



ACCIDENTS LIES A LA PRATIQUE DES RECYCLEURS EN PLONGEE

Situation actuelle

Mémoire d'Instructeur National présenté par
Laurent MARCOUX

Septembre 2010

REMERCIEMENTS

A mes Parrains, Michel GAUCHET et Georges LIVET, pour m’ avoir accompagné avec une grande gentillesse depuis le début de mon parcours d’ encadrants à la CTR Est.

A tous ceux qui ont bien voulu me guider dans l’ élaboration et la relecture de ce travail :

Georges LIVET
Bernard SCHITTLY
Michel GAUCHET
Eric BAHUET
Pascal CHAUVIERE
Sylvie MARCOUX (relecture)

A tous mes collègues Instructeurs du Comité Est

A ma femme Sylvie et à mes enfants, pour supporter tout cela depuis de nombreuses années...

PLAN

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET DESCRIPTION DES PRINCIPAUX RECYCLEURS ACTUELS

1. Principes communs à tous les recycleurs	p 6
2. Le matériel	p 7
3. Les différentes familles de recycleurs	p 8
3.1 Les recycleurs semi-fermés	p 8
3.2 Les recycleurs en circuit fermé	p 10
Recycleurs en circuit fermé à oxygène pur	p. 10
Les eCCR	p 12
Les mCCR	p 14

DEUXIEME PARTIE DESCRIPTION DES ACCIDENTS EN RECYCLEUR

1. L'hypercapnie	p 15
2. L'hyperoxie	p 26
3. L'hypoxie	p 31
4. L'inhalation de chaux sodée	p 34
5. Le risque infectieux	p 36
6. La surpression pulmonaire	p 37
7. Les accidents de désaturation	p 37
8. L'œdème aigu pulmonaire d'immersion	p 39

TROISIEME PARTIE
STATISTIQUES ET ANALYSE DES ACCIDENTS EN RECYCLEUR

1. Données chiffrées	p 41
1.1. Problèmes méthodologiques	p 41
1.2. Statistiques concernant les accidents en recycleur dans la marine française	p 41
1.3. Données provenant de l'enquête du Dive Alerte Network	p 42
1.4. Données concernant la plongée loisir	p 42
2. Problèmes liés au comportement des plongeurs :	p 48
2.1. Les plongeurs expérimentés	p 48
2.2. Les plongeurs moins expérimentés	p 50
3. Problèmes liés aux défaillances matérielles	p 51
3.1. Position des fabricants	p 51
3.2. Position des adversaires des recycleurs	p 51
3.3. Les défaillances d'origine mécanique	p 52
3.4. La norme C.E	p 52
3.5. Controverses concernant la gestion électronique des recycleurs	p 53

CONCLUSION

Avantages et inconvénients des principaux types de recycleurs	p 54
Quel type de machine peut-on recommander à quel plongeur ?	p 55

LEXIQUE	p 56
---------	------

BIBLIOGRAPHIE	p 57
---------------	------

INTRODUCTION

La plongée en recycleur est loin d'être une activité nouvelle, puisque le premier appareil est mis au point par l'anglais Henry Fleuss en 1878. Il faudra attendre pratiquement un demi-siècle l'invention du premier scaphandre autonome par les Français Farnez et Le Prieur, présenté pour la première fois en 1926 à la piscine des Tourelles à Paris.

Par la suite, les recycleurs seront essentiellement utilisés en plongée par les militaires, et c'est l'invention du scaphandre autonome muni d'un détendeur à un, puis deux étages, qui va assurer le succès de la plongée loisir à partir des années 50.

En dehors des usages militaires, la pratique du recycleur se limite à des publics peu nombreux : photographes, exploration en plongée souterraine ou plongée profonde sur épaves.

Il faudra attendre la fin des années 90 pour voir apparaître un engouement pour la pratique du recycleur en plongée loisir grâce à la mise sur le marché de machines adaptées, et d'un relais médiatique dans la presse spécialisée.

Comme on peut le constater, ce n'est pas le recycleur qui est nouveau, mais sa pratique en plongée loisir. Cependant, un certain malaise est venu tempérer cet enthousiasme naissant. En effet, plusieurs accidents graves voire mortels ont touché un certain nombre de plongeurs recycleurs, souvent – mais pas toujours – expérimentés et rigoureux. On assiste depuis à des débats souvent passionnés entre partisans et détracteurs des recycleurs.

Sans vouloir « départager » ces deux clans, ce mémoire a pour moi deux buts :

- essayer de comprendre ces accidents pour mieux les prévenir.
- essayer de conseiller un type de machine en fonction des besoins des différents plongeurs. Il n'est pas destiné à des experts en recycleurs mais à des plongeurs en circuit ouvert désirant découvrir l'activité ou des plongeurs recycleurs en formation désireux d'approfondir leurs connaissances dans le domaine des accidents.

Une première partie est consacrée aux principes généraux de fonctionnement des recycleurs. Ce chapitre simplifié est destiné à faciliter la compréhension des accidents développés par la suite et à situer les principales machines utilisées selon leur catégorie.

Une deuxième partie est consacrée à la présentation des accidents et incidents classés par ordre de fréquence. On ne traitera que leurs aspects spécifiques à la plongée en recycleur, et on proposera des mesures de prévention.

La troisième partie concerne les accidents graves et mortels. A partir de statistiques et d'analyses de cas, on essayera de comprendre les facteurs accidentogènes liés aux plongeurs et aux machines les plus fréquemment utilisées.

Enfin, en conclusion, on essayera de dégager les avantages et inconvénients des différents types de recycleurs et de voir à quels plongeurs les conseiller.

PREMIERE PARTIE : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET DESCRIPTION DES PRINCIPAUX RECYCLEURS ACTUELS

Le rôle d'un recycleur consiste à débarrasser l'air expiré du CO₂, puis à l'enrichir en O₂ pour compenser la fraction de ce gaz consommée par le plongeur.

1. Principes communs à tous les recycleurs

1.1. Récupération des gaz

L'air inspiré se compose environ de 21% d'oxygène et de 79% d'azote. Mais la consommation d'oxygène par l'organisme est assez faible, puisque l'air expiré en contient encore 17%, ce qui correspond environ à 80% de la quantité présente au départ.

Lors d'une plongée sans efforts particuliers, l'organisme consomme environ 0.5 l / min d'O₂ contre 2,5 à 3 l/min lors d'un effort maximal, et ceci indépendamment de la profondeur de la plongée. Le recyclage de l'air expiré permet donc de faire une économie considérable en gaz respirés par rapport à la plongée en circuit ouvert.

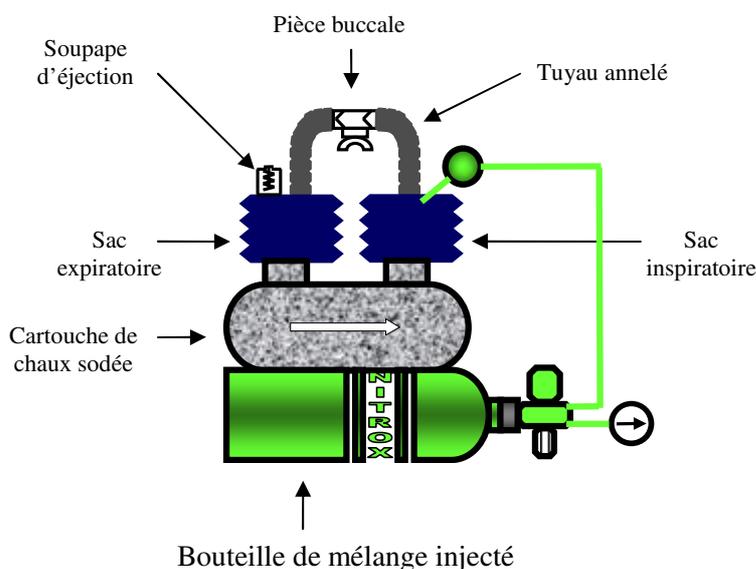
1.2. Elimination du CO₂ expiré

Un litre d'O₂ consommé par l'organisme produit environ 0,8 litre de CO₂ dans l'air expiré. Il sera éliminé en passant à travers une cartouche remplie de chaux sodée selon une réaction chimique qui produit de la chaleur et de l'humidité. Le plongeur recycleur respire un air humide et chaud, et limite ainsi ses pertes hydriques et caloriques. En effet, ces dernières peuvent représenter jusqu'à 25% des pertes caloriques totales en circuit ouvert.

1.3. Remplacement de l'O₂ consommé par le métabolisme

L'oxygène va être rajouté par différents mécanismes qui vont permettre de différencier des « familles » de recycleurs.

1.4 Circulation du mélange gazeux



D'après Pascal Chauvière

Les recycleurs ont tous en commun :

- la boucle respiratoire, composée de la pièce buccale, des tuyaux annelés, des sacs respiratoires et de la cartouche de chaux sodée, auxquels il faut rajouter les poumons du plongeur
- un système d'alimentation permettant de remplacer l'oxygène consommé par le plongeur
- une soupape de surpression

La circulation du mélange se déroule selon le trajet suivant :

Sac inspiratoire –tuyau annelé inspiratoire –pièce buccale – tuyau annelé expiratoire – sac expiratoire – cartouche de chaux sodée – sac inspiratoire

2. Le matériel

La « boucle » respiratoire comporte différents éléments

2.1. Les tuyaux annelés reliés en leur milieu par une pièce buccale.



Tuyaux annelés

Celle-ci comporte un système de valves qui n'autorisent le passage du gaz qu'en sens unique, et une tige-clapet, nommée boisseau, destinée à empêcher l'entrée d'eau dans la boucle lorsque le plongeur n'a pas l'embout en bouche, en particulier lors de la mise à l'eau.



Pièce buccale (3)

2.2. La cartouche de chaux sodée ou canister

Elle comporte une entrée et une sortie, reliées respectivement aux sacs inspiratoire et expiratoire.



Canister du Dolphin

2.3. Les sacs respiratoires



Sacs inspiratoire et expiratoire du Dolphin (3)

Ou faux poumons, ils sont le plus souvent au nombre de 2. Ils sont connectés aux tuyaux inspiratoire et expiratoire d'un côté, et à la cartouche de chaux sodée de l'autre. Ils sont constitués d'un matériau souple pour faciliter la ventilation, et munis d'une soupape de surpression au niveau du sac inspiratoire ou expiratoire.

2.4. Le contrôle de la fraction d'oxygène dans la boucle



Cellule à O₂

Une ou plusieurs « cellules à oxygène », permettent de surveiller la PpO₂ au niveau du sac inspiratoire. L'information est envoyée au plongeur par l'intermédiaire d'une console dotée d'un système d'alarme visuel, sonore, parfois d'un vibreur ou d'une liaison sans fil permettant la lecture sur un ordinateur fixé au poignet.



3 cellules à O₂ dans la tête du canister du rEvo



Oxygauge : cellule à O₂ reliée à un système d'affichage

2.5. Le système de secours

Ou « Bail Out », comporte une ou plusieurs bouteilles équipées de détendeurs à deux étages. Ce système doit permettre au plongeur de ventiler en circuit ouvert lorsqu'il rencontre un problème sérieux avec son recycleur. Le Bail Out peut être intégré à la machine ou en être indépendant. Dans tous les cas, la profondeur d'évolution et les paliers nécessaires déterminent la quantité de gaz et de blocs embarquée. Dans certains recycleurs, un dispositif appelé B.O.V (Bail Out Valve) intègre le deuxième étage du détendeur de secours directement dans l'embout du recycleur. Le plongeur peut ainsi passer sur Bail Out en gardant l'embout en bouche.



B.O.V de l'Inspiration

2.6. Le système d'adjonction d'oxygène

Il s'agit selon les cas d'oxygène pur ou d'un mélange gazeux suroxygéné contenu dans une bouteille embarquée. Celle-ci est de faible volume en comparaison des blocs utilisés en circuit ouvert, car les besoins métaboliques en oxygène sont modestes et indépendants de la profondeur d'évolution. Comme nous l'avons déjà dit, la technique utilisée permet de différencier plusieurs familles de recycleurs

3. Les différentes familles de recycleurs

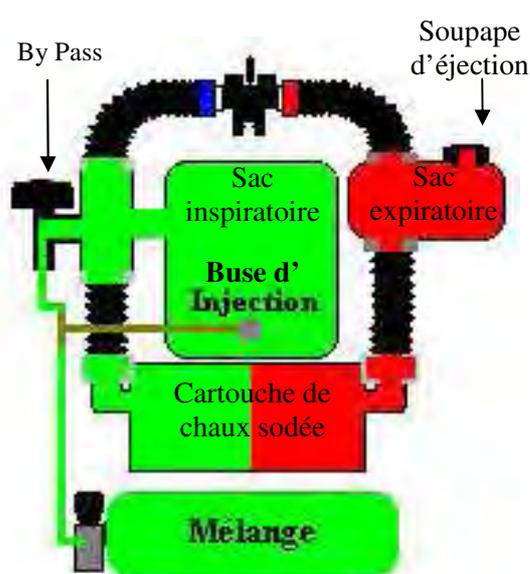
3.1. Les recycleurs semi-fermés

Dénotés SCR (semi closed rebreathers) par les anglo-saxons Leur principe consiste à recycler un mélange respiratoire prédéfini en fonction de la profondeur d'évolution. L'oxygène consommé par le plongeur est fourni par ce mélange qui sera, selon le cas, un Nitrox ou un Trimix

Selon le mode de remplacement de l'oxygène dans la boucle respiratoire, on distingue :

3.1.1. Les recycleurs semi-fermés à débit massique

Principe de fonctionnement



D'après
home.worldcom.ch/intruder/ARHsuisse-fichetechniques-photos.htm

Egalement appelés recycleurs semi-fermés actifs ou à débit constant.

Le gaz est injecté au niveau du sac inspiratoire en traversant une buse à débit constant. Son diamètre est calibré en fonction de la fraction d'O₂ contenue dans le mélange respiré, de façon à fournir environ 3 fois la quantité consommée par le plongeur.

Pour que le système fonctionne, la pression du mélange injecté doit toujours être supérieure au double de la pression ambiante. Ce type de recycleur génère un écart important entre la PpO₂ mesurée dans la boucle et la fraction d'O₂ contenue dans la bouteille, en raison de la variation de la consommation d'O₂ qui dépend des efforts réalisés. En pratique, on considère que la teneur en O₂ de la boucle est égale à 80% de celle du mélange utilisé.

A la descente, ou lors d'une augmentation rapide de la quantité de gaz consommé, les sacs respiratoires se vident, et entraînent un levier qui déclenche l'injection de gaz frais au niveau du sac inspiratoire. En cas de besoin, le plongeur peut rajouter manuellement du mélange dans la boucle par un dispositif de type « By Pass ». L'excès de gaz injecté est évacué grâce à une soupape d'éjection située sur le sac expiratoire. Ces recycleurs engendrent donc quelques bulles.

Les principales machines de ce type sont actuellement :

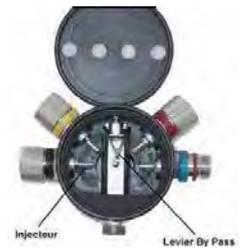
Le Dräger Dolphin



Dolphin et black Dolphin

Commercialisé en 1998, son injecteur comporte 4 buses de couleurs différentes permettant d'utiliser des Nitrox 60/40, 50/50, 40/60 et 32/68.

Plus le mélange est riche en O₂, plus le débit de la buse est faible. La consommation en mélange est diminuée, mais la profondeur d'évolution réduite. Les sacs respiratoires sont situés sur le dos. Ce recycleur a été le plus vendu des SCR, mais sa commercialisation a été abandonnée récemment par manque de rentabilité. Son prix de départ était de 4000 €, mais il est possible d'en trouver à partir de 2000 € sur le marché de l'occasion. Il est certifié C.E.



Injecteur du Dolphin
(3)

Le Dräger Ray



Ray

Commercialisé en 1999, il représente une version simplifiée du Dolphin. Il ne comporte qu'un seul injecteur permettant d'utiliser un Nitrox 50/50, ce qui limite sa profondeur d'évolution à 22 mètres. Son prix de départ était de 2000 €, mais comme le Dolphin, sa commercialisation a été arrêtée par manque de rentabilité. Il est certifié C.E.



Injecteur du Ray
Photographies M. Makar (3)

L'UBS 40 et l'Azimuth



UBS 40

L'UBS 40 est commercialisé depuis 2006. Il propose un injecteur unique, calibré avant la plongée en fonction du mélange utilisé. Son prix de départ était de 2000 €, et son poids de 25 kg.

L'Azimuth, version plus évoluée, est équipé de 2 bouteilles. Il est certifié C.E.



Azimuth

Le Submatix



Submatix capot fermé

Commercialisé en 2004, il existe en version SCR et mCCR. Il est équipé de deux bouteilles de petit volume. Son prix de départ était de 5000 €. Il est certifié C.E.



Submatix capot ouvert

3.1.2. Les recycleurs semi-fermés à fuite proportionnelle

Principe de fonctionnement

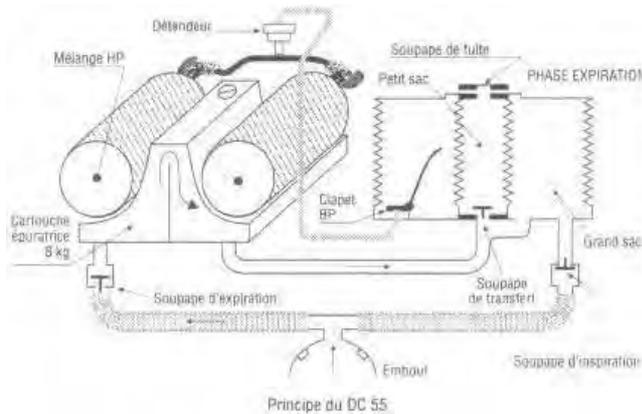


Schéma du DC 55 modifié par Eric Bahuet

Egalement appelés recycleurs semi-fermés passifs. L'injection de mélange respiratoire dans le sac inspiratoire n'est plus continue, mais proportionnelle à la ventilation du plongeur.

Le schéma ci-contre représente le fonctionnement du DC 55. Les faux poumons sont constitués de 2 sacs de tailles différentes, représentés par 2 soufflets imbriqués l'un dans l'autre. Le volume du soufflet interne représente environ 10 % de celui du soufflet externe. A l'expiration, les deux soufflets se remplissent en même temps, grâce à une soupape de transfert. A l'inspiration, ils se vident en même temps. La rétraction du petit soufflet interne entraîne l'éjection de son volume gazeux par la soupape de fuite, et déclenche un clapet qui permet l'admission du même volume de gaz frais dans le grand soufflet. Ainsi, le renouvellement du gaz au niveau de la boucle ne dépend plus de la consommation du plongeur, mais de son rythme respiratoire. Par rapport aux recycleurs à débit continu, la PPO₂ de la boucle est beaucoup plus stable et la consommation de mélange injecté est considérablement diminuée.

Les principales machines de ce type sont actuellement :

Le DC55



DC 55 capot ouvert

Recycleur commercialisé par Aqualung, il a été longtemps réservé aux militaires, et, en particulier, aux plongeurs démineurs de la marine nationale, pour des actions discrètes jusqu'à 55m.

Récemment « déclassifié » et dorénavant accessible aux plongeurs loisir, il a été remplacé en 2008 par le CRABE (Complete Range Autonomous Breathing Equipment). Son poids est de 25 kg et son prix se négocie entre 2500 et 3000 €. Actuellement, il n'est pas certifié C.E.



Soufflets externe et interne

L'Halcyon



Halcyon vu de dos

Commercialisé en 1998, il fonctionne sur un principe similaire à celui du DC 55, mais il utilise une vessie remplie d'huile pour diminuer le volume du soufflet interne. Ce dispositif permet de limiter la perte de gaz lorsque la profondeur augmente. Son prix actuel est de 6000 €, ce qui est élevé pour un SCR. Actuellement, il n'est pas certifié C.E.



Halcyon vu de face

3.2. Les recycleurs en circuit fermé

Dénomés CCR (Completely Closed Rebreathers) par les Anglo saxons, ils utilisent soit l'oxygène pur, soit un mélange respiratoire reconstitué à partir d'oxygène et d'un diluant. Si le diluant est l'air, le mélange respiré sera du Nitrox, si le diluant est du Trimix, le mélange respiré sera également du Trimix. Ces recycleurs ne produisent pas de bulle, sauf à la remontée.

3.2.1. Recycleurs en circuit fermé à oxygène pur

Principe de fonctionnement

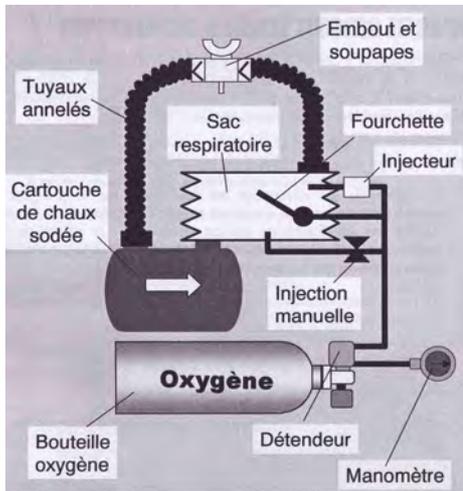


Schéma CCR O₂ pur (27)

Ce sont des recycleurs de conception et d'entretien très simples. Ils n'utilisent qu'un seul gaz, l'oxygène pur, pour remplacer la quantité d'O₂ consommée par le plongeur, et ne comportent qu'un seul sac respiratoire. Lorsque celui-ci se rétracte, il appuie sur une fourchette qui entraîne l'admission d'oxygène pur selon un système analogue au deuxième étage d'un détendeur. En cas de besoin, notamment à la descente, le plongeur peut utiliser un By Pass pour remplir le sac. Le plus souvent, il n'existe pas de soupape sur le sac respiratoire, ce qui oblige le plongeur à souffler par le nez à la remontée pour éviter la surpression pulmonaire.

Ces recycleurs se portent souvent en position ventrale ; Ils ne produisent aucune bulle, sauf éventuellement à la remontée. En raison de l'utilisation d'O₂ pur, leur profondeur d'évolution est limitée à 6 m.

Les principales machines de ce type sont actuellement :

Les recycleurs militaires



Oxygers

L'Oxygers a été remplacé en 2002 par le F.R.O.G.S. (Full Range Oxygen Gaz System) fabriqué par la Spirotechnique. Portés en position ventrale, ces recycleurs sont utilisés à faible profondeur par les nageurs de combat pour leurs missions d'approche. Ils sont munis d'une sangle pour éviter la perte de l'embout buccal. Ils ne sont pas certifiés C.E.



FROGS

Les recycleurs civils



Castoro version civile

Le Castoro, fabriqué par la firme italienne OMG existe en deux versions, civile (à gauche) et militaire (à droite).

Il est parfois utilisé par les vidéastes pour l'approche animalière à faible profondeur, et en plongée Tek pour effectuer les derniers paliers à l'oxygène pur. Il n'est pas certifié C.E.



Castoro version militaire

3.2.2. Recycleurs en circuit fermé utilisant un mélange respiratoire

Ils sont équipés de deux bouteilles : la première contient de l'oxygène pur, et la seconde un diluant : air, Trimix normoxique ou hypoxique selon la profondeur d'évolution souhaitée. Leur originalité tient au fait que la PpO_2 reste constante quelle que soit la profondeur. En fonction du mode d'injection de l'oxygène dans le sac inspiratoire, on distingue les recycleurs à gestion électronique (eCCR) et les recycleurs à gestion mécanique (mCCR).

3.2.2.1. Les eCCR

Ces recycleurs « fabriquent » un mélange respiratoire en fonction d'une valeur de consigne de PpO_2 mesurée au niveau de la boucle. Cette valeur est prédéfinie par le plongeur, et reste constante quelle que soit la profondeur. Ces recycleurs ne produisent aucune bulle, sauf à la remontée, et sont donc beaucoup plus économes en gaz que les SCR.

Principe de fonctionnement

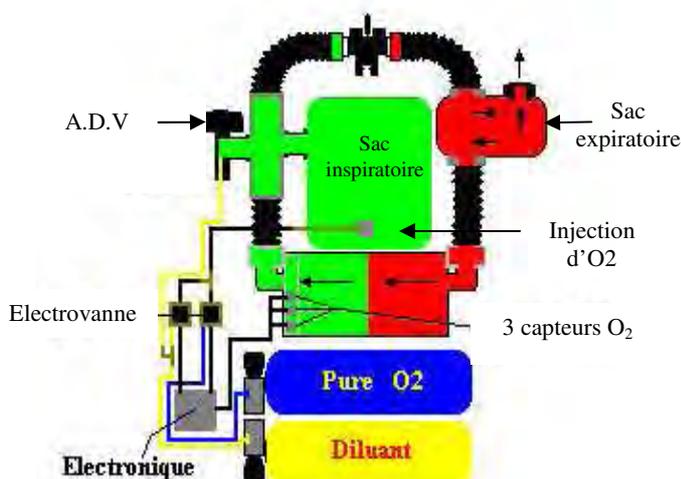


Schéma eCCR, d'après E. Bahuet

L'injection d' O_2 est contrôlée par 3 capteurs qui mesurent la fraction d'oxygène dans le sac inspiratoire. L'information est transmise à un ordinateur qui commande une électrovanne, ou solénoïde, permettant d'injecter de l'oxygène pur dans la boucle pour y maintenir une PpO_2 comprise entre deux valeurs haute et basse appelées « Setpoints »

A la descente, les sacs respiratoires se contractent et il faut rajouter du diluant pour maintenir leur volume. L'injection s'effectue par l'intermédiaire d'un A.D.V (Automatic Diluent Valve), système analogue au deuxième étage d'un détendeur classique qui réagit lorsque le sac inspiratoire est en dépression.

L'injection d' O_2 ou de diluant peut être aussi réalisée manuellement par le plongeur en cas de besoin.

Les principales machines de ce type sont actuellement :

L'Inspiration et l'Evolution



Inspiration

Fabriqué par l'anglais Ambient Pressure Diving, l'Inspiration est apparu en 1998. Il a été le premier eCCR à contrôle électronique de la PpO_2 . Les faux poumons se situent sur les épaules. Une nouvelle électronique, le système Vision, est proposée en 2005. Elle comporte une amélioration de l'affichage de la PpO_2 et des alarmes, un afficheur visuel facial de type H.U.D (Head Up Display), et l'intégration d'un ordinateur pour gérer la décompression. L'Evolution, apparu en 2005, est plus léger (24 kg au lieu de 29 pour l'Inspiration). Les recycleurs APD sont actuellement les eCCR les plus répandus dans le monde. Leur prix actuel est compris entre 5500 et 6800 € selon les options. Ils sont certifiés C.E.



Evolution

Le Mégalodon



Commercialisé en 2000 par Innerspace System Corporation (USA), il permet de changer le mode d'alimentation en oxygène et de l'utiliser au choix comme eCCR ou mCCR. Deuxième modèle le plus répandu après les modèles d'APD, il est compact et robuste. On peut l'utiliser avec n'importe quelle taille de bouteille, ce qui est pratique lors des voyages. Il possède un filtre à chaux sodée de type radial (en option). Il affiche la PpO_2 sur l'afficheur facial (H.U.D), mais ne possède pas de logiciel de décompression intégré dans la version de base. Son poids est de 28 kg et son prix actuel de 7200 € en version eCCR et de 5400 € en version mCCR. Actuellement, Il n'est pas certifié C.E.

Le Mk VI Discovery



Commercialisé par Poséidon, il est petit et léger (18 kg) ce qui est pratique pour les voyages. Il est équipé de 2 bouteilles de 3 litres, d'un B.O.V et d'un affichage par diodes et vibreur (H.U.D). Il comporte une console avec ordinateur intégré. Les faux poumons se situent sur les épaules. Il est certifié C.E, et son prix actuel est de 5470 €.



Pièce buccale et HUD

L'Ouroboros



Ouroboros (de profil)

Commercialisé depuis 2006 par The Closed Circuit Research. Les faux poumons sont montés sur le dos, ce qui engendre une certaine dureté à l'inspiration. La cartouche de chaux sodée est de type radial. L'électronique comprend un afficheur au poignet, un affichage facial H.U.D (Head Up Display) et deux autres afficheurs redondants. La décompression est assurée par le logiciel de l'ordinateur VR3. Toutes les fonctions sont contrôlables manuellement. Cependant, son poids (34 kg) et son prix de revient (proche de 12 000 €) sont très élevés. Il est certifié C.E.



Ouroboros (de dos)

Le Sentinel



Commercialisé depuis 2008 par The Closed Circuit Research. Il est souvent considéré comme une version améliorée de l'Ouroboros, il existe en 3 versions: air, Trimix ou HélioX. Les faux poumons sont situés dans le dos. Il est réputé pour avoir les meilleures performances en terme de recyclage du CO_2 . Il est équipé d'un ordinateur pour la décompression et d'un afficheur facial de type H.U.D. Son poids (27 kg) et son prix (6900 €) sont moins élevés que ceux de l'Ouroboros. Il est certifié C.E.



3.2.2.2. Les mCCR

Ils ont été conçus pour palier certains risques potentiels des eCCR : dépendance à l'électronique qui peut se dérégler ou tomber en panne, coût d'entretien élevé et risque d'inattention du plongeur puisque l'électronique prend en charge la fabrication du mélange et la décompression.

Principe de fonctionnement

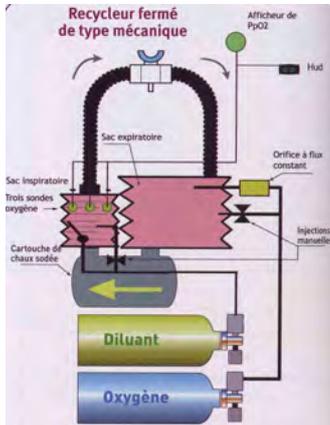


Schéma mCCR (8)

L'injection d'O₂ se fait en flux continu, comme dans un SCR, mais à un débit égal, et non pas supérieur, à la consommation métabolique, ce qui rend ce type de recycleur beaucoup plus économe en gaz.

Le plongeur ajoute manuellement l'oxygène nécessaire en fonction de la PpO₂ mesurée dans le sac inspiratoire.

L'adjonction de diluant se fait grâce à un A.D.V. et le plongeur a la possibilité de compléter la quantité d'oxygène ou de diluant manuellement à la descente.

Ces recycleurs sont de fonctionnement simple, moins chers à l'achat et à l'entretien. L'électronique n'intervient que pour afficher la PpO₂, comme dans un recycleur SCR.

Les principales machines de ce type sont actuellement :

Le Kiss



Classic Kiss

Commercialisé par Jetsam Technologie (Canada), il a été le premier recycleur mCCR destiné à la plongée. Son nom vient d'un principe édicté par son inventeur Gordon Smith « Keep It Simply Stupid », ce que l'on peut traduire par « gardez-le bêtement simple ». La moyenne pression est constante et non asservie à la pression ambiante. La première version est le Classic Kiss, commercialisé en 1998, suivi par le Kiss Sport en 2004, plus léger (20kg contre 24 pour le Classic) et plus petit. Il bénéficie, en option d'une électronique sophistiquée comme les autres recycleurs de sa catégorie. Son prix est compris entre 2500 et 3000 €. Il n'est pas certifié C.E.



Kiss Sport

Le rEvo



rEvo

Inventé par Paul Raymaekers, plongeur belge, c'est une machine compacte dont l'utilisation et la maintenance sont simples. Il est disponible en 2 tailles standard et mini. Comme pour le Kiss, l'injection d'O₂ se fait à débit constant, et la moyenne pression est constante, ce qui oblige le plongeur à compléter lui-même la quantité d'O₂ en fonction de la PpO₂ mesurée. Le rEvo II, disponible depuis mars 2008, est équipé d'un afficheur de PpO₂ (rEvodream) avec un répéteur « HUD ». Il existe en version manuelle ou électronique pilotée par un ordinateur Shearwater. Dans la version électronique, un solénoïde est fixé sur la grille des cellules O₂, mais des ajustements de la PpO₂ peuvent toujours être réalisés manuellement en cas de besoin. Le rEvo III est certifié CE depuis 2010. Son poids est de 31 kg son prix actuel de 6000 € en version mCCR et de 7400 € en version hybride eCCR/mCCR.



HUD et pièce buccale du rEvo

Le Voyager



Commercialisé par Aquatek (Italie) d'abord en version SCR, il existe depuis plusieurs années en version CCR. Contrairement au Kiss et au rEvo, la moyenne pression est asservie à la pression ambiante, comme le premier étage d'un détendeur en circuit ouvert. Le débit d'O₂ est moins stable à la descente et doit être réglé en fonction de la profondeur prévue.

Le modèle le plus récent est un hybride mCCR/eCCR : en cas de défaillance du plongeur, un système de gestion prend le relais pour gérer la PpO₂. Son prix actuel est de 5000 € en version mCCR et de 3000 € en version SCR. Il est certifié C.E.

DEUXIEME PARTIE DESCRIPTION DES ACCIDENTS EN RECYCLEURS

Certains de ces accidents sont communs avec la plongée en circuit ouvert, c'est pourquoi leur description se limitera aux aspects intéressant plus particulièrement le plongeur recycleur. Ils sont présentés par ordre de fréquence.

1. L'HYPERCAPNIE

Elle est définie par une PaCO₂ supérieure à 45 mmHg. C'est l'accident le plus fréquent lors de la pratique du recycleur en plongée militaire (32). En circuit ouvert, il est principalement lié à l'augmentation de la production de CO₂ par le plongeur, alors qu'en recycleur il est plus souvent lié à l'usage de la machine (3).

1.1 SYMPTOMES

Ils sont un peu différents de ceux décrits en circuit ouvert. Le mal de tête est souvent précoce, car le CO₂ a une action vasodilatatrice au niveau des artères cérébrales, ce qui entraîne des céphalées. Il est accompagné d'une angoisse sourde et d'une sensation de manque d'air. L'essoufflement se poursuit, comme en circuit ouvert, par deux phénomènes reflexes simultanés :

- l'augmentation de la fréquence respiratoire, pour tenter d'éliminer une plus grande quantité de CO₂,
- un « déplacement » du volume courant au niveau du volume de réserve inspiratoire, pour tenter de réduire le travail ventilatoire et limiter la production endogène de CO₂.

Si l'hypercapnie s'aggrave, le plongeur se retrouve en sueur, ressent des nausées et un mal de tête violent. Il éprouve de grandes difficultés à effectuer le moindre geste, en particulier à palmer pour maintenir son niveau d'immersion ou réaliser un rinçage de la boucle. La carbonarose s'installe progressivement avec excitation, désorientation, sensations ébrieuses, vertiges et, au stade ultime, perte de connaissance et noyade.

En outre, l'hypercapnie favorise :

- le pouvoir narcotique de l'azote : dans les années 60, Lamphier (2) a provoqué expérimentalement un état de narcose modérée chez des volontaires, suivie d'efforts physiques responsables d'une hypercapnie. Des signes d'essoufflement sont apparus, et il observa une aggravation rapide de la narcose suivie d'une perte de connaissance au bout de 5 minutes. La même expérience fut reconduite en éliminant l'azote du mélange gazeux : l'essoufflement persista, mais aucune narcose ni perte de connaissance ne survint.
- le déclenchement de la crise hyperoxique : le CO₂ provoque un effet vasodilatateur sur les artères cérébrales et potentialise la toxicité de l'O₂ à ce niveau (voir le chapitre consacré à l'hyperoxie).
- le déclenchement d'accidents de désaturation en facilitant la naissance et la croissance des bulles et en retardant l'élimination de l'azote au niveau des alvéoles pulmonaires. Comme le disait fort justement notre regrettée Penny Glover, experte dans l'enseignement des recycleurs, « le CO₂ est l'ennemi du plongeur ».

1.2. MECANISMES

Augmentation de production de CO₂ par le plongeur.

Dans l'étude réalisée par les militaires, l'hypercapnie représente 60% des cas d'accidents toxiques et 40% des accidents au total. Les causes sont essentiellement liées aux plongeurs dans cette série, en raison de l'importance des efforts physiques exigés et de la rigueur qui accompagne l'entretien du matériel.

L'évolution est beaucoup plus favorable que chez le plongeur recycleur loisir, en raison de l'importance des moyens logistiques mis en œuvre.

L'hypercapnie peut être favorisée, comme en circuit ouvert, par le manque de condition physique ou une inadéquation entre les efforts effectués et les possibilités d'élimination du CO₂.

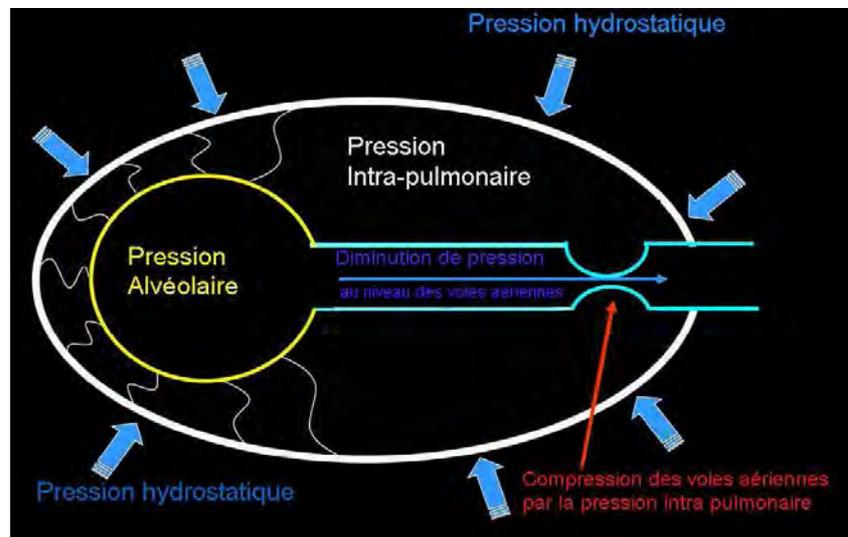
Sujets « reteneurs de CO₂ » (2,38).

Au cours de l'immersion, les modifications exercées sur la ventilation entraînent toujours un certain degré d'hypercapnie. Pour maintenir un taux acceptable de CO₂, l'organisme augmente la ventilation alvéolaire au prix d'une augmentation du travail ventilatoire. Certaines études (2) ont montré que se développait avec le temps chez nombre de plongeurs expérimentés, dont font partie la majorité des plongeurs recycleurs, une diminution de la sensibilité au CO₂. Cette tolérance à l'hypercapnie, favorisée par une hyperoxie constante lors de l'immersion, permet de diminuer le travail ventilatoire induit par la réponse normale à l'augmentation du taux de CO₂. Il s'agit donc d'un compromis, dont le caractère acquis a été confirmé par plusieurs expériences (38). Certains plongeurs aggravent ce phénomène en retenant volontairement leur respiration pour augmenter leur autonomie et diminuer leur travail ventilatoire. Ce qui pourrait sembler être un avantage présente cependant plusieurs inconvénients. Outre le fait d'augmenter la toxicité de l'oxygène et de l'azote, la survenue de l'essoufflement serait plus brutale chez le sujet « reteneur de CO₂ » que chez le plongeur « normal », car son taux de CO₂ est plus élevé au départ.

Expiration indépendante de l'effort. (2,38,39)

Phénomène décrit en 1969 (2), il a été mis en évidence sur le terrain par un tragique accident en recycleur, survenu en 2007 au cours d'une plongée souterraine. Le plongeur évoluait à -264 mètres pour récupérer le corps d'un autre plongeur décédé 10 ans auparavant. Il développa une hypercapnie à la suite d'un effort minime et, malgré de multiples rinçages de la boucle, il se noya suite à une syncope hypercapnique. Les causes de l'accident ont été déterminées à posteriori, car il avait embarqué une caméra vidéo, munie d'un système d'enregistrement du son, récupérée après l'accident.

En immersion, la densité des gaz augmente en fonction de la profondeur, ce qui entraîne un accroissement des résistances à l'écoulement au niveau des voies aériennes et une limitation du débit expiratoire. Au cours de l'expiration, la pression régnant dans les alvéoles diminue au fur et à mesure que le gaz progresse vers la trachée.



Compression des voies aériennes lors de l'expiration, d'après S.Mitchell (38)

Ce gradient augmente avec la densité des gaz respirés. Si le plongeur se force à expirer, il va appliquer une pression supplémentaire qui va comprimer les voies aériennes. Au lieu d'augmenter le débit expiratoire, l'expiration forcée va au contraire le diminuer : c'est l'expiration indépendante de l'effort. Elle est inefficace et produit une quantité supplémentaire de CO_2 . Les rinçages sont peu efficaces, car le CO_2 est produit aussi vite qu'il est éliminé.

Production de CO_2 liée à l'usage du recycleur

Travail ventilatoire et plongée en recycleur

Le travail ventilatoire représente la quantité d'énergie, exprimée en joules, nécessaire aux muscles respiratoires pour mobiliser les volumes gazeux pendant le cycle ventilatoire. Il est toujours augmenté en immersion en raison de plusieurs facteurs.

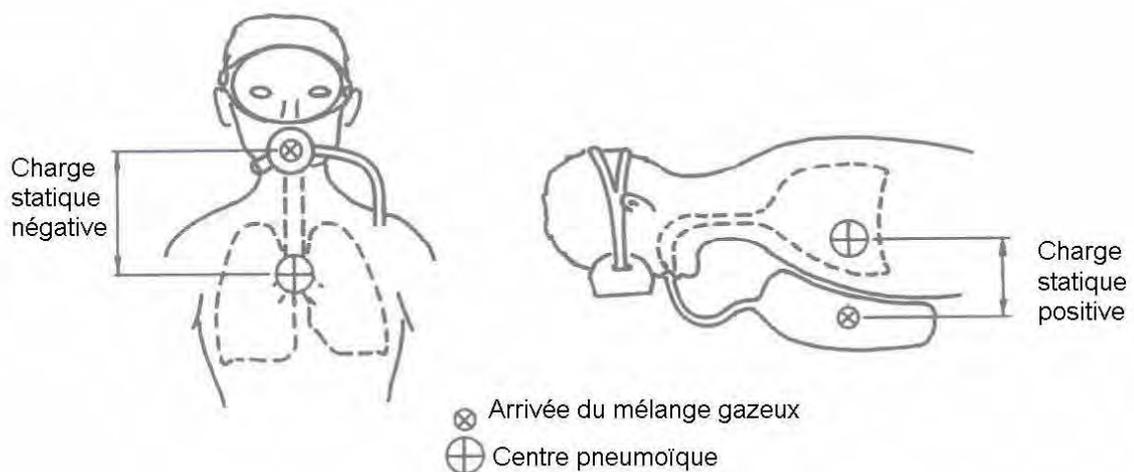
Des contraintes physiologiques :

- La redistribution de la masse sanguine au niveau du thorax (effet "bloodshift"), entraîne une diminution de la compliance pulmonaire : le poumon devient moins élastique et sera plus difficile à mobiliser.
- L'augmentation de la densité des gaz proportionnellement à la profondeur engendre des turbulences lors de leur écoulement dans les voies aériennes, responsables d'une diminution du débit expiratoire et de la ventilation/minute. En immersion, l'expiration devient active ce qui entraîne un surcroît de travail pour les muscles respiratoires et une augmentation de la production de CO_2 .

Des contraintes liées au matériel :

L'utilisation d'un recycleur entraîne une augmentation du travail respiratoire qui est toujours plus important qu'en circuit ouvert. En effet :

- Les résistances à la ventilation sont plus élevées en raison de la circulation des gaz au niveau de la boucle. Les deux éléments les plus sensibles sont la configuration de la pièce buccale et du canister de chaux sodée.
- Le plongeur recycleur doit fournir un effort plus important que le plongeur en circuit ouvert, car il doit mobiliser le volume d'air dans la boucle et commander l'ouverture et la fermeture des valves unidirectionnelles.
- Il existe une charge supplémentaire, causée par la pression hydrostatique, qui dépend de la position des sacs respiratoires par rapport au barycentre des volumes pulmonaires. Ce barycentre, appelé centre pneumoïque, constitue un point virtuel qui peut être assimilé au centre des poumons. Sa localisation change en fonction de la position du plongeur : 14 cm en dessous du sommet du sternum en position debout, et 7cm en arrière du sternum en position allongée.



D'après Warkander (47)

La charge pulmonaire statique est dite négative lorsque le centre pneumoïque est situé en dessous de l'embout buccal ou de l'arrivée de mélange au niveau du sac respiratoire, et positive dans le cas inverse.

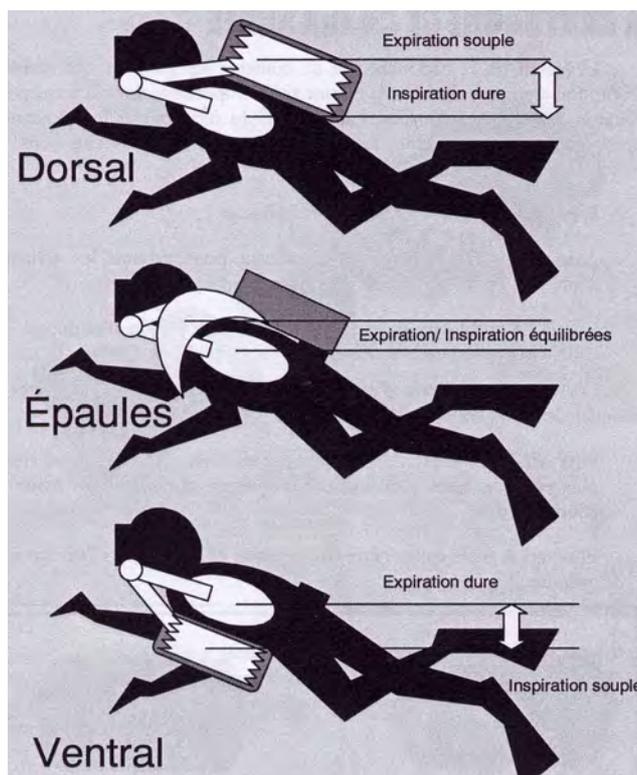
En recycleur, le confort respiratoire dépend de la position des sacs respiratoires par rapport au centre pneumoïque. Ce décalage induit des différences de pression hydrostatique qui facilitent ou au contraire rendent difficile la circulation des gaz lors de la ventilation. De façon générale une inspiration dure est moins confortable qu'une expiration dure.

En position horizontale :

- Lorsque les sacs sont placés sur le dos, la pression qui y règne est légèrement inférieure à celle qui règne dans les poumons. L'inspiration est donc plus difficile que l'expiration. Dans la catégorie des SCR, c'est le cas du Dolphin, cet inconvénient est compensé par l'injection d'oxygène à débit constant. Pour les CCR, on a le Sentinel et le rEvo.

- A l'inverse, si les sacs sont placés sur le ventre, l'expiration est plus difficile que l'inspiration. C'est le cas des recycleurs à oxygène pur utilisés par les militaires. Le plongeur doit particulièrement veiller à prévenir le risque de surpression pulmonaire à la remontée, surtout lorsque ces recycleurs ne sont pas équipés de soupape au niveau du sac expiratoire.

- Si les sacs sont placés au niveau des épaules, la différence de pression entre les sacs et les poumons est diminuée et il n'y a plus de différence sensible entre l'inspiration et l'expiration ; C'est le cas des recycleurs Inspiration, Evolution et MK VI Discovery par exemple.



Position des faux poumons et confort respiratoire (27)

Cependant ces notions sont à relativiser :

- Le facteur important est la distance entre l'embout buccal et le centre pneumoïque, qui peut varier selon la conception du recycleur indépendamment de la position des sacs
- D'autres facteurs sont au moins aussi importants, tels que :
 - Les charges élastiques engendrées par les tuyaux annelés et les sacs respiratoires dont l'élasticité des parois peut entraîner une gêne à l'expiration (7)
 - Le diamètre des tuyaux annelés
 - Le diamètre de la pièce buccale
 - La granulométrie de la chaux
 - La conception du canister : la forme radiale (MégaloDon, Ouroboros) diminue les résistances respiratoires dans le circuit
- Lors de la descente, l'écrasement des sacs peut augmenter l'effort ventilatoire.

1.3 RECYCLEURS ET NORME C.E. (7,13,47)

Le code du sport impose que tout recycleur commercialisé après 1990 respecte la norme EN 14143, à l'exception des recycleurs militaires qui dépendent des normes OTAN lorsqu'ils sont utilisés par l'armée. L'étude ergonomique du recycleur comporte deux étapes :

- Une étape sur simulateur de respiration pendant laquelle les différents constituants du recycleur sont testés séparément, puis l'appareil en entier.
- Une étape humaine en caisson hyperbare avec un plongeur qui effectue des efforts sur une bicyclette ergométrique au sec puis en immersion.

En ce qui concerne la mécanique ventilatoire, les mesures effectuées sur le simulateur permettent de construire une courbe débit/volume. Elle a un aspect en pente, contrairement à celle obtenue en circuit ouvert, car la pression est plus élevée au début de l'inspiration qu'au début de l'expiration ; La mesure entre ces deux points permet de mesurer la compliance de la boucle, c'est-à-dire sa distensibilité.

Courbe pression/volume au cours d'un cycle respiratoire (7)

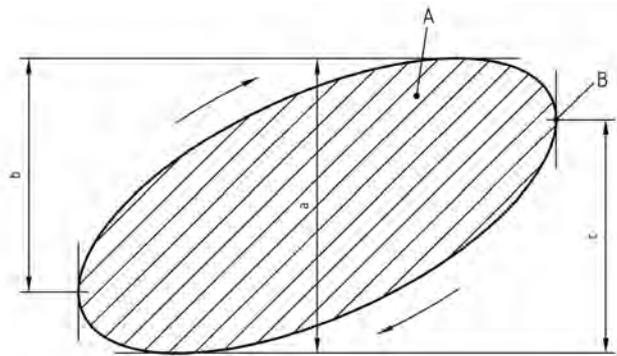
A : Travail ventilatoire

a : Pression pic à pic inspiration - expiration

b : Pression fin d'inspiration - pic expiration

c : Pression fin d'expiration - pic inspiration

B : Fin d'expiration



En pratique, on s'intéresse à deux mesures :

Le travail respiratoire :

Il est mesuré en calculant la surface comprise à l'intérieur de la boucle débit/volume, on l'exprime en Joules/l. Il est calculé pour 5 niveaux de ventilation/minute (VM)^o allant de 10 à 75 l/min.

Le travail respiratoire maximum (TM) est donné par la formule

$$TM = 0,5 + (0,3 \times VM)$$

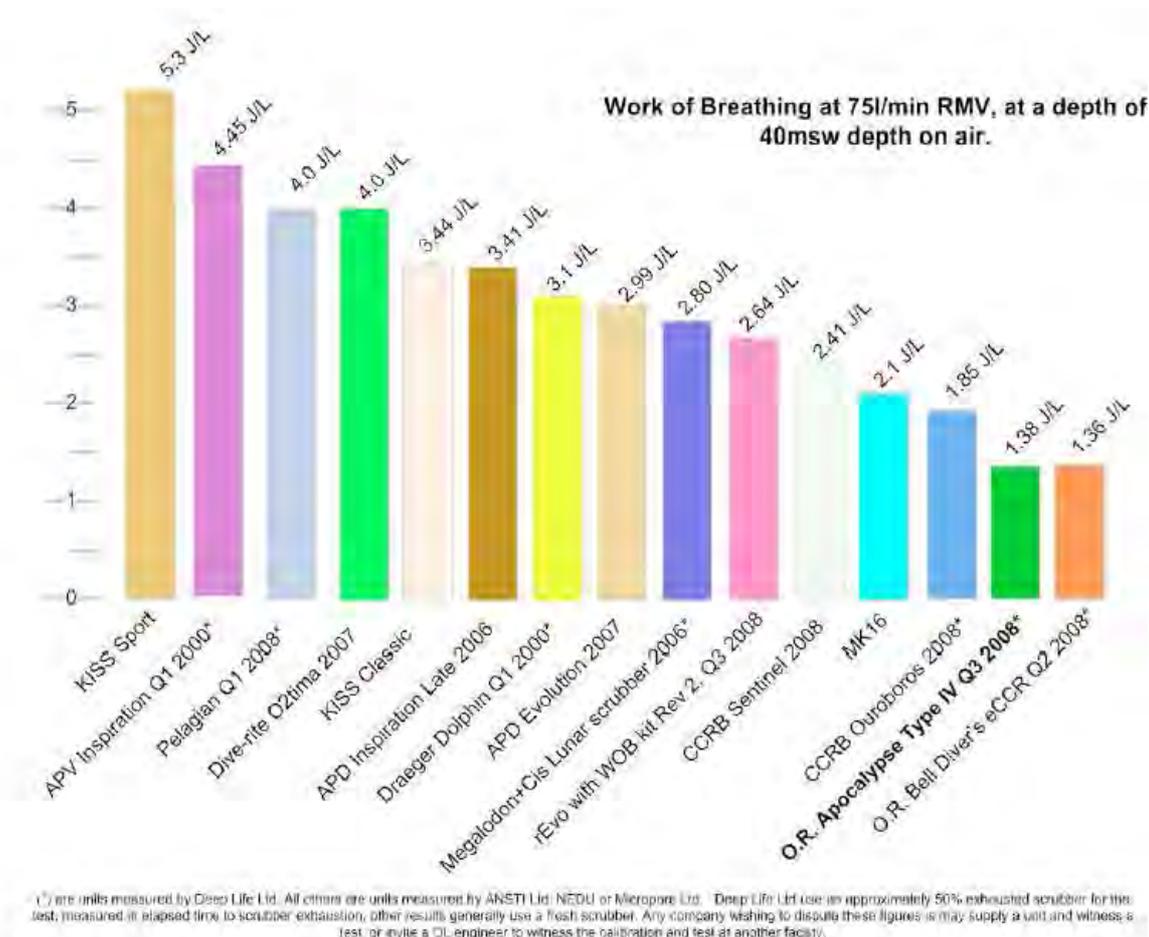
Il est donc de 2,75 Joules/l, ce qui est beaucoup plus élevé que celui d'un détendeur en circuit ouvert, dont la valeur est souvent inférieure à 1 J/l.

Les pics de pression inspiratoire et expiratoire :

Ils ne doivent pas dépasser 25 mb chacun, donc la distance entre les pics doit être inférieure à 50mb (grandeur a sur le schéma)

Pour ces 2 mesures, les tests sont réalisés sur un mannequin rotatif pour reproduire les mesures selon les différentes positions du plongeur (sur le ventre, sur le dos, sur le côté, tête en bas, tête en haut) selon différents degrés d'inclinaison.

Données obtenues selon les appareils (15)



La valeur du travail ventilatoire est importante en matière de risque d'hypercapnie. Aucune donnée n'est publiée par les constructeurs, qui considèrent ce sujet comme un secret de fabrication.

Le tableau ci-dessus est tiré du manuel du recycleur Apocalypse (15). Le travail respiratoire des différents recycleurs a été calculé pour une ventilation de 75l/min à une profondeur de 40 m.

Il faut cependant relativiser ces résultats pour plusieurs raisons :

- Les mesures ont été effectuées par plusieurs organismes américains, certains officiels comme l'US Navy, mais d'autres sont des intervenants privés.
- Les mesures marquées d'un astérisque ont été effectuées par le fabricant du recycleur Apocalypse qui obtient sans trop de surprise un des meilleurs résultats...
- Ces mêmes valeurs ont été obtenues avec un canister dont la chaux a été utilisée à 50% de sa capacité d'absorption, alors que les autres ont été réalisées avec une chaux neuve. Ceci explique probablement les mauvais résultats obtenus par certaines machines pourtant certifiées C.E, dont le travail respiratoire maximum devrait être inférieur à 2,75 J/l)

En fait, ces mesures comparatives ont surtout l'intérêt de classer les machines entre elles. On peut constater que le travail respiratoire, y compris pour les « meilleurs » de la série est bien supérieur à celui d'un détendeur en circuit ouvert, dont la valeur est le plus souvent inférieure à 1 J/l. Le recycleur est une activité qui demande une certaine condition physique pour limiter le risque de surproduction de CO₂ lié à la machine elle-même, surtout lors de plongées profondes.

1.4 PROBLEMES LIES A L'USAGE DE LA CHAUX SODEE (25,29,44)

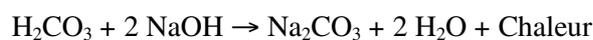
Utilisée pour éliminer le gaz carbonique, elle est d'une grande facilité d'emploi, d'une toxicité limitée et d'un coût peu élevé. Son pouvoir absorbant est lié à sa composition, et elle se présente sous forme de granulés, dont la composition et la taille varient selon les fabricants. Elle est composée à plus de 70% d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, d'eau, de soude NaOH , et de potasse KOH .

La réaction chimique avec le CO_2 se fait en 3 temps :

1. Le CO_2 se dissout dans l'eau libre des granulés pour former de l'acide carbonique.



2. L'acide carbonique réagit avec la soude pour former du carbonate de sodium, régénère l'eau consommée dans la réaction précédente et en produit en supplément.



3. Le carbonate de sodium réagit avec la chaux pour former du carbonate de calcium et régénérer la soude.



Cette dernière réaction est la plus lente et détermine la vitesse d'absorption de la chaux sodée.

Le carbonate de calcium se fixe sur les granules de chaux et en sature progressivement la surface. Par ailleurs, les réactions 2 et 3 produisent de la chaleur. Le plongeur respire un mélange réchauffé, ce qui augmente son confort et lui permet de limiter ses pertes caloriques.

D'autre part, l'élimination du CO_2 est plus efficace lorsque la température de la chaux est élevée, c'est pourquoi les canisters des recycleurs sont conçus pour limiter les pertes thermiques. La mise en route de cette réaction consiste à respirer un certain temps sur le recycleur juste avant l'immersion : c'est ce que l'on appelle communément « chauffer la chaux ». Même si les chaux actuelles ne nécessitent plus cette « pré-ventilation », on continue à enseigner cette manœuvre qui permet de s'assurer du bon fonctionnement de la machine.

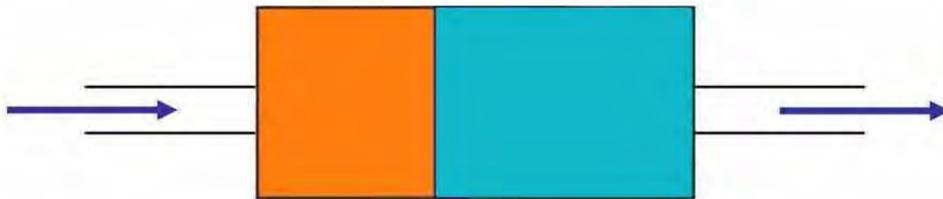
Plusieurs éléments importants sont à prendre en compte

- Lorsque l'eau est froide, le pouvoir de fixation de la chaux diminue, c'est pourquoi la plupart des fabricants recommandent de n'utiliser la chaux sodée qu'à partir d'une température de 4°C.
- La taille des granulés est habituellement comprise entre 1 et 4 mm :
 - si elle trop grande, la surface de contact avec l'air expiré sera réduite et elle sera moins efficace,
 - si elle est trop petite, les résistances et le travail respiratoire seront augmentés.

Ces deux situations risquent d'entraîner rapidement une hypercapnie. Un incident de ce type a été observé lors d'une utilisation de chaux sodée destinée aux respirateurs d'anesthésie, de taille plus réduite (3).

- Les poussières de chaux doivent être éliminées avant de remplir le canister, éventuellement par tamisage, car elles peuvent pénétrer dans le circuit respiratoire et créer un mélange avec l'eau de condensation et gêner le plongeur ou perturber le fonctionnement des cellules à O_2
- Le canister doit être rempli jusqu'au niveau requis, car des accidents hypercapniques mortels ont été observés avec des cartouches à demi remplies pour économiser la chaux !!!
- Une fois le canister refermé, la chaux doit être en légère compression, afin d'éviter la formation de chenaux préférentiels. Dans l'accident décrit au paragraphe consacré à l'expiration indépendante de l'effort, l'examen du recycleur a montré que la victime avait intercalé une rondelle de feutre de sa fabrication entre le couvercle et la cartouche de chaux. Cette rondelle avait une constitution et une épaisseur différentes de celles préconisées par le fabricant. Elle a augmenté le travail respiratoire du plongeur, et a contribué à son décès.

- La chaux sodée perd progressivement son efficacité, et doit être changée régulièrement. La production de CO₂ dépend de la consommation en O₂. Elle ne dépend pas de la profondeur mais des efforts fournis. La chaux est moins performante en profondeur et en eau froide, mais retrouve son efficacité lors de la remontée. Les durées d'utilisation, données par les fabricants, dépendent de plusieurs facteurs, et sont de l'ordre de 90 minutes par kg de chaux. Ces recommandations sont valables lorsque la chaux est neuve, la cartouche correctement remplie et la production de CO₂ normale, donc en dehors d'efforts importants. De nombreux accidents ont été observés lors de tentatives de records de durée d'utilisation de chaux sodée...
- Lorsque la chaux est utilisée au cours de plusieurs plongées, elle doit rester dans la cartouche et ne jamais en être sortie ni stockée, car on mélangerait la chaux usée et non usée, ce qui limiterait son efficacité



Ce dessin schématise un canister de type radial. Les flèches représentent le sens de circulation du mélange respiratoire. La chaux sodée saturée est dessinée en orange, la chaux encore active est dessinée en bleu. Si on mélange cette chaux, elle sera « uniformément » usée ; Il faudrait idéalement enlever la partie usée et la remplacer, ce qui est impossible à visualiser avec précision.

- Lors d'entrées d'eau à l'intérieur de la boucle, la chaux se compacte et la surface d'échange se réduit, ce qui diminue son pouvoir absorbant. Il peut aussi se créer des chenaux préférentiels (phénomène de channelling) par lesquels le CO₂ pourra passer sans être en contact avec la chaux. De plus, elle peut dégager des vapeurs nocives.
- En cas d'inondation de la boucle, la plongée doit être interrompue et la chaux doit être changée.

1.5 CONDUITE A TENIR EN CAS D'HYPERCAPNIE

Dés que le plongeur ressent un des premiers signes d'hypercapnie (angoisse, maux de tête, essoufflement), il doit immédiatement cesser tout effort, maintenir son niveau d'immersion, puis effectuer un rinçage de la boucle en soufflant par le nez et en injectant du mélange frais. Il ne doit pas remonter immédiatement, car la PpO₂ pourrait baisser brutalement. Si les signes persistent, il faut passer sur Bail Out et rejoindre la surface après avoir effectué les paliers nécessaires.

1.6 PREVENTION

Causes liées à l'augmentation de production de CO₂ par le plongeur:

- Il faut toujours garder une bonne condition physique, surtout en cas de plongée profonde, car l'usage du recycleur majore le travail ventilatoire en immersion par rapport à la plongée en circuit ouvert.
- Les mélanges à base de Trimix devraient être privilégiés à partir de 40 m afin de diminuer le travail ventilatoire dû à l'accroissement de densité du mélange respiré.

Causes liées à l'utilisation du recycleur :

- Il faut se concentrer lors du montage du recycleur et éviter d'être distrait ou dérangé durant les procédures de check list.
- Bien vérifier l'étanchéité du recycleur avant la plongée, ainsi que le fonctionnement des valves anti-retour de part et d'autre de l'embout.
- Utiliser la chaux préconisée par le fabricant et respecter les durées d'utilisation en fonction des critères évoqués plus haut.
- Changer la chaux selon les prescriptions des fabricants, et impérativement si elle a été mouillée.
- Remplir correctement le canister et ne jamais intercaler d'éléments bricolés au niveau de la boucle.
- En cas d'utilisation cumulée, il faut noter les durées d'utilisation sur le canister.

Tentatives d'évaluation du degré de saturation de la chaux sodée

Plusieurs pistes ont été explorées :

- Les indicateurs colorés **(25)**

Ils sont utilisés dans les respirateurs d'anesthésie, qui fonctionnent sur un principe comparable à celui des recycleurs SCR à débit constant ce qui permet de réaliser des économies considérables en gaz anesthésiques. La chaux est contenue dans un canister transparent, et prend une coloration violette au fur et à mesure que le degré de saturation augmente. Ces indicateurs sont inutiles et dangereux en plongée recycleur, car ils peuvent dégager des vapeurs toxiques lorsque l'appareil est exposé à la chaleur.

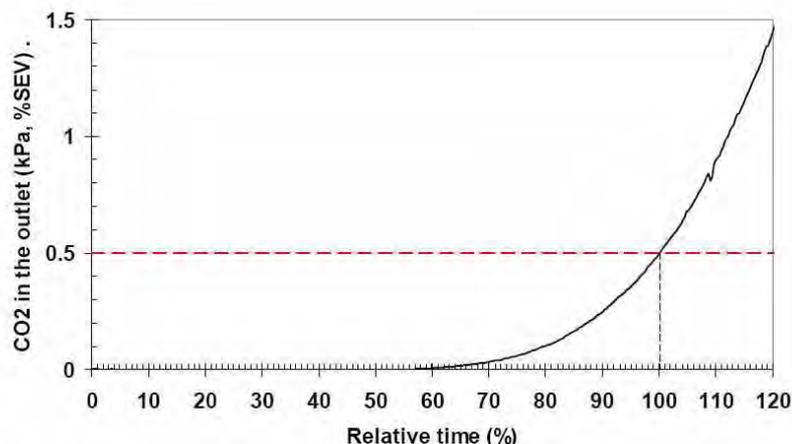
- La mesure de la PpCO₂ dans la boucle **(25,47)**

Les capteurs infrarouges de mesure du CO₂ existent depuis 20 ans en anesthésie, et ont été rendus obligatoires en 1994 par la généralisation de l'utilisation des respirateurs à recyclage de gaz. L'idée de les introduire en plongée recycleur s'est longtemps heurtée à des contraintes techniques importantes :

- leur indication peut être faussée par la condensation et l'humidité
- les valeurs changent en fonction de la pression ambiante
- ils consomment beaucoup d'énergie
- leur prix de revient est élevé

Des capteurs de CO₂ ont été mis au point et utilisés sur certains recycleurs, dont l'Apocalypse. Une alarme se déclenche quand le taux de CO₂ augmente dans la boucle et avertit le plongeur par l'intermédiaire d'un système de vibreur situé au niveau de l'embout buccal.

Cependant, cette avancée technologique a un inconvénient de taille.

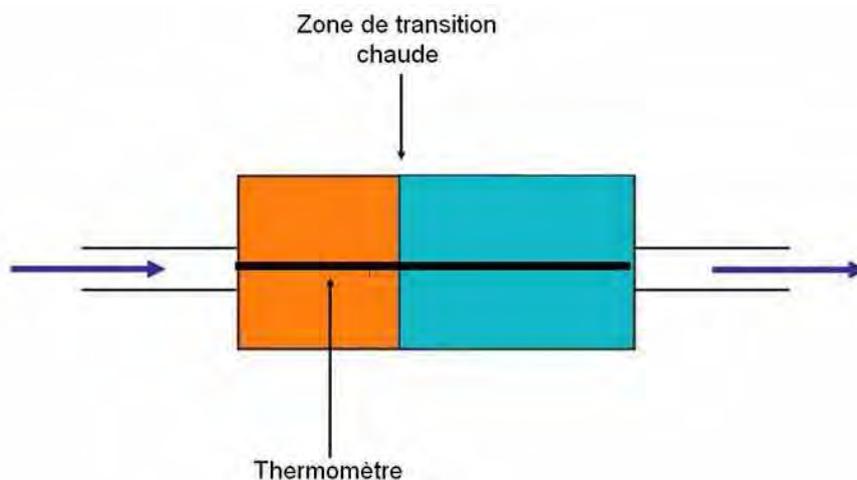


D'après Dan E. Warkander (47)

La courbe ci-dessus montre la mesure du CO₂ (en ordonnée) à la sortie du canister en fonction du degré de saturation de la chaux (en abscisse). On remarque que le CO₂ commence à augmenter lorsque l'usure de la chaux est comprise entre 60 et 80%. Avant ces valeurs, la mesure du taux de CO₂ expiré dans la boucle sera nulle ; Au delà, elle va augmenter de façon très rapide. Cette élévation très tardive réduit considérablement l'utilité d'un tel système.

- Capteurs de température de la chaux sodée (25,47)

La chaux sodée produit normalement de la chaleur lors de son utilisation. La quantité de chaleur va diminuer à mesure qu'elle se sature. Reprenons le schéma précédent.



Les flèches représentent le sens de circulation du mélange respiratoire dans le canister, la chaux sodée saturée est dessinée en orange, la chaux neuve en bleu. Le trait noir entre les zones bleu et orange représente une zone de transition où se déroule la réaction chimique entre le CO₂ et la chaux. Ce "front", qui se déplace dans le même sens que le mélange respiratoire, est plus chaud que les zones environnantes, d'où l'idée d'introduire un thermomètre à l'intérieur du canister, relié à la console du plongeur.



Thermomètre de l'Inspiration

Ce dispositif enregistre le déplacement du " front chaud " et renseigne sur le degré de saturation de la chaux présente dans le canister. Certains recycleurs haut de gamme (Inspiration, Sentinel,...) sont équipés de ce dispositif, qui semble à l'heure actuelle être la solution la plus intéressante pour mesurer le degré de saturation de la chaux. Cependant son prix de revient, environ 400 € pour l'Inspiration, rend son achat peu rentable par rapport à l'économie de chaux réalisable.

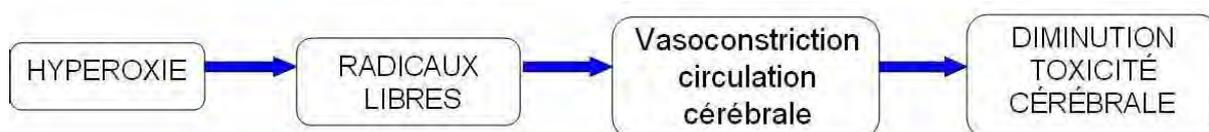
2. L'HYPEROXIE

2.1 TOXICITE NEUROLOGIQUE

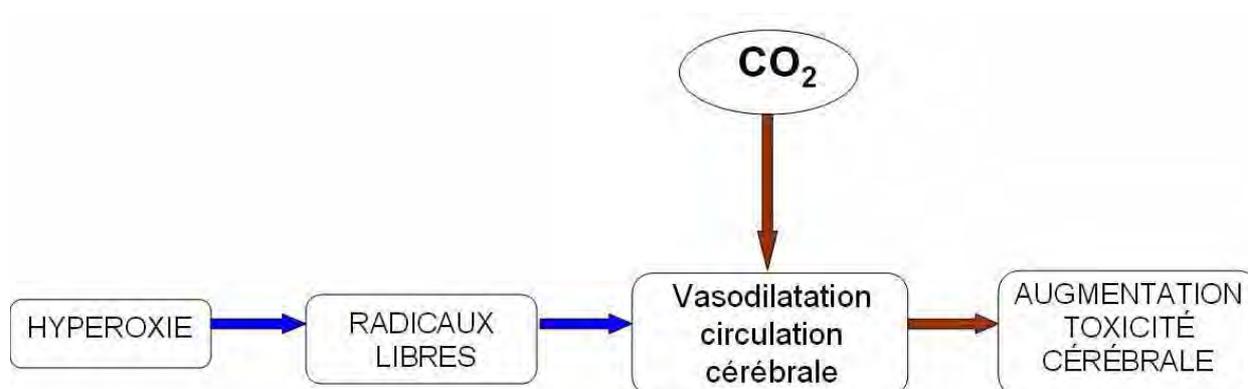
Deuxième cause d'accidents mortels en recycleurs en plongée militaire après l'hypercapnie (32), elle est essentiellement liée à l'utilisation des mélanges suroxygénés. Décrite pour la première fois chez l'animal par Paul Bert en 1878, elle a été étudiée chez l'homme pendant la deuxième guerre mondiale quand la marine italienne envoya des nageurs de combats équipés de recycleurs CCR à l'oxygène couler les bateaux de la flotte alliée. Un certain nombre de ces nageurs se noyèrent à la suite de crises convulsives attribuées à la respiration d'oxygène pur au cours de la plongée. Donald puis Lambertsen entreprirent des études expérimentales sur d'importantes séries de plongeurs militaires, ce qui permit de déterminer progressivement les facteurs de risques et les limites de tolérance à l'oxygène.

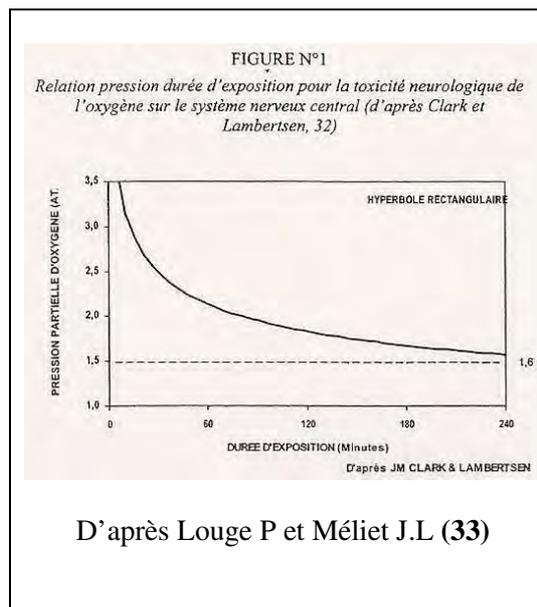
MECANISMES

Ils sont complexes et encore sujets à controverses. L'utilisation de l'oxygène par l'organisme entraîne la production de corps chimiquement instables appelés « radicaux libres de l'oxygène », en quantité infime, mais susceptibles de provoquer des crises convulsives par interaction avec les membranes lipidiques des cellules cérébrales. Lorsque la PpO_2 augmente, le cerveau se protège d'un afflux de radicaux libres en réduisant la quantité de sang qui lui parvient. Ce phénomène est possible grâce à une vasoconstriction des artères cérébrales



Dans certaines conditions, ce « verrou » peut être levé, lorsque la PpO_2 devient trop importante et surtout lorsque le CO_2 augmente de façon anormale. En effet, l'hypercapnie provoque l'effet inverse de celui de l'hyperoxie puisqu'il entraîne une vasodilatation des artères cérébrales et donc un afflux de radicaux libres.





Clark et Lambertsen ont établi expérimentalement que la toxicité cérébrale de l'O₂ était fonction de la PpO₂ et de la durée d'exposition à celle-ci. La courbe tend vers une limite de 1,6 bar en dessous de laquelle on peut observer des symptômes d'hyperoxie, mais pas de convulsions.

Cette relation est très variable d'un individu à l'autre, et parfois chez un même individu d'une façon peu prévisible. La toxicité est augmentée par le froid, la fatigue, l'effort physique, certains médicaments et l'alcool. Elle est diminuée en milieu sec (caisson hyperbare) et lorsque l'on pratique des « rinçages » : inhalation d'O₂ entrecoupée de périodes de ventilation en mélange normoxique. Mais le facteur le plus important semble être l'hypercapnie. Les sujets « reteneurs de CO₂ », dont nous avons parlé précédemment, sont particulièrement exposés puisque l'hypercapnie augmente le débit sanguin cérébral et, par conséquent, l'arrivée de radicaux libres au niveau du cerveau.

SYMPTOMES

La manifestation la plus grave est la crise hyperoxique, classiquement décrite comme une crise épileptique de type "grand mal" évoluant en 3 phases. Cependant, les observations relatées par les plongeurs Tek se résument le plus souvent à une perte de connaissance brutale précédée parfois par quelques secousses brèves au niveau des membres. Les signes avant-coureurs classiques (tremblements musculaires des petits muscles de la face ou du diaphragme, troubles sensitifs visuels et auditifs, troubles de l'humeur et du comportement, nausées...) sont le plus souvent absents, dans 60 et 90% des cas selon les auteurs. Ils ne sont pas spécifiques de l'hyperoxie car nombre d'entre eux peuvent être causés par une hypercapnie concomitante (carbonarose). Lorsqu'ils sont présents le déclenchement de la crise peut être très rapide, ce qui leur fait perdre leur valeur de signal d'alarme. De plus, il n'est pas évident qu'ils soient identifiés correctement par un plongeur qui n'en a jamais ressentis auparavant. Cependant, l'accélération brutale de la fréquence cardiaque en l'absence d'effort particulier semble constituer un signal d'alerte fiable (33)

CONDUITE À TENIR

Lorsque le plongeur est pris en charge à temps et de façon efficace, il récupère généralement sans séquelles. En cas de perte de l'embout par la victime, le sauveteur doit lui mettre en bouche l'embout de son propre Bail Out, puis le remonter à la surface à vitesse contrôlée. Il vaut mieux éviter de remettre en place l'embout du recycleur, car on continuerait à lui faire respirer un mélange hyperoxique, voire de la soude caustique, car le recycleur a de forts risques d'être inondé. Sauf en cas d'arrêt cardio-respiratoire, il faut rapidement faire respirer à la victime un mélange normoxique, sans quoi les crises vont se répéter, et mettre en jeu le pronostic vital.

Le risque de surpression pulmonaire supposé si l'on remonte l'accidenté pendant la phase tonique est rarissime : les 3 phases classiques sont le plus souvent absentes ou impossibles à différencier. Des expériences sur l'animal ont montré que la glotte reste ouverte et laisse sortir l'air des poumons pendant cette phase (46). De plus, les autopsies réalisées chez les plongeurs décédés après une crise hyperoxique n'ont pas montré de lésions de surpression pulmonaire. Lorsque la remise en bouche est impossible, l'accidenté doit être remonté à la surface tel quel, sans perte de temps.

PREVENTION

Exposition à l'hyperoxie

Les marines de différents pays ont établi des tables qui indiquent le temps maximum d'exposition à des PpO₂ données. La table la plus utilisée actuellement est celle de l'organisme américain NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Elle indique la durée maximale d'exposition à une PpO₂ donnée au cours d'une plongée unique et la durée maximale cumulée lorsque l'on effectue plusieurs plongées par 24 heures. Elle diminue considérablement lorsque la majorité des plongées sont effectuées à la limite de 1,6 bar. En cas d'effort important ou de plongée en eau froide, il est conseillé de ne pas dépasser la PpO₂ limite à 1,4 bar. Par ailleurs, la FFESSM recommande de

PpO ₂ (Bar)	Durée maximale d'une plongée (min)	Durée maximale cumulée par 24 heures (min)
1.6	45	150
1.5	120	180
1.4	150	180
1,3	180	210
1.2	210	240
1,1	240	270
1.0	300	300
0,9	360	360
0.8	450	450
0,7	570	570
0.6	720	720

ne pas dépasser 2 heures lors d'une plongée aux mélanges suroxygénés (5)

Pour tenir compte du risque de toxicité cumulée, Les Anglo saxons ont développé le concept de « compteur du système nerveux central » ou CNS Clock, repris par la majorité des fabricants d'ordinateurs de plongée. La méthode consiste à diviser le temps passé à respirer une PpO₂ donnée par la durée maximale autorisée par la table du NOAA. L'ordinateur cumule les données obtenues à différentes pressions partielles et exprime le résultat en pourcentage du compteur SNC (% CNS Clock). Lorsqu'il atteint 100%, la plongée doit être interrompue.

Cependant, la validité de ce concept est actuellement très discutée (33,46) en raison des susceptibilités individuelles importantes par rapport à la toxicité neurologique de l'O₂. Deux observations récentes (46) ont rapporté des convulsions chez des plongeurs ayant des compteurs SNC à 80% et même 50% ! Donc l'augmentation de la valeur du %SNC témoigne d'un accroissement de la probabilité de voir apparaître des signes d'hyperoxie, mais elle ne permet pas de déterminer leur nature ni le moment de leur apparition.

2.2 TOXICITE PULMONAIRE (37)

Décrite par J.Lorrain-Smith en 1890, elle apparaît pour des expositions prolongées à des FiO₂ supérieures à 50 % Les signes de toxicité débutent par une douleur rétro sternale et une irritation trachéale avec toux. Si l'exposition se poursuit, une gêne respiratoire apparaît avec fièvre et diminution de la capacité vitale. Contrairement à la toxicité cérébrale, la toxicité pulmonaire intervient pour des durées d'exposition longues, et des PpO₂ inférieures. Mais, comme dans le cas de la toxicité neurologique, on retrouve une notion de durée cumulative au cours des plongées. Des tentatives de modélisation, (OTU, UPTD, tables REPEX...) ont été proposées, mais elles représentent plus vraisemblablement des index de suspicion de toxicité que des limites de tolérance. Elles sont plus particulièrement destinées à des plongées à saturation effectuées dans le cadre professionnel ou aux séances répétitives en caisson hyperbare.

Comme la toxicité neurologique précède la toxicité pulmonaire, et que les durées d'exposition sont trop brèves, y compris en recycleur, il est classique de dire que la toxicité pulmonaire ne concerne pas le plongeur loisir. Cependant, des signes ont été observés chez des moniteurs professionnels qui utilisaient du Nitrox plusieurs fois par jour. Il s'agissait d'irritations (brûlures rétro sternales et toux) spontanément régressives après interruption des plongées pendant quelques jours (observation Dr E.Bergmann) Plus graves sont des accidents observés avec des CCR à l'O₂ pur. Les militaires, principaux utilisateurs de ces types de recycleur, n'en observent pas en raison de procédures de plongée très strictes.

Une manifestation plus sérieuse, avec gêne respiratoire et diminution de la capacité vitale a été retrouvée chez un vidéaste civil qui utilisait un CCR à O₂ pur (Castoro) et s'immergeait pendant des durées longues plusieurs jours d'affilée. Les signes ont régressé sans séquelle après arrêt temporaire des plongées et raccourcissement de la durée de celles-ci après reprise (observation Dr B.Schittly)

2.3 PRINCIPALES CAUSES D'ACCIDENTS HYPEROXIQUES EN RECYCLEUR

Ces accidents semblent être en augmentation. Dans une étude publiée par l'armée française en 2009 ils représentent 25% des accidents biochimiques et 16 % des accidents totaux. Ils concernent essentiellement les nageurs de combat qui utilisent des recycleurs CCR à O₂ pur, des plongeurs loisir qui utilisent des recycleurs de type eCCR, mais sont quasi inexistantes avec les recycleurs SCR. Ils sont graves chez les plongeurs loisir car ils aboutissent le plus souvent au décès par noyade. Ce n'est pas la crise hyperoxique qui tue le plongeur mais la noyade consécutive à la perte de l'embout. Celui-ci est souvent impossible à remettre en bouche en raison de la contraction extrême des mâchoires pendant et après la crise. La mortalité est exceptionnelle chez les militaires car ils sont sanglés en binôme afin de pouvoir se porter assistance et portent une sangle buccale permettant le maintien de l'embout en bouche.

Non respect des profondeurs plancher

Les plongeurs concernés ont une obligation réglementaire de suivre préalablement une formation approfondie à l'utilisation des mélanges suroxygénés avant d'aborder la pratique des recycleurs **(12)**, c'est pourquoi cette cause n'est jamais retrouvée comme mécanisme principal dans le déclenchement de ce type d'accident. Le dépassement accidentel peut se produire secondairement en cas de perte de connaissance par hypoxie, ou lors d'une hypercapnie associée, responsable d'une carbonarcose. En effet, lorsque le plongeur ne fournit plus d'effort de palmage, le recycleur a tendance à l'entraîner vers le fond.

Dépassement des durées d'exposition à l'hyperoxie

Plusieurs accidents mortels ont été provoqués par des plongées profondes cumulées et rapprochées. Une mauvaise interprétation de la notion de compteur SNC est souvent retrouvée. Certains plongeurs imaginent à tort que les accidents ne peuvent se produire qu'à partir du moment où celui-ci atteint ou dépasse 100 %. Or une crise convulsive a été observée à un seuil de 50 % chez un plongeur ayant atteint les 100 % 28h auparavant **(46)**. Certains décès ont été causés par des planifications qui admettaient des % compteur SNC atteignant 150 et même 270 % ! **(16)**

Confusion dans les mélanges utilisés

Cause majeure de décès par hyperoxie chez le plongeur Tek en circuit ouvert, il arrive plus rarement en recycleur, lors d'une confusion entre Bail Out et bloc destiné à la décompression, par distraction ou lors d'une hypercapnie responsable d'une carbonarcose.

Injection inappropriée d'O₂ dans la boucle par le plongeur.

Un accident d'évolution favorable a été observé lors d'une injection manuelle accidentelle d'O₂ pur dans la boucle, à la place du diluant lors de la phase de descente. Le plongeur a reconnu des signes avant-coureurs d'hyperoxie lors de la remontée et a eu le temps de passer sur Bail Out. Les injecteurs manuels d'oxygène, apanage des recycleurs mCCR, sont parfois aussi présents sur les recycleurs eCCR pour gérer la plongée manuellement en cas de panne du système de gestion électronique, mais ils peuvent être source de confusion.

Défaillance des cellules à O₂

Un excès de CO₂ dans la boucle peut fausser l'analyse des taux d'oxygène en minorant les chiffres affichés. Lorsque le plongeur effectue un rinçage de la boucle, les cellules n'affichent pas le résultat escompté : les chiffres ne bougent pas ou de façon anormalement lente. On peut observer le même phénomène en cas de défaillance du système de compensation de mesure de l'O₂ en fonction de la température ; Les cellules doivent régulièrement être remplacées : plusieurs accidents ont été provoqués par l'utilisation de cellules en fin de vie, à l'origine d'indications erronées.

Mauvais calibrage des cellules à O₂

Il a été à l'origine de plusieurs accidents mortels en eCCR. Lors de la check list avant la plongée, le système de gestion électronique invite le plongeur à effectuer un calibrage des cellules à O₂. Selon le modèle de recycleur, cette calibration commencera avec l'oxygène pur contenu dans la bouteille (Inspiration, Ouroboros, rEvo, MK6 discovery ...) ou avec l'air ambiant (Sentinel, ...) parfois avec l'un ou l'autre au choix de l'utilisateur (Mégalodon, Voyager)

Cette phase de calibration est cruciale et toute erreur peut être fatale : en cas de calibration à l'oxygène, il faut être sûr de la pureté de celui-ci, car on calibre un système avec un mélange non vérifié. Il paraît plus logique et sécurisant de débiter la calibration avec l'air ambiant, dont la composition est connue. Sur les modèles qui permettent de calibrer indifféremment à l'O₂ pur ou à l'air ambiant, il importe que l'utilisateur renseigne correctement le logiciel sur la nature du gaz utilisé. Un accident mortel survenu en 2007 a été causé par une calibration à l'air ambiant que l'utilisateur a indiqué à la machine comme étant de l'O₂ pur. La PpO₂ a été fortement sous évaluée et le plongeur est décédé d'une crise hyperoxique à 80 m de fond.

Blocage du solénoïde en position ouverte

Il provoque l'admission massive d'O₂ dans la boucle et la respiration de mélanges très hyperoxiques. Lorsque le blocage se produit en surface, il entraîne un échec de calibration, des difficultés à tenir les setpoints (Cf. page 12), et le déclenchement de l'alarme de haute pression en O₂. Par ailleurs, les faux poumons se remplissent et gênent l'immersion du plongeur.

Au fond, on observe les mêmes symptômes, on remarque le remplissage des faux poumons et on entend le solénoïde injecter de l'O₂ en permanence. Il faut rincer la boucle avec le diluant pour faire baisser la PpO₂, ou fermer la valve de la bouteille d'O₂ et passer sur Bail Out. Plus insidieusement, il peut s'agir d'une petite fuite interne au niveau des joints de l'inflateur d'oxygène, qui va entraîner une augmentation progressive de la PpO₂ au fur et à mesure de la descente.

Plusieurs accidents mortels ont été observés en eCCR, le dernier datant de mai 2010 en Egypte à - 147 m avec un recycleur garanti jusqu'à - 100m

D'autres accidents ont été provoqués par un défaut d'entretien du recycleur, (solénoïde bloqué par des cristaux de sel ou de sable), l'utilisation d'un solénoïde non conforme (bricolage effectué par l'utilisateur) ou une batterie déchargée (16)

Le solénoïde est une pièce fragile et sensible. Il doit être propre et bien lubrifié, et il faut vérifier régulièrement l'état du filtre protecteur. Dans l'industrie spatiale, les systèmes utilisés sont redondants et utilisent simultanément 2 solénoïdes (20).de technologie différente pour prévenir le risque d'une panne de même type au même moment.

Dysfonctionnement des logiciels contrôlant la PpO₂

Plusieurs incidents ont été rapportés (16,18), notamment avec le constructeur leader du marché, lorsque des erreurs au niveau du software ont perturbé l'admission d'O₂ par le solénoïde. Un accident hyperoxique non mortel est survenu chez un plongeur alimenté en O₂ pur à 30 m sans déclenchement d'aucune alarme. Le problème a été corrigé sur les versions ultérieures du logiciel, mais aucun rappel des anciennes machines en circulation n'a été effectué par le constructeur (16)...

Un autre accident peut être provoqué par la conception du logiciel lui-même. Lorsque les 3 cellules d'analyse d'O₂ donnent des indications différentes, le système prend comme référence la valeur moyenne donnée par les 2 cellules les plus proches. Un accident non mortel a été rapporté (16). au cours d'une plongée en eCCR au cours de laquelle 2 cellules ont donné simultanément des indications proches mais erronées, alors que la troisième cellule donnait la bonne valeur. La PpO₂ affichée était de 1,2 bar, ce qui a provoqué l'ouverture du solénoïde alors que la PpO₂ était en réalité de 3 bars.

Prise de médicaments par les plongeurs :

Ils peuvent être responsables d'une augmentation importante de la sensibilité à l'O₂ chez certains sujets. C'est un facteur favorisant rarement retrouvé, car rarement recherché. Plusieurs accidents mortels ont été recensés en recycleur (46) :

- Une crise hyperoxique avec convulsions à PpO₂ faible (1,36 ATA). Au cours de l'enquête sur cet accident survenu à l'étranger, on a découvert que le plongeur avait pris un cocktail de 8 médicaments parmi lesquels 2 décongestionnants nasaux à base de pseudo-épinéphrine et des médicaments contre l'asthme (Ventoline et Théophylline), divers antalgiques et anti diarrhéiques.
- Un cas identique est survenu à 30 m de profondeur (PpO₂ 1,51 ATA), impliquant encore la pseudo-épinéphrine et un antihistaminique.
- Un autre cas, associé à la prise d'un décongestionnant nasal et d'une pilule contraceptive (hors de cause), a entraîné une crise convulsive à 48 m avec contraction des mâchoires, empêchant la remise de l'embout en bouche.

3. L'HYPOXIE

Troisième cause d'accidents par ordre de fréquence après l'hypercapnie et l'hyperoxie, ils représentent, selon la marine nationale, 15% des accidents toxiques et 10 % des accidents totaux. C'est un des accidents les plus graves, car il se résume le plus souvent à une perte de connaissance brutale avec perte de l'embout et noyade. Il ne laisse souvent aucune trace lors de l'autopsie des plongeurs décédés.

3.1. SYMPTOMES

L'accident hypoxique survient lorsque la PpO₂ descend en dessous de 0,16 bar et se traduit le plus souvent par une perte de connaissance brutale, parfois accompagnée de quelques mouvements convulsifs. Plus rarement, lorsque la PpO₂ chute progressivement, la perte de connaissance peut être précédée par des signes annonciateurs tels qu'une augmentation de la fréquence respiratoire avec sensation d'étouffement, une hypersudation, une angoisse ou des nausées. Lorsque l'accidenté est récupéré, il n'a généralement aucun souvenir de son malaise ni des circonstances qui l'on provoqué.

3.2. MECANISME

L'accident hypoxique survient lorsque le plongeur respire un mélange pauvre en O₂ par rapport à la profondeur à laquelle il évolue. Cet accident survient souvent à la remontée ou en surface lorsque la PpO₂ diminue rapidement. Il est surtout fréquent en SCR, et survient plus rarement en CCR sauf en cas de panne de batterie, de non démarrage de l'ordinateur ou lorsque la bouteille d'O₂ n'a pas été ouverte.

Absence de vérification de la PpO₂ par le plongeur

Le plongeur recycleur doit connaître en permanence la PpO₂ régnant dans la boucle, en contrôlant régulièrement ses instruments, particulièrement lors de la phase de remontée où s'observent les baisses de PpO₂ les plus rapides. Comme le dit Martin Parker, concepteur du Buddy Inspiration, « Si on ne connaît pas sa PpO₂, le problème n'est pas de savoir si on va mourir en plongée mais juste où et quand ! »

Le code du sport français rend obligatoire le fait que le recycleur soit « muni d'un dispositif permettant de renseigner le plongeur lorsque la pression partielle d'oxygène inspiré n'est pas comprise entre les valeurs minimales et maximales définies à l'article A. 322-91 » soit. 0,16 bar et 1,6 bar. Malheureusement, cette mesure n'est pas obligatoire dans tous les pays, et lors de l'achat d'un recycleur, le dispositif de contrôle de la PpO₂ en CCR ou de la bouteille de mélange en SCR est alors proposé en option.

Fermeture de la bouteille d'O₂

Elle peut être volontaire, lorsque la PpO₂ augmente anormalement, ou involontaire à l'occasion d'un oubli lors de la préparation du recycleur ou tout simplement lorsque la bouteille d'O₂ est vide. Le plongeur respire un mélange qui devient progressivement hypoxique, puisque le renouvellement de l'oxygène dans la boucle n'est plus réalisé. S'il ne surveille pas sa PpO₂ ou que son système de contrôle est défaillant, la syncope hypoxique surviendra dans un délai de l'ordre de 2 minutes. Cet incident pour le moins stupide a provoqué de nombreux accidents, le plus souvent mortels. Il peut survenir à la surface en début de plongée ou en faible profondeur (piscine) **(16)**.

Défaillance des cellules à O₂ ou du système électronique contrôlant la PpO₂

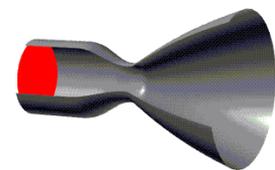
On retrouve les causes développées dans le paragraphe consacré à l'hyperoxie. Il faut aussi tenir compte de la durée de réponse des cellules, qui peut varier de 5 à 30 secondes selon les modèles **(29)**. Le système électronique devrait tester la vitesse de réaction des cellules à O₂ pendant la check list **(16)**.

Par ailleurs, la calibration doit toujours s'effectuer en surface, à pression atmosphérique. En cas d'arrêt puis de redémarrage du logiciel en immersion, suite à une rupture d'alimentation électrique par exemple, le système ne doit jamais être recalibré sous l'eau car les indications données par les cellules à O₂ seront faussées par l'augmentation de la pression ambiante.

Défaut d'entretien du système d'injection d'O₂

Dans le cas des SCR à débit massique (Dolphin, Ray) le maintien de la FiO₂ au niveau de la boucle dépend du débit d'O₂ à travers la buse d'injection, qui possède un orifice de très petit diamètre (de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres). Pour que le débit reste constant, il faut que la pression à l'entrée de la buse soit toujours supérieure au double de la pression ambiante.

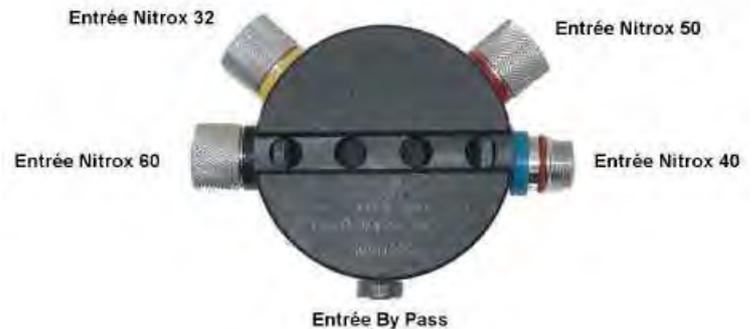
Plus le mélange injecté est riche en O₂, plus l'orifice est petit et plus le débit d'injection d'O₂ dans la boucle devient faible. Si l'orifice est obstrué par des impuretés (sable, sel...), le débit d'O₂ diminue et le mélange respiré devient progressivement hypoxique. Ce problème peut être facilement éliminé en vérifiant le débit attendu à la sortie de la buse au cours de la check list d'avant plongée. Lors de la phase de descente, la PpO₂ et la pression ambiante augmentent simultanément. Le danger vient de la diminution du gradient de pression en amont et en aval de la buse qui a tendance à abaisser le débit d'injection d'O₂ dans la boucle, ou bien de l'absence d'injection de diluant pendant cette phase.



www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/mflow.html **(3)**

Erreur de branchement au niveau des injecteurs multiples des recycleurs SCR

Le Dolphin possède un injecteur équipé de plusieurs buses. L'utilisateur doit s'assurer de brancher le tuyau d'alimentation sur l'entrée correspondant au mélange utilisé. S'il se trompe en utilisant une buse correspondant à un mélange plus pauvre en O_2 , le problème se limitera à une diminution de son autonomie, mais s'il utilise une buse correspondant à un mélange plus riche, l'injection d' O_2 sera réduite et le risque d'hypoxie augmentera de façon importante.



Injecteur du Dolphin (3)

Défaut de fonctionnement du système d'injection dans le recycleur eCCR avec blocage du solénoïde en position fermée

Souvent dû à un défaut d'entretien par l'utilisateur. Il se détecte en principe lors de la check list avant la plongée.

3.3. CONDUITE A TENIR

Si le plongeur ressent des signes annonciateurs ou que ses instruments indiquent une PpO_2 abaissée, il doit immédiatement passer sur Bail Out car la perte de connaissance peut être foudroyante.

Si l'on assiste une victime inconsciente, il faut arrêter d'urgence la ventilation du mélange hypoxique. Si l'embout est encore dans la bouche de la victime, et que la pièce buccale est équipée d'un B.O.V, on peut basculer celui-ci sur la position « Bail Out ». Dans le cas contraire, on introduira le deuxième étage du système Bail Out dans la bouche de l'accidenté après avoir vérifié son fonctionnement. Il faut ensuite remonter la victime à vitesse contrôlée et pratiquer les manœuvres de premier secours adaptées à la situation dès le retour en surface : réanimation cardio-pulmonaire et/ou oxygénothérapie et évacuation. Le pronostic de cet accident est globalement sombre, mais une prise en charge rapide et adaptée permet d'obtenir une guérison sans séquelle.

3.4. PREVENTION

Les militaires ne déplorent aucun décès par hypoxie en raison du port systématique d'une sangle buccale avec protège lèvres et de la surveillance de plongeurs : binôme pendant les missions ou instructeur en circuit ouvert pendant les périodes de formation.

La formation du plongeur joue un rôle important dans la prévention de cet accident qui se met souvent en place avant la plongée : entretien du matériel, vérification des mélanges utilisés, rigueur et concentration dans la conduite des procédures de check list avant la plongée.

La remontée constitue une phase très dangereuse en raison de la baisse brutale de la PpO_2 liée à la baisse de la pression ambiante et à l'augmentation du volume de gaz au niveau de la boucle, qui entraîne une chute de la FiO_2 par dilution. L'utilisation d'un gaz insuffisamment riche en O_2 , un débit d'injection trop faible ou le choix d'un setpoint bas inadapté peuvent entraîner une hypoxie. Il est souhaitable d'effectuer un rinçage de la boucle avant de remonter. En cas de plongée profonde, il est prudent de prévoir un mélange de décompression relais riche en O_2 que l'on puisse utiliser dans la zone de 10 à 15 mètres. L'approche de la surface devrait toujours être effectuée avec un mélange dont la concentration en O_2 est supérieure à 50% (29)

La surveillance de la PpO₂ affichée par les instruments est essentielle pendant la plongée :

- dans tous les cas, le plongeur doit immédiatement passer sur Bail Out si la PpO₂ est inférieure à 0,18 bar
- en recycleur de type SCR, on tient compte de la PpO₂ attendue en fonction de la profondeur d'évolution et du mélange respiré. Par exemple, si l'on respire du Nitrox 50/50 à 20 mètres, la PpO₂ théorique attendue dans la boucle se calcule ainsi (Cf. page 8) :

$$(P_{abs} \times \%d'O_2) \times 80\% = (3 \times 0,5) \times 0,8 = 1,2 \text{ bar.}$$

Si, par exemple, la valeur affichée est de 1 bar, on effectue un rinçage.

- En recycleur de type mCCR, on tient compte du set point bas défini avant la plongée et on injecte manuellement de l'O₂ par le by pass lorsque la PpO₂ chute en dessous de cette valeur.

4. L'INGESTION DE CHAUX SODEE (29,44)

Il s'agit d'un accident souvent décrit, très désagréable mais en général bénin.

4.1 MECANISME

L'incident est généralement causé par une inondation de la boucle en cas d'entrée d'eau dans le circuit, et plus rarement lors d'un mélange de poussière de chaux avec l'eau de condensation produite par la ventilation. La cause principale est l'oubli de fermer la pièce buccale quand la mise à l'eau ne se fait pas avec l'embout en bouche. Il peut également s'agir d'une erreur commise lors du montage du recycleur, non détectée lors de la check list d'avant plongée, ou plus rarement d'une entrée d'eau apparaissant pendant la plongée sur un matériel vétuste, mal entretenu ou ayant subi un choc important lors de la mise à l'eau ou pendant l'immersion.

4.2 SYMPTOMES

On entend généralement un bruit caractéristique lors d'une entrée d'eau à l'intérieur de la boucle (glouglous), puis on sent l'arrivée d'un liquide ayant un goût d'eau savonneuse, plus ou moins chargé de particules au niveau de la bouche. On ressent rapidement une sensation de brûlure au niveau des lèvres, de la langue et du palais qui va en s'accroissant, accompagnée d'un larmoiement et d'un écoulement nasal. Lorsqu'elle est inhalée au niveau de la trachée, la soude provoque une toux violente parfois suivie d'une sensation de brûlure lors des mouvements respiratoires.

Après le retour en surface, il persiste une sensation de gorge sèche et douloureuse, aggravée par la prise de boisson. La douleur persiste pendant quelques heures, puis les symptômes régressent entièrement en moins de 24 heures.

4.3. CONDUITE TENIR

Il faut immédiatement fermer la pièce buccale et ventiler sur le détendeur de secours du Bail Out, puis rincer la bouche à l'eau douce ou salée le plus souvent possible en immersion, toutes les 1 à 2 minutes environ. La plongée doit être interrompue après avoir effectué les paliers éventuels, puis il faut continuer le rinçage de la bouche avec les liquides disponibles après le retour en surface. On préférera les liquides sucrés pour évacuer le goût âcre qui persiste souvent dans la bouche.

La soude est généralement ingérée en faible quantité ce qui rend l'incident bénin. Dans les rares cas d'ingestion massive, narcose à l'azote ou au CO₂ ou perte de connaissance empêchant de « recracher » le liquide caustique, l'absorption peut être plus importante. Dans ce cas, il ne faut pas essayer de faire vomir le plongeur, mais le faire évacuer, après l'avoir placé sous oxygénothérapie en cas de gêne respiratoire.

4.4. PREVENTION

Elle passe par un montage correct du recycleur et la réalisation des tests de mise en pression de la boucle avant la plongée, pour vérifier son étanchéité.

On réalise d'abord le test positif, soupape de surpression fermée, en gonflant la boucle en expirant dans l'embout jusqu'à ouvrir cette soupape de surpression. On ferme ensuite la pièce buccale, puis on pose une charge de 1 kg sur le sac inspiratoire. L'ensemble sac respiratoire et boucle doit rester gonflé, sans affaissement visible pendant une durée de 2 à 3 minutes.



Bernard Schittly réalise le test positif sur un recycleur Dolphin

Ensuite, on réalise le test négatif en vidant l'air contenu dans la boucle jusqu'à voir l'écrasement du tuyau annelé. L'affaissement doit persister pendant 2 à 3 minutes sans que les tuyaux ne se regonflent



Réalisation du test négatif

Lorsque la mise à l'eau ne se fait pas avec l'embout en bouche, il faut bien veiller à la fermeture de la pièce buccale.

Si l'on perçoit des bruits hydroaériques importants durant la plongée, ou des brûlures au niveau de la bouche, il faut fermer la pièce buccale et passer sur Bail Out. Il faut immédiatement signaler l'incident à ses coéquipiers, et ne pas attendre en espérant que la situation s'améliore, car c'est plutôt l'inverse qui risque de se produire !

5. LE RISQUE INFECTIEUX (24,29,44)

La pratique du recycleur peut rarement être à l'origine de maladies infectieuses, soit transmises d'une personne à l'autre lors d'un échange de machines, soit chez un utilisateur qui néglige les procédures de nettoyage et de désinfection de son propre matériel.

Il peut s'agir de maladies bactériennes (staphylococcie, tuberculose...), virales (herpes, hépatites A, B, C), parasitaires (amibes...), ou fongiques (candidose...). La contamination par le VIH n'a jamais été observée avec la salive. Si la transmission interhumaine par échange d'embout en circuit ouvert reste théorique, des infections respiratoires sévères à type de pneumonies ont été observées avec des machines mal entretenues (observation personnelle Dr B.Schittly). Les personnes immunodéprimées sont particulièrement exposées. Cependant, même si le risque infectieux est statistiquement rare, le rinçage et la désinfection du matériel doivent faire partie intégrante de la formation du plongeur recycleur.

5.1. MECANISME

Avant la plongée, les germes peuvent déjà être présents dans la pièce buccale, les tuyaux annelés ou les sacs respiratoires lorsque le matériel n'a pas été rincé et désinfecté correctement lors de l'utilisation précédente. Plus rarement, la contamination peut avoir lieu lors de la phase de montage du recycleur par des personnes à l'hygiène douteuse. Pendant la plongée, la salive s'écoule dans les tuyaux annelés, pouvant amener des agents infectieux jusque dans les sacs expiratoires. L'air humide et chaud leur fournit un milieu de culture idéal pour leur développement.

5.2. PREVENTION

Le lavage suivi de la désinfection du matériel doit être systématique à la fin de la journée, et impératif lors d'un changement d'utilisateur, comme dans le cas de séances d'initiation de type baptême, ou lors d'une utilisation en structure commerciale.

La procédure concerne les tuyaux annelés, la pièce buccale et les sacs respiratoires. Elle se déroule en 4 phases :

- Le rinçage :

Par immersion dans l'eau savonneuse pour diminuer l'adhérence des micro-organismes aux parois du système.

- La désinfection :

Par immersion dans un second bac contenant un désinfectant pendant 15 minutes. On peut utiliser l'eau de javel au 1/10ème, mais le rinçage doit être abondant en raison du risque de corrosion de certaines pièces et pour éliminer l'odeur du produit.

La Commission Médicale et de Prévention de la FFESSM recommande l'utilisation de produits à base d'ammonium quaternaires tels que :

- l'Esculase© du laboratoire Rivadis™ dilué à 0,70 % : 2 sachets de 35 g dans 10 litres d'eau (pH après dilution : 10.5 ± 0.5)

- l'Hexanios© du laboratoire Anios™ dilué à 0,5 % : 1 dose de 50 ml dans 10 litres d'eau. L'avantage de ce produit est, qu'après dilution, le pH de la solution obtenue est neutre (7 ± 0.5) ce qui en fait un produit non corrosif.

- Le séchage

Il doit être complet avant le rangement du matériel. Les tuyaux annelés peuvent être suspendus en position verticale pour que le liquide puisse s'écouler complètement.

6. LA SURPRESSION PULMONAIRE (29,44)

Il s'agit d'un accident rare en recycleur, dont la symptomatologie et la prise en charge sont identiques à celles de l'accident survenant en circuit ouvert, mais dont les mécanismes sont différents. Elle est exceptionnelle en plongée militaire, et les signes cliniques peuvent prêter à confusion avec ceux de l'œdème aigu pulmonaire d'immersion (32)

6.1 MECANISME

Lors d'une remontée rapide, le volume de la boucle augmente et l'expiration par la bouche devient plus difficile, ce qui oblige parfois le plongeur à expirer par le nez. Dans certaines circonstances, ce volume peut augmenter très rapidement et le seuil de distension maximal des poumons peut être dépassé, notamment en cas d'absence de soupape de sécurité sur certains recycleurs à O₂ pur ou de défaillance de la soupape de surpression située sur le sac expiratoire.

Plus rarement, il peut s'agir d'un spasme réflexe de la glotte suivant une inhalation d'eau ou de chaux sodée liquide au niveau de la trachée.

6.2. PREVENTION

Lors des exercices techniques, la surpression pulmonaire constitue un risque non négligeable. La surveillance par le formateur est rendue délicate par l'absence de production de bulles par l'élève. L'enseignement de l'expiration par le nez doit faire partie intégrante de la formation du plongeur recycleur débutant, et elle fait partie des nouveaux apprentissages développés par rapport à la plongée en circuit ouvert.

La vérification du fonctionnement de la soupape de surpression doit être systématique avant la plongée. En cas de suspicion d'inondation de la boucle le plongeur doit fermer sa pièce buccale et passer sur Bail Out. Lors du sauvetage d'un plongeur recycleur inconscient, il faut lui mettre en bouche l'embout de son Bail Out, afin de pouvoir contrôler son expiration et éviter l'inhalation de liquide caustique en cas d'inondation du recycleur.

L'utilisation de recycleur à O₂ pur n'est pas destinée aux débutants, même si l'on évolue à faible profondeur, en raison des risques d'hyperoxie et de surpression pulmonaire.

7. LES ACCIDENTS DE DESATURATION (3,4,29,31,32,44)

Dans l'étude de la marine nationale ils représentent 13 % du total des accidents répertoriés. Ils sont inexistantes avec les appareils utilisant de l'O₂ pur et du Nitrox 60/40, mais fréquents avec le DC 55 qui utilise du Nitrox 40/60 entre 35 et 40m, sans paliers prévus par le protocole de désaturation. On n'observe pas d'accident au delà de 45 mètres, avec du Nitrox 32/68 ou avec des mélange ternaires, probablement en raison des conditions de plongée : durée limitée, peu d'efforts, décompression utilisant l'O₂ au palier et faible nombre d'immersions dans cette zone de profondeur.

En plongée recycleur loisir, les accidents sont rares et la médecine hyperbare ne dispose pas encore de beaucoup de recul dans ce domaine.

7.1 MECANISMES ET SYMPTOMES

Le risque d'accident de désaturation en recycleur est moins important qu'en circuit ouvert, car le mélange respiré est suroxygéné, chaud et humide ce qui permet de diminuer la saturation en azote, les pertes caloriques et la déshydratation. Les mécanismes et les symptômes sont les mêmes que pour les accidents rencontrés en circuit ouvert, avec cependant une répartition différente des signes cliniques rencontrés :

- en recycleur SCR : on observe une prédominance d'accidents médullaires, cochléo-vestibulaires et cérébraux, comme en circuit ouvert à l'air.

- en recycleur CCR utilisant du Trimix, on observe plus d'accidents ostéo arthro musculaires (bends) et cochléo-vestibulaires, comme en plongée Trimix « lourde ».

Il semble donc que ces différences dépendent plus du mélange respiré que du type de recycleur utilisé, mais le nombre d'accidents recensés actuellement est insuffisant pour valider cette affirmation.

7.2. PREVENTION

Calcul de la désaturation

Le code du sport précise dans l'article A322.99 : « la décompression d'une plongée au mélange doit être conduite soit à l'aide de *tables spécifiques*, soit à l'aide d'un *ordinateur conçu pour la plongée aux mélanges* », ce qui exclue toute autre méthode telle que l'utilisation de tables « air » en calculant la profondeur équivalente ou l'utilisation de logiciels trouvés sur internet par exemple **(31)**.

Comme nous l'avons vu précédemment, lorsque l'on plonge en recycleur SCR utilisant du Nitrox, la fraction d'O₂ respirée dans la boucle est inférieure à celle du mélange contenu dans la bouteille. Il faut donc calculer la décompression sur la fraction d'azote inspirée, qui représente environ 80 % de celle du mélange utilisé. On peut se baser sur des tables Nitrox immergeables, mais l'utilisation d'un ordinateur adapté (Uwatec Air Z0₂, couplé à une sonde de type Oxy 2), est beaucoup plus simple, car il prend en compte la valeur exacte de PpN₂ respirée. **(29,30)**

En cas d'augmentation du taux de CO₂ (effort, essoufflement, ..) on prendra une marge de sécurité en considérant que la plongée s'effectue à l'air **(29,30)**

En cas de plongée en recycleur eCCR ou mCCR, on peut rencontrer deux cas de figure :

- si le diluant utilisé est l'air, on peut utiliser des tables à PpO₂ constante (US Navy,...) mais il est beaucoup plus pratique d'utiliser un ordinateur fonctionnant à PpO₂ constante (Nexus d'AP Valves, VR2 de Delta P Technology...) qui permet une utilisation en circuit ouvert ou fermé **(3)**
- si le diluant est un mélange Trimix, il n'existe pas de tables à PpO₂ constante. Il faudra utiliser un ordinateur multigaz (VR3 de Delta P Technology, Explorer d'Abysmal Diving Inc...). Ces appareils peuvent se connecter par liaison avec ou sans fil à des sondes à O₂ situées sur le circuit inspiratoire, ce qui leur permet de connaître la PpO₂ en temps réel et de calculer la décompression adaptée. En cas de changement de gaz en cours de plongée, par exemple lors de la décompression, il faudra changer manuellement le type de mélange utilisé. **(3)**

Utilisation du Bail Out et des blocs de désaturation

Il est possible d'augmenter la sécurité de la désaturation en utilisant un ou plusieurs mélanges suroxygénés en fonction de la plongée effectuée. Les bouteilles de désaturation ne doivent pas être confondues avec celles constituant le Bail Out, qui peuvent avoir une composition différente, exposant le plongeur à l'hyperoxie ou l'ADD selon le cas.

L'utilisation de recycleurs eCCR ou mCCR en plongée profonde

L'autonomie de ces appareils semble être une alternative intéressante à la plongée « Trimix lourde » classique. Cependant, la quasi totalité des recycleurs du marché sont « garantis » jusqu'à 100 mètres de profondeur, et l'autonomie importante de ces appareils peut engendrer des profils de saturation dont les méthodes de décompression sont aléatoires ou simplement inconnues **(36)**.

Les incursions profondes réalisées dans le cadre de la plongée professionnelle ne sont pas comparables et ont toujours recours à des moyens logistiques très importants et redondants : caissons de recompression, cloche de plongée, alimentation en mélanges variable et en quantité « illimitée » à partir de la surface, moyens de communication, plongeurs d'accompagnement etc.

Quelques accidents récents sont venus tragiquement rappeler que vouloir étendre ce type de plongée à une activité de loisir présente de très grands risques. L'utilisation des ordinateurs n'est pas validée, des pannes ont été observées à grande profondeur, ce qui rend le calcul de tables spécifiques obligatoires pour les expéditions extrêmes.

8. L'OEDEME AIGU PULMONAIRE D'IMMERSION (6,11,14,26,45)

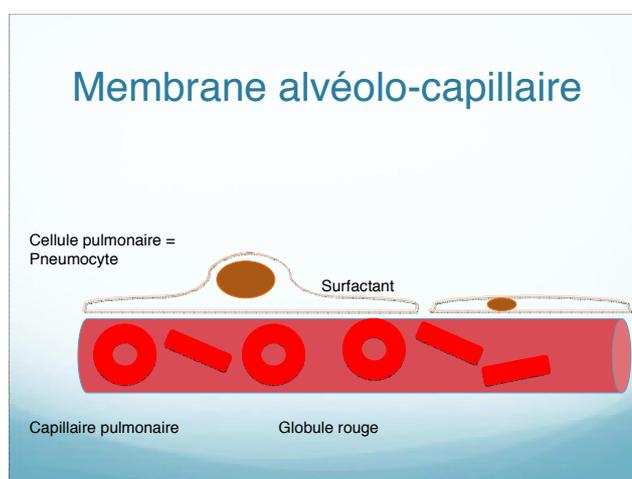
Il s'agit d'un accident rare en circuit ouvert comme en recycleur, souvent confondu avec la surpression pulmonaire, car ils ont un certain nombre de symptômes en commun. La description en est récente, une vingtaine d'année environ, mais sa fréquence augmente au fur et à mesure qu'il est recherché par les médecins hyperbares. Le plongeur recycleur y est exposé en raison de l'augmentation du travail respiratoire entraîné par sa machine par rapport au détendeur utilisé en circuit ouvert.

8.1. DEFINITION

Il s'agit d'un passage de liquide provenant du sang des capillaires pulmonaires vers les alvéoles entraînant une altération des échanges gazeux et une hypoxie sévère. Ce liquide est composé de plasma et de globules rouges en proportion plus faible que dans le sang.

8.2 MECANISME

La membrane alvéolo-capillaire doit être suffisamment fine pour permettre les échanges gazeux, mais suffisamment résistante pour supporter les fortes contraintes provoquées par la ventilation en plongée. Elle est protégée par le surfactant, sécrété par des cellules pulmonaires appelées pneumocytes de type 1. L'immersion favorise l'augmentation de la pression sanguine à l'intérieur des capillaires et l'étirement des alvéoles en raison de la distension des poumons. Si ces contraintes deviennent trop importantes, le surfactant ne peut plus remplir son rôle, et du liquide plasmatique pourra traverser la barrière alvéolo-capillaire en direction de l'alvéole.



La perméabilité capillaire peut être augmentée en immersion par de nombreux facteurs :

- La redistribution du sang au niveau des organes centraux, ou effet « blood shift », qui représente un volume compris entre 600 et 800 ml.
- La libération de protéines spécifiques entraînée par la dilatation des cavités cardiaques, consécutive au « blood shift ».
- La diminution de la compliance des poumons causée par l'effet combiné du « bloodshift » et de l'augmentation de la pression ambiante
- L'augmentation de la densité des gaz respirés responsable de résistances à l'écoulement des gaz au niveau des voies aériennes, surtout à l'effort.
- L'accroissement du travail ventilatoire lors de la respiration dans la boucle du recycleur, provoqué par l'augmentation de l'espace mort et de la résistance à l'écoulement des gaz.
- Le froid qui augmente les résistances respiratoires, et le « bloodshift » par vasoconstriction des vaisseaux périphériques
- L'effort intense qui augmente la pression dans les capillaires pulmonaires et le travail respiratoire
- Le stress, responsable d'une augmentation de la tension artérielle et de la pression capillaire pulmonaire
- L'hyperoxie qui entraîne une réaction inflammatoire locale.

8.3. FACTEURS DE RISQUE

- L'âge supérieur à 45 ans
- Les antécédents de pathologies cardiaque ou vasculaire, retrouvés dans 2/3 des cas, mais le problème peut aussi être révélé par l'accident (26) : hypertension artérielle, anomalie des valves cardiaques, etc. Il est à noter que 1/3 des accidents touche des plongeurs sans aucun antécédent médical.
- Le tabagisme semble peu impliqué

- L'effort, la fatigue et le stress sont souvent retrouvés : conditions d'examen, passage de brevet N4 ou MF2, plongée de reprise ou chez le débutant.
- Plongée en eau froide
- Problème lié au matériel : 2 cas observés chez des nageurs de combat de 27 ans lors de plongée en recycleur : efforts importants, mauvais montage de l'appareil, problème de chaux sodée (26).

8.4. DIAGNOSTIC (14,46)

- En immersion, les premiers signes débutent le plus souvent lors d'une phase de remontée à vitesse normale, entre 15 et 10 mètres. Au fond, l'augmentation de la pression capillaire est équilibrée par l'augmentation de la pression ambiante au niveau alvéolaire. La remontée provoque une diminution de la pression alvéolaire sans modification de la pression capillaire, ce qui favorise le passage de liquide en direction de l'alvéole.
- Les symptômes associent typiquement une sensation de gêne respiratoire très importante avec essoufflement, qui oblige souvent le plongeur à écourter ses paliers, une toux et des expectorations (crachats) mousseuses parfois sanglantes.

A la surface, le sujet est épuisé, penché en avant, et ressent une anxiété et une fatigue extrême qui lui interdit tout effort. On peut également observer une coloration bleutée de la peau (cyanose), une accélération des fréquences respiratoire et cardiaque, tandis que l'auscultation des poumons retrouve des râles crépitants. Dans les formes les plus graves, l'hypoxie et l'hypercapnie peuvent entraîner des troubles de la conscience pouvant provoquer un arrêt cardio circulatoire dans l'eau.

8.5. PRISE EN CHARGE

Il faut sortir la victime de l'eau, lui faire respirer de l'oxygène normobare et déclencher les procédures d'évacuation. L'oxygénothérapie hyperbare n'est pas indiquée

8.6. EVOLUTION

Elle est le plus souvent favorable, avec régression des symptômes en quelques heures, suivie d'un épuisement du patient. Elle peut se prolonger pendant 24 ou 48 h si une pathologie cardiaque est retrouvée. Cependant 2 cas d'issue fatale ont été décrits en Bretagne, dont un lors d'une reprise de la plongée après un an (26)

8.7. AUTRES ACCIDENTS POUVANT PRETER A CONFUSION

Ils seront éliminés en interrogeant soigneusement la victime sur les circonstances de la plongée et la chronologie des signes ressentis, puis par l'examen clinique.

- La surpression pulmonaire : on retrouve une notion de remontée rapide avec blocage respiratoire, un emphysème sous-cutané.
- Les chokes : ils se produisent dans un contexte de plongée longue et profonde, et de problèmes de procédure de désaturation. Les signes respiratoires sont rapidement suivis par des signes neurologiques.
- La noyade : il y a clairement une notion d'inhalation, on n'observe pas d'expectoration, et les signes respiratoires vont en s'aggravant ou régressent moins rapidement

8.8. PROBLEME DE LA REPRISE APRES L'ACCIDENT

Il s'agit d'une question difficile à trancher pour le médecin fédéral ou hyperbare. Elle ne peut se faire qu'au bout de 6 mois, en l'absence de pathologie associée ou lorsque celle-ci est stabilisée. Le patient doit être averti des risques de récurrence, dans 25% des cas environ, parfois suivis d'une évolution mortelle.

TROISIEME PARTIE

STATISTIQUES ET ANALYSE DES ACCIDENTS EN RECYCLEURS

1. DONNEES CHIFFREES

1.1. Problèmes méthodologiques (10,17)

Par rapport aux longues investigations menées à la suite d'un accident d'avion, les enquêtes menées sur les accidents de plongées sont l'objet de beaucoup moins d'attention. Certes les intérêts économiques en jeu ne sont pas comparables, mais des enquêtes bien conduites et une diffusion de leurs résultats pourraient grandement contribuer à améliorer la sécurité de la plongée en recycleur. Malheureusement, aucune réglementation n'indique comment procéder, les enquêteurs ne sont pas toujours qualifiés pour ce travail et les machines ne sont pas toujours faciles à « faire parler ». Pire, elles sont parfois expertisées par leur propre constructeur qui rejette sa responsabilité sur l'utilisateur. Les autopsies des victimes concluent le plus souvent à une simple noyade, et le grand public considère ces accidents comme relativement logiques, puisque les victimes pratiquaient une activité à risques. En France, il est très compliqué de se documenter avec précision sur les causes et les circonstances exactes des accidents.

Les procédures judiciaires sont très longues et leurs résultats ne sont pas facilement accessibles au plongeur courant, qui doit se contenter d'informations plus ou moins fiables glanées sur les forums spécialisés sur internet.

Curieusement, aux Etats Unis, pays « procédurier » entre tous, l'information est accessible beaucoup plus facilement : statistiques, rapports d'enquêtes et d'audiences judiciaires, analyses critiques des différentes machines et des pannes rencontrées. Bien sur, on pourra dire que ces informations sont incomplètes et parfois difficiles à contrôler. Elles ont cependant le mérite d'exister et de donner une image intéressante de la situation actuelle en ce qui concerne les accidents en recycleurs.

1.2. Statistiques concernant les accidents en recycleur dans la marine française (32)

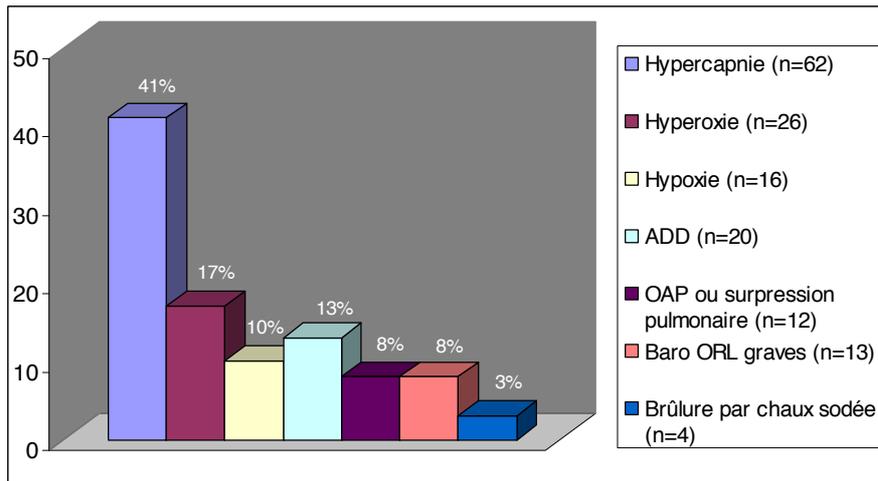
A l'heure actuelle, ce sont les militaires qui ont le plus de recul dans le domaine de l'utilisation des recycleurs. Chaque accident ou incident sérieux fait l'objet d'une déclaration, ce qui permet d'alimenter une base de données ayant pour but d'améliorer la sécurité des appareils et des plongeurs.

Une importante étude a été publiée en 2009, portant sur 30 ans de plongée en recycleur.

Pendant cette période, 153 accidents ont été répertoriés, soit environ 5 accidents par an pour un nombre de plongées estimé entre 17 000 et 23 000, ce qui représente 1 accident pour 3500 à 4500 plongées.

Par ailleurs, 50% des accidents sont observés pendant la période de formation.

La répartition des causes en a été la suivante :



Seuls 3 décès ont été observés, sans rapport avec les recycleurs, chez des plongeurs coincés dans des épaves. Dans tous les autres cas, l'évolution a été favorable.

Ces données sont intéressantes, mais la pratique des plongeurs militaires diffère de celle des civils sur de nombreux points :

- Les plongeurs sont jeunes et très entraînés sur les plans physique et mental
- Ils utilisent beaucoup les recycleurs à O₂ pur
- Leur matériel est entretenu avec soin
- Ils disposent d'une logistique lourde en surface
- Les plongeurs en formation sont accompagnés par un instructeur en circuit ouvert
- Les nageurs de combat sont sanglés avec leur binôme lors de l'utilisation de CCR à O₂ pur
- L'utilisation d'une sangle buccale est obligatoire, ce qui évite la perte de l'embout en cas de syncope.

Pour toutes ces raisons, l'utilisation des recycleurs est beaucoup plus sûre chez les militaires, et l'issue des accidents observés est rarement fatale.

1.3. Données provenant de l'enquête du Dive Alerte Network) (16)

D'après l'organisme américain :

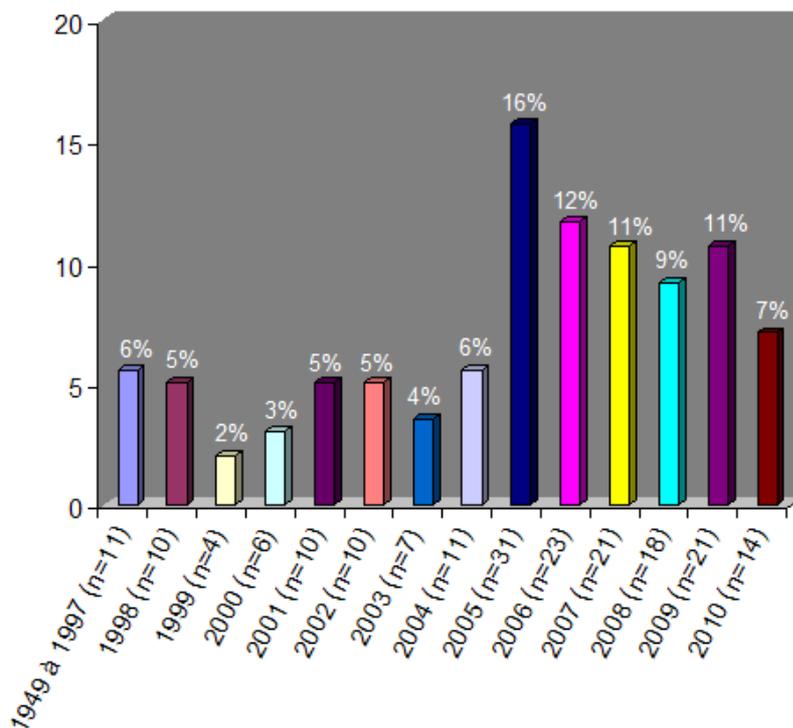
- On dénombre aux USA entre 80 et 100 accidents fatals par an en circuit ouvert pour un nombre de plongeurs compris entre 500 000 et 1 000 000.
- Les plongeurs en recycleur sont plus expérimentés et moins obèses que la moyenne des plongeurs en circuit ouvert. On devrait donc observer chez eux 8 fois moins de décès que chez les plongeurs en circuit ouvert, soit 1 décès pour 80 000 plongées par an.
- En ce qui concerne les accidents mortels en recycleurs, on observe :
 - 175 décès entre 1949 et 2007
 - 83 décès entre 1994 et 2007 pour environ 2500 pratiquants
 - 1 décès pour 391 plongées toutes catégories de recycleurs confondues

1.4. Données concernant la plongée loisir

Les tableaux suivants sont tirés d'une base de données disponible sur internet concernant 197 accidents mortels en recycleur entre 1949 et juillet 2010 publiée par Deep Life Ltd (18).

Elle est actualisée régulièrement, et constitue une référence intéressante. Malheureusement, un certain nombre de données sont manquantes, ce qui empêche une étude statistique valable concernant tous les paramètres qu'elle contient.

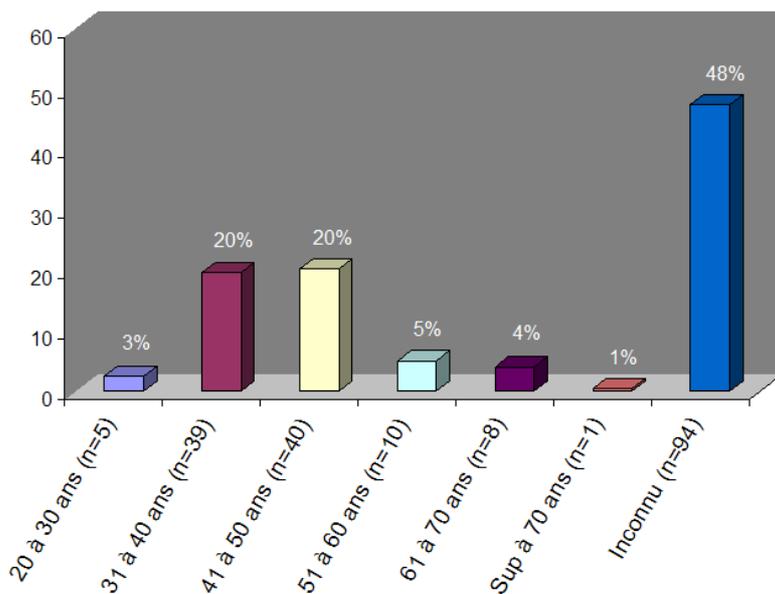
1.4.1. Répartition par année



Le développement des recycleurs en plongée loisir commence vers 1998. On constate une augmentation importante de mortalité entre 2005 et 2007. Depuis cette époque, le nombre d'accidents diminue, ce qui est probablement dû à une meilleure qualité des formations dispensées aux plongeurs.

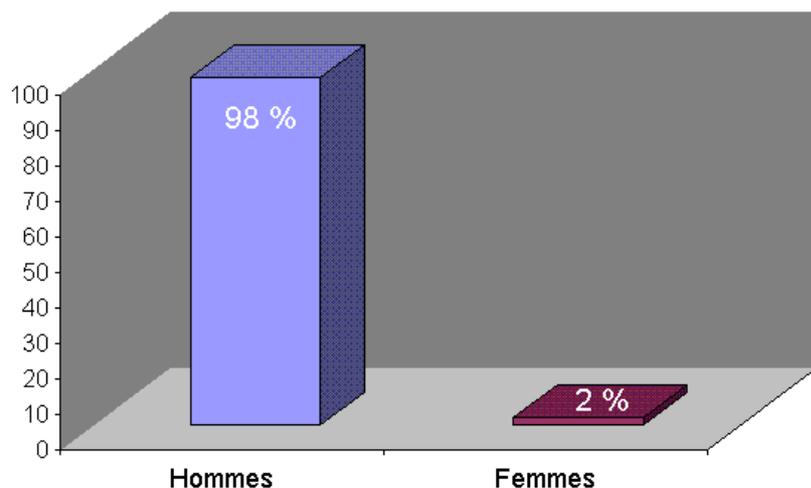
1.4.2 Données concernant les plongeurs

Tranches d'âge



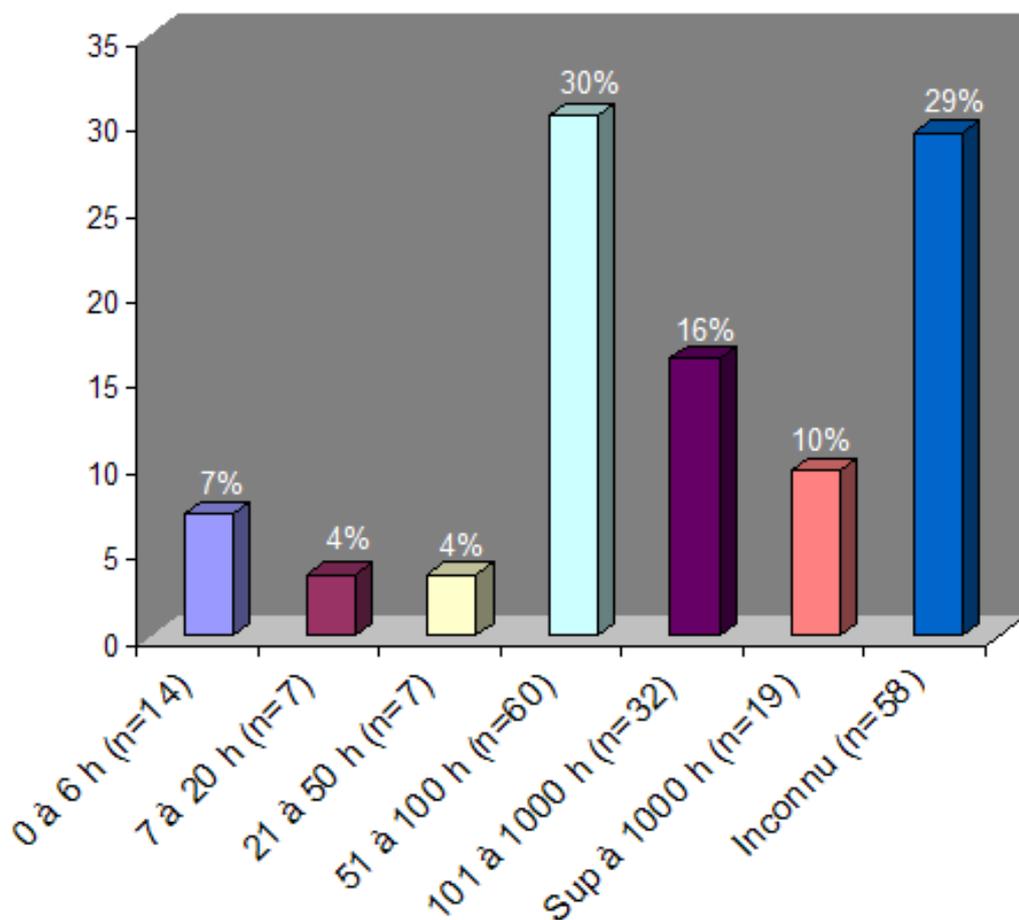
Le plus jeune plongeur décédé avait 26 ans, le plus âgé 72 ans. La tranche d'âge la plus touchée se situe entre 30 et 50 ans

Sexe



Les hommes sont sur représentés, mais les femmes pratiquent peu la plongée Tek en général

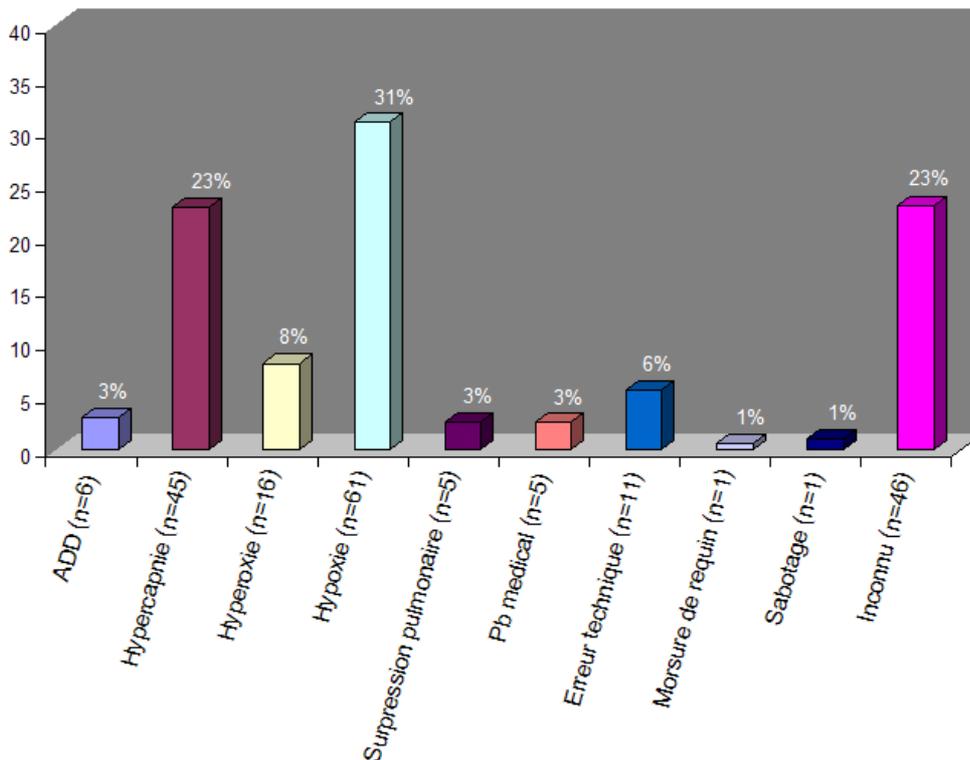
Niveau d'expérience, en nombre d'heures de pratique



La tranche la plus représentée se situe entre 30 et 50 h, ce qui correspond au moment où le plongeur se sent en confiance. Ce point sera développé plus loin.

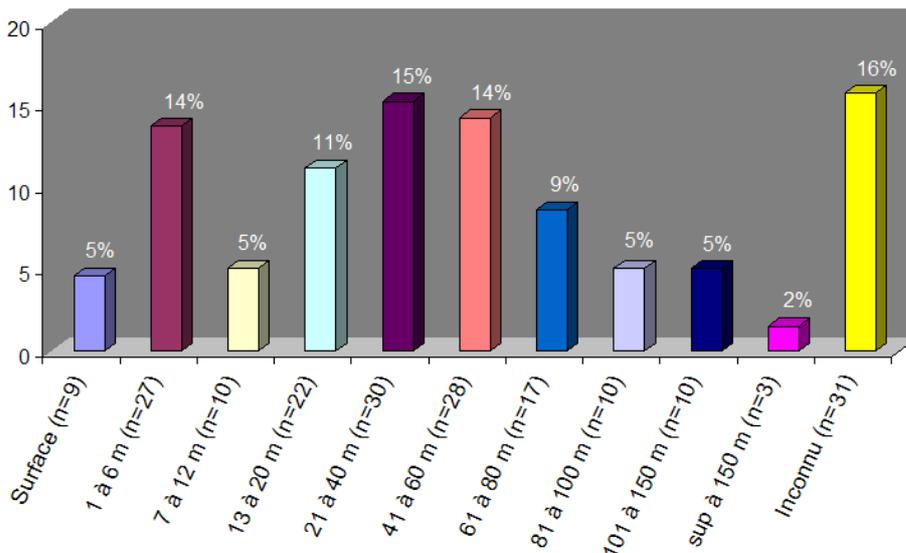
1.4.3. Données concernant l'accident

Causes



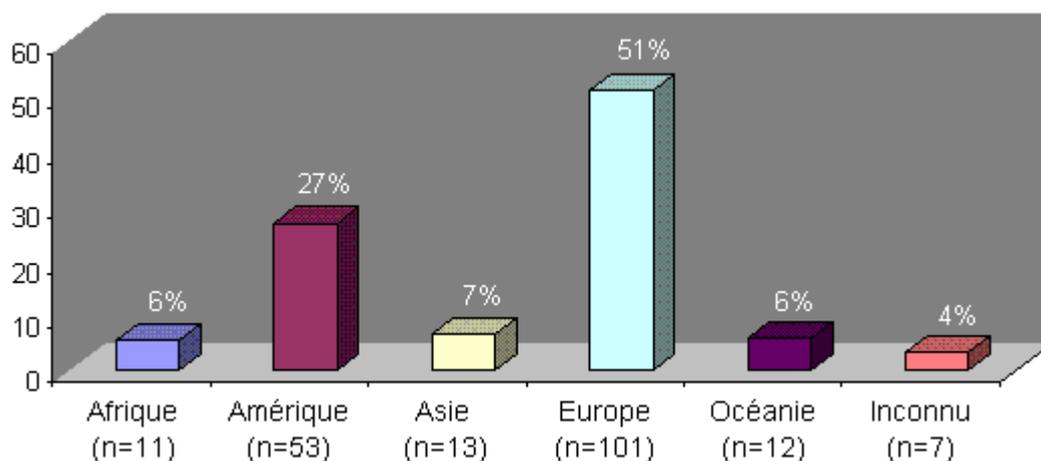
Le nombre d'accidents hypoxiques est plus élevé que les accidents hypercapniques, ce qui est une surprise par rapport aux données classiques. Cependant, les causes d'accidents sont souvent intriquées, puisque l'hypercapnie peut entraîner une hypoxie et une hyperoxie, comme nous l'avons développé précédemment. Les erreurs techniques concernent des pannes d'air, une confusion de mélange avec respiration d'air à 80 m et narcose, des plongeurs incarcérés dans des épaves ou des grottes, et des problèmes de flottabilité mal gérée. Parmi les causes anecdotiques : un décès par hémorragie suite à une morsure de requin et même un cas de sabotage du recycleur !

Profondeurs concernées



19% des accidents mortels se déroulent dans la zone entre la surface et 6 mètres, dont 5 % en surface. 50% des accidents ont lieu entre 0 et 40 m. Les accidents au delà de 80 m sont spectaculaires, mais plus rares. Cette zone d'évolution concerne évidemment beaucoup moins de plongeurs.

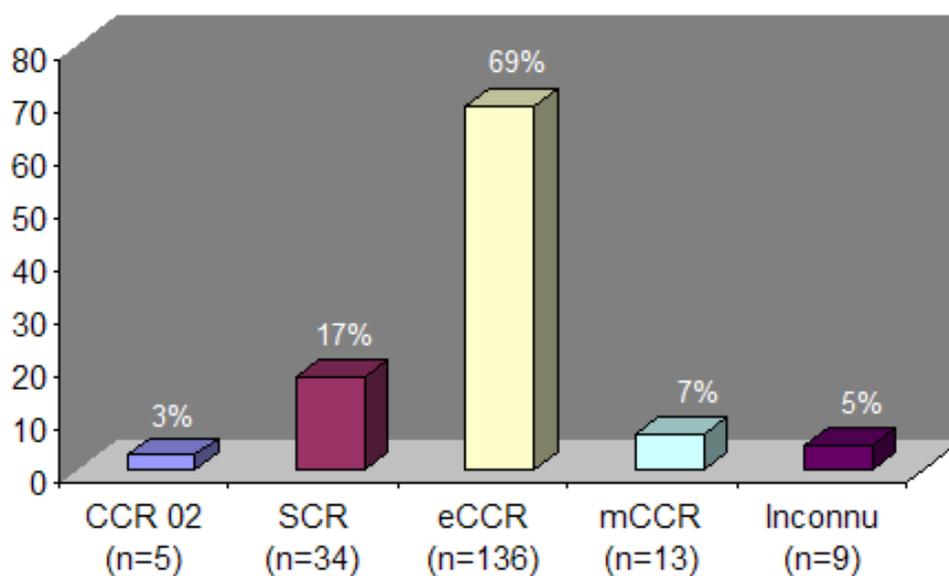
Lieu de l'accident



L'Europe concentre plus de la moitié des accidents, contre 27% pour le continent américain.

1.4.4. Données concernant les machines impliquées

Catégories

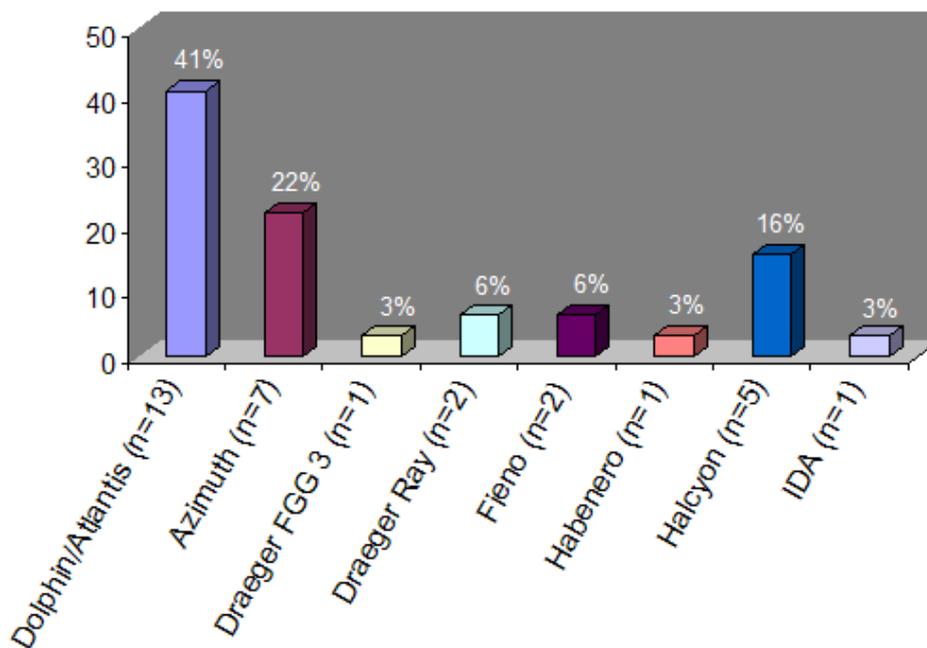


Les eCCR sont sur représentés, ce qui correspond aux résultats de l'enquête du DAN, mais ils sont également les plus utilisés des CCR. L'utilisation des mCCR est moins importante, et il faudra attendre plusieurs années avant d'interpréter valablement leur implication en matière d'accidents. L'utilisation des CCR à O₂ pur est tout à fait anecdotique, mais cette étude ne concerne pas les accidents des militaires.

Modèles de machines concernés

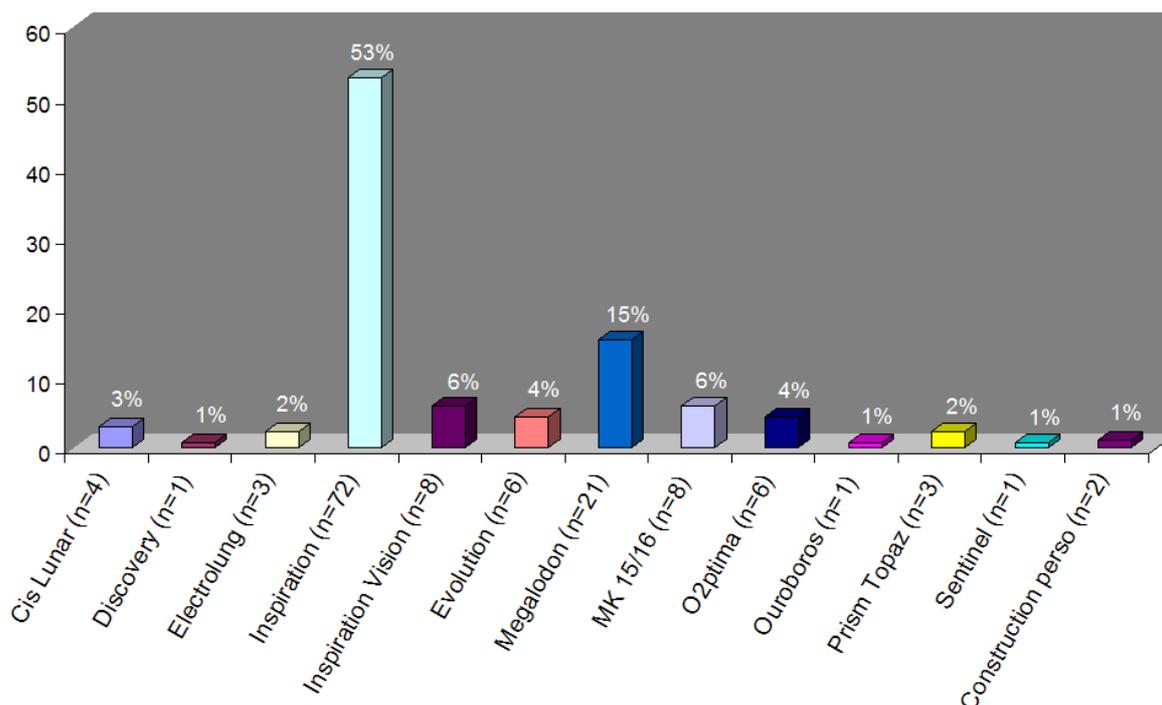
Comme le nombre de machines vendues est considéré comme secret et, donc, non publié par les fabricants, il faut considérer ces chiffres avec prudence : en effet, un recycleur très utilisé sera forcément plus souvent impliqué qu'un recycleur dont la diffusion ne concerne qu'une centaine de machines.

SCR



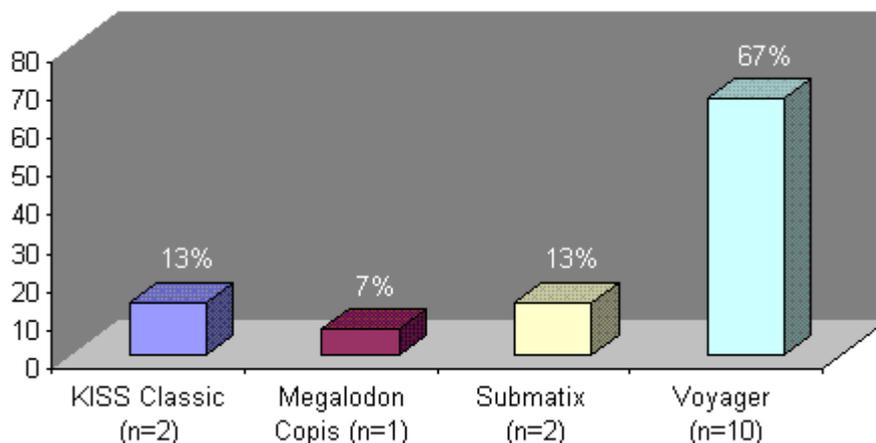
Le Dolphin est impliqué dans 41% des accidents en SCR, mais c'est également la machine la plus vendue de cette catégorie.

eCCR



Les recycleurs Inspiration et Evolution représentent les 2/3 des machines concernées, mais ce sont également les eCCR les plus vendus. L'inspiration « classique » est la machine la plus souvent mise en cause. Les versions ultérieures (Inspiration vision, Evolution) semblent moins accidentogènes. Le Mégalodon en version eCCR arrive en 2ème position.

mCCR



Le Voyager, machine populaire parmi les plongeurs spéléo et amateurs de plongée profonde, est le recycleur mCCR le plus souvent impliqué, ce qui est confirmé par le ratio accident/nombre d'unités (supposé) vendues.

2. PROBLEMES LIES AU COMPORTEMENT DES PLONGEURS :

Lorsque l'on étudie les compétences des victimes d'accident en recycleur, on retrouve deux types de profils diamétralement opposés :

- des plongeurs recycleur expérimentés, voire des formateurs
- des plongeurs recycleur peu expérimentés ou en cours de formation

2.1 Les plongeurs expérimentés

On est frappé de constater qu'ils constituent la majorité des accidents graves, surtout en tant qu'utilisateurs de recycleurs de type eCCR. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène :

La routine

La pratique du recycleur dans le domaine civil reste le plus souvent une activité de loisir, comme la plongée à l'air. Mais contrairement à cette dernière, la plongée en recycleur demande un long temps de préparation et de vérification du matériel avant la plongée. L'apprentissage insiste beaucoup sur ce point, mais les problèmes surviennent souvent par la suite, car une certaine routine peut finir par s'installer, comme dans d'autres activités. A titre d'exemple, on sait qu'un nombre très important d'accidents de la route survient sur des trajets parfaitement connus, comme celui menant du domicile au lieu de travail. La pratique du recycleur présente des risques particuliers dont la prévention nécessite une rigueur et une vigilance de tous les instants.

La distraction

Il arrive de temps en temps à un plongeur d'oublier d'ouvrir sa bouteille. En circuit ouvert, cette situation peut mettre en danger un débutant, mais rarement un plongeur expérimenté qui résoudra facilement ce problème. En recycleur, le même oubli peut avoir une issue dramatique : plusieurs accidents hypoxiques mortels ont été observés en surface ou à faible profondeur moins de 2 minutes après le début de la plongée.

Des facteurs de risques sont souvent retrouvés dans ce genre d'accidents :

- L'état physique ou psychologique : fatigue, déprime, ou préoccupations personnelles. Le plongeur est en recherche de calme et d'apaisement, dans une activité qui va lui changer les idées et lui apporter une forme de sérénité. L'état du plongeur peut varier d'un jour à l'autre, mais la pratique du recycleur demande une rigueur et une concentration sans faille.
- Le problème peut également provenir de l'environnement humain, en particulier des plongeurs en circuit ouvert attirés par ces curieuses machines que sont les recycleurs. Ils peuvent observer le plongeur et lui poser des questions. Or les phases de vérification du matériel et la check list avant immersion sont cruciales; car toute erreur ou omission peuvent mettre en danger la vie du plongeur. Ceci pose le problème de la cohabitation des plongeurs recycleurs avec les autres plongeurs sur un même bateau. Elle est envisageable, mais son organisation doit être optimisée par le directeur de plongée.

Le shunt des procédures

Plutôt commis par des plongeurs débutants, ou en cours de formation. Il peut également toucher un plongeur plus expérimenté, qui sera tenté d'accélérer la phase de préparation de la machine ou de négliger certaines alarmes afin de ne pas rater sa plongée ou retarder ses camarades.

Un accident survenu dans le cadre militaire a touché un plongeur en formation qui, ayant perdu l'usage de son recycleur suite à un coup de roulis sur le bateau de plongée, en a déstocké un autre, similaire, sans le vérifier. Il a présenté une perte de connaissance au bout de 2,5 minutes suite à une hypercapnie aigüe, car son canister ne contenait pas de chaux sodée.

La surestimation des capacités de la machine

Les adeptes chevronnés de plongée en CCR ne plongent quasiment qu'avec leur machine, afin de faire corps avec elle pour mieux la maîtriser. Certains d'entre eux nourrissent avec leur recycleur une relation quasi passionnelle, comme celle d'un collectionneur de voitures anciennes ou prestigieuses. Ils ont une foi aveugle dans leur machine, et ne sont pas toujours accessibles aux critiques qui touchent leur appareil, qui est forcément parfait. Le tollé provoqué par certains articles parus dans la presse spécialisée (36) est à ce titre très révélateur.

D'autres bricolent ou tentent des modifications sur leur machines, comme le ferait un surfeur avec sa planche à voile. Mais dans le cas du recycleur, ce genre de comportement peut rapidement mettre la vie du plongeur en danger.

La problématique du formateur

L'enseignant est investi d'une double mission :

- il doit transmettre ses connaissances théoriques et pratiques
- il doit assurer la sécurité de ses élèves, ce qui implique un contrôle rigoureux du montage de leur machine et de leurs procédures de contrôle pré plongées

Il a conscience d'être un modèle pour ses élèves et d'être observé. Il doit s'adapter en permanence à une organisation de stage souvent lourde d'un point de vue logistique, et doit faire face à la fatigue et au stress. Cependant ces impératifs ne doivent pas avoir de répercussion sur le temps qu'il devra consacrer au montage et aux vérifications concernant sa propre machine. Il devra en permanence résister à la tentation de gagner du temps à ce niveau pour rattraper un éventuel retard dans la planification du stage. Contrairement à la vision de l'élève, le formateur n'est pas invulnérable.

Les accidents « héroïques »

Au cours de certaines plongées profondes en recycleurs, la complexité de l'équipement emporté et de la planification pose le problème de la possibilité de porter secours à un camarade en difficulté sans mettre sa propre vie en danger. Cet aspect est d'ailleurs abordé lors de certains stages de plongée Tek, mais il existe comme souvent, une marge considérable entre la théorie enseignée dans une salle de cours confortable ou les conversations autour d'un apéritif convivial et la réalité sur le terrain...

Lors de l'accident décrit au chapitre hyperoxie (erreur de calibration des cellules O₂ en surface suivie d'une crise hyperoxique mortelle à 80 m de fond). Le compagnon de plongée de la victime a analysé d'emblée la gravité de la situation au fond et n'a jamais pu lui remettre l'embout dans la bouche en raison de la contraction extrême de ses mâchoires. Au lieu de laisser l'accidenté sur place, qui était malheureusement probablement déjà décédé, il est remonté de 80 m à la surface en shuntant plus d'une heure de palier. Il a été victime d'une tétraplégie, mais a pu heureusement récupérer une certaine autonomie après de nombreuses séances d'oxygénothérapie et une longue rééducation. Ce garçon était formateur en plongée Tek, et recommandait de ne pas mettre sa vie en jeu de façon inutile. Il avait même évoqué ce problème avec sa compagne et tout semblait parfaitement clair. C'était ne pas tenir compte du côté affectif de telles situations qui rendent nos réactions imprévisibles.

2.2 Les plongeurs moins expérimentés

La surestimation de ses propres capacités

Quelle que soit leur nationalité, la très grande majorité des pratiquants ont un niveau avancé en plongée à l'air ou aux mélanges. Ils sont souvent venus au recycleur pour découvrir une nouvelle activité, ou, dans le cas des plongées profondes aux mélanges, par soucis d'économie en moyens par rapport à la plongée « Trimix lourde ».

Or il est difficile de transposer l'expérience du circuit ouvert dans le domaine du recycleur qui diffère en ce qui concerne la maîtrise de la flottabilité, la gestion des gaz et les procédures de secours.

Les plongeurs doivent maîtriser des connaissances théoriques qui leur permettront de comprendre les effets de leurs actions (ajout de gaz, purge de la boucle, changement de profondeur...) sur le mélange respiré et la décompression. **(42)**

L'apprentissage est lent, le plongeur doit apprendre à connaître sa propre machine, et surtout ses propres limites. La période la plus dangereuse se situe en milieu de formation, quand le plongeur acquiert une certaine expérience et que sa confiance en lui-même dépasse ses capacités réelles **(42)**

Spécificité des machines

En matière de SCR, les adaptations d'une machine à l'autre sont relativement faciles. Il n'en est pas de même en CCR ou la formation est délivrée machine par machine.

Un changement de recycleur avant une plongée est une erreur grave ; Dans l'accident évoqué plus haut, le plongeur victime de la crise hyperoxique a décidé d'essayer la machine d'un collègue qui a dû annuler sa plongée au dernier moment. Il ne maîtrisait pas la procédure de calibrage des cellules à O₂ différente de sa propre machine.

Mauvaise appréciation de la difficulté des plongées

Lorsque le plongeur recycleur a pris conscience de ses limites, Il doit ensuite conserver une marge de sécurité entre ces limites et les plongées réellement effectuées. **(42)**. On retrouve la même problématique que celle du plongeur en circuit ouvert qui vient de passer son niveau 3 et descend en autonomie à 60m. Tout se passe bien jusqu'à ce qu'un problème survienne.

De même, lorsque le recycleur fonctionne bien, il est relativement facile de plonger avec, surtout avec un eCCR qui permet de fabriquer un mélange sur mesure et d'atteindre des profondeurs très importantes. Mais les meilleurs systèmes de contrôle ne peuvent rien contre les plongeurs inconscients.

Les séances de formations doivent consacrer beaucoup de temps pour simuler les types de pannes et acquérir les reflexes appropriés. Il faut apprendre aux plongeurs à reconnaître les problèmes et apprendre à les anticiper (42).

Les formations « light »

La vente de la plupart des recycleurs est conditionnée par une formation préalable spécifique à la machine, ce qui est en soi une bonne chose. Mais certaines de ces formations, étrangères pour la plupart, sont parfois, très insuffisantes en ce qui concerne le nombre de plongées à effectuer. Ainsi, un accident mortel survenu avec un eCCR en Suisse a impliqué un plongeur qui n'avait pas un nombre suffisant de plongées pour évoluer au Trimix à 80 mètres de profondeur.

Les cursus Tek mis en place par la FFESSM sont, à juste titre, beaucoup plus exigeants, tant pour les formations de plongeurs que de moniteurs auxquels elle impose, en ce qui concerne les recycleurs eCCR, d'avoir une pratique régulière pour pouvoir conserver leur titre. (12)

Accidents et internet

En matière de recycleur comme dans beaucoup d'autres domaines, on peut trouver le meilleur comme le pire :
- les forums sont un outil formidable quand il s'agit d'échanger des informations et permettre de faire évoluer les pratiques et augmenter la sécurité. Mais ils peuvent aussi représenter un danger s'ils diffusent des informations erronées. Le débutant devrait s'en méfier, car il n'est pas forcément en mesure de faire le tri des informations présentées.

La pire des choses concerne les achats et revente sauvages de recycleurs sur Internet. Ils donnent la possibilité d'acheter des machines sans formation, moins chères et dont l'état est très variable. On peut se demander pourquoi plusieurs de ces machines ont été vendues plusieurs fois, entraînant à chaque fois le décès de leurs propriétaires successifs !

3. PROBLEMES LIES AUX DEFAILLANCES MATERIELLES

Sujet sensible, il déclenche de nombreuses polémiques impliquant fabricants, partisans et adversaires des recycleurs.

3.1. Position des fabricants

Elle consiste à reconnaître que la pratique du recycleur présente des risques, mais que tout est mis en œuvre pour protéger les plongeurs :

- Au niveau de la conception de l'appareil, en respectant des règles de fabrication comme la norme C.E
- Avant l'utilisation puisque la vente n'est réalisée qu'après une formation spécifique par un organisme agréé par le fabricant.

Dés lors, pour le fabricant, tout accident qui pourrait arriver au plongeur serait d'une façon ou d'une autre; causé par une ou plusieurs fautes commises par l'utilisateur

3.2. Position des adversaires des recycleurs

Elle consiste à souligner le manque de sureté des recycleurs et leur inadaptation à la plongée loisir, en se basant sur les statistiques évoquées plus haut, et en soulignant que ces accidents touchent une majorité de plongeurs expérimentés. Les critiques concernent essentiellement :

- Les eCCR du point de vue de la fiabilité des systèmes électroniques qui contrôlent la plongée mais aussi la survie du plongeur,

- L'ergonomie des appareils, la complexité des procédures à effectuer avant la plongée et les contraintes liées à l'entretien et à la maintenance, qui sont difficiles à mettre en œuvre et nécessitent une grande rigueur. Selon eux, ces facteurs multiplieraient les causes d'erreurs possibles.
- L'absence de transparence des fabricants qui ne publient pas les résultats des tests effectués sur leur machines, empêche toute comparaison entre les appareils.

Essayons d'y voir plus clair

Comme nous l'avons vu précédemment, les causes des accidents sont souvent plurielles et difficiles à analyser. Cependant, les statistiques montrent essentiellement 3 choses :

- D'après l'étude du D.A.N, les causes semblent être pour moitié dues au comportement des plongeurs, l'autre moitié étant attribuée aux défaillances des machines.
- La majorité des recycleurs concernés sont des eCCR,
- Les recycleurs de type SCR et mCCR semblent être moins souvent mis en cause.

3.3. Les défaillances d'origine mécanique :

Les causes potentielles sont nombreuses et souvent multifactorielles. Toutes les parties du recycleur peuvent être incriminées, mais les incidents le plus souvent rencontrés concernent l'alimentation en O₂ ou en diluant, le logiciel de gestion électronique, la défaillance des cellules à oxygène, les défauts au niveau du canister ou de la chaux sodée. Cependant :

- La survenue de ces pannes n'incombe pas systématiquement au fabricant, mais parfois aussi à l'utilisateur. Le recycleur est une machine qui demande beaucoup plus de soin et d'entretien qu'un scaphandre traditionnel. Certaines pièces onéreuses, comme les cellules à oxygène doivent être remplacées régulièrement.
- Le plongeur qui souhaite se lancer dans la plongée recycleur doit en être conscient, ou renoncer à cette activité sous peine de mettre sa vie en danger.

Les principales causes de pannes ont été abordées dans le chapitre consacré aux différents accidents. Il n'est pas possible de les lister de façon exhaustive ici, mais le lecteur trouvera plusieurs documents intéressants à ce sujet sur internet. **(19,20)**.

3.4 La norme C.E. **(13)**

La norme E.N 14143 relative aux recycleurs ne se limite pas aux performances globales des machines évoquées dans la partie consacrée à l'hypercapnie. Ce document de 46 pages fixe des règles précises de conception et de performances concernant toutes les parties de la machine, qui visent à protéger les utilisateurs contre les pannes et les accidents. Il comprend une inspection et une vérification de la conformité de chacune des pièces composant le recycleur, puis des tests sur simulateur de respiration en milieu sec puis en immersion.

Les fabricants ont également l'obligation d'établir un rapport A.M.D.E.C (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), traduction de l'anglais F.M.E.C.A (Failure mode, effects, and criticality analysis). Il a pour but de déterminer les points faibles de la machine et d'énumérer les causes et les conséquences des défaillances possibles, de façon à pouvoir s'en prévenir et améliorer la fiabilité des composants **(40)**

Plusieurs points importants sont à noter.

Conditions d'utilisation :

- Les recycleurs utilisant l'oxygène pur sont limités à 6 mètres,
- Ceux qui utilisent du Nitrox sont limités à 40 m.
- Ceux qui utilisent du Trimix sont limités à 100m
- La température de l'eau doit être comprise entre 4 et 34 degrés

Cela signifie que toute utilisation d'un recycleur en dehors de ces conditions sort du champ d'application de la norme, et relève de la propre responsabilité du plongeur. Il s'agit en particulier :

- d'une utilisation à une profondeur supérieure à 100 m,
- des tentatives de record de profondeur, comme l'accident mortel survenu en Egypte en mai 2010 à 147 m,
- d'une utilisation en eau froide de température inférieure à 4°C, ce qui est fréquemment le cas dans nos lacs en hiver.

Ces mesures sont reprises par la plupart des constructeurs qui les ont inscrites dans le manuel d'utilisation de leur machine. Lorsqu'elles ne sont pas respectées, la responsabilité du constructeur sera difficile à engager.

Résultats des tests

Les fabricants ne publient aucun résultat des tests concernant leurs machines, car ils considèrent ces données comme un secret de fabrication. Si aucune réglementation ne les y oblige, on peut cependant regretter ce manque de transparence qui empêche le plongeur d'effectuer toute comparaison entre les différents recycleurs du marché.

3.5. Controverses concernant la gestion électronique des recycleurs

Les logiciels électroniques responsables de la gestion de la PpO_2 constante sur les recycleurs eCCR sont soupçonnés de provoquer des accidents. Leur conception est considérée comme un secret de fabrication par les constructeurs qui n'ont de compte à rendre à personne ni aucune obligation de contrôle, de mise à jour ni de rappel des machines de mêmes types que celles qui ont été incriminées dans des accidents. Certains leur reprochent une conception « artisanale », un peu légère pour un équipement dont dépend la santé voire la survie du plongeur.

On reproche notamment aux recycleurs eCCR le mode de gestion des informations fournies par les cellules à O_2 . Lorsque le recycleur est équipé de 3 cellules, le logiciel de gestion privilégie les 2 unités qui indiquent les valeurs les plus proches et exclue la 3^{ème}.

Des accidents ont été provoqués par la défaillance simultanée de 2 cellules qui donnaient la même valeur, alors que le logiciel a exclu la 3^{ème} qui donnait pourtant la valeur exacte. Les accidents que les logiciels électroniques sont soupçonnés de provoquer - à tort ou à raison - sont en pratique très difficile à prouver. En effet, il n'existe pas de traces spécifiques à l'autopsie des plongeurs accidentés. La rétention d'information est possible pour certains constructeurs qui sont les seuls à pouvoir lire les données enregistrées par leurs logiciels. Ces rumeurs - fondées ou non - font de plus en plus préférer les recycleurs de type mCCR aux eCCR à un nombre croissant de plongeurs Tek, notamment lors de plongées à grande profondeur ou en plongée souterraine. La marine française a toujours utilisé des recycleurs de type mécanique, pSCR ou mCCR, contrairement à l'US Navy qui utilise des eCCR.

Le seul point de consensus est que le recycleur le plus évolué peut aussi devenir le plus dangereux si le plongeur fait une confiance aveugle à l'électronique et ne vérifie pas régulièrement les informations fournies par ses consoles. (42)

CONCLUSION

La plongée en recycleur présente des risques certains, et demande une grande rigueur ainsi qu'une discipline sans faille. Malgré ces aspects, elle reste une activité intéressante.

Pour terminer ce mémoire, nous essayerons de synthétiser 2 points sous forme de tableaux. Le premier concerne les avantages et inconvénients des principaux types de recycleurs. Cette analyse comparative permettra de guider les futurs utilisateurs dans le choix de leur machine, ce qui sera l'objet du deuxième tableau.

Avantages et inconvénients des principaux types de recycleurs

	Avantages	Inconvénients
SCR	<ul style="list-style-type: none"> ● Simples et plutôt faciles d'emploi ● Adaptation assez facile d'une machine à l'autre ● Entretien facile ● Maintenance peu onéreuse ● Peu dangereux à condition de respecter les recommandations du fabricant ● Bonne machine pour débiter en recycleur, transfert positif pour les plongeurs qui désirent poursuivre en CCR 	<ul style="list-style-type: none"> ● Limitation en profondeur à 40 m ● Beaucoup de modèles bon marché ne se fabriquent plus et vont progressivement disparaître. Les modèles qui resteront ont un prix comparable à celui d'un CCR
CCR à O2 Pur	<ul style="list-style-type: none"> ● Très simples ● Entretien facile ● Peu onéreux ● Intéressant pour approcher la faune à faible profondeur ● Peu dangereux si on ne dépasse pas 6 mètres de profondeur 	<ul style="list-style-type: none"> ● Peu répandus en pratique civile ● Profondeur limitée à 6m, utilisation par un public très limité ● Attention à la profondeur plancher et à la durée d'exposition à l'O2 pur.
eCCR	<ul style="list-style-type: none"> ● Fabriquent un mélange adapté à la profondeur d'utilisation ● Utilisation intéressante avec un ordinateur à gestion de gaz ● Evolution possible à grande profondeur ● Evite d'emporter avec soi de nombreux blocs en plongée profonde 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sont le plus souvent impliqués dans les accidents mortels ● 2 points délicats : le logiciel électronique de gestion et le solénoïde ● Le plongeur risque de se « reposer » sur le logiciel électronique qui gère seul la plongée ● Prix d'achat élevé ● Entretien onéreux : remplacement des 3 cellules à O2 tous les ans ● Formation spécifique modèle par modèle ● Nouvelle formation obligatoire lors du passage d'un modèle à un autre.
mCCR	<ul style="list-style-type: none"> ● Mêmes possibilités que les eCCR ● Pas de gestion électronique ● Beaucoup moins de pannes ● Un peu moins chers à l'achat ● Entretien plus facile qu'un eCCR ● Moins accidentogènes que les eCCR 	<ul style="list-style-type: none"> ● Injection manuelle des gaz ● Risque de confusion entre injection d'O2 et de diluant. ● Remplacement obligatoire des cellules à O2 une fois par an ● Formation spécifique par machine.

Quel type de machine peut-on recommander à quel plongeur ?

<ul style="list-style-type: none"> ● Débutant ● Plongeur désireux d'acquérir un recycleur simple, peu dangereux et bon marché ● plongeur ne souhaitant pas évoluer au delà de 30 ou 40m ● Vidéaste, pour approcher facilement la faune 	SCR
<ul style="list-style-type: none"> ● Plongeur spéléo ● Plongeur désireux d'acquérir un recycleur plus sécuritaire qu'un eCCR ● Plongeur désirant effectuer des plongées profondes ● Plongeur Tek désireux d'alléger son équipement 	mCCR
<ul style="list-style-type: none"> ● Plongeur désireux de ne pas gérer lui-même ses mélanges respiratoires ● Recherche d'une simplicité en matière de gestion de la décompression 	eCCR
<ul style="list-style-type: none"> ● Vidéaste évoluant en eau peu profonde, pour approcher facilement la faune 	CCRO ₂ pur
<ul style="list-style-type: none"> ● Plongeur ayant tendance à être distrait ● Peu soigneux avec son matériel 	Pas de plongée en recycleur !!!

LEXIQUE

A.D.V : Automatic Diluent Valve. Système analogue au 2ème étage d'un détendeur classique permettant d'injecter automatiquement du diluant à la descente pour compenser la diminution de volume des faux poumons.

Bail Out : littéralement : se sortir de. Système comprenant une ou plusieurs bouteilles de secours qui permettent de terminer la plongée et d'effectuer les paliers lorsque le recycleur tombe en panne

B.O.V : Bail Out Valve. Association d'un embout buccal de recycleur et d'un deuxième étage de détendeur classique branché sur le Bail Out. Le B.O.V permet de passer sur Bail Out en actionnant un levier, en gardant l'embout du recycleur en bouche.

Calibration : procédure consistant à étalonner les cellules à O₂ par rapport à un mélange dont la composition est connue (air, O₂ pur)

Canister : récipient contenant la chaux sodée et souvent une partie du système électronique du recycleur (cellules à O₂, système d'injection)

CCR : Closed Circuit Rebreather : recycleur à circuit fermé

CCR O₂ pur : recycleur à circuit fermé utilisant l'oxygène pur

CNS Clock ou compteur SNC : compteur du système nerveux central. Calcul utilisé par certains ordinateurs de plongée pour exprimer la toxicité de l'oxygène sur le cerveau en fonction de la profondeur et de la durée de la plongée.

Diluant : mélange injecté dans la boucle, à la place ou en complément de l'oxygène pur. Peut être, selon la plongée et le type de recycleur, de l'air, du Nitrox ou du Trimix.

eCCR : recycleur à circuit fermé électronique.

Fraction d'O₂ : correspond au pourcentage d'oxygène dans le mélange contenu dans la bouteille de diluant ou dans la boucle.

H.U.D : Head Up Display, ou « affichage tête haute » Système de diodes électroluminescentes placées face au masque, et parfois couplées à un vibreur. Il permet de donner au plongeur diverses informations concernant le recycleur et de l'avertir en cas de danger.

mCCR : recycleur à circuit fermé mécanique.

PpO₂ : pression partielle d'oxygène.

pSCR : recycleur semi-fermé à fuite proportionnelle

SCR : Semi Closed Rebreather : recycleur semi fermé.

Setpoints : valeurs de consigne entre lesquelles la PpO₂ peut varier. Le setpoint bas est la valeur minimale admise, le setpoint haut la valeur maximale.

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Anthony G.** Diving re-breathing apparatus, testing and standards, UK/EU perspective. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. P219 - 235
Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>
- 2. Badier M.** Hypercapnie. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 306 - 312
- 3. Bahuet E.** Avec ou sans bulles ? Mémoire d'Instructeur National ; CTN FFESSM 2003.
- 4. Bergmann E.** Les accidents de plongée loisir aux mélanges. DIU de médecine hyperbare Paris 2003.
- 5. Blanchard J.L, Kersalé J.Y.** Effets physiologiques de l'oxygène; In : Manuel de plongée au Nitrox 2^{ème} éd. P 25 - 31. Chambéry : Gap 2006.
- 6. Boussuges A, Regnard J.** Physiologie cardio-vasculaire et bilan hydro-minéral - L'œdème pulmonaire en immersion et en plongée. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 131 - 132
- 7. Broussolle B, Hugon M.** Ergonomie des appareils respiratoires. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 729 - 743
- 8. Brun F, Bernabé P, Strazzera P.** Les recycleurs : description, avantages et inconvénients. In : Le guide de la plongée Tek. Chambéry : Gap 2008. P 219 - 238.
- 9. Chauvière P.** Initiation à la connaissance des recycleurs. Présentation au Comité Départemental FFESSM de Meurthe et Moselle.
- 10. Clarke J.R.** Accident investigation. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. P 238 - 260
Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>
- 11. Cochard G, Henckes A, Arvieux J, Arvieux C.** Oedème pulmonaire au cours de la plongée en scaphandre autonome. In Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. Tome 19 N°2, Marseille : Société de médecine subaquatiques et hyperbares de langue française ; 2009. P 143 - 150
- 12. Commission Technique Nationale de la FFESSM.** Manuel de Formation Technique : Recycleur à circuit fermé et gestion électronique de PpO2 ; Recycleur semi-fermé, Plongeurs Trimix - Moniteurs Trimix ; Plongeurs Nitrox - Moniteurs Nitrox.
Sur internet : <http://www.infoplongee.fr/ctn/manmon.php>

- 13. Comité Européen de Normalisation.** Norme EN 14143. Appareils respiratoires – appareils de plongée autonome à circuit fermé. Version anglaise. Sur internet : http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:wTFonF47HLAJ:www.buex.org/index.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D159+EN+14143&hl=fr&gl=fr&pid=bl&srcid=ADGEESjM8vVcr60Y-uRoymAsUL4WhvoqlFnD_pLGjLn8pmZ8F8FdBLt_Oh6xSPUm94TgYICX7IIM5HCtCsRObdgY5AoftG0bXPjPqgaRBgrsyjeWCusmvmLmEagTgKosfxd-46ZPN8Mt&sig=AHIEtbSMclEBNAbHxsI-hh-Gji-N2pdGTw
- 14. Coulanges M., Boussuges. A, Barthélemy A, Regnard J, D'Andrea C, Gempp E, Jammes Y.** Oedème pulmonaire en plongée sous-marine : facteurs de risques individuels et contraintes environnementales. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. Tome 17 N°2, Marseille : Société de médecine subaquatiques et hyperbares de langue française ; 2007. P 73 - 80.
- 15. Deas A.** Comparatif du travail respiratoire de différentiel recycleurs. In apocalypse type 4 sport mCCR Sur internet <http://www.opensafety.eu/datasheets/Apoc081231.pdf> page 5
- 16 Deas A.** How rebreathers kill people (and what can be done about it) update Feb. 2010. Sur internet http://www.deeplife.co.uk/files/How_Rebreathers_Kill_People.pdf
- 17 Deas A.** Rebreather accidents Analysis : Method. Sur internet : http://www.deeplife.co.uk/or_files/Rebreather_Accident_Analysis_Method_071219.pdf
- 18. Deas A.** Rebreather fatal accident database updated to 25th July 2010, with analysis. Sur internet : http://www.deeplife.co.uk/or_accident.php
- 19. Deas A, Davidov B, Evtukov M, Bogatchov A, Komarov V, Zabgreblenny O, Segadal K, Bergflodt Y, Holborn J, Hvalbye J.A, Nortcliffe J, Olberg S.** Failure mode, effects and criticality analysis volume 4: Mechanical Failure Mode Analysis. Sur internet : http://www.deeplife.co.uk/or_files/FMECA_OR_V4_090823.pdf
- 20. Deas A, Davidov B, Evtukov M, Bogatchov A, Malyutin S, Komarov V, Zabgreblenny O, Kudriashov A.** Rebreather failure modes and Their implications for Compliance with en61508. Deep Life Ltd open publication 2006. Sur internet : http://www.deeplife.co.uk/or_files/FMECA_OR_Faults_060807.pdf
- 21. Denoble P.J.** Common causes of fatalities in technical diving. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. P 303 – 310 Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>
- 22. Divers Alert Network.** Report on Decompression Illness, Diving Fatalities and Project Dive Exploration: 2006 Edition. Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/medical/report/index.asp>
- 23. Galland F.M.** Les recycleurs militaires. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 749 - 756

- 24. Greandjean B.** Désinfection des matériels respiratoires en plongée subaquatique. Site de la Commission Médicale et de Prévention Nationale de la FFESSM. 2007.
Sur internet : <http://www.medicale.ffessm.fr/desinfecter.htm>
- 25. Galland F.M.** La chaux sodée In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. p 765 – 774.
- 26 Henckes A, Lion F, Cochard G, Arvieux C, Arvieux J.C.** L'œdème pulmonaire en plongée sous marine autonome : fréquence et gravité à propos d'une série de 19 cas. Annales françaises d'anesthésie et de réanimation. Tome 27 2008. Paris : Elsevier Masson. p 694 - 699.
- 27. Imbert J.P.** Plongeur Recycleur IANTD : manuel et support de cours. Marseille : Divetech, 2000. P 03-4.
- 28. Jammes Y, Giry P, Hyacinthe R.** Physiologie Respiratoire et Plongée. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 86 - 114
- 29. Jourdan R.** Les recycleurs en plongée loisir : utopie ou réalité ? Mémoire d'Instructeur Régional ; CTR Est FFESSM 2004. Sur internet : <http://ffessm67.free.fr/technique/memoiresIR/MemoireRecycleur.pdf>
- 30. Jourdan R.** Sécurité et recycleurs. Présentation lors du stage de formation aux recycleurs semi-fermés organisé par la CTR Est en 2009
- 31. Livet G.** Recycleurs semi fermés : quelle désaturation ? Présentation lors du stage de formation aux recycleurs semi-fermés organisé par la CTR Est en 2009
- 32. Louge P, Blatteau J.E, Gempp E, Delprat P, Pontier J.M, Hugon M.** Epidémiologie des accidents de plongée avec appareils respiratoires à recyclage des gaz utilisés dans les armées françaises. A propos de 153 accidents répertoriés depuis 30 ans. Bulletin de médecine subaquatique et hyperbare. Tome 19 (suppl.), Marseille : Société de médecine subaquatiques et hyperbares de langue française ; 2009. P 111 - 118.
- 33. Louge P, Méliet J.L.** Toxicité neurologique de l'oxygène. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. p283 - 294.
- 34. Macchi J.P.** La normalisation des équipements de plongée. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. p 745 - 748
- 35. Marine Nationale.** Le DC55 in : Instruction sur la plongée autonome tome 3. ENTSA 1990. p II-1.7- 1.9
- 36. Martin Razzi P.** En matière de décompression, la vérité n'est pas téléchargeable. Interview de Bernard Gardette. In Subaqua N° 205, mars –avril 2006 P 47 - 49.
- 37. Mathieu D.** Toxicité Pulmonaire de l'oxygène. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 294 - 305.

38. Mitchell S.J. Respiratory issues in technical diving. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. P 12 - 34.
Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>

39. Mitchell S.J, Cronje FJ, Meintjes W.A.J, Britz H.C. Fatal respiratory failure during a “technical” rebreather art extreme pressure. Aviat Space Environ Med 2007; 78. P 81 - 86.

40. Neau E. La méthode AMDEC (FMEA). 2003
Sur internet : erwan.neau.free.fr/Toolbox/AMDEC.htm

41. Paole H, Maucherat Y. Les recycleurs sportifs. In : Broussolle B, Meliet J.L, Coulange M. Physiologie et médecine de la plongée 2^{ème} éd. Paris : Ellipse ; 2006. P 757 - 764

42. Pyle R.L. Guide d'apprentissage aux opérations du recycleur à circuit fermé. Traduit de l'anglais par J.M Belin. 2003. Sur internet : <http://www.apdiving.com/downloads/downloads/learnersguide.fr.pdf>

43. Schittly B. Les recycleurs, ou la plongée sans bulles. Présentation lors du stage de formation aux recycleurs semi-fermés organisé par la CTR Est en 2009

44. Schittly B. Les accidents aux recycleurs. Présentation lors du stage de formation aux recycleurs semi-fermés organisé par la CTR Est en 2009

45. Schittly B, Marcoux L. L'œdème aigu du poumon d'immersion. Présentation à la réunion des médecins fédéraux du Codep du Bas-Rhin 2010.

46. Vann R.D., Hamilton B. Central nervous system oxygen toxicity. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. P 38 - 64.
Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>

47. Warkander D.E. Testing divers' underwater breathing apparatus : The U.S. Navy perspective. In : Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical diving. Proceedings of the Divers Alert Network 2008 January 18-19 Conference. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009. p 206 - 217
Sur internet : <http://www.diversalertnetwork.org/research/conference/2008TechnicalDiving/Default.aspx>