



Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins
24, Quai de Rive Neuve -13007 MARSEILLE

FFESSM

Commission Nationale de Plongée Souterraine

Recommandations Etablies par la CNPS pour les Plongées Complexes

Version 3

*Etablie par la CNPS réunie le 16 octobre 2005
Approuvée par le CDN réuni les 4 et 5 février 2006*

Table des matières

Préambule.....	5
Conventions.....	5
1. Composition de l'air.....	5
2. Facteur de compressibilité.....	5
3. Bouteille vide.....	5
4. Pression atmosphérique.....	5
5. Pression partielle d'oxygène.....	5
6. Pression partielle d'azote.....	5
7. Pourcentage %.....	5
1 Organisation d'une plongée complexe.....	6
1.1 Planification de la plongée.....	6
1.2 Gestion en surface de la plongée.....	6
1.3 Sécurisation du siphon.....	6
1.3.1 Equipement du siphon.....	6
1.3.2 Ligne de sécurité.....	7
1.3.3 Sécurité pour tous en plongée et lors des parcours exondés.....	7
2 Les différents gaz et leurs zones d'utilisation.....	7
2.1 Définitions.....	7
2.2 Limites d'utilisation.....	7
2.2.1 PPO ₂	7
2.2.2 PPN ₂	8
2.2.3 Profondeur plancher.....	9
2.2.4 Oxygène.....	10
2.2.5 Trimix ou Ternaire.....	10
2.2.6 Trimix Hyperoxique ou Surox Trimix.....	10
2.2.7 Nitrox.....	11
2.2.8 Hélicair.....	11
2.2.9 HélioX.....	11
2.2.10 Argon.....	11
2.2.11 Air.....	11
3 Confection des mélanges.....	12
3.1 Nitrox.....	12
3.2 Hélicair.....	13
3.3 Trimix et Trimix Hyperoxique.....	13
3.4 Recyclage.....	14
3.4.1 Recyclage du Nitrox.....	14
3.4.2 Recyclage de l'Hélicair.....	15
3.4.3 Recyclage des Trimix et des Trimix Hyperoxique.....	15
3.5 Dilution.....	15
3.6 Transvasement par équilibrage.....	15

4	Le matériel spécifique.....	15
4.1	Oxygène.....	15
4.2	Surox (dont les Nitrox).....	15
4.3	Héliair.....	16
4.4	Trimix.....	16
5	L'analyse.....	16
6	Précision des mélanges.....	17
7	Marquage.....	17
7.1	Air.....	17
7.2	Argon.....	17
7.3	Héliair.....	17
7.4	Nitrox.....	18
7.5	Oxygène.....	18
7.6	Trimix.....	18
7.7	Trimix Hyperoxique.....	18
8	Procédures de décompression.....	19
8.1	Plongée à l'air avec décompression à l'oxygène.....	19
8.2	Plongée au nitrox.....	19
8.3	Plongée à l'héliair.....	19
8.4	Plongée au trimix.....	19
8.5	Gestion de la décompression d'une plongée aux mélanges.....	19
9	Rôles et Responsabilités.....	20
9.1	Le Plongeur.....	20
9.2	Le responsable de plongée ou de projet.....	20
9.3	Le Directeur de Plongée.....	20
10	Techniques diverses.....	21
10.1	Les propulseurs.....	21
10.2	L'équilibrage.....	21
10.3	Cloche de décompression.....	22
10.4	Les recycleurs.....	23

Ces présentes recommandations pour les plongées complexes en plongée souterraine remplacent et annulent tous les autres documents antérieurs, en la matière, établis par la CNPS, seule ou en association.

Préambule

Il est bien entendu qu'il s'agit ici de simples recommandations et non de normes dont l'application plus ou moins stricte dépend du contexte complexe qui englobe divers facteurs aggravants ou favorables parmi lesquels l'environnement de ces plongées, leur but, les capacités et l'expérience des plongeurs.

Ces recommandations concernent toutes les plongées souterraines dites plongées complexes, à savoir les plongées en scaphandre autonome nécessitant au moins l'un des éléments suivants :

- *franchissement de siphons multiples*
- *emploi de gaz autres que l'air (ternaires, nitrox, oxygène, etc.),*
- *utilisation de bouteille relais ou de scooters ou de cloches de décompression, etc.*

La pratique des plongées complexes nécessite une solide expérience préalable de la plongée souterraine.

La plongée complexe ne diffère pas de la plongée souterraine en ce qui concerne les règles de sécurité notamment en terme d'autonomie et de redondance.

Conventions

1. On admet la composition de l'air suivante : 21% d'oxygène + 79% d'azote, cette composition étant constante, on dit que l'air est «1» gaz.
2. La variation du facteur de compressibilité d'un gaz dépend de la pression et de la nature du gaz. Elle est faible pour l'azote et l'oxygène pour les pressions d'utilisation ordinaire en plongée (200 bars). Elle est beaucoup plus marquée pour l'hélium. Toutefois le degré de précision de nos mélanges admet aisément de négliger cette variation. Pour simplifier, nous prendrons «1» comme facteur de compressibilité dans tous nos calculs.
3. On admet qu'une bouteille est vide quand elle est à pression atmosphérique.
4. L'unité de pression utilisée est le bar. Pression atmosphérique = 1 atmosphère = 1 bar = 10 mètres d'eau.
5. Dans ce texte, par commodité, on appelle PPO₂, la pression partielle d'oxygène inspirée par le plongeur.
6. De même, on appelle PPN₂, la pression partielle d'azote inspirée par le plongeur.
7. Dans les formules de calcul, le sigle « % » suivi du symbole du gaz, prend la valeur du pourcentage de ce gaz dans le mélange concerné, divisé par cent.
Exemple : Dans une formule de calcul concernant un nitrox à 40% d'oxygène ; « %O₂ » signifie « 40/100 ».

1 Organisation d'une plongée complexe

1.1 Planification de la plongée

Il est recommandé de planifier une plongée complexe à l'aide d'un document écrit de forme libre, qui synthétise toutes les données techniques concernant les immersions se rapportant à une plongée avec notamment les précisions suivantes :

- Détermination précise du profil de la plongée, longueur, durée, profondeur, température...
- Choix des gaz à utiliser et calcul des consommations en tenant compte de la redondance (y compris pour la décompression) et des aléas d'une plongée.
- Choix d'une procédure de décompression.
- Détermination du matériel à utiliser, en particulier nature, nombre et positionnement des blocs, cloches, scooters, argon, vêtement chauffant, moyens de communication plongeur-surface...
- Organisation de l'assistance avec la détermination précise du rôle des plongeurs d'assistance et la planification de leurs interventions.
- Analyse des risques avec l'élaboration des solutions de secours en cas d'accident, de dérive du profil ou tout autre incident. De cette analyse dépend la faisabilité d'une plongée.
- Elaboration d'un plan de sécurité pour traiter dans l'urgence un accident de décompression, moyen de communication (téléphone portable ou autre), kit d'oxygénothérapie, adresses et téléphones des caissons, des médecins hyperbares, des responsables des secours, éventuellement mise en alerte des caissons les plus proches, présence d'un médecin, caisson mobile...
- Détermination des dates de plongée.

1.2 Gestion en surface de la plongée

Le rôle et la responsabilité de chaque participant sont clairement définis au préalable.

Une main courante enregistre toutes les informations concernant les heures de départ, les gaz utilisés, les objectifs, les heures de retour, etc.

Il faut rappeler que les plongées de soutien ou d'équipement, effectuées avec des mélanges gazeux sont elles-mêmes des plongées complexes.

Les moyens de communication entre plongeurs sont vérifiés avant leur immersion (minimum ardoise immergeable)

1.3 Sécurisation du siphon

1.3.1 Equipement du siphon

Dans une opération de plongée complexe, le siphon est souvent amené à être très fréquenté et parfois dans des conditions difficiles :

- Nombreuses charges sur un plongeur,
- Visibilité réduite...

Il peut être indispensable de refaire intégralement l'équipement (nettoyage des anciens fils vétustes, équipement en câble, voire en corde pour les tronçons verticaux, etc.) afin de sécuriser la cavité.

1.3.2 Ligne de sécurité

Dès le début d'une campagne de plongées complexes il est souhaitable d'installer une ligne de décompression de sécurité qui doit être vérifiée tous les jours de l'opération. Cette ligne peut offrir la redondance aux bouteilles de décompression sous réserve qu'il n'y ait qu'un seul plongeur à la fois susceptible d'en avoir besoin. La ligne de sécurité ne doit être déséquipée que lors de la dernière plongée de la campagne.

1.3.3 Sécurité pour tous en plongée et lors des parcours exondés

Dans le cas d'une campagne d'exploration, la sécurité ne doit pas être exclusivement centrée sur les plongeurs de pointe, mais étendue à toute l'équipe avec des gaz de décompression adaptés et redondants pour tous les plongeurs, un balisage des passages clés afin que même quelqu'un ignorant la cavité puisse sans encombre se repérer et retrouver la sortie

2 Les différents gaz et leurs zones d'utilisation

2.1 Définitions

Trimix : on appelle « trimix » ou « ternaire » un mélange gazeux composé d'hélium, d'oxygène et d'azote. Par extension on appelle aussi « trimix » un mélange composé d'hélium et d'air (héliair) ou un mélange composé d'hélium, d'oxygène et d'air.

Surox : on appelle « surox » tout mélange gazeux contenant plus de 21 % d'oxygène (un nitrox est un surox et un trimix peut être un surox).

Trimix Hyperoxique ou Surox Trimix : on appelle Trimix Hyperoxique tout trimix contenant plus de 21 % d'oxygène.

Nitrox : on appelle « nitrox » tout mélange gazeux composé d'azote et d'oxygène dont le pourcentage d'oxygène est supérieur à 21%. Par extension on appelle aussi « nitrox » un mélange d'air enrichi en oxygène.

Héliair : on appelle « héliair » un mélange composé d'air et d'hélium.

Héliox : on appelle « héliox » un mélange gazeux composé d'hélium et d'oxygène.

2.2 Conditions et Limites d'utilisation des différents gaz

2.2.1 Généralités restrictives concernant la Pression partielle d'oxygène inspirée par le plongeur

La valeur de la PPO₂ minimale est limitée à 0,17 bar. Toutefois, il est déconseillé d'inspirer une PPO₂ inférieure à 0,21 bar.

La valeur de la PPO₂ maximale, en immersion est limitée à 1,6 bar en palier et à 1,4 bar en progression. Certaines plongées induisant de longs parcours et des efforts en respirant des mélanges peuvent amener le plongeur à diminuer encore la PPO₂ m en progression.

En fonction de son pourcentage d'oxygène, à chaque mélange correspond une profondeur maximale (seuil d'hyperoxie) et, si le pourcentage d'oxygène est inférieur à 17%, une profondeur minimale (seuil d'hypoxie) qui déterminent sa zone d'utilisation.

Calcul, en mètres, de MaxPro(PPO₂) la profondeur maximale d'utilisation d'un mélange en progression en fonction de la PPO₂ (pour une PPO₂ maximale à 1,4 bar)

$$\text{MaxPro (PPO}_2) = \left(\frac{1,4}{\% \text{ O}_2} - 1 \right) \times 10$$

Calcul, en mètres, de MaxPal (PPO₂), la profondeur maximale d'utilisation d'un mélange au palier en fonction de la PPO₂ (pour une PPO₂ maximale à 1,6 bar)

$$\text{MaxPal (PPO}_2) = \left(\frac{1,6}{\% \text{ O}_2} - 1 \right) \times 10$$

Calcul, en mètres, de Min, la profondeur minimale d'utilisation d'un mélange dont le pourcentage d'oxygène est inférieur à 17%

$$\text{Min} = \left(\frac{0,17}{\% \text{ O}_2} - 1 \right) \times 10$$

Exemple :

Pour un mélange trimix à 10% d'oxygène,

La profondeur maximale en progression en fonction de la PPO₂ est :

$$\text{MaxPro(PPO}_2) = (1,4/10\% - 1) \times 10 = 130 \text{ mètres.}$$

La profondeur minimale en fonction de la PPO₂ est :

$$\text{Min} = (0,17/10\% - 1) \times 10 = 7 \text{ mètres.}$$

Pour un nitrox à 32 % d'oxygène : MaxPro(PPO₂) = 33,7 mètres ; MaxPal(PPO₂) = 38,6 mètres

La notion de dose d'O₂ toxique liée à la durée n'est pas prise en compte dans le cadre de nos plongées au vu des limites pratiques des tables de décompression.

Il est rappelé qu'aucun calcul de dose toxique n'a été introduit dans le décret de 1992 et que cette même notion de dose est très controversée dans la communauté scientifique internationale.

2.2.2 Généralités restrictives concernant la Pression partielle d'azote inspirée par le plongeur

En fonction de son pourcentage d'azote à chaque mélange correspond une profondeur maximale à ne pas dépasser (seuil de danger de la narcose à l'azote)

Calcul, en mètres, de $MaxPro(PPN_2)$ la profondeur maximale d'utilisation d'un mélange en fonction de la PPN_2 (pour une PPN_2 maximale de 5 bars, profondeur équivalente à l'air : 53 mètres)

$$MaxPro(PPN_2) = \left(\frac{5}{\% N_2} - 1 \right) \times 10$$

Il est conseillé de prévoir que la valeur de la PPN_2 à la profondeur maximale envisagée se situe entre 3 et 3,5 bars (profondeur équivalente à l'air, entre 28 et 34 mètres).

Calcul, en mètres, de $ProfRecom(PPN_2)$ la profondeur maximale recommandée en fonction de la PPN_2 (pour une PPN_2 maximale à 3 bars, profondeur équivalente à l'air : 28 mètres)

$$ProfRecom(PPN_2) = \left(\frac{3}{\% N_2} - 1 \right) \times 10$$

Exemple :

Pour un mélange trimix contenant 18% d'O₂, 42 % d'He et 40 % d'N₂.

La profondeur maximale en fonction de la PPN_2 est :

$$MaxPro(PPN_2) = (5/40\% - 1) \times 10 = 115 \text{ mètres.}$$

La profondeur maximale recommandée en fonction de la PPN_2 est :

$$ProfRecom(PPN_2) = (3/40\% - 1) \times 10 = 65 \text{ mètres.}$$

2.2.3 Délimitation de la profondeur plancher d'un gaz en fonction de la PPO_2 et de la PPN_2

La profondeur plancher d'un mélange (Plancher) est définie :

Pour la progression,

Soit par sa $MaxPro(PPO_2)$, soit par sa $MaxPro(PPN_2)$, en prenant la valeur la plus petite des deux.

Pour les paliers,

Soit par sa $MaxPal(PPO_2)$, soit par sa $MaxPro(PPN_2)$, en prenant la valeur la plus petite des deux.

Exemple :

Pour un mélange trimix contenant 18% d'O₂, 42 % d'He et 40 % d'N₂.

La profondeur maximale en fonction de la PPN_2 est :

$$MaxPro(PPN_2) = (5/40\% - 1) \times 10 = 115 \text{ mètres.}$$

La profondeur maximale en progression en fonction de la PPO_2 est :

$$MaxPro(PPO_2) = (1,4/118\% - 1) \times 10 = 67,8 \text{ mètres.}$$

$$\text{Plancher} = 67,8 \text{ mètres}$$

2.2.4 Oxygène

L'inspiration de l'oxygène pur est limitée à 6 mètres en pleine eau.

2.2.5 Trimix

La plongée au trimix est recommandée dès que le plongeur envisage de dépasser la zone des 50 mètres. Suivant la nature de la plongée, longue exposition, travaux particuliers, eaux froides, etc. il est recommandé de descendre ce seuil à 40 mètres. La plongée est limitée en temps et profondeur par les conditions de sécurité.

Compte tenu des analyses de risque incluant les procédures de décompression, la résistance au froid, les risques liés au Syndrome Nerveux des Hautes Pressions (SNHP), la fiabilité du matériel et la «pression du temps» (autonomie et palier), il semble actuellement raisonnable de limiter les plongées souterraines à la zone des 150 mètres de profondeur.

Il est conseillé de prévoir que la valeur de la PPO₂ à la profondeur maximale envisagée se situe entre 1,2 et 1,4 bar.

Il est préconisé de se rapprocher au mieux de ces valeurs, en tenant compte, malgré tout, d'une légère erreur d'analyse ou de lecture et du risque de dérive de quelques mètres au-delà de la profondeur maximale autorisée pendant la plongée.

De même, il est conseillé de prévoir que la valeur de la PPN₂ à la profondeur maximale envisagée se situe entre 3 et 3,5 bars (profondeur équivalente à l'air, entre 28 et 34 mètres).

2.2.6 Trimix Hyperoxique

Le trimix hyperoxygène est utilisé dans les plongées complexes pour limiter les effets indésirables de l'azote, par exemple :

- La narcose et le risque d'essoufflement dus à un pique d'azote lors des changements de gaz pendant la remontée,
- La reprise de la saturation de l'azote.

Les trimix hyperoxiques sont essentiellement utilisés pour la décompression, mais ils peuvent également être utilisés pour la progression le temps de passer au mélange fond.

Sur des zones peu profondes, ces mélanges pourraient également se substituer aux Nitrox pour des plongées très longues (> à plusieurs heures), mais ce type de profil n'est pas courant. Dans ce cas de figure où on se rapproche de la saturation, l'ajout d'hélium accélérerait la décompression.

Composition des trimix hyperoxiques utilisés en décompression :

Oxygène :

Comme ce sont des mélanges de décompression, la teneur en oxygène pourra être de 1,6b calculé à la profondeur maxi d'utilisation (ex : pour un trimix hyperoxique utilisable entre -40 et -20 m, on prendra 1,6b à -40, soit 30% d'oxygène en arrondissant)

Si, lors de la plongée, le plongeur a déjà ingurgité une grosse dose d'oxygène, on pourra ramener le taux du mélange à 1,4b, voir à 1,2b (surtout dans la zone profonde > 40m)

Azote :

On essaiera de minimiser l'écart entre le pourcentage d'azote contenu dans le mélange précédent et celui du mélange suivant.

Exemple : Imaginons une plongée à -100 m avec un Trimix 10/65 (soit 25% d'azote) et un premier mélange de décompression qui serait pris à -60m.

Composition de ce Trimix hyperoxygène :

Oxygène : PPO₂ = 1,6 b à - 60 m ce qui donne 23 % d'O₂

Azote : on tente de conserver 25 % comme dans le mélange précédent.

Hélium : 100% - (23% d'O₂ + 25% de N₂) = 52 %

On pourra donc utiliser un Trimix hyperoxygène 23/52, mais on pourrait également s'autoriser une légère augmentation du taux de N₂ en prenant un Trimix hyperoxygène 23/50 (soit 27% d'azote)

Remarque :

Lors de la confection de ces Trimix hyperoxygène, pour chaque gaz, nous ne sommes pas à 1 ou 2% près. Les gains ou les pertes en temps de décompression, la précision de l'analyse ne justifie pas qu'on travaille au % près. Il est préférable d'arrondir, ce qui facilite la logistique et permet une standardisation des gaz dans la majeure partie des plongées.

2.2.7 Nitrox

En progression le nitrox ne peut-être utilisé que pour la partie déjà connue du siphon; son utilisation en exploration n'est pas souhaitable. En effet, les variations de profondeur pourraient, dans le meilleur des cas, stopper prématurément l'exploration, mais surtout pourraient inciter le plongeur à dépasser sciemment ou inconsciemment les limites admissibles de PPO₂.

Sa zone d'utilisation est comprise entre la surface et sa profondeur maximale.

Il est conseillé de prévoir que la valeur de la PPO₂ à la profondeur maximale envisagée soit dans la fourchette de 1,2 à 1,4 bar pour la progression et de 1,4 à 1,6 bar au palier.

Il est préconisé de se rapprocher au mieux de ces valeurs, en tenant compte, malgré tout, d'une légère erreur d'analyse ou de lecture et du risque de dérive de quelques mètres au-delà de la profondeur maximale autorisée pendant la plongée.

2.2.8 Héliair

Une procédure de décompression à l'air est tolérée lors d'une plongée à l'héliair jusqu'à 10 % d'hélium, dans la limite des 50 mètres et sous réserve d'utiliser de l'oxygène à partir de 6 mètres, en lieu et place de l'air et si possible d'utiliser un nitrox pour le retour et les paliers profonds.

Au-delà de 10 % d'hélium, toute plongée à l'héliair doit être considérée et gérée comme une plongée trimix.

2.2.9 HélioX

Pour la plongée loisir l'utilisation de ce gaz binaire a été jusqu'à ce jour rarissime, entre autres, à cause de son coût élevé et des problèmes liés au froid qu'il engendre. Pourtant c'est un gaz largement utilisé en plongée professionnelle. Lors des plongées à saturation son emploi peut être d'une grande utilité. Toutefois son utilisation très pointue d'une part et très limitée d'autre part fait que les procédures de plongée à l'hélioX sortent du cadre de ces recommandations à ce jour .

2.2.10 Argon

Gaz non respirable utilisé uniquement pour équilibrer les vêtements étanches.

2.2.11 Air

L'utilisation de l'air dans les plongées complexes doit obéir aux critères de restriction concernant la Pression partielle d'azote inspirée par le plongeur

3 Confection des mélanges

La meilleure solution serait à n'en point douter l'achat de gaz synthétiques, mais la multitude de gaz différents à mettre en œuvre et la variété des blocs à utiliser rendent cette solution utopique.

D'autres solutions comme le filtre à membrane et le mélangeur

Sous réserve d'une sérieuse formation et d'une grande rigueur le plongeur souterrain peut réaliser ses mélanges sous son entière responsabilité.

De nombreuses méthodes de fabrication existent tant au niveau du choix des matières premières que du choix des systèmes de mélange des différents gaz.

Les mélanges obtenus avec des gaz « purs » du commerce ont l'avantage d'éliminer tout apport de gaz rares, d'humidité de l'air et de pollution éventuelle due au compresseur (vapeur d'huile).

L'idéal étant d'utiliser les gaz du commerce et un compresseur à membranes ou un surpresseur.

Pourtant, les méthodes développées dans le cadre de ces recommandations sont celles les plus utilisées par les plongeurs souterrains.

Il est rappelé que la manipulation de l'oxygène pur peut s'avérer dangereuse : elle nécessite un matériel adapté et une grande rigueur d'exécution.

Marquage intermédiaire : Attention, à chaque étape du mélange, il est indispensable de noter sur la bouteille la nature et la pression des gaz introduits, à l'exclusion de tout autre marquage avant l'analyse définitive.

3.1 Nitrox

Il existe plusieurs méthodes de fabrication du Nitrox, ici, seul le cas de l'air enrichi en oxygène est développé, méthode la plus usitée à ce jour, en plongée souterraine, même si rien n'interdit l'emploi des mélangeurs et l'utilisation des filtres à membranes.

Ne pas oublier le marquage intermédiaire

1. Calcul de $P^i O_2$, en bars, la pression initiale d'oxygène à mettre dans une bouteille de plongée vide en fonction du pourcentage d' O_2 désiré dans le nitrox et de la pression totale finale de la bouteille (P^f).

$$P^i O_2 = \frac{P^f \times (\% O_2 - 0,21)}{0,79}$$

2. Commencer par mettre l' O_2 par équilibrage au moyen d'une lyre de transfert adaptée et compatible oxygène. La bouteille à équilibrer doit être impérativement à pression atmosphérique. Le laminage se fait depuis la bouteille d' O_2 très lentement. Une fois la pression d' O_2 désirée atteinte, il est indispensable de laisser refroidir la bouteille de plongée jusqu'à ce qu'elle retrouve la température ambiante avant de contrôler sa pression. Le cas échéant, il faut alors, effectuer un réajustement de la pression par équilibrage.
3. Monter la bouteille de plongée en pression par équilibrage à partir d'une bouteille d'air tampon spécialement réservée à cet effet. Cette bouteille est dégraissée et régulièrement vérifiée, elle est gonflée avec de l'air suffisamment filtré pour être compatible oxygène.
4. Compléter à l'air la bouteille de plongée à la pression finale désirée par le biais d'un compresseur muni d'un filtre supplémentaire pour garantir un air sans traces de graisse.
5. Attendre que le mélange soit stabilisé (12 heures conseillé).
6. Analyser le mélange et noter les résultats sur la bouteille.

3.2 Hélicair

L'hélicair est un trimix sans rajout d'oxygène.

Ne pas oublier le marquage intermédiaire

1. Calcul de la pression d'hélium (PHe), en bars, à mettre dans une bouteille de plongée vide en fonction du pourcentage d'hélium désiré dans l'hélicair et de la pression totale finale de la bouteille (P^f).

$$P_{He} = P^f \times \% He$$

2. Commencer par mettre de l'hélium par équilibrage au moyen d'une lyre de transfert adaptée. La bouteille à équilibrer doit être impérativement à pression atmosphérique. Une fois la pression d'hélium désirée atteinte, il est indispensable de laisser refroidir la bouteille de plongée jusqu'à ce qu'elle retrouve la température ambiante avant de contrôler sa pression. Le cas échéant, il faudra alors, effectuer un réajustement de la pression par équilibrage.
3. Compléter à l'air la bouteille de plongée à la pression finale désirée par le biais d'un compresseur.
4. Attendre que le mélange soit stabilisé (12 heures conseillé).
5. Analyser le mélange et noter les résultats sur la bouteille.

3.3 Trimix et Trimix Hyperoxyque

Il existe plusieurs méthodes pour fabriquer du Trimix, ici, nous traiterons seulement de la méthode la plus usitée en plongée souterraine : à savoir transvasement d'oxygène, d'hélium et enfin complément avec l'air du compresseur. Mélangeur

Calcul de la pression d'O₂ à mettre dans une bouteille de plongée vide en fonction des pourcentages d'O₂ et d'He du mélange et de la pression totale finale de la bouteille (P^f).

$$\text{Rappel : } \% O_2 + \% N_2 + \% He = 100 \%$$

On utilise les formules suivantes (en bars) :

$$\text{Pression d'hélium (PHe)} \quad P_{He} = P^f \times \% He$$

$$\text{Pression d'azote (PN}_2\text{)} \quad P_{N_2} = P^f \times \% N_2$$

Pression d'air à rajouter (P^{air})

$$P^{air} = \frac{P_{N_2}}{0,79}$$

Calcul de P^{iO_2} , en bars, la pression initiale d'oxygène à mettre dans une bouteille vide :

$$P^{iO_2} = P^f - (P_{He} + P^{air})$$

Ne pas oublier le marquage intermédiaire

1. Commencer obligatoirement par mettre la pression initiale d'O₂ par équilibrage au moyen d'une lyre de transfert adaptée et compatible avec l'oxygène. La bouteille à équilibrer doit être impérativement à pression atmosphérique. Le laminage se fait depuis la bouteille d'O₂ très lentement. L'emploi d'un manomètre O₂ précis et de lecture facile est indispensable. Une fois la pression d'O₂ désirée atteinte, il est indispensable de laisser refroidir la bouteille de plongée jusqu'à ce qu'elle retrouve la température ambiante avant de contrôler sa pression. Le cas échéant, il faut, alors, effectuer un réajustement de la pression par équilibrage.
2. Puis monter la bouteille de plongée en pression par équilibrage avec une bouteille d'hélium. Le laminage se fait lentement depuis la bouteille d'hélium. Dans le cas où la lyre de transfert hélium n'est pas munie d'un robinet de laminage et sous réserve que la lyre possède un clapet anti-retour, il est admis que ce soit le robinet de la bouteille de plongée qui régule la vitesse d'équilibrage. Une fois la pression d'hélium désirée atteinte (soit Pression initiale d'O₂ + Pression d'Hélium), il est indispensable de laisser refroidir la bouteille de plongée jusqu'à ce qu'elle retrouve la température ambiante avant de contrôler sa pression. Le cas échéant, il faut alors, effectuer un réajustement de la pression par équilibrage.
3. Compléter à l'air la bouteille de plongée à la pression finale désirée par le biais d'un compresseur.
4. Attendre que le mélange soit stabilisé (12 heures conseillé).

5. Analyser le mélange et noter les résultats sur la bouteille.

Pour l'hélium et pour l'hélium seulement, quand la pression de la bouteille d'hélium est inférieure à la pression d'hélium nécessaire dans la bouteille de plongée, il est possible de vider la bouteille d'hélium par le biais du compresseur.

Pour cela, utiliser un système de transvasement pour récupérer l'hélium détendu, lui-même branché sur la prise d'air du compresseur.

Attention au-delà de 150 bars le coefficient de compressibilité de l'hélium diffère sensiblement, (200 bars dans une B50 ne donne pas 10 m³ mais seulement 9)

Pour une sécurité accrue en ce qui concerne la précision du mélange, il est donc recommandé d'inclure une étape intermédiaire dans cette procédure : l'analyse du mélange stabilisé lorsque la bouteille ne contient que deux gaz : l'oxygène et l'hélium.

En cas d'erreur, il est alors possible de rectifier ce mélange intermédiaire souvent en rajoutant de l'hélium.

3.4 Recyclage

C'est le rajout de l'un, de deux ou de trois de ces gaz : Hélium, Oxygène, air, dans une bouteille de gaz Nitrox, Surox ou Trimix dont la composition est clairement établie.

3.4.1 Recyclage du Nitrox

Le faible coût de l'oxygène et le danger inhérent à sa manipulation sous haute pression ne nécessitent pas un recyclage systématique des Nitrox pour récupérer les fonds de bouteilles. Toutefois il est admis qu'un mélange Nitrox soit recyclé sous réserve d'une longue expérience et d'une parfaite dextérité en la matière.

Les calculs étant assez complexes, il est recommandé de les effectuer dans de bonnes conditions environnementales, évitez le calcul mental et le coin de la nappe, et préférez la routine sur une calculatrice programmable, un tableur genre Excel ou à l'aide d'un logiciel approprié.

Version 3,

Etablie par la CNPS réunie le 16 octobre 2005

Approuvée par le CDN réuni les 4 et 5 février 2006

3.4.2 Recyclage de l'héliair

Pour l'héliair ce recyclage peut se faire indéfiniment puisque nous n'avons que deux gaz : de l'hélium et de l'air.

3.4.3 Recyclage des Trimix et des Trimix hyperoxique

Dans le cas où vous ne disposez pas d'un analyseur d'hélium, votre incapacité à analyser le taux d'hélium ou d'azote rend l'opération aléatoire. A titre exceptionnel, et sous réserve d'une longue expérience et d'une parfaite dextérité en la matière, il est admis qu'un mélange trimix subisse un et un seul recyclage. Ensuite la bouteille est utilisée telle quelle ou est vidée.

Par contre si vous disposez d'un analyseur d'hélium (en plus de l'analyseur d'oxygène) rien n'empêche, si ce n'est la complexité des manipulations, de recycler vos trimix.

3.5 Dilution

C'est l'ajout d'air dans une bouteille de gaz nitrox ou trimix dont la composition est clairement établie.

- Nitrox : l'opération peut se faire indéfiniment puisque nous n'avons que deux gaz, de l'azote et de l'oxygène ;
- Trimix : si sur le plan technique rien n'interdit une dilution, l'intérêt de cette manœuvre est très largement discutable. En effet les nouveaux gaz trimix ont une composition souvent très éloignée de celle préconisée par les tables trimix (mais restent utilisables avec un logiciel de décompression).

3.6 Transvasement par équilibrage

Il est possible de transvaser le contenu de deux ou plusieurs bouteilles contenant le même gaz dans une seule par équilibrage ou via un compresseur pour les gaz dont le pourcentage d'O₂ est inférieur ou égal à 25 %.

4 Le matériel spécifique

4.1 Oxygène

Tout le matériel en contact direct avec l'oxygène ou susceptible de l'être, doit être « compatible O₂ ». Il s'agit d'un matériel exclusivement réservé à cet effet, clairement identifié et marqué « spécial O₂ ».

Ce matériel 100 % compatible l'O₂ est :

- soit conçu pour l'air et adapté pour l'O₂, dégraissé et régulièrement vérifié ;
- soit spécialement conçu et commercialisé pour l'O₂ (cette formule étant assurément la meilleure, quand elle est possible).

4.2 Surox (dont les Nitrox et les Trimix hyperoxyques)

Dans le cas de confection des gaz, les bouteilles, les robinets et les lyres de transfert doivent être impérativement dégraissés pour être compatibles oxygène.

Les bouteilles et les détendeurs/manomètres sont clairement marqués NITROX ou SUROX d'une manière indélébile.

Dans la mesure du possible les robinets sont eux aussi différenciés des robinets standards, par exemple avec un volant de couleur.

En règle générale, les détendeurs et les manomètres sont spécialement conçus pour l'utilisation des surox. Toutefois il est admis d'utiliser des détendeurs « air » dégraissés sous réserve qu'ils soient correctement différenciés et soient réservés exclusivement à cet usage.

Il est admis que jusqu'à 40 % d'oxygène, le matériel de plongée standard peut être utilisé sans modification et sans danger sous réserve d'un marquage correct et d'une vigilance intransigeante de la limite à ne pas dépasser.

Attention : ceci ne concerne pas les lyres, bouteilles, robinets et tout le matériel qui peut à un moment ou à un autre être en contact direct avec l'oxygène pur, en particulier lors de la confection du mélange.

4.3 Héliair

Le matériel classique de plongée peut être utilisé pour l'héliair sous réserve d'un marquage clairement lisible des détendeurs, manomètres et blocs.

4.4 Trimix

Les détendeurs et manomètres classiques de plongée peuvent être utilisés pour le trimix (pas pour le Trimix hyperoxygène) sous réserve d'un marquage clairement lisible.

Attention, ceci ne concerne pas les lyres, bouteilles, robinets et tout le matériel qui peut à un moment ou à un autre être en contact direct avec l'oxygène pur, en particulier lors de la confection du mélange.

5 L'analyse

L'ANALYSE DES MÉLANGES EST OBLIGATOIRE.

La confection des mélanges doit être étalée dans le temps pour éviter les grands écarts de température d'une part et pour permettre une parfaite homogénéité du gaz d'autre part.

A notre niveau (plongée sportive), l'analyse consiste à mesurer la PPO₂ avec un analyseur d'oxygène et la PPH_e avec un analyseur d'hélium.

Analyser la pression partielle d'oxygène des mélanges est considéré comme suffisant en tout cas pour les Nitrox et l'Héliair. En effet à partir de cette analyse il n'y a aucun problème à déduire le taux d'azote

Pour les Trimix il est préférable d'analyser le taux d'oxygène et d'hélium avec les deux analyseurs, toutefois il est admis, sous réserve d'une grande rigueur dans la réalisation des opérations, d'analyser la seule PPO₂. Le taux d'hélium du trimix offrira certaines imprécisions qu'il faudra minimiser avec soin.

Chaque bouteille de mélange doit être analysée au moins 2 fois avant son utilisation en plongée et ce par 2 personnes différentes, en ce qui concerne sa teneur en oxygène.

Une des 2 analyses obligatoires et les mesures de pression doivent être effectuées ou supervisées par l'utilisateur des mélanges qui notera de manière indélébile et lisible par tous, la nature du gaz et la pression.

L'analyse doit être faite après le délai de stabilisation du mélange (12 heures au minimum). A noter que le brassage des bouteilles accélère l'homogénéité du mélange.

6 Précision des mélanges

Il est admis que le pourcentage d'O₂ trouvé lors de l'analyse ne doit pas s'écarter de plus de 5% de la valeur nominale souhaitée. (Ex : Pour un mélange à 10% d'O₂, le pourcentage déterminé par l'analyse doit être compris entre 9,5 % et 10,5 %).

Il est à noter que toutes les valeurs, notamment celles de la PPO₂, celles des profondeurs minimales et maximales sont calculées sur la base du pourcentage réel trouvé lors de l'analyse.

Un Nitrox ou un trimix «raté» (pourcentage différent de celui escompté) reste néanmoins utilisable ; il suffit d'adapter sa profondeur d'utilisation pour respecter les seuils de PPO₂ et d'intégrer les valeurs réelles des pourcentages des gaz pour le calcul des procédures de décompression.

7 Marquage

Le fût de toute bouteille utilisée dans une plongée complexe doit comporter une étiquette indélébile indiquant clairement la nature du gaz contenu. Celle-ci doit être lisible sous l'eau même lorsque la bouteille est équipée (détendeur, cerclage, flotteurs...).

Entendre par « étiquette » soit un adhésif, soit un cartouche directement noté sur le fût.

7.1 Air

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- **AIR** ;
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau

A noter que dans le cadre des plongées complexes, les bouteilles d'air doivent, elles aussi, être marquées.

7.2 Argon

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- ARGON non respirable ;
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau.

A noter qu'il n'y a pas de 2^{ème} étage sur le détendeur et dans ce cas, il est opportun de monter au niveau du 1^{er} étage une soupape de surpression.

7.3 Hélicair

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- HELIAIR X% O₂, Y% He (pourcentage d'oxygène trouvé lors de l'analyse, pourcentage d'hélium déduit de celui de l'oxygène ou mieux pourcentage d'hélium trouvé lors de l'analyse),
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau,
- profondeur **Plancher**.

Formule à utiliser pour déduire le pourcentage d'hélium de celui d'oxygène :

$$\%He = 100 - (476,2 \times \%O_2)$$

7.4 Nitrox

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- NITROX X% O₂ ou plus simplement N ou NITROX X% (Exemple N32), le pourcentage d'oxygène est celui trouvé lors de l'analyse),
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau,
- profondeur **Plancher**

7.5 Oxygène

Une étiquette, facilement lisible et indélébile, indique au minimum les mentions suivantes :

- Oxygène ou O₂ ;
- Pression de la bouteille avant sa mise à l'eau.

7.6 Trimix

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- TRIMIX X% O₂, Y% He ou plus simplement T ou TRIMIX X%/Y% (exemple T 18/42). Les valeurs sont les pourcentages trouvés lors des analyses pour l'oxygène et l'hélium dans le cas de la double analyse O₂, et He. Dans le cas de la simple analyse de la PPO₂, les valeurs affichées seront les pourcentages souhaités sous réserve que le pourcentage d'oxygène trouvé lors de l'analyse ne s'écarte pas de plus de 5% de la valeur nominale souhaitée,
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau,
- profondeur plancher et, le cas échéant, la profondeur minimale autorisée.

7.7 Trimix Hyperoxique ou Surox T

L'étiquette de marquage indique au minimum les mentions suivantes :

- TRIMIX HYPEROXIQUE ou SUROX T X% O₂, Y% He ou plus simplement TH X%/Y% (exemple TH 35/25). Les valeurs sont les pourcentages trouvés lors des analyses pour l'oxygène et l'hélium dans le cas de la double analyse O₂, et He. Dans le cas de la simple analyse de la PPO₂, les valeurs affichées seront les pourcentages souhaités sous réserve que le pourcentage d'oxygène trouvé lors de l'analyse ne s'écarte pas de plus de 5 % de la valeur nominale souhaitée,
- pression de la bouteille avant sa mise à l'eau,
- profondeur plancher et, le cas échéant, la profondeur minimale autorisée.

Pour chacun des blocs, avant son immersion, il est conseillé de noter en plus, le nom de l'utilisateur, éventuellement la place et l'utilité de la bouteille

On pourra noter d'autres indications concernant la date de l'analyse du mélange, et le nom du ou des opérateurs.

8 Procédures de décompression

Dans tous les cas, la redondance reste de mise et il faut pouvoir pallier à :

- la perte d'un jeu de table ou d'un ordinateur,
- la panne d'un ordinateur.

en doublant, voire en triplant, les informations immergées.

Toutes les procédures s'accompagnent des préconisations suivantes :

- vitesse de remontée lente, de l'ordre de 10 mètres/minute.
- 2' de palier au minimum à chaque changement de gaz.

8.1 Plongée à l'air avec décompression à l'O₂

A défaut d'un logiciel ou d'un ordinateur de plongée gérant la décompression à l'oxygène pur, il est recommandé d'utiliser les tables MT92.

8.2 Plongée au nitrox

Dans le cas de plongée au nitrox, utiliser une des possibilités suivantes :

- des tables spéciales plongée au nitrox ;
- un ordinateur de plongée prévu pour la plongée au nitrox ;
- un logiciel qui gère la plongée au nitrox ;
- les tables à l'air MT92 dans lesquelles on entre avec la profondeur air équivalente.

8.3 Plongée à l'héliair (jusqu'à 10% d'hélium)

A défaut d'un logiciel ou d'un ordinateur de plongée gérant la décompression d'une plongée à l'héliair, il est recommandé d'utiliser les tables MT92 en intégrant aux paliers, si possible, l'emploi de nitrox et d'O₂.

8.4 Plongée au trimix

La décompression d'une plongée trimix doit être particulièrement adaptée au profil de la plongée envisagée et aux gaz respirés. Elle doit être conduite à l'aide d'une des possibilités suivantes :

- des tables de décompression spécifiques ;
- un ordinateur adapté au trimix et uniquement dans les limites des possibilités de l'appareil (gestion multi-gaz, multi profondeur, temps et profondeur limites, etc.) ;
- un logiciel de décompression spécial trimix.

8.5 Gestion de la décompression d'une plongée aux mélanges

Quelle que soit la formule choisie, le plongeur, en toute autonomie, doit être capable d'effectuer une décompression convenable dans le cas :

- d'une plongée écourtée (temps ou profondeur moindre) ;
- d'une plongée plus longue ;
- d'une plongée plus profonde ;
- ou d'un quelconque aléa de nature à modifier les paramètres de la plongée initialement prévue.

De même, dans tous les cas, il ne faut pas oublier d'intégrer dans les paramètres de la plongée, les spécificités de la plongée souterraine, comme les profils dits du type « montagnes russes », les plongées successives ou consécutives...

Une gestion de la décompression ne se limite pas à des temps de paliers avec des gaz adaptés. Elle doit inclure aussi :

- le calcul de l'autonomie, basé sur les conditions les plus pessimistes ;
- la redondance des scaphandres de décompression ;
- la mise en place de la ligne de décompression (mise en place des bouteilles) ;
- les moyens de protection contre le froid (argon, cloche, vêtement chauffant, etc.) ;
- l'assistance au plongeur en décompression ;
- les procédures en cas d'incidents matériels au cours de la décompression...

9 Rôles et Responsabilités des intervenants lors d'une plongée complexe

9.1 Plongeur

Chaque plongeur est responsable :

- de la vérification des mélanges qu'il utilise (analyse, pression, etc.) ;
- de l'évaluation de ses propres capacités (limites, expérience, etc.) ;
- du choix de la procédure de décompression qu'il va appliquer ;
- du respect des règles de sécurité.

9.2 Le responsable de plongée ou de projet

Le responsable de la plongée ou du projet, qui est souvent le plongeur de pointe, doit s'assurer :

- de la planification des plongées,
- de la désignation d'un directeur de plongée lorsqu'il ne peut ou ne veut pas assurer ce rôle (en particulier lorsqu'il doit plonger),
- de la bonne information concernant les règles de sécurité pour tous les intervenants ;
- que les tâches affectées à chaque plongeur soient cohérentes avec leurs compétences, leurs expériences, leur condition physique ou psychologique.

9.3 Le Directeur de plongée

Lors des opérations de plongées complexes, il est conseillé de désigner un directeur de plongée (rôle défini pour une journée au minimum). Pendant le temps où il sera affecté à ce poste il ne devra pas plonger. Il devra assurer au minimum :

- l'attribution des rôles en fonction des compétences et possibilités du moment de chacun,
- le suivi de la bonne exécution des missions prévues,
- l'enregistrement des paramètres de toutes les plongées,
- l'enregistrement des entrées et sorties du matériel,
- la gestion du matériel déposé dans le siphon (nature, lieu, affectation, etc.)

10 Techniques diverses

10.1 Les propulseurs

L'intérêt des propulseurs n'est plus à démontrer : rapidité, exposition réduite en terme de saturation, diminution de la consommation en gaz, etc.

L'autonomie du propulseur doit se gérer comme l'autonomie en gaz et en éclairage, en prévoyant suffisamment large pour le parcours prévu et en envisageant une ou plusieurs pannes.

Par exemple :

1. En emmenant avec soi un ou plusieurs autres engins,
2. En disposant des propulseurs régulièrement sur le parcours (relais et sécurité),
3. En disposant d'une autonomie (gaz, procédure de décompression, résistance au froid et à l'effort, etc.) suffisante pour gérer un retour à la palme.

La solution idéale étant probablement un savant équilibre des trois solutions.

Suivi du fil :

Le fil doit se trouver dans le champ visuel du pilote, le siphon doit être spécialement équipé dans ce sens (fil placé à la base de la zone de progression du plongeur, pas de fil pendant, etc.).

Position sur le propulseur :

L'idéal est de trouver la position la plus aérodynamique pour diminuer la traînée. Le propulseur doit être impérativement et intrinsèquement équilibré (en cas de perte, il est préférable qu'il soit légèrement lourd pour le retrouver plus facilement au fond de la galerie).

10.2 L'équilibrage

L'équilibrage du plongeur et de l'ensemble de ses charges est un atout de sécurité essentiel pour éviter l'essoufflement. Ce quasi-équilibre doit être trouvé tout le long de la plongée quel que soient les variations de la configuration du harnachement.

Pour faire varier son poids apparent le plongeur doit appliquer les sacro-saintes règles de l'autonomie et de la redondance.

Le plongeur doit prévoir suffisamment de gaz nécessaire à son équilibrage dans ses réserves de flottabilité (vêtement, jacket, poche dorsale, Wings...) pour l'intégralité de sa plongée (progression aller et retour et décompression). En plus des éventuelles petites bouteilles d'air ou d'argon, il est impératif d'être connecter sur son scaphandre principal et d'avoir plusieurs sources de gaz indépendantes pour chacun de ses stabilisateurs.

Il est impératif de prendre en compte les variations maximales de poids apparent dans la configuration la plus complète du plongeur.

Par exemple il faut calculer la variation de poids apparent du plongeur avec son bi-dorsal vide et lorsqu'il est chargé de tous les relais plein et scooters qu'il devra porter à un moment de la plongée.

Le volume des réserves de flottabilité doit être capable de maintenir l'équilibrage du plongeur quelque soit le volume de gaz restant dans les blocs. Les variations de poids entre bouteille vide et bouteille pleine sont importantes (environ 1kg/m3). Les scaphandres trop lourds sont à déconseiller sauf moyen d'équilibrage redondant et adapté.

A noter qu'il convient de gérer une panne de stabilisateur (inflateur ou crevaison). La redondance en matière d'équilibrage doit être adaptée.

Une charge incompressible et sans variation de poids, comme un scooter peut être allégé avec des flotteurs type Kégesel ou polystyrène (attention à l'écrasement avec la pression) mais ce type d'équilibrage est à proscrire pour les bouteilles qui, vides, deviendraient trop légères.

10.3 Cloche de décompression

Les paliers sont le prix parfois exubérant de la plongée. Leur durée est actuellement, sans conteste, la plus importante limite des explorations en plongée souterraine, bien au-delà de l'autonomie.

Plusieurs facteurs font de ces paliers une véritable épreuve de force : le froid, la faim, la soif, l'isolement, l'immobilité...

L'utilisation d'une cloche de décompression permet de résoudre partiellement ces problèmes. Hors de l'eau, à température extérieure égale, le plongeur se refroidit beaucoup moins vite. D'autre part, il peut facilement s'alimenter, parler avec les « visiteurs », lire, écouter de la musique...

De nombreux choix s'imposent quant à la conception de la cloche : sa taille, son volume, souple ou rigide, le système d'ancrage, fixe ou réglable, etc.

Aucune solution est parfaite, il faut pour chaque siphon, réfléchir au meilleur compromis, en intégrant les dimensions du conduit, la température de l'eau, la nature de la roche, le financement, etc.

Un soin tout particulier doit être apporté à l'arrimage de l'appareil qui doit être calculé en fonction du volume de la cloche.

L'apport des gaz

L'arrivée des gaz se fait souvent depuis la surface (lorsque cela est possible) avec un narguilé, mais pour ne pas oublier la sacro-sainte double sécurité, il faut prévoir des bouteilles/détendeurs de secours à portée de la cloche. Attention lorsque l'on utilise un narguilé en surface: c'est l'assistance extérieure qui gère les gaz. D'où une grande vigilance en haut et une grande confiance en bas. Un système de communication cloche plongeur est indispensable (généphone, téléphone...) De plus pour éviter toute rupture de l'acheminement des gaz, le narguilé doit être branché sur 2 bouteilles avec un jeu de vanne.

L'expiration :

Deux problèmes se posent en ce qui concerne l'expiration :

1. L'accumulation de CO₂ dans la cloche, ce qui représente un réel danger lorsque l'on respire le gaz ambiant de la cloche, par exemple en mangeant ou en parlant aux visiteurs.
2. La suroxygénation de l'atmosphère de la cloche qui engendre des risques d'explosion conjuguée à une quelconque étincelle (Walkman, généphone, etc. . .)

Pour réduire ces risques, la respiration dans un groin muni d'un déverseur est préférable à un détendeur classique.

Malgré l'emploi du masque déverseur, les fuites des gaz expirés persistent et pour régénérer l'air de la cloche, Il est indispensable d'insuffler régulièrement de l'air.

Si l'utilisation de la cloche est un atout de sécurité et de confort il ne faut pas oublier qu'elle engendre de nouveaux dangers qu'il faut envisager très sérieusement avant son utilisation :

- Rupture de l'arrimage: la cloche monte instantanément en surface, le plongeur avec: surpression, accident de décompression, etc.
- Fuite importante : la cloche coule rapidement emmenant avec elle le plongeur prisonnier et sans autonomie. Un moyen relativement simple permet de limiter les dégâts en fixant la cloche aussi par le haut.
- Explosion de la cloche: conséquence inconnue mais facile à deviner. Pour réduire ces risques, nous avons l'obligation de maintenir le taux d'oxygène inférieur à 30 %, voire d'inertiser les appareils électriques et d'éviter les mécaniques imprégnées d'huile à l'intérieur de la cloche (même si ce risque est très faible, voire quasi-nul, il est préférable de prendre des précautions de bon sens).
- Essoufflement : lié à la respiration d'une atmosphère chargée en CO₂.
- Dangers de l'hyperoxie : se contenter d'une pression partielle d'O₂ en deçà des normes, même si l'exposition à une pression partielle élevée en O₂ semble plus facilement acceptée par le corps humain au chaud et au sec que dans l'eau froide.

10.4 Les recycleurs

L'utilisation de recycleur en plongée souterraine présente certains avantages qui devront être analysés par rapport à la complexité supplémentaire introduite. Leur mise en œuvre dépendra du bilan pour chaque projet.

En plus des règles d'usage liées à la spécificité des recycleurs, les recommandations suivantes doivent être considérées pour leur mise en œuvre en plongée souterraine :

Utilisation d'un capteur d'oxygène informant le plongeur du niveau de PPO₂ inhalé.

Prise en compte de la PPO₂ ou du pourcentage d'O₂ le plus faible pouvant être rencontré lors de la plongée pour le calcul de la décompression

L'utilisation d'un recycleur nécessite un moyen de redondance permettant au plongeur un retour à la surface en cas de panne complète de l'appareil. Les modes de fonctionnement dégradés de l'appareil ne doivent pas être l'unique sécurité du plongeur.

La redondance pourra être obtenue par l'utilisation d'un deuxième appareil ou par l'utilisation de circuits ouverts (bloc + détendeur) correctement dimensionnés. Dans les deux cas, il est recommandé de s'assurer régulièrement de leur bon fonctionnement.

Les règles d'autonomie doivent être revues en fonction de la solution retenue. Les consommations de gaz annexes (vidage masque, équilibrage, rinçage, etc.) devront être pris en compte dans la planification de la plongée.