

## Décompression

Durée : 1H30 - Coefficient 4

En tant que MF2, vous participez à la préparation et au déroulement d'un stage de Niveau 4 de 2 semaines qui se conclut par un examen, que votre CTR décide d'organiser au sein d'une structure de bord de mer. Il y a 8 stagiaires préparant le Niveau 4, et le directeur de stage souhaite profiter de l'occasion pour incorporer au staff quatre stagiaires pédagogiques qui pourront ainsi parfaire leur expérience.

### I - Saturation, paliers, majoration et modèle de Haldane (8 points)

Vous devez expliquer aux stagiaires MF1 les principes de calcul de la saturation et des paliers du modèle de Haldane, ainsi que celui de la majoration des MN90. Vous vous appuyerez pour cela sur l'équation simplifiée du modèle (durées multiples entiers de la période) en abordant les points suivants :

- 1) Donnez la définition du concept de majoration et illustrez-le graphiquement.
- 2) Imaginez un modèle Haldanien ignorant les plongées consécutives et dans lequel l'organisme serait réduit au seul compartiment de période 5 minutes, doté pour la circonstance d'un  $Sc = 2,4$ .  
Préalablement saturé à l'air à 1 bar, calculez sa  $TN_2$  au bout de 15 min d'immersion à 40 m.
- 3) À quelle profondeur peut-il alors être remonté sans risque ? Que représente cette profondeur ?
- 4) Combien de temps doit-il rester à cette profondeur avant de pouvoir rejoindre la surface ? Que représente cette durée ?
- 5) Il remonte immédiatement en surface à l'issue de cette durée. En accord avec votre définition, calculez sa majoration après 5 minutes en surface s'il veut redescendre à une profondeur de 20 m ?

*On considère que l'air est composé de 20% d'O<sub>2</sub> et 80% de N<sub>2</sub>.*

### II - Stage Niveau 4, tables et Nitrox (7 points)

Afin d'améliorer la sécurité, le directeur du stage propose à tous les moniteurs qualifiés de respirer systématiquement des mélanges Nitrox calculés au plus riche. Vous plongez avec un N30 en binôme avec un stagiaire MF1 qui plonge à l'air, pour une profondeur prévue de 40 m. Vous utilisez tous deux les tables fédérales MN90 et vous souhaitez faire exactement le même profil de plongée.

- 1) Pourquoi ne pas utiliser un mélange N32 ?

Vous travaillez successivement avec deux élèves N4. Premier élève : immersion à 9H00, profondeur 42 m, pas d'incident notable, vous vous retrouvez à 4 m 7 min après l'immersion. Second élève : descente 1 min plus tard jusqu'à 40 m, remontée assistée très rapide jusqu'à 10 m, où vous interrompez l'exercice que vous jugez dangereux, durée totale de prestation 5 min. Vous êtes à votre palier 2 min plus tard.

- 2) Déterminez votre décompression commune avec le stagiaire MF1.
- 3) Quelles sont vos conclusions et que pouvez-vous concrètement proposer ?

L'immersion pour la suite de l'examen est prévue 1H45 plus tard. Vous disposez de trois mélanges déjà prêts : N32, N36 et N40. Vous prévoyez 25 min de plongée à 20 m et vous ne voulez pas faire de palier.

- 4) Quels sont les mélanges que vous pouvez utiliser ? Quel mélange choisissez-vous et pourquoi ?

### III - ADD et facteurs favorisants (5 points)

A l'issue d'une plongée de formation à 40 m, un stagiaire MF1 se plaint d'une fatigue prononcée et de fourmillements aux extrémités se propageant rapidement jusqu'aux coudes et aux genoux. Il a respecté sa procédure de décompression.

- 1) Quel accident vous vient à l'esprit et pourquoi ?
- 2) Enumérez les facteurs favorisants. Exposez le mécanisme probablement mis en jeu.
- 3) A quel examen sera vraisemblablement soumis ce plongeur ? En quoi consiste-t-il ?

## Référentiel de correction et proposition de barème

### I - Saturation, paliers, majoration et modèle de Haldane (9 points)

#### Question 1 (3 points) : Concept de majoration

La majoration, c'est le temps qu'il aurait fallu passer à la profondeur de la deuxième plongée -si elle avait été unitaire- pour atteindre la même valeur de TN2 qu'après la première plongée.

*(Schéma à fournir : on doit voir la prolongation de la courbe exponentielle de début de la deuxième plongée en revenant vers la gauche jusqu'à atteindre l'axe du temps/périodes. La majo est le segment de l'axe entre ce point d'intersection et le début de la deuxième plongée)*

#### Question 2 (1 point) : Compartiment 5 min (Sc = 2,4) : calculez sa TN2 au bout de 15 min d'immersion à 40 m

Nombre de périodes =  $15 / 5 = 3$ . Le pourcentage de la formule est donc 87,5%

Pression absolue à 40 m = 5 bar

To = Saturation de surface = 0,8 bar

Tf = PpN2 à 40 m =  $5 \times 80\% = 4$  bar

TN2 =  $To + (Tf - To) \times X\%$

TN2 =  $0,8 + (4 - 0,8) \times 87,5\% = 3,6$  bar

#### Question 3 (1 point) : A quelle profondeur peut-il alors être remonté sans risque ? Que représente cette profondeur ?

$Cs = TN2 / Pabs \rightarrow Pabs = TN2 / Cs$

On ne veut pas dépasser la valeur du Csc, nous l'utilisons donc dans la formule

$Pabs = 3,6 / 2,4 = 1,5$  bar, ce qui correspond à une profondeur de **5 mètres**

**C'est la profondeur du palier.**

#### Question 4 (2 points) : Combien de temps doit-il rester à cette profondeur avant de pouvoir rejoindre la surface ? Que représente cette durée ?

Si nous utilisons la formule simplifiée, le seul moyen de calculer une durée est de retrouver le pourcentage, et à condition qu'il retombe sur l'une des valeurs connues (50%, 75% etc...), en déduire le nombre de périodes, qu'il suffit ensuite de multiplier par la durée de la période pour trouver la durée.

$TN2 = To + (Tf - To) \times X\%$

$TN2 - To = (Tf - To) \times X\%$

$X\% = (TN2 - To) / (Tf - To)$

Il nous faut donc déterminer To, Tf et TN2

La TN2 :

Pour un retour en surface (à 1 bar) sans accident, on ne veut pas dépasser la valeur du Sc (soit 2,4).

$Cs = TN2 / Pabs \rightarrow TN2 = Cs \times Pabs = 2,4 \times 1 = 2,4$

On veut donc que la TN2 soit au maximum égale à 2,4 bar au palier pour pouvoir faire surface

La To :

C'est la valeur de la TN2 à l'arrivée au palier, soit 3,6 bar

La Tf :

C'est la PpN2 au palier, soit  $1,5 \times 80\% = 1,2$  bar

Remplaçons dans la formule  $X\% = (TN2 - To) / (Tf - To)$

$X\% = (2,4 - 3,6) / (1,2 - 3,6) = 0,5$  soit 50%, il doit donc s'écouler 1 période soit **5 minutes**

**C'est la durée du palier.**

**Question 5 (2 points) : Calculez sa majoration après 5 minutes en surface s'il veut redescendre à une profondeur de 20 m ?**

Après 5 minutes en surface, 1 période s'est écoulée, X% vaut donc 50%

On peut donc calculer la nouvelle TN2 avec les valeurs suivantes :

$$T_o = TN2 \text{ à la sortie de l'eau} = S_c / P_{abs} = 2,4 / 1 = 2,4 \text{ bar}$$

$$T_f = P_{pN2} \text{ à la surface} = 0,8 \text{ bar}$$

$$TN2 = T_o + (T_f - T_o) \times X\%$$

$$TN2 = 2,4 + (0,8 - 2,4) \times 50\% = 1,6 \text{ bar}$$

La majoration, c'est le temps qu'il aurait fallu passer à 20 mètres pour atteindre cette TN2 de 1,6 bar en partant de 0,8 bar.

Là encore, pour trouver la durée il faut calculer le pourcentage :

Revenons à la formule  $X\% = (TN2 - T_o) / (T_f - T_o)$

$$TN2 = TN2 \text{ après le temps en surface} = 1,6 \text{ bar}$$

$$T_o = TN2 \text{ à saturation en surface} = 0,8 \text{ bar}$$

$$T_f = P_{pN2} \text{ à 20 mètres} = 3 \times 80\% = 2,4 \text{ bar}$$

Donc  $X\% = (1,6 - 0,8) / (2,4 - 0,8) = 0,5$  soit 50%, il faudrait donc rester 1 période à 20 mètres pour atteindre une TN2 de 1,6 bar.

La majoration est donc de **5 minutes**

## II - Stage Niveau 4, tables et Nitrox (6 points)

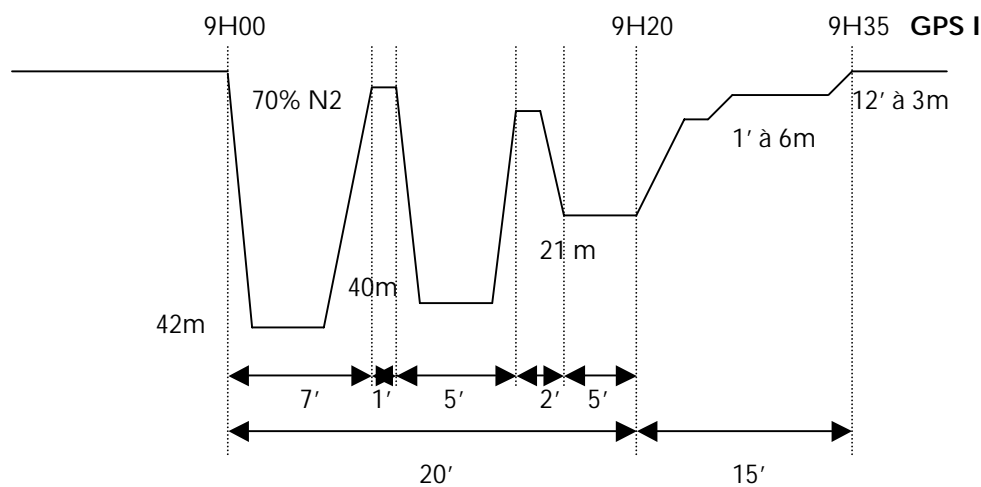
**Question 1 (1 point) : Pourquoi ne pas utiliser un mélange N32 ?**

Mélange N32 : profondeur max d'utilisation =  $1,6 / 0,32 = 5 \text{ bar}$  soit 40 m. Le mélange est utilisable à 40 m, mais le risque est trop grand en formation de dérapage de quelques mètres.

Mélange N30 : profondeur max d'utilisation =  $1,6 / 0,30 = 5,33 \text{ bar}$  soit un peu plus de 43 m, ce qu'il faut pour évaluer une stabilisation à 40 m.

**Question 2 (3 points) : Déterminez votre décompression commune avec le stagiaire MF1 :**

Stagiaire MF1 à l'air :



42 m et 20' → 1' à 6 m et 12' à 3 m

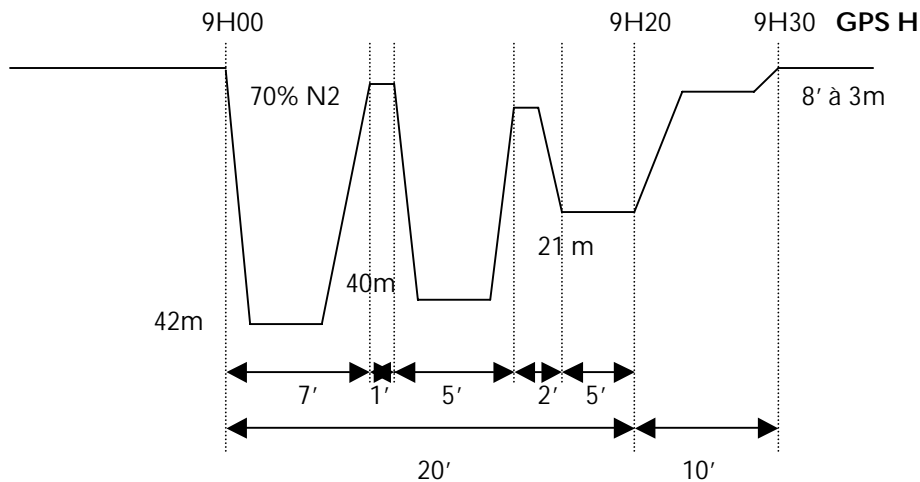
$$DTR = (21-6)/15 + 1 + 0,5 + 12 + 0,5 = 15'$$

Vous au N30 :

$$P_{Abs} = 5,2 \text{ bar}$$

$$P.A.E. = 5,2 \times 70/80 = 4,55 \text{ bar}$$

Profondeur équivalente = 35,5 m soit 38 m



38 m et 20' → 8' à 3 m

$$DTR = (21-3)/15 + 8 + 0,5 = 9,9' \text{ soit } 10'$$

Décompression commune :

Or vous souhaitez adopter exactement le même profil de plongée que le stagiaire MF1, vous devez donc rester au palier de 6 m avec lui.

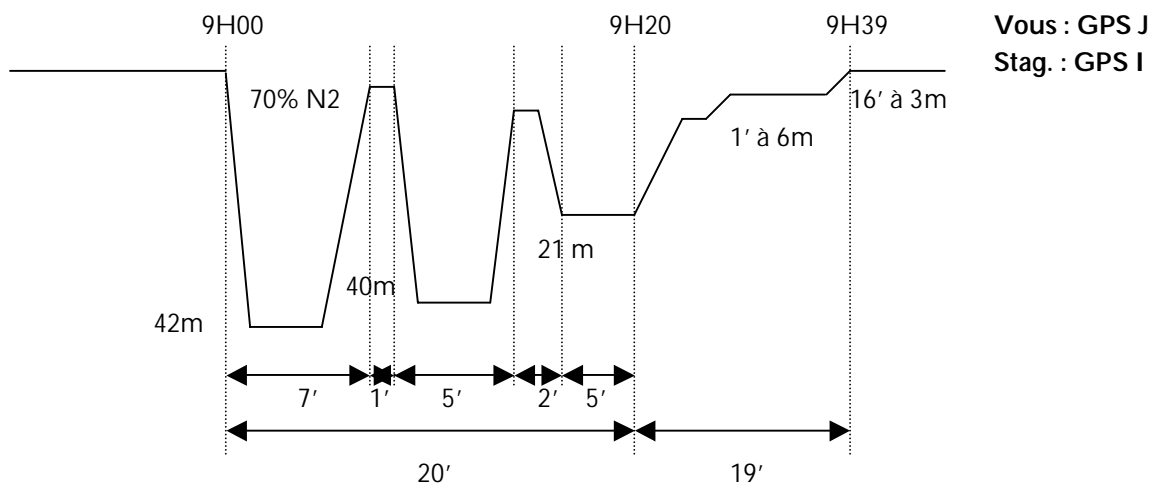
En conséquence, vous devez considérer la remontée à ce palier et ce palier à 6 m comme une remontée lente et en inclure la durée à votre temps de plongée.

Or, au bout de la remontée de 1 min jusqu'à 6 m, vos paramètres sont :

38 m et 21' → 1' à 6 m et 16' à 3 m

La minute à 6 m durant laquelle vous patientez avec le stagiaire MF1 sert donc en définitive de palier à 6 m pour votre nouvelle décompression.

Votre palier à 3 m est plus long que celui du stagiaire MF1, il reste avec vous pour l'effectuer.



42 m et 20' → 1' à 6 m et 12' à 3 m

38 m et 21' → 1' à 6 m et 16' à 3 m

$$DTR = (21-6)/15 + 1 + 0,5 + 16 + 0,5 = 19'$$

**Question 3 (1 point) : Quelles sont vos conclusions et que pouvez-vous concrètement proposer ?**

Conclusions : Cette procédure est difficile à mettre en pratique dans l'eau et peut difficilement être planifiée compte tenu de l'incertitude sur la durée et les circonstances de la plongée.

Son résultat est paradoxal, car bien que plongeant au Nitrox, vous avez plus de paliers et ressortez avec un GPS plus pénalisant que le plongeur air, alors que vous êtes manifestement moins chargé en azote.

### Propositions :

- 1) Faire les décompressions individuellement, en tolérant que pendant 1 min un plongeur soit à 6 m et l'autre à 3 m, ce qui ne pose pas vraiment de problème, d'autant moins si tout le monde effectue la décompression accroché à un parachute.
- 2) Caler la décompression Nitrox sur la décompression air. On est sûr d'être dans la sécurité.
- 3) Plonger avec des ordinateurs qui tiennent si possible compte des remontées rapides, ou en adoptant la procédure de mi-profondeur à défaut d'autre chose s'ils n'en tiennent pas compte.

### **Question 4 (1 point) : Quels sont les mélanges que vous pouvez utiliser ? Quel mélange utilisez-vous et pourquoi ?**

GPS J et IS de 1H30 → TN2 = 1,06 bar

25' de plongée prévues à 20 m :

| Mélange | Prof. équivalente | Majoration | Durée utilisée pour entrer dans la table | Palier à 3 m |
|---------|-------------------|------------|--|--------------|
| N32     | 15,5 soit 18 m    | 36'        | 61'                                      | 8'           |
| N36     | 14 soit 15 m      | 44'        | 69'                                      | -            |
| N40     | 12,5 soit 15 m    | 44'        | 69'                                      | -            |

Il est donc possible d'utiliser du N36 ou du N40.

Le choix du N40 est le plus judicieux car c'est le plus riche (donc celui qui offre a priori le meilleur niveau de sécurité) et qu'il est utilisable jusqu'à  $1,6 / 0,4 = 4$  bar soit 30 m, donc aucun dérapage possible pouvant conduire à un risque d'hyperoxie.

### **III - ADD et facteurs favorisants (5 points)**

#### **Question 1 (1 point) : Quel accident vous vient à l'esprit et pourquoi ?**

Les symptômes font penser à un accident neurologique haut ou cérébral, provoqué par le passage de bulles dans le circuit artériel.

En outre, nous sommes en cours de stage Niveau 4, donc la saturation générale est vraisemblablement importante. De plus il s'agit d'une plongée de formation à 40 mètres, avec yoyos probables et vitesses excessives possibles. Or la charge en azote, les plongées de type yoyo et la vitesse excessive sont des facteurs favorisant des ADD et plus particulièrement de ceux-ci.

#### **Question 2 (3 points) : Enumérez-en les facteurs favorisants. Développez le mécanisme mis en jeu lorsque c'est possible.**

##### Facteurs favorisants :

Concernant les neurologiques hauts (et les ADD de l'oreille interne), les facteurs suivants doivent particulièrement être considérés comme favorisants :

- Plongées longues / profondes
- Plongées successives
- Yoyos
- Vitesse de remontée excessive
- Toute hyperpression intra-thoracique provoquée par exemple par :
  - o Une manœuvre de Valsalva à la remontée ou au palier,
  - o La toux,
  - o Tout effort en blocage ventilatoire : remontée à l'échelle équipé, hissage du bloc à bord du bateau, remontée de l'ancre, gonflage du gilet à la bouche, etc...
- Présence d'un FOP (Foramen Ovale Perméable)

### Mécanismes :

- Ouverture des shunts pulmonaires :

En cas d'arrivée de bulles en nombre important à l'entrée du filtre pulmonaire, la pression qui augmente peut provoquer l'ouverture de « dérivations » dans les circuits capillaires, particulièrement lors d'efforts qui créent une hyperpression intra-thoracique. Ces dérivations ne passent pas au contact d'alvéoles pulmonaires et ne permettent donc pas l'élimination des bulles d'azote, qui repassent dans la circulation artérielle.

On constate que les bulles sont particulièrement nombreuses suite à des plongées profondes (> 30 m) relativement longues et particulièrement sur les successives (d'autant plus que l'intervalle est court) et les yoyos (facteur d'autant plus important que les Valsalva à la redescente favorisent le passage des bulles dans la circulation artérielle).

- Ouverture d'un FOP éventuel :

Le foramen ovale est une communication entre les oreillettes droite et gauche qui permet de court-circuiter la petite circulation du fœtus dont l'alimentation en sang oxygéné est assurée par la circulation maternelle. Lors de la naissance, le gradient de pression s'inverse et ferme une sorte de clapet qui obture le foramen, avec lequel il se solidarise avec le temps. Dans certains cas, cette obturation est imparfaite, et le foramen reste perméable (25 à 30% de la population).

En cas d'effort, particulièrement ceux qui créent une hyperpression intra-thoracique, la pression dans l'oreillette droite devient supérieure à celle de l'oreillette gauche et peut favoriser l'ouverture du foramen. Le sang veineux passe alors directement dans la circulation artérielle, et avec lui les bulles d'azote qui n'ont pas été éliminées par le filtre pulmonaire.

Cette ouverture est d'autant plus facilitée que l'immersion réduit voire annule le gradient de pression entre les deux oreillettes suite à la modification du retour veineux, qui est favorisé vers le cœur droit.

Ceci dit, si le FOP est indéniablement un facteur favorisant, il n'y a pas de corrélation systématique entre la présence d'un FOP et la survenue d'un accident.

- Quelle que soit la raison, les bulles qui repassent dans la circulation artérielle peuvent remonter par les carotides vers la tête, provoquant préférentiellement des accidents cérébraux ou vestibulaires.

### **Question 3 (1 point) : A quel examen sera vraisemblablement soumis ce plongeur ? En quoi consiste-t-il ?**

Il sera vraisemblablement soumis à un examen permettant de détecter un FOP.

Aujourd'hui, cette détection est opérée par écho-doppler trans-cranien (ETC), qui est un examen non invasif. Auparavant était pratiquée une échographie trans-oesophagienne (ETO), nécessitant l'introduction d'une sonde dans l'œsophage afin de la rapprocher le plus possible du cœur.

A noter que le résultat positif avec l'ETC donne lieu à une vérification par ETO.

Quoi qu'il en soit, cet examen consiste à injecter divers types d'émulsions de bulles dans la circulation, et à en détecter le passage éventuel au niveau de la circulation artérielle, soit directement au niveau du cœur (ETO), soit au niveau d'une artère de l'encéphale (ETC).