



# Les recycleurs semi-fermés

*Le Dräger Dolphin*



- ✓ Théorie des recycleurs SCR
- ✓ Prévention des accidents
- ✓ Planification des plongées
- ✓ Paramétrage des machines
- ✓ Le « What-if »
- ✓ Le bailout
- ✓ Recherche de pannes
- ✓ Entretien, désinfection, rangement

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 EN RECYCLEUR SCR DEMANDE UNE FORMATION PARTICULIÈRE

**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.**

La plongée en recycleur n'est pas plus dangereuse que la plongée en circuit ouvert. Tout au plus certains facteurs de risque sont différents. Les « Recycleux » ne sont ni des martiens, ni des tortues Ninja et encore moins des têtes brûlées. Ce sont des plongeurs à la recherche des meilleures techniques pouvant améliorer leur confort, sécurité et performances. Ils sont ordonnés, précis et méthodique, mais cela fait aussi partie de la formation.

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 978-2-930747-25-5



## Table des matières

<b>PARTIE 1</b> .....	<b>5</b>
<b>HISTORIQUE, DESCRIPTION GENERALE, CONTEXTE D'UTILISATION ET CHOIX DE LA MACHINE</b> .....	<b>5</b>
1.1. HISTORIQUE .....	6
1.2. UN RECYCLEUR C'EST QUOI ? .....	6
1.3. AVANTAGES DES RECYCLEURS .....	6
1.4. INCONVENIENTS DES RECYCLEURS .....	7
1.5. COMPARAISON AVEC LES CIRCUITS OUVERTS .....	7
1.6. CONFIGURATION GENERALE .....	7
1.7. LES TYPES DE RECYCLEURS .....	8
1.8. CHOIX DE LA MACHINE .....	9
<b>PARTIE 2</b> .....	<b>10</b>
<b>DESCRIPTION, PREPARATION, TESTS ET MESURES DE LA MACHINE</b> .....	<b>10</b>
2.1. DESCRIPTION DE LA MACHINE .....	11
2.2. LA CHAUX SODEE .....	15
2.3. PREPARATION DE LA MACHINE .....	17
2.4. MISE EN PLACE DANS LA COQUE .....	19
2.5. TEST ET MESURE, CONFIGURATION DE LA MACHINE .....	21
2.6. LESTAGE DE LA MACHINE .....	22
<b>PARTIE 3</b> .....	<b>23</b>
<b>PHYSIOLOGIE, PREVENTION DES ACCIDENTS</b> .....	<b>23</b>
3.1. HYPERCAPNIE .....	24
3.2. HYPOXIE .....	25
3.3. HYPEROXIE .....	26
3.4. INGESTION DE « SOUPE CAUSTIQUE » .....	27
3.5. BRULURE CAUSTIQUE EN PREPARANT LE SCRUBBER .....	27
<b>PARTIE 4</b> .....	<b>28</b>
<b>CALCUL FRACTION OXYGENE, BEST MIX, AUTONOMIE, BAILOUT</b> .....	<b>28</b>
<b>GESTION DE LA DECOMPRESSION, PLANIFICATION, PROCEDURES</b> .....	<b>28</b>
4.1. LE « BEST MIX » .....	29
4.2. FRACTION D'OXYGENE DANS LA BOUCLE D'UN SCR ACTIF .....	29
4.3. FRACTION D'OXYGENE DANS UN RECYCLEUR SCR EN MODE PASSIF .....	32
4.4. CALCUL DE LA DUREE MAXIMUM D'UTILISATION DE LA CHAUX .....	33
4.5. ESTIMATION DE SA CONSOMMATION METABOLIQUE .....	34
4.6. POURQUOI UN DEBIT MASSIQUE CONSTANT ? .....	34
4.7. PROFONDEUR MAXIMALE D'UTILISATION « MECANIQUE » .....	37
4.8. PROFONDEUR MAXIMALE D'UTILISATION « PHYSIOLOGIQUE » .....	37
4.9. CALCUL DE L'AUTONOMIE .....	38
4.10. DETERMINATION DU SYSTEME DE BAILOUT .....	39
4.11. PARAMETRAGE ET CONFIGURATION DE LA MACHINE .....	41
4.12. GESTION DE LA DECOMPRESSION .....	41
4.13. PLANIFICATION DE LA PLONGEE .....	43
4.14. PROCEDURE DE PLONGEE .....	47
<b>PARTIE 5</b> .....	<b>49</b>
<b>WHAT IF, TABLEAU DES PANNES, REDONDANCES</b> .....	<b>49</b>
5.1. LE « WHAT IF » .....	50
5.2. LES REDONDANCES .....	54
<b>PARTIE 6</b> .....	<b>56</b>
<b>DEMONTAGE, DESINFECTION, ENTRETIEN, RANGEMENT, MODIFICATIONS</b> .....	<b>56</b>
6.1. DEMONTAGE ET RINÇAGE .....	57
6.2. DESINFECTION .....	57



6.3. ENTRETIEN .....	58
6.4. STOCKAGE.....	58
6.5. MODIFICATION SUR LA MACHINE. ....	58
<b>PARTIE 7 .....</b>	<b>59</b>
<b>ANALYSE DES RISQUES .....</b>	<b>59</b>
7. ANALYSE DES RISQUES. ....	60
7.1. DEFINITIONS.....	61
7.2. METHODE KINNEY .....	61
7.3. APPLICATION DE LA METHODE KINNEY .....	63
<b>ANNEXES.....</b>	<b>65</b>
1.1. PARAMETRAGE DU DOLPHIN.....	66
1.2. FEUILLE DE PLANIFICATION S.C.R.....	70

Tableau des mises à jour et modifications.

Version	Date	Remarques
Vers. 1.01	Mars 2024	Version originale

Non libre de droit



# Partie 1

---

## Historique, description générale, contexte d'utilisation et choix de la machine

- |    |                                       |                        |
|----|---------------------------------------|------------------------|
| 1. | Historique                            | <a href="#">Page 6</a> |
| 2. | U recycleur, c'est quoi ?             | <a href="#">Page 6</a> |
| 3. | Avantages                             | <a href="#">Page 6</a> |
| 4. | Inconvénients                         | <a href="#">Page 7</a> |
| 5. | Comparaison avec les circuits ouverts | <a href="#">Page 7</a> |
| 6. | Configuration générale                | <a href="#">Page 7</a> |
| 7. | Types de recycleurs                   | <a href="#">Page 8</a> |
| 8. | Choix de la machine                   | <a href="#">Page 9</a> |

Non libre de droit



## 1.1. Historique

---

- 1680 : Le mathématicien, physicien, physiologiste Italien Giovanni Alphonso Borelli émet l'idée qu'il est possible de purifier l'air expiré.
- 1726 : Stephen Hale fabrique la première vraie cartouche d'épuration avec de la flanelle imbibée d'eau de mer et de tartre. Cet appareil devait servir comme moyen de secours dans les désastres miniers.
- 1878 : L'officier de marine Henry Fleuss développe un appareil à l'oxygène pur et plonge à une profondeur de 5m. La cartouche épuratrice est constituée par une corde imbibée de potasse caustique.
- 1881 : Achilles Kothinsky et Simon Lake font breveter une cartouche d'épuration utilisant l'hydroxyde de baryum.
- 1905 : Des machines Henry Fleuss modifiées sont utilisées pour sauver les sous-marinières.
- 1912 : Dragër met au point un appareil à l'O<sub>2</sub> avec une autonomie de deux heures.
- 1915 : Des recycleurs à l'oxygène pur sont utilisés pour le tournage du film 20.000 lieues sous les mers.
- 1936 : Adaptation de la machine de Henry Fleuss par la marine italienne pour ses nageurs de combats.
- 1950-95 : Les grandes marines mettent au point des machines pour leurs nageurs de combat. Le succès auprès des plongeurs sportifs n'est pas au rendez-vous.
- 1995 : Dräger met au point un recycleur semi- fermé L'Atlantis I à usage grand public.
- 1998-1999 : Fort du succès aux USA de l'Atlantis Dräger continue ses recherches pour aboutir aux Dolphin et au Ray qui sont réellement des machines « grand public » simples, fiables et peu onéreuses.
- 2002 : OMG concurrence Dräger avec un semi fermé l'Azimut.

## 1.2. 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 comprenant un embout avec des clapets, des tuyaux annelés, un sac d'inspiration, un sac d'expiration<sup>1</sup> et une cartouche filtrante<sup>2</sup> pour éliminer le CO<sub>2</sub> est commun à tous les recycleurs. Ce qui va changer c'est la manière d'injecter le ou les gaz respiratoire(s).

## 1.3. Avantages des recycleurs

---

- 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

---

<sup>1</sup> Les recycleurs à l'O<sub>2</sub> pur n'ont pas besoin de sac expiratoire, car le volume de gaz neutre (Azote) est nul

<sup>2</sup> Scrubber ou canister sont les termes les plus utilisés



représente pour le photographe de ne jamais avoir de bulles devant l'objectif.

- Très confortable.
- Grande autonomie.
- Rapport autonomie/poids du matériel très avantageux.
- Réduction du risque d'accident de décompression (mélanges suroxygénés).
- Respiration d'un mélange chaud et humide par réaction du CO<sub>2</sub> sur la chaux sodée de l'épurateur.

## 1.4. Inconvénients des recycleurs

- 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.

## 1.5. Comparaison avec les circuits ouverts

	Circuit ouvert	Recycleur
Autonomie	Faible	Importante
Rapport autonomie/poids	Peu élevé	Élevé
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	Possible si négligence
Poumon ballast	Oui	Non
Prix d'achat	Moins élevé	Plus élevé
Entretiens	Plus facile	Moins facile
Coût des entretiens	Moins important	Plus important

## 1.6. Configuration générale

Les recycleurs peuvent se placer sur le dos, sur le ventre avec les sacs inspiratoires et expiratoires, dans la coque ou sur les épaules. La position des sacs influe sur le confort respiratoire. Si le plongeur est horizontal avec P<sub>sac</sub> qui est la pression dans les sacs, P<sub>hyd</sub> qui est la pression hydrostatique au niveau de l'embout les conforts respiratoires sont donnés par le tableau ci-dessous.

Position des sacs	Résistance inspiratoire	Résistance expiratoire	P <sub>sac</sub> / P <sub>hyd</sub>
Dorsal	Non	Oui	P <sub>sac</sub> < P <sub>hyd</sub>
Ventral	Oui	Non	P <sub>sac</sub> > P <sub>hyd</sub>
Épaules	Non	Non	P <sub>sac</sub> = P <sub>hyd</sub>



## 1.7. Les types de recycleurs

Il existe deux grandes familles de recycleurs. Les circuits fermés ou CCR (Closed Circuit Rebreather) et les circuits semi-fermés SCR (semi-Closed Rebreather). C'est principalement les SCR qui sont utilisés en plongée loisir. Les CCR étant réservés à des plongées plus techniques et plus profondes.

Types	Mélange / mode	Gestion	Utilisation	Profondeur maximum
CCR	Oxygène	Militaire (Davis, Oxygers...) Civil (Castaro C96...)		6 m
	Mélange Nx-Tx	Electronique	TEC (Inspiration, Revo..)	Pas de limite
		Mécanique	TEC (KISS)	Limite : Pression critique
SCR	Passif	Militaire (DC 55...) Civil (EDO 04, RB80)		Non divulgué
	Actif	Loisir (Dolphin, Ray, Azimut...)		20 à 40 m
	Flux variable	Loisir (Mares Horizon)		30 - 40m

### 1.7.1. Les CCR.

#### 1.7.1.1. Les CCR Oxygène

Ce sont des outils parfaits pour des intrusions discrètes de commandos. Ce sont des machines très simples, légères, parfaitement silencieuses, qui ne font pas de bulles. Une bouteille injecte, via un détendeur à la demande, de l'oxygène pur dans un sac d'inspiration qui est par la suite utilisé par le plongeur via un embout buccal. Embout qui comprend un second tuyau pour les gaz expirés qui sont purifiés dans un filtre. Il n'y a pas de sac d'expiration, ce qui exclut l'utilisation de Nitrox.

#### 1.7.1.2. Les CCR mélange

Ce sont des machines très complexes, des véritables usines à gaz qui fabriquent les mélanges durant la plongée en fonctions de paramètres préétablis et de la profondeur. Ils présentent l'avantage de pouvoir maintenir la PPO<sub>2</sub> constante durant toute la plongée, ce qui réduit considérablement les paliers de décompression. Les budgets, formation, achat et entretien sont pharaoniques. La complexité des machines est telle qu'il faut suivre une formation pour chaque machine auprès d'un agent d'usine. Le mélange est fabriqué à partir d'un gaz le « diluent » qui peut être un Nitrox ou un Trimix et de l'injection d'oxygène pur. Celui-ci est le seul gaz consommé par l'organisme, les gaz neutres : hélium, azote tournant en boucle dans la machine. Il est donc très facile en agissant sur l'injection d'O<sub>2</sub> de maintenir la PPO<sub>2</sub> constante. La gestion de l'injection de l'oxygène peut se faire soit électroniquement à l'aide d'une boucle de régulation comprenant des senseurs O<sub>2</sub>, analyseurs, ordinateurs et électrovannes. Soit se faire manuellement à l'aide de vannes manuelles actionnées par le plongeur. La vanne manuelle d'O<sub>2</sub> étant doublée par une injection automatique d'oxygène<sup>3</sup> à raison de notre débit métabolique<sup>4</sup>. Il va de soi que dans ces systèmes il est impératif de connaître avec exactitude la quantité d'oxygène dans la boucle de recyclage.

### 1.7.2. Les SCR

Les SCR sont des machines beaucoup plus simples, ils utilisent un mélange préfabriqué de Nitrox. Elles ne doivent pas être équipées de coûteuses et délicates boucles de régulations. Le montage et

<sup>3</sup> C'est le système KISS (Kip Is Simple Stupid) de Gordon Smith

<sup>4</sup> Débit minimum d'oxygène que notre organisme à besoin pour vivre.

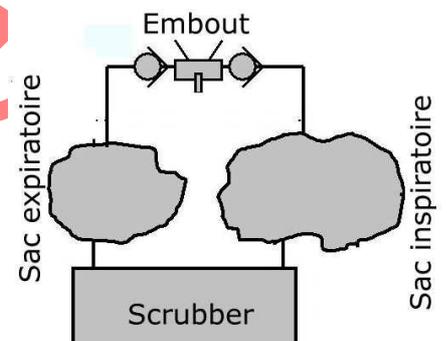


l'entretien s'en trouvent très simplifiés. Cette simplification en fait des machines idéales pour la plongée loisir. Les machines peuvent être en mode passif ou actif.

En mode passif, l'injection de mélange est proportionnelle au rythme respiratoire du plongeur. Ce type de machine est principalement utilisé par les plongeurs démineurs. En mode actif le débit est constant et ne s'adapte pas. Malgré une consommation de gaz un peu plus importante, c'est néanmoins cette solution qui a été adoptée dans la plupart des machines de loisir, à cause de la simplicité d'une part et surtout par le fait qu'il est impossible d'avoir une concentration d'oxygène dans le sac inspiratoire supérieure à la concentration dans la bouteille. Le SCR à « flux variable »<sup>5</sup> est un système hybride conçu par Mares. Il n'y a qu'une buse qui délivre du Nx à 5l/min. Un contrôleur électronique, via une électrovanne, permet de faire un appoint de Nx lorsque la PPO<sub>2</sub> descend en dessous des valeurs établies. Le système est à sécurité active. En cas de panne du contrôleur l'électrovanne reste ouverte et injecte en permanence du gaz frais dans la boucle du recycleur.

## 1.8. Choix de la machine

Le choix de la machine dépend incontestablement de l'usage que l'on veut en faire et du budget. Pour des plongées Tec le choix va plutôt se porter sur les CCR. Pour la plongée loisir le choix sera plutôt axé sur des machines plus simples et moins coûteuses comme les SCR. Dans le cadre de cet ouvrage, le choix s'est porté sur un SCR en mode actif le « Dräger Dolphin ». Ce choix a été guidé par les considérations suivantes : Machine ayant fait ses preuves, solide, facile à monter et à entretenir.<sup>6</sup>



Principe commun à tous les recycleurs

<sup>5</sup> Note humoristique de l'auteur : Cela ressemble fort au résultat des amours coupables entre madame SCR active et monsieur eCCR

<sup>6</sup> Note de l'auteur : En 2002 Dräger a arrêté la production et cédé les droits à Aqualung, qui a laissé mourir la technologie !



# Partie 2

## Description, préparation, tests et mesures de la machine

- |    |                               |                         |
|----|-------------------------------|-------------------------|
| 1. | Description générale          | <a href="#">Page 11</a> |
| 2. | La chaux sodée                | <a href="#">Page 15</a> |
| 3. | Préparation de la machine     | <a href="#">Page 17</a> |
| 4. | Mise en place dans la coque   | <a href="#">Page 19</a> |
| 5. | Tests, mesures, configuration | <a href="#">Page 21</a> |
| 6. | Lestage de la machine         | <a href="#">Page 22</a> |

Non libre de droit



## 2.1. Description de la machine.

**En bleu** : injection de Nitrox frais. Connecteur noir

**En noir** : circulation du gaz épuré du CO<sub>2</sub>. Connecteur noir

**En rouge** : circulation du gaz chargé de CO<sub>2</sub>. Connecteur rouge

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>7</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. L'ensemble by-pass et buses soniques sont connectés directement sur le sac d'inspiration.

5. Sac d'inspiratoire

6 ;7a/7b ; 15 Embout avec clapets anti-retour et vanne d'isolation pour éviter les entrée d'eau.

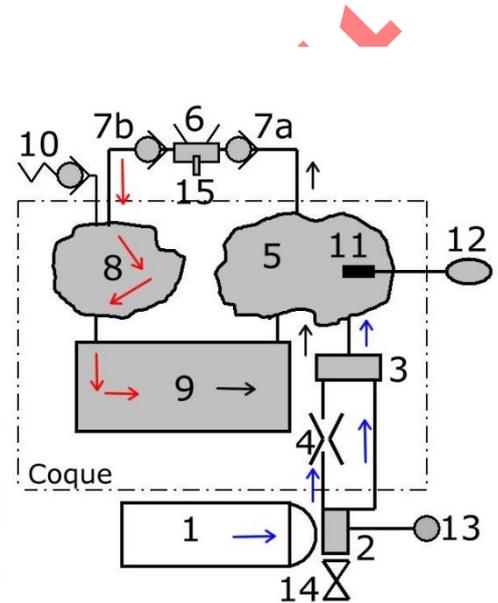
8. Sac expiratoire.

9. Canister ou scrubber. Bidon remplis de chaux sodée, qui élimine le CO<sub>2</sub> du circuit respiratoire.

10. Soupape de surpression, évite le surpression dans le circuit lors de la remontée.

11 ; 12. Sonde et analyseur d'O<sub>2</sub> ou ordinateur.

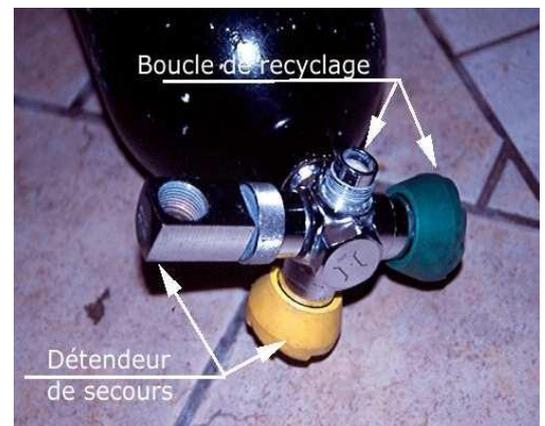
13 ;14 Manomètre Nitrox, vanne d'isolation.



Le sac inspiratoire (5) et le sac d'expiration (8) sont connectés à des connecteurs passe cloisons fixés à la coque de la machine. L'ensemble des tubes annelés avec les clapets anti-retours (7a et 7b) et l'embout (6) sont connectés à la partie extérieure des passe cloisons. Les sacs sont connectés directement sur le scrubber (9) fixé dans la coque à l'aide d'une sangle. Il n'est pas possible de mal monter les pièces, elles portent toutes des détrompeurs, bagues fléchées du sens de circulation du mélange, et codes de couleurs. La bague rouge indique le sens des gaz expirés.

### 2.1.1 La bouteille

La bouteille est une bouteille Nitrox qui doit être dégraissée et qui porte un robinet (14) ayant une connectique spéciale pour le détendeur Dräger. Il existe des robinets à deux sorties pouvant accueillir un détendeur de secours. La capacité standard de la bouteille livrée avec la machine est de 5 litres mais on peut aussi monter une bouteille de 10 litres.



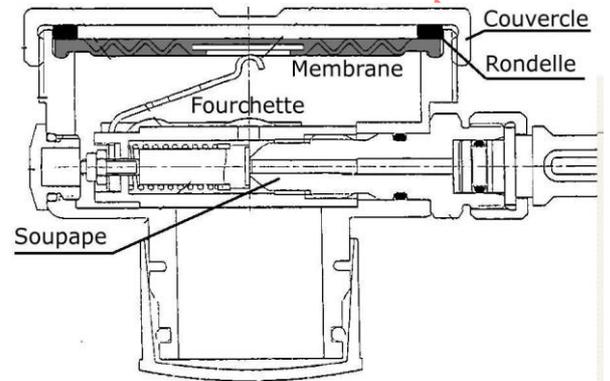


### 2.1.2. Le détendeur

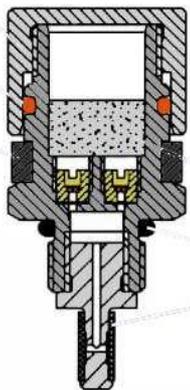
Il s'agit d'un détendeur à membrane qui délivre une pression constante de l'ordre de 17,5 bars. Il n'est pas possible d'utiliser un détendeur classique de plongée, la pression étant trop faible que pour assurer le bon fonctionnement des buses soniques.

### 2.1.3. Le By-pass

C'est l'équivalent au deuxième étage d'un détendeur pour circuit ouvert. C'est une pièce essentielle dans la machine, sans elle il ne serait pas aisé de descendre. Il assure le bon gonflage du sac d'inspiration. Lorsque la pression extérieure augmente et fait diminuer le volume de ce sac<sup>8</sup>, il se produit une 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



### 2.1.4. Les buses soniques



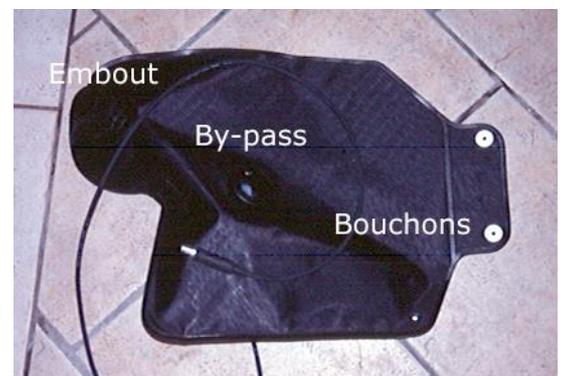
La buse sonique est la clé de voûte dans le fonctionnement de la machine. C'est la buse sonique qui délivre dans le système la quantité d'oxygène<sup>9</sup> indispensable à notre vie. Les buses soniques sont des tuyères qui ont un débit massique constant à condition que la pression en amont de la buse soit supérieure à la pression critique<sup>10</sup> au col de la tuyère. Pour des facilités de compréhension, de calcul et de mesure, elles sont néanmoins notées en débit volumique<sup>11</sup> (litres/minutes). La machine possède quatre buses soniques visées directement sur le boîtier du by-pass. On n'en utilise qu'une à la fois, les autres étant obturées par des bouchons. Les débits nominaux sont inscrits sur chaque buse, elles sont repérées par un code de couleur et portent une indication du Nitrox recommandé.

Marquage	Qs min	Qs max	Code
EAN 60	5,1	6,4	Gris
EAN 50	6,6	8	Rouge
EAN 40	9,4	11,3	Bleu
EAN 32	14,2	16,9	Jaune

Qs = Débit en litres / minutes

### 2.1.5. Le sac inspiratoire

Il est très facile à reconnaître, c'est le sac qui a le plus de connexions et c'est le plus grand des deux sacs. Son volume est de l'ordre de 5 litres ce qui correspond au volume pulmonaire moyen de la plupart des individus. La connexion supérieure est munie d'un passe cloison de couleur noire. La connexion avant est destinée à recevoir le By-pass (3), une des connexions arrière sert pour la jonction du Scrubber (9) tandis que l'autre est destinée à recevoir la



<sup>8</sup> Boyle-Mariotte

<sup>9</sup> Oxygène délivré sous forme de Nitrox dans les machines SCR

<sup>10</sup> Voir la détermination de la pression critique dans le chapitre quatre.

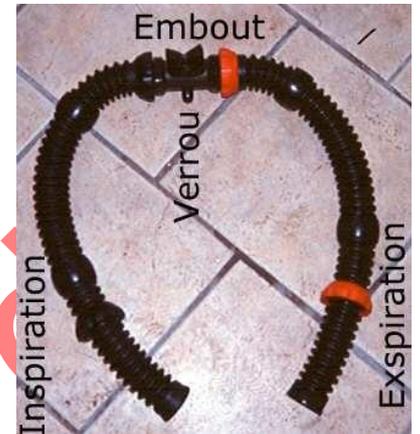
<sup>11</sup> Nombre de molécules de gaz délivrée dans l'unité de temps (moles/minutes)



sonde d'O<sub>2</sub> (11). S'il n'y a pas de sonde, un bouchon est prévu pour obturer l'orifice. Ce sac est muni d'un petit bouchon de vidange pour faciliter le rinçage et la désinfection. Il y a à l'intérieur du sac des spirales en plastique. Ces spirales sont très importantes car elles empêchent le placage du sac lors de la descente. La machine montée ce sac recouvre le Scrubber.

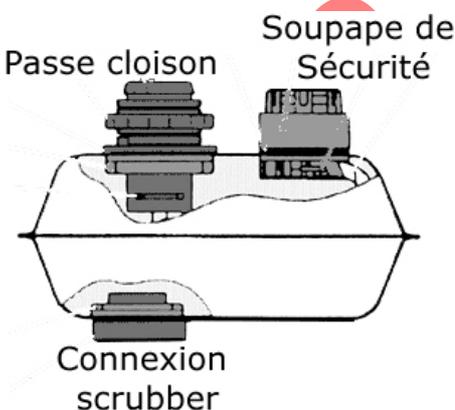
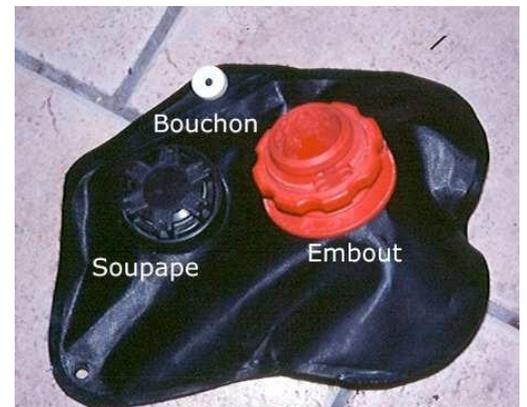
### 2.1.6. L'embout et les tuyaux annelés

L'embout d'un recycleur est beaucoup plus complexe que le simple embout des détendeurs classiques, c'est une des pièces maîtresse de la machine et hélas aussi une des plus fragiles. L'embout est muni de deux clapets anti-retours (7a et 7b). Ils ne sont pas destinés à empêcher le noyage du circuit, comme le pense à tort certains plongeurs, mais ils sont destinés à empêcher le reflux de gaz. Ils sont là pour garantir que les gaz suivent le chemin prévu. C'est à dire vers le Scrubber via le sac d'expiration pour les gaz expirés et non pas vers le sac d'inspiration. L'embout est muni de deux tuyaux annelés. Les tuyaux sont annelés pour assurer un effet Venturi qui accélère la vitesse du gaz et assure un confort respiratoire plus important. Pour éviter les entrées d'eau, le noyage du circuit et tous les risques inhérents à cette problématique, l'embout est prévu avec un verrou d'isolation (15).



### 2.1.7. Le sac expiratoire

C'est le plus petit des deux sacs, il se trouve placé au-dessus du scrubber (9). Sa fonction est double d'une part il collecte les gaz expirés servant ainsi de tampon au système de filtrage de CO<sub>2</sub> (Scrubber) et d'autre part il piège l'humidité du circuit évitant que celle-ci se mélange à la chaux sodée au risque de créer une « soupe caustique ». Le sac possède deux connexions : une à sa partie inférieure pour le Scrubber et une à la partie supérieure munie d'un passe cloison de couleur rouge. Il est muni de la soupape de sûreté réglable (10), entre 15 et 25 millibars, en vissant

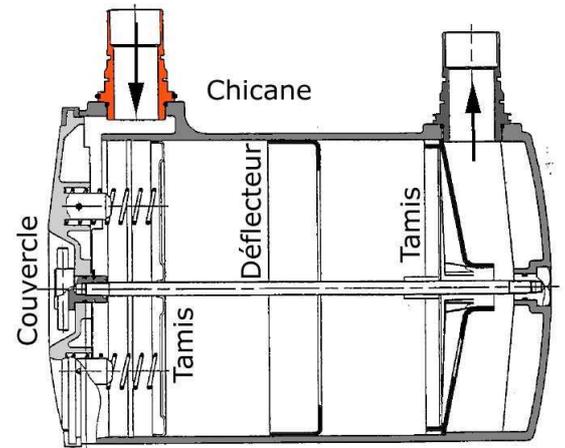


Cette soupape a un ergo permettant la mise en place sans erreur du sac dans la coque. La connexion sur la coque est de couleur rouge ce qui indique que c'est du gaz expiré qui circule dans cette partie du circuit. Ce sac est muni d'un petit bouchon de vidange pour faciliter le rinçage et la désinfection



### 2.1.8. Le scrubber ou canister

Le scrubber est loin d'être un simple bidon, il assure la fonction la plus importante dans la machine, celle d'éliminer le CO<sub>2</sub> de la boucle de recyclage. C'est dans ce récipient qu'ont lieu les réactions chimiques qui permettent l'élimination de ce gaz dangereux. Pour faciliter les réactions, les dimensions, la forme et la conception ne sont pas dues au hasard. Il faut d'une part que la vitesse de passage aux travers de la chaux ne soit pas trop rapide, pour laisser le temps à la chaux de faire son office. D'autre part que les pertes de charges ne peuvent pas être trop importantes, le tout est une question de compromis. Pour éviter un passage trop rapide et en ligne droite du gaz sans épuration il y a un déflecteur dans le récipient. Un remplissage adéquat joue un rôle primordial. Des chicanes sont aussi prévues pour éviter que des granules de chaux sodées migrent dans la boucle de recyclage et pour éviter que des gouttelettes d'eau se mélangent à la chaux. Le couvercle est aussi muni d'un système qui permet de maintenir par compression les granules en place. La pipe de connexion sur le sac d'expiration est jaune. La capacité du scrubber est de 2,25 kg de chaux sodée, ce qui assure une autonomie de l'ordre de 180 minutes.



#### 2.1.8.1. Grille anti channeling

Il s'agit d'un grillage qui répartit le flux de gaz sur toute la surface de la chaux sodée. La section de passage des perforations est déterminée pour minimiser les pertes de charges. Les ressorts servent à empêcher les mouvements de la chaux sodée en la comprimant légèrement.



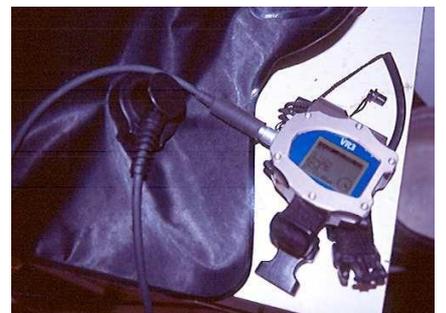
#### 2.1.9. La sonde oxygène

Cette sonde est identique aux sondes utilisées dans les oxymètres. La plupart des fabricants d'ordinateurs équipés d'une sonde proposent un kit de connexion pour le Dolphin. Il faut que la sonde soit adaptée à l'appareil de mesure.



#### 2.1.10. L'oxygauge

C'est un simple voltmètre à affichage digital qui utilise le signal délivré par la sonde pour afficher la pression partielle d'oxygène. Deux alarmes sonores non paramétrables sont prévues à 1,4 et 1,6 bars. Comme tout oxymètre il faut calibrer la mesure dans l'air avant de plonger. De nombreux fabricants proposent des ordinateurs avec une sonde O<sub>2</sub>, cette solution, quoique plus coûteuse qu'une simple gauge, est séduisante. L'ordinateur permet d'optimiser la gestion de la décompression en tenant compte réellement de la PPO<sub>2</sub> dans la boucle de recyclage.





## 2.2. La chaux sodée

### Les réactions chimiques

Réaction primaire avec l'humidité



Réaction sur la chaux



### Composition moyenne de l'absorbant

Hydroxyde de calcium	Ca (OH) <sub>2</sub>	70 à 80%
Hydroxyde de potassium	KOH	1 à 2%
Hydroxyde de sodium	NaOH	0 à 1%
Eau	H <sub>2</sub> O	16 à 20%

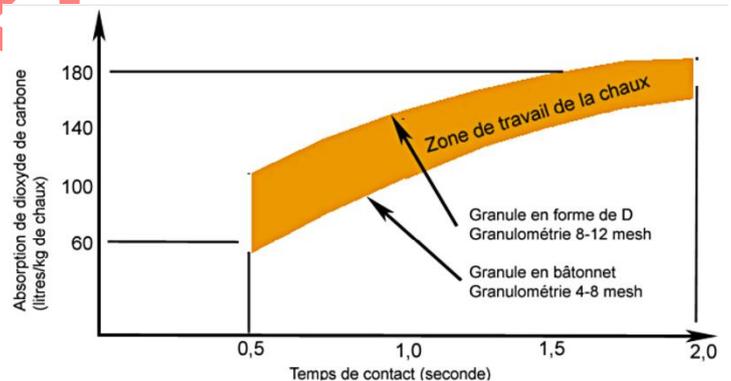
Sous le vocable de chaux sodée, se cache en fait un produit chimique assez complexe. Produits commercialisés sous divers noms : DiveSorb, SpheraSorb, Sofnoline... mais qui ont finalement

des caractéristiques d'absorption très similaires. Nous sommes tenus à une granulométrie relativement restreinte : construction du scrubber, vitesse de circulation des gaz, pertes de charges. D'une marque à l'autre on ne va pas doubler les caractéristiques, tout au plus gagner une dizaine de pourcents. La granulométrie préconisée pour nos applications est de 1,5 – 5mm<sup>12</sup> en forme hémisphérique<sup>21</sup>. Les conditionnements sont variables : sachet de 1 kg à 3 kg, bidon de 5 à 25 kg suivant le fabricant. Une qualité essentielle est le faible taux de poussière dans l'absorbant.

### 2.2.1. Capacité d'absorption de la chaux

La capacité d'absorption de CO<sub>2</sub> est de l'ordre de 100 à 130 litres par kilo ce qui correspond à 90 minutes de plongée par kilo d'absorbant. Des fabricants ajoutent un colorant qui vire au violet lorsque la chaux est saturée, mais cette méthode n'est pas vraiment fiable pour juger du degré de saturation de l'absorbant. Pour des chiffres précis il faut se rapporter aux indications des fabricants.

L'efficacité de la chaux dépend grandement du temps de passage du gaz sur les granules. Ce temps de passage est conditionné principalement par la granulométrie et la forme des granules. Le dessin ci-contre montre la quantité de dioxyde de carbone par litre de chaux en fonction de la durée de contact entre le gaz et les granule. On constate que la quantité absorbée varie en fonction de la forme et la granulométrie. Il est admis que le temps de passage minimum est de 0,5 seconde.



### 2.2.2. Forme, granulométrie et dureté de la chaux.

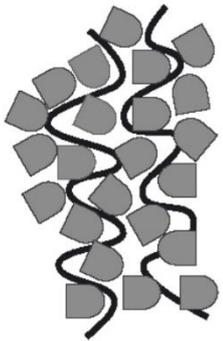
La forme et la granulométrie jouent un rôle capital dans l'efficacité de l'élimination de l'oxyde de carbone. Les granules se placent aléatoirement dans le scrubber, laissant un certain vide permettant au gaz de circuler. Certaines formes de granules vont avoir tendance à allonger le chemin parcouru par le gaz dans le scrubber. C'est le cas des granules ayant une forme de D ou semi-hémisphérique. Le temps de passage sera plus important et l'élimination de dioxyde de carbone meilleure. Les gaz doivent pouvoir

Mesh	microns
4	4760
5	4000
6	3360
7	2830
8	2380
10	2000
12	1680
14	1410

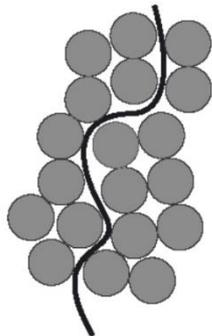
<sup>12</sup> Le DiveSorb à une granulométrie 2-4mm hémisphérique



circuler facilement sans engendrer des pertes de charges trop importantes. Des pertes de charges importantes engendreraient d'importants efforts inspiratoires. Les granules doivent être suffisamment grosses pour ne passer au travers des grillages du scrubber.



Granule en "D"

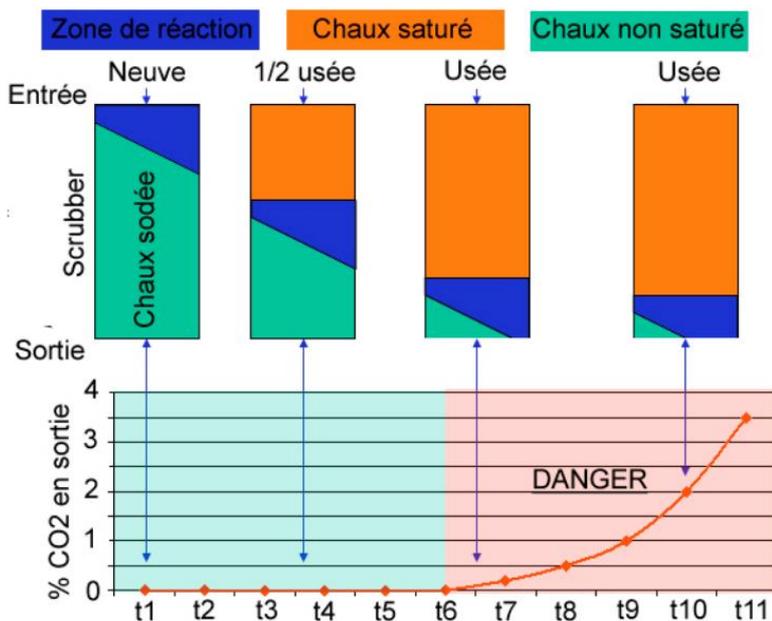


Granule sphérique

Le choix de la granulométrie est un compromis entre l'efficacité d'élimination du CO<sub>2</sub>, de la perte de charge admissible et des paramètres constructifs du scrubber. La détermination de la granulométrie est obtenue par passage au travers d'une série de tamis de mailles décroissantes. L'unité de granulométrie Mesh reflète le nombre de mailles du tamis par inch (1 inch = 25.4 mm). Au plus il y a de mailles, au plus élevé est le chiffre Mesh, au plus fin sera le tamis. Au plus fin est le tamis, au plus petite sera la taille des granules. Pour les recycleurs la granulométrie est généralement comprise entre 4 et 12 Mesh. La dureté revêt également une certaine importance pour éviter le tassement et la production de poussière. Plus la granule est dure et moins elle aura tendance à se tasser et produire de la poussière. Un tassement trop important risque de nuire à la bonne circulation des gaz dans le scrubber. La dureté s'estime en comparant la masse d'une certaine quantité de granules avant et après vibration. Le rapport entre ces masses donne un indice de dureté

tassement et la production de poussière. Plus la granule est dure et moins elle aura tendance à se tasser et produire de la poussière. Un tassement trop important risque de nuire à la bonne circulation des gaz dans le scrubber. La dureté s'estime en comparant la masse d'une certaine quantité de granules avant et après vibration. Le rapport entre ces masses donne un indice de dureté

### 2.2.3. Mode de fonctionnement de la chaux.



La chaux n'est pas attaquée uniformément par le dioxyde de carbone mais par couches successives. La zone de réaction se déplace de l'entrée du scrubber vers la sortie. La zone de chaux saturée s'agrandit jusqu'à occuper l'ensemble du scrubber. Lorsque la zone de réaction devient insuffisante le taux d'oxyde de carbone croît très rapidement. Le « repacking » qui consiste à vider le scrubber de la chaux pour la réutiliser ultérieurement est un procédé particulièrement hasardeux, même si on tente d'enlever la couche de chaux saturée. L'épaisseur de celle-ci étant difficile à estimer, la couleur n'étant pas un critère suffisamment fiable. La température au sein du scrubber n'est pas

uniforme, il y a des points chauds et froids. Les points chauds sont situés dans la zone de réaction, les froids dans les zones saturées et non saturées. Cette particularité rend difficile la conception d'un indicateur de saturation basé sur la température fiable et financièrement acceptable. Les réactions chimiques sont fortement influencées par les conditions physiques tel que la pression, la température, la viscosité des gaz. La viscosité des gaz augmentant en fonction de la profondeur le DERA a démontré que la capacité d'absorption de la chaux diminue drastiquement en fonction de la profondeur d'utilisation. Approximativement on considère qu'une charge de chaux valable 180 minutes dans la zone de 0- 20m ne sera plus valable que 140 minutes dans la zone de 20-50m et 100 minutes au-delà de 50m.



## 2.2.4 Le Channeling

Les gaz vont toujours avoir une tendance naturelle à suivre le chemin le plus facile c'est à dire celui des « moindres pertes de charge ». Si la chaux présente un couloir « Channel » le gaz va suivre ce couloir et n'aura pas le temps de se débarrasser de son dioxyde de carbone. Cela peut être gravissime pour la santé du plongeur et même mettre le pronostic vital en cause. Il faut être particulièrement attentif lors du remplissage du scrubber

## 2.2.5 Stockage

Le produit doit être stocké dans son emballage au sec à une température comprise entre 0 et 35°C. Bien stockée, la durée de vie du produit est de l'ordre de 5 ans. Il faut éviter le contact avec l'eau ou d'autres substances chimiques

## 2.2.6. Protection

L'absorbant est un produit alcalin, il doit être manipulé avec précaution. Il faut éviter le contact avec la peau (surtout si elle est humide) et les yeux. Ne pas respirer la poussière ou l'absorber dans les voies digestives.

## 2.3. Préparation de la machine.

C'est la partie la plus importante, votre santé voire votre vie peut dépendre de la manière et de la rigueur dont vous allez faire preuve dans la préparation de la machine. Si vous ne devez retenir qu'un seul chapitre : c'est celui-ci. Toutes les pièces s'emboîtent et se connectent sans problèmes. Si l'une d'entre elle résiste ce n'est pas de sa faute, vous vous êtes probablement trompé. Un petit truc pour ne pas se tromper dans les couleurs. Le CO<sub>2</sub> c'est dangereux, le danger c'est rouge donc toutes les parties du circuit qui contiennent du CO<sub>2</sub> (circuit d'expiration) sont marquées en rouge.

### 2.3.1. Chargement du Scrubber.

Le remplissage correct du Scrubber est d'une importance fondamentale pour la sécurité. Si vous remplissez le Scrubber à l'extérieur il vaut mieux le faire vent dans le dos pour éviter de recevoir dans les yeux de la poussière de chaux sodée. Il est important d'éviter la poussière de chaux sodée dans le Scrubber, celle-ci pouvant boucher les buses soniques et mettre en péril le fonctionnement de la machine. Au besoin tamiser la chaux.





#### 2.3.1.4. Procédure de remplissage

1. Ouvrir le Scrubber, vider le contenu dans une poubelle destinée aux déchets chimiques, enlever le déflecteur et le poser le verticalement sur le sol.
2. Remplir au 2/3 de chaux sodée en tapotant le Scrubber pour bien répartir la chaux sodée et éviter les vides.
3. Remettre le déflecteur en place
4. Remplir de chaux sodée jusqu'au marquage de la tige en tapotant le Scrubber pour répartir la chaux sodée.
5. Nettoyer et vérifier le joint du couvercle.
6. Fixer le couvercle, le couvercle n'étant pas symétrique il n'y a qu'une manière de le monter.
7. Secouer le Scrubber pipes vers le bas pour éliminer les granules de chaux sodée qui pourraient passer accidentellement dans le circuit.
8. Vérifier l'étanchéité du système en bouchant à l'aide de la main la pipe noire et en soufflant dans la pipe rouge.
9. Vérifier s'il n'y a pas une résistance anormale au passage de l'air, il suffit de ne plus boucher de la main la pipe noire, l'air doit passer normalement.
10. Vérifier si lors des tests les joints n'ont pas bougé, en procédant comme au point (7). Aucune granule ne doit tomber.

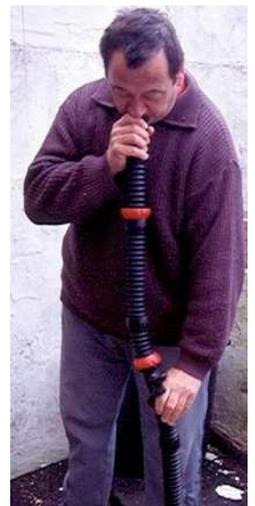


#### 2.3.2. L'embout, les tuyaux annelés et les clapets.

Il est important que ces pièces soient montées dans le bon sens des flèches sur les tuyaux annelés et l'embout indique le sens de circulation des gaz. Une indication supplémentaire : l'écrou du côté expiration de l'embout est rouge. Lorsqu'on monte les clapets sur l'embout un truc pour ne pas se tromper : il faut que pour le tuyau d'expiration la tute<sup>13</sup> de la membrane pointe vers l'embout et l'inverse pour l'inspiration

##### 2.3.2.1. Procédure de vérification

1. Vérifier le sens des flèches et le code de couleur.
2. Secouer les tuyaux pour éliminer les traces d'eau.
3. Vérifier si le verrou de l'embout fonctionne normalement.
4. Vérifier le bon sens des clapets : ouvrez le verrou puis inspirez du côté du tuyau d'expiration (bague rouge). L'air doit passer au travers de tout l'annelé.
5. Vérifier l'étanchéité du clapet d'expiration : Soufflez dans le tube d'expiration (bague rouge), l'air ne doit pas passer.
6. Vérifier l'étanchéité du clapet d'aspiration : Aspirez dans le tube d'aspiration (bague noire), l'annelé doit se racrapoter.



<sup>13</sup> Excroissance qui maintien la membrane sur son support



### 2.3.3. Le sac d'expiration et le sac d'inspiration

Il est essentiel que les sacs soient en bon état, le bon fonctionnement de la machine et votre vie peuvent en dépendre. Ce sont des éléments fragiles qu'il faut traiter comme les jeunes filles : tout en douceur.

#### 2.3.3.1. Procédure d'inspection des sacs.

1. Vérifier visuellement si les sacs ne présentent pas de trous, déchirures, pliures.
2. Vérifier si les bouchons de rinçages sont bien remis correctement.
3. Assurez-vous de la propreté des connecteurs et vérifiez le bon fonctionnement des verrouillages de ceux-ci.
4. Pour le sac expiratoire : vérifiez la présence des spirales en le tâtant délicatement.

### 2.3.4. La bouteille

C'est plus classique, cela ressemble au circuit ouvert honorablement connu avec néanmoins une particularité : les informations de vos mesures vont servir à configurer votre machine.

#### 2.3.4.1. Procédure de vérification et de mesure.

1. Inspecter visuellement l'état du robinet et des connecteurs DIN
2. Mesurer la pression dans la bouteille.
3. Mesurer le % d'oxygène dans le mélange.
4. Noter ces informations car elles vont vous servir à calculer la FiO<sub>2</sub>, l'autonomie et configurer la machine.

## 2.4. Mise en place dans la coque.



Maintenant que chaque élément constitutif de la machine a été vérifié, nous pouvons passer au montage final. Il n'y a qu'une manière de faire : la bonne. Si un élément résiste au montage ce n'est probablement pas lui le fautif, vous commettez certainement une erreur.

Au préalable graisser à l'aide d'une graisse compatible pour l'oxygène pur<sup>14</sup> tous les « O ring » et les filets. Il est inutile de serrer les écrous comme des brutes, sinon vous risquez de ne plus pouvoir les défaire sans les casser. Lorsque vous montez les accessoires sur les sacs (Scrubber, by-pass, sonde...) évitez de prendre appui sur les sacs, ceux-ci sont fragiles, il faut prendre appui sur les bagues des connecteurs. Si la connexion est bien faite, vous devez entendre le « clic ! » du connecteur qui se bloque. Pour déconnecter, il faut appuyer sur le bouton du connecteur et surtout ne pas tirer sur les sacs mais maintenir la bague du connecteur.



<sup>14</sup> Dräger conseille la « Molykote 111 »



### 2.4.1. Procédure de montage

1. Monter la bouteille sous la coque et fixer celle-ci à l'aide de la sangle.
2. Monter le détendeur sur la bouteille (au besoin ajuster la position de la bouteille). Veiller à ce que le corps du détendeur ne frotte ou ne vienne pas en butée sur un élément ce qui risque de nuire à l'étanchéité
3. Déposer la coque à plat sur le sol, la partie inférieure devant vous.
4. Monter le sac d'expiration à gauche, D'une part il y a un petit ergo rouge qui doit se placer dans l'orifice ad hoc de la coque (cet orifice est repéré par une pastille rouge). D'autre part, il faut faire passer le passe cloison dans l'orifice de la coque. Serrer le contre-écrou du passe cloison.
5. Monter le sac d'inspiration, à droite. Procéder de la même manière que pour le sac d'expiration (l'ergo est de couleur noire). Pour ne pas vous tromper lorsque vous montez le sac, l'orifice pour le by-pass doit être devant vous. Eventuellement connecter la sonde O<sub>2</sub> mais ne connectez pas encore le by-pass : il faut d'abord effectuer la mesure de débit (voir paragraphe test)
6. Connecter le Scrubber aux sacs (la pipe rouge à gauche et vers le haut) et faites-le glisser dans la coque.
7. Fixer le Scrubber à l'aide du velcro.
8. Monter les tuyaux annelés sur les passes cloisons en respectant le sens de circulation des gaz (code de couleur). Avant de serrer les écrous ajustez la position de l'embout buccal : lorsque les tuyaux annelés pendent devant la machine, l'embout doit être +/- vertical, le verrou vers l'intérieur. Les bagues avec les flèches sont des lests, qui permettent de modifier la flottabilité des tuyaux afin d'assurer une prise en bouche de l'embout. On peut les ajuster en les vissant/dévisant le long des tuyaux annelés.
9. En fonction de votre mesure d'O<sub>2</sub>, de la FiO<sub>2</sub> estimée et de votre planification de plongée connecter la buse sonique la mieux adaptée. N'oubliez surtout pas de mettre les bouchons sur les buses non utilisées.
10. Vérifier le débit de la buse sonique<sup>15</sup>
11. Connecter le by-pass sur le sac d'inspiration, vérifier la bonne tenue des flexibles et la non-présence de plis dans les sacs.
12. Effectuer le test d'étanchéité négatif<sup>14</sup>
13. Gonfler les sacs en ouvrant la bouteille, sans oublier de fermer le verrou de l'embout.
14. Ne surtout pas oublier de refermer la bouteille.
15. Effectuer le test d'étanchéité positif<sup>14</sup>
16. Refermer le rabat de la coque, sans oublier d'enlever le poids qui a servi au test. La fermeture du rabat se fait sacs gonflés pour être certain que le rabat ne va pas gêner le gonflage des sacs durant la plongée.

Certains plongeurs utilisent une méthode légèrement différente qui consiste à monter les sacs sur le scrubber puis glisser l'ensemble dans la coque.

<sup>15</sup> Voir le paragraphe test de la machine



## 2.5. Test et mesure, configuration de la machine

On ne le répètera jamais assez, ces tests sont vitaux. L'immense majorité des « Recycleux » qui ont eu des accidents graves ou qui ont perdu la vie ont eu leur accident pour avoir négligé d'effectuer les tests sur la machine ou par négligence au montage.

### 2.5.1. Vérification du débit de la buse sonique.

Cette mesure vous permet d'une part de vous assurer du bon fonctionnement de la buse sonique. De vous assurer que celle-ci n'est pas bouchée. D'autre part cette mesure vous permet d'affiner le calcul de la  $FiO_2$ . La tuyère d'une buse sonique est trop délicate que pour faire une confiance aveugle sur le marquage du débit sans faire une mesure. Certains auteurs indiquent une manière empirique pour vérifier le débit en mesurant le temps de remplissage du sac d'inspiration. Je suis totalement adverse de cette méthode car trop peu précise. Si on n'a pas les outils pour mettre sa machine en état et la vérifier, une seule solution évidente de bon sens s'impose... On ne plonge pas au recycleur.



#### 2.5.1.1. Procédure de mesure.

1. Connecter le débitmètre au by-pass, à l'orifice de connexion sur le sac inspiratoire. Le débitmètre doit être horizontal.
2. Ouvrir délicatement la bouteille en redressant le débitmètre à la verticale.
3. Effectuer la mesure et noter celle-ci.
4. Fermer la bouteille.
5. Retour au point 10 du montage dans la coque.

### 2.5.2. Généralité sur les tests d'étanchéités.

Ces tests sont à effectuer au montage de la machine. Si on transporte la machine montée avant de plonger, il convient de refaire les tests avant de s'équiper. Il y a deux tests à effectuer le test d'étanchéité positif ou de surpression et le test d'étanchéité négatif ou de dépression. Ces tests ne sont absolument pas à négliger sous peine de noyer la boucle, de devoir nettoyer le scrubber à la « brosse à dent » ou pire d'ingérer de la « soupe caustique »

### 2.5.3. Test d'étanchéité négatif.

Ce test a pour but de vérifier la bonne tenue des joints, membranes et clapets.

#### 2.5.3.1. Procédure de test négatif.

1. Ouvrir le rabat
2. Aspirer tout l'air contenu dans les sacs tout en pinçant les tuyaux annelés, il faut entendre le bruit que fait la membrane du by-pass lorsqu'elle écrase la fourchette.





3. Vérifier au travers des trous du by-pass que la membrane est bien enfoncée.
4. Vérifier durant une minute ou deux que les tuyaux annelés restent bien racrapotés.

#### 2.5.4. Test d'étanchéité positif

Il peut se faire de deux manières. Soit au gonflage des sacs à la bouche, soit gonfler les sacs avec la bouteille. Ce test a pour but de vérifier l'étanchéité complète de la machine.

##### 2.5.4.1. Procédure de test positif

1. Fermeture de la soupape de surpression, rabat ouvert.
2. Gonflage des sacs. Si on gonfle les sacs à la bouche, il ne faut pas oublier de fermer le verrou. Si on gonfle à la bouteille, il faut vérifier la fermeture du verrou et ne surtout pas oublier de fermer la bouteille dès que les sacs sont gonflés.
3. Poser un poids d'environ 1 kg sur le sac d'inspiration durant 5 minutes et vérifier qu'il ne se dégonfle pas.
4. Retirer le poids et refermer le rabat et tant que les sacs sont. La fermeture du rabat se fait sacs gonflés pour être certain que le rabat ne gêne pas le gonflage des sacs durant la plongée.



## 2.6. Lestage de la machine

Le gilet du Dolphin a une poche au niveau des épaules. Placer +/-2 kg de plomb dans chacune des poches, sans cela il vous sera impossible de maintenir une position horizontale. La flottabilité des sacs vous ferait basculer en position verticale.



# Partie 3

---

## Physiologie, prévention des accidents

- |                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Hypercapnie                      | <a href="#">Page 24</a> |
| 2. Hypoxie                          | <a href="#">Page 25</a> |
| 3. Hyperoxie                        | <a href="#">Page 26</a> |
| 4. Ingestion de « soupe caustique » | <a href="#">Page 27</a> |
| 5. Brûlures caustiques              | <a href="#">Page 27</a> |

Non libre de droit



## 3.1. Hypercapnie

C'est un accident typique de la plongée en recycleur elle est due à un excès de CO<sub>2</sub>. Au-delà d'une pression partielle CO<sub>2</sub> de 0,02 bar le risque devient important. L'OSHA<sup>16</sup> préconise de ne jamais dépasser la pression partielle de 0,005 bar (5000 ppm à la pression atmosphérique) Au-delà, des symptômes pouvant aller jusqu'à la perte de conscience vont apparaître. L'hypercapnie favorise la narcose et les risques d'ADD. Au repos un adulte produit de l'ordre de 0,3 grammes de CO<sub>2</sub> par minute, cette quantité peut être multipliée cinq lors d'un effort violent. Le protocole DERA-QinetiQ d'Alverstoke<sup>17</sup> qui permet de déterminer la durée d'utilisation de la chaux dans un scrubber donné, se base sur un taux respiratoire moyen de 40 l/min produisant 1,6 l de CO<sub>2</sub> par minute. Il est possible d'estimer sa production de CO<sub>2</sub> en multipliant sa consommation métabolique d'oxygène par 0,9

### 3.1.1. Causes

- Buse sonique bouchée (mesure de débit négligée).
- Effort exagéré qui se transforme en essoufflement.
- Mauvais remplissage du scrubber (négligence dans le remplissage).
- Chaux sodée saturée (oubli de noter la durée d'utilisation du produit).
- Oubli de mettre de la chaux dans le Scrubber.
- Bouteille non ouverte.
- Chaux sodée non adaptée au Scrubber.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.

### 3.1.2. Prévention

- Être attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.

### 3.1.3. Symptômes

- Effets sur les capacités cérébrales : troubles des capacités de concentration, somnolence, narcose hypercapnique, Fatigue.
- Sueurs froides, sensation d'angoisse.
- Essoufflement, maux de tête.
- Nausées, vomissement.
- Perte de conscience.

### 3.1.4. Conduite à tenir.

- Fermer le verrou de l'embout.
- Passer sur bailout.
- Entamer immédiatement la remontée (Abort the dive)
- Prolonger les paliers peu profonds

Symptômes de l'hypercapnie	
PpCO <sub>2</sub>	Effets
0,02 bar	Pas d'altération notable des fonctions physiologiques au repos et à l'effort
0,03 bar	Acidose, hyperventilation
0,04 bar	Forte hyperventilation, maux de têtes, fatigue, vomissements
0,045 bar	Augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle
0,07 bar	Tolérance limitée à une dizaine de minutes

<sup>16</sup> Occupational Safety and Health Administration -USA

<sup>17</sup> U.K Defence Evaluation and Research Agency –QinetiQ : Britain's largest independent science and technology company



## 3.2. Hypoxie

On parle d'hypoxie lorsque la quantité d'oxygène délivrée aux tissus est insuffisante par rapport aux besoins cellulaires. On considère que l'on est dans une zone hypoxique lorsque la PPO<sub>2</sub> est inférieure à 0,16 bars et on parle d'anoxie lorsque cette pression chute en dessous de 0,1 bars.

### 3.2.1. Causes

- Buse sonique bouchée (mesure de débit négligée)
- Effort exagéré, consommation métabolique plus importante que prévue.
- Mauvaise estimation de la consommation métabolique.
- Erreur de calcul de la FiO<sub>2</sub>.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.
- Bouteille non ouverte.

### 3.2.2. Prévention

- Être attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.
- Avoir une mesure de PPO<sub>2</sub>
- Vérifier régulièrement la PPO<sub>2</sub>

### 3.2.3. Symptômes

- Baisse des performances intellectuelles : troubles de mémoire.
- Augmentation de la fréquence respiratoire et cardiaque.
- Trouble de la respiration.
- Etourdissement, vertiges.
- Maux de tête.
- Perte de connaissance.

### 3.2.4. Conduite à tenir.

- Fermer le verrou de l'embout.
- Passer sur bailout.
- Entamer immédiatement la remontée (Abort the dive).
- Prolonger les paliers peu profonds.

Seuil toxique de l'oxygène	
PpO <sub>2</sub> (mélanges)	
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



## 3.3. Hyperoxie

C'est le contraire de l'hypoxie, il s'agit d'un excès d'oxygène. Il est communément admis que la PPO<sub>2</sub> maximum en plongée est de 1,6 bars. Le DAN préconise une PPO<sub>2</sub> sur le fond de 1,4 bars.

### 3.3.1. Causes

- Profondeur plus importante que la profondeur planifiée.
- Erreur de mesure de la concentration d'oxygène dans la bouteille.

### 3.3.2. Prévention

- Etre attentif et rigoureux dans les mesures.
- Se tenir au planning initial de plongée.
- Avoir une mesure de PPO<sub>2</sub>
- Vérifier régulièrement la PPO<sub>2</sub>
- Calculer le MOD d'une manière conservative (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.

### 3.3.3. Symptômes

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 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.

### 3.3.4. Conduite à tenir.

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



## 3.4. Ingestion de « soupe caustique »

---

Il s'agit de l'ingestion d'un mélange d'eau et de chaux sodée. Avec les conceptions modernes des scrubber (chicanes...) cet accident n'est pratiquement plus possible.

### 3.4.1. Causes

- Noyage du circuit.
- Mauvaise conception du scrubber ou scrubber bricolé.
- Négligence dans le remplissage du scrubber.
- Chaux sodée qui voyage dans la boucle de recyclage.

### 3.4.2. Prévention

- Etre attentif et rigoureux lors du montage de la machine et ne pas oublier les tests.

### 3.4.3. Symptômes

- Brûlure des voies digestives supérieures. La soupe caustique est neutralisée par l'acide gastrique.

### 3.4.4. Conduite à tenir.

- Interrompre la plongée.
- Faire boire de l'eau vinaigrée pour neutraliser la soupe caustique (base).
- Evacuation vers l'hôpital le plus proche.
- O<sub>2</sub> si difficultés respiratoires.
- Surtout ne PAS faire vomir.

## 3.5. Brûlure caustique en préparant le Scrubber

---

Il s'agit de brûlure occasionnée par le contact avec la peau humide ou les yeux de la chaux sodée.

### 3.5.1. Prévention

Ne pas remplir le Scrubber en milieu naturel face au vent.  
Eviter d'avoir les mains humides.

### 3.5.2. Conduite à tenir

Rincer abondamment les parties touchées à l'eau.  
Consulter un médecin ou un ophtalmologue.



# Partie 4

---

Calcul fraction oxygène, Best Mix, autonomie, bailout.

Gestion de la décompression, planification, procédures

1. Best Mix	<a href="#">Page 29</a>
2. Fraction oxygène dans la boucle	<a href="#">Page 29</a>
3. Durée d'utilisation de la chaux	<a href="#">Page 33</a>
4. Estimation du métabolisme	<a href="#">Page 34</a>
5. Calcul des buses soniques	<a href="#">Page 34</a>
6. Profondeur maximale d'utilisation	<a href="#">Page 37</a>
7. Calcul de l'autonomie	<a href="#">Page 38</a>
8. Détermination du bailout	<a href="#">Page 39</a>
9. Paramétrage et configuration	<a href="#">Page 41</a>
10. Gestion de la décompression	<a href="#">Page 41</a>
11. Planification de la plongée	<a href="#">Page 43</a>
12. Procédures de plongée et d'urgence	<a href="#">Page 47</a>



## 4.1. 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>18</sup> tout en respectant la pression partielle maximum d'oxygène toléré.

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

Avec

Pr : Profondeur planifié (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 ?

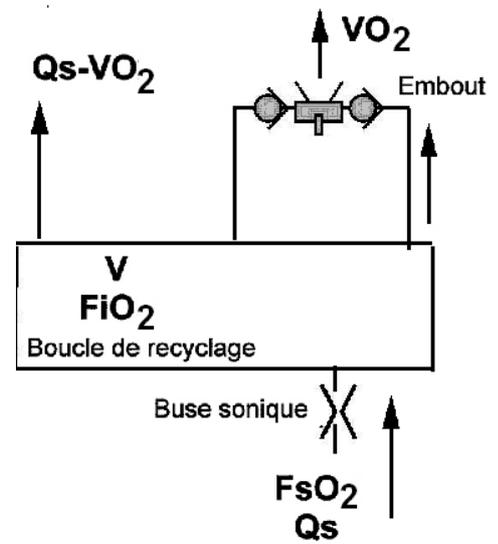
$$Nx = \frac{1,4}{(30/10) + 1} 100 = 35\%$$

## 4.2. 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



<sup>18</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)



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.

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

Avec

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

$Q_s$  : Débit de la buse sonique (l / min)

$FsO_2$  : Fraction d'O<sub>2</sub> 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

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

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

$$\text{terme variable} = \left( FiO_{2s} - \frac{Q_s FsO_2 - VO_2}{(Q_s - VO_2)} \right) e^{-(1/\tau)t}$$

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

#### 4.2.1. Quelques valeurs clés

##### 4.2.1.1. 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, Photographie...	0,5 à 0,75
Moyenne	Balade, palmage moyen	1 à 1,5
Forte	Palmage intense, Courant, travail	1,75 à 2,5

##### 4.2.1.2. Les Buses soniques Dräger

Marquage	$Q_s$ min (l/min)	$Q_s$ 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

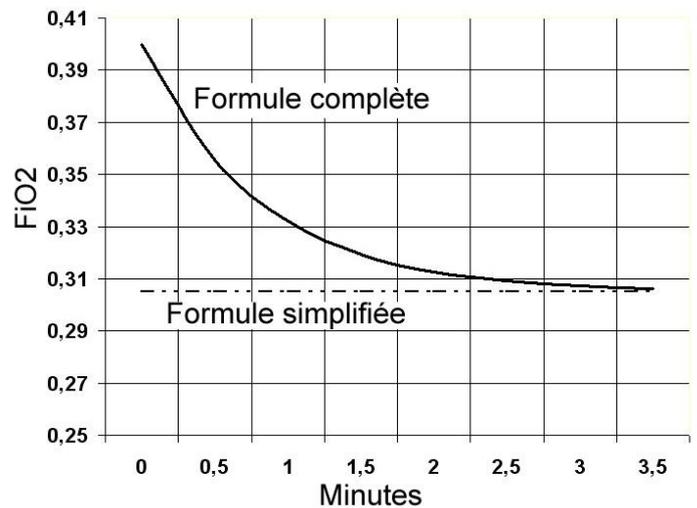
[Calcul de la fraction d'oxygène](http://www.jctdive.be) (Lien vers jctdive.be)



#### 4.2.2. 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 !



On peut donc adopter la formule simplifiée pour les calculs pratiques soit :

$$F_{iO_2} = \frac{Q_s F_{sO_2} - V_{O_2}}{(Q_s - V_{O_2})} \quad Q_s = \frac{V_{O_2}(1 - F_{iO_2})}{(F_{sO_2} - F_{iO_2})}$$

Avec

$F_{iO_2}$  : Fraction d'oxygène dans la boucle. (%)

$Q_s$  : Débit de la buse sonique (l / min)

$F_{sO_2}$  : Fraction d' $O_2$  de la bouteille source (%)

$V_{O_2}$  : Consommation métabolique (l / min)

Exemple

Un plongeur effectue une balade avec un recycleur Dräger Dolphin. Lors des tests il a mesuré un % d' $O_2$  dans sa bouteille de 38% et un débit de 10 litres/minute de la buse sonique. Déterminer la fraction d'oxygène dans la boucle ?

$$F_{iO_2} = \frac{10 \times 0,38 - 1,5}{(10 - 1,5)} = 0,27 \text{ soit } 27\%$$

Exemple

Déterminer le débit minimum de la buse sonique pour une consommation métabolique de 2 litres par minute et de manière à avoir au moins une fraction d'oxygène dans la boucle de 0,21 en utilisant un Nx40.

$$Q_s = \frac{2(1 - 0,21)}{(0,4 - 0,21)} = 8,3 \text{ l/min}$$



### 4.2.3. Détermination du débit minimum de la buse sonique.

En appliquant la formule simplifiée et en considérant que la fraction d'oxygène dans la boucle ne peut pas être inférieure à 0,21 et que la consommation métabolique est de maximum 2,5 litres par minutes on peut établir la relation pratique suivante.

$$Q_s = \frac{200}{(N_x - 21)}$$

Avec :

N<sub>x</sub> : Pourcentage d'O<sub>2</sub> de la source

	VO <sub>2</sub> = 2,5 l/min		FiO <sub>2</sub> = 21%			
Source N <sub>x</sub>	32	36	40	50	60	80
Q <sub>s</sub> (l/min)	18	13	10,5	7	5,5	3,5

### 4.3. 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<sub>2</sub> : Fraction d'oxygène dans la boucle (%)

FsO<sub>2</sub> : Concentration en oxygène de la source (bouteille de Nitrox) (%)

P : Pression ambiante absolue (bar).

V<sub>i</sub> : Volume du sac d'inspiration (litres) (l).

V<sub>e</sub> : Volume du sac d'expiration (litres) (l).

V<sub>lo</sub> : 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.

ξ : Rapport constructif de la machine variant entre 10 et 15



### 4.3.1. 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 DC-55

FiN<sub>2</sub> : Fraction d'azote dans la boucle (%)

FsN<sub>2</sub> : 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 Cm=0,04 ?

$$FiN_2 = 50 \frac{(4 + (12,7 \times 0,04))}{(4 - 0,04)} = 57\% \quad FiO_2 = 100 - 57 = 43\%$$

### 4.4. Calcul de la durée maximum d'utilisation de la chaux

Pour faire simple comme rien ne se perd et rien ne se crée, on peut considérer que pour chaque litre d'oxygène que notre organisme brûle nous rejetons un litre de CO<sub>2</sub>. La difficulté réside dans le fait que notre consommation métabolique est fortement variable. De surcroît le rendement des réactions chimiques dépend non seulement du design du scrubber mais aussi des conditions de réaction : vitesse des gaz, pression, degré de saturation de la chaux, température. Elle dépend de la chaux elle-même, granulométrie, forme des granules... Il n'est donc pas possible de donner une formule précise. En moyenne Dräger a estimé qu'il était possible de plonger durant 90 minutes avec un kilo de chaux sodée. Nous pouvons donc établir une formule simple et même simpliste :

$$T_{UC} = \frac{(Cs \times 90)}{(1 + \Psi)}$$

Avec :

T<sub>UC</sub> temps d'utilisation de la chaux

Cs Capacité du Scrubber en kilo

$\Psi$  Coefficient de sécurité (0,15 à 0,25)

Pour le Dolphin si on adopte :  $\Psi = 0,15$  comme la capacité du Scrubber est de 2,25 kg on trouve un T<sub>UC</sub> de 176 minutes ce qui est très proche des données techniques du Dolphin (180 minutes). La marine américaine<sup>19</sup> estime que pour un plongeur exécutant un travail léger à lourd, la consommation d'oxygène et donc la production de CO<sub>2</sub> est de l'ordre de 1,7 à 2,5 l/min. Raisonnablement pour notre balade nous devons en moyenne produire 1 à 1,5 litres par minute de CO<sub>2</sub>. Une autre manière de calculer est de connaître sa consommation moyenne en circuit ouvert. Comme nous consommons en moyenne 6 % du gaz que nous respirons notre production de CO<sub>2</sub> pour une consommation de 20 litres/minute en circuit ouvert sera de 1,2 litres de CO<sub>2</sub>.

<sup>19</sup> US Navy Diving Manual Revision 4, 20. Januar 1999



## 4.5. Estimation de sa consommation métabolique

Il est possible avec quelques mesures simples en plongée d'estimer sa consommation métabolique à l'aide de l'oxygauge et de son profondimètre. Il suffit de noter la profondeur et la mesure de PPO<sub>2</sub> indiquée, de réduire cette valeur à la pression atmosphérique pour retrouver la FIO<sub>2</sub>. Par la suite il est simple de calculer sa consommation métabolique (VO<sub>2</sub>)

$$VO_2 = \frac{Qs (FiO_2 - FsO_2)}{(FiO_2 - 1)}$$

Avec :

Qs : Débit de la buse sonique en litres/minute

FsO<sub>2</sub> : Concentration en oxygène de la source (bouteille de Nitrox)

VO<sub>2</sub> : Consommation métabolique en litres/minute

FIO<sub>2</sub> : Fraction d'oxygène dans la boucle.

[Calculateur consommation métabolique](#) – lien vers jctdive.be

Exemple : Nx 40 - buse sonique : 10 litre/minute

Mesures			Calculs	
Profondeur	PPO <sub>2</sub>	Pression	FiO <sub>2</sub>	VO <sub>2</sub>
10m	0,7 Bar	2 Bar	0,7/2 = 0,35 Bar	$\frac{10 (0,35-0,4)}{(0,35-1)} = 0,77$ l/min
20m	0,9 Bar	3 Bar	0,9/3 = 0,3 Bar	$\frac{10 (0,3-0,4)}{(0,3-1)} = 1,43$ l/min
30m	1,0 Bar	4 Bar	1,0/4 = 0,25 Bar	$\frac{10 (0,25-0,4)}{(0,25-1)} = 2,00$ l/min

## 4.6. 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 ».

### 4.6.1 Pression critique de la buse sonique

La particularité d'une buse sonique 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>20</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.

[Calculateur de Pression critique](#) – lien vers jctdive.be

Exemple :

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

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

#### 4.6.2. Débit massique maximum de la buse sonique.

Le débit massique d'une buse sonique est maximum, à la pression critique. On peut écrire la formule théorique suivante.

$$Qm_{max} = S_{bs} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{V_1}}$$

Avec

$Qm_{max}$  : Débit massique maximum de la buse (Kg/m<sup>3</sup>)

k : Constante adiabatique du gaz

$P_1$  : Pression à l'entrée du détendeur = +/- la pression de détendeur, au pertes de charge près.

$V_1$  : Volume massique du gaz à l'entrée de la buse sonique (m<sup>3</sup>/kg)

En pratique, cette formule est très difficile à utiliser. Un débit massique est nettement plus difficile à mesurer qu'un débit volumique : un simple débit litre à bille donnant une indication plus que suffisante. La buse sonique utilisée dans les recycleurs est de faible diamètre et uniquement convergente. Elles travaillent dans des gammes de température restreinte et les coefficients adiabatiques des divers gaz utilisés sont fort semblable Dans ces conditions Jan Jahns<sup>21</sup> propose les formules empiriques suivantes pour le Nitrox, l'oxygène et le Trimix comportant entre 10 et 50% d'hélium

<sup>20</sup> Daniel Bernoulli (9/02/1700 – 17/03/1782) médecin, physicien et mathématicien suisse.

<sup>21</sup> Jan Jahns, Physicien - Mass flow through an orifice.



$$Qv = \varepsilon P_1 d^2$$

Coefficient $\varepsilon$		
Oxygène	Nitrox	Trimix (10 à 50% d'He)
8,65	$9,233 - 0,00588[O_2]\%$	$9,71 + 0,011[He]\%^2$

Avec

$Qv$  = Débit volumique de la buse sonique (l/min)

$\varepsilon$  = Coefficient dépendant de la nature du gaz

$P_1$  = Pression en amont de la buse sonique = +/- la pression de détenteur, au pertes de charge près (bar).

$d$  = Diamètre de la buse sonique en mm

$[O_2]\%$  = Pourcentage Oxygène

$[He]\%$  = Pourcentage d'Hélium

Exemple

Quel est le débit volumique de Nx 30 au travers d'un orifice de 0,2 mm de diamètre en sachant que la pression moyenne du détenteur est de 15 bar ?

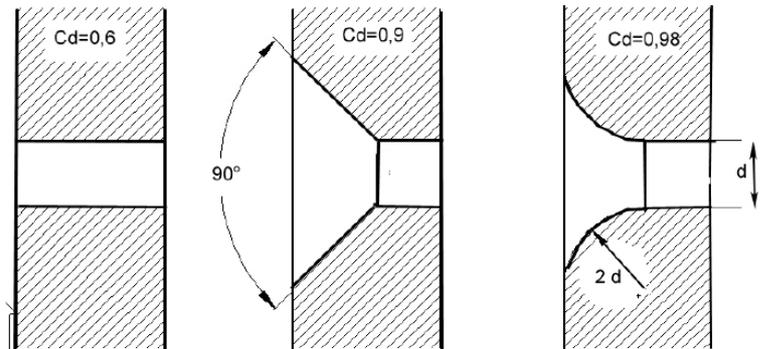
$$\varepsilon = 9,233 - (0,00588 \times 30) = 9,056$$

$$Qv = 9,056 \times 15 \times 0,2^2 = 5,4 \text{ l/min}$$

#### 4.6.2.1. Facteur influençant le débit de la buse sonique

De nombreux facteurs de construction peuvent influencer le débit théorique calculé. Le facteur principal étant la forme de la buse et principalement à l'entrée du fluide. D'autres facteurs plus insidieux ont également une importance non négligeable.

- L'état de surface et rugosité de la buse qui augmente les pertes de charge et turbulences.
- Les tolérances de fabrications, les côtes nominales ne sont jamais respectées même si les moyens modernes de production réduisent les écarts entre la réalité et les mesures théoriques.
- Les écarts de concentricité entre la buse et la veine fluide. Les précisions obtenues de nos jours sont de l'ordre de 2 microns pour les meilleures buses.



Pour tenir compte de ces défauts les constructeurs définissent un coefficient de débit ( $Cd$ ). C'est le rapport entre le débit réel mesuré ( $Qr$ ) et le débit calculé ( $Qv$ ). D'après l'ASME<sup>22</sup> code sa valeur minimale ne doit pas être inférieure à 0,6. Dans la pratique celui varie entre 0,6 et 0,98 en fonction des qualités mécaniques de la buse. C'est principalement la forme d'entrée de la buse qui va influencer favorablement ou non ce coefficient.

<sup>22</sup> American Society of Mechanical Engineers



$$Cd = \frac{Q_r}{Q_v} \quad Q_r = Cd \times Q_v$$

Avec

$Q_v$  = Débit volumique calculé en l/min

$Q_r$  = Débit volumique réel en l/min

$Cd$  = Coefficient de débit

#### 4.6.3. Coefficient de rapport de pression critique

Pour faciliter le calcul, les constructeurs ont introduit la notion de coefficient de rapport de pression critique ( $\chi$ ).

$$\chi = \frac{P_{critique}}{P_{détendeur}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cong 0,53 \text{ pour air et } nx$$

#### 4.7. Profondeur maximale d'utilisation « mécanique ».

Maintenant que nous avons déterminé les conditions de fonctionnement de la buse sonique, il est facile de déterminer en fonction de la pression délivrée par le détendeur la profondeur maximale de d'utilisation théorique ou mécanique de la machine. En effet le débit massique de la buse sonique doit rester constant, ce qui implique que la pression ambiante ne peut pas être supérieure à la pression critique. Si la pression ambiante absolue est supérieure à la pression critique, le débit ne reste plus constant. La pression délivrée par le détendeur étant la pression amont.

$$Prof_{max} = 10\{(\chi P_{det}) - 1\}$$

Avec :

$Prof_{max}$  : Profondeur maximum théorique de fonctionnement (m).

$P_{det}$  : Pression du détendeur (bar).

Exemple

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

$$Prof_{max} = 10\{(0,53 \times 9) - 1\} = 37,7m$$

#### 4.8. Profondeur maximale d'utilisation « physiologique »

Par mesure de conservatisme la profondeur maximum d'utilisation est déterminée par la concentration en oxygène de la source. C'est à dire de la bouteille de Nitrox. Cette manière de procéder nous laisse une certaine marge de manœuvre. Il ne faut pas déterminer cette profondeur en fonction de la concentration en oxygène dans la boucle de recyclage pour les raisons suivantes :

- La concentration en oxygène n'est pas connue avec exactitude dans la boucle.
- La concentration en oxygène est variable dans la boucle.
- La concentration en oxygène dans la boucle peut varier rapidement : ouverture du by-pass, modification des conditions de plongée...
- La concentration en oxygène dans la bouteille est toujours supérieure à celle de la boucle, ce



qui nous donne une marge de sécurité dans le calcul de la profondeur maximum.

- Cette manière de calculer permet l'utilisation de la source comme bailout.

DAN préconise de ne pas dépasser une PPO<sub>2</sub> de 1,4 bar sur le fond. La limite maximum tolérée étant de 1,6 bar. Les temps au fond en recycleur pouvant être largement plus importants qu'avec le circuit ouvert. Il est indispensable de vérifier pour chaque plongée si on ne dépasse pas les 75% de % CNS préconisé par le NOAA. La vérification du %CNS peut se faire très rapidement et avec conservatisme en considérant la concentration d'oxygène au niveau de la source et pas celle de la boucle de recyclage. De nombreux « recycleurs » limitent la PPO<sub>2</sub> à 1,3 voire à 1 bar pour les CCR car le temps au fond peut être très important.

## 4.9. Calcul de l'autonomie

L'autonomie de plongée en recycleur n'est pas liée à la profondeur. Ce concept, pourtant simple à comprendre, est très difficilement perçu par les « non recycleurs ». Ceux-ci ayant l'habitude de calculer l'autonomie avec la loi de Boyle Mariotte ont tendance à l'appliquer là où elle n'est pas d'application. D'une part comme la plus grande partie des gaz présent dans la machine est recyclée au sein de celle-ci. La loi des gaz parfait ne va s'appliquer, lors de la descente, qu'à un volume réduit de gaz (sac inspiratoire)<sup>23</sup>. D'autre part, la buse sonique délivre un poids de gaz constant dans l'unité de temps<sup>24</sup> quel que soit la profondeur, la loi des gaz parfaits ne s'applique donc pas. Dans certains cas, l'autonomie sera donnée, non pas par la quantité de gaz emporté, mais par la quantité de chaux sodée<sup>25</sup>. Comparons l'autonomie d'un circuit ouvert avec un SCR. Les deux appareils ayant une bouteille de 10 litres à 200 bars. Le plongeur consomme 15 litres de gaz par minute en circuit ouvert et on utilise la buse EAN 32 pour le recycleur. Cette buse délivrant 19,4 grammes de gaz par minutes ou 15 litres de gaz normobare par minute.

Profondeur mètres	Pression bar	Circuit ouvert		SCR		
		Consommation Litres /minute	Autonomie minutes	Gaz ds sac d' inspiration litres	Consommation grammes/ min	Autonomie minutes
0	1	15	133	5	19,4	133
10	2	30	67	10	19,4	133
20	3	45	44	15	19,4	132
30	4	60	33	20	19,4	131
40	5	75	27	25	19,4	131

On constate que vis à vis de la capacité de la bouteille la quantité de gaz utilisée dans les sacs est négligeable. On peut déduire la formule :

$$Auto = \frac{(Vb (Pb - Pr))}{Qs}$$

Avec :

Auto : Autonomie de la réserve de gaz (minutes)

Vb : Volume hydraulique de la bouteille (litres)

Pb : Pression de gonflage de la bouteille (bar)

Pr : Pression de sécurité. Généralement on adopte 25 bar minimum

Qs : Débit mesuré de la buse sonique (litres / minute)

<sup>23</sup> Voir fonctionnement et rôle du by-pass

<sup>24</sup> Constance du débit massique.

<sup>25</sup> C'est systématiquement le cas pour les CCR



Exemple :

On utilise un Dolphin dans sa configuration classique : bouteille de 5 litres gonflée à 200 bars, avec un débit de buse mesurée de 11 litres/ minute. Quelle est l'autonomie de la machine ?

$$Auto = \frac{(5 (200 - 25))}{11} = 79 \text{ minutes}$$

## 4.10. Détermination du système de bailout

Sous ce vocable barbare se cache une chose toute simple. Le bailout est un système de sécurité qui doit permettre à un plongeur de remonter et faire ses paliers seul et sans aucune aide extérieure. Dans l'immense majorité des configurations, le bailout est constitué d'un circuit ouvert. La conception du bailout peut être très complexe et dépend du style de plongée. Nous n'aborderons dans ce paragraphe que la conception du bailout pour l'utilisation d'un SCR limité à une profondeur de 40m et pour des plongées ayant un accès libre à la surface. La conception du bailout pour les plongées sous voûtes étant trop spécifique. Le bailout doit être prévu pour palier à un accident maximum majeur sur la boucle de recyclage (noyage de la boucle) juste au moment de la remontée. Les mélanges dans le bailout doivent être respirables quelle que soit la profondeur. Le passage sur bailout implique la fin de la plongée et la remontée. Il faut essayer d'avoir un bailout avec une flottabilité aussi neutre que possible pour ne pas devoir ajuster son lestage à chaque modification.

### 4.10.1. Bailout minimaliste

Dräger fourni avec le Dolphin une bouteille de 2 litres à 200 bars. Cette bouteille peut servir de bailout pour des plongées très peu profondes et sans paliers. La capacité de la bouteille étant encore réduite par le fait que celle-ci sert aussi à gonfler le gilet et le costume. En considérant que 50 bars sont utilisés pour la gestion du gilet et du costume et qu'il faut une réserve de 20 bars en surface pour palier assurer la flottabilité il reste 130 bars ou 260 litres d'air pour faire la remontée et un palier de sécurité. C'est vraiment peu !

Profondeur	Pression (bar)			Consommation (litres)		
	Absolue	Moyenne	Remontée	Remontée	Paliers	Totale
10m	2	1,5	1 minute	30	90	110
20m	3	2	2 minutes	80	90	170
30m	4	2,5	3 minutes	150	90	240
40m	5	3	4 minutes	240	90	330

On constate sur le tableau ci dessus qu'avec ce système il n'est pas possible de faire un palier de sécurité si la profondeur dépasse 20 à 30m.

### 4.10.2. Bailout léger et économique

Une solution légère et économique consiste à monter, a la place de la bouteille classique Dräger de 5 litres, une bouteille de capacité plus grande (8 à 10 litres). Mettre un robinet double sortie et monter sur la deuxième sortie un détendeur en circuit ouvert. Il faut considérer que la moitié de la bouteille peut servir de bailout. Cette solution a néanmoins un petit défaut même si la boucle de recyclage et le bailout sont totalement séparées, le bailout n'est pas totalement indépendant.



### 4.10.3. Bailout indépendant.

C'est la solution la plus sûre. Le bailout est totalement indépendant du recycleur. Il faut que le détendeur soit facilement accessible et sa position bien connue pour pouvoir y accéder sans hésitations, même avec une visibilité nulle. Le flexible du détendeur est maintenu par deux élastiques. Il est lové sur la bouteille de manière à pouvoir être délové facilement. La bouteille est fixée sur le gilet par des mousquetons sous le bras gauche, le détendeur se trouvant au niveau de la poitrine. Une autre manière pour fixer un bailout de petite taille consiste à le fixer transversalement sur le ventre. Le détendeur étant fixé de la même manière que précédemment.

### 4.10.4. Détermination de la capacité minimale du bailout.

$$\text{Capacité bailout} = (A + B + C)v$$

$$A = \psi \left( \frac{\text{Prof}}{10} + 1 \right) t_1 \quad B = \psi \left( \frac{\text{Prof}}{20} + 1 \right) \frac{\text{Prof}}{V} \quad C = \sum_1^i \psi \left( \frac{Pp_i}{10} + 1 \right) t_i$$

A ≡ Quantité de gaz utilisé AVANT d'entamer la remontée (litres).

B ≡ Quantité de gaz utilisé durant la remontée jusqu'en surface (litres).

C ≡ Quantité de gaz utilisé pour exécuter les paliers (litres).

Avec :

Prof : Profondeur de la plongée (m)

ψ: Consommation standard en litres/minute. Par défaut 20 l/min

t<sub>1</sub> : Temps entre le passage sur bailout et la remontée. Compter au minimum deux minutes pour analyser le problème et envoyer le parachute puis ajouter le temps pour sortir d'une épave ou une grotte... (min)

V : Vitesse de remontée en mètre/ minute (10 m /min)

Pp<sub>i</sub> : Profondeur des paliers (m)

t<sub>i</sub> : Durée des paliers (min)

v: Coefficient de sécurité : minimum 1,25 conseillé 1,5

[Calculateur de bailout](#) – lien vers jctdive.be

Exemple

Epave à la profondeur de 40m, on doit passer sur bailout dans l'épave après avoir passé 3 minutes dans celle-ci. Palier de 7 minutes à 6m et 24 minutes à 3 mètres quel est le bailout à prévoir ?

Bouteille = Total / 200 Bouteille = 1985 / 200 = 10 litres		Profondeur (Prof) (m)	Temps x Pression x ψ = volume			
			Temps (t) (min)	P (bar)	ψ	Volume (l)
P = (Prof/10) + 1	A	40	3+2 = 5	5,0	20	500
t = Prof/10	B	40 à 0	4	3,0	20	240
P = (Prof/20) + 1						
P = (Prof/10) + 1	Palier 6m	6	7	1,6	20	224
	Palier 3m	3	24	1,3	20	624
Total sans sécu						1588
Sécurité						1,25
Total						1985



## 4.11. Paramétrage et configuration de la machine

---

Le paramétrage et la configuration des SCR et du Dolphin en particulier sont très simples. Après avoir déterminé le profil de la plongée : temps, profondeur, mélange, buse sonique, on détermine facilement la configuration de la machine et de son bailout. Il suffit de raccorder la bonne buse sonique, faire les tests et préparer le bailout, sans oublier les accessoires de fixation sur la machine (mousquetons, ring, sangles...).

## 4.12. 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.

### 4.12.1. 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.

### 4.12.2. 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 »**



#### 4.12.2.1. 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

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

% 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

**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%

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%

#### 4.12.3. 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.



## 4.13. Planification de la plongée

Dans ce paragraphe nous n'allons pas passer en revue tous les détails de la planification, qui sont connus depuis les premiers niveaux et la formation Nitrox. Nous aborderons uniquement les points relatifs à la planification spécifique à l'utilisation des SCR. Connaissant la profondeur et la durée de la plongée nous pouvons établir la procédure suivante.

### 4.13.1. Procédure de planification

1. Calculer le Best-Mix, gaz de la source.
2. Déterminer le débit de la buse sonique à utiliser.
3. Déterminer la procédure de décompression (table, soft, ordinateur...) sans oublier un plan de secours en cas de perte totale de l'électronique et un passage sur bailout juste au moment de la remontée.
4. Vérifier l'autonomie de la machine.
5. Vérifier si pour le plan le plus pessimiste la valeur du CNS n'est pas trop importante.
6. Calculer le bailout.
7. Vérifier la validité de la fraction d'oxygène dans les extrêmes ( $VO_2 = 0,5$  et  $2,5$  l/min)

#### Exemple

On fait une plongée en Zélande à une profondeur de 33 m durant 35 minutes avec un Dräger Dolphin. La remontée verticale n'étant pas possible à cause d'un chenal de navigation. On estime à 3 minutes le temps qu'il faut en cas de passage sur bailout pour se sortir de la zone dangereuse et remonter. Déterminer la fiche de planification complète. Le marquage du scrubber indique que la chaux a été utilisée durant 70 minutes.

#### Données

Profondeur : 33 m    Durée : 35 minutes  
Temps sur bailout avant d'entamer la remontée : 3 minutes  
Chaux : utilisée durant 70 minutes

#### Choix des tables

Nous optons pour la table US Navy 2008, Utilisée avec la méthode sécuritaire de gestion de la décompression. La table donne

Calcul des paliers : la table donne Palier 27 minutes de palier 6 m

La durée d'utilisation de la machine sera d'environ 66 minutes

#### Calcul du Best Mix

En première approximation en considère une PPO<sub>2</sub> maximum de 1,4 bar

$$Nx = \frac{1,4}{\left(\frac{33}{10}\right)+1} 100 = 32,5 \text{ soit } Nx32$$

#### Détermination de la buse sonique

$$Q_s = \frac{200}{(32 - 21)} = 18,2 \text{ l/min}$$

La valeur est un peu trop forte la buse EAN 32 on va considérer qu'il vaut mieux passer à un Nx35 pour l'alimentation du recycleur et du Nx32 pour le bailout.  $Q_s = 200 / (35 - 21) = 14,28$  l/min ce qui est idéal pour une buse EAN32. Le site de plongée pouvant être soumis à du courant, la consommation



métabolique peut s'accroître fortement. Il faut prévenir l'hypoxie et opter pour un Nx contenant un peu plus d'oxygène. On a obtenu par mesure, le débit de la buse sonique : 15l/min

Résultat obtenu par l'utilitaire de calcul de FiO<sub>2</sub>

**Pourcentage d' O2 dans la boucle d'un recycleur à buse sonique en mode actif**

**Type Dräger Ray, Dolphin, Azimut**

**Introduction des données**

%O <sub>2</sub> source (fsO <sub>2</sub> )	<input type="text" value="35"/>	%
Débit buse (Qs)	<input type="text" value="15,0"/>	litres/minute
Débit O <sub>2</sub> métabolisé (VO <sub>2</sub> )	<input type="text" value="2,0"/>	litres/minute
ppO <sub>2</sub> maximale	<input type="text" value="1,5"/>	bars

Débit oxygène métabolisé (VO <sub>2</sub> )									
	<input type="text" value="0,5"/>	<input type="text" value="0,75"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1,25"/>	<input type="text" value="1,5"/>	<input type="text" value="1,75"/>	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2,25"/>	<input type="text" value="2,5"/>
FiO <sub>2</sub>	32,8	31,6	30,4	29,1	27,8	26,4	25,0	23,5	22,0

Volume cylindre source	<input type="text" value="7"/>	litres
Pression cylindre source	<input type="text" value="200"/>	bars
Réserve de sécurité	<input type="text" value="40"/>	bars

Métabolisme	
VO <sub>2</sub> = 0,5 à 1,5	Activité faible statique, photo, vidéo
VO <sub>2</sub> = 1 à 1,5	Activité moyenne, balade,,,
VO <sub>2</sub> = 1,75 à 2	Activité forte, travail, courant

**Résultats**

% O <sub>2</sub> boucle (FiO <sub>2</sub> )	<input type="text" value="25,0"/>	%
Profondeur maximale Nx Souce	<input type="text" value="32,9"/>	m
Profondeur maximale Nx Boucle	<input type="text" value="50,0"/>	m
Autonomie	<input type="text" value="74,66€"/>	minutes

Buse sonique Dräger Dolphin		
Marquage	Qs minimum	Qs maximum
EAN60	5,1	6,4
EAN50	6,6	8
EAN40	9,4	11,3
EAN32	14,2	16,9

Calcul de l'autonomie

a) Gaz

La mesure de la buse sonique EAN32 a donné la valeur de 15l/min. La quantité de gaz estimée sera de 66x15=990 litres. La bouteille standard de 5 litres est trop juste. Optons pour la 7l à 200 bar soit une capacité de 1400 litres ce qui nous donne une réserve de 410 litres ou 58 bar. Ce qui est largement suffisant.

b) Chaux sodée

Utilisation de la chaux : 66 minutes

Déjà utilisée 70 minutes

Durée totale d'utilisation : 70 + 66 =136 minutes

Ce qui est inférieur à 180 minutes donnée par le constructeur.



### Estimation du CNS

On considère la remontée comme un « temps fond » et une PPO<sub>2</sub> de 1,4 bar

	Temps	%CNS	CNS	
CNS rémanent			0%	(1) 0,65 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,4
CNS plongée	35+3=38	0,65	25%	(1) 0,83 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,5
CNS paliers	27	0,3 <sup>(2)</sup>	8%	(1) 2,20 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,6
			Total 33%	(2) Valeur extrême CNS= %CNS x Temps

### Détermination du bailout

Bouteille = Total / 200		Profondeur (Prof) (m)	Temps x Pression x ψ = volume			
Bouteille = 1672 / 200 = 9 litres			Temps (t) (min)	P (bar)	ψ	Volume (l)
P = (Prof/10) + 1	A	33	3	4,3	20	258
t = Prof/10	B	33 à 0	4 (arrondi à la minute)	2,7	20	216
P = (Prof/20) + 1						
P = (Prof/10) + 1	Palier 6m	6	27	1,6	20	864
Total sans sécu						1338
Sécurité						1,25
Total						1672

### Vérification de la FiO<sub>2</sub> aux extrêmes

a) Plongée quasi statique (VO<sub>2</sub>=0,5 l/min)

$$FiO_2 = \frac{(15 \times 0,35) - 0,5}{(15 - 0,5)} = 0,33 \text{ bar} \quad PPO_{2 \text{ fond}} = 4,3 \times 0,33 = 1,42 \text{ bar}$$

b) Plongée avec effort important. A la limite de l'essoufflement

$$FiO_2 = \frac{(15 \times 0,35) - 2,5}{(15 - 2,5)} = 0,22 \text{ bar}$$

On constate que tous les paramètres sont au vert. Pas de risque d'hypoxie ni d'hyperoxie



Feuille de calcul « à la main »

Date: 4/5/23 Durée totale d'utilisation chaux : 70...min Profondeur : 33.m Temps de plongée 35.min

**Calculs préliminaires** Utilitaire calcul Best Mix

Best Mix	$FsO_2 = PPO_2 / [(P/10) + 1]$	32%
Buse sonique	$Qs = 200 / (Nx - 21)$	18,9 !

Best Mix → Nx 35

**Mesures**

% O <sub>2</sub> de la source (FsO <sub>2</sub> )	35	%
Pression source (P)	200	Bar
Débit buse sonique (Qs)	15	l/min

**Fraction d'oxygène dans la boucle** Utilitaire de calcul

Normal VO <sub>2</sub> = 1 à 1,5	$\frac{Qs FsO_2 - VO_2}{(Qs - VO_2)}$	30-28
Essoufflement VO <sub>2</sub> =2,5		28

PPO<sub>2</sub> : Pression partielle O<sub>2</sub> max (Bar)  
 Nx : Nitrox (32, 40, 50...)  
 Qs : Débit de la buse sonique (l/min)  
 FsO<sub>2</sub> : Fraction d'O<sub>2</sub> de la bouteille  
 VO<sub>2</sub> : Consommation métabolique (l/min)  
 FIO<sub>2</sub> : Fraction d'oxygène dans la boucle  
 P : Pression (Bar)  
 Prof : Profondeur (m)  
 Mc : Poids de chaux (Kg)  
 Vb : Volume hydraulique de la source (lt)  
 Pb : Pression de gonflage (Bars)  
 Pr : Réserve (25 bar minimum)  
 Aut : Autonomie (minutes)

**Estimation rapide du CNS** Utilitaire de calcul CNS

	Temps	%CNS	CNS	
CNS rémanent				(1) 0,65 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,4
CNS plongée	38	(1) 0,65	25	(1) 0,83 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,5
CNS paliers	27	0,3 <sup>(2)</sup>	8	(1) 2,20 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,6
Total			33%	(2) Valeur extrême CNS = %CNS x Temps

**Calcul du bailout et de la durée totale de la plongée.**

Bouteille = Total / 200		Profondeur (m)	Temps x Pression x cons = volume			
Bouteille = 9 litres			Temps (t) (minutes)	Pression (P) (bar)	cons. l/min	Volume (litres)
P=(Profondeur/10)+1	A	33	3	4,3	20	258
t= Profondeur /10	B	1,7	4	2,7	20	216
P=(Profondeur/20)+1						
P=(Profondeur/10)+1	Palier 3m	3	-	1,3	20	-
	Palier 6m	6	27	1,6	20	864
	Palier 9m	9	-	1,9	20	-
Durée totale de la plongée			66	Total sans sécu (T)		1338
Utilitaire de calcul du bailout				Sécurité (S)	1,25	1
				Total = (T) x (S)		1678

**Calcul d'autonomie**

Capacité source (Vb)	Pression de gonflage (Pb)	Qs	Sécurité (Pr)	Autonomie (Aut)
7	200	15	40	Aut = (Vb x (Pb - Pr)) / Qs = 74
Chaux	Poids chaux (Mc) <sup>3</sup>	A ; B ; C		Le reliquat = A-B-C doit être

A = 180 min      180 - 70 - 66 = 44'



## 4.14. Procédure de plongée

### 4.14.1. Mise à l'eau

Contrairement aux circuits ouverts les SCR consomment dès l'ouverture de la bouteille. Il ne faut donc n'ouvrir la bouteille que juste avant de se mettre à l'eau. Tant que l'on ne respire pas sur la machine, le verrou de l'embout doit être fermé. Dans le cas contraire, surtout si la bouteille est fermée, c'est le noyage de la boucle de recyclage assuré. Pour que les réactions chimiques s'amorcent dans le Scrubber, il faut un minimum d'humidité, celle-ci est donnée par la respiration. Le maximum de rendement des réactions ne s'obtient qu'après trois ou quatre cycles de respiration qui seront faites en surface. Il faut au moins une minute entre l'ouverture du bloc et l'immersion pour établir la pression dans la boucle.

Plonger en recycleur, c'est laisser les habitudes acquises en circuit ouvert au bord de l'eau...

#### 4.14.1.1. Procédure de mise à l'eau en surface.

1. Vérifier si le verrou de l'embout est fermé.
2. Ouvrir la bouteille.
3. Expirer à fond, pour éviter d'injecter inutilement du CO<sub>2</sub> dans le circuit.
4. Mettre l'embout buccal en bouche.
5. Ouvrir le verrou de l'embout buccal.
6. Faire 3 – 4 cycles respiratoires pour amorcer les réactions avant de s'immerger.

### 4.14.2. Descente

Les recycleurs ne sont pas des machines destinées à respirer en surface, il n'est pas rare qu'au début de la plongée vous ayez l'impression d'un manque d'air. Cette impression va s'estomper dans les deux trois premiers mètres de la descente. Ce n'est pas parce qu'on plonge en recycleur que tous les principes de la plongée doivent être oubliés. Pour éviter le placage, il faudra bien sur équilibrer la cuve du masque en soufflant par le nez, mais il faut essayer de limiter la consommation de gaz en effet une vidange complète du masque fait perdre entre deux et quatre minutes d'autonomie.

#### 4.14.2.1. Procédure de descente

1. Descendre à 5 mètres et se stabiliser.
2. Effectuer le « bubble check » avec le buddy. Vérifier si des bulles suspectes sortent de la machine, soyez attentifs aux bruits suspects et à une modification anormale de la flottabilité.
3. Après validation du test, continuer la descente.

### 4.14.3. Déplacement horizontal

Ce qui frappe le plus le plongeur qui passe du circuit ouvert au recycleur, c'est l'absence totale de poumon-ballast. Ce qui est tout à fait logique puisque les sacs et les poumons sont vidés et remplis alternativement sans modification du volume global machine - poumons. Sans lestage au niveau des épaules il vous sera difficile de maintenir une position horizontale. Si vous éprouvez des difficultés à maintenir cette position il faut augmenter le lestage. Autre point important sur nos sites de plongée où la visibilité est loin d'être « méditerranéenne » c'est l'absence de bulles, il faut être



nettement plus attentif pour éviter de perdre son buddy. En circuit ouvert on vous a appris à surveiller vos paramètres de plongée. En recycleur si vous avez un paramètre supplémentaire à surveiller, c'est la pression partielle d'oxygène. L'utilisation d'une jauge, même si elle n'est pas obligatoire, est fortement conseillé.

#### 4.14.4. Remontée

La remontée que ce soit en recycleur ou en circuit ouvert est toujours la partie la plus délicate de la plongée. Dans le cas des SCR, la gestion de la remontée est un peu plus délicate qu'en circuit ouvert. Lors de la remontée, la pression ambiante diminuant, les sacs vont augmenter de volume et la pression augmenter jusqu'à l'ouverture de la soupape de sécurité. L'augmentation de volume des sacs risque d'augmenter la vitesse de remontée. Pour contrer ce phénomène, aggravé par le débit constant de la buse sonique, il suffit d'expirer par le nez ce qui aura pour effet de vider en partie les sacs. Un autre avantage de quelques expirations à la remontée est de « rincer » les sacs avec un mélange frais riche en oxygène, alors que la pression diminue. Ce qui va contribuer à maintenir une PPO<sub>2</sub> dans des normes acceptables ce qui n'est pas plus mal pour la décompression.

#### 4.14.5. Conduite à tenir en cas d'urgence.

Le point le plus important. L'analyse détaillée d'un problème ou d'une panne ne se fait jamais en plongée mais en surface. Que ce soit un problème mécanique sur le recycleur, un problème physiologique : maux de tête, vertiges, nausées... une lecture de PPO<sub>2</sub> hors des valeurs acceptables. Bref quel que soit le problème il n'y a qu'une attitude intelligente à avoir. Passage sur bailout et fin de plongée (Abort the dive). Pour passer sur bailout il est indispensable de savoir trouver instantanément le détendeur de secours, même à tâtons sans aucune visibilité. La bouteille de bailout doit être toujours ouverte durant la plongée.

##### 4.14.5.1. Procédure de passage sur bailout.

1. Fermer le verrou de l'embout buccal.
2. Laisser filer les tubes annelés vers le haut.
3. Saisir le détendeur de secours du bailout.



# Partie 5

---

## What if, tableau des pannes, redondances

1. What if
2. Redondances

[Page 50](#)

[Page 54](#)

Non libre de droit



## 5.1. Le « What if »

Littéralement : Que faire au cas où ! Cette philosophie des plongeurs « Tec » est très facile à comprendre, moins facile à mettre en œuvre. Il s'agit de faire une liste, non exhaustive, de tous les problèmes matériels ou non 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 buddy pour résoudre un problème de la liste n'est pas considérée comme une option valable et doit être rejetée.

Le « Recycleux » doit s'inspirer largement de cette manière de voir pour pouvoir résoudre ses problèmes sans aide car la plupart de ses buddy's ne seront pas des « Recycleux ». Il est tout à fait illusoire de vouloir expliquer, en quelques minutes, à des personnes qui ne connaissent pas les recycleurs les conduites à tenir vis à vis d'un « Recycleux ». Virtuellement même en palanquée le « Recycleux » doit être considéré comme seul. Il faut s'entraîner à la mise en œuvre des solutions imaginées. Dans les paragraphes suivants nous allons passer en revue les problèmes les plus courants liés aux recycleurs.

### 5.1.1. Problèmes au montage et aux tests

Avant de plonger : il faut que la machine soit parfaitement en état. Un problème non résolu quel que soit le problème, interdit l'utilisation de la machine.

Annelé	Test côté inspiration négatif.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier le sens du clapet.</li> <li>• Membrane sale ou endommagée.</li> <li>• Joints sales ou endommagés.</li> </ul>
	Test côté expiration négatif.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier le sens du clapet.</li> <li>• Membrane sale ou endommagée.</li> <li>• Joints sales ou endommagés.</li> </ul>
Scrubber	Test d'étanchéité négatif.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couvercle pas fermé, écrou desserré.</li> <li>• Trop de chaux sodée.</li> <li>• Joint non mis en place.</li> <li>• Joint sale ou détérioré.</li> </ul>
	Test passage d'air	Pas de résistance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déflecteur oublié.</li> <li>• Scrubber mal chargé ou pas vibré</li> <li>• Mauvaise granulométrie, grains trop gros.</li> </ul>
		Trop de résistance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise granulométrie, grains trop petits.</li> <li>• Tamis bouchés.</li> <li>• Chaux sodée trempée, formant des grumeaux.</li> </ul>



### 5.1.2. Montage de la machine

Fuite au niveau du détendeur		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecrou mal serré, le corps du détendeur frotte sur un élément de la machine.</li> <li>• Joint « O » Ring.</li> </ul>			
Buse sonique	Débit trop faible	Sur une buse	Buse obstruée	Remplacement	
		Sur toutes les buses	Moyenne pression	Fuite détendeur	
				Fuite tuyauterie	
				Fuite au couvercle de by-pass	
					Membrane du by-pass percée
				Joint « O » ring	
Débit trop fort	By-pass débite	Fourchette trop haute	Régler la fourchette		
	MP trop élevée	Détendeur déréglé	Régler le détendeur		
Test positif non concluant	Fuite dans le circuit	Embout buccal mal fermé		Fermer le verrou	
		Bouchons blancs pas en place		Mettre le(s) bouchon (s)	
		Orifice d'un sac ouvert	Mettre le bouchon ou l'accessoire manquant (oxyjauge...)		
		Soupape de sécurité ouverte	Fermer la soupape		
		Fuite dans une connexion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elément(s) mal monté (s) pas de « clic » au montage.</li> <li>• « O » ring endommagé, sale ou non graissé.</li> </ul>		
		Fuite du joint du Scrubber	Refaire le montage et les tests		
		Fuite au by-pass ou niveau des buses soniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oublier de remettre le capot sur une buse non utilisée.</li> <li>• Oublié de connecter la buse</li> <li>• Joints « O » Ring</li> </ul>		
		Fuite au capot du by-pass	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capot mal vissé.</li> <li>• La rondelle en plastique est montée à l'envers ou on a oublié de la monter ; la bague est mal placée ; la membrane est montée à l'envers.</li> <li>• La membrane est percée.</li> </ul>		
	Fuite à la soupape de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membrane pliée, endommagée ou sale</li> <li>• Ressort détaré</li> </ul>			
Test négatif non concluant	Les deux côtés du tuyau annelé ne tiennent pas		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verrou de l'embout ouvert.</li> <li>• Tuyau annelé mal connecté à la machine.</li> <li>• Joints du verrou défectueux, sales ou non graissés.</li> </ul>		



	Le côté inspiration du tuyau annelé ne tient pas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tuyau annelé mal connecté à la machine.</li><li>• Fuite au niveau des joints de l'embout côté inspiration</li></ul>
	Le côté expiration du tuyau annelé ne tient pas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tuyau annelé mal connecté à la machine.</li><li>• Fuite au niveau des joints de l'embout côté expiration</li></ul>
	La membrane du by pass ne tient pas.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Verrou de l'embout mal fermé.</li><li>• Capot mal vissé</li><li>• Oublié de remettre le capot sur une buse non utilisée ou buse desserrée.</li><li>• Joints des buses soniques sales, défectueux, ou non graissés</li><li>• Membrane percée</li><li>• Connecteur MP dévissés</li><li>• Membrane de la soupape de sécurité non étanche.</li></ul>

Non libre de droit



### 5.1.3. Problèmes en immersion

Lestage	Votre lestage est correct et vous n'arrivez pas à descendre	Pas de chaux sodée dans la machine	Bailout immédiat
	Vous n'arrivez pas à rester horizontal	Lestage d'épaule insuffisant	
Flottabilité	La machine prend du poids rapidement	Boucle de recyclage noyée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bailout immédiat</li> <li>• Gonfler le gilet</li> </ul>
	La machine vous remonte, même en dégonflant le gilet.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soupape bloquée ou débit trop faible.</li> <li>• Débit permanent du by-pass</li> </ul>	Expirer par le nez pour vider les sacs
Bruits	Bruit de « glouglou » permanent	La machine se remplit d'eau	Bailout immédiat
	Claquement au niveau de l'embout durant les respirations	Eau dans le tube annelé. Probablement à cause d'une membrane de clapet non étanche ou déformée.	Tenter de faire sortir l'eau en secouant la tête de gauche à droite
Physiologique	Maux de tête, vertige, nausées, goût bizarre dans la bouche...	Problème chimique, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> ...	Bailout immédiat
Mesure PPO <sub>2</sub>	PPO <sub>2</sub> > 1,6	Trop profond. Erreur de calcul ou de mesure	Bailout immédiat
	PPO <sub>2</sub> < 0,21	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreur de calcul, ou de mesure</li> <li>• Buse sonique bouchée</li> </ul>	Bailout immédiat



#### L'indispensable à ne jamais oublier !

- La graisse compatible oxygène.
- Le débitmètre
- Le raccord de gonflage de la bouteille



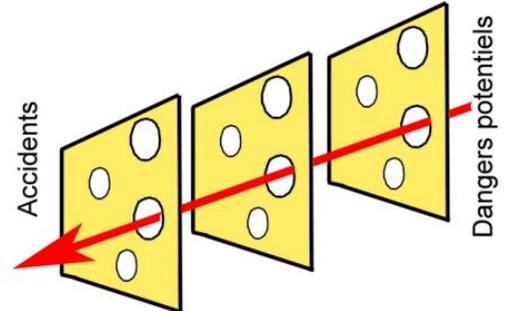
## 5.2. Les redondances

### 5.2.1. 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.



#### 5.2.1.1.. Note sur la plongée « solo » et recycleurs

Dans le cas de la « plongée classique », on peut considérer que le binôme représente une « tranche d'emmental », avec des trous plus ou moins important 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. Il en va de même pour la plongée en recycleur. Le binôme du « recycleux » n'a pas toujours les compétences requises pour gérer un problème de recycleur. Contrairement à la plongée en circuit ouvert, il est impossible de faire un « passage d'embout ». Pour assurer une sécurité équivalente, il faut d'une part remplacer la « tranche d'emmental » que représente éventuellement le binôme 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.

### 5.2.2. 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).

La redondance 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. En plongée recycleur, la redondance est constituée par le bailout, qui doit pouvoir assurer la remonter de plongeur en sécurité. Certains plongeurs spéléos plongent avec un double recycleur, qui sert de redondance.

### 5.2.3. 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. L'utilisation de la bouteille source comme bailout, en se contentant d'ajouter un détendeur en circuit ouvert est l'exemple typique d'un « défaut de mode commun ». Une perte de gaz ou un problème de robinetterie vont faire prendre, très rapidement, l'ensemble des systèmes qui maintiennent en vie le plongeur.

Non libre de droit



# Partie 6

---

## Démontage, désinfection, entretien, rangement, modifications

- |    |                      |                         |
|----|----------------------|-------------------------|
| 1. | Démontage et rinçage | <a href="#">Page 57</a> |
| 2. | Désinfection         | <a href="#">Page 57</a> |
| 3. | Entretien            | <a href="#">Page 58</a> |
| 4. | Stockage             | <a href="#">Page 58</a> |
| 5. | Modifications        | <a href="#">Page 58</a> |

Non libre de droit



## 6.1. Démontage et rinçage

---

Si vous n'utilisez pas la machine durant un laps de temps important, vous devez la démonter et la rincer. Pour déconnecter les éléments il faut actionner les boutons de libération des ergots de maintien des bagues de connexions sans prendre appui sur les sacs.

### 6.1.1. Procédure

- Démontez les tuyaux annelés et les secouer pour enlever l'eau. Il est conseillé de laisser les écrous sur les tuyaux pour éviter de les perdre.
- Déconnecter le scrubber des sacs et retirer celui-ci de la machine.
- Déconnecter et enlever l'oxyjauge
- Dévisser les contres écrous des passes cloisons et retirer les sacs. Il est conseillé de remonter les contre écrous sur leur sac respectif pour éviter de les perdre.
- Rincer à l'eau douce tous les éléments qui ont été en contact avec l'eau et l'intérieur des sacs.
- Faites sécher les éléments à l'abri du soleil, ne pas oublier de retirer les petits bouchons blancs de vidange des sacs et de les placer à l'endroit prévu sur le sac. Pour l'anneler le plus facile est de le pendre verticalement.
- Le cas échéant si la machine n'est plus utilisée durant un long laps de temps retirer la chaux sodée du scrubber.

## 6.2. Désinfection

---

### **Souvenez-vous de la maladie des légionnaires !**

Un point très important, surtout si la machine sert à plusieurs personnes. La machine recycle non seulement les gaz mais aussi les bactéries qui tournent en circuit fermé dans un milieu chaud et humide favorable à leur multiplication. Il est donc très important de désinfecter régulièrement la boucle de recyclage en respectant scrupuleusement les concentrations de produit préconisé. La plupart des produits sur le marché sont concentrés et doivent être dilués. A chaque changement d'utilisateur il faut désinfecter la boucle. Le produit désinfectant doit être compatible avec le Nitrox et l'oxygène pur. En Union-Européenne le produit doit répondre aux normes EN1276 et EN1650



## 6.3. Entretien

Nous n'aborderons dans ce paragraphe que les entretiens courant pouvant être facilement faits par l'utilisateur. Pour plus de détail il faut consulter le manuel technique du constructeur.

Après chaque plongée.	Rincer et inspecter visuellement la machine.
Après un W.E. plongée	Rincer, désinfecter et inspecter visuellement la machine
Mensuel	Graisser les O rings avec de la graisse MOLYKOTE 111
Annuel	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inspecter les tuyaux</li><li>• Vérifier les buses soniques</li><li>• Vérifier la Moyenne pression</li></ul>
Tous les 2 ans	<ul style="list-style-type: none"><li>• Remplacer les O rings</li><li>• Remplacer les membranes</li></ul>
Tous les 6 ans	Inspection complète par un technicien de la firme.

## 6.4. Stockage

La machine doit être rangée et démontée à l'abri de la lumière. Il faut veiller à ne pas solliciter la coque et de ne pas laisser des plis dans les sacs.

## 6.5. Modification sur la machine.

La machine est conforme aux normes européennes. Si vous la modifiez au terme des directives de l'UE vous devenez « constructeur » et vous portez l'entière responsabilité du bon fonctionnement de l'ensemble de la machine et pas seulement de la modification que vous apportez.

La modification importante la plus couramment effectuée sur le Dräger Dolphin est la transformation en CCR par la méthode KISS de Gordon Smith. Il s'agit de récupérer la mécanique du Dräger : sacs, scrubber... de modifier le circuit d'alimentation en gaz par l'adjonction d'une bouteille de diluent, d'oxygène, des vannes ad hoc et bien sûr d'un système de contrôle de PPO<sub>2</sub> redondant. C'est totalement un autre concept qui redemande une nouvelle formation.

Il existe d'autres modifications moins spectaculaires.

Ajout d'un circuit supplémentaire d'injection d'un gaz de décompression dans la boucle de recyclage. Cela peut se faire en injectant le gaz :

- Directement dans le scrubber (connexion noire)
- Dans le by-pass en ajoutant un connecteur
- A l'entrée de l'anneau dans un prolongateur



[Catalogue Techme.de](http://Catalogue.Techme.de)



# Partie 7

---

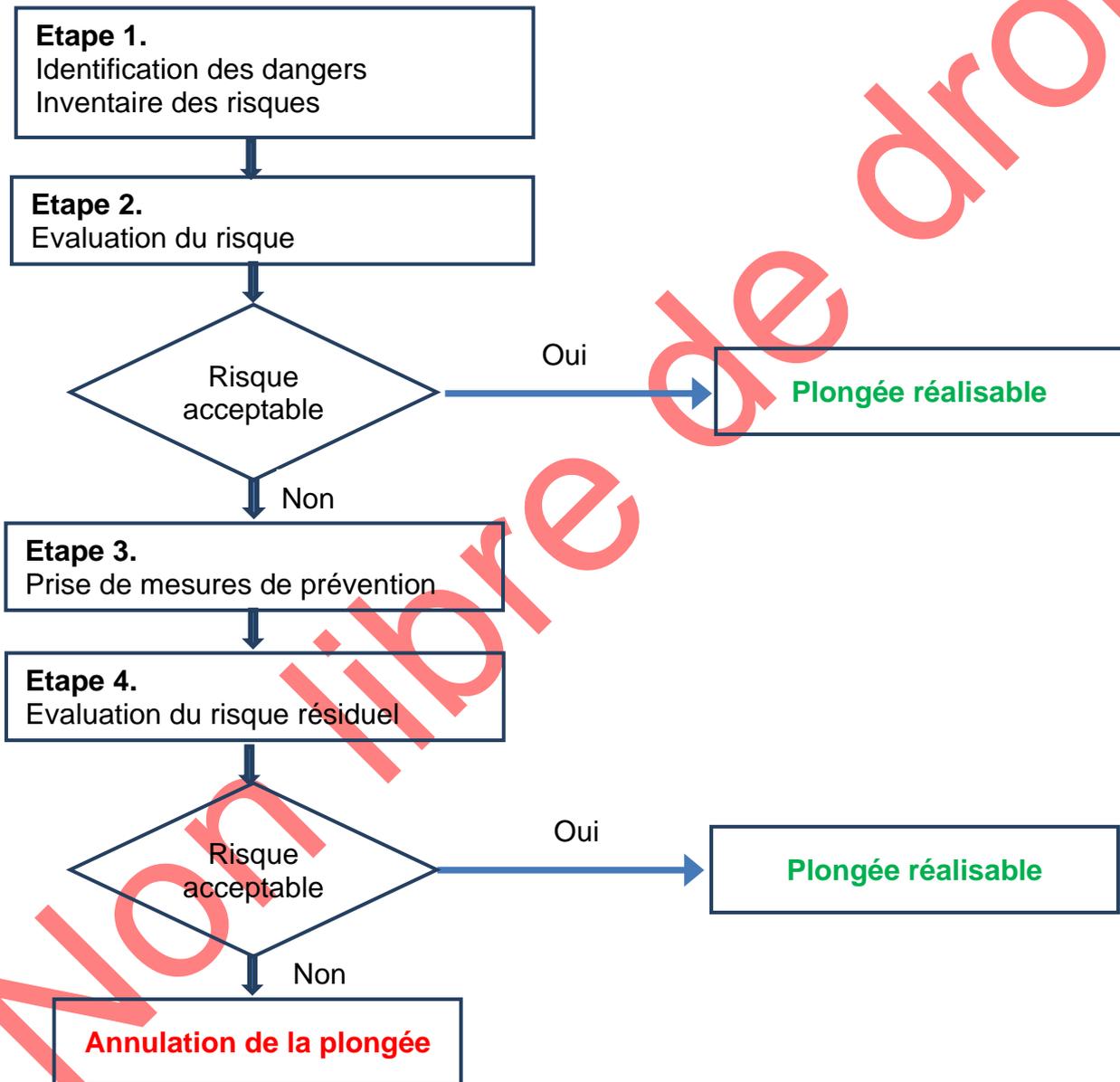
## Analyse des risques

Non libre de droit



## 7. 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>26</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>26</sup> Opérateur en Travaux Subaquatiques



## 7.1. Définitions

---

**Danger** : Tout élément qui peut mettre en péril l'intégrité physique et la sécurité du plongeur.

**Exposition** : durée d'exposition au danger.

**Domage** : Atteinte à l'intégrité physique ou psychologique du plongeur.

**Risque** : Probabilité pour qu'un « Domage » se produise.

**Risque résiduel** : Risque qui subsiste lorsque les mesures de prévention ont été prises.

**Facteur de risque** : Elément ou évènement qui peut engendrer un « Domage ».

**Prévention** : Toutes mesures pour limiter le « Risque », éviter les « Domages » ou les atténuer.

**Probabilité** : Paramètre variable en fonction de la nature du « Risque ».

## 7.2. 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>27</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 :

$$Rk = G \times E \times P \times F$$

Rk : Risque estimé suivant la méthode Kinney.

G : Gravité des conséquences possibles (Domage).

E : Durée d'exposition au facteur de risque.

P : Probabilité d'émergence du dommage 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>28</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, 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>29</sup>, le « score » varie en fonction

---

<sup>27</sup> [Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques](#) - Malchaire J. & Koob J-P – Université catholique de Louvain

<sup>28</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 !

<sup>29</sup> [Fiabilité de la méthode Kinney d'analyse des risques](#) - Malchaire J. & Koob J-P – UCL



en fonction de l'observateur dans une fourchette de 1 à 15.

## 7.2.1 Tableaux des facteurs G, E et P

### 7.2.1.1. « 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

### 7.2.1.2. « 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

### 7.2.1.3. « 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

## 7.2.2 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



## 7.3. 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
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	Formation, palier au Nx, O <sub>2</sub> sur site	7	3	0,2	4,2
	R= 200 à 239	7	1	3	21		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					
	Temp. > 24° C	7	3	0,1	2,1					
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 pour se mettre à l'eau et en sortir	3	3	1	9
	Pente escarpée	3	3	3	27					
Emmêlement	Tous	15	3	0,5	22,5	Plusieurs outils tranchants, Repérer les endroits où il y des filets, 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					
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 a 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	Néant				
	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					
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					
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					
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					
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					
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



Risque	Degré engagement de la plongée et Conditions particulières	Facteurs / score				Préventions	Risque résiduel			
		G	E	P	Rk		Facteurs / score			
							G	E	P	Rk
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 compétè 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
Soupe caustique		15	3	6	270	Eau vinaigrée, évacuation hôpital vérification compétè et test de pression avant la plongée	1	3	0,2	9
Essoufflement		7	3	3	63	Vérifier la chaux. Passer sur bailout	7	3	0,5	10,5
Vertige, vision en tunnel, maux de tête	Hypercapnie, hyperoxie, hypoxie	15	3	6	270	Bail out immédiat. Vérification complète de la machine,	15	3	0,2	9

Note : le tableau est basé sur l'expérience de l'auteur est n'est donné qu'a 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.



# Annexes

---

1. Paramétrage Dräger Dolphin
2. Feuille de planification
3. Bibliographie

[Page 66](#)

[Page 70](#)

[Page 71](#)

Non libre de droit



## 8.1. Paramétrage du Dolphin

En fonction du Nitrox source utilisé et du débit de la buse sonique (litres/minutes), de la consommation métabolique  $VO_2$  (litres/minutes) vous trouvez en fonction de la profondeur la PPO<sub>2</sub> (Bar) dans la boucle de recyclage.

- Les valeurs en gras représentent le paramétrage optimum.
- Les valeurs en rouge représentent des points présentant un risque anoxique ou hyperoxique.

Nx 30											
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m
15	0,5	0,28	0,41	0,55	0,69	0,83	0,97	1,10	1,24	1,38	1,52
15	1	<b>0,25</b>	<b>0,38</b>	<b>0,50</b>	<b>0,63</b>	<b>0,75</b>	<b>0,88</b>	<b>1,00</b>	<b>1,13</b>	<b>1,25</b>	<b>1,38</b>
15	2	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,67	0,77	0,87	0,96	1,06

Nx 32											
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m	45m
15	0,5	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,19	1,33	1,48	1,63
15	1	<b>0,27</b>	<b>0,41</b>	<b>0,54</b>	<b>0,68</b>	<b>0,81</b>	<b>0,95</b>	<b>1,09</b>	<b>1,22</b>	<b>1,36</b>	<b>1,49</b>
15	2	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65	0,75	0,86	0,97	1,08	1,18

Nx 34										
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
15	0,5	0,32	0,48	0,63	0,79	0,95	1,11	1,27	1,43	1,59
15	1	<b>0,29</b>	<b>0,44</b>	<b>0,59</b>	<b>0,73</b>	<b>0,88</b>	<b>1,03</b>	<b>1,17</b>	<b>1,32</b>	<b>1,46</b>
15	2	0,24	0,36	0,48	0,60	0,72	0,83	0,95	1,07	1,19

Nx 36									
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m
8	0,5	0,32	0,48	0,63	0,79	0,95	1,11	1,27	1,43
8	1	<b>0,27</b>	<b>0,40</b>	<b>0,54</b>	<b>0,67</b>	<b>0,81</b>	<b>0,94</b>	<b>1,07</b>	<b>1,21</b>
8	2	0,15	0,22	0,29	0,37	0,44	0,51	0,59	0,66
11	0,5	0,33	0,49	0,66	0,82	0,99	1,15	1,32	1,48
11	1	<b>0,30</b>	<b>0,44</b>	<b>0,59</b>	<b>0,74</b>	<b>0,89</b>	<b>1,04</b>	<b>1,18</b>	<b>1,33</b>
11	2	0,22	0,33	0,44	0,54	0,65	0,76	0,87	0,98
15	0,5	0,34	0,51	0,68	0,84	1,01	1,18	1,35	1,52
15	1	<b>0,30</b>	<b>0,46</b>	<b>0,61</b>	<b>0,76</b>	<b>0,91</b>	<b>1,06</b>	<b>1,21</b>	<b>1,37</b>
15	2	0,26	0,39	0,52	0,65	0,78	0,92	1,05	1,18



Nx 38									
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m	35m
8	0,5	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02	1,19	1,35	1,52
8	<b>1</b>	<b>0,29</b>	<b>0,44</b>	<b>0,58</b>	<b>0,73</b>	<b>0,87</b>	<b>1,02</b>	<b>1,17</b>	<b>1,31</b>
8	2	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,61	0,69	0,78
11	0,5	0,35	0,53	0,70	0,88	1,05	1,23	1,40	1,58
11	<b>1</b>	<b>0,32</b>	<b>0,48</b>	<b>0,64</b>	<b>0,80</b>	<b>0,95</b>	<b>1,11</b>	<b>1,27</b>	<b>1,43</b>
11	2	0,24	0,36	0,48	0,61	0,73	0,85	0,97	1,09
15	0,5	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,43	1,61
15	1	0,34	0,50	0,67	0,84	1,01	1,18	1,34	1,51
15	2	0,28	0,43	0,57	0,71	0,85	1,00	1,14	1,28

Nx 40								
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m
8	0,5	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44
8	<b>1</b>	<b>0,31</b>	<b>0,47</b>	<b>0,63</b>	<b>0,79</b>	<b>0,94</b>	<b>1,10</b>	<b>1,26</b>
8	2	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
11	0,5	0,37	0,56	0,74	0,93	1,11	1,30	1,49
11	1	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02	1,19	1,36
11	2	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93	1,07
15	0,5	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52
15	<b>1</b>	<b>0,36</b>	<b>0,54</b>	<b>0,71</b>	<b>0,89</b>	<b>1,07</b>	<b>1,25</b>	<b>1,43</b>
15	2	0,31	0,46	0,62	0,77	0,92	1,08	1,23

Nx 42								
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m	30m
8	0,5	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,53
8	<b>1</b>	<b>0,34</b>	<b>0,51</b>	<b>0,67</b>	<b>0,84</b>	<b>1,01</b>	<b>1,18</b>	<b>1,35</b>
8	2	0,23	0,34	0,45	0,57	0,68	0,79	0,91
11	0,5	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,37	1,57
11	<b>1</b>	<b>0,36</b>	<b>0,54</b>	<b>0,72</b>	<b>0,91</b>	<b>1,09</b>	<b>1,27</b>	<b>1,45</b>
11	2	0,29	0,44	0,58	0,73	0,87	1,02	1,16
15	0,5	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60
15	<b>1</b>	<b>0,38</b>	<b>0,57</b>	<b>0,76</b>	<b>0,95</b>	<b>1,14</b>	<b>1,33</b>	<b>1,51</b>
15	2	0,33	0,50	0,66	0,83	0,99	1,16	1,32



Nx 45							
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m
8	0,5	0,41	0,62	0,83	1,03	1,24	1,45
8	<b>1</b>	<b>0,37</b>	<b>0,56</b>	<b>0,74</b>	<b>0,93</b>	<b>1,11</b>	<b>1,30</b>
8	2	0,27	0,40	0,53	0,67	0,80	0,93
11	0,5	0,42	0,64	0,85	1,06	1,27	1,48
11	<b>1</b>	<b>0,40</b>	<b>0,59</b>	<b>0,79</b>	<b>0,99</b>	<b>1,19</b>	<b>1,38</b>
11	2	0,33	0,49	0,66	0,82	0,98	1,15

Nx 48							
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m
6	0,5	0,43	0,65	0,87	1,08	1,30	1,51
6	<b>1</b>	<b>0,38</b>	<b>0,56</b>	<b>0,75</b>	<b>0,94</b>	<b>1,13</b>	<b>1,32</b>
6	2	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77
8	0,5	0,45	0,67	0,89	1,11	1,34	1,56
8	<b>1</b>	<b>0,41</b>	<b>0,61</b>	<b>0,81</b>	<b>1,01</b>	<b>1,22</b>	<b>1,42</b>
8	2	0,31	0,46	0,61	0,77	0,92	1,07
11	0,5	0,46	0,68	0,91	1,14	1,37	1,59
11	<b>1</b>	<b>0,43</b>	<b>0,64</b>	<b>0,86</b>	<b>1,07</b>	<b>1,28</b>	<b>1,50</b>
11	2	0,36	0,55	0,73	0,91	1,09	1,28

Nx 50							
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m	25m
6	0,5	0,45	0,68	0,91	1,14	1,36	1,59
6	<b>1</b>	<b>0,40</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>1,20</b>	<b>1,40</b>
6	2	0,25	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88
8	0,5	0,47	0,70	0,93	1,17	1,40	1,63
8	<b>1</b>	<b>0,43</b>	<b>0,64</b>	<b>0,86</b>	<b>1,07</b>	<b>1,29</b>	<b>1,50</b>
8	2	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,17

x 52						
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m
6	0,5	0,48	0,71	0,95	1,19	1,43
6	<b>1</b>	<b>0,42</b>	<b>0,64</b>	<b>0,85</b>	<b>1,06</b>	<b>1,27</b>
6	2	0,28	0,42	0,56	0,70	0,84
8	0,5	0,49	0,73	0,98	1,22	1,46
8	<b>1</b>	<b>0,45</b>	<b>0,68</b>	<b>0,90</b>	<b>1,13</b>	<b>1,35</b>
8	2	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08

droit



Nx 54						
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m
6	0,5	0,50	0,75	1,00	1,25	1,49
6	<b>1</b>	<b>0,45</b>	<b>0,67</b>	<b>0,90</b>	<b>1,12</b>	<b>1,34</b>
6	2	0,31	0,47	0,62	0,78	0,93

Nx 56						
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m	20m
6	0,5	0,52	0,78	1,04	1,30	1,56
6	<b>1</b>	<b>0,47</b>	<b>0,71</b>	<b>0,94</b>	<b>1,18</b>	<b>1,42</b>
6	2	0,34	0,51	0,68	0,85	1,02

Nx 58					
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m
6	0,5	0,54	0,81	1,08	1,35
6	<b>1</b>	<b>0,50</b>	<b>0,74</b>	<b>0,99</b>	<b>1,24</b>
6	2	0,37	0,56	0,74	0,93

Nx 60					
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m
6	0,5	0,56	0,85	1,13	1,41
6	<b>1</b>	<b>0,52</b>	<b>0,78</b>	<b>1,04</b>	<b>1,30</b>
6	2	0,40	0,60	0,80	1,00

Nx 65					
Buse	VO <sub>2</sub>	0m	5m	10m	15m
6	0,5	0,62	0,93	1,24	1,55
6	<b>1</b>	<b>0,58</b>	<b>0,87</b>	<b>1,16</b>	<b>1,45</b>
6	2	0,48	0,71	0,95	1,19

Non autorisé de droit



## 8.2. Feuille de planification S.C.R.

Date : .....Durée totale d'utilisation chaux : .....min Profondeur : .....m Temps de plongée : .....min

### Calculs préliminaires [Utilitaire calcul Best Mix](#)

Best Mix	$FsO_2 = PPO_2 / [(P/10) + 1]$	
Buse sonique	$Qs = 200 / (Nx - 21)$	

### Mesures

% O <sub>2</sub> de la source (FsO <sub>2</sub> )		%
Pression source (P)		Bar
Débit buse sonique (Qs)		l / min

### Fraction d'oxygène dans la boucle [Utilitaire de calcul](#)

Normal VO <sub>2</sub> = 1 à 1,5	$\frac{Qs FsO_2 - VO_2}{(Qs - VO_2)}$	
Essoufflement VO <sub>2</sub> =2,5		

PPO<sub>2</sub> : Pression partielle O<sub>2</sub> max (Bar)  
 Nx : Nitrox (32, 40, 50....)  
 Qs : Débit de la buse sonique (l/min)  
 FsO<sub>2</sub> : Fraction d'O<sub>2</sub> de la bouteille  
 VO<sub>2</sub> : Consommation métabolique(l/min)  
 FIO<sub>2</sub> : Fraction d'oxygène dans la boucle  
 P : Pression (Bar)  
 Prof : Profondeur (m)  
 Mc : Poids de chaux (Kg)  
 Vb : Volume hydraulique de la source (lt)  
 Pb : Pression de gonflage (Bars)  
 Pr : Réserve (25 bar minimum)  
 Aut : Autonomie (minutes)

### [Utilitaire de calcul PPO<sub>2</sub>](#)

### Estimation rapide du CNS [Utilitaire de calcul CNS](#)

	Temps	%CNS	CNS	
CNS rémanent				(1) 0,65 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,4
CNS plongée		(1)		(1) 0,83 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,5
CNS paliers		0,3 <sup>(2)</sup>		(1) 2,20 pour une PPO <sub>2</sub> de 1,6
Total				(2) Valeur extrême CNS= %CNS x Temps

### Calcul du bailout et de la durée totale de la plongée.

Bouteille = Total / 200	Profondeur (m)	Temps x Pression x cons = volume			
Bouteille = litres		Temps (t) (minutes)	Pression (P) (bar)	cons. l/min	Volume (litres)
P=(Profondeur/10)+1	A			20	
t= Profondeur /10	B			20	
P=(Profondeur/20)+1					
P=(Profondeur/10)+1	Palier 3m	3	1,3	20	
	Palier 6m	6	1,6	20	
	Palier 9m	9	1,9	20	
Durée totale de la plongée			Total sans sécu (T)		
<a href="#">Utilitaire de calcul du bailout</a>			Sécurité (S)	1,25	
			Total = (T) x (S)		

### Calcul d'autonomie [Utilitaire de calcul](#)

Capacité source (Vb)	Pression de gonflage (Pb)	Qs	Sécurité (Pr)	Autonomie (Aut)	
				Aut = (Vb x (Pb - Pr)) / Qs =	
Chaux	Poids chaux (Mc) <sup>3</sup>	A ; B ; C		Le reliquat = A-B-C doit être supérieur à zéro.	
	(A)	+			
A= 90xMcx0,85	Durée utilisée (B)	-			
2,25 Kg pour le Dolphin	Temps total de plongée (C)	-		La durée totale de la plongée doit être inférieure à Autonomie	
	<b>Reliquat</b>				



## Bibliographie

Jacques Vettier -- *Nitrox Trimix* , ed Ulmer 2003  
André Houberechts -- *La Thermodynamique Technique*, ed Vander 1975  
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  
Jean-François André (dit Jeff)—*Nitrox et Recycleur*, ed Hippoconsulting 2005  
Ranald V. Giles -- *Mécanique des fluides*, ed Schaum 1977  
Manuel d'utilisation et technique du SCR Dräger Dolphin

**Les sites :** <http://www.danshop.com/> <http://recycleur.free.fr/index.php>  
<http://www.nwdesigns.com/rebreathers/Default.htm> <http://home.worldcom.ch/intruder/> <http://www.therebreathersite.nl/>

Non libre de droit