



# NITROX et BLENDING

## Usage récréatif et Extended Range

PROTEC



### Partie 1.

- Usage récréatif
- Extended Range

### Partie 2.

- Station de gonflage

### Partie 3.

- Fabrication du Nitrox
- Fabrication du Trimix

### Partie 4.

- Nitrox et recycleur SCR

### Partie 5.

- Analyse des risques

Jean-Claude Taymans



## AVERTISSEMENTS

La plongée est une activité à risque. Elle ne peut être pratiquée que par des personnes correctement formées, bien entraînées et en bonnes conditions physiques et mentales. Le non-respect des règles peut conduire à des blessures graves, des invalidités permanentes ou à la mort. Il vous incombe personnellement d'en évaluer les risques. Ne comptez pas sur les données de cet ouvrage pour garantir votre sécurité. Avant d'entrer dans l'eau, vous devez exercer votre propre jugement quant aux dangers et difficultés que vous allez rencontrer. A vous de faire une évaluation réaliste des conditions de plongée, de la difficulté du site et de votre condition physique !

Ce livre ne remplace pas la formation et n'est pas un substitut à un encadrement professionnel. L'auteur n'assume dès lors aucune responsabilité quant aux données et informations publiées dans cet ouvrage. L'auteur ainsi que l'éditeur ne peuvent encourir aucune responsabilité, légale ou contractuelle, pour les dommages éventuels encourus en raison de l'utilisation de cet ouvrage.

## LA PLONGÉE NITROX DEMANDE UNE FORMATION PARTICULIÈRE

### Photo de couverture

Auteur : timsimages.uk - Shutterstock

Toute reproduction d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, notamment par photocopie, imprimerie, microfilm est interdite sans l'autorisation de l'auteur.

Copyright © Jean-Claude Taymans, tous droits réservés

2 Rue Mouzin – 7390 Wasmuël – Belgique

jctdive@gmail.com

D\mars 2024 Jean-Claude Taymans : Editeur

ISBN 978-2-930747-24-8



## Table des matières

<b>PARTIE 1.....</b>	<b>7</b>
<b>LE NITROX USAGE RECREATIF ET EXTENDED RANGE .....</b>	<b>7</b>
1. GENERALITES .....	8
1.1. DEFINITION.....	8
1.2. AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	9
1.3. DENOMINATION DU NITROX ET MARQUAGE DES BOUTEILLES .....	9
2. RAPPEL DE PHYSIQUE .....	10
2.1. LES UNITES FONDAMENTALES.....	10
2.2. LES UNITES DERIVEES. ....	11
2.3. LES MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLE.....	11
2.4. LOI DES GAZ PARFAIT.....	11
2.5. MELANGE DES GAZ PARFAITS – LOI DE DALTON.....	12
3. LES LIMITES DU NITROX.....	13
3.1. PROFONDEUR EQUIVALENTE AIR - EQUIVALENT AIR DEPTH (EAD).....	13
3.2. PROFONDEUR MAXIMUM D'UTILISATION – MAXIMUM OPERATING DEPTH (MOD).....	14
3.3. TABLEAU DES EAD ET DES PRESSIONS PARTIELLES OXYGENE.....	15
3.4. LE « BEST MIX » .....	16
3.5. NITROX ET PLONGEE EN ALTITUDE.....	16
4. L'OXYGENE, SES DANGERS - EFFET PAUL BERT .....	17
4.1. GENERALITES .....	17
4.2. L'EFFET PAUL BERT.....	17
5. LE %CNS CLOCK .....	19
5.1. EXPOSITION MAXIMUM A L'OXYGENE.....	19
5.2. VARIATION DU %CNS CLOCK PAR MINUTE.....	20
5.3. DIMINUTION DU %CNS EN SURFACE.....	21
6. L'EFFET LORRAIN - SMITH .....	24
6.1. SYMPTOMES .....	24
6.2. DETERMINATION DE L' OXYGEN TOLERANCE UNIT (OTU) .....	24
6.3. REDUCTION DE LA CAPACITE VITALE.....	25
6.4. METHODE REPEX – EXPOSITION REPETITIVE.....	26
7. PLANIFICATION DES PLONGEES NITROX.....	27
7.1. GENERALITES [REC], [ER].....	27
7.2. CALCUL DE L'AUTONOMIE [REC] [ER].....	28
8. MOYENS DE DETERMINATION DE LA DECOMPRESSION .....	30
8.1. AVANT-PROPOS.....	30
8.2. LES TABLES.....	30
8.3. MODELISATION DE LA DECOMPRESSION [ER].....	31
8.4. QUEL NITROX UTILISER ? [ER].....	37
8.5. PARAMETRAGES DES LOGICIELS [ER] .....	38
8.6. LE « RUN TIME » .....	41
8.7. LES ORDINATEURS DE PLONGEE .....	41
9. DEGRE D'ENGAGEMENT DE LA PLONGEE [ER] .....	42
9.1 APPROCHE TTS .....	42
9.2. APPROCHE ANALYTIQUE .....	42
10. LE MATERIEL [REC] [ER].....	44
10.1. NITROX RECREATIF .....	44
10.2. EXTENDED RANGE [ER] .....	44



11. AGENCEMENT DU MATÉRIEL [ER].....	51
11.1. PRINCIPE GÉNÉRAUX.....	51
11.2. BLOC PRINCIPAL, FIXATION DES DÉTENDEURS ET ROUTAGE.....	51
11.3. LA BOUTEILLE DE DÉCO.....	52
12. LES PROCÉDURES DE REMONTÉE ET DE DÉCOMPRESSION [ER].....	53
12.1 REMONTEES DANS LE BLEU.....	53
12.2. STATION DE DECOMPRESSION (SHOTLINE).....	53
12.3. REMONTEE SOUS PARACHUTE AU DEVIDOIR.....	53
13. LE « WHAT-IF » ET LES PRINCIPES DE REDONDANCE.....	55
13.1. LE « WHAT-IF ».....	55
13.2. LES REDONDANCES.....	55

## **PARTIE 2.....57**

### **LA STATION DE GONFLAGE.....57**

1. GENERALITES ET DEFINITIONS.....	58
1.1. COMPOSITION DE L'AIR.....	58
1.2. L'AIR « RESPIRABLE ».....	58
1.3. CARACTERISTIQUE DES GAZ UTILISE EN PLONGEE.....	59
1.4. REGLES GENERALES EDICTEES PAR LE NOAA.....	59
1.5. OXYGENE, DANGERS ET PRECAUTIONS A PRENDRE.....	59
1.6. HELIUM, DANGERS ET PRECAUTIONS A PRENDRE.....	60
1.7. LES GAZ UTILISES EN PLONGEE.....	61
2. PREPARATION DU MATERIEL.....	62
2.1. LES PRODUITS.....	62
2.2. DEGRAISSAGE DU PETIT MATERIEL.....	63
2.3. PREPARATION DE LA BOUTEILLE.....	64
3. COMPOSITION DES STATIONS DE GONFLAGE.....	66
3.1. LE COMPRESSEUR.....	66
3.2. LE MOTEUR D'ENTRAINEMENT.....	67
3.3. LE FILTRE D'ASPIRATION.....	67
3.4. LE SEPARATEUR HUILE/EAU.....	68
3.5. LA FILTRATION FINALE – FILTRE A CHARBON ACTIF.....	68
3.6 LUBRIFICATION ET LE REFROIDISSEMENT DU COMPRESSEUR.....	70
3.7. SOUPAPE DE SURPRESSION.....	71
3.8. PURGE ET ARRET AUTOMATIQUE.....	71
3.9. LES TAMPONS.....	72
3.10. LA RAMPE DE GONFLAGE.....	72
4. INSTALLATION DES STATIONS DE GONFLAGE.....	73
4.1. STATION MOBILE A MOTEUR THERMIQUE.....	73
4.2. LES INSTALLATIONS FIXES.....	74
4.3. SCHEMA D'UNE INSTALLATION TYPE.....	76

## **PARTIE 3.....79**

### **FABRICATION DU NITROX ET DU TRIMIX.....79**

1. SCOPE.....	80
2. REMPLISSAGE A PARTIR D'UN MELANGE PREFABRIQUE.....	80
2.1. LE BOOSTER.....	80
3. METHODE DES PRESSIONS PARTIELLES.....	81
3.1. FABRICATION DU NITROX.....	82



3.2. FABRICATION DU TRIMIX .....	83
4. MATERIEL POUR LA FABRICATION EN FLUX CONTINU - « STICK » .....	85
4.1. LE MANODETENDEUR – DEBITMETRE .....	85
4.2. LE STICK .....	86
4.3. MICRO-VANNE DE LAMINAGE .....	88
4.4. FILTRE A AIR .....	89
4.5. ANALYSEUR ET SONDE OXYGENE .....	89
5. FABRICATION DU NITROX EN FLUX CONTINU – « STICK » .....	91
5.1. PROCEDURE DE REMPLISSAGE .....	91
5.2. A NE JAMAIS FAIRE .....	91
5.3. A TOUJOURS FAIRE .....	92
6. FABRICATION DU TRIMIX EN FLUX CONTINU – « STICK » .....	93
6.1. METHODE DU SIMPLE STICK .....	93
6.2. METHODE DU DOUBLE STICK .....	95
7. FABRICATION DU NITROX PAR FILTRATION DNAX .....	97
8. METHODE GRAVIMETRIQUE OU DES « MASSES MOLECULAIRES » .....	98
8.1. PETIT RAPPEL DE PHYSIQUE .....	98
8.2. CALCUL DES MASSES DES GAZ CONSTITUANT LE MELANGE .....	98
9. COMPARAISON ENTRE LES MODES DE FABRICATION .....	100
10. TEMPS D’HOMOGENEISATION D’UN MELANGE .....	101
10.1. THEORIE SUR LA DIFFUSION DES GAZ .....	101
11. ANALYSE DES GAZ .....	103
11.1. MESURE DE LA TENEUR EN OXYGENE .....	103
11.2. UTILISATION DE L’OXYMETRE .....	105
11.2. MESURE DE LA TENEUR EN HELIUM .....	107
<b>PARTIE 4.....</b>	<b>109</b>
<b>LE NITROX DANS LES RECYCLEURS SCR.....</b>	<b>109</b>
1. GENERALITES .....	110
1.1. UN RECYCLEUR C’EST QUOI ? .....	110
1.2. LE POUR ET LE CONTRE .....	110
2. LES TYPES DE RECYCLEURS .....	111
2.1. STRUCTURE DU RECYCLEUR SCR EN MODE ACTIF .....	111
3. POURQUOI UN DEBIT MASSIQUE CONSTANT ? .....	112
3.1 LES BUSES SONIQUES .....	112
4. FRACTION D’OXYGENE DANS LA BOUCLE D’UN SCR ACTIF .....	113
4.1. QUELQUES VALEURS CLES .....	114
4.2. ANALYSE DE LA VARIATION DE LA FRACTION D’OXYGENE DANS LA BOUCLE .....	114
5. FRACTION D’OXYGENE DANS UN RECYCLEUR SCR EN MODE PASSIF .....	115
5.1. FORMULE PRATIQUE .....	115
6. GESTION DE LA DECOMPRESSION .....	116
6.1. METHODE SECURITAIRE .....	116
6.2. METHODE AGRESSIVE .....	116
6.3. GESTION ELECTRONIQUE.....	118
<b>PARTIE 5.....</b>	<b>119</b>
<b>ANALYSE DES RISQUES.....</b>	<b>119</b>
1. ANALYSE DES RISQUES .....	120
1.1. DEFINITIONS .....	121



1.2. METHODE KINNEY.....	121
1.3. APPLICATION DE LA METHODE KINNEY.....	123
BIBLIOGRAPHIE.....	126

Tableau des mises à jour et modifications.

Version	Date	Remarques
Vers. 1.01	Mars 2024	Version originale
Vers 1.02	Avril 2024	Mise a jour suivant peer review

Non libre de droit



# Partie 1

---

## Le Nitrox usage récréatif et Extended Range

1. Généralités	Page 8
2. Rappel de physique	Page 10
3. Les limites du Nitrox	Page 13
4. L'oxygène, ses dangers – Effet Paul Bert	Page 17
5. Le %CNS Clock	Page 19
6. L'effet Lorrain-Smith	Page 24
7. Planification des plongées Nitrox	Page 27
8. Détermination de la décompression	Page 30
9. Degré d'engagement de la plongée	Page 42
10. Le matériel	Page 44
11. Agencement du matériel	Page 51
12. Procédure de remontée	Page 53
13. What-if et redondances	Page 55



# 1. Généralités

## 1.1. Définition

Le Nitrox est par définition de l'air enrichi à l'oxygène contenant entre 22 et 99% d'oxygène. En pratique le % d'O<sub>2</sub> se situe entre 25 et 80%. Nitrox est la contraction des mots anglais Nitrogen (azote) et Oxygen (oxygène). Pour des raisons pratiques, de sécurité et de prix, le « plongeur récréatif » se limite généralement à des mélanges contenant 32 ou 36 % d'O<sub>2</sub>. Ce sont des mélanges standardisés nommés respectivement NITROX I et NITROX II. Les Nitrox ayant entre 50 et 80% d'O<sub>2</sub> sont des gaz de décompression.

### 1.1.1. Utilisation du Nitrox

Pour le plongeur loisir, concrètement trois possibilités sont à envisager :

1. Utilisation récréative. Le pourcentage d'oxygène dans le mélange est limité à 40%. Généralement seul les Nitrox standardisés de 32 et 36% sont fournis par les centres de plongée. A quelques restrictions<sup>1</sup> près, le plongeur peut pratiquement utiliser le même matériel que pour l'air.
2. Utilisation en gaz de décompression. Ce sont des gaz qui contiennent entre 40 et 100% d'oxygène. Ils sont utilisés pour accélérer la décompression en augmentant la « fenêtre oxygène O<sub>2</sub> »<sup>2</sup>. Ils sont utilisés pour des plongées profondes au Trimix ou lors de plongée profonde à l'air (Extended Range)
3. Dans les recycleurs semi-fermés (SCR)

### 1.1.2. Quelques dates importantes

- 1773: Découverte de l' O<sub>2</sub> par Carl Scheele.
- 1778: Publication des travaux de Paul Bèrtr sur le Nitrox .
- 1960: Utilisation du NITROX en plongée commerciale.
- 1964: Utilisation du NITROX en plongée spéléo.
- 1985: Table et procédures éditées par le NOAA<sup>3</sup> pour le NITROX I & II.
- 1991 Richard Rutkowski crée l'IANTD<sup>4</sup> qui est la première association de "plongée loisir" aux mélanges.

<sup>1</sup> Restriction légale dans certains pays de l'UE (M26x2) et pratique suivant le mode de remplissage de la bouteille.

<sup>2</sup> Au niveau de l'alvéole pulmonaire, c'est la différence entre les tensions (N<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>) artériel et veineux

<sup>3</sup> NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration (USA).

<sup>4</sup> IANTD. International Association of Nitrox and Technical Divers.



## 1.2. Avantages et inconvénients

---

### 1.2.1. Avantages

- Augmentation de la durée de plongée sans palier obligatoire (plongée loisir).
- Réduction de la durée des paliers (plongée technique).
- Diminution du taux d'azote résiduel dans l'organisme après la plongée.
- Diminution du risque d'accident de décompression.
- Diminution du risque de narcose<sup>5</sup>.
- Diminution de la fatigue après la plongée<sup>5</sup>.

### 1.2.2. Inconvénients

- Risques liés à la toxicité de l'O<sub>2</sub>.
- La production de Nitrox demande des équipements spéciaux et coûteux.
- Le matériel doit être bien dégraissé.
- Une utilisation du Nitrox sur une longue période peut occasionner des lésions pulmonaires.
- L'utilisation du Nitrox demande une formation spécifique.
- Prix de revient par plongée sensiblement supérieure à la plongée à l'air.

## 1.3. Dénomination du Nitrox et marquage des bouteilles

---

Il est vital d'identifier clairement et sans ambiguïté le type de gaz dans les bouteilles ainsi que le pourcentage des différents composants de ce gaz. L'identification se fait à l'aide de deux lettres et une série de chiffres. Le Nitrox se note Nx suivi d'un chiffre ou d'une série de chiffres.

### 1.3.1. Notation internationale

C'est la notation dite de la « mer du Nord ». Elle a été adoptée par la majorité des agences internationales de formation. On indique Nx pour Nitrox, suivi du pourcentage d'oxygène. Le pourcentage d'azote se déduit par cette soustraction. La notation prend la forme : Nx [% O<sub>2</sub>]  
Cette forme de notation est parfaitement claire, on ne risque pas de se tromper en notant le pourcentage contrairement à la notation à la française.

Exemple : un Nitrox contenant 40% d'oxygène se notera : « Nx40 »

### 1.3.2. Notation à la française

Cette notation n'est pratiquement utilisée qu'en France<sup>6</sup>. Comme pour la notation internationale on indique Nx pour Nitrox suivi de deux chiffres. Le premier indique le pourcentage d'oxygène et le second le pourcentage d'azote. La notation prend la forme : Nx [% O<sub>2</sub>] / [% N<sub>2</sub>].

Exemple : un Nitrox contenant 40% d'oxygène se notera : « Nx40/60 »

---

<sup>5</sup> Ces points n'ont pas été confirmés ou infirmés par des études probantes. Il est possible que ce ne soit qu'un effet placebo

<sup>6</sup> En pratique, même si on retrouve cette notation dans les ouvrages, les plongeurs français l'abandonne de plus en plus



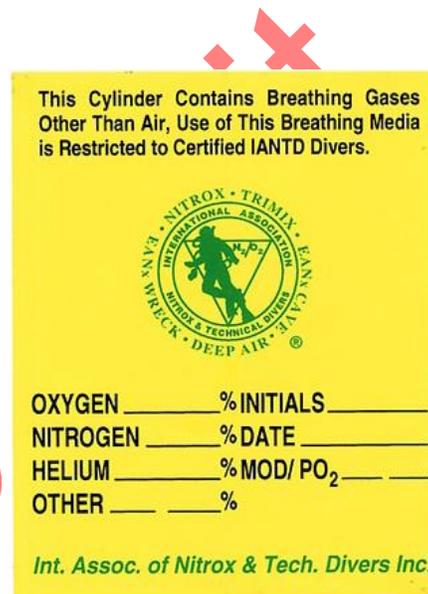
Cette notation est problématique et potentiellement dangereuse. Il est possible de confondre le pourcentage d'oxygène et le pourcentage d'azote. Il est très facile d'inverser les chiffres lors du marquage.

### 1.3.3. Marquage additionnel

Le marquage des bouteilles doit comporter au minimum la profondeur maximum d'utilisation du mélange (MOD). On peut y ajouter :

- La Pression dans la bouteille en bar
- La fraction d'oxygène (FiO<sub>2</sub>) qui a servi au calcul de la profondeur maximum d'utilisation (MOD), le plus généralement 1,4 bar
- La date de fabrication du mélange
- Le nom de l'analyseur et éventuellement celui du gonfleur<sup>7</sup>

Il existe des étiquettes « toutes faites », mais il n'est pas obligatoire de les utiliser. Un simple adhésif fonctionne tout aussi bien !



## 2. Rappel de physique

La physique n'est pas concevable sans unités de mesure clairement établies, définies et universelles<sup>8</sup>. Il existe deux types d'unités, les unités fondamentales et les unités dérivées de celles-ci mais pouvant être relié par une relation mathématique. Les erreurs les plus fréquentes sont : utiliser des °C à la place de degrés Kelvin ; se tromper dans la valeur de la constante des gaz parfaits qui n'est pas un adimensionnel.

**Lorsqu'on calcule il faut veiller à utiliser des unités cohérentes. Les coefficients utilisés dans certaines formules ne sont pas des adimensionnels, il faut y être particulièrement attentif.**  
**On ne multiplie pas des poires avec des pommes !**

### 2.1. Les unités fondamentales.

Type	Unité	Symbole	Remarques
Longueur	mètre	m	
Temps	seconde	s	
Masse	kilogramme	kg	Ne pas confondre avec le « poids, la masse représente une quantité de matière et est invariable quel que soit l'endroit de l'univers
Température	Kelvin	K	<b>K= °Celsius + 273,15</b>
Quantité de matière	mole	mol	Quantité de matière qui contient 6,022 10 <sup>23</sup> atomes ou molécules (Nombre d'Avogadro)

<sup>7</sup> En France et en structure, le nom de l'analyseur doit figurer sur l'étiquette.

<sup>8</sup> Depuis les conférences internationales des poids et mesures de 1963 et 1980 les unités de longueur et de temps ont été redéfini à l'aide de grandeurs universelles : longueur d'onde d'une radiation et célérité de la lumière dans le vide spatial.



## 2.2. Les unités dérivées.

Type	Unité	Symbole	Remarques
Vitesse	m/s	w, v, u	C'est la vitesse d'un mobile qui animé d'un mouvement rectiligne uniforme parcourt un mètre en une seconde.
Accélération, gravité	m/s <sup>2</sup>	a, g	C'est l'accélération d'un mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré dont la vitesse varie en une seconde de 1 m/s
Force (poids)	Newton, N	F	Force=masse (Kg) x accélération ou gravité (m/s <sup>2</sup> ) C'est la force qu'il faut donner à un mobile d'une masse de 1 kg pour lui communiquer une accélération de 1 m/s <sup>2</sup>
Pression	Pascal N/m <sup>2</sup> , Pa	P	C'est la pression qui est due à une force de 1N qui agit sur une surface de 1 m <sup>2</sup> Le Pascal étant une unité très petite on utilise un multiple le bar : 100.000 Pa = 10 <sup>5</sup> Pa = 1 bar
Energie, Chaleur	Joule N.m, J	J, Q	Joule
Puissance	Watt J/s	W	C'est la puissance d'un joule par seconde

## 2.3. Les multiples et sous-multiple

Préfixe	Symbole	Facteur multiplicatif	
Giga	G	1.000.000.000.	10 <sup>9</sup>
Méga	M	1.000.000	10 <sup>6</sup>
Kilo	k	1.000	10 <sup>3</sup>
Hecto	h	100	10 <sup>2</sup>
Déca	da	10	10 <sup>1</sup>
Unité	-	1	1
déci	d	0,1	10 <sup>-1</sup>
centi	c	0,01	10 <sup>-2</sup>
milli	m	0,001	10 <sup>-3</sup>
micro	μ	0,000 001	10 <sup>-6</sup>

## 2.4. Loi des gaz parfait

L'état d'un gaz à un moment donné est caractérisé par ses variables d'état. Ces variables sont la pression, la température et le volume qu'occupe le gaz. Ces variables sont reliées par la relation suivante :

$$PV = nRT$$

Avec :

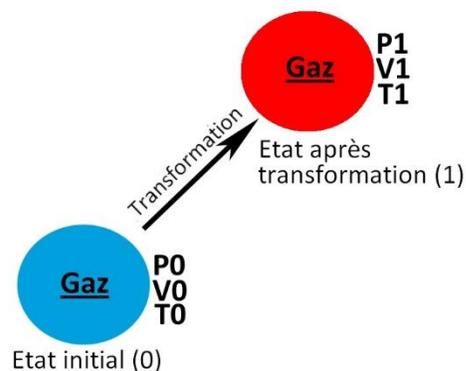
P : Pression en Pascal (Pa)

V : Volume du gaz en m<sup>3</sup>

R : Constante des gaz parfaits 8,314 J/mol K

T : Température en Kelvin (K)

n : Quantité de matière en moles (mol)





Considérons une quantité de gaz  $n$  à l'état 0 qui est caractérisé par ses variables d'état, pression, volume et température soit  $P_0, V_0, T_0$ . Faisons évoluer ce gaz vers l'état 1 caractérisé par les variables d'état  $P_1, V_1, T_1$ . D'après la relation précédente nous pouvons écrire que :  $P_0V_0=nRT_0$  et  $P_1V_1=nRT_1$

$$P_0V_0 = nRT_0 \text{ et } P_1V_1 = nRT_1$$

De ces deux relations il vient que :

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}$$

Si la transformation s'effectue en maintenant une des trois variables d'état constante il existe trois possibilités :

- La température reste constante, il s'agit d'une transformation isotherme.
- La pression reste constante, il s'agit d'une transformation isobare.
- Le volume reste constant, il s'agit d'une transformation isochore.

	Transformation	Constante	Relation	Loi de :
1	Isotherme	$T_0=T_1$	$P_0 V_0 = P_1 V_1$	Boyle <sup>9</sup> -Mariotte <sup>10</sup>
2	Isobare	$P_0=P_1$	$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}$	Charles <sup>11</sup>
3	Isochore	$V_0=V_1$	$\frac{P_0}{T_0} = \frac{P_1}{T_1}$	Gay-Lussac <sup>12</sup>

## 2.5. Mélange des gaz parfaits – Loi de Dalton

Dans un mélange de gaz parfait Dalton <sup>13a</sup> énoncé les lois suivantes :

- La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le volume total du mélange.
- La pression totale du mélange est la somme des pressions partielles.
- La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est égale au produit de la pression totale par le pourcentage du gaz considéré.

<sup>9</sup> Robert Boyle (25/01/1627 - 30/12/1691) physicien et chimiste irlandais.

<sup>10</sup> L'Abbé Edmé Mariotte (1620 - 12/05/1684) physicien et un botaniste français.

<sup>11</sup> Jacques Charles (12/11/1746 – 07/04/1823) chimiste, physicien et aéronaute français.

<sup>12</sup> Louis Joseph Gay-Lussac (6/12/1778 – 9/05/1850) chimiste et physicien français.

<sup>13</sup> John Dalton (06/09/1766 - 27/07/1844) chimiste et physicien britannique



Considérons un réservoir contenant un mélange de n gaz non réactif ayant un pourcentage  $[x_i]$  dans le mélange. La loi de Dalton s'écrit sous la forme :

$$Pp_i = P [x_i]$$

$$P = \sum_{i=1}^n Pp_i = Pp_1 + Pp_2 + \dots Pp_n$$

Avec :

P : Pression totale du mélange.

$Pp_i$  : Pression partielle de chaque constituant du mélange.

$[x_i]$  : Pourcentage (fraction) du gaz considéré dans le mélange.

### Exemple

On mesure la pression d'une bouteille de plongée qui est de 200 bar cette bouteille contient de l'air qui est constitué du mélange des gaz suivant :  $N_2=79\%$   $O_2=21\%$

Mélange	Concentration		Pression partielle
	Symbole	Valeur	
Oxygène	$[O_2]$	0,21	$200 \times 0,21 = 42$ bars
Azote	$[N_2]$	0,79	$200 \times 0,79 = 158$ bars
Pression totale			200 bars

### Exemple

La Pression partielle d' $O_2$  à 40m est de 1.5 bar. Quel est le pourcentage d' $O_2$  dans ce mélange ?

$$P = \frac{40}{10} + 1 = 5 \text{ bar} \quad [O_2] = \frac{1,5}{5} = 0,3 \text{ soit } 30\%$$

## 3. Les limites du Nitrox

L'utilisation du Nitrox implique de calculer deux paramètres. La profondeur équivalente air qui permet d'utiliser les tables classiques « air » et la profondeur maximum d'utilisation. DAN<sup>14</sup> préconise de ne pas dépasser une  $ppO_2$  de 1,4 bar au fond et 1,6 bar en décompression.

### 3.1. Profondeur équivalente air - Equivalent Air Depth (EAD)

Le principal facteur dans la détermination de la décompression est la pression partielle de l'azote, ou encore en toute rigueur de l'ensemble des gaz neutres. Dans le Nitrox, l'oxygène ne joue aucun rôle dans cette détermination. On pourra donc utiliser les tables de la plongée à l'air à condition qu'il y ait équivalence des pressions partielles d'azote. La profondeur équivalente (EAD) est la profondeur qui donne le même profil de décompression qu'une plongée faite à l'air pour la même durée. C'est avec cette profondeur calculée que nous utiliserons les tables.

<sup>14</sup> Diving Alert Network



$$EAD = \frac{\left(1 - \frac{\%O_2}{100}\right) (Pr + 10)}{0,79} - 10$$

Avec

EAD : profondeur équivalente (m)

Pr : étant la profondeur réelle de plongée (m)

%O<sub>2</sub> : Pourcentage d'oxygène dans le Nitrox

Exemple :

Calculer l'EAD pour un Nitrox contenant 32% d'oxygène à -33m?

$$EAD = \frac{\left(1 - \frac{32}{100}\right) (33 + 10)}{0,79} - 10 = 27m$$

[Calculateur EAD](#) (lien vers jctdive.be)

### 3.2. Profondeur maximum d'utilisation – Maximum Operating Depth (MOD)

L'oxygène devenant neurotoxique à une certaine profondeur, il est essentiel de connaître la fraction d'oxygène admissible, dans un mélange, à une profondeur donnée (planifiée). Le Maximum Operating Depth: est la profondeur maximale d'utilisation du mélange. Elle est fonction de la concentration en O<sub>2</sub> et ne tient pas compte de l'effet narcotique. Elle se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$MOD = 10 \left\{ \left( \frac{FiO_2}{\%O_2/100} \right) - 1 \right\}$$

Avec :

MOD : Maximum Operating Depth (m)

%O<sub>2</sub> : Pourcentage d'oxygène du mélange (%)

FiO<sub>2</sub> : Pression partielle oxygène admissible (bar)

DAN (Diving Alert Network) préconise : 1,4 bar pour un mélange fond et 1,6 bar pour un mélange de décompression

[Calculateur MOD](#) – Lien jctdive.be

Exemple

Calculer le MOD pour un Nitrox contenant 32% d'oxygène en considérant que la pression partielle d'oxygène est de maximum 1,4 bar ?

$$MOD = 10 \left\{ \left( \frac{1,4}{32/100} \right) - 1 \right\} = 33,75m \text{ soit } 33m$$



### 3.3. Tableau des EAD et des pressions partielles oxygène

A l'aide des relations précédentes ont a construit le tableau qui donne les profondeurs équivalentes air (EAD) en fonction des Nitrox les plus courants (entre 25 et 40% d'oxygène), ainsi que les pressions partielle d'oxygène (PO2). Les valeurs en bleu sont les valeurs limites préconisés par DAN pour les mélanges « fond ».

m	bar	% O2 25		26		27		28		29		30		31		32	
		PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD
9	1,9	0,48	9	0,49	8	0,51	8	0,53	8	0,55	8	0,57	7	0,59	7	0,61	7
12	2,2	0,55	11	0,57	11	0,59	11	0,62	11	0,64	10	0,66	10	0,68	10	0,70	9
15	2,5	0,63	14	0,65	14	0,68	14	0,70	13	0,73	13	0,75	13	0,78	12	0,80	12
18	2,8	0,70	17	0,73	17	0,76	16	0,78	16	0,81	16	0,84	15	0,87	15	0,90	15
21	3,1	0,78	20	0,81	20	0,84	19	0,87	19	0,90	18	0,93	18	0,96	18	0,99	17
24	3,4	0,85	23	0,88	22	0,92	22	0,95	21	0,99	21	1,02	21	1,05	20	1,09	20
27	3,7	0,93	26	0,96	25	1,00	25	1,04	24	1,07	24	1,11	23	1,15	23	1,18	22
30	4	1,00	28	1,04	28	1,08	27	1,12	27	1,16	26	1,20	26	1,24	25	1,28	25
33	4,3	1,08	31	1,12	31	1,16	30	1,20	30	1,25	29	1,29	29	1,33	28	1,38	28
36	4,6	1,15	34	1,20	34	1,24	33	1,29	32	1,33	32	1,38	31	1,43	31	1,47	30
39	4,9	1,23	37	1,27	36	1,32	36	1,37	35	1,42	35	1,47	34	1,52	33	1,57	33
42	5,2	1,30	40	1,35	39	1,40	39	1,46	38	1,51	37	1,56	37	1,61	36	1,66	35
45	5,5	1,38	43	1,43	42	1,49	41	1,54	41	1,60	40	1,65	39				
48	5,8	1,45	46	1,51	45	1,57	44	1,62	43	1,68	43						

m	bar	% O2 33		34		35		36		37		38		39		40	
		PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD	PO2	EAD
9	1,9	0,63	7	0,65	6	0,67	6	0,68	6	0,70	6	0,72	5	0,74	5	0,76	5
12	2,2	0,73	9	0,75	9	0,77	9	0,79	8	0,81	8	0,84	8	0,86	7	0,88	7
15	2,5	0,83	12	0,85	11	0,88	11	0,90	11	0,93	10	0,95	10	0,98	10	1,00	9
18	2,8	0,92	14	0,95	14	0,98	14	1,01	13	1,04	13	1,06	12	1,09	12	1,12	12
21	3,1	1,02	17	1,05	16	1,09	16	1,12	16	1,15	15	1,18	15	1,21	14	1,24	14
24	3,4	1,12	19	1,16	19	1,19	18	1,22	18	1,26	18	1,29	17	1,33	17	1,36	16
27	3,7	1,22	22	1,26	21	1,30	21	1,33	20	1,37	20	1,41	20	1,44	19	1,48	19
30	4	1,32	24	1,36	24	1,40	23	1,44	23	1,48	22	1,52	22	1,56	21	1,60	21
33	4,3	1,42	27	1,46	26	1,51	26	1,55	25	1,59	25	1,63	24	1,68	24	1,72	23
36	4,6	1,52	30	1,56	29	1,61	28	1,66	28	1,70	27						
39	4,9	1,62	32	1,67	31	1,72	31										
42	5,2	1,72	35														

#### Exemple

On planifie une plongée à 36m quel est le Nitrox le plus favorable en tenant compte des prescriptions du DAN ? Quel est la PPO<sub>2</sub> et le MOD ?

On rentre dans le tableau à 36m. La valeur PO<sub>2</sub> en bleu donne le maximum de la pression partielle O<sub>2</sub> tolérable (1,38) et le % d'oxygène dans le Nitrox (30%)



### 3.4. Le « Best Mix »

---

Littéralement « quel est le meilleur mélange à utiliser ». Cette notion vient de la plongée technique. Elle consiste à calculer et à fabriquer un mélange qui répond le mieux à une plongée dont la profondeur est strictement planifiée. Le problème consiste à optimiser la décompression. Ce qui revient à trouver un pourcentage d'oxygène qui donne la « meilleure fenêtre O<sub>2</sub> »<sup>15</sup> tout en respectant la pression partielle maximum d'oxygène toléré.

$$Nx = \frac{FiO_2}{(Pr/10) + 1} 100$$

Avec

Pr : Profondeur planifiée (m)

Nx : Pourcentage d'oxygène du mélange (%)

FiO<sub>2</sub> : Pression partielle oxygène admissible (bar)

DAN (Diving Alert Network) préconise : 1,4 bar pour un mélange fond et 1,6 bar pour un mélange de décompression

[Calculateur du Best Mix](#) – Lien jctdive.be

Exemple

Déterminer le meilleur Nitrox pour une plongée à 30m en tenant compte que la pression partielle d'oxygène admissible est de 1,4 bar ?

$$Nx = \frac{1,4}{(30/10) + 1} 100 = 35\%$$

Le tableau des EAD au paragraphe 3.1.3 donne une bonne idée du « Best Mix » en se basant sur les valeurs de la pression partielle d'oxygène en bleu.

### 3.5. Nitrox et plongée en altitude

---

Pour les plongées faites en altitude les règles établies par le commandant Chauvin restent d'application. Il faut, dans ce cas, utiliser la « profondeur fictive » pour calculer la profondeur équivalente air (EAD). L'utilisation du Nitrox présente de nombreux avantages lors des plongées en altitude.

[Pour en savoir plus sur la plongée en altitude.](#)

---

<sup>15</sup> Au niveau de l'alvéole pulmonaire, c'est la différence entre la tension O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> du côté artériel et du côté veineux. On considère qu'elle est optimale pour une pression partielle d'oxygène comprise entre 1,3 et 1,6 bar (Johnny E. Brian, Jr. Associate Professor Department of Anesthesia University of Iowa College of Medicine)



## 4. L'oxygène, ses dangers - effet Paul Bert

### 4.1. Généralités

L'oxygène est un gaz paramagnétique, incolore, insipide et inodore indispensable à la vie humaine mais qui n'est toléré par l'homme que dans une plage de pression partielle assez étroite. En dehors de cette plage, des effets cliniques peuvent apparaître sous deux formes : la crise neurotoxique ou « Effet Paul Bert » et la pneumonie chimique ou « Effet Lorrain – Smith ».

<b>Seuil toxique de l'oxygène</b>	
<b>PpO<sub>2</sub> (mélanges)</b>	
0,10 bar	Anoxie, inconscience, coma, morts
0,16 bar	Signe d'hypoxie
0,21 bar	Normoxie
0,50 bar	Exposition maximum à saturation
1,40 bar	Exposition maximum conseillée en plongée loisir
1,60 bar	Exposition maximum en plongée loisir (Exposition maximum légale en plongée d'incursion), mélange de décompression
2,80 bar	Utilisation thérapeutique

### 4.2. L'effet Paul Bert

Il s'agit d'une intoxication due à la respiration d'oxygène à des pressions partielles élevées, qui peut se traduire par une crise hyperoxique. L'oxygène s'attaque au système nerveux central ou "Central Nervous System" (CNS) provoquant des crises de convulsions ressemblant à des crises d'épilepsie. Ces crises sont dues au dysfonctionnement du métabolisme cellulaire provoquée par la production de produits oxydants (superoxydes, peroxydes, radicaux O+) qui nuisent à certains enzymes au niveau de la cellule. Cet effet néfaste de l'oxygène a été mis pour la première fois en évidence par le physiologiste Paul Bert en 1778. Les recherches récentes effectuées par le NOAA<sup>16</sup> ont permis d'établir des règles permettant de déterminer le temps de latence avant l'apparition des symptômes hyperoxiques. L'organisme possède des moyens de défense naturel contre la production d'oxydant ce qui explique que tous les plongeurs ne sont pas égaux devant la crise hyperoxique.

#### 4.2.1. Les défenses naturelles contre les oxydants

- Les vitamines E présentent dans l'organisme.
- La réduction de l'O<sub>2</sub> par des enzymes qui produisent de l'eau avec ou sans étape intermédiaire de production d'hydrogène.
- La régénération des enzymes oxydés.

#### 4.2.2. Les symptômes de l'intoxication à l'oxygène

Les symptômes ne sont pas toujours faciles à détecter sous l'eau et n'apparaissent généralement sans signes précurseurs. Ils peuvent être annoncés par le tremblement des lèvres. Dès que ce

<sup>16</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)



symptôme apparaît, il faut remonter prudemment pour éviter la surpression pulmonaire et faire chuter la PpO<sub>2</sub>. Les symptômes sont : anxiété ; tremblements ; bourdonnements d'oreilles ; irritabilité ; vertiges ; convulsions ; euphorie ; nausées ; réduction du champ visuel ; vision en effet de tunnel.

#### 4.2.3. Facteurs favorisant la crise hyperoxique

Plusieurs facteurs peuvent favoriser l'apparition d'une crise hyperoxique : l'hypercapnie ; les efforts L'essoufflement ; l'anxiété ; la fatigue ; le stress, l'eau froide en dessous de 9° ; l'eau chaude au-dessus de 29° ; les médicaments contenant de la pseudoéphédrine.

#### 4.2.4. Prévention de la crise hyperoxique

- Calculer le MOD d'une manière conservatrice (PpO<sub>2</sub> de 1,4bar).
- Ne pas dépasser, sur le fond, une PpO<sub>2</sub> de 1,4bar qui est la valeur recommandée par DAN.
- Respecter les règles édictée par le NOAA en matière de CNS.
- Limiter la durée de séjour à la profondeur maximale.
- Toujours planifier sa plongée.
- Respecter le planning.
- Reconnaître les signes avant-coueurs de l'hyperoxie.
- Remonter dès le premier signe avant-coureur.

#### 4.2.5. Conduite à tenir en cas de crise hyperoxique

Le schéma ci-dessous donne une idée du déroulement d'une crise hyperoxique et de la conduite à tenir lors des différentes phases de cette crise.

0	2	5	Minutes	35
Phase tonique	Phase clonique		Phase résolutive	
0,5 à 2 minutes	2 à 3 minutes		5 à 30 minutes	
Contractions musculaires Arrêt ventilation Perte de connaissance	Convulsions Ventilation irrégulière Morsure de la langue		Relâchement musculaire Reprise de la conscience Confusion, agitation Amnésie	
blocage de la glotte Risque de SP				
Ne PAS remonter la victime Maintenir de détendeur	Remonter la victime		Poursuivre le sauvetage	



## 5. Le %CNS Clock

Le NOAA a établi un système qui permet d'évaluer l'intoxication du système nerveux central par l'oxygène, qui est une véritable « horloge » de l'intoxication à l'oxygène. Le %CNS Clock (Central Nervous System) est exprimé en pourcentage (%) de la durée maximum d'exposition. Plus la valeur est proche de 100%, plus le risque d'intoxication est grand. Ce système de calcul est largement répandu dans toutes les associations de plongeurs Nitrox.

### 5.1. Exposition Maximum à l'oxygène

Le NOAA a établis des tableaux qui définissent un temps maximum d'exposition à l'oxygène pour différentes pressions partielles (PpO<sub>2</sub>). A partir de ce tableau une formule simple permet de calculer son intoxication à l'oxygène en pourcent (% CNS Clock).

Temps maximum d'exposition à l'oxygène en minutes d'après le NOAA (%CNS=100%)		
PpO <sub>2</sub>	Plongée unitaire (ETL)	Cumulée en 24 h
0.6	720	720
0.7	570	570
0.8	450	450
0.9	360	360
1.0	300	300
1.1	240	270
1.2	210	240
1.3	180	210
1.4	150	180
1.5	120	180
1.6	45	150

$$\%CNS = \frac{100 DTD}{ETL}$$

Avec  
 %CNS : pourcentage CNS (%)  
 DTD : temps de plongée à une profondeur déterminée (Dive Time at given Depth). (minutes)  
 ETL : temps d'exposition maximum à une PPO<sub>2</sub> donnée (Exposure Time Limits) (minutes)

Le NOAA conseille de ne pas dépasser un %CNS de 75%

#### Règles d'utilisations

- Si pour une plongée unitaire on atteint la valeur limite du tableau, il faut attendre 2 heures pour la plongée successive.
- Si on atteint la valeur limite du tableau en plongée successive dans une période de 24 heures il faut attendre 12 heures avant de replonger.
- Pour une successive avec un intervalle de moins de deux heures, il faut ajouter les temps de plongée et voir si on ne dépasse pas la valeur limite pour une plongée unitaire. On utilise pour la détermination la PPO<sub>2</sub> la plus élevée.

#### Exemple

La première plongée est d'une durée de 35 minutes à la profondeur de 30m en utilisant un Nx36. La plongée successive est d'une durée de 40 minutes à la profondeur de 20m en utilisant un Nx 36, l'intervalle entre les deux plongée est de 1Hr30 minutes. La plongée successive peut-elle se faire et si oui quelle est sa durée maximale ? Quel est le %CNS de la 1<sup>er</sup> plongée ?



Plongée 1:  $PpO_2 = 4 \times 36 / 100 = 1.44$  bar soit 1.5 bar

Plongée 2:  $PpO_2 = 3 \times 36 / 100 = 1.08$  bar soit 1.1 bar

Comme l'intervalle de moins de deux heures, il faut ajouter les temps des plongées. Le temps à considérer est de  $35 + 40 = 75$  minutes et la  $PPO_2$  de 1.5 bar. La table donne un temps maximum (ETL) de 120 minutes. La 2<sup>e</sup> plongée peut donc se faire. La durée maximale sera de  $120 - 35 = 85$  minutes.

$$\%CNS = \frac{100 \times 35}{120} = 29\%$$

## 5.2. Variation du %CNS Clock par minute

Le tableau ci-dessous donne la variation du % de CNS par minute en fonction de la pression partielle d'oxygène ( $PPO_2$ ). Ce tableau permet de déterminer facilement le %CNS pour une plongée multiniveaux.

PPO <sub>2</sub> Bar	%CNS/min	Temps max de plongée minutes	PPO <sub>2</sub> Bar	%CNS/min	Temps max de plongée minutes
0,60	0,14	571	1,18	0,46	174
0,62	0,14	571	1,20	0,47	170
0,64	0,15	533	1,22	0,48	167
0,66	0,16	500	1,24	0,52	154
0,68	0,17	471	1,26	0,52	154
0,70	0,18	444	1,28	0,54	148
0,72	0,18	444	1,30	0,56	143
0,74	0,19	421	1,32	0,57	140
0,76	0,20	400	1,34	0,60	133
0,78	0,21	381	1,36	0,62	129
0,80	0,22	364	1,38	0,63	127
0,82	0,23	348	1,40	0,65	123
0,84	0,24	333	1,42	0,68	118
0,86	0,25	320	1,44	0,71	113
0,88	0,26	308	1,46	0,74	108
0,90	0,28	286	1,48	0,78	103
0,92	0,29	276	1,50	0,83	96
0,94	0,30	267	1,52	0,93	86
0,96	0,31	258	1,54	1,04	77
0,98	0,32	250	1,56	1,19	67
1,00	0,33	242	1,58	1,47	54
1,02	0,35	229	1,60	2,22	36
1,04	0,36	222	1,62	5,00	16
1,06	0,38	211	1,65	6,25	13
1,08	0,40	200	1,67	7,69	10
1,10	0,42	190	1,70	10,00	8
1,12	0,43	186	1,72	12,50	6
1,14	0,43	186	1,74	20,00	4
1,16	0,44	182	1,77	25,00	3



### Exemple

On effectue une plongée à 35m de profondeur au Nitrox 32 d'une durée de 25 minutes, Puis on se balade pendant 40 minutes à 12m de profondeur et on termine la plongée avec 15 minutes de paliers à 3m à l'oxygène. Quel est le %CNS en fin de plongée ?

Profondeur (m)	Durée (min)	[O2]	PPO2 (bar)	%CNS/min	%CNS	
35	25	0,32	4,5 x 0,32 = 1,44	0,71	25 x 0,71 = 17,8	
12	40	0,32	2,2 x 0,32 = 0,70	0,18	40 x 0,18 = 7,2	
3	15	1,00	1,3	0,56	15 x 0,56 = 8,4	
					% CNS total	33,4 %
<a href="#">Calculateur de %CNS</a> – Lien vers jctdive.be						

### 5.3. Diminution du %CNS en surface

En surface le % CNS va décroître exponentiellement avec une période de 90 minutes. Ce qui signifie que toutes les 90 minutes le %CNS sera divisé par deux. Ce qui peut se traduire par la relation mathématique :

$$\%CNS_t = \%CNS_{t_0} \times (0,5)^{\frac{t}{90}}$$

Cette relation peut être écrite sous sa forme exponentielle. Ce qui va permettre d'extrapoler le temps d'attente pour diminuer le %CNS à une valeur donnée.

$$\%CNS_t = \%CNS_{t_0} \times e^{-kt}$$

$$k = -\frac{1}{90} \ln\left(1 - \frac{50}{100}\right) = 0,0077016$$

$$t = \left(\frac{-1}{k}\right) \ln\left(\frac{\%CNS_t}{\%CNS_{t_0}}\right)$$

Avec :

% CNS<sub>t</sub> : %CNS calculé au temps t (%)

t : Intervalle de surface en minutes e=2.718

%CNS<sub>t0</sub> : %CNS juste à la sortie de la dernière plongée.

e : base des logarithme népérien =2.718

k : Coefficient exponentiel

Ces types de calcul étant difficiles à faire on a généré à l'aide de ces formules des tableaux faciles à utiliser et donnant une bonne approximation.

**Le NOAA recommande de ne pas commencer une plongée si le %CNS résiduel dépasse 40%**



### 5.3.1. Réduction du %CNS en fonction de l'intervalle de surface

% CNS <sub>t0</sub>	Intervalle de surface en minutes								
	15	30	60	90	120	180	240	300	360
100	89,09	79,37	63,00	50,00	39,69	25,00	15,75	9,92	6,25
95	84,64	75,40	59,85	47,50	37,70	23,75	14,96	9,43	5,94
90	80,18	71,43	56,70	45,00	35,72	22,50	14,17	8,93	5,63
85	75,73	67,46	53,55	42,50	33,73	21,25	13,39	8,43	5,31
80	71,27	63,50	50,40	40,00	31,75	20,00	12,60	7,94	5,00
75	66,82	59,53	47,25	37,50	29,76	18,75	11,81	7,44	4,69
70	62,36	55,56	44,10	35,00	27,78	17,50	11,02	6,94	4,38
65	57,91	51,59	40,95	32,50	25,80	16,25	10,24	6,45	4,06
60	53,45	47,62	37,80	30,00	23,81	15,00	9,45	5,95	3,75
55	49,00	43,65	34,65	27,50	21,83	13,75	8,66	5,46	3,44
50	44,54	39,69	31,50	25,00	19,84	12,50	7,87	4,96	3,13
45	40,09	35,72	28,35	22,50	17,86	11,25	7,09	4,46	2,81
40	35,64	31,75	25,20	20,00	15,87	10,00	6,30	3,97	2,50
35	31,18	27,78	22,05	17,50	13,89	8,75	5,51	3,47	2,19
30	26,73	23,81	18,90	15,00	11,91	7,50	4,72	2,98	1,88
25	22,27	19,84	15,75	12,50	9,92	6,25	3,94	2,48	1,56
20	17,82	15,87	12,60	10,00	7,94	5,00	3,15	1,98	1,25
15	13,36	11,91	9,45	7,50	5,95	3,75	2,36	1,49	0,94
10	8,91	7,94	6,30	5,00	3,97	2,50	1,57	0,99	0,63

#### Exemple

Que devient le %CNS, de notre exemple précédent (33,4%) après 2 heures d'intervalle ?

La solution exacte :  $\%CNS_t = 33,4 \times (0,5)^{\frac{120}{90}} = 33,4 \times 0,397 = 13,25 \%$

La solution approchée en utilisant le tableau : en rentre dans le tableau avec le %CNS<sub>t0</sub>=35 et au temps 120 minutes et on trouve : 13,89%

[Calculateur : Réduction du %CNS](#) – Lien vers jctdive.be



### 5.3.2. Intervalle de temps pour une réduction du %CNS planifiée

%CNS Sortie de plongée	%CNS planifié pour plongée suivante														
	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
100	0	6,7	13,7	21,1	29,0	37,4	46,3	55,9	66,3	77,6	90,0	103,7	119,0	136,3	156,3
95		0,0	7,0	14,4	22,3	30,7	39,7	49,3	59,7	71,0	83,3	97,0	112,3	129,7	149,7
90			0,0	7,4	15,3	23,7	32,6	42,3	52,6	63,9	76,3	90,0	105,3	122,6	142,6
85				0,0	7,9	16,3	25,2	34,8	45,2	56,5	68,9	82,6	97,9	115,2	135,2
80					0,0	8,4	17,3	27,0	37,4	48,7	61,0	74,7	90,0	107,3	127,4
75						0,0	9,0	18,6	29,0	40,3	52,6	66,3	81,6	99,0	119,0
70							0,0	9,6	20,0	31,3	43,7	57,4	72,7	90,0	110,0
65								0,0	10,4	21,7	34,1	47,7	63,0	80,4	100,4
60									0,0	11,3	23,7	37,4	52,6	70,0	90,0
55										0,0	12,4	26,1	41,3	58,7	78,7
50											0,0	13,7	29,0	46,3	66,3
45												0,0	15,3	32,6	52,6

Exemple

Combien de temps pour passer d'un %CNS de 60 à 30%

$$t = \left( \frac{-1}{0,007706} \right) \ln \left( \frac{30}{60} \right) = (-129,84) \times (-0,693147) = 90 \text{ minutes}$$

Exemple

Combien de temps pour passer d'un %CNS de 63 à 38%

La solution exacte  $t = \left( \frac{-1}{0,007706} \right) \ln \left( \frac{38}{63} \right) = (-129,84) \times (-0,505548) = 65,64 \text{ minutes}$

La solution exacte approchée. On rentre dans le tableau avec les valeur 63 >> 65% et 38 >> 35 qui sont les valeurs les plus conservatives et on trouve : 80 minutes

[Calculateur Intervalle %CNS donné](#) – Lien jctdive.be



## 6. L'effet Lorrain - Smith

C'est le deuxième effet néfaste de l'oxygène. L'effet Lorrain-Smith peut s'apparenter à une « pneumonie chimique » qui réduit la capacité vitale<sup>17</sup>. Cet effet ne se manifeste que pour des expositions à des pressions partielles d'oxygène supérieures à 0,5 bar et pour des durées d'expositions longues. Cet effet est négligeable pour la plongée loisir. Pour quantifier cette intoxication, le NOAA a développé le concept de l'OTU (Oxygen Tolerance Unit). Certains auteurs utilisent le terme UPTD (Unit of Pulmonary Toxic Dose) pour désigner l'OTU.

On considère que pour une plongée l'accroissement de 625 OTU est parfaitement acceptable. Néanmoins cette tolérance diminue avec le nombre de jours durant lequel le plongeur est exposé. Pour des expositions répétitive sur plusieurs jours, Le NOAA a mis au point la procédure REPEX.

### 6.1. Symptômes

- Figure rosâtre.
- Difficulté respiratoire.
- Gêne au niveau de la cage thoracique.
- Douleur au niveau des bronches.
- Douleur et toux sèche incontrôlable, aggravée à l'inspiration.
- Diminution de la capacité vitale.
- Inflammation du surfactant<sup>18</sup> et des alvéoles pulmonaires.
- Œdème aigu du poumon.

### 6.2. Détermination de l' Oxygen Tolerance Unit (OTU)

On peut utiliser les formules suivantes pour déterminer l'indice de toxicité pulmonaire. Un OTU représente l'exposition durant une minute à la pression partielle d'oxygène (PPO<sub>2</sub>) de 1 bar.

$$OTU = t \times Kp \quad Kp = \left[ \frac{(PPO_2 - 0,5)}{0,5} \right]^{0,833}$$

Avec :

t : le temps d'exposition (minutes)

PPO<sub>2</sub> : la pression partielle d'oxygène (bar)

Pour faciliter le calcul, nous donnons ci-dessous les valeurs du coefficient Kp en fonction de la pression partielle d'oxygène PPO<sub>2</sub>. Il suffit de multiplier ce coefficient par le temps d'exposition (t) pour trouver l'indice OTU

<sup>17</sup> La capacité vitale est le volume pulmonaire entre le niveau inspiratoire maximal et le niveau expiratoire maximal

<sup>18</sup> Agent tensioactif présent à la surface des alvéoles pulmonaires.



PPO <sub>2</sub>	Kp								
0,600	0,262	0,820	0,690	1,040	1,066	1,260	1,417	1,480	1,752
0,620	0,305	0,840	0,725	1,060	1,099	1,280	1,448	1,500	1,781
0,640	0,346	0,860	0,761	1,080	1,132	1,300	1,479	1,520	1,811
0,660	0,387	0,880	0,796	1,100	1,164	1,320	1,510	1,540	1,841
0,680	0,427	0,900	0,830	1,120	1,196	1,340	1,541	1,560	1,870
0,700	0,466	0,920	0,865	1,140	1,228	1,360	1,571	1,580	1,899
0,720	0,505	0,940	0,899	1,160	1,260	1,380	1,601	1,600	1,929
0,740	0,543	0,960	0,933	1,180	1,292	1,400	1,632	1,620	1,958
0,760	0,580	0,980	0,967	1,200	1,324	1,420	1,662	1,640	1,987
0,780	0,617	1,000	1,000	1,220	1,355	1,440	1,692	1,660	2,016
0,800	0,653	1,020	1,033	1,240	1,386	1,460	1,722	1,680	2,045

Exemple

Quel est l'OTU pour une plongée de 30 minutes à la pression partielle de 1.4 bar ?

Le tableau donne pour une PPO<sub>2</sub> de 1.4 bars, une valeur de Kp égale à 1.632

OTU= 1.632x30 = 48.96 ce qui est largement inférieur à la limite de 625.

### 6.3. Réduction de la capacité vitale.

La capacité vitale (Cv) est la quantité d'air contenue dans les poumons entre une inspiration maximale et une expiration maximale. La respiration vitale se réduit lorsqu'on respire un mélange contenant de l'oxygène à une pression partielle de plus de 0,5 bar. Cette réduction de la capacité vitale peut se calculer par la relation ci-dessous

$$\%Cv = -0,011 (PPO_2 - 0,5) t$$

Avec :

%CV : Pourcentage de réduction de la capacité vitale (%)

PpO<sub>2</sub> : Pression partielle d'oxygène (bar)

t : Durée d'exposition à cette pression partielle (minutes)

Exemple

Quel est la réduction de la capacité vitale pour une plongée de 30 minutes à la pression partielle de 1.4 bar ?

$$\%CV = -0,011(1,4 - 0,5) \times 30 = -0,297 \%$$

[Calculateur OTU et Réduction CV](http://www.jctdive.be)- Lien jctdive.be



## 6.4. Méthode REPEX – Exposition répétitive

---

Jours	OTU / jour	OTU cumulé
1	850	850
2	700	1400
3	620	1860
4	525	2100
5	460	2300
6	420	2520
7	380	2660
8	350	2800
9	330	2970
10	310	3100
11 à 30	300	

Lorsque l'exposition à une pression partielle d'oxygène se fait durant plusieurs jours consécutifs, la limite journalière admissible de 625 OTU doit être réduite. Concrètement, pour le plongeur loisir c'est le cas lors durant les vacances. Le NOAA a proposé les valeurs reprises dans le tableau ci-contre. La colonne centrale (OTU/jour) donne les valeurs moyennes limites journalière. La colonne de droite, les valeurs cumulées à ne pas dépasser durant le séjour.

Il est fortement conseillé de prendre une journée de repos après 7 jours de plongées consécutifs pour remettre les compteurs « azote » et « oxygène » à zéro !



## 7. Planification des plongées Nitrox

**Toutes les règles de plongée à l'air restent valables pour la plongée Nitrox. Le respect de la planification au Nitrox est impératif.**

Dans cet ouvrage, deux cas sont envisagés la planification en plongée récréative et la plongée en Extended Range. Pour différencier les deux nous utiliserons les notations [REC] pour récréatif et [ER] pour Extended Range.

### 7.1. Généralités [REC], [ER]

---

#### 7.1.1 Avant la plongée

- **Prise en charge de la bouteille**
  - Vérification de la bouteille, Numéro, date d'épreuve, marquage NITROX, étiquettes
  - Vérification de la pression de la bouteille.
  - Vérification du %d'O<sub>2</sub> avec l'oxymètre (ne pas oublier de l'étalonner)
  - Calculer la profondeur maximum d'utilisation.
  - Vérifier si l'étiquette sur la bouteille est correctement remplie en fonction des différents paramètres mesurés.
  - Compléter et signer le registre de gonflage.
- **Choix du mode de calcul décompression**
  - Ordinateur de plongée.
  - Table NITROX adaptée au % d'O<sub>2</sub>
  - Table à l'air et calcul de la profondeur équivalente.
  - Logiciel générant un « Run Time » [ER].
- **Détermination des paramètres**
  - Choix de la PpO<sub>2</sub> (froids, courant...) et détermination de la profondeur.
  - Calculer et noter la profondeur équivalente.
  - Vérification de son %CNS de départ
  - Détermination de la durée maximum de plongée.
  - Vérifier en fonction de ces paramètres si le %CNS en fin de plongée est acceptable, au besoin modifier les paramètres (profondeur et temps).
- **Détermination des procédures d'urgences**
  - Analyse de risque
  - What-If

#### 7.1.2. La plongée

- Ne pas aller au-delà des paramètres calculés, respecter la planification



### 7.1.3. Après la plongée

Calculer son %CNS réel et Indiquer dans son carnet, en plus des données classiques les paramètres propre à la plongée NITROX. Le %CNS ; le type de mélange ; le mode de décompression.

## 7.2. Calcul de l'autonomie [REC] [ER]

### 7.2.1. Règle des tiers.

La fameuse règle des tiers, qui n'est valable que pour des plongées ou le retour à la surface est possible à tout moment. Elle prévoit 1/3 de la réserve de gaz pour l'aller, 1/3 pour le retour et 1/3 pour la sécurité et le palier. Cette règle simpliste est très valable pour la plongée loisir avec peu ou pas de palier. Elle est à prendre avec la plus grande prudence pour

les plongées en ER ou les paliers peuvent être plus longs et où il faut tenir compte d'une perte éventuelle de la totalité des gaz de déco. En fait la sécurité consiste à prévoir un boni de 30% sur tous les gaz utilisés suivant le calcul de consommation, en tenant compte que la déco pour être faites sur le gaz de fond en cas de perte totale du gaz de déco.

Uniquement valable s'il est possible de rejoindre la surface à n'importe quel moment

	Entrée/sortie		Rebroussement
1/3	4000 l	Aller: consommation 1330 l	2670 l
	Sécurité: 0 l	Retour: consommation 1330 l	Perte d'une bouteille Reste: 1335 l
1/4	4000 l	Aller: consommation 1000 l	3000 l
	Sécurité: 500 l	Retour: consommation 1000 l	Perte d'une bouteille Reste: 1500 l
1/5	4000 l	Aller: consommation 800 l	3200 l
	Sécurité: 800 l	Retour: consommation 800 l	Perte d'une bouteille Reste: 1600 l

Plongée sous plafond

### 7.2.2. Détermination de la consommation.

En moyenne un plongeur consomme 20 litres de mélange par minutes et par bar de pression absolue. Le calcul de consommation consiste à additionner la consommation pour chaque niveau. Il faut tenir compte qu'il est toujours possible de perdre le mélange de décompression et qu'il faudra faire les paliers sur le mélange fond.

$$Cons = \sum_{1}^{n} 20 \times Pa_n \times t_n$$

Avec :

Cons : Consommation en litres

Pa<sub>n</sub> : Pression absolue au niveau n en bar

t<sub>n</sub> : Temps passé, en minute au niveau n



### Exemple

On fait une plongée à 48m durant 20 minutes. La table US-Navy 2008 donne une déco de 12 minutes à 6m à l'O<sub>2</sub> ou 22 minutes à 6m à l'air. Calculez les consommations

	Profondeur	Pa (bar)	Durée (min)	Cons air (litres)	Cons O <sub>2</sub> (litres)
Plongée	48 m	5,8	20	2320	-
Remontée	48 à 0 m	3,4 (moy)	5	340	
Palier O <sub>2</sub>	6m	1,6	12	0	384
Palier air	6m	1,6	22	704	

Plongée sans perte du gaz de déco coefficient de sécurité : 1,3

Air :  $1,3 \times (2320 + 340) = 3458$  litres soit un 2x10 litres à 200 bar

Coefficient de sécurité 1,5

O<sub>2</sub> :  $1,3 \times 384 = 499$  litres

Plongée avec perte du gaz de déco coefficient de sécurité : 1,3

Air :  $1,3 \times (2320 + 340 + 704) = 4373$  litres soit un 2x12 litres à 200 bar (4800 litres)

Réserve =  $4800 - 4373 = 427$  litres soit 17 bars



## 8. Moyens de détermination de la décompression

### 8.1. Avant-propos

Pour gérer sa plongée il existe bien sûr la manière traditionnelle des tables mais aussi des moyens électroniques. Ce sont soit des ordinateurs soit des logiciels qui recalculent les tables en fonction des paramètres de plongée. Le but de ce chapitre n'est pas de faire l'apologie de l'une ou de l'autre méthode ; de l'une ou de l'autre philosophie de la plongée ; de l'un ou de l'autre algorithme de calcul mais bien de donner au lecteur une idée aussi complète que possible de ce qui existe sur le marché. A lui de faire son choix en fonction de ses desiderata. Le but n'est pas non plus d'épiloguer sur la fiabilité et la sécurité comparée des divers systèmes. Tous les protocoles sont bons et aucun ne l'est, le risque zéro n'existe pas, le seul moyen d'être sûr de ne jamais faire d'ADD est de ne jamais plonger. Un bon moyen de minimiser le risque est de ne jamais utiliser les extrema des protocoles ou des profils à risques.

### 8.2. Les tables

#### 8.2.1. Les tables air [REC]

Les tables sont le moyen le plus simple et le plus économique de gérer sa plongée. Généralement les tables utilisées pour le Nitrox sont des tables « Air » recalculées en fonction du pourcentage d'oxygène. Les tables sont élaborées à partir d'un algorithme mathématique et d'expérimentation en conditions réelles. Elles ont évolué au cours du temps et sont devenues de plus en plus fiable grâce à l'expérience accumulée. Les tables de plongées sont conçues pour être utilisées au niveau de la mer, et pour un type de gaz, généralement de l'air. Toute autre utilisation demande d'effectuer des corrections. Il en existe un grand nombre dans chaque pays. Les plus connues sont :

- les US NAVY (USA)
- MN 90 (France)
- COMEXPRO (France table de travail)
- PADI (Dérivée de l'US NAVY)
- DCIEM (Canada)
- BSAC (Britannique)
- Buhlmann (Suisse adaptée pour les plongées en altitude)

En Europe les tables les plus couramment utilisées sont les US-Navy, MN90 et Buhlmann en Suisse. Les principes d'utilisation de ces différentes tables sont similaires. Il convient néanmoins de se familiariser avec leurs protocoles respectifs. Dans cet ouvrage nous utiliserons, sauf indication contraire, les tables US-Navy 2008 (voir la table en annexe)

#### [Utilisation des tables US-2008](#)



### 8.2.2. Les tables NOAA [REC]

Le NOAA aux Etats-Unis a développé des tables récréatives spécifiques pour des Nitrox ayant un pourcentage d'oxygène compris entre 28 et 40%. Elles ont l'avantage d'être très simples à utiliser et de ne nécessitent aucun calcul préalable. Principe identique à l'US-Navy.

[Lien vers les tables NOAA](#)

**NO-DECOMPRESSION TABLE**  
**NOAA NITROX 32**  
 ONLY FOR 32% O<sub>2</sub> 68% N<sub>2</sub> MIXTURES

NOAA 07-2015

32

Uniquement pour l'exemple

### 8.2.3. Tables IANTD [ER]

Ce sont des tables air avec une décompression au Nitrox. Elles sont calculées pour une altitude de maximum 300m et sont basées sur l'algorithme Bühlmann ZHL-16. Les différentes tables sont :

- Air
- EAN 32
- EAN36
- Air – Déco EAN50
- Air – Déco EAN75

**IANTD AIR DECOMPRESSION TABLES WITH EAN 75% DECOMPRESSION**

Uniquement pour l'exemple

## 8.3. Modélisation de la décompression [ER]

A l'heure actuelle, même un ordinateur bas de gamme est capable de gérer une plongée Nitrox. La majorité des ordinateurs sont même capable de gérer deux ou trois gaz différents durant la plongée. Logiciel et ordinateur sont basés sur deux grandes familles d'algorithmes :

- Les Haldaniens (Bühlmann ZHL-16) basé sur la tension critique dans les compartiments (M-Values)
- Les modèles à perméabilité variable (VPM, RGBM) basé sur le nombre et la taille de microbulles que l'organisme peut supporter indéfiniment sans dommages.

Ils peuvent calculer en temps réel le %CNS et l'OTU cumulé sur une série de jours de plongée. Dans certaines limites, il est possible de programmer leurs paramètres. Soit directement sur la console ou par l'intermédiaire d'un PC pourvu d'une carte d'interface adéquate et d'un soft spécifique. Il existe aussi des ordinateurs qui peuvent être connectés à des recycleurs. Ce qui présente comme avantages, d'optimiser la décompression et contrôler en permanence la fraction d'oxygène dans la boucle de recyclage.





Le M-value est la tension (pression) (T) maximum qu'un tissu (compartiment) peut supporter par rapport à la pression ambiante absolue ( $P_{abs}$ ) sans faire courir le risque d'un ADD. Elle peut être représentée par la droite d'équation :

$$T_{max} = \left( \frac{P_{abs}}{b} \right) + a \quad \text{avec } b = \frac{1}{\text{Pente}} \quad \text{et } \text{pente} = \frac{dy}{dx}$$

a et b sont des coefficients qui dépendent du tissu (compartiment). La linéarité de cette équation est un avantage prépondérant pour la programmation des ordinateurs.

Pour augmenter la sécurité on a introduit la notion de « Gradient Factor » (GF) qui permet de durcir le modèle original en diminuant la valeur des M-Values. Ce qui revient à établir une nouvelle ligne des pressions (4) entre la ligne des pressions ambiantes (1) et la ligne des M-values de Bühlmann (2) ce qui engendre une plus grande sécurité. Deux paramètres permettent de gérer la position de cette ligne et sa pente : le GF Low et le GF High

- Le GF Low (Low car c'est le point bas de la plongée) varie entre 0 et 100%. Il gère la profondeur du premier palier. Si on diminue sa valeur on augmente la profondeur du premier palier. 100% correspond à la ligne des M-Values (2) et 0% à la ligne des pressions ambiantes (1).
- Le GF High (High car c'est le point haut de la plongée) varie entre 0 et 100%. Il gère la durée des paliers. Si on diminue sa valeur on augmente la durée des paliers. 100% correspond à la ligne des M-Values (2) et 0% à la ligne des pressions ambiantes (1).

La notation standardisée est la suivante :

$$\text{GF} \ll \text{Valeur du } \mathbf{GF\ Low} \text{ en } \% \gg / \ll \text{Valeur du } \mathbf{GF\ High} \text{ en } \% \gg$$

L'utilisation des « Gradient Factor » présente de nombreux avantages :

- Possibilité d'adapter le modèle à la physiologie du plongeur et aux conditions de plongée (froid, courant...). Le système présente une grande flexibilité.
- Possibilité de calculer une gestion de la décompression incluant des paliers profonds.
- Peu de modifications par rapport au modèle Haldanien classique qui a fait ces preuves.
- Les paliers sont toujours dans la zone de « sécurité » de la décompression.

Les fabricants d'ordinateurs destinés à la plongée loisir sont avares en informations sur les paramètres qu'ils utilisent pour durcir les M-Values. Ils indiquent simplement un « niveau » L0, L1... ou P0, P1... l'indice « 0 » représentant le niveau de base le moins sécuritaire. Mais généralement ils se gardent bien de dire à quoi correspondent ces niveaux en termes de GF ! Le niveau « 0 » correspond-il à la droite de M-Values ou est-il affecté d'un coefficient de sécurité ? et si oui de combien ? Cela reste souvent un mystère.

Pour mieux illustrer la notion de GF on a fait quelques simulations à l'aide du logiciel « Multideco » avec l'algorithme Bühlmann ZHL16-C. On a généré quelques « Run Time » pour une plongée à 30m



de 30 minutes. En faisant varier l'altitude (0 et 1750m) et les valeurs des GF Low et High. Ces simulations montrent que :

- La durée des paliers et donc la DTR augmentent lorsque le GF High décroît.
- Que la profondeur du premier palier augmente lorsque le GF Low décroît
- Que les plongées en haute altitude sont extrêmement pénalisantes
- Que la table Bühlmann bleue (0-700m) est très proche des M-Values originaux avec néanmoins un conservatisme de quelques %

## Altitude: Niveau de la mer

### Conservatisme = GF 100/100

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:20 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	3m	(32)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	3m	6:18 (39)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(39)	Air	-6m/min Remontée.

### Conservatisme = GF 95/95

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:20 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	6m	(32)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	6m	0:36 (33)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	8:00 (41)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(41)	Air	-6m/min Remontée.

### Conservatisme = GF 90/90

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:20 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	6m	(32)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	6m	1:36 (34)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	10:00 (44)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(44)	Air	-6m/min Remontée.

### Conservatisme = GF 85/85

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:20 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	6m	(32)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	6m	2:36 (35)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	11:00 (46)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(46)	Air	-6m/min Remontée.

### Conservatisme = GF 30/85

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:20 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	15m	(31)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	15m	0:30 (32)	Air	0,52 ppO2, 15m ead
Palier à	12m	1:00 (33)	Air	0,46 ppO2, 12m ead
Palier à	9m	1:00 (34)	Air	0,40 ppO2, 9m ead
Palier à	6m	4:00 (38)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	10:00 (48)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(48)	Air	-6m/min Remontée.

### Altitude = 1750m (s)

#### Conservatisme = GF 85/85

Desc à	30m	(1)	Air	18m/min Descente.
Niveau	30m	28:14 (30)	Air	0,84 ppO2, 30m ead
Rem. à	6m	(32)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	6m	1:36 (34)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	30:00 (64)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(64)	Air	-6m/min Remontée.

## Altitude: 1750m



## En résumé

Plongée 30m – 30 minutes au niveau de la mer						
Modèle informatique Bühlmann ZHL16-C	Paliers (minutes)					DTR
	15m	12m	9m	6m	3m	
GF 100/100	0	0	0	0	7	10
GF 95/95	0	0	0	1	8	12
GF 90/90	0	0	0	2	10	15
GF 85/85	0	0	0	3	11	17
30/85	1	1	1	4	10	20
Table Bühlmann 0-700m	0	0	0	2	7	12

DTR : Durée Totale de Remontée en minutes  
 Vitesse de remontée entre le fond et le premier palier : 10m/min  
 Vitesse de remontée entre les paliers et la surface : 6m/min

### 8.3.1.2. L'algorithme ZH - L16

L'algorithme ZH-L16, est un algorithme Haldanien à 16 compartiments (tissus). « ZH » signifie Zurich.

Les compartiments sont numérotés de 1 à 16 avec une périodicité qui va de 4 à 635 minutes.

Trois jeux de paramètres ont été établis : « A », « B » et « C ». « A » est le jeu de paramètres expérimental. Ce jeu de paramètres a été renforcée pour éditer la variante « B » destinée à l'écriture des tables. La variante « C », qui sert dans les ordinateurs de plongée, est une variante durcie de la variante « B ». Le coefficient « a » a été durci pour les compartiments (tissus) 5 à 15, c'est-à-dire pour les périodes les longues. Une simulation à l'aide du logiciel « Multideco » pour une plongée de 20 minutes à 50m au niveau de la mer GF 100/100 permet de se faire une idée de la différence entre les variantes « B » et « C ». Le dernier palier à 3m est allongé de 4 minutes.

Modèle de décompression: ZHL16-B + GF

#### PROFIL DE PLONGÉE

Intervalle de surface = 5 jours 0 hr 0 min.

Altitude = 0m

Conservatisme = GF 100/100

Desc à	50m	(2)	Air	18m/min Descente.
Niveau	50m	17:13 (20)	Air	1,25 ppO2, 50m ead
Rem. à	9m	(24)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	9m	1:54 (26)	Air	0,40 ppO2, 9m ead
Palier à	6m	6:00 (32)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	9:00 (41)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(41)	Air	-6m/min Remontée.

Modèle de décompression: ZHL16-C + GF

#### PROFIL DE PLONGÉE

Intervalle de surface = 5 jours 0 hr 0 min.

Altitude = 0m

Conservatisme = GF 100/100

Desc à	50m	(2)	Air	18m/min Descente.
Niveau	50m	17:13 (20)	Air	1,25 ppO2, 50m ead
Rem. à	9m	(24)	Air	-10m/min Remontée.
Palier à	9m	1:54 (26)	Air	0,40 ppO2, 9m ead
Palier à	6m	6:00 (32)	Air	0,34 ppO2, 6m ead
Palier à	3m	13:00 (45)	Air	0,27 ppO2, 3m ead
Surface		(45)	Air	-6m/min Remontée.

### 8.3.2. Les modèles à « Perméabilité Variable » [ER]



Ces modèles sont une rupture avec le modèle Haldanien. On ne nie plus l'existence des bulles mais on les étudie ! VPM est le premier de ces modèles il sera suivi par le modèle RGBM.

#### 8.3.2.1. VPM - Varying Permeability Model

C'est une rupture importante avec les modèles Haldaniens dans la mesure où les critères limites de remontée ne s'appuient plus sur des ratios de sursaturation entre tension des tissus et pression ambiante, mais sur des volumes gazeux tolérables par l'organisme. On ne nie plus l'existence des bulles, au contraire, on les étudie, on les quantifie et on les qualifie à travers leur rayon afin de prédire des profils de remontée plus surs et plus proches de la physiologie humaine. VPM suppose en effet que notre corps peut supporter qu'il y ait un certain volume de gaz libre. Ce volume est lié au nombre de bulles excitées jusqu'à croissance pendant la décompression. Le principe de l'algorithme VPM est d'empêcher un nombre excessif de bulles de croître

#### 8.3.2.2. RGBM - Reduced Gradient Bubble Model

Le RGBM est un algorithme mathématique qui prend en compte, à la fois le passage des gaz de l'état dissous à l'état libre. L'association entre les états libres/dissous et les nouvelles théories sur les microbulles grossissant à partir de micronoyaux produits par les efforts du ou du frottement dans les tissus. Les microbulles ne provoquent pas de symptômes perceptibles, mais elles sont néanmoins présentes et ne peuvent être détectées qu'au moyen de détection sophistiquée par effet Doppler. Les micronoyaux gazeux se forment au contact des zones sinueuses des vaisseaux sanguins et des tissus. Ceux-ci ont tendance à s'agglomérer pour former les microbulles. A la remontée ils vont suivre la loi de BoyleMariotte, grossir et boucher les vaisseaux. Les microbulles présentes dans les tissus peuvent créer des complications pathologiques après la plongée. Le phénomène est plus évident dans certains cas :

- Plongée plusieurs jours de suite sans arrêt.
- Plongées successives.
- Plongée à profil inversée.

L'algorithme RGBM calculé par le docteur Bruce Wienke<sup>21</sup> est le premier à déterminer mathématiquement des paliers de décompression profonds, améliorant ainsi la possibilité d'élimination des microbulles. Le bienfait des paliers profonds sur la réduction du stress physiologique après plongée avait été introduit intuitivement par Richard Pyles. Comme l'a démontré Laplace la pression dans une bulle est supérieure à la pression environnante, est inversement proportionnelle au diamètre de la bulle. Si la pression du gaz dans la bulle est supérieure à la tension du tissu, les molécules de gaz vont se déplacer de la bulle vers le tissu, diminuant ainsi la taille de la bulle. Dans le cas contraire, la bulle continuera à grossir. Plus la bulle est petite, plus la différence de pression est grande entre la bulle et l'environnement extérieur. Il est évident que l'idéal est de conserver les bulles aussi petites que possible, la différence de pression entre la bulle et l'extérieur doit être la plus grande possible. La remontée doit être optimisée de

<sup>21</sup> Dr Bruce Wienke, scientifique du laboratoire de Los Alamos aux USA est l'auteur de nombreuses publications scientifiques sur des sujets liés à la plongée sous-marine. Consultant de plusieurs universités et centres de recherches, il est considéré comme un des meilleurs spécialistes mondiaux dans le domaine de la décompression.



façon que les bulles ne deviennent pas trop grosses, pour quelle restent suffisamment petites, il faut rester plus profond plus longtemps. C'est l'origine des paliers profonds<sup>22</sup>.

### 8.3.3. Paliers profond ou pas ? [ER]

Le palier profond, longtemps considéré comme le « Saint Graal » de la plongée « profonde », il a été fortement mis en question par des études récentes pour des plongées à l'AIR. D'autres études ont des conclusions plus mitigées. Bienfait ou méfait ? la question n'est pas tranchée et continue à faire polémique. L'idée des paliers profonds vient de Richard Pyle... Uniquement pour information ci-après la méthode empirique des « Pyles stops »

#### 8.3.3.1. Les Pyles stops

Richard Pyles qui n'était pas physiologiste mais biologiste à constater qu'en faisant des arrêts d'une minute à certaines profondeurs il se sentait moins fatigué même pour des plongées dans la zone des 100m. Ces arrêts étaient rendus obligatoire pour éviter l'éclatement des vessies natatoires des spécimens qu'il remontait. Il a établi une règle empirique illustrée par l'exemple suivant :

Après une plongée à 40m le premier palier donné par l'ordinateur est à 6m les Pyles stops sont :

$$Ps1 = (40 + 6) / 2 = 23m$$

$$Ps2 = (23 + 6) / 2 = 15m$$

### 8.4. Quel Nitrox utiliser ? [ER]

La mise sur le marché d'ordinateurs de plus en plus performants a permis de s'affranchir des mélanges standardisés sans trop de difficultés. Le tout est de savoir lequel est le plus efficace ? Dans le cas de la plongée récréative c'est assez facile... C'est le « Best Mix » (cf § 3.1.4.). Dans le cas d'une plongée en Extended Range, indépendamment de la difficulté à fabriquer les mélanges, le choix va dépendre du profil de plongée, de la profondeur et du temps des paliers. L'idéal est d'avoir une « fenêtre oxygène » aussi large que possible sans pour autant dépasser 1,6 bar et 100% de %CNS (75% conseillé par le NOAA).

#### 8.4.1. La fenêtre oxygène

Au niveau des alvéoles pulmonaire, la fenêtre O<sub>2</sub> est différence entre la PPO<sub>2</sub> + PPCO<sub>2</sub> artérielle et veineuse. En plongée, les techniques actuelles de décompression aux mélanges suroxygéné ou à l'oxygène s'appuient sur l'utilisation de la « Fenêtre Oxygène ». Le mouvement des gaz, qui va des poumons aux tissus et vice et versa, est dépendant de l'écart des pressions partielles de ces gaz. D'après les théories dynamiques de la décompression le gradient d'éliminations des gaz inertes sera d'autant plus important que la fenêtre d'O<sub>2</sub> est importante.

---

<sup>22</sup> Des études récentes ont mis en cause le bienfondé des paliers profonds pour les plongées à l'AIR et d'autres le contraire ou ont des avis partagés (DAN). Le débat semble clos des agences de formation abandonnent les « paliers profonds » pour les plongées à l'air Fraedrich D dans son article Validation des algorithmes utilisés dans les ordinateurs de plongée commerciaux prêts à l'emploi. (Plongée et médecine hyperbare. 24/12/2018) considère qu'un GF Low=70 est acceptable



Taille de la fenêtre O<sub>2</sub> exprimée en bars, en fonction de la PPO<sub>2</sub> est la suivante

- PPO<sub>2</sub>= 0,2 bar Fenêtre= 0,07 bar
- PPO<sub>2</sub>= 1,0 bar Fenêtre= 0,70 bar
- PPO<sub>2</sub>= 1,3 bar Fenêtre= 1,12 bar
- PPO<sub>2</sub>= 1,6 bar Fenêtre= 1,40 bar

#### 8.4.2. Les gaz de décompression

Ce sont des mélanges dont le pourcentage d'oxygène s'échelonne entre 50 et 100%

% oxygène	Profondeur maximum (m)	PPO <sub>2</sub> max Bar	PPO <sub>2</sub> à 6m Bar	PPO <sub>2</sub> à 3m Bar
50	21	1,55	0,8	0,65
60	12	1,3	0,96	0,78
75	9	1,4	1,2	0,98
80	9	1,5	1,28	1,04
85	9	1,6	1,36	1,10
100	6	1,6	1,6	1,3

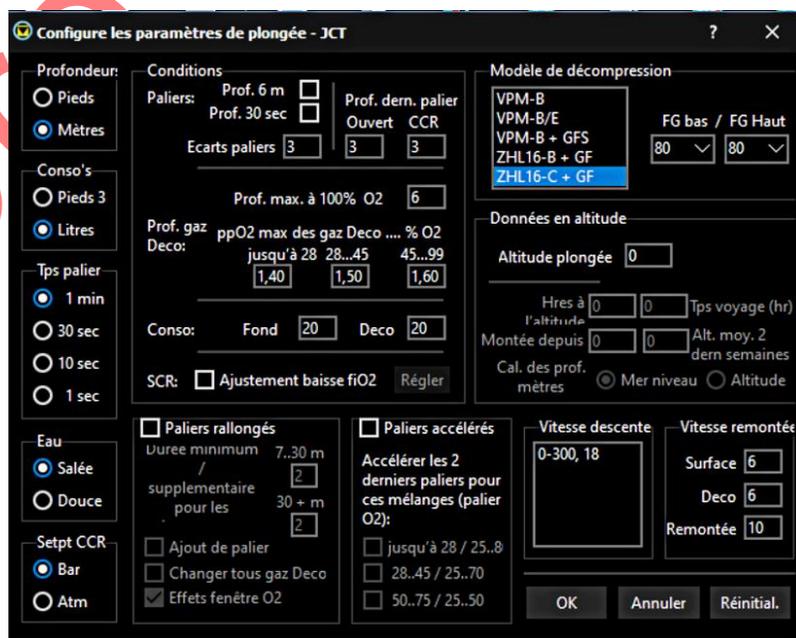
#### 8.5. Paramétrages des logiciels [ER]

Le but de cet ouvrage n'est pas de conseiller tel ou tel paramétrage mais de donner quelques lignes directrices. Chaque plongeur est responsable de ses propres choix. Aucun logiciel ou paramétrage aussi conservatif qu'il soit ne peut garantir et ne garanti pas une sécurité absolue.

Le risque zéro n'existe pas !

Il existe de nombreux logiciels qui permettent de planifier les plongées air, Nitrox et Trimix. Dans cet ouvrage on se limitera au logiciel Multideco. Il permet de simuler des plongée Air, Nitrox et Trimix avec les modèles VPM et Bühlmann ZHL-16. Le modèle RGBM n'étant pas un « Open Source » il n'est pas implanté dans la plupart des logiciel téléchargeable sur le net. Les étapes de la configuration sont :

1. Choisir le système d'unité métrique ou impérial ;





2. Vérifier si le paramétrage par défaut correspond à vos attentes ou à des valeurs de bonne pratique pour une plongée en circuit ouvert (OC) ;
  - a. Ecart entre les paliers, profondeur du dernier palier (3m par défaut) ;
  - b. Pressions partielles d'oxygène admissible (1,4 bar mélange fond, entre 1,4 et 1,6 bar pour la décompression) ;
  - c. Vérifier la vitesse de descente (entre 18 et 20 m/minutes) ;
  - d. Vérifier la vitesse de remontée (par défaut 10m/min et 6m/min entre les paliers) ;
  - e. Vérifier l'altitude (niveau de la mer par défaut)
3. Choisir le modèle et le degré de conservatisme souhaité. C'est le point le plus délicat car il est une grande partie subjectif. Le choix peut être influencé par :
  - a. Les conditions de plongée : froid, courant...
  - b. Les mélanges utilisés : Nitrox, air, Trimix ;
  - c. Le degré d'engagement de la plongée ;
  - d. La condition physique de plongeur : Embonpoint, âge, FOP<sup>23</sup>...
  - e. Liste non exhaustive.

A : Choix du modèle de décompression

B : Choix du conservatisme.

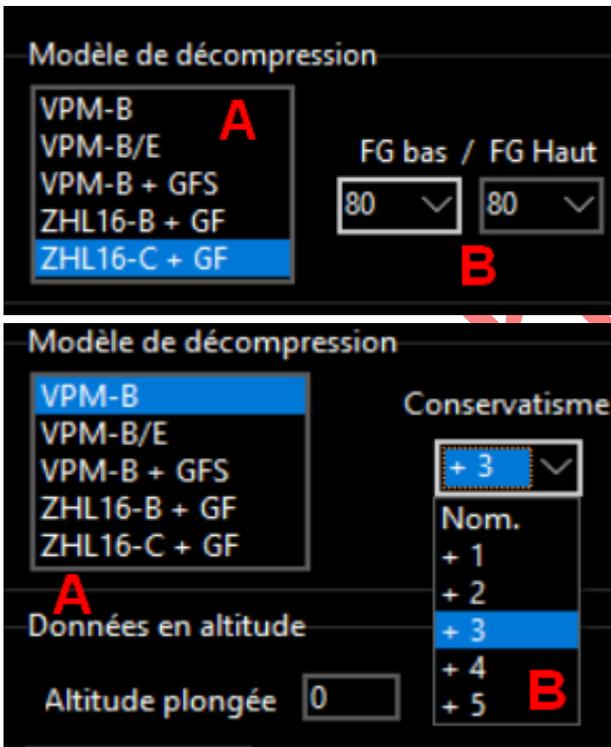
La version C du modèle ZHL16 donne un degré de conservatisme de quelques % supplémentaires par rapport à la version B.

**Facteur Gradient** (cf. § 8.3.1.1.)

FG Bas (GF low) règle la profondeur du premier palier  
FG Haut (Gf high) règle la durée des paliers

VPM-B : B pour Boyle. Dans le VPM classique, lors de la remontée il ne peut pas y avoir de croissance de la microbulle, ce qui induit des durées de palier totalement inadaptés à des plongées réelles. La version B permet une certaine croissance des microbulles, pour autant qu'elles ne deviennent pas pathogènes. Cinq niveaux de durcissement croissants sont prévus.

Le gradient (variation) de pression admissible lors de la remontée est inversement proportionnel au rayon critique de la microbulle



<sup>23</sup> Foramen Ovale Perméable



L'extension /E ajoute du conservatisme aux plongées très engagées.

L'extension GFS (Gradient Factor Surfacing) augmente le degré de conservatisme sur les paliers peu profond lors de plongées très engagées.

### 8.5.1. Comparaison entre tables et modèles VPM et ZHL-16

Pour tenter d'y voir un peu plus clair dans les divers modèles on a comparé VPM-B, Bühlmann ZHL-16C, US-navy 2008 et MN 90 pour une plongée de 20 minutes à 48m de profondeur. Ce qui est assez représentatif d'une plongée Extended Range classique.

N°	Profondeur palier (m)	24	21	18	15	12	9	6	3	Durée totale paliers	DTR
1	US-Navy 2008 (*)	0	0	0	0	0	0	22	0	22	47
2	US-Navy 2008 déco O2	0	0	0	0	0	0	12	0	12	37
3	MN 90	0	0	0	0	0	0	4	19	23	48
4	MN 90 déco O2 (**)	0	0	0	0	0	0	4	13	17	42
5	VPM-B GF Nominal	1	2	2	3	3	6	9	15	41	66
6	VPM-B GF Nominal déco O2	1	1	2	3	3	5	4	6	25	50
7	ZHL-16C GF 100/100	0	0	0	0	0	1	5	11	17	42
8	ZHL-16C GF 100/100 déco O2	0	0	0	0	0	1	3	5	9	34
9	ZHL-16C GF 85/85	0	0	0	0	1	4	7	17	29	54
10	ZHL-16C GF 85/85 déco O2	0	0	0	0	1	4	4	6	15	40
11	ZHL-16C GF 90/90	0	0	0	0	1	3	6	15	25	50
12	ZHL-16C GF 90/90 déco O2	0	0	0	0	1	3	4	5	13	38
13	ZHL-16C GF 35/85	0	1	1	1	3	4	7	17	34	59
14	ZHL-16C GF 35/85 déco O2	0	1	1	1	3	4	4	6	20	45

Profondeur 48m - Temps de plongée 20 minutes.  
(\* ) Le dernier palier est à 6m pour la dernière version des tables US-Navy (2008).  
(\*\* ) Valeur calculée, la table MN90 ne donne pas directement les paliers à l'oxygène.

### Constatations.

- Le modèle VPM-B (N° 5 et 6) pour des plongées ER donne un résultat « délirant » par rapport aux tables classiques.
- Les tables US-Navy et MN90 (N° 1 à 4), donnent pour ce niveau de plongée (profondeur, durée) un résultat très similaire.
- Les GF 100/100 (nominal) (N° 7 et 8) ne sont pas assez conservatif par rapport aux tables.
- Les GF 85/85 et 90/90 (N° 9 à 12) se rapprochent très fortement de tables.
- Les GF asymétriques 35/85 se rapprochent assez du modèle VPM-B.



## 8.6. Le « Run Time »

Desc à	48m		(2)	Air
Niveau	48m	17:20	(20)	Air
Rem. à	12m		(23)	Air
Palier à	12m	1:24	(25)	Air
Palier à	9m	3:00	(28)	Nitrox 75
Palier à	6m	4:00	(32)	Nitrox 75
Palier à	3m	8:00	(40)	Nitrox 75
Surface			(40)	Nitrox 75

Le run time c'est une manière précise d'écrire le temps, la profondeur et les gaz utilisés tout au long de la plongée. Il est généré par les logiciel de décompression. C'est une autre manière d'écrire les tables plus sure lorsqu'on a des nombreux paliers à des profondeurs différentes. Celui-ci doit impérativement être respecté, à la descente et à la remontée. Il est calculé en tenant compte des paliers de décompression et

de la vitesse de remontée. La base de temps indique le moment de QUITTER la profondeur. Dans l'exemple ci-contre on effectue une plongée à -48m. Le temps de plongée est de 20 minutes les vitesses de descente et de remontée sont respectivement de 20 et 10 m/min. Le run time est indiqué par les chiffres entre parenthèses. Il doit se lire de la manière suivante. Descente à l'air jusqu'à 48m, on quitte la profondeur de 48m au temps t=20 minutes. On remonte jusqu'à la profondeur de 12 m (+/- 3,5 minutes de remontée) que l'on quitte au temps t=25 minutes. On remonte jusqu'à 9m, passage au Nitrox 75. On quitte la profondeur de 9m au temps t=28... Et ainsi de suite jusqu'à la surface.

Généralement le plongeur génère plusieurs « Run Time » qui tiennent compte d'une perte de gaz de décompression, d'un dépassement de temps, d'un dépassement de profondeur ou des deux.

	OK	75
48	(20)	(20)
12	1 (25)	1 (25)
9	3 (28)	4 (29)
6	4 (32)	8 (37)
3	8 (40)	19 (56)
Consommation de gaz		
Pas de panne - plongée normale - OK		
2546,2 ltr Air		
444,4 ltr Nitrox 75		
2990,6 ltr TOTAL		
Gaz Déco perdu ou manquant: 75		
3441,6 ltr Air		
3441,6 ltr TOTAL		

## 8.7. Les ordinateurs de plongée

Il y en a pour toutes les bourses. L'adage « qui peut le plus peut le moins » n'est pas obligatoirement une bonne solution technico-économique étant l'évolution rapide des machines. Peu de plongeurs vont passer de l'Extended Range au Trimix. Donc inutile d'acheter immédiatement un ordinateur gérant les plongées Trimix ! Un ordinateur gérant l'air plus un ou deux gaz de décompression est largement suffisant pour la plongée Nitrox et l'Extend Range.

Marque	Type	Algorithme	Nbr de gaz	Utilisation
Aqualung	I100	ZHL-16C	2	Nx
Suunto	D5	RGBM	3	Nx+ER
Mares	Quad	RGBM	3	Nx+ER
Scubapro	Aladin sport	ZHL-16C	3	Nx+ER
	Luna	ZHL-16C	3	Nx+ER
Sheawater	Peregrine	ZHL-16C	3	Nx+ER
Cressi	Raffaello	RGBM	3	Nx+ER



## 9. Degré d'engagement de la plongée [ER]

Le degré d'engagement d'une plongée est une notion difficile à appréhender et encore plus difficile à quantifier d'une manière cartésienne ! Le degré d'engagement conditionne le risque d'accident de décompression (ADD). Il existe peu d'études statistiques sur la probabilité d'un ADD au niveau des plongeurs sportifs, les chiffres les plus communément admis oscillent entre 0,1 et 1,4 ADD par 1000 plongées. Ce risque (R) est conjointement lié à la profondeur (P) et au temps de plongée (t). Le risque augmentant avec la profondeur et le temps de plongée. Cette notion, essentielle à la gestion du risque, est difficile à évaluer quantitativement étant donné la complexité du phénomène de décompression. Plusieurs approches sont possibles, mais aucune n'est le saint Graal. Ce ne sont que des estimations très relatives, mais qui néanmoins permettent d'anticiper le niveau de risque que le plongeur accepte de prendre. La plus courante est d'estimer le degré d'engagement de la plongée en fonction de la durée des paliers obligatoires et du temps total pour rejoindre la surface.

### 9.1 Approche TTS

L'approche Temps Total Surface est une approche très simple, basée sur la durée totale pour rejoindre la surface (TTS) et le temps passé au fond (TF). Elle a l'inconvénient d'être peu précise et pas du tout analytique.

	Risque ADD
Profondeur ≤ 9m	Quasi inexistant
Plongée sans palier obligatoire	Faible
TTS < TF ou TTS < 20 minutes	Moyen
TTS ≥ TF ou TTS ≥ 20 minutes	Elevé

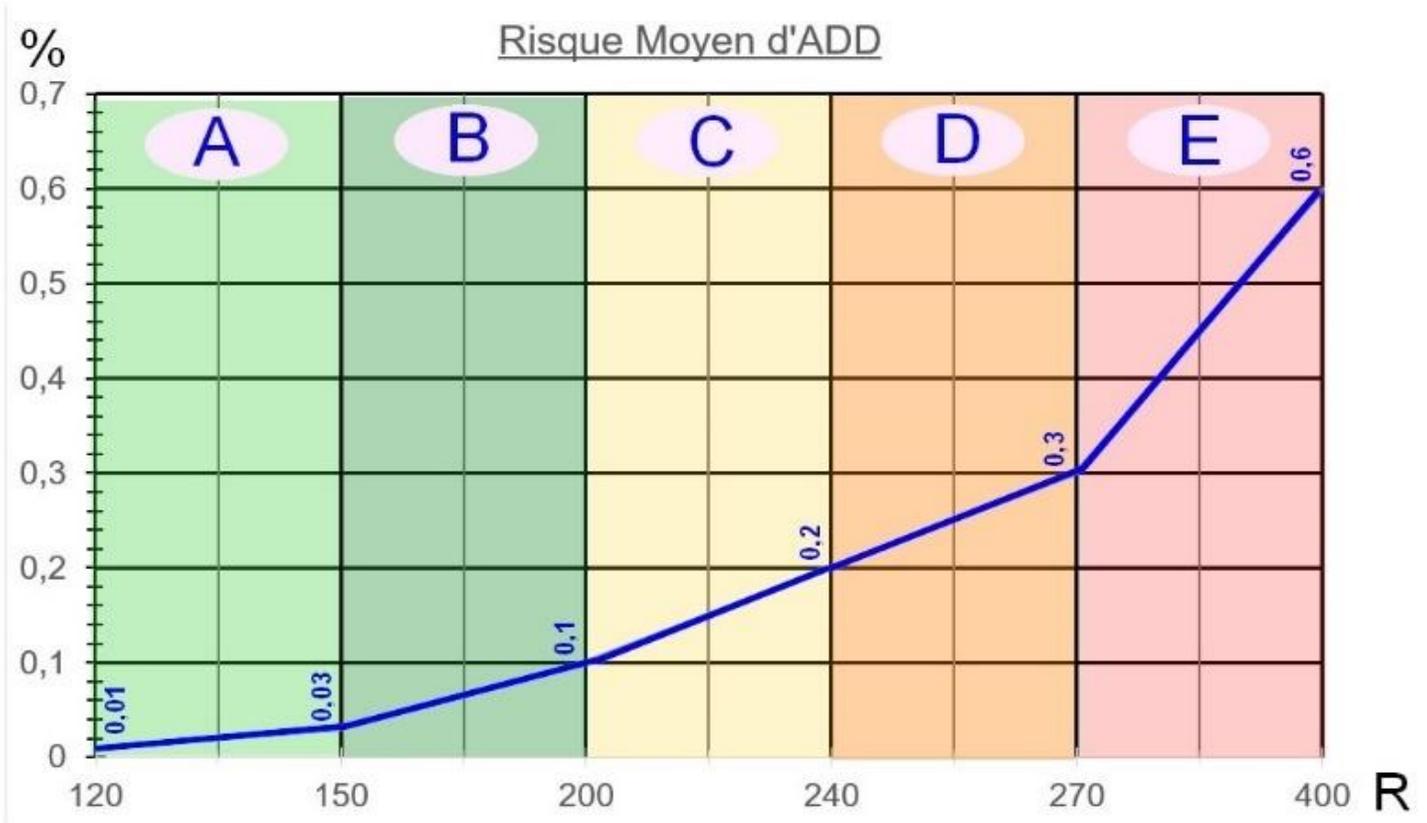
### 9.2. Approche analytique

Le docteur Bernard Gardette<sup>24</sup>, a développé une approche analytique qui est nettement plus précise que l'approche TTS. Cette approche relie la charge en gaz inerte (N<sub>2</sub>, He) au risque d'accident. Il définit un coefficient de Risque (R) proportionnel à la profondeur (P) et à la racine carrée du temps de plongée (t).

$$R = P\sqrt{t}$$

Avec : P : Profondeur en mètres  
t : Temps de plongée en minutes

<sup>24</sup> Doctorat de neurophysiologie en 1974. Doctorat d'état en 1987. Directeur scientifique de la COMEX entre 1976 et 2015.



Zone A	Plongée loisir sans palier obligatoire
Zone B	Plongée loisir avec palier obligatoire de courte durée (Max 6 minutes)
Zone C	Plongée sportive avec palier obligatoire de durée moyenne (Max 15 minutes)
Zone D	Plongée sportive avec palier obligatoire de longue durée (plus de 15 minutes)
Zone E	Plongée TEK

La courbe représente le risque moyen estimé d'accident de décompression en fonction du paramètre (R) qui est l'image du degré d'engagement de la plongée. Ce risque peut être multiplié par 30 si le plongeur présente des facteurs aggravants : FOP<sup>25</sup>, fatigue, stress etc....

Pour faire simple, on peut considérer que lorsque le paramètre (R) est multiplié par un facteur de 1,3 le risque d'ADD, malgré le respect des tables, est multiplié par 10 !

<sup>25</sup> Foramen Ovale Perméable



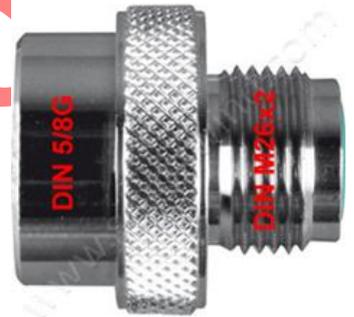
## 10. Le matériel [REC] [ER]

Deux cas sont à considérer la plongée récréative avec des Nitrox qui ne dépasse pas 40% d'oxygène sans gaz de décompression et la plongée en « Extended Range » avec des gaz de décompression ayant plus de 40% d'oxygène.

### 10.1. Nitrox récréatif

C'est le cas le plus simple en technique on peut plonger avec le matériel classique du plongeur loisir. Il y a néanmoins une restriction technique : La bouteille ainsi que le robinet doivent être dégraissés lorsque le Nitrox est fabriqué par la méthode des pressions partielles. En effet dans ce cas le gonfleur injecte de l'O<sub>2</sub> dans la bouteille, puis fait l'appoint en air pour obtenir le mélange désiré.

En novembre 2002 l'Union Européenne a édicté une directive (Norme EN144-3)<sup>26</sup> qui prévoit que les bouteilles contenant plus de 21% d'oxygène devaient avoir un robinet avec un filetage spécifique. C'est le filetage DIN M26x2 qui a été adopté. Après la période transitoire de 5 ans édictée par l'UE, il n'est plus possible théoriquement possible d'avoir un robinet DIN 5/8G sur une bouteille Nitrox. En pratique il en va tout autrement. Pour éviter de devoir acheter un détendeur spécifique si on utilise un Nitrox ayant maximum 40% d'O<sub>2</sub> il est possible d'acheter un adaptateur mâle/femelle 5/8G - M26x2



### 10.2. Extended range [ER]

Étant donné que le Nitrox dépasse 40% d'oxygène, l'ensemble du matériel en contact avec ce gaz doit être dégraissé et prévu pour un service « oxygène pur ». Ce qui inclut la bouteille, les robinets, le détendeur, le manomètre et l'ensemble des tuyauteries. Le gaz de décompression ne peut en aucun cas servir à gonfler le gilet stabilisateur ou le costume étanche et même le parachute (SMB).

Les plongées étant au-delà des limites de la plongée récréative, il faudra adapter le matériel et « penser » aux redondances.

#### 10.2.1. Blocs

Les plongées en ER étant généralement plus longues et plus profondes qu'en plongée loisir, un bloc de 15 litres ne suffira plus dans la plupart des cas. La préférence sera donnée à un bi-bouteille de 10 ou 12 litres, monté soit avec une vanne d'isolation (Manifold) entre les bouteilles soit comme le font les spéléos montées indépendamment. Le volant du Manifold doit être tourné vers le plongeur à un angle de 45° par rapport à l'horizontale, de manière à pouvoir être manipulée sous l'eau sans aide. Une tendance actuelle est de s'équiper en



<sup>26</sup> Une norme ne devient une loi que lorsqu'elle est publiée, ainsi que les arrêtés d'application au journal officiel du pays. En pratique, peu de plongeurs privés respectent cette norme qui n'est issue que d'un intense lobbying en vue de vendre des détendeurs spécifiques. Dans les magasins, il est possible que le vendeur refuse de gonfler Nx si le robinet n'est pas M26.



sidemount. Le portage latéral présentant des avantages principalement lorsqu'on plonge en partant du bord, avec de longs portages.

### 10.2.1.1. Manifold fermé ou ouvert durant la plongée ?

Deux écoles s'affrontent sur le sujet. Les deux configurations présentent des avantages et des inconvénients.

Manifold	Avantages	Inconvénients
Ouvert	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pas d'obligation d'alterner les détendeurs.</li><li>• Un seul manomètre est suffisant.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Défaut de redondance en mode commun.</li><li>• Risque de perte totale du gaz en cas d'incapacité à fermer le(s) robinet(s)</li><li>• Difficulté potentielle pour fermer le(s) robinet(s) et notamment le robinet de manifold (raideur des combis, gants étanches.)</li></ul>
Fermé	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pas de défaut de redondance en mode commun.</li><li>• Aucun risque d'une perte totale du gaz.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Obligation d'alterner les détendeurs régulièrement.</li><li>• Obligation d'avoir deux manomètres</li></ul>

### 10.2.2. Bloc de déco ou stage

En plongée ER on n'utilise généralement qu'un seul<sup>27</sup> bloc de déco contenant le mélange de déco. Sa capacité est fonction des paramètres de la plongée. Généralement une capacité de 7 litres suffit largement. Pour pouvoir déposer facilement le bloc et ne pas devoir modifier son lestage à chaque changement de stage il faut que le bloc soit le plus neutre possible dans l'eau. Les blocs « Alu » conviennent très bien et ont l'avantage d'être peu sensible à la corrosion... Même pas besoin de les peindre ! Ce bloc et le robinet doivent être parfaitement dégraissés. Il convient de choisir un robinet à volant, pas un robinet ¼ de tour qui sont trop fragile et difficile à ouvrir avec des gants. Pour le portage le bloc est équipé de :

- Deux mousquetons pour accrocher la bouteille à la wing aux anneaux supérieur et inférieur. L'écartement entre les mousquetons doit être tel que la bouteille reste parallèle au corps du plongeur, lorsque celui-ci est en position horizontale.
- Deux élastiques pour lover le détendeur.



<sup>27</sup> **Opinion de l'auteur** : Certaines organisations préconisent une formation ER avec deux blocs de déco. Uniquement pour faire la différence entre le « Advanced Nx » et l'Extended Range. Pour apprendre à utiliser deux blocs, il est préférable de faire une formation Trimix. Pour les Tx, les deux blocs serviront réellement à quelque chose !

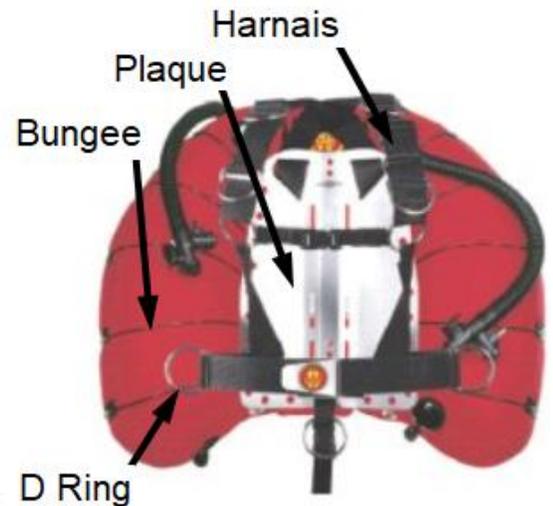


Suivant les normes UE, cette bouteille doit (ou devrait) avoir une connectique M26x2

Par sécurité, durant la plongée, la bouteille de déco est fermée et n'est ouverte que lorsque le plongeur est à la profondeur d'utilisation. Respirer un Nx75 ou fond est la plupart du temps mortel !

### 10.2.3. Gilet (BCD – Wing)

Il doit avoir une capacité suffisante pour combattre efficacement l'écrasement de la combinaison plus le poids des gaz consommés et un surlestage éventuel avec un bon coefficient de sécurité. Celui-ci sera de présence de l'ordre de deux à trois, 1,5 étant le strict minimum. Si on considère que dans une plongée ER il n'est pas rare de consommer 4000 litres de mélange soit +/- 5 Kg de Gaz et qu'une combinaison néoprène perd 40% de son épaisseur à 40m de profondeur. Le poids négatif sera de l'ordre de 6 kg. Avec un surlestage de l'ordre du kilo au palier il faut au minimum une capacité de 24 litres. Quelques anneaux, sans exagération, sont nécessaires pour accrocher la bouteille de déco et les accessoires tel que cisaille, reels, parachutes... L'idéal est la « Wing » composé d'un harnais, d'une plaque dorsale et d'une bouée en forme de fer à cheval. Elle est particulièrement modulable et confortable même avec des très gros scaphandre. Contrairement à une certaine philosophie « Jarodienne » je suis partisan des « bungee's » qui sont des élastiques qui racrapotent la bouée pour éviter quelle ne flotte lorsqu'elle est dégonflée. Si ces élastiques sont bien étudiés et montés correctement, il est tout à fait possible de gonfler la bouée à la bouche. Un matériau de bonne qualité (Cordura) n'est pas entamé par le silicone des élastiques et de même si on accroche l'élastique il suffit d'une bonne traction pour le casser.



### 10.2.4. Détendeur de déco

Il doit être parfaitement dégraissé et facilement identifiable. Le montage doit être le plus simple possible. Inutile de monter un long flexible avec manomètre. Un manomètre bouton suffit amplement et inutile de monter un tuyau pour inflateur. Il ne sert absolument à rien ne pouvant pas être connecté sur un gilet ou à un étanche. Le détendeur doit être facile à démonter, à dégraisser, à remonter avec un minimum de réglage. Pas la peine d'avoir un premier étage ultra compensé et avec un super kit antigivre, on ne respire sur ce détendeur qu'à faible profondeur. Par leur fabrication les mélanges de déco sont très secs et sont par la même intrinsèquement antigivre. Un premier étage à piston non compensé suffit





amplement pour ce type de détendeur. Leur dégraissage est facile et le chemin parcouru par le gaz est exempt de variations de section, d'angles vifs, de pièges à « graisse ». Donc peu de chocs moléculaires lors du passage des gaz et un faible risque d'avoir une auto-inflammation.

Suivant les normes UE, ce détendeur doit (ou devrait) avoir une connectique M26x2

### 10.2.5. Protection contre le froid

Les plongées en ER sont plus longues que les plongées loisirs il convient d'en tenir compte pour adapter la protection thermique. Sous nos latitudes au minimum une semi-étanche ou de préférence un costume sec.

Température	Costume
> 14°C	Semi-étanche
10 à 14 °C	– Costume sec néoprène + T shirt – Costume sec toilé + souris 200 gr/m <sup>2</sup>
8 à 10 °C	– Costume sec néoprène + souris 100 gr/m <sup>2</sup> – Costume sec toilé + souris 200 gr/m <sup>2</sup>
6 à 8 °C	Costume sec toilé + souris 400 gr/m <sup>2</sup>
4 à 6 °C	– Costume sec toilé + souris 400 gr/m <sup>2</sup> + gants étanches + argon (si possible- – Costume sec toilé + souris 100-200 gr/m <sup>2</sup> + gilet chauffant + gants étanches

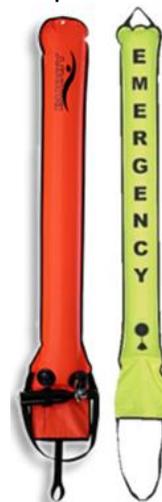
[e-book : Plongée en eau froide](#)

### 10.2.6. Parachute

Elément indispensable à la plongée en ER : il permet non seulement de faire les paliers confortablement en pleine eau mais aussi de se signaler au bateau. Traditionnellement les plongeurs TEK utilisent deux parachutes : un rouge pour faire les paliers et un jaune pour signaler un problème (perte de gaz de déco...). Le parachute jaune doit être équipé à son sommet d'une petite plaquette et d'un crayon gras. Ce qui permet au plongeur d'indiquer clairement à la sécurité surface la nature du problème. Contrairement à la plongée loisir il convient d'utiliser des parachutes anti-déflation associé à un dévidoir (Reels ou Spool). Les parachutes sont tirés depuis le fond et non plus à la profondeur des paliers. La longueur de la corde doit être au moins égale à 1,3 fois la profondeur de largage du parachute.

#### **Avantages**

- Paliers confortables en pleine eau.
- Signalisation Immédiate, près du bateau.
- Dérive du plongeur facile à suivre depuis le bateau.
- Remontée facilitée par un point de repère.
- Moins de risque de remontée trop vite.





### **Désavantages**

- Risque d’emmêlement si pas utilisé correctement.
- Blocage du dévidoir.
- Le bobinage est parfois pénible.
- Plus encombrant que le système traditionnel.

### **Code de couleur**

- Rouge : Utilisation normale
- Jaune : EMERGENCY, il faut lui adjoindre une plaquette et un crayon pour indiquer la nature du problème

### **10.2.7. Les dévidoirs (Reels et Spool)**

Associées aux parachutes ce sont des bobines de fil. Ils existent sous deux formes, les Reels (moulinet) et les Spools (bobine). Les deux ont le même objectif, pouvoir larguer le parachute depuis le fond. Ces deux systèmes ont leurs points positifs et négatifs, leurs partisans et leurs détracteurs !<sup>28</sup> Le fil doit être assez résistant et pas trop gros, le 18/10 convient pratiquement à toutes les situations. La longueur doit être suffisante pour pouvoir utiliser un parachute depuis le fond. Il faut au moins une longueur de fil égale à 1,3 fois la profondeur de largage.

#### **10.2.7.1. Le dévidoir (Reel)**

C’est un moulinet qui s’apparente au moulinet de pêche. Il est constitué d’une bobine d’un cliquet qui permet de libérer / bloquer le fil, d’une manivelle de rembobinage et d’un guide fil pour éviter l’emmêlement. Il est facile et pas fatiguant à utiliser et permet d’avoir une grande longueur de fil. Les qualités d’un bon dévidoir sont :

- D’une conception qui élimine les risques d’emmêlement.
- Blocage / déblocage facile même avec des gants.
- Une manivelle de bonne dimension permettant un rembobinage aisé avec des gants sans se faire des crampes dans les doigts !



#### **10.2.7.2. La bobine (Spool)**

C’est une simple bobine de fil qui ne dispose généralement de 20 à 45m de fil, exceptionnellement 60m. D’une construction très simple, elle dispose d’un trou central qui permet au pouce de servir de pivot. Les trous extérieurs permettent de bloquer le fil à l’aide d’un mousqueton à targette double. Mousqueton servant de « manivelle » lors du rebobinage. Pas chère et peu encombrante l’utilisation nécessite un peu d’entraînement. Certains modèles ont un trou central élargi permettant d’être utilisés avec des gants étanches.



<sup>28</sup> Note de l’auteur : J’utilise l’un ou l’autre sans préjugé en fonction des circonstances.



### 10.2.7.3. Comparaison entre dévidoir et bobine

Bobine	Dévidoir
<ul style="list-style-type: none"><li>- Peu couteuse.</li><li>- Faible encombrement.</li><li>- Simple, pas de mécanisme.</li><li>- Limitée en longueur de fil.</li><li>- Plus difficile à utiliser que le dévidoir.</li><li>- Plus fatigante à utiliser que le dévidoir.</li><li>- Facile à fixer sur le parachute à demeure.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Grande longueur de fil.</li><li>- Plus facile à utiliser en grande profondeur.</li><li>- Assez encombrante.</li><li>- Plus difficile à fixer à demeure sur le parachute.</li><li>- Mécanisme pouvant se casser ou se bloquer.</li><li>- Assez couteuse.</li><li>- Peut facilement être utilisée comme fil d'Ariane.</li></ul>

### 10.2.7.4. Fixation a demeure sous le parachute ou pas ?



Il y a deux écoles l'une préconise la fixation a demeure sur le parachute, l'autre pas. Etant donné l'encombrement réduit et le faible coût des bobines je suis partisan d'une fixation à demeure sous le parachute jaune. Pour le parachute rouge si le largage se fait à plus de 35m, il vaut mieux utiliser un dévidoir. Le dévidoir est plus difficile à fixer à demeure au parachute. La fixation a demeure permet de déployer plus rapidement le parachute, mais en contrepartie il n'est pas possible d'utiliser le dévidoir à un autre usage (fil d'Ariane...).

### 10.2.8. Cisailles

Les couteaux de plongée ont la particularité de très mal couper ! Pour se dégager d'un emmêlement dans le fil du dévidoir, l'idéal est d'utiliser une cisaille. Contrairement au couteau, une seule main suffit pour trancher le fil.



### 10.2.9. Coupe-fil (Eezycut)



Le coupe fil à lame de rasoir ou eezycut est un petit outil complémentaire pouvant facilement trancher des fils de pêche. Il se glisse facilement en poche



### 10.2.10. Mousquetons

Choisir des mousquetons coulissants à targettes dit « Américain » en inox, plutôt que des mousquetons pivotants classiques de « Pompiers ». La fermeture est plus sûre et la manipulation plus facile sous l'eau. Les plongeurs DIR<sup>29</sup> nomment les mousquetons de pompiers « Suicide Clips ». Les mousquetons galvanisés ou en aluminium sont totalement à proscrire.



### 10.2.11. Support de bloc de déco ou stage

Le principe est d'avoir deux mousquetons pivotant et coulissant aux parties supérieures et inférieures de la bouteille. Mousquetons qui seront passés respectivement dans un D ring d'une bretelle de harnais et dans un D ring de la ventrale du harnais. La sangle de portage étant un plus pour transporter le stage. Il existe des systèmes tout faits dans le commerce mais il est très facile de les fabriquer à moindre frais. Les mousquetons doivent avoir une taille suffisante que pour pouvoir être manipulés facilement sous l'eau. L'écartement entre les mousquetons doit être tel que la bouteille reste parallèle au corps du plongeur, lorsque celui-ci est en position horizontale.



<sup>29</sup> DIR : Do It Right... Bien faire les choses.



## 11. Agencement du matériel [ER]

**Un plongeur qui ne sait pas faire de nœuds est très aimé dans le magasin car il nourrit le patron, les employés et leurs familles, il l'est moins dans sa famille car il se ruine...**

### 11.1. Principe généraux

- Tous les accessoires doivent être fixés.
- Tous les accessoires doivent pouvoir être récupérés et rangés facilement sous l'eau seul, sans aide et en aveugle. Ce qui revient à dire que le plongeur doit savoir exactement où le matériel se trouve.
- L'aide d'un binôme pour récupérer du matériel n'est pas une option valable.
- Les accessoires pouvant rester accrochés doivent être fixés d'une manière élastique. L'élastique servant de point de rupture ultime en cas de croche.

### 11.2. Bloc principal, fixation des détendeurs et routage

Il n'est pas toujours facile d'avoir une configuration parfaite, la perfection n'existant pas, mais il est possible de s'en approcher en réfléchissant à quelques principes ! La configuration DIR, très réfléchi, s'en approche s'en approche de très près.

- Les robinets d'isolation des bouteilles et le manifold doivent être facilement accessibles par le plongeur sans aide extérieure.
- Les flexibles sont fragiles, il faut les protéger et éviter le risque de les accrocher à des aspérités.
  - Eviter les boucles à l'extérieur du gabarit du plongeur, ce qui implique de croiser certains flexibles.
  - Ne pas croquer les flexibles. Ils doivent présenter des courbes amples et coplanaire
- Les seconds étages des détendeurs doivent être accessibles très facilement, même sans aucune visibilité. Le plus simple est que les seconds étages se situent dans un triangle formé par les épaules et le nombril.
- Afin de facilement pouvoir partager de l'air, le détendeur principal sera de préférence muni d'un long hose. Long hose passé sous le bras et autour du cou. Ce détendeur est fixé du côté droit. Dans cette configuration le plongeur en difficulté ne prends PAS le détendeur de secours, mais reçoit le détendeur principal. Le donneur d'air prend le détendeur de secours pendu autour de son cou.
- Le second étage du détendeur principal est équipé d'un mousqueton coulissant avec élastique pour qu'on puisse l'accrocher à un D ring de la wing lors du passage sur le mélange de déco
- Le détendeur secondaire est attaché avec un élastique autour du cou. Il est fixé du côté gauche
- En cas de fermeture de la bouteille principale, le plongeur doit pouvoir gonfler sa Wing et lire



[Source : Proteushop](#)



la pression dans les bouteilles. L'inflateur de la Wing et le manomètre sera placé sur le premier étage du détendeur secondaire.

- L'inflateur pour l'étanche est monté sur le détendeur principal.

### 11.3. La bouteille de déco

**Elle n'est JAMAIS fixée sur le bloc principal.**  
**Elle est TOUJOURS fermée durant la plongée.**



Source : Documentation OMS

Pour éviter de respirer accidentellement un mélange ayant une forte concentration en oxygène cette bouteille n'est ouverte qu'à la profondeur d'utilisation. Avant la plongée on l'ouvre, on vérifie la pression et on la referme **sans** purger le détendeur. Cela permet d'éviter la présence d'eau sur le filtre en bronze fritté du détendeur. La bouteille de déco doit pouvoir s'ouvrir et se fermer facilement et sans aide. Le

plus simple est de la pendre par les mousquetons sur les D-Ring du harnais. De cette manière la bouteille va se lover sous le bras. La bouteille de déco doit être facilement décrochable en surface comme en immersion. Elle ne sera jamais fixée sur le scaphandre principal, ce n'est pas une pony. Traditionnellement si on a plus d'une bouteille de déco le mélange le plus oxygéné se trouve à droite. Le flexible est lové le long de la bouteille, entre deux élastiques, de manière qu'il puisse être dégagé par une simple traction. Lorsque la bouteille est pendue, le marquage du mélange doit être parfaitement visible en immersion. Pour éviter les chocs et l'encrassement du second étage du détendeur, il est tourné vers le haut, et se situe entre la bouteille et le corps du plongeur.



## 12. Les procédures de remontée et de décompression [ER]

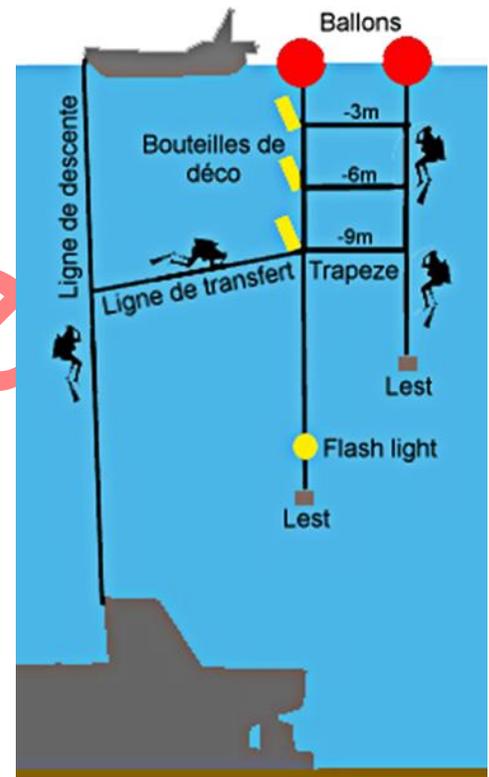
Il y a plusieurs méthodes pour faciliter la remontée et l'exécution des paliers de décompression. Remonter en pleine eau sauf le long d'un tombant n'est pas très sécuritaire et n'est pas la meilleure manière de respecter les profondeurs de paliers de décompression. Une meilleure méthode consiste à remonter le long de la ligne d'ancre ou mieux le long d'une station de décompression spécialement mise en place. Ces deux dernières méthodes ne sont possibles que si le courant n'est pas trop violent.

### 12.1 Remontées dans le bleu

C'est la méthode la moins la moins sécurisante. Il n'y a pas de point de repère durant la remontée, pas de signalisation en surface et le respect strict de la vitesse de remontée ainsi que de la profondeur des paliers est difficile. Cette méthode est à proscrire ou du moins à ne pas recommander.

### 12.2. Station de décompression (Shotline)

C'est la méthode la plus sécurisante, mais il ne peut pas y avoir trop de courant. La station de décompression permet de faire très confortablement les paliers avec une grande sécurité. Il est possible de l'équiper pour faire face à un manque de gaz de décompression, un manque de lestage... Elle est composée d'une ou plusieurs barres de décompression placées à intervalles réguliers sur des pendeurs lestés. Une ligne permet de rejoindre la station depuis le fond. Ce type de montage est très utilisée pour l'exploration d'épaves profondes. Il y a un repère fixe durant toute la remontée, la signalisation en surface est parfaite et le respect strict de la vitesse de remontée et de la profondeur des paliers est très facile à respecter (trapeze de décompression). De plus il y a des bouteilles de décompression fixes.



### 12.3. Remontée sous parachute au dévidoir

C'est la méthode sécurisante qui est la plus généralement adoptée même s'il y a du courant. A condition que le parachute soit largué depuis le fond, elle permet d'avoir un point de repère durant toute la remontée et d'avoir une bonne signalisation en surface. Le bateau peut facilement suivre les plongeurs en dérive dans le courant. La remontée le long de la ligne en bobinant permet un bon respect de la vitesse de remontée et de la profondeur des paliers. La procédure de largage depuis le fond est la suivante :

1. Décrocher le dévidoir et le parachute.
2. Dégonfler un peu le gilet.
3. Dérouler le parachute.
4. Passer sur le détenteur secondaire et

Source : Wikipédia © Arjes  
Licence : CC-BY-SA





avec le détendeur principal souffler de l'air dans le parachute. Il est aussi possible de l'air par la bouche, certains parachutes ayant une pipette de gonflage buccale. Le must étant d'avoir un parachute avec une petite bouteille d'air destiné au gonflage. Il faut prendre soin de ne pas se faire entraîner. Le dévidoir ne doit pas être accroché au harnais, la dragonne ne doit pas être passée autour du poignet. On tient le tout éloigné du corps pour éviter les croches.

5. Dès qu'on ne peut plus tenir le parachute on le laisse filer jusqu'en surface en débloquant le cliquet du dévidoir.
6. La remontée se fait en bobinant le fil en prenant le plus grand soin de le maintenir tendu.

Il faut un parachute ROUGE PAR plongeur et PAS un parachute par palanquée. Il est recommandé d'avoir en plus un parachute JAUNE – Emergency.

La technique du double parachute rouge côte à côte en cas d'urgence est à proscrire. Le phénomène de parallaxe pourrait empêcher la sécurité surface de voir les deux parachutes.



## 13. Le « What-If » et les principes de redondance

### 13.1. Le « What-if »

Littéralement : Que faire au cas où ! Cette philosophie des plongeurs « Tek » est très facile à comprendre, moins facile à mettre en œuvre. Il s'agit de dresser une liste, non exhaustive, de tous les problèmes matériels ou autres que l'on puisse rencontrer en plongée. On ne plonge que si tous les points ont reçu une réponse satisfaisante. L'aide obligatoire de la part du binôme pour résoudre un problème de la liste n'est pas considérée comme une option valable et doit être rejetée. C'est cette liste qui va permettre de mettre en place un système de redondance.

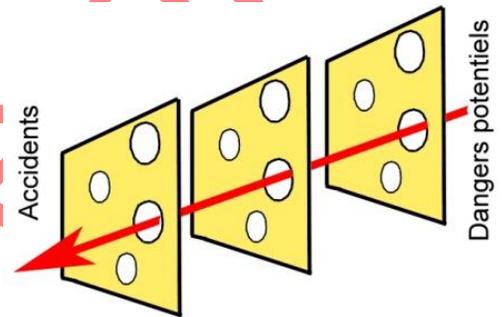
### 13.2. Les redondances

#### 13.2.1. La philosophie de la « tranche d'emmental ».

Pour passer d'un « danger » à un « accident », il faut passer au travers d'une série de barrières de sécurité. James. Reason, de l'université de Manchester, compare ses barrières à des tranches d'emmental, le « swiss cheese model ».

Pour limiter les risques il est nécessaire :

- D'avoir un nombre de trous réduits et donc, peu de possibilité de panne ;
- Que la taille des trous soit la plus réduite possible et donc d'avoir une bonne fiabilité ;
- Que les trous ne soient pas alignés, c'est-à-dire que la faillite d'un système ne puisse pas engendrer la faillite dans le système suivant ;
- Avoir un nombre de tranches suffisant, c'est-à-dire diminuer la probabilité d'un alignement des trous. C'est le principe fondamental de la redondance.



##### 13.2.1.1. Note sur la plongée « solo »

Dans le cas de la « plongée classique », on peut considérer que le binôme représente une « tranche d'emmental », avec des trous plus ou moins importants en fonction du degré d'autosuffisance du binôme, de sa propension à porter aide et assistance, ainsi que de la fiabilité de son équipement. Dans le cas de la « plongée solo », la tranche d'emmental nommée « binôme » a disparu. Pour assurer une sécurité équivalente, il faut donc d'une part remplacer cette tranche par une ou des tranches similaires : c'est le principe de la redondance et d'autre part diminuer la taille des trous dans d'autres tranches, c'est-à-dire augmenter la fiabilité.

#### 13.2.2. La redondance

La redondance consiste à disposer plusieurs exemplaires d'équipements ayant les mêmes fonctions de base. Les solutions peuvent être mécaniques et/ou électronique. Ce système permet de réduire les risques induits par une panne mais aussi d'augmenter les performances de l'outil



ou combiner les deux effets. La redondance peut être symétrique, asymétrique, évolutive ou modulaire.

- La redondance symétrique est réalisée à l'aide de deux systèmes ayant des fonctions identiques strictement opposées dans l'espace.
- La redondance asymétrique permet de basculer d'un type d'équipement vers un autre.
- La redondance évolutive consiste en cas de panne d'isoler le mécanisme défaillant pour utiliser une autre partie du système.
- La redondance modulaire consiste à dévier une panne d'un équipement vers un autre (free flow control device).

#### *13.2.2.1. Note sur la plongée « solo »*

La redondance en plongée solo est constituée par le doublement symétrique du matériel ou des dispositifs sensibles (machines, appareils, instruments...) pour une même fonction vitale. De sorte qu'en cas de défaillance de l'un ou de plusieurs appareils, la fonction vitale puisse être assurée. Avec plusieurs appareils pour une fonction, la probabilité de défaillance simultanée sera bien inférieure à celle d'une seule machine. La probabilité de survenance d'un événement est convertie en degré de confiance ou de criticité.

#### **13.2.3. Le défaut de mode commun.**

Le défaut de mode commun consiste à risquer de perdre plusieurs systèmes redondants à cause d'une et une seule cause extérieure. On peut citer les exemples suivants :

- Pas de vanne manifold sur une bi-bouteille. Un défaut qui survient sur une des bouteilles risque de vider les deux bouteilles.
- Utilisation de deux ordinateurs identiques : Un bug au niveau du logiciel fait perdre la fiabilité de l'ensemble du système.



# Partie 2

---

## La station de gonflage

- |  |         |
|--|---------|
| 1. Généralités et définitions            | Page 58 |
| 2. Préparation du matériel               | Page 62 |
| 3. Composition de la station de gonflage | Page 66 |
| 4. Installation des stations de gonflage | Page 73 |



## 1. Généralités et définitions

### 1.1. Composition de l'air

Gaz	%
Azote (N <sub>2</sub> )	78,09
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20,95
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	5,0 x 10 <sup>-5</sup>
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,035
Ozone (O <sub>3</sub> )	1,0 x 10 <sup>-6</sup>
Hélium (He) 5	,24 x 10 <sup>-4</sup>
Krypton (Kr)	1,0 x 10 <sup>-4</sup>
Néon (Ne)	1,8 x 10 <sup>-3</sup>
Xénon (Xe)	8,0 x 10 <sup>-6</sup>
Argon (A)	0,93
Radon (Rn)	6,0 x 10 <sup>-18</sup>

La vapeur d'eau est présente dans l'atmosphère dans des proportions comprises entre 0,1% pour les régions glacées de notre globe et 5% pour les zones tropicales. Les gaz indiqués en bleu dans le tableau sont les gaz appelés communément les « gaz rares ». La masse molaire de l'air est de 28,97

### 1.2. L'air « Respirable »

Depuis 1999 une norme édictée par l'Union Européenne définit les qualités minimales de l'air dit « respirable » dans la norme EN 12021. Le contrôle de l'air est effectué à l'aide de tube réactifs. Depuis cette date les constructeurs de compresseurs sont tenus de ne mettre sur le marché que des machines qui répondent à cette norme.



[Malette de test. Documentation Dräger](#)

Norme EN 12021	
Oxygène (O <sub>2</sub> )	21 +/- 1%
Vapeur d'eau 200 bar	40 – 50 mg/m <sup>3</sup>
Vapeur d'eau 300 bar	< 35 mg/m <sup>3</sup>
Vapeur d'huile 200 bar	0,5 mg/m <sup>3</sup>
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Maximum 500 ppm
Monoxyde de carbone (CO)	Maximum 15 ppm



### 1.3. Caractéristique des gaz utilisé en plongée

Plusieurs gaz respiratoire sont utilisés en plongée. Ci-après leurs caractéristiques usuelles. Le tableau est établi pour une température de 293 K

Gaz	$\mu$	$\delta$	Cp	Cv	$\lambda$	k
Hélium (He)	4	0,18	5,23	3,15	0,15	1,66
Azote (N <sub>2</sub> )	28	1,25	1,04	0,745	0,025	1,39
Oxygène (O <sub>2</sub> )	32	1,43	0,91	0,65	0,026	1,4
Air		1,29	1	0,72	0,025	1,39

Avec :

$\mu$  : Masse moléculaire (g/môle)

$\delta$  : Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)

Cp : Chaleur massique à pression constante (KJ/Kg.K)

Cv : Chaleur massique à volume constant (KJ/Kg.K)

$\lambda$  : Coefficient de conductivité thermique (W/m.K)

k=Cp/Cv : Coefficient adiabatique

### 1 4. Règles générales édictées par le NOAA

Le NOAA a édicté quelques règle de bonne pratique dont voici un résumé succinct.

- Tous les gaz utilisés en plongée doivent être de qualité respiratoire.
- Le matériel qui est susceptible d'être en contact avec un mélange contenant plus de 40 % d'O<sub>2</sub> doit être nettoyé et dégraissé pour un service à l'oxygène pur.
- Tous les joints, clapets et autres mécanismes en contact avec un mélange contenant plus de 40 % d'O<sub>2</sub> doivent être compatible pour l'oxygène pur.
- Le montage du matériel, l'entretien et la mise en conformité pour un service « oxygène pur » doivent être exécuté par un spécialiste qualifié.

### 1.5. Oxygène, dangers et précautions à prendre

**L'oxygène est un gaz comburant. Il peut présenter des risques d'explosions ou d'incendie. Il ne peut être mis en œuvre que par des personnes compétentes, bien formées et conscientes des risques inhérents à son utilisation.**

#### 1.5.1. A ne JAMAIS faire

- Utiliser des graisses non spécifiques.
- Fumer ou avoir un feu à flamme non couverte à proximité de l'oxygène.
- Ne jamais faire passer un gaz contenant plus de 40% d'oxygène dans le compresseur.
- Ouvrir les vannes brutalement.
- Utiliser un matériel de fabrication ou de transfert non dégraissé.
- **Injecter un mélange contenant plus de 40% d'O<sub>2</sub> dans le gilet ou le costume étanche.**



### 1.5.2. A TOUJOURS faire

- Utiliser un matériel de fabrication et de transfert parfaitement dégraissé.
- Dégraisser régulièrement le matériel de fabrication et de transfert.
- Avoir une installation propre dans un local propre.
- Ouvrir les vannes et robinets progressivement.
- Veillez à ce que personne ne fume ou allume une flamme à proximité.
- Pour le passage dans un compresseur, vérifiez que le pourcentage d'oxygène est de maximum 40% et que le mélange est bien homogène.

### 1.5.3. Matériaux compatibles avec l'oxygène

Le tableau ci-après indique à quel degré les matériaux sont compatibles avec l'oxygène.

Matériaux	Compatibilité	Remarques
Acier ferritique	Faible	Rouille, corrosion perforante en présence d'humidité
Acier austénitique	Très bonne	Inox fort % de chrome et de nickel (Ainsi 304, 316)
Laiton	Très bonne	
Aluminium	Bonne	Se couvre d'une couche passive d'oxyde protecteur ( $Al_2O_3$ ) peu toxique.
Titane	Moyenne	Se couvre d'une couche passive d'oxyde protecteur ( $TiO_3$ ) <u>considérée comme cancérogène</u>
Plastique ABS	Très bonne	
Teflon (PTFE)	Bonne	En fonction de la nuance.
Joint Buna-Nitrile	Moyenne	Couleur noire se désagrège rapidement
Joint Viton	Bonne	Couleur verte. Fluoro-carbone. Dégage des vapeurs toxique en cas d'inflammation.
Joint Silicone	Très bonne	Couleur rouge. Ne peut être utilisé que dans des montages statiques. Demande une précision d'usinage importante
Graisse	<b>Incompatible</b>	<b>Inflammation à température ambiante</b>
Graisse PERCO B	Compatible	Graisse spéciale oxygène

### 1.6. Hélium, dangers et précautions à prendre

L'hélium est un gaz rare très léger, non combustible, non comburant, totalement neutre et très coûteux. Il a tendance à faire chauffer les compresseurs. Il faut bien ventiler le compresseur et périodiquement le laisser refroidir. Lors de l'achat de l'Hélium, il est impératif de vérifier la qualité pour s'assurer que ce n'est pas un « Hélium qualité ballon » qui contient de l'azote, des impuretés et pire du monoxyde de carbone (CO). Il faut favoriser un hélium de qualité, pur à 99,996% (Hélium 4.6).



## 1.7. Les gaz utilisés en plongée

---

**NITROX** : Mélange binaire d'oxygène et d'azote. Utilisé par les plongeurs récréatifs et Tek.

**HELIOX** : Mélange binaire composé d'hélium et d'oxygène, plongée professionnelle ou en plongée sportive dans les recycleurs.

**TRIMIX** : Mélange ternaire le plus utilisé en plongée Tek circuit ouvert ou fermé, il est composé d'hélium, oxygène et azote.

Le Trimix hyperoxique contient au moins 21% d'oxygène et le Trimix hypoxique contient moins de 21% d'oxygène. L'hyperoxique est utilisé en décompression

**HELIAIR** : Mélange d'air et d'hélium sans apport d'oxygène, il s'agit donc d'un Trimix hypoxique.

**HYDRELIOX** : Mélange ternaire, exclusivement utilisé en plongées pros à saturation à des profondeurs très importantes il est composé d'oxygène, d'hélium et d'hydrogène.

**HYDROX** : Mélange binaire, exclusivement utilisé en plongées pros à saturation à des profondeurs très importantes il est composé d'oxygène, et d'hydrogène.

**ARGON** : Gaz neutre, non respiratoire qui ne sert pas dans les mélanges. Uniquement utilisé dans les costumes secs pour augmenter l'isothermie.

### 1.7.1. Identification des gaz et degré de pureté

Dans l'Union Européenne l'identification des bouteilles de gaz est réglementée par la norme EN 1089-3. L'identification se fait par la couleur de l'ogive. D'une manière générale :

- Jaune : gaz toxique ou Corrosif
- Rouge : gaz inflammable
- Vert : gaz inerte
- Bleu clair : gaz oxydant

Des cas particuliers : Blanc pour l'oxygène et vert foncé pour l'argon.

La pureté d'un gaz est indiquée par deux chiffres séparés par un point. Le premier chiffre indique le nombre de « 9 ». Le chiffre derrière le point est le dernier chiffre significatif du degré de pureté.

Exemple :

Oxygène 2.5 est un oxygène pur à 99,5%

Hélium 4.6 est un Hélium pur à 99,996 %

**Chez le gazier, il faut toujours vérifier l'étiquetage du gaz et sa pureté.**



## 2. Préparation du matériel

Comme nous l'avons vu l'utilisation de l'oxygène pur et des mélanges contenant plus de 40% d'oxygène est délicat et demande d'avoir du matériel propre, parfaitement dégraissé et que les matériaux utilisés sont compatibles avec l'oxygène. Dans ce chapitre nous aborderons la manière de préparer le matériel.

### 2.1. Les produits

#### 2.1.1. Les dégraissants et détartrants

Type	Puissance	Utilisation / Remarques	Toxicité
Acétone	Fort	Métaux	Très toxique, explosif
Perchloréthylène	Fort	Métaux	Très toxique
Teepol + eau chaude	Moyenne	Plastique, joint, bouteille	Non toxique
Liquide vaisselle + eau chaude	Faible	Plastique, joint, bouteille	Non toxique
Vinaigre de cuisine	Détartrant	Petites pièces	Alimentaire
Liquide spécifique pour bac à ultrasons	Détartrant Dégraissant	Petites pièces. Voir les spécificités du produit	Non toxique

##### *2.1.1.1. Précautions pour utiliser du trichloréthylène, perchloréthylène et acétone.*

- Le trichlo, le perchlo et l'acétone sont des produits nocifs et dangereux, il faut les utiliser avec précaution dans des locaux bien aérés.
- Ne jamais fumer en présence de ces produits, non seulement c'est très nocif, mais l'acétone peut exploser.
- Ne jamais tremper les mains nues dans ces produits.
- Ne jamais mélanger ces produits entre eux ou avec un autre produit dégraissant.
- Toujours bien rincer après dégraissage.
- Ne jamais tremper les matières plastiques et les joints dans ces produits, ils seront inexorablement attaqués.

#### 2.1.2 Les abrasifs

Abrusif	Bouteille	Remarques
Gravier	Acier	Efficacité moyenne, à utiliser pour des bouteilles peu encrassées
Verre pilé	Acier,	Efficacité faible. Excellent pour l'aluminium, pour l'acier ne peut enlever que quelques traces de rouille
Bille verre	Aluminium	
Céramique	Carbone	
Corindon (Alumine)	Acier	Très efficace. A ne pas utiliser avec de l'acide, à cause d'un possible dégagement de gaz. L'efficacité est proportionnelle à la densité du produit



### 2.1.3. Les détergents

Détergent	Bouteille	Remarques
Liquide vaisselle et eau chaude	Acier, Aluminium Carbone	Rien a signaler
Teepol et eau chaude		
Acide phosphorique à 5%	Acier	Ne <b>PAS</b> utiliser avec du Corindon
Solution de dérouillage		
Additif de tonnelage à 10%	Acier	A utiliser avec le Corindon

### 2.2. Dégraissage du petit matériel

Le dégraissage du petit matériel, la question qui revient le plus souvent sur tous les forums de discussions ! Je ne connais qu'une façon de dégraisser...la bonne. C'est à dire la méthode qui permet d'éliminer toutes les particules de graisse et d'huile. Bien sûr éliminer jusqu'à la dernière molécule est un vœux pieux, mais on peut tenter de s'approcher de cet objectif en combinant les techniques. Bien souvent on pense que le passage dans un bac à ultrasons suffit à tout éliminer. Ce bac sert surtout à détartre, pas à dégraisser, à moins d'utiliser un produit spécifique qui détartre et qui dégraisse ou deux produits en deux opérations distinctes. Dans les spécifications de ces produits il doit être indiqué qu'il est valable pour « un service oxygène ». Tout le petit matériel qui est susceptible d'entrer en contact avec un mélange qui contient plus de 40 % d'oxygène doit être dégraissé au moins une fois par an.



[Bac à ultrasons Catalogue Bigata](#)

Pour effectuer un bon dégraissage il est nécessaire de :

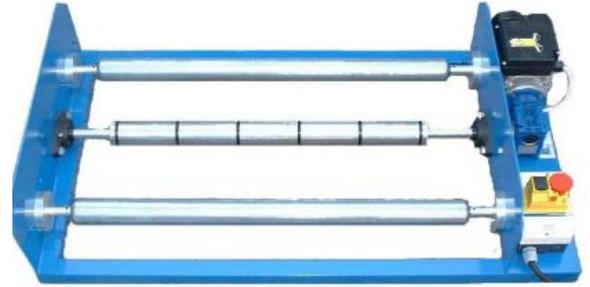
1. Commencer par démonter le matériel le plus complètement possible.
2. Détartre les pièces au vinaigre ou dans un bac à ultrasons avec le liquide adéquat (vérifier l'adéquation entre le produit et le matériau des pièces).
3. Dégraisser en brossant avec le solvant adéquat, ne pas se contenter de faire tremper les pièces ou utiliser un bac à ultrasons avec le liquide adéquat (vérifier l'adéquation entre le produit et le matériau des pièces).
4. Rincer énergiquement à l'eau très chaude pour éliminer les traces des produits.
5. Recommencer les opération au moins deux fois.



## 2.3. Préparation de la bouteille

La plupart des centres de plongée remplissent les bouteilles par la méthode des « pressions partielles ». Il injecte de l'oxygène dans la bouteille, de ce fait la bouteille et le robinet doivent être parfaitement dégraissés et les joints compatibles à l'oxygène.

La bouteille doit posséder un certificat de conformité pour le Nitrox délivrée par un service agréé (Apragaz.....), elle devra être pourvue d'une mention NITROX sur une large bande jaune/vert et posséder une étiquette marquée reprenant le %O<sub>2</sub>, la date de remplissage et la profondeur maximum d'utilisation (MOD).



Tonneuse double Catalogue Bigata

Sont absolument à proscrire :

- Les films anti-corrosion (paraffine...) à l'intérieur de la bouteille.
- Les robinets à ouverture rapide (robinet 1/4 de tour) qui augmentent les risques de combustion spontanée.

Avant le dégraissage, il faut décrasser l'intérieur de la bouteille. Si la bouteille n'est pas trop encrassée, le passage d'un fouet métallique est suffisant. Dans le cas contraire, il faut « tonner » la bouteille. Cette opération consiste à faire tourner la bouteille avec un abrasif et un liquide lubrifiant. Le plus facile est d'utiliser une tonneuse. Cet appareil permet de faire tourner les bouteilles sur elles-mêmes. Elle est composée de deux cylindres actionnés par un petit moteur électrique, la bouteille à « tonner » est posée sur les deux cylindres. Pour effectuer un bon nettoyage il est important de bien choisir l'abrasif et le détergent.

**L'abrasif ne peut jamais tourner à sec.**

### 2.3.1. Le tonnelage et dégraissage

1. Placer l'abrasif dans la bouteille à raison de 4 à 6 kg suivant la taille de la bouteille.
2. Remplir complètement la bouteille avec du détergent et boucher la bouteille, le bouchon faisant office de protection des filets.
3. Tonner entre 15 et 90 minutes suivant l'état d'encrassement de la bouteille.
4. Vider et tamiser l'abrasif et le détergent, l'abrasif étant récupérable.
5. Rincer abondamment la bouteille au nettoyeur haute pression avec une bonne dose de liquide vaisselle ou de Teepol pour achever le dégraissage.
6. Retourner la bouteille sur un support pour vider l'eau et sécher à l'air chaud (sèche-cheveux)

La question est de savoir quel abrasif utiliser avec quel solvant pour quelle type de bouteille ? le tableau à la page suivante peut donner une bonne indication.



Bouteille	Encrassement	Gravier					Verre					Céramique					Corindon									
	Détergent →	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
Acier	Faible	X	X				X	X				X	X											I	I	
	Moyen	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X									I	I	
	Fort																X	X						I	I	X
Aluminium	Faible						X	X				X	X											I	I	
	Moyen						X	X				X	X											I	I	
	Fort						X	X				X	X											I	I	
Carbone insert Aluminium	Faible						X	X				X	X											I	I	
	Moyen						X	X				X	X											I	I	

1 : Liquide vaisselle et eau chaude

2 : Teepol et eau chaude

3 : Acide Phosphorique dilué à 5%

4 : Solution de dérouillage (Bon rinçage car toxique)

5 : Additif tonnelage

I : INTERDIT



### 3. composition des stations de gonflage

Les stations de gonflage se composent généralement des éléments suivants :

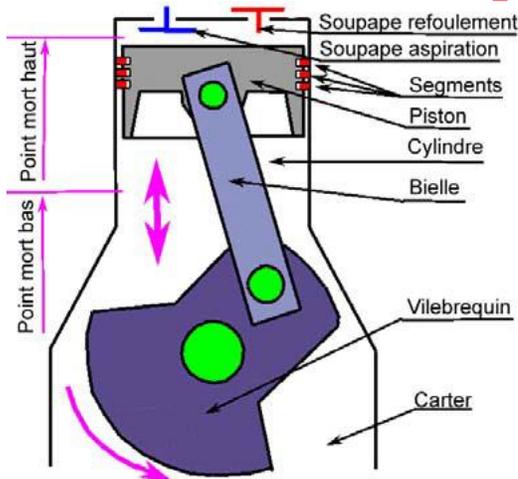
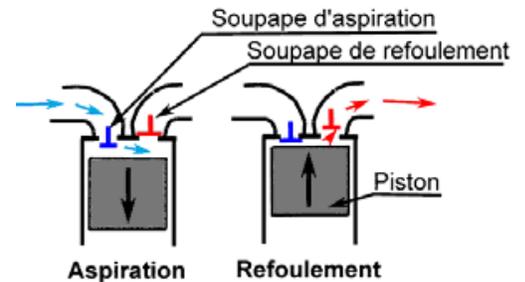
- Un ou des compresseur(s) « Haute Pression » 200 ou 300 bar.
- Le(s) moteur(s) d'entraînement (s) du (des) compresseurs pour les petites unités mobiles il s'agit souvent d'un moteur thermique essence ou diesel.
- Un système de refroidissement par air, le plus généralement, ou par eau pour les grosses unités.
- Un système de filtration incluant un séparateur d'eau et d'huile.
- Une rampe de gonflage avec un panneau de contrôle.
- Une ou plusieurs bouteilles tampons.
- Une tuyauterie d'aspiration munie d'un filtre primaire
- Le tuyautage haute pression entre le compresseur, les tampons et la rampe de gonflage.

Pour les très petites unités fixes ou mobiles la « station de gonflage » est réduite à sa plus simple expression, c'est-à-dire : un compresseur, un moteur, une unité de filtration, un ventilateur de refroidissement et un flexible de gonflage en guise de rampe. Le tout monté sur un châssis unique.



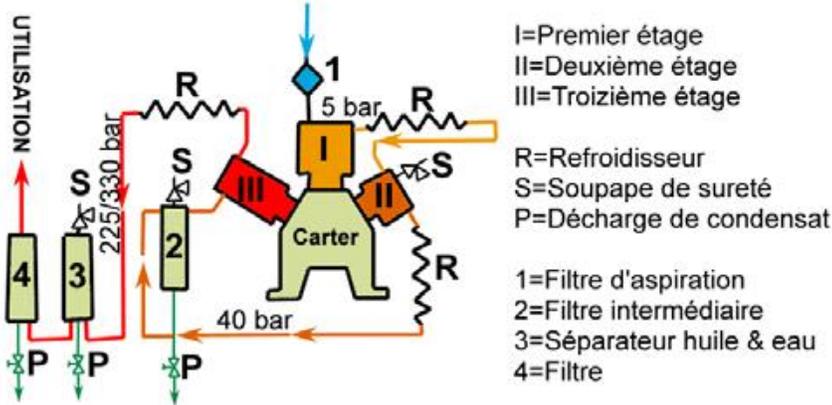
#### 3.1. Le compresseur

Le compresseur est la partie essentielle d'une station de gonflage. Les compresseurs utilisés pour le gonflage des bouteilles sont des compresseurs à pistons. C'est une machine alternative, qui dans un premier temps, lorsque le piston descend, aspire de l'air au travers de la soupape d'aspiration ouverte. Dans un deuxième temps, lorsque le piston remonte, l'air est refoulé à une pression déterminée au travers de la soupape de refoulement ouverte.



Le vilebrequin et la bielle transforment le mouvement circulaire uniforme du moteur en un mouvement linéaire alternatif du piston. On définit le rapport volumétrique de compression, communément appelé rapport de compression, comme le rapport entre le volume du cylindre piston au niveau bas et le volume du cylindre piston au niveau haut. Pour une raison d'échauffement le rapport de compression est limité. Pour obtenir la pression de gonflage des bouteilles il est nécessaire d'utiliser trois ou quatre étages de compression séparés par des refroidisseurs.

La lubrification des éléments mécaniques se fait par barbotage dans l'huile se trouvant dans le fond du carter et pour les gros



compresseurs par huile pressurisée. La pressurisation de l'huile est obtenue par une pompe qui injecte l'huile aux points de lubrification : segments, paliers... Les huiles utilisées sont non toxiques, doivent résister à des températures élevées et ne pas se décomposer sous les effets de la pression. Les compresseurs modernes n'utilisent plus que des huiles de synthèse. La précision d'usinage obtenue de nos jours rend les huiles minérales

incompatibles avec les compresseurs de la dernière génération.

La lubrification indispensable pour le bon fonctionnement du compresseur entraîne de l'huile dans l'air. Il faudra un traitement ultérieur de cet air pour le rendre respirable et conforme aux normes. L'étanchéité entre le cylindre et le piston est assurée par une série de segments métalliques, qui sont des anneaux ayant une certaine élasticité pour rattraper les usures et les jeux fonctionnels.

### 3.2. Le moteur d'entraînement

Puissance moteur en fonction du débit - Pression 225 bar	
Débit (l/min)	Puissance (Kw)
100	2,5
140	3
200	4
250	5,5
350	7,5
500	11
650	15

Dans les stations fixes, les compresseurs sont entraînés par des moteurs électriques monophasés pour les petites puissances et triphasés pour les puissances plus conséquentes. Les compresseurs des stations mobiles sont entraînés par des moteurs thermiques essence ou diesel. Le moteur entraîne le compresseur par l'intermédiaire d'un système de poulies et de courroies. Le démarrage demande une énergie considérable et est un facteur d'usure important. Pour cette raison on les limite à 3 ou 4 par heure au maximum. Pour les petits compresseurs, il est bon de laisser une période de refroidissement de 10 minutes toutes les heures.

### 3.3. Le filtre d'aspiration

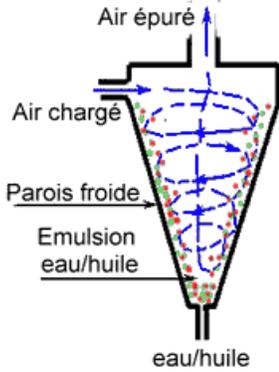


Le filtre d'aspiration permet d'éliminer les poussières présentes dans l'air aspiré par le compresseur. Ce filtre est particulièrement important pour protéger les cylindres du compresseur contre les rayures, ce sont des filtres secs en carton que l'on trouve très facilement dans l'industrie automobile.

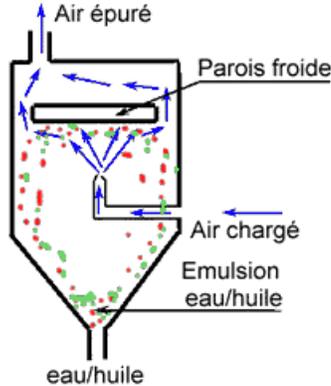


### 3.4. Le séparateur huile/eau

#### Séparateur cyclonique



#### Séparateur par impact



Avant de filtrer l'air il est indispensable d'éliminer au maximum les particules d'huiles et la vapeur d'eau. Le principe de cette filtration mécanique est simple, l'air chaud chargé de particules est mis en mouvement tourbillonnaire dans un cyclone. Les effets combinés de la force centrifuge et de la gravité séparent les particules d'huile de l'air. La vapeur d'eau quant à elle se condense au contact des parois froides du cyclone pour s'écouler le long de celles-ci. On obtient un effet similaire en projetant l'air chaud directement sur une paroi froide. Ce type de

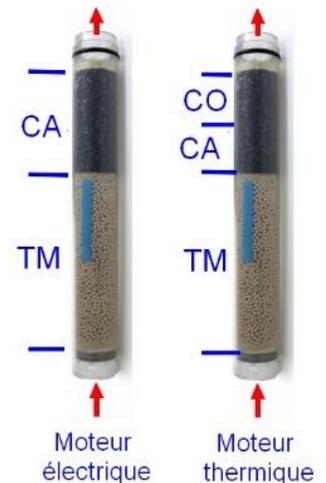
séparation mécanique élimine 90 à 95% de l'huile et de la vapeur d'eau résiduelle. Les condensats sont recueillis à la partie inférieure de l'appareil pour être éliminés manuellement à l'aide d'un robinet ou pour les grosses unités à l'aide d'un purgeur automatique.

### 3.5. La filtration finale – filtre à charbon actif.

Après le séparateur, l'étape suivante consiste à affiner l'extraction de l'humidité résiduelle en faisant passer le gaz respiratoire sur un tamis moléculaire<sup>30</sup>. Celui-ci se présente sous la forme de petites billes blanche-brunâtre. Par la suite, le gaz respiratoire passe sur du charbon actif afin d'éliminer les traces d'huile et les odeurs. Pour les petits compresseurs le tamis moléculaire et le charbon actif se trouvent dans la même cartouche. Les deux produits sont séparés par une rondelle de feutre.

**Lors du remplacement de la cartouche, il faut être attentif à ne pas se tromper de sens.**

Le charbon actif n'élimine PAS le monoxyde de carbone (CO). Il faut donc être très prudent lors du gonflage et éloigné l'aspiration d'air des sources éventuelles de gaz d'échappement. A l'heure actuelle, des fabricants ont mis sur le marché des cartouches contenant un catalyseur<sup>31</sup> qui transforme le monoxyde de carbone (CO) en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ce catalyseur élimine aussi l'ozone, mais nécessite un gaz très sec ! Le tamis moléculaire absorbe légèrement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). C'est la raison pour laquelle certaines cartouches ont une couche de tamis moléculaire après le catalyseur.

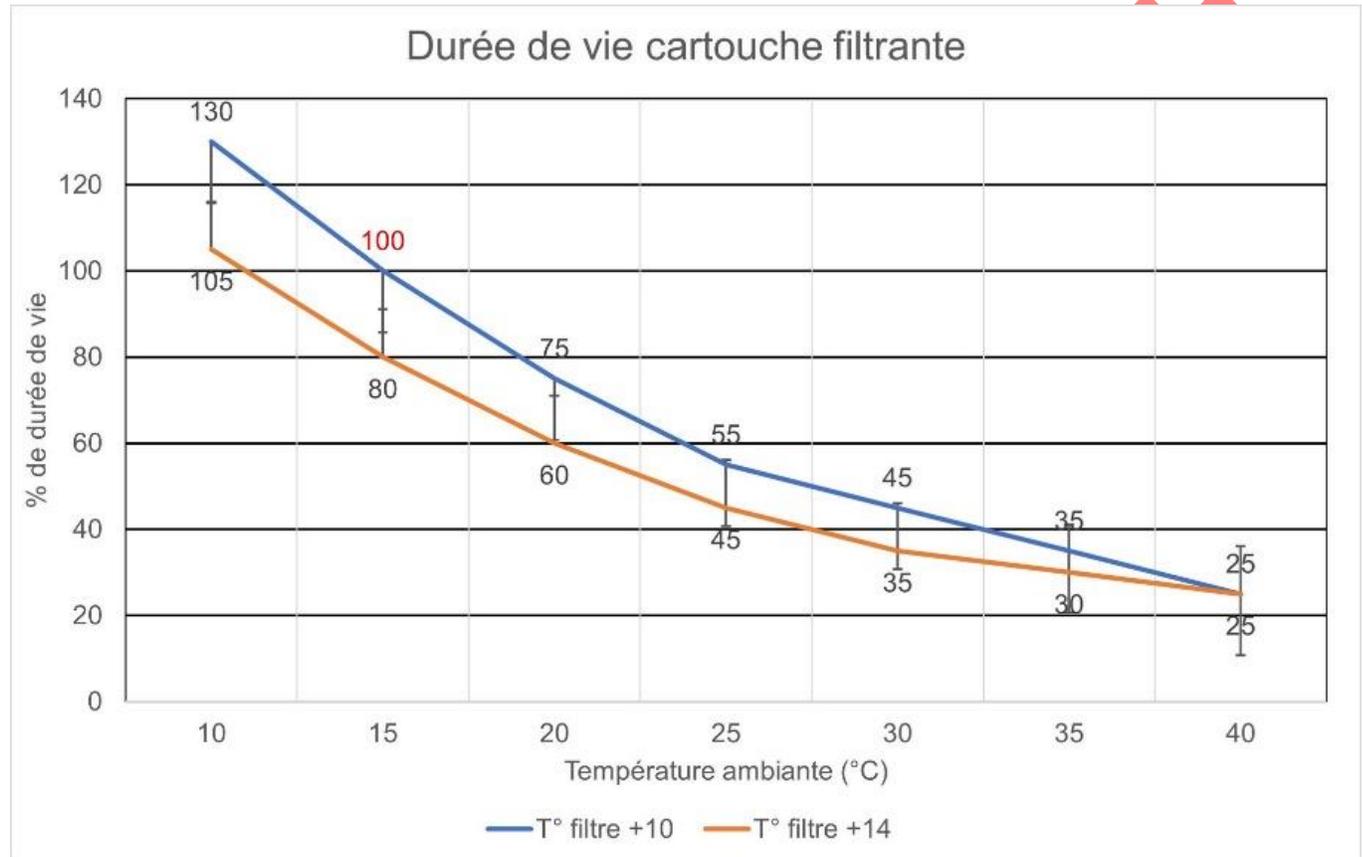


<sup>30</sup> C'est un minéral à base de silice à structure cristalline tridimensionnelle. Les cavités ont la propriété d'adsorber les molécules d'eau.

<sup>31</sup> L'HopCalite est un mélange contenant principalement de l'oxyde de cuivre (CuO), de l'oxyde de manganèse (MnO). Ce produit a été mis au point en 1920 à l'université Johns Hopkins et à l'université de Californie.



La durée de vie d'une cartouche<sup>32</sup> diminue avec la température du gaz respiratoire à l'entrée du filtre et la température à l'entrée du filtre est conditionnée par la température ambiante. En moyenne, la température à l'entrée du filtre est de 10 à 14°C supérieure à la température ambiante. L'indication de la durée de vie est souvent exprimée en Normo mètre cube (Nm<sup>3</sup>)<sup>33</sup>.



Le graphique donne une estimation, en pourcentage, de la durée de vie d'une cartouche filtrante par rapport au conditions normales et pour un compresseur bien ventilé. L'indice 100% est pour une température ambiante de 15°C et une température à l'entrée du filtre de 25°C. La courbe bleue (T° filtre + 10) Correspond a une température d'entrée du filtre de 10°C supérieure à la température ambiante. La courbe orange (T° filtre + 14) Correspond a une température d'entrée du filtre de 14°C supérieure à la température ambiante.

<sup>32</sup> Note de l'auteur : **Il convient de se montrer prudent.** Les indications des fabricants de cartouches et / ou des revendeurs peuvent être floues. On ne sait pas toujours si les indications font références à la température ambiante ou à la température à l'entrée du filtre. Pour une même cartouche, il n'est pas rare de trouver, suivant le site, des durées de vie qui vont du simple au double !

<sup>33</sup> Le Normo mètre cube (anciennement Normal mètre cube) exprime une quantité de gaz dans des conditions normales c'est-à-dire à la pression de 1 atm et à la température de 15°C (norme ISO 2533) ou 0°C (norme DIN 1343). **Si la norme n'est pas précisée, l'indication reste floue !**



Exemple : un constructeur donne pour sa cartouche une capacité de 130 Nm<sup>3</sup> suivant la norme ISO 2533. A la température ambiante de 25°C la capacité de la cartouche sera réduite entre 45 et 55% de sa capacité nominale. Elle ne pourra donc filtrer que 59 à 72 m<sup>3</sup> de gaz respiratoire

Type de cartouche et utilisation		
Marquage	Composition	Utilisation recommandée
CA/TM/CO	Charbon actif / Tamis moléculaire / Catalyseur de CO	<u>Moteur thermique.</u> Air, Nitrox et Trimix au stick
CA/TM	Charbon actif / Tamis moléculaire	<u>Moteur électrique.</u> Air, Nitrox et Trimix au stick
CA	Charbon actif	Hélium, Argon

Les cartouches CA/TM/CO ont en moyenne une capacité de filtration inférieur de 15% par rapport aux cartouches CA/TM.

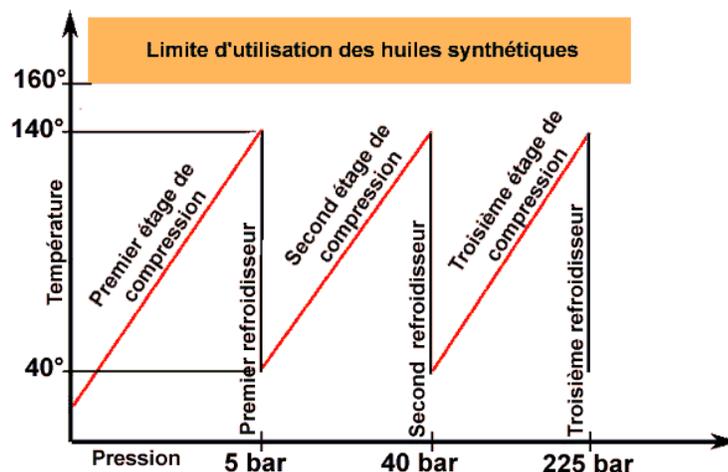
### 3.6 Lubrification et le refroidissement du compresseur

La lubrification et le refroidissement du gaz comprimé entre les différents étages du compresseur sont des fonctions essentielles. La vie du compresseur en dépend ! Dans le cas des petits compresseurs, la lubrification est assurée par barbotage. Lors de sa rotation, le vilebrequin va projeter l'huile qui se trouve dans le fond du carter sur les pièces en mouvements. Pour assurer une lubrification optimale, le carter doit être rempli correctement et le compresseur doit être à l'horizontal.



Trop ou pas assez d'huile affecte la qualité de la lubrification.

A l'heure actuelle, on utilise principalement des huiles de synthèse<sup>34</sup>, qui résistent mieux aux hautes températures et qui ont une faible toxicité ! A haute température, l'action combinée de la température et de la pression partielle d'oxygène (ppO<sub>2</sub>) du gaz respiration peut désagréger l'huile et libérer des composés toxiques (COV)<sup>35</sup>. En pratique la température du gaz comprimé est limitée à 140°C. Au-delà les huiles se désagrègent et ne peuvent plus assurer une lubrification correcte des éléments mécaniques.



<sup>34</sup> Contrairement à une idée très répandue, ce ne sont ni des huiles végétales, ni des huiles alimentaires. Une huile alimentaire peut être bue, sans trop de problèmes, mais pas inhalée dans les poumons (paraffinose) !

<sup>35</sup> Composés Organiques Volatils



Il ne faut jamais mélanger des huiles différentes. Ne JAMAIS utiliser l'huile pour le moteur thermique dans le compresseur et vice versa. Utiliser de préférence l'huile préconisé par le fabricant<sup>36</sup> !

Le refroidissement du compresseur est non seulement important pour garantir le bon fonctionnement de la machine, mais aussi et surtout pour ne pas compromettre la qualité du mélange respiratoire. Pour les compresseurs portable, le refroidissement est assuré par la circulation d'air autour de la machine. L'air pulsé par un ventilateur refroidi le carter et le gaz respiratoire qui passe dans une série de serpentins. Ces serpentins se trouvent entre les différents étages de compression. Le carter est muni d'ailettes pour assurer une meilleure évacuation de la chaleur.

### 3.7. Soupape de surpression

La soupape de surpression est un élément primordial. Elle évite de gonfler les bouteilles au-delà de leur pression nominale. Le tarage doit correspondre à la pression maximale d'utilisation de la bouteille. Il ne faut jamais gonfler une bouteille 200 bar avec une soupape tarée pour une bouteille 300 bar, cela représente un danger mortel !

Pression (bar)	
Service	Tarage
200	225
232	250
300	330

Il faut vérifier régulièrement le bon fonctionnement de cette soupape. On procède comme suit :

1. Connecter le compresseur à une bouteille de plongée. Cette bouteille restera fermée durant toute la vérification.
2. Après avoir ouvert les purges de condensat, lancer le moteur.
3. Fermer les purges de condensats. La pression va monter rapidement dans le circuit. A la pression de tarage de la soupape, celle-ci va s'ouvrir avec un bruit caractéristique. Si ce n'est pas le cas, cela signifie que la soupape est défectueuse.
4. Ouvrir les purges de condensat pour faire chuter la pression dans le circuit.

Les soupapes de surpression sont tarées en usine. Il ne faut jamais modifier le tarage de la soupape.

### 3.8. Purge et arrêt automatique

Prohibitif et tout à fait inutile pour une station de gonflage individuelle mobile étant donné que lors du gonflage le matériel est surveillé. L'arrêt automatique en cas de fabrication de Nitrox au stick est totalement prohibé, car l'arrêt automatique ne coupe pas l'arrivée d'oxygène pur<sup>37</sup> sur un compresseur à moteur thermique. Pour éviter l'humidité dans la bouteille de plongée, il faut purger régulièrement les condensats du séparateur d'eau et du filtre à charbon actif

<sup>36</sup> Note de l'auteur : Depuis quelques années, les fabricants n'indiquent plus dans leurs manuels les huiles compatibles pour leurs compresseurs. Ils vendent, sous leur marque, à des prix prohibitifs des lubrifiants achetés ailleurs. Ni Bauer, ni Coltri, ni tous les autres ne distillent des lubrifiants, Aluchem, Shell... s'en charge à leur place ! Heureusement nos petits compresseurs n'utilisent pas beaucoup de lubrifiants, le prix au litre est donc d'une importance toute relative. Une huile assez universelle : Shell Corena S2 P150 (Bauer) et Alusynt CE 750 Plus (Coltri)

<sup>37</sup> L'arrêt automatique coupe simplement le circuit d'allumage du moteur essence.

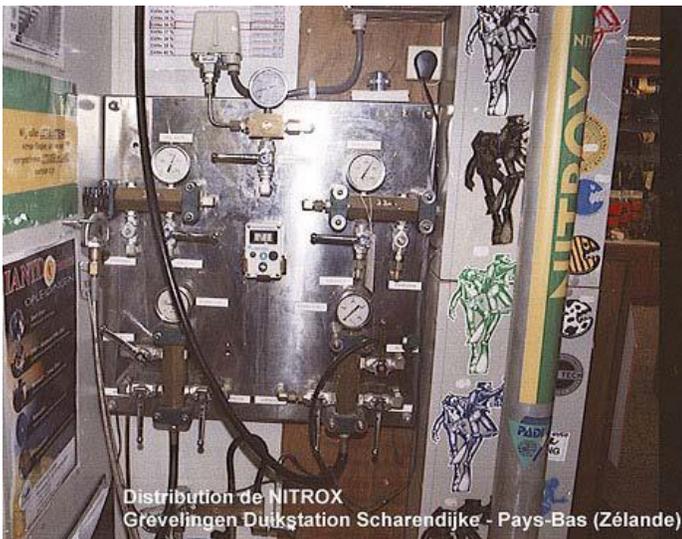


### 3.9. Les Tampons

Les tampons sont des éléments régulateurs dans une station de gonflage, ce sont des bouteilles de 50 litres reliées entre-elles et gonflées entre 250 et 300 bars. Ils permettent non seulement de limiter le nombre de démarrages horaires du compresseur, de faire face aux fluctuations de pression mais aussi et surtout de faire face à une demande d'air ponctuellement importante. Ce qui est le cas en fin de la journée de plongée ou entre les marées. La taille des tampons dépend essentiellement des facteurs suivant :

- Le débit nominal du compresseur.
- La consommation d'air moyenne et en pointe.
- La différence de pression à laquelle le pressostat doit redémarrer le compresseur, cette différence de pression est généralement de 60 bar.
- Le nombre de démarrages horaires autorisés du compresseur qui est aux maximum de 3 ou 4.
- D'un facteur économique, on peut par exemple privilégier la capacité des tampons par rapport au débit nominal du compresseur pour des raisons de coût. C'est particulièrement appréciable si pour des raisons d'environnement sonore il faut utiliser des compresseurs isolés qui sont très chers.

### 3.10. La rampe de gonflage



La rampe de gonflage est l'interface entre la station de gonflage et l'utilisateur. Pour un petit groupe mobile cette interface est réduite à sa plus simple expression c'est à dire un flexible de gonflage et un manomètre. Pour des groupes fixes la rampe de gonflage peut être très complexe, à partir de celle-ci on peut contrôler plusieurs circuits de pression, généralement 200 et 300 bar, plusieurs mélanges (NITROX), plusieurs flexibles de remplissage, un ou plusieurs racks de tampons. Elle est pourvue de tout un système de vannes, détendeurs, pressostats, manomètres, arrêts d'urgence et éventuellement un ou des analyseurs d'oxygène. Dans certains pays il y a même un bac d'eau pour gonfler les bouteilles à froid.



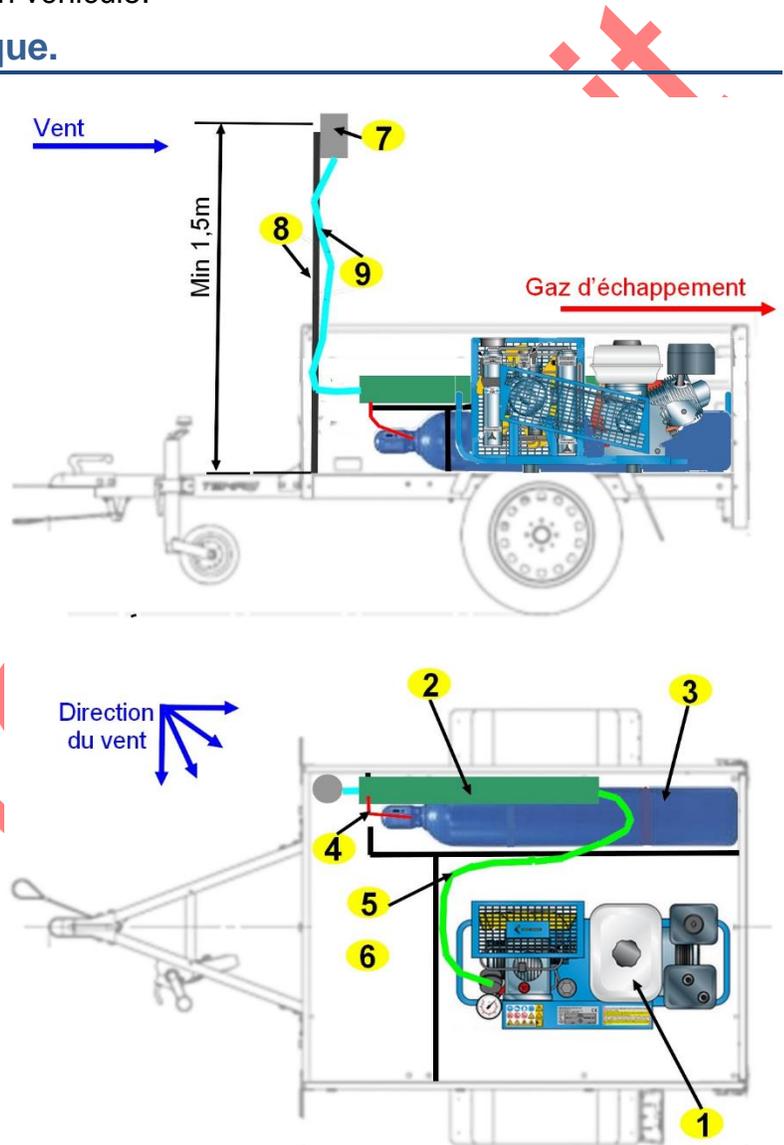
## 4. Installation des stations de gonflage.

Les installations vont du plus simple au plus complexe, elles peuvent être fixes ou mobiles et même être embarquées sur une remorque ou dans un véhicule.

### 4.1. Station mobile à moteur thermique.

Il s'agit de petits compresseurs d'un débit de 80 à 150 litres /minute avec des moteurs thermiques essence ou diesel d'une puissance de l'ordre de 4 à 6 KW. Le compresseur, le moteur, les filtres et les refroidisseurs sont montés sur un châssis unique et très compact. Le poids de l'ensemble est de l'ordre de 40 à 80 kg suivant le débit et le type de motorisation. Ce type de matériel est surtout utilisé par des plongeurs individuels, des couples ou par un groupe de maximum quatre à six plongeurs. Les types de compresseurs les plus généralement utilisés sont le Coltri MCH 6 et le Bauer Junior II. Il est très important d'installer le compresseur sur un sol plat et horizontal, et dans la direction du vent de sorte que les gaz d'échappement s'éloignent de la prise d'air. Les gaz d'échappement étant plus lourds que l'air la prise d'air doit être située en hauteur. On peut ajouter un ou deux sticks pour la fabrication Nitrox et du Trimix.

1. Compresseur 6m<sup>3</sup>/h
2. Stick
3. Bouteille d'oxygène
4. Flexible O<sub>2</sub> entre le manodétendeur et la vanne de laminage du stick
5. Flexible annelé entre le stick et l'aspiration du compresseur
6. Espace de rangement
7. Filtre d'aspiration
8. Cane
9. Flexible annelé aspiration d'air





#### 4.1.1. A ne JAMAIS faire

- Faire tourner le compresseur dans un local totalement ou partiellement fermé
- Utiliser le compresseur près d'un véhicule moteur tournant.
- Utiliser le compresseur près d'un feu nu ouvert à cause des gaz de combustion.
- Démarrer le moteur en charge.

#### 4.1.2. A TOUJOURS faire

- Vérifier les niveaux d'huile avant la mise en route.
- Surveiller le compresseur durant tout le gonflage.
- Surveiller la pression.
- Purger régulièrement les condensats.
- Vérifier si au cours du gonflage le vent ne change pas de sens.
- En fin de gonflage vérifier si l'air n'a pas une odeur d'huile.
- Noter les heures de fonctionnement.

### 4.2. Les installations fixes.

Les installations fixes peuvent être très importantes, il n'est pas rare de trouver des centres avec plusieurs compresseurs de grand débit, des compresseurs destinés au Nitrox, des surpresseurs, des dizaines de bouteilles tampons, des rampes de gonflage pouvant accueillir une dizaine de bouteilles simultanément et des automates de gonflage. Ce type d'installation peut occasionner des nuisances, sonores, vibratoires, thermiques qu'il convient de minimiser afin de ne pas gêner le voisinage. Il faut également assurer la sécurité des opérateurs et des clients.

#### 4.2.1. Les nuisances sonores

Les compresseurs sont des machines bruyantes, il faut les installer dans des locaux bien insonorisés et mettre tout en œuvre à l'aide de flexibles, de manchettes... pour que le bruit ne se répercute pas à l'extérieur par les tuyauteries. De nombreux constructeurs proposent des compresseurs isolées (les séries « Silent » et « Super Silent ») pouvant être placées dans des locaux pas ou peu insonorisés. Ils indiquent dans leurs catalogues les valeurs de l'intensité sonore en dBA, qui est une unité de mesure exprimant un niveau d'intensité sonore pondéré en fonction des caractéristiques physiologiques de l'oreille humaine. Cette échelle n'est pas linéaire mais logarithmique : un compresseur de 84 dBA à une intensité sonore double d'un compresseur de 83 dBA.

30 dBA : niveau de bruit dans un appartement vide.  
50 dBA : chambre à coucher en ville animée.  
60 dBA : conversation, musique d'ambiance.  
80 dBA : rue très animée, chaîne Hi-fi à volume moyen.  
100 dBA : voisinage d'aérodrome  
130 dBA : limite de tolérance de l'oreille humaine

Coltri MCH6 Essence : 87 dBA.  
Coltri MCH6 Electrique : 83 dBA.  
Coltri MCH13: 80 dBA – MCH16 : 82dBA  
Coltri MCH13 Silent :72 dBA. – MCH16 Silent : 75 dBA  
Coltri MCH13 Super Silent : 66 dBA.  
Coltri MCH16 Super Silent : 69 dBA

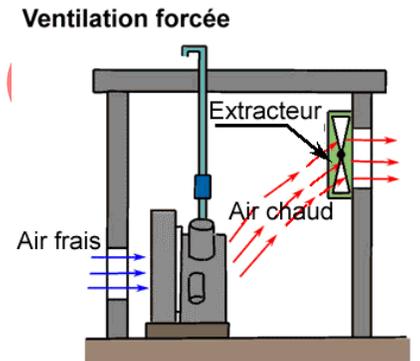
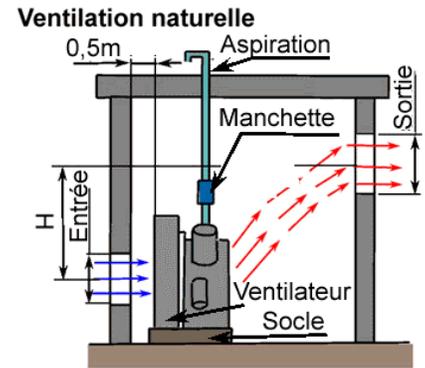


### 4.2.2. Les vibrations

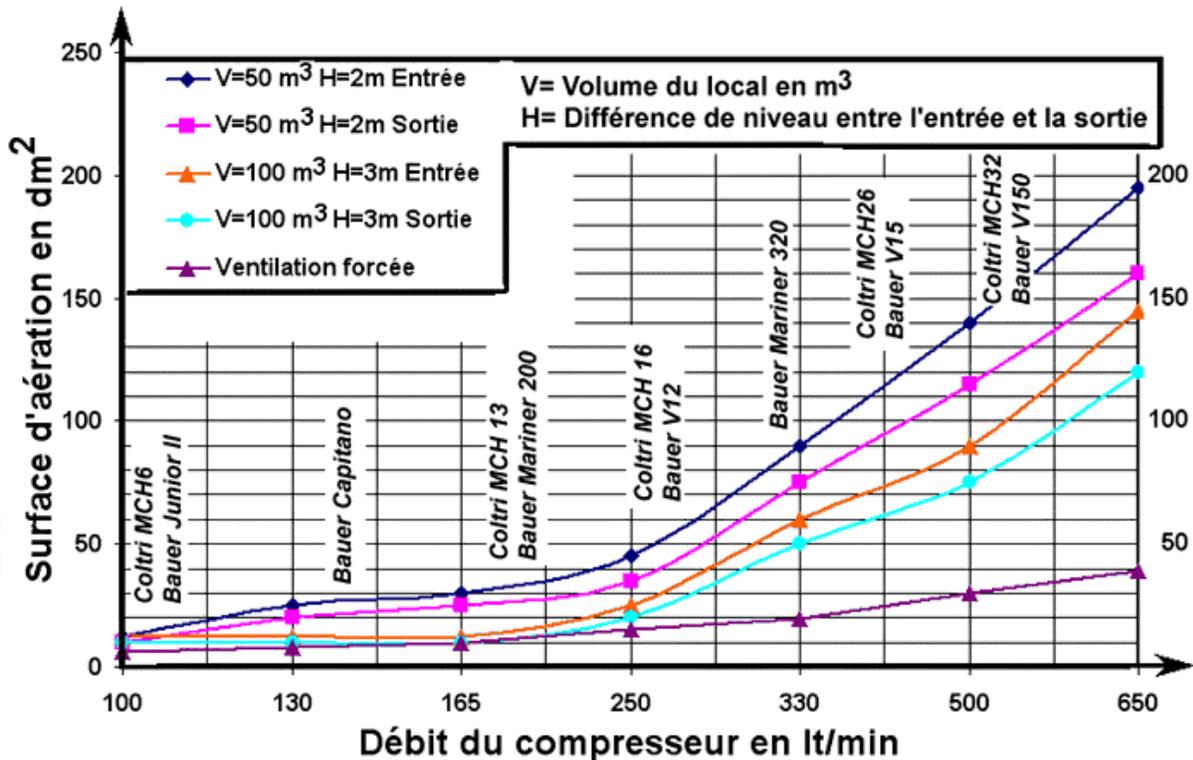
Les compresseurs, comme toutes les machines cycliques, produisent énormément de vibrations ; dans la mesure du possible il faut éviter que celles-ci se transmettent à la structure du bâtiment. L'idéal est de poser les compresseurs sur des socles en béton par l'intermédiaire de « Silentblocs ». Toutes les tuyauteries de pression et d'aspiration doivent être connectées au compresseur par l'intermédiaire de flexibles et de manchettes pour éviter de transmettre les vibrations par l'intermédiaire des tuyauteries.

### 4.2.3. Evacuation de la chaleur

Les compresseurs dissipent en moyenne 0,35 kWh par mètre cube d'air comprimé à 300 bar. Pour un bon fonctionnement la température dans le local ne peut pas dépasser les 45°C. Il est obligatoire de ventiler le local, cette ventilation peut être naturelle ou forcée par un extracteur. Le diagramme donne les dimensions minimales des aérations en fonction du volume du local, de la différence de niveau des aérations et du débit des compresseurs.



## Aération des locaux



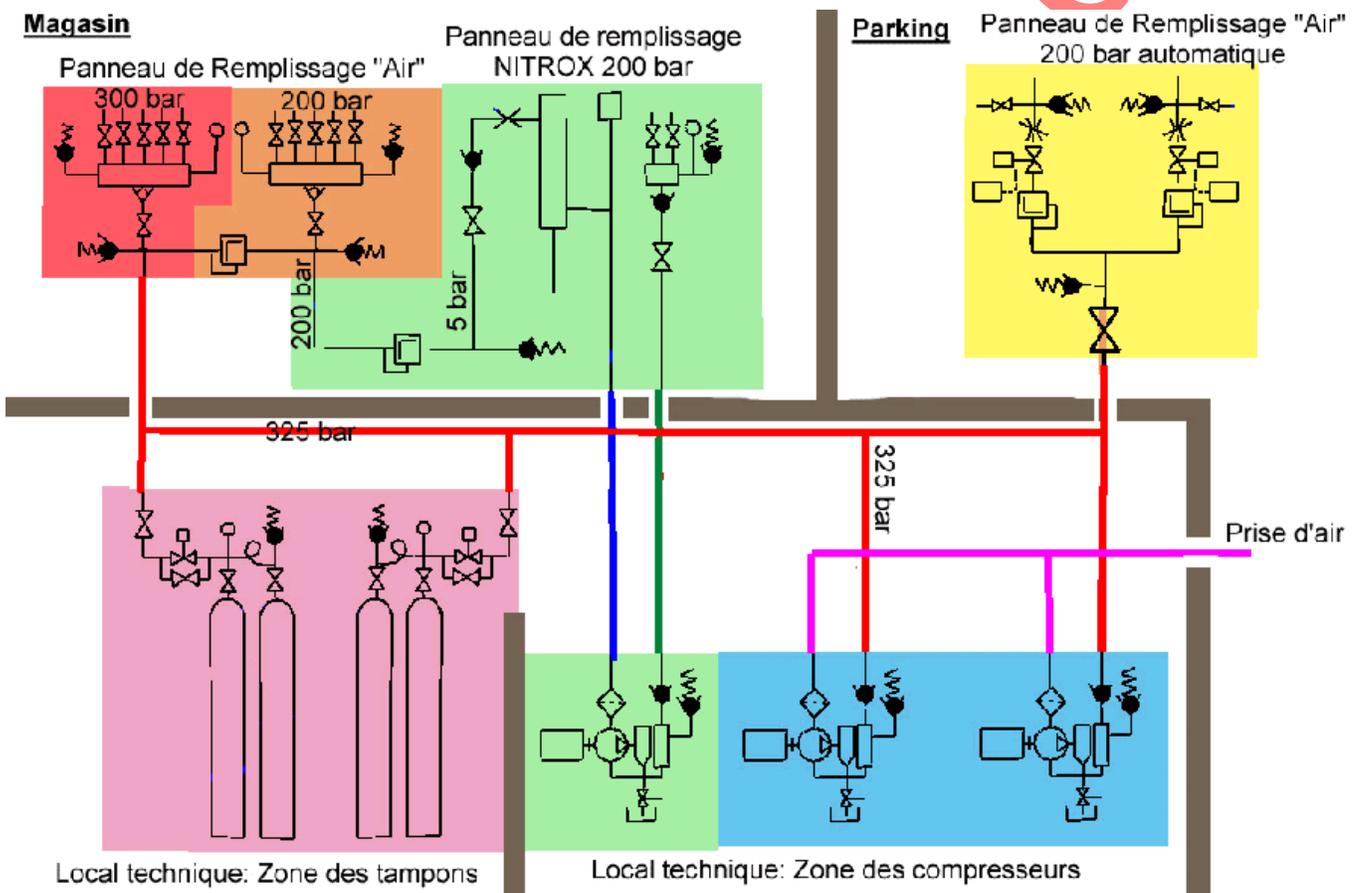


#### 4.2.4. Les locaux

Les locaux doivent être propres, secs, hors du gel et le sol doit être horizontal. Les compresseurs doivent être placés à au moins 50 cm des murs pour assurer une bonne ventilation. Les prises d'air doivent être conduites à l'extérieur du bâtiment et placées en hauteur pour éviter d'aspirer les gaz d'échappement de la circulation automobile. De préférence placer les tampons dans un local technique séparé de la salle des compresseurs, cette pièce doit être munie d'auvents permettant la détente de l'air sans danger en cas d'incident sur un des tampons.

### 4.3. Schéma d'une installation type

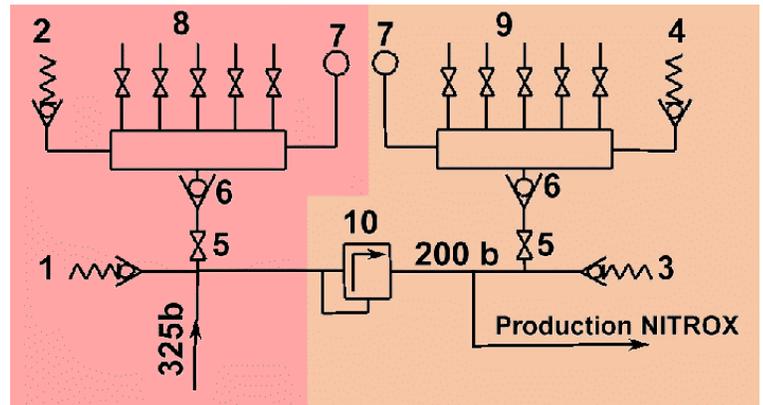
Le schéma suivant est un exemple didactique d'un centre de gonflage moderne qui permet de gonfler des bouteilles d'air, 200 ou 300 bars, du Nitrox à 200 bars et une station automatique qui permet de gonfler hors des bouteilles en dehors des périodes d'ouverture.



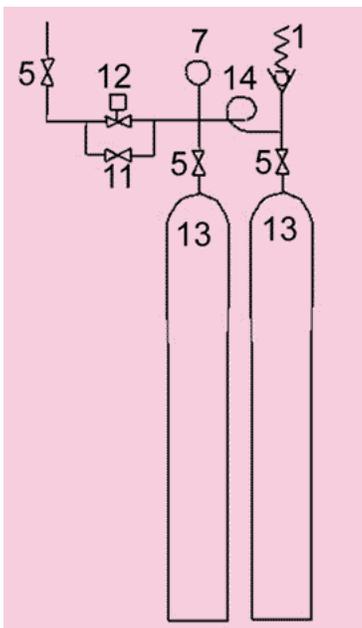


Rampe gonflage air.

- 1. Soupape de sûreté 350 bar
- 2. Soupape de sûreté 325 bar
- 3. Soupape de sûreté 250 bar
- 4. Soupape de sûreté 225 bar
- 5. Vanne d'isolation
- 6. Clapet anti-retour.
- 7. Manomètre
- 8. Rampe de 300 bar /air
- 9. Rampe de 200 bar /air
- 10. Détendeur 325/225 bar



Les racks de tampons



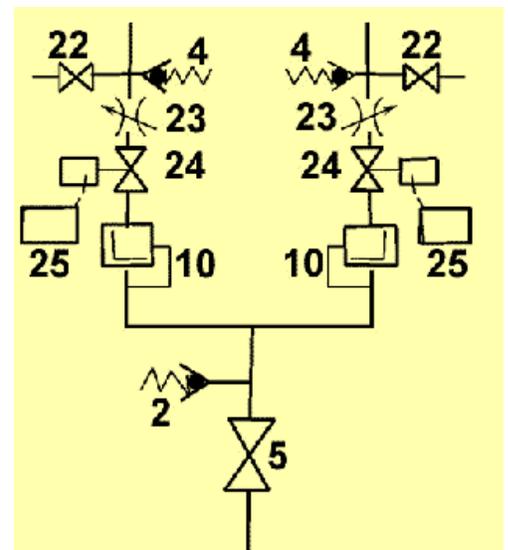
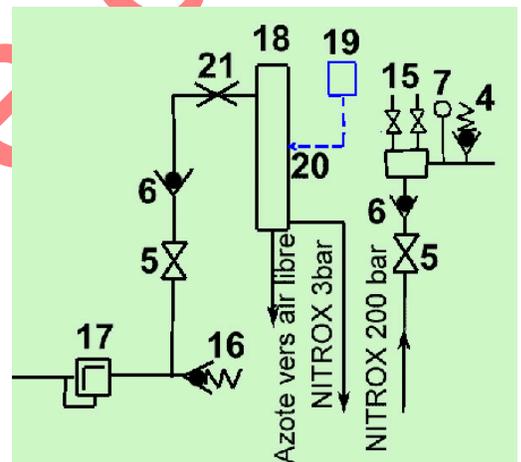
- 11. Vanne de By-pass : cette vanne double les électrovannes pour permettre une utilisation manuelle de l'installation.
- 12. Electrovanne qui permet d'utiliser les tampons ou de les gonfler à Partir d'une commande sur la rampe de gonflage.
- 13. Tampon B50.
- 14. Lyre de connexion entre les bouteilles tampons.

Rampe de gonflage automatique

Cette technique a été développée en Zélande pour permettre aux plongeurs de gonfler leurs bouteilles en dehors des heures normales des magasins, la plupart des plongées se faisant suivant les horaires des marées en partie la nuit.

- 22. Vanne de décharge, qui permet de déconnecter le flexible après le gonflage.
- 23. Düse (gicleur réglable) qui permet de régler le débit et de déterminer la quantité d'air par unité monétaire.
- 24. Electrovanne d'ouverture/fermeture de la ligne de gonflage, cette vanne est pilotée via le monnayeur
- 25. Monnayeur

Rampe de gonflage Nitrox





#### 4.3.1. Les compresseurs compacts « Silent » et « Super Silent »

Ce sont des unités très compactes comprenant compresseur, moteur, filtres, rampe de gonflage montés dans une caisse insonorisée. Ce matériel a été spécifiquement développé pour les petits magasins citadins ne disposant ni d'une grande superficie ni d'un local spécifique pour le gonflage. Leur insonorisation est telle qu'ils peuvent être placés dans une pièce en rez-de-chaussée sans déranger les voisins du premier étage.



Non libre de



## Partie 3

---

### Fabrication du Nitrox et du Trimix

1. Scope	Page 80
2. Remplissage à partir d'un mélange préfabriqué	Page 80
3. Méthode des pressions partielles	Page 81
4. Matériel pour la fabrication en Flux continu	Page 85
5. Nitrox en flux continu – Stick	Page 91
6. Trimix en fux continu – Simple et double stick	Page 93
7. Filtration DNAX	Page 97
8. Méthode gravimétrique	Page 98
9. Comparaison des diverses méthodes	Page 100
10. Temps d'homogénéisation d'un mélange	Page 101
11. Analyse des gaz	Page 103



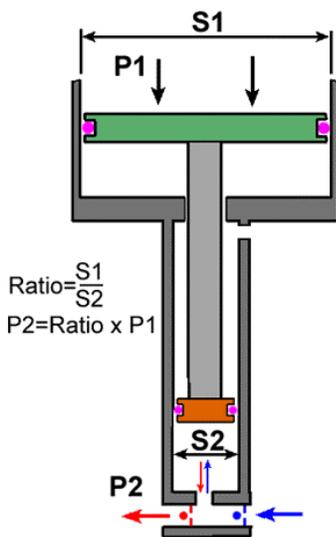
## 1. Scope

Le matériel pour la fabrication du Nx et du Tx étant similaire, on abordera également la fabrication de ce mélange dans ce chapitre.

## 2. Remplissage à partir d'un mélange préfabriqué.

On utilise des bouteilles de Nitrox et de Trimix préfabriqués qu'on injecte dans les bouteilles de plongées à l'aide d'un surpresseur ou « booster ». L'avantage de la méthode est la simplicité, mais il n'est pas possible d'obtenir par cette méthode des mélanges différents. Le surpresseur est une machine coûteuse et encombrante et les frais de chômage sont importants. Cette méthode est principalement utilisée sur les barges, les bateaux, les magasins de plongée et les plongeurs professionnels commerciaux (Opérateurs en Travaux Subaquatique).

### 2.1. Le Booster



Le nombre croissant de plongeurs "TEK", de plongeurs utilisant des recycleurs ou plus simplement des plongeurs utilisant des mélanges fortement suroxygénés à des pressions très élevées (300 bars) ont permis le développement de machines « compatibles oxygène » plus compactes et plus accessibles au grand public. Le plus souvent les surpresseurs sont actionnés par de l'air comprimé qui par l'intermédiaire d'un système de tiroir actionne alternativement le piston. Lorsque le piston se relève le mélange venant de la bouteille nourrice remplit la chambre de compression, puis le mélange est surpressé lorsque le piston redescend. Contrairement au compresseur le surpresseur n'aspire pas il faut obligatoirement que la bouteille nourrice aie une pression minimum. Certains modèles sont entraînés par un groupe hydraulique actionné par un moteur

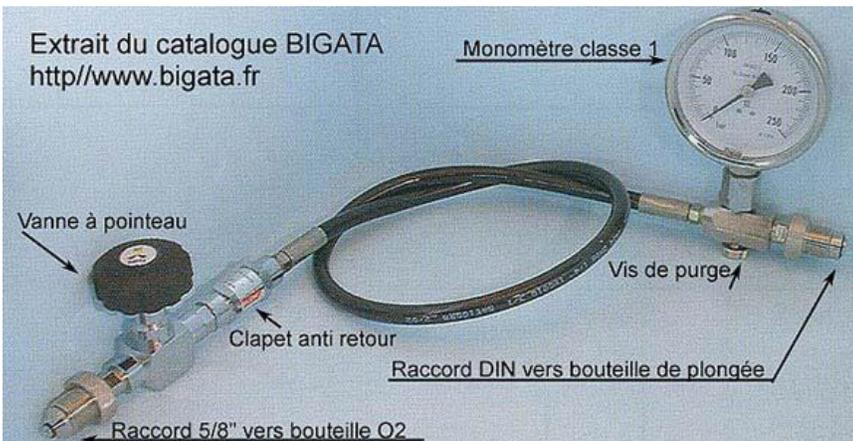
électrique. Les surpresseurs sont définis par leur ratio de compression qui varie entre 5 et 25 pour les modèles à un étage et jusqu'à 100 pour les modèles à deux étages et à double action.



Source : catalogue MPS



### 3. Méthode des pressions partielles.



On remplit les bouteilles avec de l'O<sub>2</sub> pur venant d'une grande bouteille d'oxygène puis on fait l'appoint avec de l'air comprimé qui a été parfaitement filtré de façon à ne plus contenir ni poussières ni huile. L'état du compresseur doit être impeccable et il faut par mesure de précaution mettre en service à la sortie du compresseur une unité de filtre à huile supplémentaire. C'est la méthode la moins onéreuse et la plus simple si on



maîtrise parfaitement la technique et l'utilisation de la loi de Dalton, on peut obtenir n'importe quel type de Nitrox. Les risques d'incendie sont réels puisque cette méthode met en œuvre de l'O<sub>2</sub> pur. Il faut obligatoirement utiliser des bouteilles dégraissées et des manomètres de précision adaptés à l'O<sub>2</sub> pur. Le surfiltre est obligatoire pour limiter la quantité d'huile résiduelle à 0,1 mg/m<sup>3</sup> qui est la valeur la plus généralement admise pour la

fabrication du Nitrox par cette méthode. Pour avoir une précision suffisante le manomètre de la lyre de transfert doit au minimum être de la classe 1 c'est à dire que sur toute l'échelle de mesure la précision doit être au minimum de 1%. Le manomètre électronique présente l'avantage d'être très précis et d'avoir une lecture très aisée mais est d'un prix prohibitif. Il faut aussi prévoir un clapet antiretour sur la lyre pour éviter de transférer accidentellement du Nitrox dans la bouteille d'oxygène pur.

Cette méthode convient pour la fabrication du Nitrox et du Trimix mais présente d'importants inconvénients.

- Impossibilité de vider complètement les bouteilles d'oxygène et d'hélium.
- La fabrication se fait à pression élevée ce qui augmente le risque de combustion spontanée.
- L'injection d'oxygène pur se fait directement dans la bouteille de plongée qui doit être parfaitement dégraissée,
- Il faut attendre quelques heures avant le mélange soit homogène. Le plus rapide est de coucher la bouteille. Sans être réellement complexe, le calcul des différentes pressions de remplissage par la loi de Dalton peut rebuter.



### 3.1. Fabrication du Nitrox

#### Phase 1.

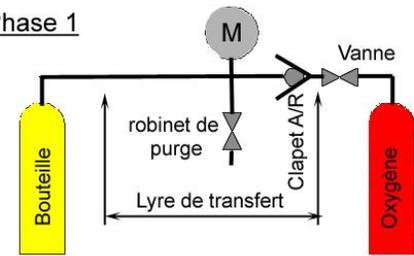
Injection de l'oxygène pur dans la bouteille de plongée jusqu'à la pression calculée.

#### Phase 2.

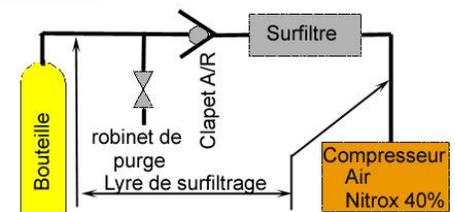
Appoint en air ou en Nitrox préfabriqué, éventuellement au Stick (40% O<sub>2</sub> maximum)

[Calcul Pressions partielles](#) (lien vers JCTdive.be)

Phase 1



Phase 2



#### 3.1.1. Formule de calcul

$$P_{O_2} = \frac{\left[ \frac{(P \times O_2) - (P_i \times O_{2i})}{(P - P_i)} - O_{2s} \right]}{(100 - O_{2s})} \times (P - P_i)$$

Avec

P<sub>O<sub>2</sub></sub> = Pression d'oxygène à ajouter dans la bouteille.

P = Pression finale à obtenir.

P<sub>i</sub> = Pression initiale mesurée dans la bouteille.

O<sub>2</sub> = % d'oxygène à obtenir.

O<sub>2i</sub> = % initial d'oxygène mesuré dans la bouteille.

O<sub>2s</sub> = % d'oxygène de la source (air ou Nitrox). (21 si on fait un appoint en air)

#### Exemple

Quel est la pression d'O<sub>2</sub> à ajouter dans une bouteille contenant un Nx 32 à 90 bar pour fabriquer un NITROX 36 à 200 bar. L'appoint se fait avec de l'air ?

Quel doit être la pression lue sur le manomètre après l'ajout de l'O<sub>2</sub> ?

Quel doit être la pression lue sur le manomètre après l'appoint d'air ?

$$P = 200 \text{ bar} \quad P_i = 90 \text{ bar} \quad O_2 = 36 \% \quad O_{2i} = 32 \% \quad O_{2s} = 21 \%$$

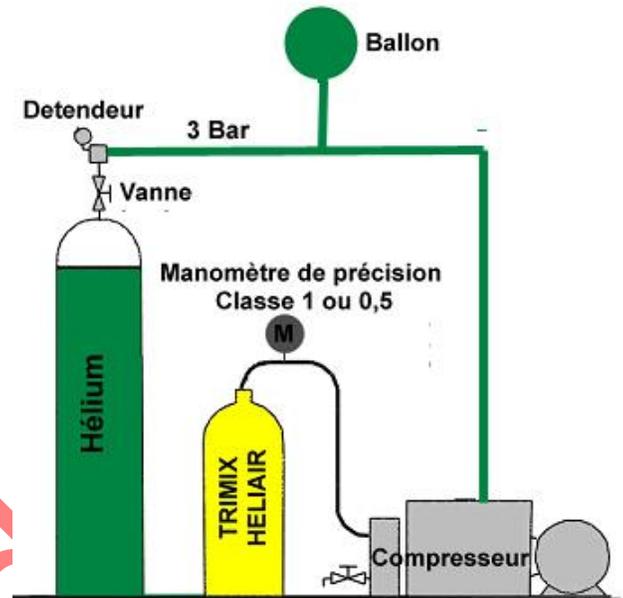
$$P_{O_2} = \frac{\left[ \frac{(200 \times 36) - (90 \times 32)}{(200 - 90)} - 21 \right]}{(100 - 21)} \times (200 - 90) = 25,4 \text{ bar}$$

Il faut lire sur le manomètre : 90 + 25,4 = 115,4 bar Pression finale après appoint : 200 bar



## 3.2. Fabrication du Trimix

1. Introduire l'oxygène (voir le chapitre précédent)
2. Introduire l'hélium. L'idéal est d'utiliser un booster mais il est aussi possible de faire passer l'hélium au travers d'un simple compression à piston moyennant quelques précautions. L'injection d'hélium se fait à débit constant dans une machine qui agit alternativement. Il faudra limiter le débit et la pression tout en alimentant le compresseur sans perdre trop d'hélium. Un compresseur qui tourne sans remplissage correct des cylindres va caviter et causer des dégâts au niveau des soupapes. Il convient de ne pas dépasser 3 bar dans la ligne d'alimentation et d'utiliser un ballon pour réguler le débit. Un règle le débit du manodétendeur de manière à maintenir le ballon gonflé. Une vieille stab, joue parfaitement le rôle de ballon et elle à une soupape de sécurité, qui va empêcher l'éclatement. L'hélium a tendance de faire chauffer le compresseur, l'idéal est d'interrompre le gonflage durant un quart d'heure toutes les 30 à 45 minutes.



### Procédure

1. Ouvrir la bouteille d'hélium, et régler le débit de manière à gonfler le ballon.
2. Démarrer le compresseur.
3. Chasser l'air en gonflant / dégonflant légèrement le ballon 2 à 3 fois. Puis régler le débit de manière à maintenir le ballon gonfler (100 l/min pour un compresseur Coltri MCH 6).
4. Connecter la bouteille.
5. Dès que le compresseur atteint 200 bars ouvrir la bouteille de plongée.
6. Surveiller le manomètre et le ballon qui doit rester gonfler.
7. A la pression calculée fermer la bouteille et arrêter le compresseur.
8. Fermer la bouteille d'Hélium.

[Calcul Trimix](#) (lien vers JCTdive.be) L'utilitaire permet d'introduire un coefficient (entre 5 et 10%) pour tenir compte de la compression de l'Hélium



### 3.2.1. Formule de calcul

#### 1) Calculs préliminaires.

Calculer les pressions partielles des composants initiaux et finaux soit : PPOi ; PPHei ; PPNi ; PPOf ; PPHef ; PPNf

#### 2) Calculer les pressions à ajouter dans la bouteille.

$$PHe = PPHef - PPHei \quad PNx = \frac{100 \times [PPNf - PPNi]}{(100 - Nx)}$$

$$PO = PPOf - PPOi - \left( \frac{PNx \times Nx}{100} \right)$$

- PPOi : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange initial (bar)
- PPHei : Pression partielle de l'hélium dans le mélange initial (bar)
- PPNi : Pression partielle de l'azote dans le mélange initial (bar)
- PPOf : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange à obtenir (bar)
- PPHef : Pression partielle de l'hélium dans le mélange à obtenir (bar)
- PPNf : Pression partielle de l'azote dans le mélange à obtenir (bar)
- Nx : Pourcentage d'oxygène dans le Nitrox d'appoint (%) (21 % si on ajoute de l'air)
- PHe : Pression d'hélium à ajouter (bar)
- PNx : Pression de Nitrox ou d'air à ajouter (bar)
- PO : Pression d'oxygène à ajouter

#### 3) Etablir la carte de remplissage.

#### Exemple

On doit fabriquer un Tx 12/50 à 200 bar à partir d'un reliquat de 30 bar d'un Tx 15/40. Etablir la carte de gonflage en considérant que l'appoint est de l'air.

#### 1) Calculs préliminaires

$$PPOi = 0,15 \times 30 = 4,5$$

$$PPHei = 0,4 \times 30 = 12$$

$$PPNi = 0,55 \times 30 = 13,5$$

$$PPOf = 0,12 \times 200 = 24$$

$$PPHef = 0,5 \times 200 = 100$$

$$PPNf = 0,38 \times 200 = 76$$

#### 2) calcul des pressions à ajouter

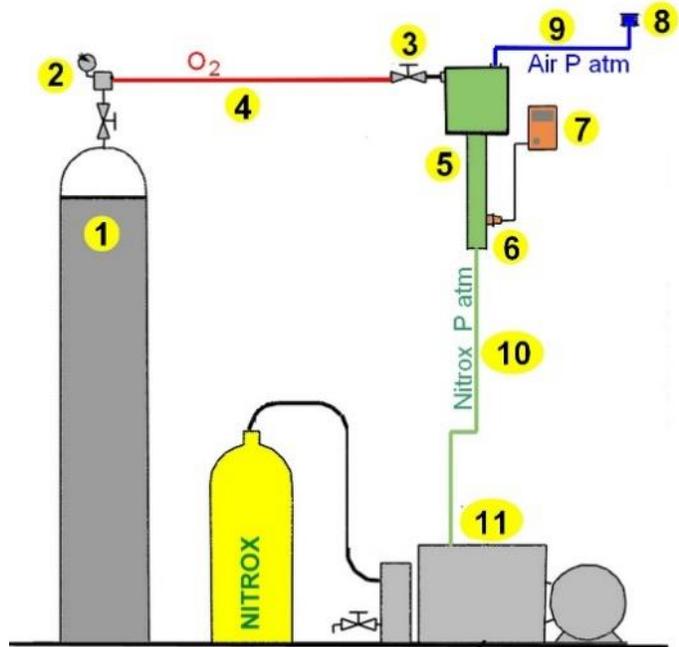
$$PHe = 100 - 12 = 88 \text{ bar} \quad PNx = \frac{100 \times [76 - 13,5]}{(100 - 21)} = 79 \text{ bar} \quad PO = 24 - 4,5 - \left( \frac{79 \times 21}{100} \right) = 3 \text{ bar}$$

Carte de gonflage			
Ordre	Gaz	Pression	A lire sur le manomètre
	Initial	30	30
1	Oxygène (O <sub>2</sub> )	3	33
2	Hélium (He)	88	121
3	Air	79	200

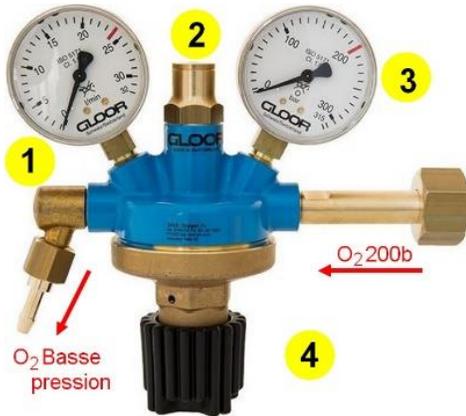


## 4. Matériel pour la fabrication en flux continu - « Stick »

1. Bouteille<sup>38</sup> O<sub>2</sub> – 200/300 bar
2. Manodétendeur / débitmètre
3. Micro-vanne de laminage
4. Flexible BP compatible O<sub>2</sub>
5. Stick
6. Sonde mesure oxygène
7. Analyseur O<sub>2</sub>
8. Filtre d'aspiration d'air
9. Flexible annelé
10. Flexible annelé
11. Aspiration du compresseur



### 4.1. Le manodétendeur – débitmètre



1. Débitmètre
2. Soupape de surpression
3. Manomètre
4. Molette de réglage du débit

Le manodétendeur pour fonction de réduire la pression à une dizaine de bar au maximum. Il devra être compatible oxygène et équipé d'un débitmètre, d'une soupape de surpression et d'un manomètre. Ce matériel doit être particulièrement costaud<sup>39</sup>, pour

une application mobile, ce qui exclut les débitmètres en verre.

<sup>38</sup> Note de l'auteur : Les gaziers proposent souvent du Diveox (oxygène plongée) moins cher que le médical, mais nettement plus cher que la qualité 2.5. Cependant ce sont techniquement les mêmes gaz, purs à 99,5%. Les 0,5% étant des traces d'azote (N<sub>2</sub>). Personnellement j'utilise depuis près de 30 ans du 2.5. A chacun de faire ses choix.

<sup>39</sup> Note de l'auteur : Personnellement j'utilise un manodétendeur industriel « Gloor », qui est une référence en la matière.



Le choix des caractéristiques sont fonctions de :

- Pression dans la bouteille d'oxygène. 200 ou 300 bar
- Du débit d'oxygène qu'on doit obtenir. Ce débit est fonction du débit du compresseur. Ce débit peut se calculer avec la relation suivante :

$$Q_{O_2} = \frac{Q_C(0,01N_x - 0,21)}{0,79}$$

Avec

$Q_{O_2}$  : débit d'oxygène en litre/minute (normaux)

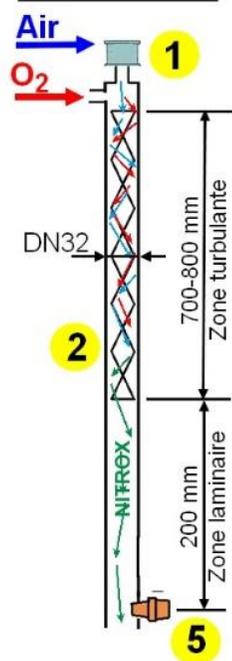
$Q_C$  : débit du compresseur en litre/minute (normaux)

$N_x$  : % d'oxygène dans le Nitrox

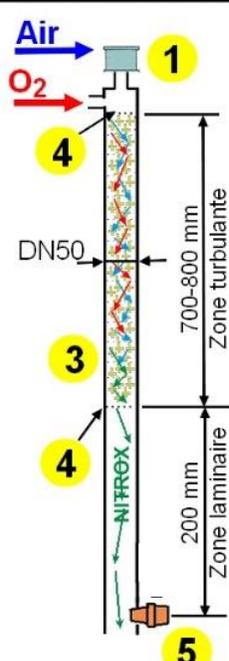
l/min (m <sup>3</sup> /h)	Compresseur 6m <sup>3</sup> /h – Q <sub>c</sub> =100			Compresseur 9m <sup>3</sup> /h – Q <sub>c</sub> =150		
	Q <sub>O2</sub>	Q <sub>O2moyen</sub>	Q <sub>manodét</sub>	Q <sub>O2</sub>	Q <sub>O2moyen</sub>	Q <sub>manodét</sub>
NX30	12 (0,72)	18 (1,08)	30 (1,80)	17 (1,02)	27 (1,62)	50(3,00)
NX40	24 (1,44)			36 (2,16)		

## 4.2. Le stick

### Stick à hélice



### Stick à croisillons



1. Filtre à air
2. Hélice
3. Croisillons
4. Grille

à six spirales sur une longueur de l'ordre de 700 à 800 mm dans un tube DN32 (débit 6 à 12 m<sup>3</sup>/h). L'hélice peut être remplacé par des croisillons de carreleur en augmentant un peu le diamètre du tube (DN 50)

Le stick (cane) a pour but de mélanger, à la pression atmosphérique, de l'air avec de l'oxygène afin d'obtenir un mélange homogène à l'entrée du compresseur. La teneur en oxygène de ce mélange ne pourra pas dépasser 40%. Le stick n'est donc qu'un simple mélangeur. Le mélange peut se faire dans une boîte à chicanes, par l'intermédiaire d'une hélice ou même en utilisant les propriétés cycloniques des décanteurs. L'hélice pourra être remplacé par des croisillons de carreleur ou même un empilement de maillons de chaîne en PVC. Le compresseur étant une machine cyclique (flux pulsé) et le débit d'oxygène continu, pour éviter d'envoyer une rasade d'oxygène dans les cylindres du compresseur (peu de chance qu'il apprécie) il faut éloigner l'injection d'oxygène du compresseur. La colonne d'air servant ainsi d'amortisseur. Le Stick permet d'allonger artificiellement la colonne d'amortissement.

Le stick est composé de deux zones, une zone turbulente où l'air et l'oxygène sont mélangés et une zone laminaire pour faciliter la mesure de la concentration en d'oxygène. Pour qu'un stick à hélice soit efficace il faut avoir au minimum cinq



Le stick à chicane est nettement plus compact en longueur mais pas en diamètre. Pour qu'il soit efficace il faut au moins une dizaine de chicanes. Pour un débit entre 6 à 12 m<sup>3</sup>/h, les sections annulaires (Sa) et les sections de passage (Sp) doivent être de l'ordre de 350 mm<sup>2</sup> ce qui pour un diamètre D=100mm induit une distance (e) entre chicanes de 5 à 6 mm.

#### 4.2.2. Avantages du stick

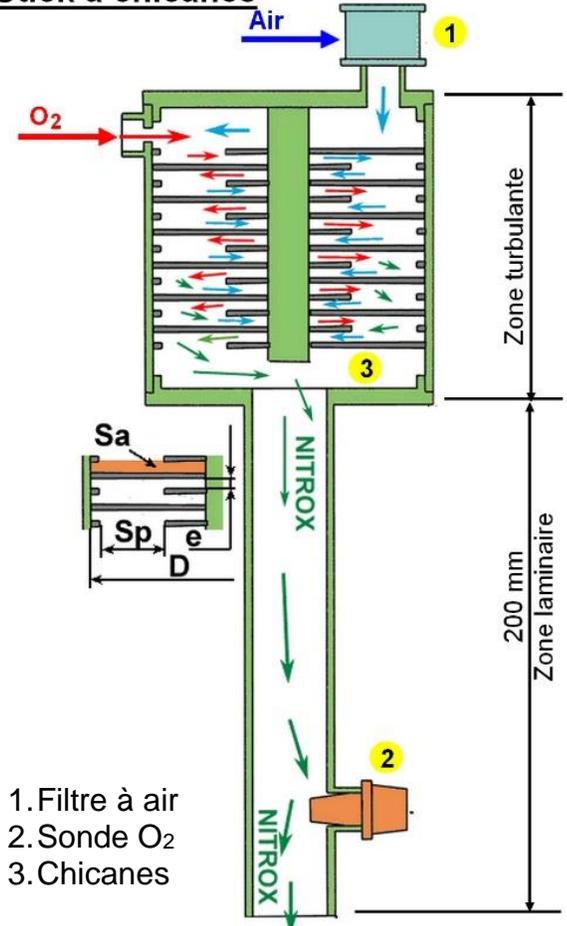
- Pas de filtre supplémentaire
- Facile à déplacer
- Convient aux installations mobiles
- Procédé peu coûteux
- Convient à tous les types de compresseur
- Procédé très précis
- Matériel peu coûteux
- Faible encombrement et facile à installer
- Possibilité de vider entièrement les bouteilles d'oxygène
- Convient parfaitement aux petites installations
- Procédé statique qui ne nécessite aucun entretien
- Mélange directement homogène, on peut l'utiliser sans délai d'homogénéisation
- Peu de perte de charge, par rapport au filtre DnAx
- Pas d'entretien spécifique

#### 4.2.3. Inconvénients du stick

- Nitrox limité à 40%
- Dangerosité de la manipulation de l'oxygène pur.

**Le danger le plus important dans l'utilisation du Stick est de laisser par distraction la vanne de laminage ouverte à fond et d'ouvrir brutalement la vanne de la bouteille d'oxygène.**

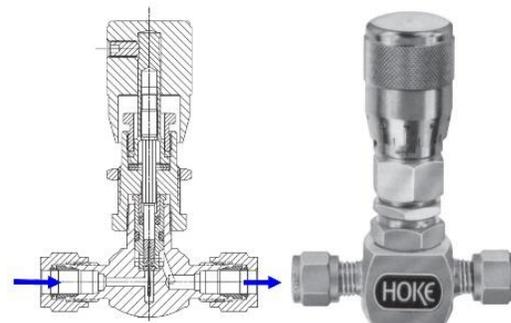
#### Stick à chicanes





### 4.3. Micro-vanne de laminage

Cette vanne à pointeau ou à aiguille, permet de régler finement le débit d'oxygène et donc le pourcentage d'oxygène dans le Nitrox. Placée sur le stick, elle permet d'interrompre très rapidement l'alimentation en oxygène en cas de défaillance du compresseur. Pour un fonctionnement optimal, la vanne doit être correctement dimensionnée. Il faut déterminer le plus précisément possible son coefficient de débit (Cv), ce qui pour un gaz n'est souvent qu'une approximation plus ou moins réaliste en fonction de l'exactitude des hypothèses de départ !



Le Coefficient de débit peut s'estimer à l'aide des relations suivantes :

$$Cv = \frac{Q}{1360 \sqrt{A}} \quad A = \frac{210 (P1-P2) P1}{d ((1,8T)+492)}$$

Avec :

P1 : Pression absolue à l'entrée de la vanne (bar)

P2 : Pression absolue à la sortie de la vanne (bar)

Q : débit du gaz dans des conditions normales (Nm<sup>3</sup>/h)

T : Température du gaz (°C)

d : Coefficient de densité du gaz - 1 pour de l'air à 21°C et 1 atm . 1,05 pour N<sub>2</sub> et +/- 0,15 pour l'He

Hypothèses :

(P1-P2) = 0,5 P1 = 1,5 bar (Maximum efficace)

d = 1,05 (l'oxygène est légèrement plus dense que l'air)

T = 5°C (estimation de la température après détente de l'oxygène)

P1 : 3 bar (Suivant la soupape de surpression du détendeur)

Suivant ces hypothèses :

$$A = \frac{210 \times 1,5 \times 3}{1,05 ((1,8 \times 5) + 492)} = \frac{945}{522} = 1,81$$

$$\sqrt{A} = \sqrt{1,81} = 1,35$$

Avec ces données, le Cv pour des compresseurs de 6 à 9 m3/h sera de l'ordre de 0,0008 à 0,0012. La régulation sera d'autant meilleure que le Cv de la vanne correspond à cette plage de valeur. Le prix des vannes micrométriques est élevé. Souvent on se contente d'une vanne à pointeau « ordinaire » et le réglage se fait sur un ou deux tours au lieu de la vingtaine de tour d'une vanne micrométrique.

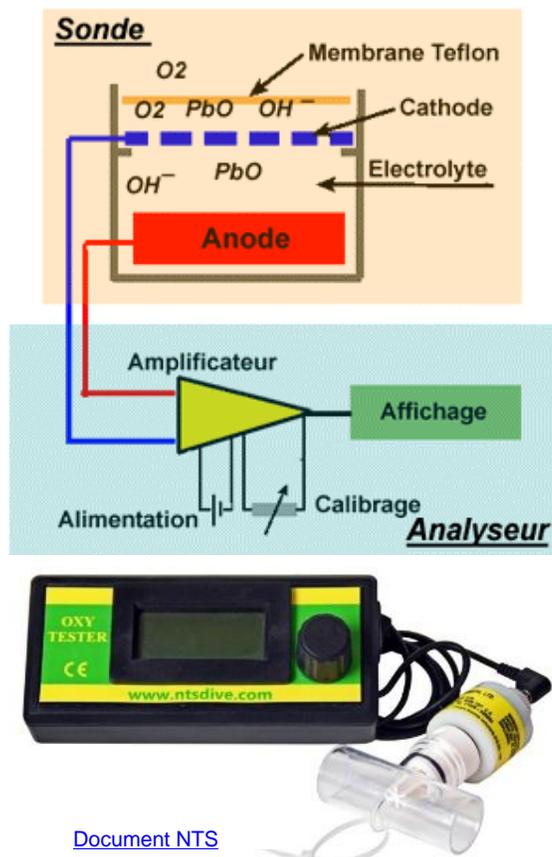


## 4.4. Filtre à air

La solution la plus simple est de déplacer le filtre à air du compresseur et le placer en amont du stick. De cette manière toute la ligne d'aspiration est protégée des impuretés contenues dans l'air atmosphérique.

## 4.5. Analyseur et sonde oxygène

La majorité des analyseurs utilisés sont à cellule électrochimique. Le capteur d'oxygène est basé sur l'effet de pile. La différence de potentiel entre l'anode et la cathode de cette pile sera proportionnel à la quantité d'oxygène qui va traverser une paroi semi-perméable. Il suffit d'un voltmètre gradué en pourcentage pour assurer la mesure. Mais ce type d'appareil nécessite un calibrage.



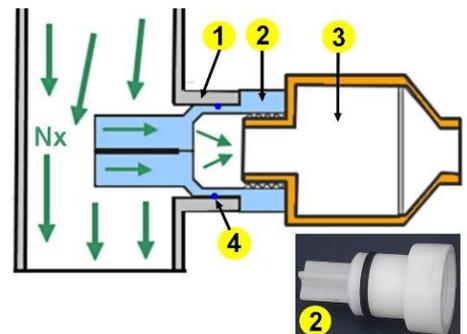
[Document NTS](#)

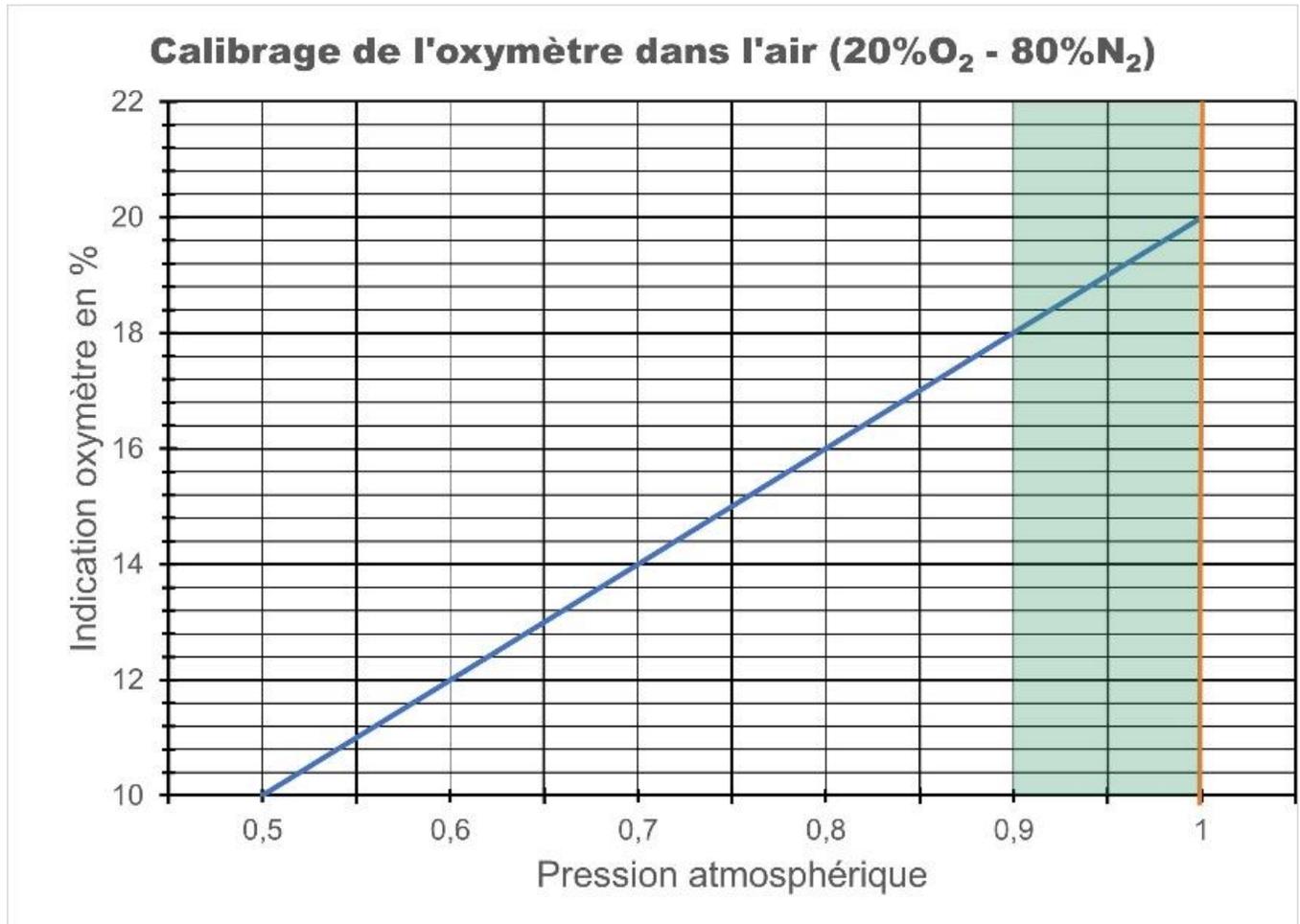
Il ne faut jamais acheter directement des cellules de réserve.

Le courant produit par la sonde est la conséquence des réactions chimiques qui ont lieu en son sein. L'oxygène s'infiltré au travers d'une membrane de téflon pour se dissoudre dans un liquide, l'électrolyte. Au contact de la cathode (plomb ou cadmium), il se produit une réaction qui produit des électrons. Simultanément l'anode s'oxyde en fournissant de l'énergie. La différence de potentiel entre l'anode et la cathode est proportionnelle à la quantité d'oxygène. La réaction d'oxydation mange la matière de l'anode ce qui explique que la durée de vie de la cellule est limitée. Dès que la matière de cette anode devient insuffisante la cellule tombe en panne de « carburant ». La production d'électrons engendre entre l'anode et la cathode un courant électrique (entre 10 et 25 mV) que l'on peut amplifier et mesurer. Un potentiomètre servant au calibrage de l'analyseur. L'alimentation de l'analyseur ne sert pas comme on le pense généralement à fournir de l'énergie à la sonde, mais sert uniquement à fournir de l'énergie au circuit électrique.

La durée de vie d'une cellule est de 24 à 30 mois. Même sans être connectée à l'analyseur la cellule travaille, les réactions chimiques se font et elles réduisent la

1. Stick
2. Déviateur de flux
3. Sonde oxygène
4. Joint « O » Ring





L'appareil ne mesure pas un % d'oxygène mais mesure la pression partielle de l'oxygène. Si la pression atmosphérique n'est pas égale à 1 bar il faut utiliser une correction lors du calibrage. Les variations de température et d'humidité sont compensées par l'appareil. Pour la fabrication du Nitrox au stick, le choix se portera vers un analyseur possédant une cellule séparée avec un temps de réponse court, une courbe de réponse linéaire et pouvant facilement se connecter sur le stick. La cellule R-17VAN de Teledyne associé à un analyseur Vandagraph VN202 ou le NTS OxyTester conviennent parfaitement.

La sonde se fixe dans le stick dans une zone à flux laminaire en aval de la zone de mélange. Le déviateur de flux (Flow Divertor) permet de canaliser une partie du flux vers la sonde et de réduire les turbulences afin d'assurer une mesure fiable.



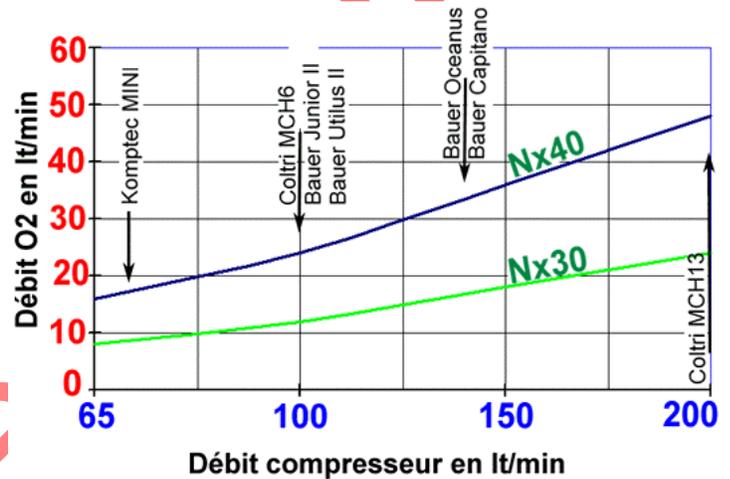
## 5. Fabrication du Nitrox en flux continu – « Stick »

La fabrication du Nitrox au stick constitue la manière la plus économique de fabriquer un **Nitrox contenant au maximum 40% d'oxygène**. Néanmoins ce procédé présente des risques, puisqu'on travaille avec de l'oxygène pur.

Il faut être particulièrement attentif en cas d'arrêt intempestif du compresseur étant donné que sur une station mobile, il n'y a pas d'électrovanne pour couper l'alimentation en oxygène.

### 5.1. Procédure de remplissage

1. Vérifier si les vannes du circuit d'oxygène sont fermées.
2. Démarrer le compresseur, soupapes des filtres ouverts.
3. Calibrer et vérifier le calibrage de l'analyseur O<sub>2</sub> (20,9%).
4. Vérifier si l'analyse d'O<sub>2</sub> reste stable.
5. Ouvrir doucement la bouteille d'oxygène.
6. Vérifier la pression dans la bouteille.
7. Vérifier le réglage du débit du manodétendeur (voir diagramme).
8. Ouvrir TRES délicatement la vanne de laminage en surveillant l'analyseur d'O<sub>2</sub>. Dès qu'on est proche du %O<sub>2</sub> désiré attendre 10-20s pour voir si la mesure reste stable.
9. Ajuster la valeur en actionnant la vanne de laminage encore plus délicatement.
10. Faire monter le compresseur en pression (+/-200 bar en surveillant l'oxymètre).
11. Ouvrir la bouteille.
12. Vérifier régulièrement la stabilité de la mesure, ajuster au besoin et ne pas oublier de purger régulièrement le compresseur.
13. Dès que la bouteille est remplie, déconnecter celle-ci.
14. Fermer la bouteille d'oxygène.
15. Faire tourner le compresseur à vide au moins 30s pour vider toute l'installation du mélange, l'oxymètre indiquera +/-21%
16. Couper le compresseur.
17. Fermer la vanne de laminage.



### 5.2. A ne JAMAIS faire

- Tenter de fabriquer un mélange contenant plus de 40% d'O<sub>2</sub>.
- Laisser l'installation sans surveillance et principalement l'analyseur.
- Utiliser un compresseur mal entretenu.



### 5.3. A TOUJOURS faire

---

- Vérifier que toutes les vannes d'oxygènes sont fermées avant de lancer le compresseur.
- Se limiter à un Nx40 au maximum.
- Analyser le mélange directement sur la bouteille.
- Marquer la bouteille avec le type de mélange, la date, la profondeur maximum d'utilisation en fonction de la ppO<sub>2</sub> (1.4).
- Remplir le carnet de gonflage.
- Remplir le « Logbook du compresseur », très utile pour les entretiens.

Non libre de droit



## 6. fabrication du Trimix en flux continu – « Stick »

Il y a deux méthodes la fabrication à l'aide d'un simple stick ou la fabrication à l'aide de deux sticks ou d'un stick double.

### 6.1. Méthode du simple stick

Le problème pour faire passer de l'hélium au travers du compresseur est que d'une part, il faut éviter d'aspirer de l'air et d'autre part il faut assurer la continuité du gonflage sous peine d'avoir des ennuis de cavitation au niveau des cylindres (ils n'aiment pas cela du tout). Il faut aussi éviter de perdre de l'hélium dans l'atmosphère, bien qu'il n'y ait absolument aucun danger...Sauf pour votre portefeuille ! Une solution consiste à placer dans le circuit d'aspiration un ballon nourrice. On peut facilement bricoler ce ballon avec une vessie de stab qui présente en plus l'avantage d'avoir une soupape de sûreté. Si le circuit d'aspiration passe au travers de votre stick, il faut veiller à démonter la sonde de mesure d'O<sub>2</sub> et ne pas oublier de mettre un bouchon sur cet orifice. On peut facilement connecter l'aspiration au ballon nourrice. Le débit d'hélium étant nettement plus important que le débit d'O<sub>2</sub> pour la fabrication du Nitrox. Pour éviter la cavitation, la vanne de laminage devra être calibrée pour pouvoir laisser passer le débit du compresseur. Le cas échéant, il faudra la ponter et faire le réglage de débit unique sur le manodétendeur. Le remplissage se fait en deux phases.

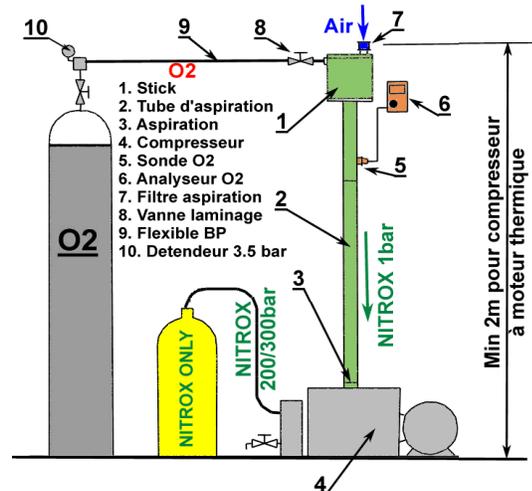
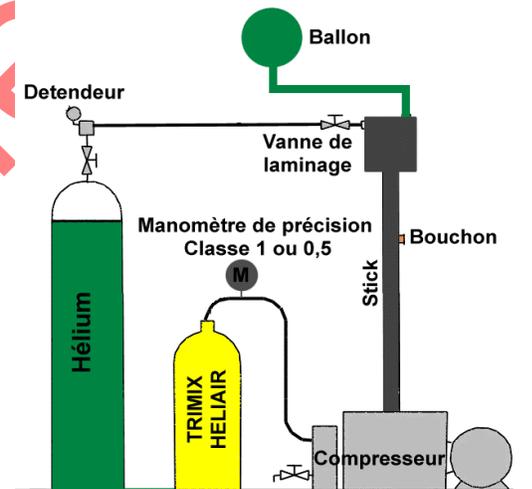
#### Phase 1.

Introduire de l'hélium dans la bouteille. Le mode opératoire est le suivant.

1. Mesurer le pourcentage d'hélium et d'oxygène dans le reliquat de gaz.
2. Calculer les pressions et le % d'oxygène dans le Nitrox
3. Ouvrir la bouteille d'hélium
4. Gonfler le ballon en actionnant la vanne de laminage
5. Démarrer le compresseur
6. En actionnant la vanne de laminage dégonfler et gonfler le ballon deux / trois fois pour chasser l'air du circuit.
7. Connecter la bouteille sans l'ouvrir
8. Dès que le compresseur atteint 200 bar, ouvrir la bouteille
9. Surveiller le manomètre de précision et le ballon qui doit rester gonflé
10. Dès que l'on atteint la pression calculée fermer la bouteille et arrêter le compresseur
11. Fermer la bouteille d'hélium et la vanne de laminage.

#### Phase 2.

Faire l'appoint en air ou en Nitrox pour obtenir le mélange désiré. Pour la procédure voir le chapitre 5.1





### 6.1.1. Calcul de l'hélium et du Nitrox à ajouter

$$PHe = PPHe_f - PPHe_i$$

$$PN = PPN_f - PPN_i$$

$$PO = PPO_f - PPO_i$$

$$Nx = \frac{100 PO}{(PO + PN)}$$

PPO<sub>i</sub> : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange initial (bar)

PPHe<sub>i</sub> : Pression partielle de l'hélium dans le mélange initial (bar)

PPNi : Pression partielle de l'azote dans le mélange initial (bar)

PPO<sub>f</sub> : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange à obtenir (bar)

PPHe<sub>f</sub> : Pression partielle de l'hélium dans le mélange à obtenir (bar)

PPN<sub>f</sub> : Pression partielle de l'azote dans le mélange à obtenir (bar)

Nx : Pourcentage d'oxygène dans le Nitrox à ajouter

PHe : Pression d'hélium à ajouter (bar)

PO : Pression d'oxygène à ajouter (bar)

PN : Pression d'azote à ajouter (bar)

**Si Nx est inférieur à 21% ou supérieur à 40% le mélange n'est pas fabricable avec cette méthode**

Exemple.

On doit fabriquer un Tx 12/50 à 200 bar à partir d'un reliquat de 30 bar d'un Tx 15/40. Etablir la carte de gonflage en considérant que l'appoint est de l'air.

1) Calculs préliminaires

$$PPO_i = 0,15 \times 30 = 4,5$$

$$PPHe_i = 0,4 \times 30 = 12$$

$$PPNi = 0,55 \times 30 = 13,5$$

$$PPO_f = 0,12 \times 200 = 24$$

$$PPHe_f = 0,5 \times 200 = 100$$

$$PPN_f = 0,38 \times 200 = 76$$

$$PHe = 100 - 12 = 88 \text{ bar} \quad PN = 76 - 13,5 = 62,5 \text{ bar} \quad PO = 24 - 4,5 = 19,5 \text{ bar}$$

$$Nx = \frac{100 \times 19,5}{(19,5 + 62,5)} = 23,8 \text{ bar}$$

Carte de gonflage			
Ordre	Gaz	Pression	A lire sur le manomètre
	Initial	30	30
1	Hélium (He)	88	118
2	Nitrox		200

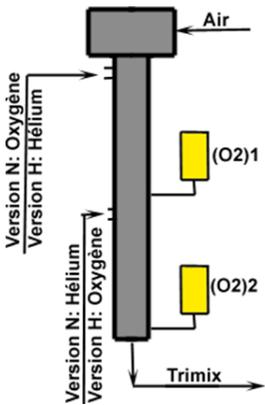
[Calculateur Trimix simple stick](http://www.jctdive.be) - Lien jctdive.be

### 6.1.2 A Ne jamais faire

- Laisser tourner le compresseur ballon vide.
- Omettre de surveiller le manomètre.
- Oublier de vérifier les pourcentages d'hélium et d'oxygène avant la plongée.



## 6.2. Méthode du double stick



C'est la méthode la plus rationnelle, elle se fait en une seule opération. Elle présente tous les avantages de la méthode précédente avec un plus important. Le mélange se fait à pression atmosphérique. Il sera de ce fait, directement utilisable sans délai d'homogénéisation. La détermination la fraction d'hélium se fait indirectement par une double mesure de la fraction oxygène en amont et en aval de l'injection d'hélium.

Les analyseurs d'hélium n'étant pas suffisamment dynamiques pour une utilisation en flux continu. Cette méthode est extrêmement précise. Elle ne présente qu'un seul inconvénient, le prix du matériel de fabrication, qui est pratiquement le double de la méthode du « simple stick ». Il y a deux variantes en fonction de l'ordre d'injection de l'oxygène et de l'hélium. Personnellement j'ai une nette préférence pour la « Variante N »



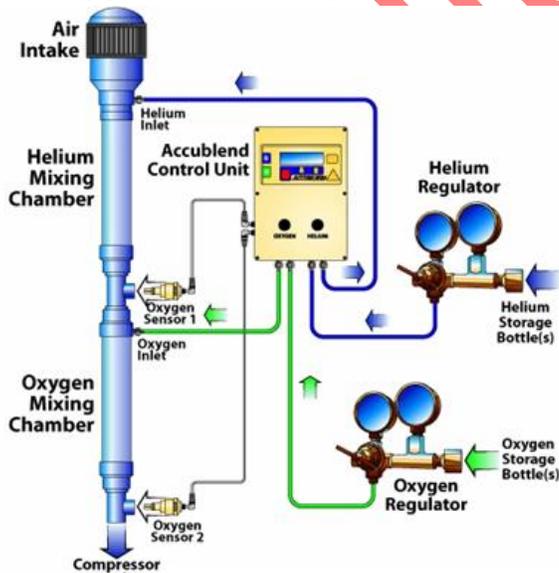
Source : catalogue Diving Equipment

### Variante N

« N » pour « Nitrogen ». L'injection d'oxygène se fait en premier lieu. On fabrique un Nitrox, puis on injecte de l'hélium pour fabriquer le Trimix.

### Variante H

« H » pour « Heliar ». L'injection d'hélium se fait en premier lieu. On fabrique un Héliar, puis on injecte de l'oxygène pour fabriquer le Trimix.



Source : Documentation Tri-Hunter

Le système Tri-Hunter permet un la fabrication et le contrôle en continu du mélange. Il permet de faire tous les calculs relatifs à la plongée Trimix

[Calculateur Trimix double stick](http://lien.jctdive.be) – Lien jctdive.be



### 6.2.1. Réglage des oxymètres

$$PHe = PPHef - PPHei$$

$$PN = PPNf - PPNi$$

$$PO = PPOf - PPOi$$

#### A. Mode Nitrogen (N)

$$\text{Oxymètre 1} = \frac{100 PO}{(Pf - Pi - PHe)} \quad (\%)$$

$$\text{Oxymètre 2} = \frac{100 PO}{(Pf - Pi)} \quad (\%)$$

#### B. Mode Héliair (H)

$$Phéliair = 0,2658 PN \quad (\text{bar})$$

$$\text{Oxymètre 1} = \frac{100 Phéliair}{(Phéliair + PHe + PN)} \quad (\%)$$

$$\text{Oxymètre 2} = \frac{100 PO}{(Pf - Pi)} \quad (\%)$$

PPOi : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange initial (bar)

PPHei : Pression partielle de l'hélium dans le mélange initial (bar)

PPNi : Pression partielle de l'azote dans le mélange initial (bar)

PPOf : Pression partielle de l'oxygène dans le mélange à obtenir (bar)

PPHef : Pression partielle de l'hélium dans le mélange à obtenir (bar)

PPNf : Pression partielle de l'azote dans le mélange à obtenir (bar)

PHe : Pression d'hélium à ajouter (bar)

PO : Pression d'oxygène à ajouter (bar)

PN : Pression d'azote à ajouter (bar)

Pf : Pression finale dans la bouteille (bar)

Pi : Pression initiale dans la bouteille, reliquat (bar)

**Si le calcul indique un % d'oxygène supérieur à 40%. Le mélange n'est pas fabricable avec cette méthode.**

Exemple

On doit fabriquer un Tx 15/50 à 200 bar à partir d'un reliquat de 40 bar d'un Tx 10/70.

$PPOf=0,15 \times 200=30$	$PPHef=0,5 \times 200=100$	$PPNf=0,35 \times 200=70$
$PPOi=0,10 \times 40=4$	$PPHei=0,7 \times 40=28$	$PPNi=0,20 \times 40=8$
$PO=26$	$PHe=72$	$PN=62$

A. Stick « Nitrogen » (N)

$$\text{Oxymètre 1} = 100 PO / (Pf - Pi - PHe) = 2600 / (200 - 40 - 72) = 29,5\%$$

$$\text{Oxymètre 2} = 100 PO / (Pf - Pi) = 2600 / (200 - 40) = 16,2\%$$

B. Stick « Héliair » (H)

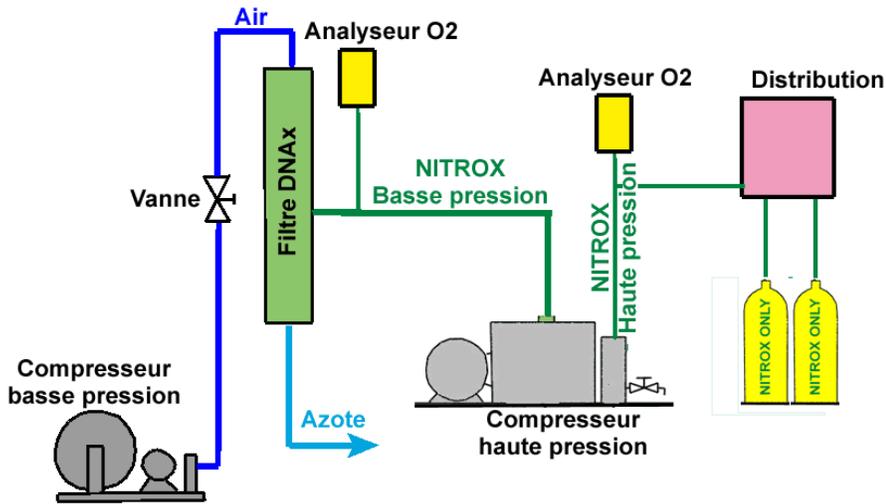
$$\text{Phéliair} = 0,2658 PN = 0,2658 \times 62 = 16,5 \text{ bar}$$

$$\text{Oxymètre 1} = 100 \text{Phéliair} / (\text{Phéliair} + PHe + PN) = 1650 / (16,5 + 72 + 62) = 11\%$$

$$\text{Oxymètre 2} = 100 PO / (Pf - Pi) = 2600 / (200 - 40) = 16,2\%$$



## 7. Fabrication du Nitrox par filtration DNAX



La séparation moléculaire ou filtration semi-perméable DNAX est une méthode sûre mais particulièrement coûteuse à l'achat comme à l'entretien. L'air est envoyé à partir d'un compresseur basse pression (10 bar) au travers d'un filtre de fibres (Hollow fiber) qui a la particularité de séparer l'azote de l'air. Le produit résiduel de cette filtration est un air enrichi en oxygène. Le pourcentage d'oxygène dans le mélange est fonction de la pression de l'air et du réglage du débit d'échappement de l'azote à la

sortie du filtre. Avec une double boucle de régulation, il est possible de fabriquer deux qualités de Nitrox. Par la suite ce Nitrox est comprimé jusqu'à 200bar dans un simple compresseur à piston comme pour le procédé du stick. Par cette méthode il n'est pas possible, par les caractéristiques du filtre, d'obtenir un mélange supérieur à 40 % d'oxygène. C'est le moyen le plus sûr pour fabriquer du Nitrox à usage récréatif, même lorsque la fabrication est assurée par un personnel peu qualifié. La méthode ne nécessite aucun calcul, ne pas en œuvre de l'oxygène pur à haute pression. En contrepartie, elle est très énergivore et demande une installation complexe et coûteuse. Il faut :

- Un compresseur haute pression dédié uniquement au Nitrox
- Un compresseur basse pression dont le débit doit être au moins trois fois plus important que le débit du compresseur haute pression.
- Une unité de filtrage DNAX
- Une tuyauterie doit relier la sortie du filtre qui rejette de l'azote vers l'extérieur sous peine de risquer de diminuer drastiquement le taux d'oxygène dans le local. Le risque d'hypoxie est réel !



Le prix de revient du Nitrox ainsi fabriqué est relativement élevé. La méthode ne convient qu'aux grands centres pouvant amortir sur la quantité le prix de l'installation. Depuis la flambée de prix de l'énergie en 2022 certains centres ont abandonné cette méthode. Malgré cet inconvénient COLTRI a lancé une gamme de petits compresseurs compacts équipés de cette technologie à l'usage des petits centres et du grand public.

Source : [Documentation COLTRI](#)



## 8. Méthode gravimétrique ou des « masses moléculaires »

Cette méthode est basée sur la masse de chaque gaz. Elle est particulièrement précise principalement pour un grand volume. L'imprécision due à la force exercée sur la balance par le flexible de gonflage et l'effet dynamique du gaz en circulation devenant négligeable. Cette méthode est utilisée industriellement pour fabriquer des mélanges très précis (étalonnage...) à partir de gaz chimiquement pur dans des bouteilles préalablement vidées<sup>40</sup> et rincée. La méthode nécessite l'utilisation d'une balance digitale très précise et d'un environnement exempt d'éléments perturbateurs pouvant influencer la mesure. Cette méthode nécessite un investissement important est peu utilisée dans les centres de gonflage. Elle est principalement utilisée pour préfabriquer des mélanges qui seront par la suite « boostés » dans les bouteilles de plongée. Néanmoins l'imprécision aux hautes pressions de la loi de Boyle Mariotte, principalement pour les gaz monoatomiques (Hélium) et la complexité de l'équation d'état de Van der Waals incitent de plus en plus les gonfleurs importants à utiliser cette méthode. La bonne pratique est définie en Union Européenne par la norme ISO 6142.

### 8.1. Petit rappel de physique

Masse moléculaire	
Molécule	g/mole
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	2,016
Hélium (He)	4,002
Azote (N <sub>2</sub> )	28,016
Oxygène (O <sub>2</sub> )	32,000
Air sec	28,850

La masse moléculaire s'exprime généralement en kg/kmole ou en gramme/mole dans des conditions normales. (Température 0°C et pression atmosphérique normale de 760mm de mercure) une mole de gaz occupe un volume de 22,4135 litres. L'avantage de travailler avec des masses moléculaires est que la masse d'une mole de gaz est constante, même si le volume occupé par cette mole varie en fonction de la pression et de la température du gaz.

### 8.2. Calcul des masses des gaz constituant le mélange

#### Phase1

La première phase consiste à déterminer la composition du reliquat de gaz, sa pression, sa température, le volume du contenant et calculer les paramètres de ce reliquat dans les conditions normales et calculer la masse de chaque composant du reliquat.

$$V_{normal\ reliquat} = \frac{273,15 P_{reliquat} V_{bouteille}}{(273,15 + T_{reliquat})}$$

Avec

$V_{bouteille}$  : Volume hydraulique de la bouteille en litres (l)

$P_{reliquat}$  : Pression mesurée du reliquat (bar)

$T_{reliquat}$  : température mesurée du reliquat (°C)

$V_{Normal\ reliquat}$  : Volume du reliquat de gaz dans des conditions normales en litres (l)

<sup>40</sup> Dans l'industrie les bouteilles sont effectivement vidées. Ce n'est pas le cas des centres de plongée ou on ne gaspille pas le gaz



$$[Masse\ n]_{relicat} = \frac{V_{normal\ relicat} \times [\%n]_{relicat} \times [Masse\ molaire\ n]_{relicat}}{2241,35}$$

Avec

[Masse n]<sub>relicat</sub> : Masse du composant N du reliquat en grammes (g)

[%n]<sub>relicat</sub> : Pourcentage du composant n dans le reliquat (%)

[Masse molaire n]<sub>relicat</sub> : Masse moléculaire du composant n dans le reliquat en grammes (g)

V<sub>Normal relicat</sub> : Volume du reliquat de gaz dans des conditions normales en litres (l)

Exemple

On a une bouteille B50 qui contient un Tx 15/40 à la pression de 30 bar, à la température de 20°C. Quelle est la masse de chaque composant ?

$$V_{normal\ relicat} = \frac{273,15 \times 30 \times 50}{(273,15 + 20)} = 1398\text{ litres}$$

$$[Masse\ O_2]_{relicat} = \frac{1398 \times 15 \times 32}{2241,35} = 299,4\text{ g}$$

$$[Masse\ He]_{relicat} = \frac{1398 \times 40 \times 4,002}{2241,35} = 99,8\text{ g}$$

$$[Masse\ N_2]_{relicat} = \frac{1398 \times 45 \times 28,0016}{2241,35} = 785,9\text{ g}$$

**Phase 2**

Calculer la masse de chaque composant du mélange final à obtenir. Pour éviter de dépasser la pression de service de la bouteille, à la température ambiante, on se base généralement sur une pression de calcul de 90% de la pression de service.

$$V_{final} = P_{finale} V_{bouteille}$$

$$[Masse\ n]_{final} = \frac{V_{final} \times [\%n]_{final} \times [Masse\ molaire\ n]_{final}}{2241,35}$$

Avec

[Masse n]<sub>final</sub> : Masse du composant N du mélange final à obtenir en grammes (g)

[%n]<sub>final</sub> : Pourcentage du composant n dans le mélange final à obtenir (%)

[Masse molaire n]<sub>final</sub> : Masse moléculaire du composant n dans le mélange final à obtenir en grammes

V<sub>final</sub> : Volume final du mélange à obtenir dans des conditions normales en litres (l)

V<sub>bouteille</sub> : Volume hydraulique de la bouteille en litres (l)

P<sub>finale</sub> : Pression finale du mélange à obtenir dans des conditions normales (bar)

[Calculateur Trimix gravimétrique](#) – Lien jctdive.be



### Exemple

On désire obtenir un Tx 20/30 dans une bouteille de 50 bar dont la pression de service est de 200 bar

- Quelle est la masse de chaque composant à ajouter si la bouteille est vide ?
- Quelle est la masse de chaque composant à ajouter si la bouteille à un reliquat de gaz comme défini dans l'exemple de la phase 1 ?

Par mesure de précaution, pour éviter une surpression lors du gonflage on considère une pression de calcul de 180 bar.

a)

$$V_{final} = 180 \times 50 = 9000 \text{ litres}$$

$$[Masse O_2]_{final} = \frac{9000 \times 20 \times 32}{2241,35} = 2569,9 \text{ g}$$

$$[Masse He]_{final} = \frac{9000 \times 30 \times 4,002}{2241,35} = 482,1 \text{ g}$$

$$[Masse N_2]_{final} = \frac{9000 \times 50 \times 28,0016}{2241,35} = 5621,9 \text{ g}$$

b)

$$\text{Ajout } O_2 = 2570 - 299 = 2271 \text{ g}$$

$$\text{Ajout He} = 482 - 100 = 382 \text{ g}$$

$$\text{Ajout } N_2 = 5622 - 786 = 4836 \text{ g}$$

## 9. Comparaison entre les modes de fabrication.

Méthode	Gaz	Utilisateur	Blender	Prix matériel	Précision	Homogène à la fabrication	Perte gaz (O <sub>2</sub> , He)
Pression partielle	Nx, Tx	Loisir, Tec	Perso	Très faible	Faible	Non	Oui
Stick simple	Nx<40%	Loisir	Perso	Faible	Moyen	+/-	Non
	Tx	Tec	Perso	Faible	Moyen	+/-	Non
Stick double	Tx	Tec	Perso Centre	Moyen	Moyen	+/-	Non
Filtre DNax	Nx<40%	Loisir	Centre	Elevé	Moyen	+/-	Non
Gravitique	Nx,Tx	Pro	Industrie	Très élevé	Très bon	Non	Non



## 10. Temps d'homogénéisation d'un mélange

### 10.1. Théorie sur la diffusion des gaz

Lorsqu'on prépare un mélange par pression partielle, l'homogénéité du mélange n'est pas instantanée. Il faudra un certain temps pour rendre le mélange homogène. Ce temps va dépendre de la vitesse de diffusion des gaz. La diffusion étant la dispersion progressive d'un gaz dans un autre. Théoriquement la vitesse de diffusion dépend de la vitesse moyenne de déplacement des molécules de ce gaz. Néanmoins étant donné la proximité des molécules, il y aura un grand nombre de collisions entre les molécules. Le trajet d'une molécule sera très éloigné d'un trajet rectiligne. La vitesse réelle sera plus lente que celle donnée par la relation ci-dessous.

$$V = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Avec :

V : Vitesse moyenne de déplacement des molécules (m/s)

T : Température du gaz (K)

R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K)

M : Masse molaire (Kg/mol)

Quelques valeurs de « V »

T : 300K			
Gaz	He	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
V (m/s)	1368	517	483

#### 10.1.1. Loi de Graham

A pression et à température égale, les vitesses de diffusion de deux gaz sont inversement proportionnelles à la racine carrée de leurs masses molaires.

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

Avec :

V<sub>1</sub> : Vitesse de diffusion du gaz 1 (m/s)

V<sub>2</sub> : Vitesse de diffusion du gaz 2 (m/s)

M<sub>1</sub> : Masse molaire du gaz 1 (Kg/mol)

M<sub>2</sub> : Masse molaire du gaz 2 (Kg/mol)

#### 10.1.2. Le coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion exprime la vitesse à laquelle un gaz diffuse dans un autre gaz. Pour l'hélium on peut se baser sur la valeur de  $6,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ce coefficient va permettre d'estimer le temps nécessaire pour rendre homogène un Trimix fabriqué par la méthode des pressions partielles.



### 10.1.3. Estimation du temps d'homogénéisation d'un Trimix

Lors de la fabrication d'un Trimix par pression partielle, la crainte est de voir l'hélium se placer au sommet de la bouteille par simple effet de gravité. En effet la masse molaire de l'hélium ( $4 \cdot 10^{-3}$  Kg/mol) est largement inférieur à celui de l'azote ( $28 \cdot 10^{-3}$  Kg/mol) ou de l'oxygène ( $32 \cdot 10^{-3}$  Kg/mol). Il faudra donc attendre un certain temps pour que le mélange devienne homogène. Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, il est possible d'estimer le temps d'homogénéisation avec une relation mathématique simple.

#### *Hypothèses simplificatrices*

On suppose que :

- Seul la diffusion intervient dans l'homogénéisation du mélange. C'est-à-dire que le régime du gaz lors de l'injection d'hélium a été laminaire et non turbulent. Ce qui constitue une approche conservatrice.
- Le coefficient de diffusion reste constant, malgré l'augmentation de pression et donc de la masse volumique du mélange.
- Le coefficient de diffusion reste constant, malgré une légère augmentation de la température. L'augmentation de la température va dans le bon sens, pour réduire le temps d'homogénéisation (augmentation de l'agitation moléculaire).
- Le mélange  $O_2/N_2$  est homogène avant l'injection d'hélium.

#### *Facteur favorisant l'homogénéisation.*

Certaines pratiques peuvent tendre à réduire le temps d'homogénéisation

- Injecter les gaz dans l'ordre des masses molaires croissantes. Donc l'hélium en premier, puis l'oxygène. Ce n'est pas toujours possible dans le cadre de la plongée loisir, l'oxygène ne pouvant pas passer dans un compresseur classique. Il faut un surpresseur compatible oxygène.
- L'injection de l'hélium en régime turbulent est favorable à l'homogénéisation.

$$t = \frac{l^2}{D} \quad t_{\text{homogène}} = \epsilon t$$

Avec :

t : Temps pour qu'une molécule passe de la partie supérieure du réservoir jusqu'au fond du réservoir (s)

l : Distance verticale entre le sommet et le fond du réservoir (m)

D : Coefficient de diffusion ( $m^2/s$ ) – ( $6,97 \cdot 10^{-5} m^2/s$  pour l'hélium)

$t_{\text{homogène}}$  : Temps d'homogénéisation

$\epsilon$  : Coefficient de sécurité – minimum 3



#### 10.1.4. Comparaison entre une bouteille debout ou couchée.

Considérons une bouteille de 12l longue (hauteur 700mm, diamètre 170mm). Comparons le temps d'homogénéisation, bouteille debout et couchée en considérant un coefficient de sécurité de 3

	Bouteille debout	Bouteille couchée
l	0,7m	0,17m
€	2	2
t	$t = \frac{0,7^2}{0,0000697} = 7030s$ soit 2 heures	$t = \frac{0,17^2}{0,0000697} = 414s$ soit 7 minutes
t <sub>homogène</sub>	2 x 3 = 6 heures	3 x 7 = 21 minutes

Conclusion : Ce sont des valeurs théoriques. Les coefficients de diffusions peuvent varier avec la pression. L'exemple est néanmoins suffisamment parlant pour se rendre compte qu'il est préférable de coucher la bouteille après la fabrication d'un mélange par la méthode des pressions partielles.

En pratique il est rare ne pas avoir quelques heures entre la fabrication et l'utilisation du mélange.

## 11. Analyse des gaz

Après, une période d'homogénéisation, plus ou moins longue suivant le procédé de fabrication et de la position de la bouteille, il est impératif pour la sécurité d'analyser le mélange obtenu et le cas échéant adapter le plan de plongée. Sans analyse on ne plonge PAS !

**« Sans lui on ne sait pas ce que l'on respire ; Sans lui on ne plonge PAS ou on plonge à l'air ou à l'oxygène. »<sup>41</sup>**

### 11.1. Mesure de la teneur en oxygène

Que ce soit pour le Nitrox ou le Trimix, une mesure de la teneur en oxygène du mélange est requise. Il existe différents types d'oxymètres qui se divisent en deux catégories. Les oxymètres paramagnétiques et les oxymètres à cellule électrochimique. Ce sont les oxymètres à cellule électrochimique qui sont utilisés pour la plongée récréative et Tec. Les oxymètres paramagnétiques sont plutôt réservés au laboratoire et à l'industrie.

#### 11.1.1. les oxymètres paramagnétiques

Ils utilisent les facultés que possède l'O<sub>2</sub> de s'aimer dans des champs magnétiques, pour déterminer le % d'O<sub>2</sub>. Ces oxymètres sont très précis mais très chers, de ce fait ils sont peu répandus parmi les plongeurs qui préfèrent les oxymètres à cellule électrochimique pour des raisons budgétaires.

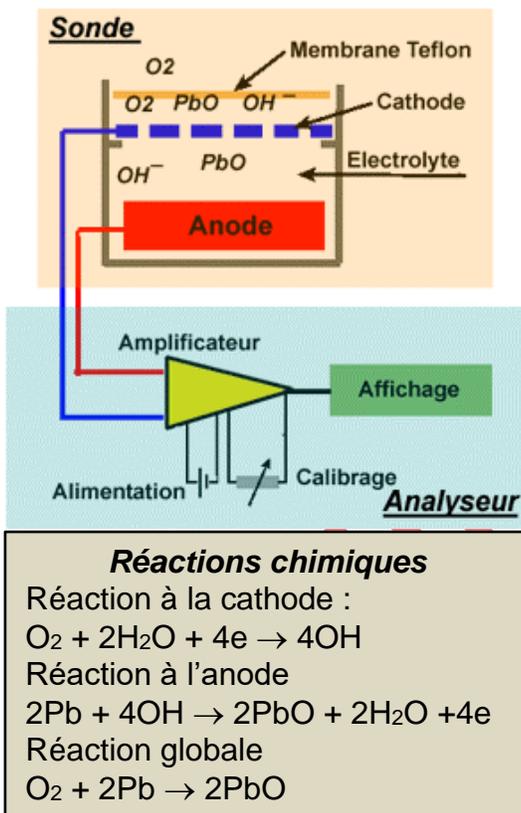
<sup>41</sup> Jacques Vettier- Nitrox, Trimix aux éditions Ulmer



## 11.1.2. Les Oxymètres à cellule électrochimique

Le capteur d'oxygène est basé sur l'effet de pile, la différence de potentiel entre l'anode et la cathode de cette pile sera proportionnelle à la quantité d'oxygène qui va traverser une paroi semi-perméable. C'est le type d'oxymètre le plus courant mais il nécessite un calibrage. L'appareil mesure en fait une pression partielle, si la pression atmosphérique n'est pas égale à 1 bar, plongée en altitude par exemple il faut utiliser une formule de correction. Les variations de température et d'humidité sont compensées par l'appareil. La plupart des cellules sont galvaniques, leur durée de vie n'est pas illimitée il est raisonnable de changer la cellule toute les 24 à 30 mois. Même sans être connectées à l'analyseur les cellules travaillent. Les réactions chimiques se font et elles réduisent la durée de vie de la cellule. Il ne faut jamais acheter directement des cellules de réserve.

### 11.1.2.1. Fonctionnement



L'analyseur est composé d'une sonde, et d'un circuit électronique qui analyse le signal émis par cette sonde. Le courant produit par la sonde est la conséquence des réactions chimiques d'oxydoréduction qui ont lieu en son sein. L'oxygène s'infiltré au travers d'une membrane de téflon pour se dissoudre dans un liquide appelé électrolyte. Au contact de la cathode (plomb ou cadmium), il se réduit (réaction de réduction ou Redox) en produisant des électrons et simultanément l'anode s'oxyde (réaction d'oxydation ou Oxydo) en fournissant l'énergie pour la continuité de ces deux réactions (Oxydo-Redox). La différence de potentiel entre l'anode et la cathode est proportionnelle à la quantité d'électrons et donc à la quantité d'oxygène. La réaction d'oxydation mange la matière de l'anode ce qui explique que la durée de vie de la cellule est limitée, dès que la matière de cette anode devient insuffisante la cellule tombe en panne de « carburant ». La production d'électrons engendre entre l'anode et la cathode un courant électrique (entre 10 et 25 mV) que l'on peut amplifier et mesurer dans l'analyseur, un potentiomètre servant au calibrage de l'analyseur. L'alimentation de l'analyseur ne sert pas comme on le pense généralement à fournir de l'énergie à la sonde, mais

sert uniquement à fournir de l'énergie au circuit électrique.

### 11.1.2.2. Fin de vie de la cellule

Il est très facile de s'apercevoir que la cellule approche de sa fin de vie, l'affichage devient de moins en moins stable et il faut recalibrer de plus en plus souvent l'oxymètre. Ces signes avant-coureurs de la mort de la cellule sont dus au fait que la matière de l'anode est devenue insuffisante pour assurer une bonne alimentation en énergie de la cellule.



### 11.1.2.3. Quel oxymètre choisir ?

Des oxymètres il y en a pour toutes les bourses. Le bon choix dépend principalement de ce que l'on attend de l'analyseur. Si on fabrique son Nitrox au stick, il est clair que le choix se portera plutôt vers un appareil possédant une cellule séparée avec un temps de réponse court et pouvant facilement se connecter sur le stick et sur une bouteille. Si on ne fabrique pas son Nitrox, on peut se contenter d'un appareil portable à cellule intégrée qui a l'avantage d'être très bon marché (à peine plus cher que le prix de la cellule) mais qui est hors d'usage dès la fin de vie de la cellule et qui généralement a un temps de réponse plus important.



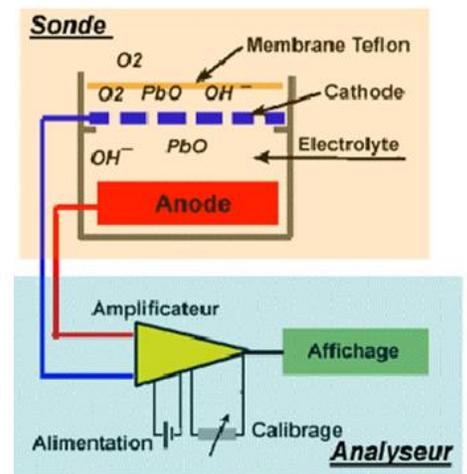
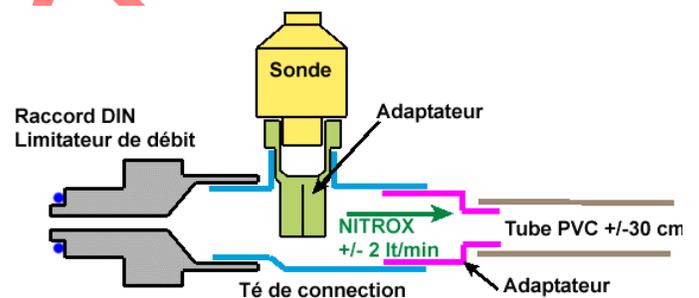
Source : Catalogue Vandagraph

## 11.2. Utilisation de l'oxymètre.

1. Vérifier le calibrage de l'appareil. 21% dans l'air au niveau de la mer soit à la pression de 1atm au besoin ajuster avec le bouton « Calibrate ». Il est conseillé de calibrer l'appareil à chaque utilisation. Pour une utilisation en altitude, les fabricants fournissent généralement un petit abaque de correction
2. Connecter l'appareil à la bouteille à l'aide des accessoires fournis avec l'analyseur.
3. Ouvrir très délicatement la bouteille de plongée, attendre que la mesure se stabilise.
4. Relever la valeur lorsque la mesure est stable (en moyenne 15 à 25 secondes)
5. Recommencer la mesure deux ou trois fois.

### 11.2.1. A ne JAMAIS faire

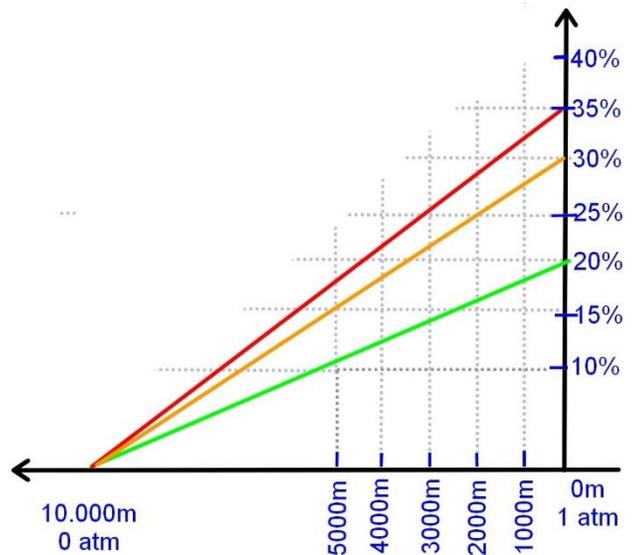
1. Oublier de vérifier le calibrage de l'oxymètre.
2. Mettre la sonde sous pression.
3. Ouvrir à fond le robinet de la bouteille de plongée.
4. Stocker des sondes durant une longue période.
5. Emballer une sonde sous-vide. L'électrolyte qui est un produit toxique va diffuser au travers de la membrane.
6. Laisser l'appareil dans la poussière





### 11.2.2. Correction en fonction de la pression atmosphérique (altitude).

Etant que l'oxymètre ne mesure pas un pourcentage, mais une pression partielle traduite en pourcentage. Ce qui donne une mesure exacte que si elle est faite au niveau de la mer (pression atmosphérique +/- 1 bar). Il faut corriger le calibrage en fonction de l'altitude ou plus exactement en fonction de la pression atmosphérique à l'altitude de la mesure. Généralement le plongeur n'a pas de baromètre pour mesurer la pression atmosphérique, mais il connaît avec une assez bonne précision l'altitude du site de plongée. En considérant une atmosphère théorique de 10.000m, il est possible de calculer la valeur du calibrage, avec une précision suffisante, en fonction de l'altitude avec la relation empirique :



$$\text{Calibrage}_{\text{Air}} = \frac{21(10.000 - \text{Altitude})}{10.000}$$

Avec :

Calibrage<sub>Air</sub> : Valeur à afficher en % pour un calibrage fait à l'air  
 Altitude : Altitude en mètres (m)

Il est possible d'adapter cette formule pour calculer la valeur à afficher pour la fabrication du Nitrox avec la méthode du stick. Etant donné que la précision des mesures et des calculs diminue avec l'altitude, il est conseillé de ne pas utiliser cette méthode si l'altitude dépasse 1500m et se limiter à un Nx35.

$$\text{Affichage}_{\text{Nx}} = \frac{\%O_2 (10.000 - \text{Altitude})}{10.000}$$

Avec :

Affichage<sub>Nx</sub> : Valeur à régler pour obtenir un Nitrox ayant le %O<sub>2</sub> voulu  
 Altitude : Altitude en mètres (m)  
 %O<sub>2</sub> : Pourcentage d'oxygène dans le Nitrox à fabriquer (%)

Exemple

On fabrique un Nx 35 à 1500m d'altitude calculer le calibrage de l'oxymètre avec de l'air et la valeur à régler pour la fabrication du Nitrox.

$$\text{Calibrage}_{\text{Air}} = \frac{21(10.000 - 1500)}{10.000} = 17,9$$

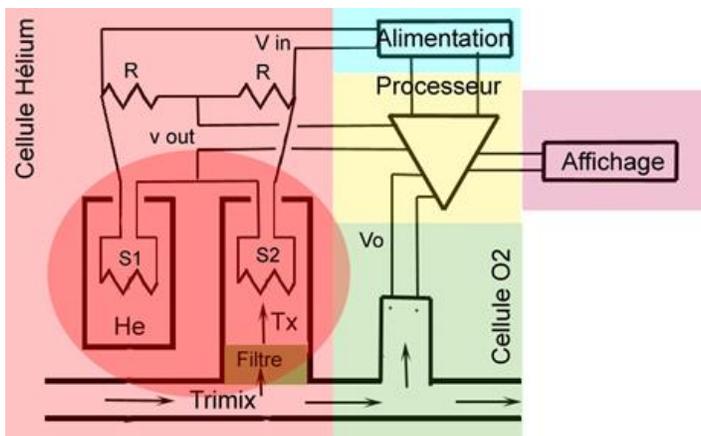
$$\text{Affichage}_{\text{Nx}} = \frac{35 (10.000 - 1500)}{10.000} = 29,8$$



## 11.2. Mesure de la teneur en hélium

Les analyseurs d'hélium sont des appareils relativement coûteux, quoiqu'on puisse en trouver à des prix de l'ordre de 700 €. S'ils sont combinés à un oxymètre. L'avantage des appareils combinés est que l'on détermine la carte du gaz en une seule mesure. Je pense que lorsqu'on investit dans sa propre station de fabrication Trimix, il ne faut pas lésiner sur cet investissement. La sécurité et la santé n'ont pas de prix. La mesure de la concentration en hélium n'est pas « instantanée » comme la mesure de la teneur en oxygène. Il faut plusieurs secondes pour quelle se fasse. Pour cette raison, il n'est pas possible d'utiliser un analyseur d'hélium pour la fabrication du Trimix en flux continu. Les analyseurs sont basés sur les principes de la conductivité des gaz ou de la vitesse du son dans le gaz.

### 11.2.1. Analyseur basé sur la conductivité thermique



Ce type d'analyseur est basé sur la différence de conductivité thermique entre l'hélium et le Trimix à mesurer. L'hélium et le trimix à mesurer ne se refroidissent pas à la même vitesse après échauffement. La différence varie en fonction de la teneur en hélium du mélange. La cellule de mesure est composée de deux chambres rigoureusement identiques au sein desquelles plongent deux thermistances<sup>42</sup> S1 et S2 identiques. L'une contient de l'hélium pur et l'autre le Trimix à analyser.

L'analyse se fait en deux temps :

1. Réchauffement des gaz dans la cellule par effet joule
2. Refroidissement des gaz qui va varier en fonction de la conductivité de ceux-ci. Cette différence ( $S1 \neq S2$ ) va déséquilibrer le pont composé des résistances R, S1 et S2 et provoquer une différence de potentiel ( $V_{out}$ ) proportionnelle à la concentration en hélium du Trimix. Si dans la chambre Tx il y a de l'hélium pur :  $S1 = S2$

- La précision de ces analyseurs est de l'ordre de +/- 1%.
- Le temps de réponse suivant les modèles entre 5 et 15s.
- Ils doivent être étalonné, avec de l'hélium, à chaque mesure.
- Il ne convient pas pour piloter un stick, ni pour une mesure en continu.
- En moyenne la cellule doit être changée tous les 5 à 10 ans suivant les modèles. Ce qui a un coût non négligeable.

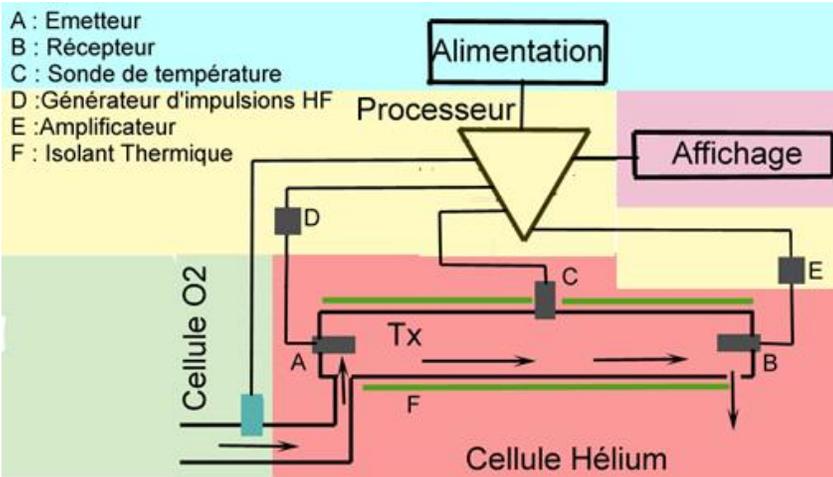


Source : [Catalogue NTR dive](#)

<sup>42</sup> La thermistance est une résistance dont la valeur varie en fonction de la température.



## 11.2.2. Analyseur basé sur la vitesse du son (Sonique)



Cette technologie assez récente, dans le grand public, est basée sur la grande différence existant entre la célérité (vitesse) du son entre les gaz monoatomique (hélium) et les gaz biatomique (oxygène, azote).

La vitesse du son ne dépend que de la nature du gaz ( $k$  et  $R$ ) et de sa température. En mesurant cette vitesse, la température et la concentration en oxygène, il est possible de déterminer la concentration en hélium avec une grande précision. Cette vitesse est proportionnelle au temps que met

l'impulsion sonore pour passer de l'émetteur (A) au récepteur (B).

$$C_g = \sqrt{\frac{k R T}{M_m}}$$

Avec :

$C_g$  : Célérité du son dans le gaz (m/s)

$k$  : Constante adiabatique des gaz parfaits  $k=C_p/C_v$

$R$  : Constante universelle des gaz parfaits (8,314 J/mol K)

$T$  : Température absolue du gaz en Kelvin (K)  $T= 273,15 + ^\circ C$

$M_m$  : Masse molaire du gaz (Kg/mol)



Source : Catalogue Divesoft

Valeurs usuelles			Valeur	Unité
k	Gaz monoatomique	He, Ar...	1,67	-
	Gaz diatomique	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Air	1,40	-
M <sub>m</sub>	Oxygène	O <sub>2</sub>	0,032	Kg/mol
	Azote	N <sub>2</sub>	0,028	Kg/mol
	Air	-	0,0288	Kg/mol
	Hélium	He	0,004	Kg/mol

$$C_{air\ 0^\circ C} = \sqrt{\frac{1,4 \times 8,314 \times 273,15}{0,0288}} = 332\ m/s$$

$$C_{Hélium\ 0^\circ C} = \sqrt{\frac{1,67 \times 8,314 \times 273,15}{0,004}} = 974\ m/s$$

- La précision de ces analyseurs est de l'ordre de +/- 0,3%.
- Le temps de réponse est inférieur à 5s
- Il ne doit pas être étalonné, avec de l'hélium, à chaque mesure.
- Il ne convient pas pour piloter un stick, mais peut faire une mesure en continu.



# Partie 4

---

## Le Nitrox dans les recycleurs SCR

1. Généralité	Page 110
2. Types de recycleurs	Page 111
3. Pourquoi un débit massique constant ?	Page 112
4. Fraction oxygène SCR actif	Page 113
5. Fraction oxygène SCR passif	Page 115
6. Gestion de la décompression	Page 116



Les recycleurs sont des machines qui peuvent vous tuer ou vous blesser gravement, si vous ne les utilisez pas correctement. Il est indispensable de suivre une formation adaptée à chaque machine, et d'être particulièrement rigoureux dans la préparation de celle-ci.

**Un « Recycleux » qui ne connaît pas la composition du mélange qu'il respire ou qui a omis de vérifier sa machine est un « Recycleux » mort.**

## 1. Généralités

### 1.1. Un recycleur c'est quoi ?

Lorsque nous respirons sur un circuit ouvert nous ne consommons que 5% de l'oxygène respiré. Le restant de ce précieux gaz est expulsé dans l'eau avec l'azote et le produit de la combustion de l'oxygène par notre organisme, le CO<sub>2</sub>. Cette technologie engendre un gaspillage énorme. Le recycleur est une machine qui permet d'une part de ne plus gaspiller l'oxygène qui reste dans la boucle respiratoire et d'autre part d'éliminer le CO<sub>2</sub> du circuit. La boucle de recyclage comprend un embout avec des clapets, des tuyaux annelés, un sac d'inspiration, un sac d'expiration et une cartouche filtrante pour éliminer le CO<sub>2</sub>. Ces éléments sont communs à tous les recycleurs. Ce qui va changer c'est la manière d'injecter le ou les gaz respiratoire(s).

### 1.2. Le pour et le contre

#### 1.2.1. Les avantages

- Fonctionnement très silencieux, ce qui permet aux photographes d'approcher facilement les animaux.
- Pas ou peu de bulles. Le peu de bulles expulsées ne le sont pas au niveau de l'embout, ce qui permet de ne jamais avoir de bulles devant l'objectif de l'appareil photo.
- Très confortable.
- Grande autonomie.
- Rapport autonomie/poids du matériel très avantageux.
- Réduction du risque d'ADD (mélanges suroxygénés).
- Respiration d'un mélange chaud et humide par réaction du CO<sub>2</sub> sur la chaux sodée de l'épurateur.

#### 1.2.2. Les inconvénients

- Prix d'achat plus élevé que le matériel classique.
- Nécessite une formation spécifique pour chaque machine ou groupe de machine.
- Besoin de rigueur dans la préparation du matériel et de la planification de la plongée.
- Prix de revient des consommables par plongée plus important que pour le circuit ouvert, sauf pour les recycleurs Trimix.
- Entretien plus important que pour les circuits ouverts.



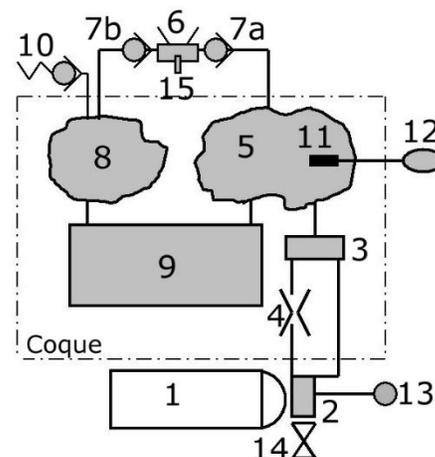
	<b>Circuit ouvert</b>	<b>Recycleur</b>
Autonomie	Faible	Importante
Rapport autonomie/poids	Peu élevé	Elevé
Composition du gaz respiré	Fixe durant la plongée	Variable durant la plongée
Qualité du gaz respiré	Froid et sec	Chaud et humide
PPO <sub>2</sub>	Variable	Fixe ou variable svt la machine
CO <sub>2</sub> dans le circuit respiratoire	Impossible <sup>43</sup>	Possible si négligence <sup>44</sup>
Poumon ballast	Oui	Non
Prix d'achat	Moins élevé	Plus élevé
Entretiens	Plus facile, coût faible	Moins facile, coût important

## 2. Les types de recycleurs

Il existe deux grandes familles de recycleurs les circuits fermés ou **Closed Circuit Rebreather** et les recycleurs semi-fermés **Semi-Closed Rebreather**. Les CCR n'utilisent pas de Nx, ils sortent du cadre de cet ouvrage.

### 2.1. Structure du recycleur SCR en mode actif

1. Bouteille Nitrox.
2. Détendeur. Sa pression de service constante est de l'ordre de 16 à 18 bar ce qui garanti un débit massique constant et stable de la buse sonique jusqu'à +/- 60m de profondeur.
3. By-pass. Il permet de maintenir le sac d'inspiration gonflé lors de la descente. Lorsque la pression extérieure augmente et fait diminuer le volume du sac inspiratoire<sup>45</sup>, La dépression au niveau de la membrane du by-pass qui via la fourchette ouvre le clapet qui permet l'injection du mélange dans le sac.
4. Buse sonique (gicleur). Délivre un débit massique de Nitrox constant quel que soit la profondeur, si la pression hydrostatique est inférieure à la pression critique de la buse.
5. Sac inspiratoire
- 6 ;7a/7b ; 15 Embout avec clapets anti-retour et vanne d'isolation pour éviter les entrée d'eau.
8. Sac expiratoire.
9. Canister ou scrubber. Bidon remplis de chaux sodée, qui élimine le CO<sub>2</sub> du circuit respiratoire.
10. Soupape de surpression, évite la surpression dans le circuit lors de la remontée.
- 11 ; 12. Sonde et anamyseur d'O<sub>2</sub> ou ordinateur.
- 13 ;14 Manomètre Nitrox, vanne d'isolation.



<sup>43</sup> Impossible si les bouteilles ont été gonflées correctement.

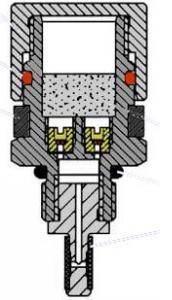
<sup>44</sup> Ce problème est éliminé la cartouche de chaux est remplie correctement.

<sup>45</sup> Suivant la loi de Boyle-Mariotte



### 3. Pourquoi un débit massique constant ?

Notre organisme pour vivre à besoin de carburant et de comburant. Le carburant c'est la nourriture et le comburant l'oxygène. On a besoin d'un certain nombre de grammes d'oxygène par minute, ni plus ni moins. Cette quantité d'oxygène dans l'unité de temps c'est le débit le débit massique. Elle, dépend de la physiologie de plongeurs et de l'effort qu'il fournit, mais pas de la profondeur. Le débit massique constant est assuré par la buse sonique (gicleur). Buse qui exploite une propriété physique des « orifices de petites dimensions ».



#### 3.1 Les buses soniques

Leur particularité est de délivrer un débit massique constant quelle que soit la profondeur. Les buses soniques sont des orifices calibrés dans lesquelles la vitesse maximale d'écoulement du gaz atteint, au droit la section de passage minimum, sa propre vitesse sonique. Pour réaliser ce type d'orifice il suffit de fabriquer une tuyère convergente sans divergent, la sortie la buse correspond au « col de la tuyère. Pour dimensionner la buse il faudra connaître l'évolution de la pression, la vitesse sonique et dans quelles conditions il est possible d'atteindre cette vitesse. Autrement dit étudier l'évolution des constantes physiques d'un fluide compressible. Ces phénomènes ont été étudiés par Bernoulli<sup>46</sup>. Le débit massique restera constant tant que la pression du Nitrox délivré par le détendeur est supérieure à la pression ambiante.

$$Q_{massique} = Constante \Leftrightarrow P_{critique} > P_{ambiante}$$

$$P_{critique} = P_{détendeur} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Gaz	k
Air, Nitrox	1,40
Tx 20/10	1,48
Tx 20/25	1,56
Tx 16/40	1,60
Tx 14/50	1,61
Hélium	1,66

Avec : k = Constante adiabatique du gaz.

Exemple :

Déterminer la profondeur maximale théorique d'utilisation d'un Dräger Ray dont le détendeur délivre un Nitrox à 9 bar.

$$P_{critique} = 9 \left( \frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 4,8 \text{ bar soit une profondeur de } 38\text{m}$$

<sup>46</sup> Daniel Bernoulli (9/02/1700 – 17/03/1782) médecin, physicien et mathématicien suisse.



## 4. Fraction d'oxygène dans la boucle d'un SCR actif

A l'ouverture de la bouteille de Nitrox source, la fraction d'oxygène dans la boucle est égale à celle de la bouteille source. Lorsque le plongeur va commencer à respirer sur la machine, l'injection de Nitrox, via la buse sonique, ne va pas compenser totalement la chute de la fraction d'oxygène dans la boucle du recycleur. Deux questions se posent :

1. A quelle vitesse aura lieu la chute de la fraction d'oxygène dans la boucle ?
2. La fraction d'oxygène se stabilise-t-elle et si oui à quel niveau ?

Les lois de la mécanique des fluides nous permettent d'établir une modélisation et d'écrire l'équation différentielle de la variation de la fraction d'oxygène dans la boucle par rapport au temps. Cette fraction d'oxygène dans la boucle du recycleur va dépendre du plongeur et des caractéristiques de la machine. Notamment du volume de la boucle, de la quantité de gaz frais injecté, de la fraction d'oxygène dans le gaz source.

$$\frac{d FiO_2}{dt} = \frac{(Qs FsO_2 - VO_2(t) - (Qs - VO_2) FiO_2(t))}{V}$$

Avec

- $FiO_2$  : Fraction d'oxygène dans la boucle. (%)
- $Qs$  : Débit de la buse sonique (l / min)
- $FsO_2$  : Fraction d' $O_2$  de la bouteille source (%)
- $VO_2$  : Consommation métabolique (l / min)
- $V$  : Volume total de la boucle de recyclage (l)

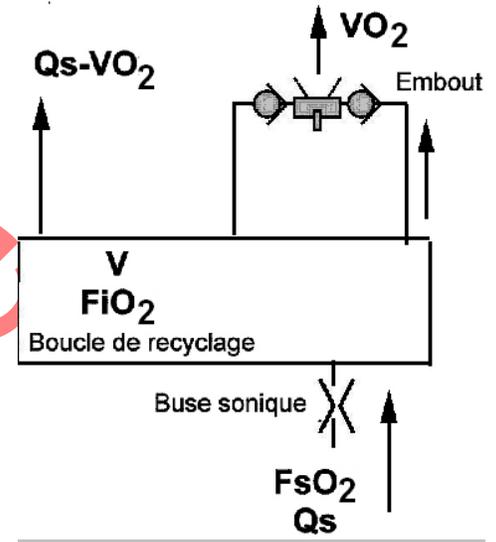
La résolution de ce type d'équation différentielle, par les transformées de Laplace, va donner un terme constant dans le temps et un terme variable dans le temps. Au temps  $t=0$  la fraction d'oxygène dans la boucle  $FiO_2s$  correspond généralement à la fraction d'oxygène de la bouteille source

$$FiO_2(t) = \text{terme constant} + \text{terme variable}$$

$$\text{terme constant} = \frac{Qs FsO_2 - VO_2}{(Qs - VO_2)}$$

$$\text{terme variable} = \left( FiO_2s - \frac{Qs FsO_2 - VO_2}{(Qs - VO_2)} \right) e^{-(1/\tau)t}$$

$$\text{Avec la constante de temps de la machine : } \tau = \frac{V}{(Qs - VO_2)}$$





## 4.1. Quelques valeurs clés

### 4.1.1 consommation métabolique d'oxygène.

C'est la quantité d'oxygène que notre organisme a besoin pour assurer son fonctionnement. Cette quantité est variable d'un individu à l'autre, elle dépend de la corpulence, de la forme physique, de l'entraînement et de l'activité exercée en plongée. Le débit métabolique ( $VO_2$ ) est exprimé en litre/minute.

Activité	Style d'activité	$VO_2$
Repos	Sans activité Sommeil	0,3
Faible	Plongée statique Photographie...	0,5 à 0,75
Moyenne	Balade Palmage moyen	1 à 1,5
Forte	Palmage intense Courant, travail	1,75 à 2,5

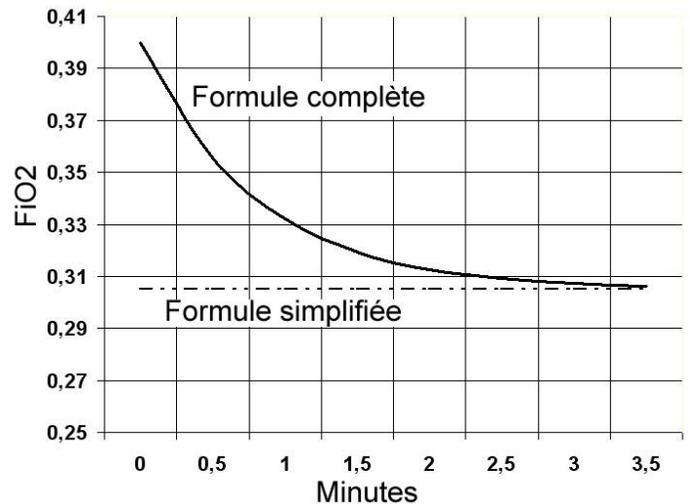
### 4.1.2. Les Buses soniques Dräger

Marquage	Qs min (l/min)	Qs max (l/min)
EAN 60	5,1	6,4
EAN 50	6,6	8
EAN 40	9,4	11,3
EAN 32	14,2	16,9

[Calcul de la fraction d'oxygène](http://jctdive.be) (Lien vers jctdive.be)

## 4.2. Analyse de la variation de la fraction d'oxygène dans la boucle

Analysons à l'aide des relations établies le comportement du SCR Dräger Dolphin. Son volume global (V) de l'ordre de 12 litres, en analysant une configuration classique de la machine soit un Nx40 comme source, la buse sonique de 11 litres/minutes et une consommation métabolique de 1,5 litres/minute on constate en examinant le graphique :



- Que la formule simplifiée, donnée dans le manuel du constructeur et qui correspond au « terme constant » est amplement suffisant.
- Que cette formule ajoute un facteur sécurité en calculant une  $F_{iO_2}$  inférieure à la réalité en début de plongée. Le risque hypoxique réel est moins élevé que le risque calculé !
- Que le plongeur doit respirer au moins une minute en surface pour éviter un risque hyperoxique lors d'une descente rapide à grande profondeur
- Que le terme variable devient très vite négligeable !



## 5. Fraction d'oxygène dans un recycleur SCR en mode passif

Ce type de recycleur est nettement moins présent dans le grand public. A l'origine ils étaient destinés à une utilisation purement militaire. Depuis la déclassification du DC55 des plongeurs ont racheté ces machines à la marine nationale française. Dans ce type d'appareil une partie des gaz respirés est rejetée dans l'eau à chaque respiration du plongeur. C'est la chute de volume de gaz dans la boucle qui provoque l'admission de gaz frais. Le volume de gaz injecté dans la boucle est proportionnel à la pression hydrostatique. Ce qui revient à dire que la fraction d'oxygène injectée est proportionnelle à la profondeur. En appliquant les lois de la mécanique des fluides et de la physique il vient :

$$FiO_2 = 1 - \left[ \frac{(1 - FsO_2)(P + (\xi \times \lambda))}{(P + \lambda)} \right]$$

$$\xi = \frac{V_i}{V_e} \quad \lambda = \frac{(21 - V_{lo})}{100}$$

Avec :

$FiO_2$  : Fraction d'oxygène dans la boucle (%)

$FsO_2$  : Concentration en oxygène de la source (bouteille de Nitrox) (%)

$P$  : Pression ambiante absolue (bar).

$V_i$  : Volume du sac d'inspiration (litres) (l).

$V_e$  : Volume du sac d'expiration (litres) (l).

$V_{lo}$  : Reliquat d'oxygène expiré (%). Pour connaître sont VLO c'est très simple il suffit d'expirer lentement dans son oxymètre et de lire la valeur affichée.

$\xi$  Rapport constructif de la machine variant entre 10 et 15

### 5.1. Formule pratique

La formulation ci-dessus étant difficile à exploiter en pratique, la marine a établi pour le DC55 une formule de bonne pratique testée expérimentalement.

$$FiN_2 = FsN_2 \frac{(P + (\xi \times Cm))}{(P - Cm)} \quad FiO_2 = 100 - FiN_2$$

Avec

$Cm$  : Coefficient métabolique varie entre 0,035 et 0,055 et  $\xi$  : 12,7 pour le DC55

$FiN_2$  : Fraction d'azote dans la boucle (%)

$FsN_2$  : Fraction d'azote de la source (%)



Exemple didactique.

Quel est le % d'oxygène dans la boucle d'un DC55 lors d'une plongée à 30m avec un Nx50 et  $C_m=0,04$  ?

$$FiN_2 = 50 \frac{(4 + (12,7 \times 0,04))}{(4 - 0,04)} = 57\% \quad FiO_2 = 100 - 57 = 43\%$$

## 6. Gestion de la décompression

La gestion de la décompression en CCR et SCR est totalement différente. En CCR la pression partielle d'oxygène est maintenue constante contrairement au SCR où cette pression varie en permanence. Dans le cadre de cet ouvrage nous n'aborderons que le mode SCR.

### 6.1. Méthode sécuritaire

C'est la méthode la plus simple, la plus efficace et la plus sécuritaire. Elle vous permet de profiter pleinement de la sécurité accrue qu'apporte le Nitrox. Ce n'est pas négligeable dans nos conditions de plongée habituelle qui allient le froid, le courant, le stress lié au manque de visibilité et les efforts physiques avant et après la plongée. Cette méthode consiste tout simplement à gérer la décompression comme si la plongée était faite à l'air avec des tables, un ordinateur air ou un ordinateur Nitrox réglé sur 21% d'oxygène.

### 6.2. Méthode agressive

Cette méthode consiste à estimer, de préférence largement, sa consommation métabolique. Puis déterminer la fraction d'oxygène dans la boucle et utiliser cette valeur pour gérer la décompression en utilisant soit des tables Nitrox, des tables air corrigées, en programmant un ordinateur Nitrox ou en utilisant un logiciel générateur de run time.

Cette méthode a bien des inconvénients et incertitudes :

- L'estimation de la fraction d'oxygène n'est pas une valeur sûre, mesurable directement et vérifiée.
- La fraction d'oxygène est fortement variable suivant les conditions de plongée.
- La fraction d'oxygène peut chuter fortement lors de la remontée, alors que l'on entame le processus de décompression. Quelques expirations lors de la remontée permettent de « rincer » la boucle avec un mélange frais riche en oxygène. Cela permet de maintenir une PPO2 dans des normes acceptables, ce qui n'est pas plus mal pour la décompression.

Sans être totalement adverse de la méthode, je n'en suis pas un partisan convaincu à cause des incertitudes. Il va de soi que si on plonge, à faible profondeur, avec une remontée très lente, avec un Nitrox source fortement oxygéné et que même avec une consommation métabolique élevée (2 – 2,5 litres/minute) il y aura une fraction d'oxygène élevée dans la boucle on peut envisager la méthode avec prudence.

**A chacun de prendre ses responsabilités et comme disent les américains « It's your live »**



## 6.2.1. Logiciel générateur de Run Time

De nombreux logiciels sur le marché permettent de générer un Run Time pour des recycleurs CCR et SCR. Cela permet de générer un ou plusieurs plans de secours en cas de panne de la gestion électronique de la décompression ou du passage sur bailout. La difficulté réside dans le fait que pour un SCR la PPO<sub>2</sub> n'est pas constante et n'est pas déterminée avec précision. La première étape consiste à déterminer quelle sera la PPO<sub>2</sub> la plus défavorable (courant, effort...). Puis paramétrer le logiciel avec les conditions les plus défavorables c'est-à-dire avec le minimum d'oxygène dans la bouche du recycleur et donc du maximum d'azote. Ce n'est pas toujours évident, il faut parfois tester plusieurs paramétrages pour remplir cette condition de sécurité durant TOUTE la plongée.

Exemple didactique.

On veut faire une plongée à 24m – 60 minutes avec un SCR actif. Le débit mesuré de la buse sonique est de 15l/min et le Nitrox source est de 40%.

D'après la fiche de calcul, on constate que dans le pire des cas on aura au moins 30,8% d'oxygène dans la boucle. Il faudra paramétrer le logiciel pour qu'il calcule la déco avec cette valeur durant toute la plongée.

### Calcul du % O<sub>2</sub> dans la boucle des recycleurs SCR à buses soniques

Type *Dräger Dolphin et Ray*

#### Introduction des données

% O <sub>2</sub> de la source (fsO <sub>2</sub> )	40	%
Débit de la buse sonique (Qs)	15	litre/minute
Débit O <sub>2</sub> métabolisé (VO <sub>2</sub> )	1,3	litre/minute
% O <sub>2</sub> dans la boucle (FiO <sub>2</sub> )	34,3	%
Profondeur maximale ppO <sub>2</sub> =1,4 bar	25,0	m
Profondeur maximale ppO <sub>2</sub> =1,5 bar	27,5	m
Profondeur maximale ppO <sub>2</sub> =1,6 bar	30,0	m

VO <sub>2</sub>	FiO <sub>2</sub>
0,5	37,9
0,75	36,8
1	35,7
1,25	34,5
1,5	33,3
1,75	32,1
2	30,8

On a calculé le profil de la plongée avec le logiciel MultiDeco paramétré pour calculer la déco avec 30% d'oxygène dans la boucle.

En toute logique, le bailout devra au moins contenir un mélange ayant au minimum 30% d'oxygène ou mieux 40%

**PROFIL DE PLONGÉE**  
 Intervalle de surface = 5 jours 0 hr 0 min.  
 Altitude = 0m  
 Conservatisme = GF 80/80

Desc à	24m	(1)	Nitrox 30
Niveau	24m	58:40 (60)	Nitrox 30
Rem. à	3m	(62)	Nitrox 30
Palier à	3m	16:54 (79)	Nitrox 30
Surface		(79)	Nitrox 30

OTU pour cette plongée: 62  
 CNS Total: 20,7%



### 6.3. Gestion électronique

---

C'est la gestion la plus ergonomique, à défaut d'être la plus économique. Il faut avoir un ordinateur qui prend en charge la mesure de PPO<sub>2</sub> pour effectuer ses calculs de décompression. La mesure de pression partielle d'oxygène est faite par une sonde placée à l'intérieur du sac d'inspiration. Cette méthode efficace de gestion nécessite néanmoins quelques précautions.

- Ne pas oublier de calibrer l'ordinateur à sa première mise en service.
- Vérifier régulièrement le calibrage.
- Les cellules O<sub>2</sub> n'ont pas une durée de vie éternelle, il faut les remplacer régulièrement. Les constructeurs conseillent un remplacement annuel.
- Prévoir un système de gestion de décompression alternatif en cas de défaillance du système.
- Prévoir un calcul de décompression alternatif en cas de passage sur bailout. En cas de passage sur bailout la mesure de la pression partielle d'oxygène n'est plus la valeur réelle.



# Partie 5

---

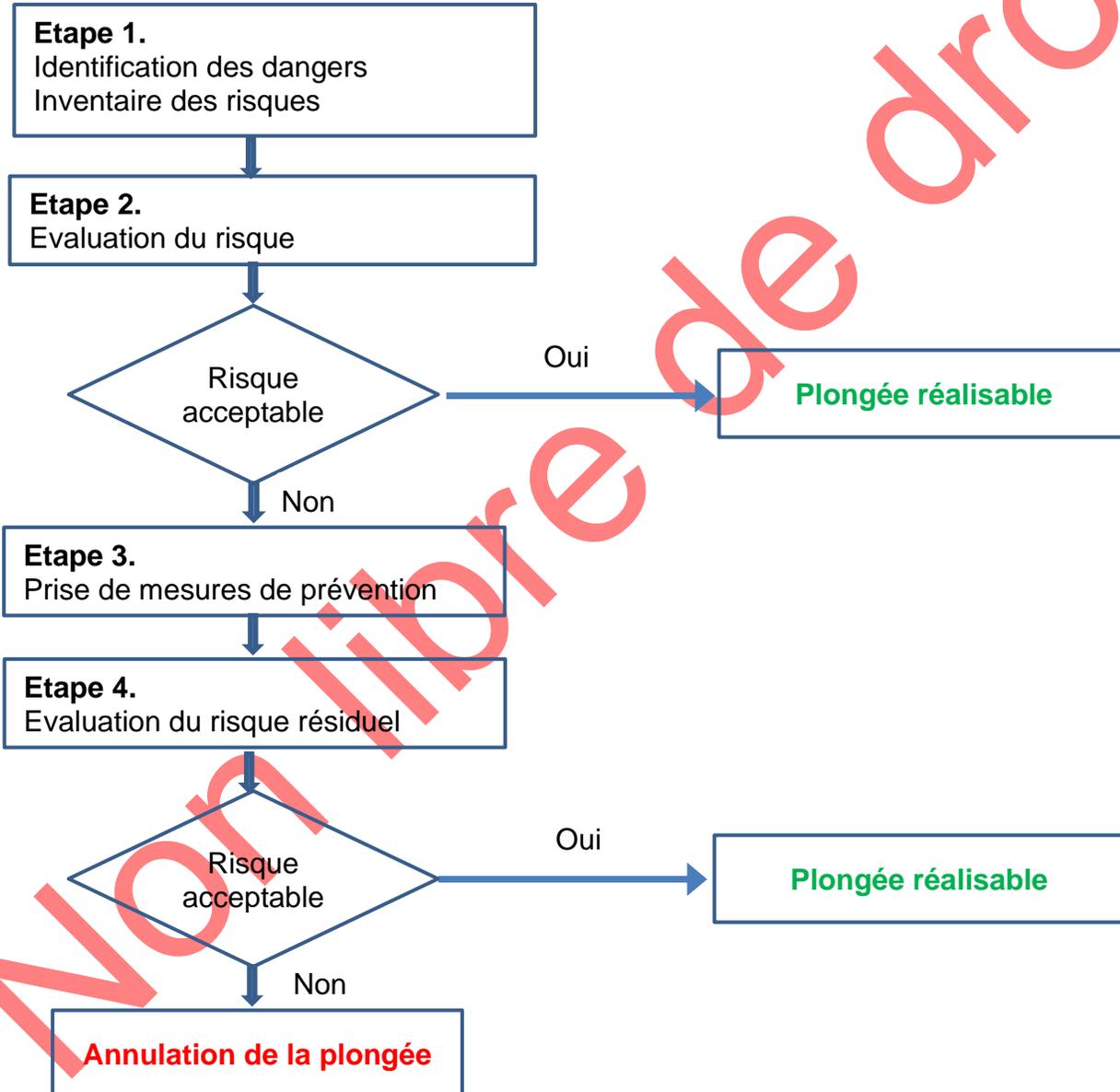
## Analyse des risques

Non libre de droit



## 1. Analyse des risques.

L'analyse des risques est une science largement répandue dans le milieu industriel et notamment au niveau de la plongée professionnelle<sup>47</sup>. On peut s'en inspirer pour analyser et quantifier le risque en plongée loisir et plus particulièrement en plongée solo. Cette analyse vise à identifier les risques (danger), les facteurs de risques, les quantifier et les prévenir d'une manière systématique. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le risque, la plus courante est la méthode Kinney.



<sup>47</sup> Opérateur en Travaux Subaquatiques



## 1.1. Définitions

---

- **Danger** : Tout élément qui peut mettre en péril l'intégrité physique et la sécurité du plongeur.
- **Exposition** : durée d'exposition au danger.
- **Dommmage** : Atteinte à l'intégrité physique ou psychologique du plongeur.
- **Risque** : Probabilité pour qu'un « Dommmage » se produise.
- **Risque résiduel** : Risque qui subsiste lorsque les mesures de prévention ont été prises.
- **Facteur de risque** : Élément ou évènement qui peut engendrer un « Dommmage ».
- **Prévention** : Toutes mesures pour limiter le « Risque », éviter les « Dommmages » ou les atténuer.
- **Probabilité** : Paramètre variable en fonction de la nature du « Risque ».

## 1.2. Méthode Kinney

---

La Méthode Kinney est une méthode d'hierarchisation des risques et pas une méthode de dépistage des risques. Elle présente l'avantage d'être facile, rapide et de quantifier le risque.

Le postulat de départ indique que le Risque est proportionnel à la probabilité (P), à l'exposition (E) et la gravité des conséquences possibles (G). Ce qui conduit à écrire la formule suivante :

$$Rk = G \times E \times P$$

Cette formulation ne tient pas compte de la formation et de l'expérience. Malchaire J. & Koob J-P<sup>48</sup> proposent d'en tenir compte en affectant la formule précédente d'un facteur (F), sans toutefois donner un tableau de valeur. La relation devient donc :

$$Rk = G \times E \times P \times F$$

Avec :

Rk : Risque estimé suivant la méthode Kinney.

G : Gravité des conséquences possibles (Dommmage).

E : Durée d'exposition au facteur de risque.

P : Probabilité d'émergence du dommmage pendant la durée d'exposition.

F : Facteur qui tient compte de la formation et de l'expérience.

Des tableaux donnent pour ces trois facteurs des valeurs numériques<sup>49</sup>. L'estimation du « score » du risque est le produit de ces facteurs. Le score ainsi obtenu peut être nuancé en fonction de la formation,

---

<sup>48</sup> [Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques](#) - Malchaire J. & Koob J-P – Université catholique de Louvain

<sup>49</sup> Les tableaux originaux donnaient une échelle de coût. Dans le cadre de la plongée solo, je n'ai pas trouvé utile de les reprendre. D'autant plus que les originaux datent de 30 ans, sans mise à jour des valeurs !



l'expérience et la pratique régulière ou non du plongeur. Ce score permet à tout un chacun d'estimer si le risque est acceptable ou non. La première difficulté consiste à faire l'inventaire des facteurs de risque. Il n'est pas facile de ne rien oublier ! La seconde difficulté, qui est de loin la plus gênante consiste à calculer le « score ». Celui-ci peut fortement varier en fonction de l'observateur, de son expérience, de sa sensibilité, de sa formation, de son niveau d'études, de son expérience de terrain... D'après l'étude de Malchaire J. & Koob J-P<sup>50</sup>, le « score » varie en fonction en fonction de l'observateur dans une fourchette de 1 à 15.

## 1.2.1 Tableaux des facteurs G, E et P

### 1.2.1.1. « Gravité » (G)

Gravité	Conséquences	Valeur
Catastrophique	Nombreux morts	100
Désastre	Quelques morts	40
Très grave	Un mort	15
Sérieux, grave	Blessure sérieuse, invalidité permanente	7
Important	Blessure incapacitante	3
Incident	Petite blessure non incapacitante	1

### 1.2.1.2. « Exposition » (E)

Exposition	Valeur
En continu	10
Régulièrement, de l'ordre d'une fois par jour	6
De temps à autre, de l'ordre d'une fois par semaine	3
Parfois de l'ordre, d'une fois par mois	2
Quelques fois par an	1
Maximum une fois par an	0,2

### 1.2.1.3. « Probabilité » (P)

Probabilité	Valeur
Probable	10
Possible	6
Inhabituel mais possible	3
Petite possibilité dans des cas limites	1
Concevable mais peu probable	0,5
Pratiquement impossible	0,2
A peine concevable	0,1

<sup>50</sup> [Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques](#) - Malchaire J. & Koob J-P – UCL



## 1.2.2 Tableaux de l'évaluation du « Risque » (Rk)

En fonction du « score » ce tableau indique le degré d'acceptabilité du risque. Nœuds

Valeur	Evaluation	Action
Rk > 400	Risque très élevé	Risque tout à fait inacceptable
200 < Rk ≤ 400	Risque élevé	Mesures de correction impératives
70 < Rk ≤ 200	Risque important	Adopter des mesures de correction
20 < Rk ≤ 70	Risque moyen	Attention particulière requise
Rk < 20	Risque faible	Acceptable

## 1.3. Application de la méthode Kinney

Risque	Degré engagement de la plongée et Conditions particulières	Facteurs / score				Préventions	Risque résiduel			
		G	E	P	Rk		G	E	P	Rk
Panne d'air	Prof. < 9m	3	3	3	27	Formation – Octopus	3	3	0,2	1,8
	Sans paliers	7	3	3	63	Formation, Bi manifold ou sidemount	7	3	0,2	4,4
	Avec paliers	15	3	3	135	Formation, Bi manifold ou Sidemount, bouteille de déco	15	3	0,2	9,0
Givrage (eau froide)	Prof. < 9m	1	3	6	18	Octopus, Free flow stop, air sec	1	3	0,2	0,6
	Sans paliers	1	3	6	18		1	3	0,2	0,6
	Avec paliers	3	3	6	54	Bi manifold + free flow stop ou Sidemount, air sec	3	3	0,2	1,8
ADD avec respect des paliers obligatoires et de sécurité	R= 120 à 149	7	3	0,2	4,2	O <sub>2</sub> sur site	7	3	0,2	4,2
	R= 150 à 199	7	3	0,5	10,5		7	3	0,2	4,2
	R= 200 à 239	7	1	3	21	Formation, palier au Nx, O <sub>2</sub> sur site	7	3	0,5	10,5
	R= 240 à 400	15	1	6	90	Best mix, formation, plan d'urgence spécifique, multiples gaz de déco, caisson hyperbare à moins d'une heure. O <sub>2</sub> sur site	7	1	3	21
Non-respect des paliers Remontée trop rapide	R= 120 à 149	1	3	1	3	Formation aux mesures de réimmersions préventives, O <sub>2</sub> sur le site				
	R= 150 à 199	3	3	1	6					
	R= 200 à 239	7	2	1	14					
	R= 240 à 400	15	1	1	15		7	2	0,5	7
Hypothermie	Temp. 0 à 5° C	7	1	6	42	Costume sec, gants étanches, veste chauffante, argon. Limiter le temps de plongée à 30 minutes	7	1	0,5	3,5
	Temp. 6 à 14° C	7	3	6	126	Costume sec, gants étanches, argon, Limiter le temps de plongée à 45 minutes	7	3	0,5	10,5
	Temp. 15 à 19° C	7	3	1	21	Costume sec	7	3	0,5	10,5
	Temp. 20 à 24° C	7	3	0,2	4,2					
	Temp. > 24° C	7	3	0,1	2,1	Néant				
Chute en partant du bord	Plage sable	3	3	0,2	1,8	Néant				
	Plage galet	3	3	0,5	4,5					
	Rocher glissant	3	3	6	45	S'équiper dans l'eau, utiliser une corde	3	3	1	9
	Pente escarpée	3	3	3	27	pour se mettre à l'eau et en sortir	3	3	1	9



Risque	Degré engagement de la plongée et Conditions particulières	Facteurs / score				Préventions	Risque résiduel				
		G	E	P	Rk		G	E	P	Rk	
Emmêlement	Tous	15	3	0,5	22,5	Plusieurs outils tranchants, Repérer les endroits où il y a des fillets, ne pas plonger si la visibilité est trop faible	15	3	0,2	9	
Narcose avec incapacité à réagir	Profondeur < 30m	15	3	0,1	4,5	Néant					
	Profondeur 30 à 39 m	15	3	0,2	9						
	Profondeur 40 à 49m	15	1	1	15						
	Profondeur 50 à 59 m	15	1	3	45		Utiliser de préférence un Tx	15	1	0,2	7,5
	Profondeur > 60m	15	1	10	150		Tx obligatoire	15	1	0,2	7,5
Se perdre	Plongée du bord	1	3	3	9	Parachute de palier rouge	1	3	3	9	
	Plongée bateau	15	3	3	135	Sécurité en veille à bord du bateau, parachutes de palier rouge et jaune, fil d'Ariane accrochée à l'ancre, Sea Marshall, miroir, siflet	15	3	0,2	9	
Courant	0,1 à 0,4 nœuds	1	3	6	18	Formation, parachutes de palier rouge et jaune, Analyse du courant en force et direction (Rose des courants). Prévoir des points de sortie alternatifs					
	0,5 à 0,8 nœuds	3	3	6	54						
	0,9 à 1,5 nœuds	7	1	6	42						
	>1,5 nœuds Plongée dérivante	15	1	6	90			15	1	1	15
Vagues Plongée au départ d'une plage sable ou de galets	0 à 50 cm	1	3	0,5	1,5	Néant					
	50 à 100 cm	3	1	3	9						
	> 100 cm	7	1	6	42		Utiliser une corde pour se mettre à l'eau et en sortir	7	1	1	7
Vagues Plongée au départ d'une zone rocheuse	0 à 50 cm	1	3	1	3	Néant					
	50 à 100 cm	3	1	3	9						
	> 100 cm	15	1	6	90		Annuler la plongée				
Vagues Plongée au départ d'une embarcation	0 à 50 cm	1	3	0,5	1,5	Néant					
	50 à 100 cm	3	1	3	9						
	> 100 cm	7	1	6	42		Annuler la plongée				
Vent Plongée au départ du bord	1 à 4 Bft	1	3	0,2	0,6	Néant					
	5 à 6 Bft	3	1	3	9						
	≥ 7 Bft	15	1	6	90		Annuler la plongée				
Panne ordinateur	No déco	7	3	3	63	Fin de plongée, redondance	7	3	0,2	4,2	
	Deco obligatoire	15	3	3	135	Passer sur le « Run-Time » de secours et les redondances	15	3	0,2	9	
Dépassement des paramètres		7	3	3	63	Passer sur les plans de secours. Avoir prévu les suppléments de gaz	7	3	0,5	10,5	
Panne de SCR		15	3	6	270	Passer sur bailout et Run-Time de secours vérification compète et test de pression avant la plongée	15	3	0,2	9	
Boucle noyée		15	3	6	270	Passer sur bailout et Run-Time de secours. Test de pression positive et négative	15	3	0,2	9	
Incendie		40	3	1	120	Vérifier la propreté et le dégraissage des éléments en contact avec les mélanges à plus de 40% d'oxygène. Pas de flamme sur le site de gonflage Extincteur Plan de secours	40	3	0,1	12	



Risque	Degré engagement de la plongée et Conditions particulières	Facteurs / score				Préventions	Risque résiduel			
		G	E	P	Rk		Facteurs / score			
							G	E	P	Rk
Explosion compresseur		40	3	1	120	Vérifier la propreté et le dégraissage des éléments en contact avec les mélanges à plus de 40% d'oxygène. Pas de flamme sur le site de gonflage. Limiter le débit du stick. Extincteur Plan de secours	40	3	0,1	12
Mélange pollué		15	3	6	270	Vérifier la pureté des gaz. Vérifier la position du filtre d'aspiration du compresseur. Vérifier le filtre à charbon actif du compresseur	15	3	0,2	9
Mélange non adéquat		15	3	3	135	Ajuster le mélange et/ou les paramètres de la plongée. Vérifier les calculs et les modes de production des mélanges	15	3	0,2	9
Perte de gaz de déco		15	3	3	135	Utilisation du mélange fond en déco. Vérifier si le volume de gaz est suffisant	15	3	0,2	9

Note : le tableau est basé sur l'expérience de l'auteur et n'est donné qu'à titre didactique. La probabilité (P) a été estimée avec le plus de rigueur possible. Néanmoins, comme expliqué au chapitre précédent, celle-ci dépend grandement du ressenti. De ce fait il y a toujours une part de subjectivité. L'exposition (E) a été estimée en fonction d'un plongeur régulier qui plonge au minimum 5 fois par mois.

Chacun devra adapter les facteurs en fonction de son style de plongée et des circonstances locales.



## Bibliographie

- J-P Bonnin, C Grimaud, J-C Happey, J-M Strub, P. Cart -- *La plongée sous-marine sportive*, Masson 1999  
D. Sirven -- *La plongée NITROX*, Technical Diving International France, 1996  
D. Rutkowski -- *NITROX Manual*, Hyberbaric International, Key Largo, FL. 1989  
L. Somers -- *Enriched air NITROX diver instructor's manual*, IANTD, Miami, FL. 1992  
US Navy Diving Manual  
DNAx Denitogenated Air, *Advanced Diver*, 3, 1999, 49-50  
Jacques Vettier -- Nitrox Trimix, ed Ulmer 2003  
André Houberechts -- *La Thermodynamique Technique*, ed Vander 1975  
Jean-François André (dit Jeff) —Nitrox et Recycleur, ed Hippoconsulting 2005  
Ranald V. Giles -- *Mécanique des fluides*, ed Schaum 1977  
C. Paternoster --*La cinématique des fluides* ed. Vyncke (Gent) 1963  
L.Landau et E. Lifchitz-- *Mécanique des fluides* ed. MIR (Moscou) 1971
- Manuel d'utilisation et technique du SCR Dräger Dolphin  
Manuel d'utilisation des compresseurs Coltri  
Manuel d'utilisation des compresseurs Bauer  
Documents publicitaires Coltri  
Documents publicitaires Bauer  
Norme CEE EN12021  
Catalogues Bigata, Catalogue Undersea Breathing Systems, Divesoft, NTRdive