

LA PLONGEE AUX MELANGES SUROXYGENES

I. DEFINITION

L'air ambiant contient idéalement :

- 20,94 % d'oxygène.
- 78,09 % d'azote.
- 0,97 % de gaz rares.

Soit schématiquement 79 % d'azote et 21 % d'oxygène.

Les mélanges suroxygénés sont composés d'oxygène à une concentration supérieure à 21 % et de gaz purs.

On distingue :

- Le Nitrox * : (azote-oxygène).
- L'Héliox * : (hélium-oxygène).
- Le Trimix * : (azote-hélium-oxygène).
- L'Hydrox * : (hydrogène-oxygène).
- L'Hydréliox * : (hydrogène-hélium-oxygène).

Les 4 derniers mélanges ne sont utilisés que par les plongeurs professionnels.

Nous nous intéresserons donc dans ce cours uniquement au Nitrox, employé actuellement en plongée loisir.

Le Nitrox est un mélange d'oxygène et d'azote, où la concentration d'oxygène est supérieure à celle de l'air ambiant, c'est à dire 21 %.

On parle de Nitrox 36 si la concentration en oxygène est de 36 % dans le mélange.

En plongée loisir, les mélanges utilisés contiennent classiquement entre 22 et 40 % d'oxygène.

II . AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA PLONGÉE NITROX

1) Avantages :

- Une courbe de sécurité plus longue pour une même profondeur.
- Des paliers moins longs pour une même durée de plongée.
- Des intervalles de surfaces moins longs.
- Des plongées successives plus longues et sans palier.
- Une fatigue moins importante que lors des plongées identiques à l'air.

Comparaison d'une même plongée à 21 m effectuée à l'air ou avec un mélange Nitrox 36
(Palier de sécurité 1 minute à 3 mètres)

Air : 36 minutes
Nitrox 36 : 70 minutes

2) Inconvénients :

- Contraintes liées à la toxicité de l'oxygène.
- Contraintes matérielles quant à la compatibilité de l'oxygène et des équipements utilisés.
- Nécessité d'une station de gonflage sans reproche et de techniciens compétents.
- Planification des plongées plus poussées liées à l'analyse du mélange respiré et du profil de plongée à réaliser.

III . LA TOXICITÉ DE L'OXYGÈNE EN PROFONDEUR

1) Rappels sur les lois physiques des gaz :

A) Notion et définition de la pression :

Pression = force par unité de surface

$$P(\text{Pascal}) = \frac{F(\text{Newton})}{S(\text{m}^2)}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 1013 \text{ Hpa} \\ &= 760 \text{ mm Hg} \\ &= 1 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

B) Pression relative (en mer) :

$$\text{Pression relative} = \frac{\text{Profondeur(mètres)}}{10}$$

$$\text{Pression relative à 10 m de profondeur en mer} = 10/10 = 1 \text{ bar}$$

C) Pression absolue :

C'est la pression réelle subie dans l'eau à une profondeur donnée :

$$\text{Pression absolue} = \text{Pression atmosphérique} + \text{Pression relative}$$

$$\text{Pression absolue à 20 m} = 1 + (20 / 10) = 3 \text{ bar}$$

D) Loi de Dalton = loi des mélanges gazeux :

a) Dans un mélange de gaz, les molécules ne se combinent pas entre elles et chaque gaz exerce la pression qu'il aurait s'il occupait à lui seul la totalité du volume du mélange.

$$\text{Pression partielle} = \text{Pression absolue} \times \% \text{ du gaz dans le mélange}$$

Exemple : pressions partielles dans l'air ambiant à 1 bar (pression au niveau de la mer).

$$\text{Pression partielle d'oxygène} = P_{pO_2} = 1 \times (21 / 100) = 0,21 \text{ bar}$$

$$\text{Pression partielle d'azote} = P_{pN_2} = 1 \times (79 / 100) = 0,79 \text{ bar}$$

b) La somme des pressions partielles des gaz d'un mélange est la pression totale du mélange.

Pression totale du mélange oxygène + azote (air) = Pression partielle oxygène + Pression partielle azote

$$\begin{aligned} &= P_{pO_2} + P_{pN_2} \\ &= 0,21 + 0,79 \\ &= 1 \text{ bar} \end{aligned}$$

2) Applications des lois des gaz aux mélanges Nitrox

Le seuil de toxicité de l'oxygène est fixée à 1,6 ou 1,4 bar de la pression partielle.

A) Calcul de la pression partielle d'oxygène lors d'une plongée à l'air à 66 m de profondeur :

$$\begin{aligned} \text{a) pression absolue à 66 m} &= \text{pression atmosphérique} + \text{pression relative} \\ &= \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad + \quad \quad \quad 6,6 \\ &= 7,6 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) pression partielle d'oxygène à 66 m} &= 7,6 \times (21 / 100) \\ &= 1,6 \text{ bar} \end{aligned}$$

On voit qu'à 66 m, on atteint le seuil de toxicité de l'oxygène fixé à 1,6 bar de pression partielle. On est donc aux limites de la plongée à l'air.

B) Calcul de la pression partielle d'oxygène lors d'une plongée à 20 m en mer avec un mélange Nitrox 34 (34 % d'oxygène) :

$$\begin{aligned} \text{a) pression absolue à 20 m} &= \text{pression atmosphérique} + \text{pression relative} \\ &= \quad \quad \quad 1 \quad \quad \quad + \quad \quad \quad 2 \\ &= 3 \text{ bar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) pression partielle d'oxygène} &= 3 \times 34 / 100 \\ &= 1,02 \text{ bar} \end{aligned}$$

c) Calcul de la profondeur maximum que l'on peut atteindre sans risque avec un Nitrox 36, en fixant le seuil maximum de la pression partielle d'oxygène (PpO₂) à 1,6 bars :

$$\begin{aligned} 1,6 &= \text{pression absolue} \times \% \text{ d'oxygène dans le mélange Nitrox} \\ 1,6 &= \text{pression absolue} \times 0,36 \end{aligned}$$

$$\text{Pression absolue} = 1,6 / 0,36 = 4,44 \text{ bar}$$

Or Pression absolue = P atmosphérique + P relative

$$\text{Pression relative} = 4,44 - 1 = 3,44 \text{ bar}$$

Or Profondeur = Pression relative x 10

$$\text{Profondeur} = 3,44 \times 10 = 34,4 \text{ mètres}$$

Pour récapituler, en plongée Nitrox, on utilise les formules suivantes :

$$\begin{aligned} & \text{Pression partielle d'oxygène} \\ & \quad = \\ & \text{Pression absolue} \times \% \text{ d'oxygène dans le mélange} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Profondeur maximum d'utilisation du mélange} \\ & \quad = \\ & [(\text{Pression partielle d'oxygène maximum tolérée}) / (\% \text{ d'oxygène dans le mélange}) - 1] \times 10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Mélange optimum pour une profondeur donnée} \\ & \quad = \\ & (\text{Pression partielle d'oxygène maximum tolérée}) / (\text{Pression absolue à la profondeur souhaitée}) \end{aligned}$$

3) Effet Paul BERT :

C'est la toxicité de l'oxygène sur le système nerveux central lors d'une respiration à forte pression partielle (CNS Clock en anglais).

Pour les plongées loisirs Nitrox, la pression partielle d'oxygène maximum recommandée est de 1,4 bar.

A) Rappel des syndromes :

C'est une crise convulsive évoluant classiquement en trois phases :

- tonique
- clonique
- résolutive

Précédées parfois de prodromes :

- troubles de la vision : diplopie, vision en tunnel,
- troubles auditifs,
- anxiété,
- tremblements des lèvres,
- nausées et vomissements.

B) Conduite à tenir :

C'est avant tout la prévention et rester dans les limites de PO_2 acceptables.

En cas d'apparition de la crise, il faut effectuer une remontée en urgence en maintenant l'embout en place et la liberté des voies aériennes pour éviter un accident de surpression pulmonaire.

C) Prévention et tables oxygène de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

- Comme l'azote, la toxicité de l'oxygène varie en fonction du temps et de la profondeur :
Plus la pression partielle d'oxygène augmente, plus la durée de plongée doit être brève. Il faut éviter les zones proches des limites de sécurité.
- Comme tout plongeur observe scrupuleusement la table de décompression, le plongeur Nitrox doit utiliser la table oxygène.

Tables Durée / Pression Partielle O₂ de la NOAA			
PPO₂	Durée max de la 1^{ère} plongée (mn)	Temps de plongée max sur 24h	% SNC / mn
1,6	45	150	2,22
1,5	120	180	0,83
1,4	150	180	0,65
1,3	180	210	0,56
1,2	210	240	0,47
1,1	240	270	0,42
1	300	300	0,33
0,9	360	360	0,28
0,8	450	450	0,22
0,7	570	570	0,18
0,6	720	720	0,14

On définit alors une toxicité due à l'oxygène sur le système nerveux central en % par la formule :

$$\text{Toxicité O}_2 \text{ du SNC (\%)} = \frac{\text{durée de plongée}}{\text{durée maximum de la 1ère plongée}}$$

- Quand le plongeur a atteint le temps maximum pour une seule plongée, il doit observer un intervalle de surface.
- Si la toxicité atteinte est supérieure à 80 %, cet intervalle doit être d'au moins 2 heures.
- Quand dans une journée on atteint 80 à 100 % du maximum d'exposition l'intervalle avant de replonger doit être d'au minimum 12 heures.
- Les intervalles de surface sont effectués à l'air.
- Toutes les 90 minutes, on considère que la toxicité baisse de 50 %.

Exemples :

Sortie de l'eau avec une toxicité O₂ SNC de 60 %.

Après 90 minutes toxicité 60 % x 0,5 = 30 %

On pourra replonger sur la journée 100-30 = 70 % du temps théorique restant à la PO₂ envisagée.

Une autre table déduite des tables de la NOAA donne des résultats plus précis et plus proches de la réalité avec des temps de plongée légèrement plus faibles.

On doit toujours arrondir les valeurs dans le sens de la sécurité, ex : PO₂ : 1,37 → 1,4.

4) Effet LORRAIN-SMITH et tables OTU :

A) Physiopathologie et symptômes

L'effet LORRAIN-SMITH est la toxicité pulmonaire de l'oxygène suite à de longues expositions à une pression partielle d'oxygène comprise entre 0,5 et 1 bar.

C'est une pneumonie toxique par brûlure alvéolaire entraînant des dégâts irréversibles et conduisant à la mort.

Lors des plongées sportives ce risque pulmonaire n'existe pas.

B) Prévention :

C'est la table OTU de Hamilton (Oxygen Time Unit).

- Le nombre d'OTU sur 24 heures ne doit pas dépasser 1500.
- Un traitement hyperbare peut apporter jusqu'à 650 OTU.
- On se réserve donc la possibilité d'un traitement hyperbare et l'on considère que :

La dose maximum d'une journée de plongée est de (1500-650), soit 850 OTU (600 voir 400).

Table OTU
En fonction de la pression partielle d'oxygène et du temps passé en profondeur

PO ₂ (bar)	OTU/mn
0,5	0
0,6	0,27
0,7	0,47
0,8	0,65
0,9	0,83
1	1
1,1	1,16
1,2	1,32
1,3	1,48
1,4	1,63
1,5	1,78
1,6	1,92

Exemple : combien de temps peut-on respirer de l'oxygène à 1,6 bars sans dépasser 850 OTU

A 1,6 bar, la dose est de 1,92 OTU/mn

$$1,92 \times t = 850$$

$$t = (850 / 1,92)$$

$$t = 442 \text{ minutes}$$

soit plus de 7 heures

IV. LA TOXICITE DE L'AZOTE ET LES PROCEDURES DE DECOMPRESSION EN PLONGEE NITROX

1) Rappels de physique :

L'azote est un gaz inerte à l'air, mais en plongée sa pression partielle va augmenter du fait de l'augmentation de la pression absolue :

Ex 1 : à 30 mètres de profondeur en mer, en plongée à l'air, qu'elle est la pression partielle d'azote ?

$$\begin{aligned}\text{Pression partielle d'azote} &= \text{Pression absolue} \times \% \text{ azote} \\ &= 4 \times 0,79 \\ &= 3,16 \text{ bar}\end{aligned}$$

Ex 2 : quelle serait la pression partielle d'azote avec un mélange Nitrox 30 ?

$$\begin{aligned}\text{Le pourcentage d'azote serait} &= 100-30 \\ &= 70 \% \\ \text{La pression partielle d'azote serait} &= 4 \times 0,7 \\ &= 2,8 \text{ bar}\end{aligned}$$

On constate que pour une même profondeur, avec un mélange enrichi en oxygène donc appauvri en azote la pression partielle de l'azote, responsable de la maladie de décompression diminue, ce qui explique les temps plus longs pour les plongées Nitrox.

2) Notion de profondeur équivalente :

Reprenons l'exemple précédent :

Plongée à 30 mètres en mer avec un mélange Nitrox 30.

$$\begin{aligned}\text{Pression partielle} &= \text{Pression absolue} \times \% \text{ azote} \\ &= 4 \times 0,7 \\ &= 2,8 \text{ bar}\end{aligned}$$

2,8 bar de pression partielle d'azote lors d'une plongée à l'air seront rencontrés à une pression absolue de

$$\begin{aligned}2,8 &= \text{Pression absolue} \times 0,79 \\ (2,8 / 0,79) &= \text{Pression absolue} \\ 3,5 \text{ bar} &= \text{Pression absolue}\end{aligned}$$

or Pression absolue = Pression atmosphérique + Pression relative

$$\begin{aligned}3,5 &= 1 + \text{Pression relative} \\ \text{Pression relative} &= 2,5 \text{ bar}\end{aligned}$$

Soit à une profondeur de 25 mètres.

Une plongée avec un Nitrox 30 à 30 mètres est donc **équivalente** à une plongée à l'air à 25 mètres.

$$\text{Profondeur équivalente air (en mètre)} = \left[\frac{(\% \text{ N}_2 \text{ dans le mélange} \times \text{Pression absolue})}{\% \text{ N}_2 \text{ dans l'air}} - 1 \right] \times 10$$

V . PLANIFICATION D'UNE PLONGÉE ET ÉQUIPEMENTS NITROX

1) Les paramètres

A) Profondeur :

Il faut se poser la question suivante : Est-ce que ma pression partielle d'oxygène ne dépassera pas 1,6 bar (de préférence 1,4 bar), au point le plus profond de la plongée envisagée ?

B) Durée :

Est-ce que je vais dépasser 80 % de toxicité oxygène sur le système nerveux central sur les tables de la NOAA ?

C) C) Paliers

Ils sont à éviter, sauf un palier de sécurité de 1 à 3 minutes à 3 mètres.

2) La consommation

Il ne faut pas oublier que les efforts augmentent la consommation.

⇒ on consomme 4 fois plus à 30 mètres (pression absolue de 4 bar) qu'à l'air libre .

3) Équipement spécifique :

- Selon la NOAA, on pourrait utiliser le même équipement que pour l'air comprimé tant que les mélanges Nitrox ne contiennent pas plus de 40 % d'oxygène (Nitrox 40).
- Cependant, le mélange oxygène et graisses peut être inflammable et le risque est réel.
- Le moment le plus crucial est celui où le plongeur ouvre sa bouteille : tout le système robinetterie-détendeur-manomètre est mis sous pression, donc chauffe. Il risque alors de se produire un auto-allumage du mélange contenant de l'oxygène et des graisses.

A) Les détendeurs :

Ils seront toujours démontés, dégraissés et séchés.

B) Les manomètres :

Ils seront démontés, dégraissés et séchés, on dégraisse également le tuyau interne.

C) Les inflateurs et les gilets :

Ils seront démontés et dégraissés, on dégraisse également le flexible d'alimentation.

D) Les bouteilles :

Elles seront spécifiques, dégraissées, rincées et séchées.

E) Les robinetteries :

Elles seront également démontées, dégraissées et séchées.

F) Les ordinateurs de plongée :

Ce sont des ordinateurs spécifiques à la plongée Nitrox.

On peut citer :

- UWATEC : modèle ALADIN PRO NITROX
- SUUNTO : modèle SOLUTION ALPHA NITROX
- etc.

- Il est très important de dégraisser les bouteilles, car lors de la fabrication des Nitrox, celles-ci sont en contact avec l'oxygène pur.
- Ensuite il est indispensable de ne plus remplir ces bouteilles n'importe où, car si l'air qui est remis dedans ne correspond pas à la norme DIN 3188, il sera pollué par des particules de graisse et polluera ainsi les détendeurs, les manomètres, les robinets et tous les périphériques qui avaient été spécifiquement préparés. Tout le processus de dégraissage

4) Matériaux et oxygène :

A) Matériaux compatibles :

- Cuivre et alliages
- Laiton
- Acier
- Acier inox
- Téflon
- KEL-L* (Polytrifluoéthylène)
- VITON *

B) Graisses compatibles :

- HALOCARBON
- VOLTALEF
- FONBLIN

C) Matériaux incompatibles * :

- Aluminium
- FONTE
- TITANE et alliages de titane
- Résine époxy
- Polyuréthane

D) Graisses incompatibles :

- Toutes les autres graisses
- Solvants, peintures, marker
- Empreintes digitales grasses

5) Marquage des bouteilles :

A) Ordonnance du 1^{er} Janvier 1997 :

- Les mélanges contenant plus de 21 % d'oxygène sont classés comme « oxydants » sous chiffre 10.
- Les bouteilles contenant un tel mélange doivent être marquées 3156 NITROX.
- Tous les robinets peuvent être utilisés à condition qu'ils soient construits avec des matériaux compatibles NITROX et OXYGÈNE certifiés par le constructeur ou le fournisseur.

LES BOUTEILLES SERONT MARQUÉES COMME SUIT :

- COULEUR JAUNE
- LARGE BANDE VERTE MARQUEE NITROX EN GROSSES LETTRES
- ETIQUETTE : indiquant la date de la préparation compatible oxygène.
- ETIQUETTE : signalant :
 - le pourcentage (%) d'oxygène dans le mélange
 - la pression du mélange
 - la date de fabrication du mélange
 - le visa du fabricant du mélange
- REPORT DANS UN CAHIER DE CONTRÔLE :
 - du numéro d'identification de la bouteille
 - du pourcentage (%) d'oxygène trouvé lors du contrôle par l'utilisateur et visa de l'utilisateur.

6) Les systèmes de préparation Nitrox :

A) La fabrication des Nitrox :

a) Méthode dite de la pression partielle :

1. On prend une bouteille vide.
2. On transvase la quantité d'oxygène nécessaire
3. On complète avec de l'air comprimé jusqu'à obtention de la pression finale.

- Il existe d'autres techniques permettant de fabriquer des Nitrox en continu. Il est alors possible de remplir directement les bouteilles de plongée ou de stocker le Nitrox dans des bouteilles tampon pour le transvaser ultérieurement (gonflage à flot continu ou suivant le poids moléculaire).
- Théoriquement, on peut fabriquer n'importe quel Nitrox mais dans la pratique on descend rarement le pourcentage d'oxygène en dessous de 30 % car l'on se retrouve trop proche de l'air comprimé, de même s'y l'on effectue des mélanges avec plus de 50 % d'oxygène l'on réduit tellement la profondeur des plongées que les avantages du Nitrox disparaissent.
- EN PRATIQUE ON FABRIQUE DES NITROX CONTENANT ENTRE 28 % ET 40 % D'OXYGENE.

b) Les analyseurs d'oxygène :

Il existe différents modèles portables ou fixes, leur précision est de 0.1 %. Il faut analyser le mélange environ 12 heures après sa fabrication car les molécules ont besoin de temps pour se mélanger parfaitement = LOI DE BERTHOLET

7) Règles à appliquer en tant qu'utilisateur Nitrox :

- avoir un équipement compatible
- faire gonfler sa bouteille au centre agréé
- analyser le mélange contenu dans le bloc
- marquer lisiblement le pourcentage (%) d'oxygène
- signer la feuille de gonflage de la station