



*Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-marins
Comité interrégional EST*

COMMISSION TECHNIQUE REGIONALE

***LES RECYCLEURS EN PLONGEE LOISIR
UTOPIE OU REALITE ?***



*Mémoire présenté par:
Renaud Jourdan
(MF2 n° 801)*

*En vue de l'obtention du titre d'
Instructeur Régional*

Juillet, 2004

REMERCIEMENTS :

A mes parrains de stage, Sylvain PEYBERNES et Jean Pierre GOEHNER.

A Pascal CHAUVIERE, qui m'a donné il y a quelques années déjà, le virus du recycleur (sur un Cressi) et fait faire mes premières inspiration sur un Ray.

A Michel GAUCHET, Gaby VASSEUR et François DE VILLENEUVE, qui depuis de longues années, par leur conseils et leur exemple m'ont donné la passion d'enseigner la plongée.

A Marc WINTERHALTER pour sa relecture pertinente et ses nombreuses corrections de syntaxe ou d'orthographe.

A tous mes amis plongeurs, qui se sont initiés avec moi ou qui ont assuré ma sécurité, Jérôme TONGIO, Joël AILLAUD, Christian PIECHOCKI, Yves GAERTNER, Michel OLLAND, Marie Stéphanie BOUR, et à tous mes ami(e)s du SCH (Subaquatique Club de Haguenau) dont son président, Pierre JUNG.

A ceux qui m'ont supporté au niveau matériel, Raymond ERTLE, Thierry MASSICOT, Frederic JACOMET, Jean Pierre ARGUEL.

Merci pour leur disponibilité et leurs conseils à Eric BAHUET, Jean Luc DIAINVILLE, Pierre Yves LEMAREC, Jean François ANDRE et à tous mes ami(e)s de l'AHR (Avenir et Histoire des Recycleurs) dont son fondateur Henri PAOLE.

Enfin, un grand merci à Joanna JOURDAN et à Laurence ZIMMER.

COMITE de RELECTURE :

Eric BAHUET (Instructeur National)
Pascal CHAUVIERE (Instructeur National)
Jean Pierre GOEHNER (Instructeur Régional)
Henri PAOLE (Président AHR, ingénieur et conseiller technique Draeger et Aqualung)
Sylvain PEYBERNES (Instructeur Régional)
Marc WINTERHALTER (Instructeur Régional)

Photo de couverture : Ray et Raie ! par Christian Piechocki (Mer Rouge 2003)

Plan

	<i>Page</i>
Introduction	4
1- Historique du développement des recycleurs.	6
2- Situation Actuelle :	16
2 a/ Aspects légaux de la pratique du recycleur en France	16
2 b/ Quel recycleur pour la plongée loisir ?	17
2 c/ Sécurisation des recycleurs (Bail Out, Mesure de la PpO ₂)	21
2 d/ Présentation des organisations et formations recycleur existantes	25
3- Eléments théoriques de la plongée au recycleur :	32
3 a/ Matériel	32
- Les éléments constitutifs	32
- Les différents principes de recycleur	38
3 b/ Physique et Chimie	42
- La Chaux et l'absorption du CO ₂	42
- Calcul de la PpO ₂ pour recycleur semi-fermé	45
3 c/ Accidents et Prévention	46
- Hypercapnie	46
- Hypoxie	47
- Hyperoxie	49
- Intoxication à la soude	52
- Les barotraumatismes	53
- La décompression	54
- Les risques de contamination	56
- Analyse des risques inhérents à la plongée recycleur	58
4- Eléments pratiques de la plongée au recycleur (proposés par l'auteur):	60
4 a/ Les vérifications et procédures obligatoires	60
- Avant la plongée	60
- Pendant la plongée	61
- Après la plongée	62
4 b/ Exercices pratiques d'aisance	62
4 c/ Assistance et Sauvetage d'un plongeur au recycleur	63
5- Analyses d'expériences :	64
5 a/ Expériences de formations	64
5 b/ Propositions de l'auteur de niveaux de pratique de la plongée au recycleur	69
6- Propositions de l'auteur de contenus de formation	72
6 a/ Initiation/Découverte	72
6 b/ Plongeur Recycleur SCR (PR1)	72
6 c/ Plongeur Recycleur Autonome SCR/ MGCCR (PR2)	76
7- Quel Avenir pour la plongée loisir au recycleur :	79
7 a/ Un produit nouveau et des adaptations nécessaires.	79
7 b/ Le point de vue du constructeur, entretien avec Jean Luc Diainville (Aqualung).	80
7 c/ Et si on imaginait demain ?	81
Conclusion.	82
Références Bibliographiques.	83
Annexes.	85

INTRODUCTION

Les appareils de plongée à recyclage de gaz, ou recycleurs, ont depuis longtemps servi à des plongées utiles, et souvent même dangereuses. Des plongées militaires pour les nageurs de combats, ou industrielles pour les constructions sous-marines et l'exploration pétrolière off-shore. Mais, depuis une dizaine d'années, des appareils destinés à la plongée loisir apparaissent sur le marché.

Pourtant, si l'on regarde autour de nous lors d'une sortie plongée, on s'aperçoit que les plongeurs recycleurs sont encore très peu nombreux.

Alors parler d'utilisation des recycleurs en plongée loisir, serait-ce une utopie ? On peut effectivement s'interroger sur l'intérêt de la plongée au recycleur qui impose une préparation et des procédures plus lourdes que la plongée en circuit ouvert. Et pourtant, grâce aux nouveaux appareils spécialement conçus pour une utilisation loisir avec des mélanges Nitrox, il apparaît que pour le plongeur curieux d'essayer, la plongée au recycleur est véritablement une plongée *différente* et les sensations rencontrées y sont incomparables.

- Peu ou pas de bulles, donc immersion discrète favorisant l'approche de la faune.
- Utilisation de mélange Nitrox, diminuant les problèmes de décompression.
- Respiration d'un mélange suroxygéné, humide et chaud.
- Autonomie plus importante.

Ainsi, du fait de ce nouvel horizon qui s'offre au plongeur, la plongée loisir au recycleur, soit en location, en école ou suite à un achat privé devrait être amenée à se développer.

Dans le cadre de cette évolution, ce mémoire a pour objet de présenter de façon concrète les différents aspects de l'utilisation des recycleurs dans l'optique d'une vraie pratique loisir en toute sécurité.

Passé, présent et futur y seront évoqués ;

- Le passé, par un historique du développement des recycleurs de 1849 à 2004.
- Le présent, par un état des lieux de la plongée loisir, en s'intéressant d'abord aux aspects législatifs, aux choix et à la sécurisation des appareils permettant d'évoluer entre 0 et 45 mètres, puis en présentant une approche au premier degré des différents aspects théoriques et pratiques qui en résultent.
- Le futur ensuite, car à partir de l'analyse des formations existantes et d'un certain nombre d'expériences, différents niveaux de pratique loisir ainsi que les contenus de formation correspondant sont proposés.
- Le futur enfin par une réflexion et un dialogue avec un constructeur de matériel sur l'évolution des recycleurs de loisirs et les conditions du développement de cette pratique.

L'utilisation des recycleurs aux mélanges Trimix ou HélioX pour la plongée profonde ne sera que occasionnellement évoquée car elle sort du cadre d'une utilisation loisir entre 0 et 45 mètres.

La plongée, notre passion, évolue, et les changements dans nos pratiques semblent comme dans notre société, se succéder à un rythme de plus en plus rapide. Ainsi ce mémoire n'a d'autre prétention que celle d'être une photo instantanée de la situation au moment où ce travail se termine.

Bonne lecture à tous.

ABREVIATIONS :

Les abréviations utilisées sont celles que l'on retrouve dans la littérature spécialisée. Ces ouvrages ou articles étant le plus souvent écrits en anglais, j'ai conservé pour ce mémoire les abréviations anglaises.

En voici la signification :

CCR : **C**losed **C**ircuit **R**ebreather = Recycleur Circuit Fermé (Oxygène pur).

SCR : **S**emi **C**losed **R**ebreather = Recycleur Circuit Semi Fermé.

MGCCR : **M**ixed **G**as **C**losed **C**ircuit **R**ebreather (Recycleur Circuit Fermé avec Mélanges de Gaz).

RMV : **R**espiratory **M**inute **V**olume, ou **RMV** Keyed, s'utilise pour les recycleurs asservis au rythme respiratoire du plongeur.

VO₂ : Consommation Oxygène en litre par minute.

% SNC : Pourcentage d'exposition oxygène sur le système nerveux central (en anglais, **C**entral **N**ervous **S**ystem). L'exposition ne doit jamais dépasser 100% de la dose maximale possible. On parle aussi d'horloge oxygène.

NOTES :

Les nombres (xx) entre parenthèses dans le texte renvoient aux références bibliographiques en pages 83 et 84.

1- HISTORIQUE

L'intérêt d'un historique par rapport à la plongée au recycleur apparaît rapidement :

- c'est un moyen attractif et pédagogique de découvrir le principe du recyclage du gaz et à travers son évolution, de découvrir les solutions techniques utilisées aujourd'hui.
- cela permet d'ancrer la pratique loisir dans une longue tradition de plongée et de découvertes.

1774 – Antoine Lavoisier met en évidence le rôle de l'oxygène.

1849 – Pierre Aimable de St Simon Sicard (2), inventeur, chimiste et homme d'affaire français prend un brevet pour un système appelé ' appareil et système chimico sauveur ' comprenant en plus de l'appareil de recyclage, un casque avec soupape, un habit de toile ainsi qu'une lampe sous marine. L'appareil est alimenté par deux bouteilles en cuivre d'oxygène pur contenant 150 litres.



Dans le casque, un premier embout en plomb en forme de bec de flûte permet d'inspirer alors qu'un second est utilisé pour expirer. Le gaz expiré traverse alors une boîte contenant un système de linges trempés dans un mélange de chaux et d'acétate de plomb, tendus sur des fils de fer qui assurent l'absorption du CO₂ expiré par le plongeur. Le gaz ainsi traité rejoint ensuite la partie inspiratoire de la boîte. Le plongeur doit de temps à autre injecter de l'oxygène dans le circuit.

Victor de Granchamp, testeur officiel des inventions de St Simon Sicard fera en Avril 1853 la couverture de la revue l'Illustration après une plongée de 35 minutes.

1864 – Benoît Rouquayrol, ingénieur des Mines et Auguste Denayrouse, lieutenant de vaisseau développent le premier système de détendeur à la demande. Sur la base d'un appareil respiratoire pour mineur, ils mettent au point un appareil de plongée qui, bien que relié à la surface comme un scaphandre classique permet au plongeur de respirer de l'air à la pression ambiante. L'admission d'air se fait grâce à une membrane, un système de clapets, et des soupapes en bec de canard, qui font de cette invention un des premiers détendeurs de plongée autonome. De plus, en cas de rupture de l'arrivée d'air surface, un réservoir intermédiaire donne au plongeur une autonomie de 20 minutes à 15 mètres (3)

1869 – 20000 lieues sous les mers de Jules Verne est publié. A l'époque de la plongée en scaphandre alimenté en air depuis la surface, il y fait dire au Capitaine Nemo « l'étape suivante sera celle du plongeur autonome débarrassé de son tuyau d'alimentation ».

1871 – Anton Lodigin, un inventeur russe présente à la cours du Tsar Alexandre II un équipement de plongée autonome. Quelques années plus tard vers 1878, A. Hotinski présente lui un appareil de plongée à oxygène. Apparemment, un des premiers circuits fermés russes. Mais Alexandre II a fort à faire après la défaite de Crimée et avec la naissance des mouvements nihilistes révolutionnaires. Aussi, devant l'indifférence du Tsar, ces inventions ne connaissent aucun développement industriel ou militaire.

1879 – Henry Fleuss, un officier de la marine anglaise (d'origine allemande) dépose en Angleterre un brevet pour un appareil portable sous marin. L'appareil consiste en un masque en caoutchouc avec deux tubes connectés à un sac respiratoire dans lequel se trouve une bouteille de cuivre de 6 litres chargée à 30 bars en oxygène pur et une cartouche d'absorption de CO₂. La cartouche est remplie de morceaux de chanvre (!) imbibés de potasse caustique. L'entrée de l'O₂ était contrôlée par le plongeur en ouvrant/fermant le robinet de la bouteille afin de régulièrement gonfler le sac respiratoire.

Fleuss effectuera une plongée de une heure dans un bassin d'une profondeur de 6 mètres mais c'est Alexander Lambert, un des plus fameux scaphandriers de l'époque, qui rendra cet appareil célèbre.

Le 5 Novembre 1880, après plusieurs essais infructueux en scaphandre classique, il plonge dans le tunnel Severn à Londres alors inondé par une source (4). Lambert s'immerge à une profondeur de 10 mètres pendant plus de 90 minutes, puis l'après midi pendant plus de 80 minutes à l'aide de l'appareil prêté par Fleuss. Il parvient à fermer un compartiment étanche et ouvrir une vanne de pompage ce qui permettra de colmater cette arrivée d'eau. Cette intervention était quasi impossible pour les scaphandres traditionnels du fait de la distance et du nombre de débris qui encombraient le tunnel. C'est un succès pour l'appareil de Fleuss qui marque le début de la plongée professionnelle au recycleur. Cependant Lambert en ressort particulièrement affecté par les effets de l'oxygène encore inconnus à cette époque. En 1883 quand une nouvelle fuite demandera une intervention dans le tunnel, il y retournera en scaphandre classique alimenté par de l'air et non pas par de l'oxygène pur.



Appareil de Fleuss, hier



et aujourd'hui (1)

Fleuss vend ensuite son brevet et rejoint la société Siebe, Gorman and Co pour continuer à y développer et fabriquer des appareils de ce type.

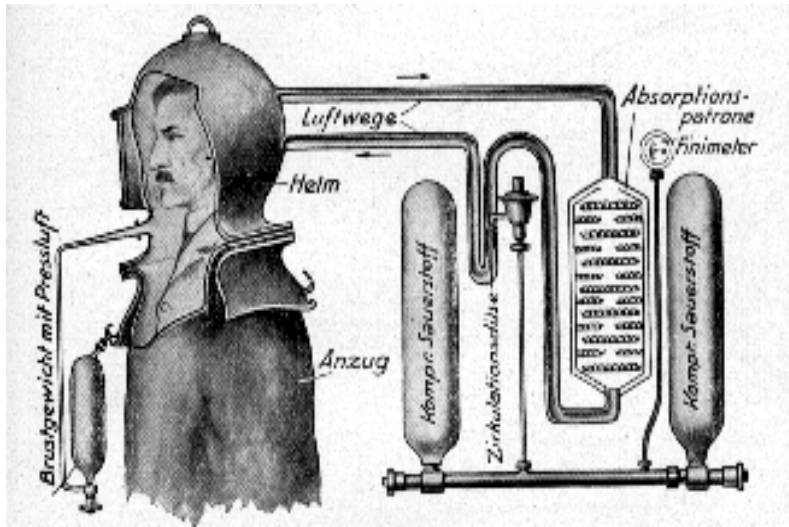
1880 – Paul Bert, médecin et physiologiste français, publie « La Pression Barométrique ». Un ouvrage fondamental, dans lequel il décrit les effets de la pression et de ses variations sur l'individu. Il explique la fameuse maladie des caissons par la présence d'azote sous forme gazeuse dans les tissus lors de remontées trop rapides. Il met aussi en évidence la toxicité de l'oxygène sous pression pour des pressions partielles supérieures à 2 bars.

1892 – Louis Boutan, un zoologiste français de la Sorbonne considéré comme le père de la photographie sous marine travaille sur les premiers appareils photo sous marins. Pour ses immersions, il utilise un recycleur Fleuss, légèrement modifié puisqu'il lui permet de tenir 3 heures à 6 mètres. C'est la première utilisation d'un recycleur pour la photographie et l'approche de la faune sous marine.



1907 – En Allemagne la firme Draegerwerk à Lubeck (8), jusque là spécialisée dans le matériel pour pompiers et mineurs se lance dans le matériel de plongée. Sous la direction du Dr Draeger et de

Hermann Stelzner, les ingénieurs modifient un appareil de sauvetage utilisé dans les mines de fer et de charbon et mettent au point un recycleur permettant l'évacuation des équipages de sous-marins
C'est le premier *U-Boot Tauchretter*, littéralement le premier appareil de sauvetage des sous-marinières



Brustgewicht mit Pressluft : Lest de poitrine et air comprimé.

Luftwege : Circuit d'air.

Helm: Casque

Anzug: Combinaison.

Komp. Sauerstoff : O₂ sous pression.

Zirkulationsduse : Clapet anti-retour et injecteur O₂.

Absorptionspatrone : Cartouche d'absorption.

Finimeter : Manomètre.

Appareil DM 20 (Draeger Mix) de 1909.

1909 – Invention du Draegerwerk DM 20. Le circuit est alimenté en oxygène par un injecteur avec régulateur de pression contrôlé par une membrane en contact avec l'eau (zirkulationsduse). Le système respiratoire est donc toujours à pression ambiante. Les blocs sont équipés d'un manomètre et gonflés à l'oxygène pur. Le plongeur peut évoluer jusqu'à 20 mètres pendant 2 heures (le système n'étant pas purgé au départ, le % O₂ inspiratoire est vraisemblablement inférieur à 100%).

1909 - La société Siebe Gorman utilise de l'oxylithe dans un recycleur pour fabriquer elle aussi un appareil de sauvetage pour sous-marins. La compétition avec Draegerwerk fait alors rage.

L'oxylithe, une invention de Hall and Rees datant de 1908, est un composé chimique constitué de peroxyde de potassium et de peroxyde de sodium qui libère de l'oxygène lors de la réaction avec le gaz carbonique mais qui extrêmement inflammable au contact de l'eau.

1910 – John Scott Haldane, médecin et physiologiste anglais, confirme la théorie de Paul Bert sur la maladie des caissons. En mettant au point les premières tables de plongées, il jette les bases de la plongée moderne.

1911- Le Dr Bernard Draeger met au point le premier recycleur semi fermé à mélange suroxygéné 60/40 non pré-établi, le DM 40 (40 pour 40 mètres). C'est une modification du DM 20 de 1909 monté avec un casque lourd. Une des deux bouteilles du DM 20 est maintenant remplie d'air. Le plongeur ouvre les deux bouteilles et se retrouve à respirer un mélange 60% O₂. Différents % O₂ peuvent être utilisés en variant la taille ou la pression des bouteilles.

Dans le même temps, sir Robert Davis, alors directeur de Siebe Gorman modifie l'invention de Fleuss et crée le recycleur à circuit fermé connu sous le nom anglais de Davis Lung ou en français Faux Poumon Davis. Ce recycleur équipera de nombreux sous-marins comme engin de secours (utilisable depuis une profondeur max. de 30 mètres) puis deviendra l'appareil employé par les premiers nageurs de combat.

En 1914, à la veille de la première guerre mondiale, les deux sociétés Draeger et Siebe ont à leur catalogue des appareils à circuit semi-fermé fonctionnant au Nitrox et permettant de plonger jusqu'à 40 mètres entre 2 et 4 heures.



En haut à gauche –Tauchretter Draeger de 1912.

En haut à droite - Système de recycleur Nitrox monté avec casque lourds.

En bas à gauche - Système de recycleur Tauchretter monté sur masque souple et avec combinaison de toile pour une plongée sous glace. Photos collection Draeger werk (8) ca. 1913.

1914 – En Russie, quelques appareils à circuit fermé O₂ utilisés dans les mines sont modifiés pour équiper les divisions chimiques de l'armée. Ce sont les KIP, appareils respiratoires à oxygène pur de surface (6).

1915 – Tournage aux USA de la première adaptation de 20 000 Lieues sous les mers par Stuart Paton avec Allan Holubar (5). L'équipe et les acteurs sont équipés de recycleurs Fleuss/Davis fonctionnant à l'oxylithe pour le tournage des scènes sous-marines. Ce film est l'un des tout premiers incluant des scènes tournées sous l'eau, dont une scène de combat, assez trouble d'ailleurs, opposant les héros à une pieuvre géante. La réalité a dépassé ou simplement rattrapé la fiction de Jules Verne.

1926- Scaphandre circuit ouvert de Yves Le Prieur et Maurice Fernex. Bien que le système respiratoire ne soit pas encore à la demande, comme ce sera le cas pour le scaphandre de Georges Comheines en 1937 puis du Cousteau Gagnan en 1943, cette invention marque le début de la plongée loisir en circuit ouvert. Ces systèmes simples sans recyclage et donc sans chaux fonctionnent à l'air, ce qui les rend beaucoup plus accessibles. Dans le même temps Draeger sort un recycleur pour plongée loisir et sauvetage (Draeger Bade-Tauchretter). Mais désormais, la technologie du recycleur commence à passer dans le domaine du secret militaire.

1931 - Six sous-marinières ressortent vivants du naufrage du HMS Poséidon en Mer de Chine grâce à leur courage et en utilisant le système Davis Lung.

1931-1932 En Union Soviétique, les ingénieurs et physiologistes ont mis au point un système fermé O₂, les Epron (E) sans By-pass O₂ et les VAP avec By-pass et bouton injecteur O₂.

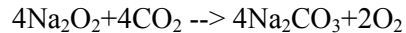
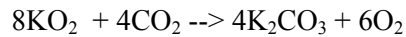
1934 – 1939 la Marine italienne conçoit des torpilles de propulsion pour plongeurs équipés de recycleurs. Les engins surnommés "Maiale" par Tisco Tesei, l'un de leurs inventeurs (ce qui pourrait se traduire par Cochons, vraisemblablement du fait de leur comportement capricieux) se révéleront très efficaces pendant la seconde guerre mondiale pour des missions de destruction de navires alliés (plus de 150 000 tonnes coulées). Les plongeurs sont équipés de recycleur Pirelli, une version italienne du recycleur Davis Lung, dont la licence leur a été vendue par les anglais vers 1936. De 1940 à 1943, les

nageurs de combats italiens opèrent depuis Algeiras (Gibraltar). Leur base secrète est dissimulée à l'intérieur de l'épave du Olterra, un cargo coulé dans le port. Cette base ne sera découverte qu'en 1943 lorsque l'Italie signera l'armistice.

1936 – Le IPA-3 soviétique voit le jour. Comme nombre de ses successeurs le IPA-3 fonctionne avec de l'oxylithe, qui libère de l'oxygène en absorbant le gaz carbonique. Ce choix technique de générer de l'O₂ dans le système lui-même perdure encore dans les modèles russes modernes. Le produit absorbant s'appelle le O-3 et fonctionne selon les réactions suivantes :

KO₂: Peroxide de Potassium

Na₂O₂: Peroxide de Sodium



Dès cette époque les physiologistes russes préconisent l'utilisation de recycleur à oxygène pur jusqu'à une profondeur de 20 mètres. Cette consigne semble encore appliquée de nos jours.

1939 - Aux USA, le Dr. Christian Lambertsen met au point le LARU. (Lambertsen Amphibious Respiratory Unit) – Un circuit fermé oxygène à débit constant (1).

1942 – Hans Haas en Allemagne collabore avec Hermann Stelzner. Ils mettent au point le Draeger 138 en perfectionnant un ancien recycleur circuit fermé O₂ par l'ajout d'un bouton poussoir pour l'incorporation d'O₂ à la demande. On commence à quitter le modèle du débit constant. Avec cet appareil Haas plonge à 18 mètres ce qui lui permet de faire des photos mais aussi d'avoir quelques problèmes d'hyperoxie.



Hans Haas vers 1942

Haas et sa femme Lotte plongent régulièrement sur la côte d'azur, puis contribuent au développement de la plongée en Mer Rouge. C'est un retour très discret des recycleurs vers la plongée loisir, car de 1939 à 1945 tous les fabricants (Pirelli, Draeger, Davis) équipent uniquement les nageurs de combat avec ces appareils.

Après la deuxième guerre mondiale, quasiment tous les recycleurs sont conçus à des fins militaires (nageurs de combat ou plongeurs démineurs). Seule la firme Italienne Cressi, commercialise en 1947 un recycleur circuit fermé O₂ le ARO 47 pour un usage de plongée loisir.

Avec le développement des détendeurs, la plupart des recycleurs vont maintenant être conçus avec des injections de gaz à la demande (9).

- Le LARU qui sous sa version Emerson Lambertsen équipera l'US Navy jusqu'en 1984. Il sera alors remplacé par le Draeger LAR V, évolution du Draeger Lieutenant Lund II (1953) et de la série des LAR développée par Draeger à partir des années 50.
- Aux USA, le Mark 6, puis toute une série jusqu'au Mark 15 (1972), fabriqués par Northrop/ General Electric pour l'US Navy. Ce sont des recycleurs Nitrox à circuit semi fermé qui équipent les UDT (Underwater Destruction Team). Leur design en forme de stab est très proche du Draeger Ray (25).
- En France, le GERS avec la société FENZY puis avec la Spirotechnique développent les appareils circuit fermé O₂ tels que l'Oxygers en 1957 et plus récemment le FROG et le CODE, ainsi que des appareils circuit semi fermé tels que l'Oxymixgers (circuit fermé O₂ et circuit semi fermé mélange) et le fameux DC-55.

1952 – Invention du DC-52 par le Pharmacien Chimiste Principal Dufau Casanabe membre du GERS. Le DC-52 est un recycleur circuit semi fermé à fuite proportionnelle. Le gaz expiré par le plongeur est envoyé dans deux sacs concentriques. Le volume du petit sac est rejeté vers l'extérieur tandis que le volume du grand sac est destiné à l'inspiration suivante. En fin de course, le grand sac déclenche un système mécanique permettant l'admission de mélange frais. Cette amélioration du système semi fermé permet une consommation encore plus faible, une très faible présence de bulles et une grande stabilité du % O₂ dans le circuit. Petits problèmes de jeunesse, le DC-52 est encombrant et présente un grand inconfort respiratoire. Le DC-55 est une évolution du DC-52 mis au point par le Pharmacien Chimiste Principal Perrimond Trouchet.

Le DC-55 est plus compact et plus fiable. Cet appareil entièrement constitué d'éléments amagnétiques est encore utilisé par les plongeurs démineurs français dans sa version militaire le DC-96 (13). Il est aujourd'hui fabriqué par la société Aqualung et est toujours classé arme de deuxième catégorie. C'est l'un des meilleurs recycleurs semi fermé au monde, par sa simplicité et sa grande efficacité. Ce concept du RMV (volume respiratoire minute) sera repris par les américains sur le Halcyon RMV Keyed en 1998 et le Halcyon RB-80.



1955 - La marine soviétique commande à l'académie médicale militaire Kirova de Léningrad un appareil à oxygène (IDA, du russe Dichat – Apparat, c'est-à-dire appareil à respirer) utilisable comme équipement de secours sur les sous-marins et pour la réalisation de travaux sous-marins à des profondeurs faibles. Depuis quelques années, cet institut travaillait sur les problèmes d'hypoxie rencontrés avec les IPA (liés au système d'injection de l'oxygène) et sur le développement de nouveaux recycleurs IDA. Le IDA 55 voit le jour, puis le IDA 57 (en 1957). Ces appareils fonctionnent à l'oxygène pur et sont utilisés par la marine en plongée jusqu'à 20 mètres de profondeur.

1959 – Le IDA 59 utilise en plus du système O₂ typique des IDA, une deuxième bouteille d'Héliox. Cela répond à la demande de sécurité pour des sous-marins qui peuvent désormais atteindre de grandes profondeurs. Des évacuations par plus de 200 mètres de fond ont été rapportées.

A partir des années 50, les plongeurs spéléo commencent à s'intéresser aux recycleurs, mais la technologie n'est pas vraiment disponible car les équipements sont classés secret-défense. La spéléo va donc faire le choix des circuits ouverts et donc d'une logistique extrêmement lourde pour amener le plongeur de pointe.

De 1970 à 1990, la technologie des recycleurs continue à évoluer, mais les plongeurs professionnels ne voient pas un grand avantage dans ces technologies, car quand bien même ils ne sont plus reliés à la surface pour le gaz, ils demeurent branchés à un cordon pour la protection thermique et l'apport d'énergie. Seules quelques machines seront développées, soit pour économiser l'hélium coûteux, telles que le FENZY P68, le Draeger SMS 1, soit comme appareil de secours tels que le BOS II par la COMEX pro ou le SLS par Divex. En 1984, le Draeger CCBS est mis au point pour des opérations jusqu' à 600 mètres de fond.

Durant cette période, la technologie des capteurs O₂ se développe (début 70) et avec elle, apparaissent les recycleurs à PpO₂ constante, c'est-à-dire fabricant le mélange respiré en fonction de la profondeur. Le premier est l'*Electrolung* en 1968, puis Biomarine Industry, une société formée par un groupe d'anciens ingénieurs de General Electric commercialise le CCR 1000 (1974). Cet appareil est le premier à utiliser un capteur galvanique à oxygène pour réguler l'arrivée de gaz. Sa conception est la

base du recycleur semi fermé le MK16 fabriqué par Biomarine puis par Carleton technology Inc (1979) et utilisé alors par l'US Navy ainsi que par les marines anglaises et australiennes.

Coté anglais, en 1979, c'est le DD500 par Normalair Garret conçu pour un travail léger par 500 mètres de fond. Même si l'appareil fonctionne, les problèmes liés au syndrome nerveux des hautes pressions (SNHP) ainsi que son très grand encombrement font que la notoriété de cet appareil ne dépassera pas son apparition dans le film James Bond "*Seulement pour vos yeux*" (1).

Coté soviétique, la série des IDA commencée dans les années 50 (IDA 57, 59, 64, 71, 76) se poursuit sans aucun apport électronique, mais avec une technologie de modification mécanique du mélange en fonction de la profondeur et avec utilisation systématique de O-3 (nom donné par les Russes à l'Oxylithe) comme absorbeur de CO₂. Les détendeurs sont de marque Oukraina.

A partir de 1960, les recycleurs russes ne seront plus en position ventrale mais en position dorsale. Le AKA 60 est un recycleur Nitrox, permettant d'atteindre 40 mètres avec un mélange 50%. C'est le premier recycleur amagnétique soviétique. Puis, en 1971, le IDA 71 combine la technologie de l'AKA 60 et celle du IDA 64. Le IDA 71 est un appareil qui permet de s'immerger à l'oxygène, puis de passer sur mélange Nitrox, tout cela étant contrôlé de manière exclusivement mécanique.



Vêtement sec et recycleur AKA 60 soviétique.

En 1972, le PZ72, dont la conception rappelle celui du DC-55 est un recycleur fonctionnant à l'air entre 10 et 40 mètres. On descend à 10 mètres afin d'obtenir une pression absolue suffisante pour que le mélange du recycleur (17% O₂) ne soit pas hypoxique, et le recycleur fonctionne. En 1972, sortie du IDA 71P, qui permet de s'immerger à 40 mètres, après avoir sauté en parachute de plus de 8000 mètres (Le IDA 71P se branche sur le circuit oxygène de l'avion !) et du IDA-72 fonctionnant à l'Héliox pour des plongées profondes en utilisation autonome à partir d'une cloche à plongeur (ca. 200 mètres).

A partir des années 80, les spéléos qui souhaitent aller encore plus loin, plus profond et plus longtemps, s'intéressent de nouveau aux recycleurs. Là, deux écoles s'affrontent (7).

Pour certains, comme les américains du groupe de Wakulla Spring, il convient d'embarquer suffisamment de bouteilles de secours pour pouvoir effectuer le retour en circuit ouvert en cas de défaillance du recycleur.

Mais pour d'autres, comme l'allemand Hasenmayer ou le suisse Olivier Isler, la solution est d'utiliser un recycleur dont les circuits sont redondants (deux recycleurs indépendants en un appareil), et qui plus est, dont la régulation dépende d'un minimum d'électronique embarquée. Le premier appareil de ce type fut développé par Jochem Hasenmayer en 1980, le STR 80 (pour spéléo twin, de l'anglais twin : jumeaux). Grâce à ce concept, Olivier Isler et son RI 2000 entre 1989 et 1998, bat records sur records en plongée spéléo. Il explore notamment la Doux de Coly sur 4250 mètres en consommant sur une plongée de 15h22 (dont 5 heures 42 au fond) 4.1 m³ de gaz sur les 16.7 embarqués. Bill Stone, aux USA conçoit sur le même principe avec Cis Lunar Lab, le Cis Lunar MK1 CCR et réalise lui une plongée de 24 heures. Cela tend à démontrer l'intérêt de la théorie de la redondance par rapport à une sécurisation de l'incursion avec des systèmes de secours en circuit ouvert, car pour un plongeur de pointe, il faut parfois emmener plus de 80 plongeurs en soutien. A noter que Bill Stone avait mis au point pour la NASA le système respiratoire des scaphandres des missions Apollo.

1985 – L'IDA 85, version modifiée du fameux IDA 71P est le dernier recycleur *soviétique*.

A partir 1990 – Premiers recycleurs civils industrialisés pour le marché de la plongée loisir :

Voici quelques réalisations notables et toujours présentes sur le marché, en particulier aux USA.

1990 Steam Machine aux Etats-Unis commercialise le SM1600 ou MK 15.5 dans sa version militaire, un recycleur circuit fermé à régulation électronique.

1995

- La société Draeger présente l'Atlantis qui deviendra le Dolphin en 1998 (recycleur de type semi-fermé).
- La société Grand Bleu/Nissan (Japon) innove avec le Fieno (un appareil de type semi-fermé, très compact, assez rapidement reconnu comme dangereux car plus destiné à la physiologie respiratoire de charmantes japonaises que de vigoureux plongeurs).
- Cis Lunar Lab, la firme de Bill Stone conçoit le Cis Lunar Mk 4 puis Mk 5, utilisés par Richard Pyle aux USA (19), pour ces recherches en biologie (projet Rolex 1995- découverte de nouvelles espèces dans la zone des 100 mètres). Le Cis Lunar est un des premiers appareils à contrôle de la PpO₂ électronique en vente libre, continuant ainsi dans la voie déjà choisie par Steam Machine et les militaires américains.



Cis Lunar Mark 5



Buddy Inspiration

1998

- AP Valves (Angleterre) présente le Buddy Inspiration, premier recycleur à contrôle électronique de la PpO₂ en Europe. Le nombre de cellules de mesure de la PpO₂ passera rapidement de deux à trois de façon à sécuriser l'appareil.
- Le Halcyon (USA- Floride) RMV keyed est un recycleur asservi à la respiration de conception très complexe. La version simplifiée et toujours commercialisée s'appelle le RB 80.
- Biomarine (USA) sort le BMR 500, un recycleur à gestion électronique.
- Steam Machine (USA) commercialise le Prism Topaz (encore un système à régulation électronique).

1999

- Cochran aux USA présente un modèle de recycleur à gestion électronique.
- Le Halcyon (USA – Florida) sort le RB 80, une très belle machine, sur le principe du DC-55, disponible uniquement aux USA.
- Le producteur italien Ocean Management Group (OMG) qui fabrique ou distribue depuis plus de 30 ans des recycleurs militaires, sort deux modèles pour le plongeur loisir, un recycleur semi-fermé le Azimuth (produit par San O Sub et Mares, avant que Mares ne se retire du projet) et le Castoro C96 pro, un circuit fermé oxygène pur.



Azimuth



Castoro C96

- Le Draeger Ray, recycleur entièrement conçu pour la plongée loisir. Le sac inspiratoire et le sac expiratoire sont intégrés dans un gilet stabilisateur. Les faux poumons sont donc placés très près des poumons du plongeur ce qui offre un grand confort respiratoire. Cet appareil est conçu au départ pour l'utilisation de mélange Nitrox 50% uniquement, limitant son utilisation à 22 mètres. Si c'est intéressant pour le marché américain, il en va autrement en Europe où Draeger puis Aqualung proposeront rapidement des modifications (différents injecteurs) permettant d'évoluer entre 0 et 35 mètres.



Première présentation du Draeger Ray au Boot 1999 (Düsseldorf)

2000

- Innerspace System Corporation (USA) présente le Megalodon à gestion électronique.
- Olympic Submarine Technology (USA) produit le Aura CCR 2000, encore un appareil à gestion électronique.

2003

- Aquatek (Italie) sort le Voyager, un appareil de type semi-fermé aux performances intéressantes.



Voyager (Aquatek)



Cochran CCR

2004

- CCR Technologies Co (Angleterre) qui commercialise déjà l'ordinateur VR3 pour utilisation HélioX ou Trimix présente un recycleur MGCCR, le *Ouroboros*, à 4 contrôleurs O₂ permettant de plonger de 0 à **300** mètres avec une autonomie de 4 heures (avec 2 blocs de 2 litres !). Ce

recycleur est équipé de nombreuses alarmes électroniques, notamment de prévention de l'hyperoxie. La qualification CE est en cours.

1999- 2004

Plus une seule revue de plongée qui ne traite du sujet des recycleurs, l'impact médiatique est évident. Côté vente, bien que les constructeurs restent très discrets sur ces chiffres, on peut estimer, fin 2003 que deux à trois milles recycleurs Draeger, ainsi qu'un nombre similaire d'Inspiration ont été vendus dans le monde. Tout cela contribue à l'apparition de ces machines dans l'environnement du plongeur sportif européen.

Est-ce une niche, ou l'émergence d'une nouvelle pratique ? Car si la supériorité technique par rapport au système ouvert est évidente, les recycleurs créent la curiosité du public mais suscitent encore, en Europe, l'indifférence ou la méfiance du consommateur. Il est cependant clair, à la vue des derniers salons de plongée que les fabricants ne baissent pas la garde et multiplient leurs efforts pour augmenter la taille de ce marché.

Points Clefs :

- Premier recycleur, dès 1849 par le Français Pierre Aimable de St Simon Sicard.
- A la veille de la première guerre mondiale, sur le principe des recycleurs circuit fermé employés dans les mines, les firmes anglaise Gorman et Siebe et allemande Draeger fabriquent des appareils de sauvetage pour sous marins et des appareils de plongée Nitrox permettant d'évoluer jusqu'à 40 mètres.
- Deuxième guerre mondiale, les nageurs de combat italiens s'illustrent en utilisant des recycleurs CCR type Davis. L'utilisation et le développement se fait alors uniquement pour des utilisations militaires.
- Après la deuxième guerre mondiale, invention du détendeur circuit ouvert et apparition de recycleurs semi-fermés avec injection à la demande.
- Dès 1970, apparition de machines à capteur O₂ et contrôle électronique.
- Dès 1980, utilisation fréquente des recycleurs en plongée spéléo. Des records sont battus en utilisant des machines spécialement conçues pour ces immersions très longues.
- Dès 1990, apparition de modèles industriels destinés à la plongée loisir.
- 2001 à 2004, large couverture médiatique pour les recycleurs qui entrent dans l'environnement du plongeur loisir. Est-ce une mode, une passion ou l'émergence d'une nouvelle pratique ?

2- SITUATION ACTUELLE

- 2 a/ Aspects légaux de la pratique du recycleur en France.
- 2 b/ Quel recycleur pour la plongée loisir ?
- 2 c/ Sécurisation des recycleurs (Bail Out, Mesure de la PpO₂).
- 2 d/ Présentation des organisations et formations recycleur existantes.

2 a/ Aspects légaux de la pratique du recycleur en France

La plongée au recycleur est une plongée au mélange autre que l'air et tombe donc sous le coup de l'arrêté du 28 Août 2000 pour la pratique en club.

Point clef 1 : Valeur limite de la PpO₂ et de la PpN₂

Au titre I, dans l'article 4, figurent les valeurs limites de PpO₂ et de PpN₂ autorisées pour la pratique. Il s'agit pour la PpO₂ de **0.17 bars** en PpO₂ min et de **1.6 bars** en PpO₂ max. Dans la pratique du recycleur loisir, ce sont ces deux valeurs qui vont déterminer les débits massiques de l'appareil, les mélanges utilisés et les profondeurs limites.

Point clef 2 : L'obligation d'un moyen de mesure de la PpO₂ et d'un circuit ouvert de secours.

L'article 12, du titre III (**Analyse des mélanges**), décrit les éléments devant être présents sur ces appareils et relie la pratique du recycleur au titre II (**Matériel**) couvrant lui l'ensemble des équipements et procédures applicables à la plongée Nitrox. L'obligation d'équiper les recycleurs d'un moyen de mesure de la PpO₂ inspirée ainsi que la nécessité lors de plongée au-delà de l'espace lointain de se munir d'un détendeur en circuit ouvert et d'une bouteille de secours y figurent.

Point clef 3 : Niveau minimum de pratique

L'article 19 du titre V (**Espace d'évolution et condition d'évolution**), mentionne qu'au **delà de l'espace proche**, seuls les plongeurs titulaires d'un niveau 3 ou plus peuvent pratiquer la plongée aux mélanges Nitrox ou Trimix avec un appareil à recyclage de gaz. On peut interpréter par défaut, que dans l'espace proche la pratique du recycleur n'est pas soumise à un niveau de plongée minimum, mais cela resterait cependant à démontrer. En effet, en Annexe I, (**conditions de délivrance des qualifications Nitrox et Trimix**), il n'est pas fait mention des recycleurs. De même en Annexe II comme en Annexe III, (**conditions de pratique de la plongée au Nitrox et au Trimix**), rien n'est spécifié pour la pratique de la plongée au recycleur. Le baptême, que ce soit du vrai débutant ou d'un plongeur souhaitant découvrir la plongée au recycleur, vecteur très important du développement de ce type de plongée, n'est pas évoqué. Dans le tableau 2a de l'Annexe II, il est indiqué qu'effectuer un baptême Nitrox ne demande pour le pratiquant aucun niveau minimum, et que l'encadrant de ce baptême doit être titulaire du E3 avec qualification Nitrox confirmé. Dans la presse (Océan Février 2003) certains ont étendu les conditions de pratique du baptême Nitrox à un baptême recycleur, en évoquant une nature du gaz respiré semblable. Cependant on s'accordera à dire que dans ce cas, l'encadrant devrait avoir une connaissance minimum des recycleurs et notamment de leur dangerosité potentielle dans la zone de l'espace proche.

Point clef 4 : Obligation d'utiliser des appareils portant la norme CE.

Dans l'article 12, du titre III, il est mentionné que seuls les appareils à recyclage de gaz ayant la norme CE 14143, peuvent être utilisés.

Ainsi du fait de l'absence de cursus de formation des plongeurs, ce cadre législatif est assez vague et restrictif. Il apparaît donc que le développement de la pratique loisir du recycleur passe par une modification de l'arrêté de août 2000.

2 b/ Quel recycleur pour la plongée loisir ?

Un bon recycleur est un recycleur permettant de faire la plongée souhaitée ! (Henri Paole).

Examinons donc le cahier des charges pour une utilisation en plongée loisir.

Profondeur : On peut considérer que la zone 0-45 mètres est la zone d'évolution principale pour le plongeur loisir. C'est aussi la zone d'utilisation des mélanges Nitrox traditionnels (30% et plus).

Durée de l'immersion : La notion de durée est liée à celle de la décompression. La majorité des plongées loisirs a des temps de paliers inférieurs à 10 minutes.

Une analyse des performances des recycleurs en fonction de la profondeur et de la durée d'immersion est donnée dans le tableau 1. Les calculs sont faits en utilisant les hypothèses suivantes (voir aussi chapitre 3b et l'annexe I):

- Recycleur utilisant un mélange pré-fabrique Nitrox.
- La composition du Mélange Inspiratoire correspond à une consommation O₂ moyenne de 1 litre/minute (effort modéré / palmage d'exploration).
- Les durées totales de plongées incluant une durée de décompression de 10 minutes sont extraites des MN90 en utilisant la Profondeur Air Equivalente (PAE) correspondante au mélange **inspiratoire**.
- Les profondeurs max d'utilisation sont données par le mélange embarqué (% O₂ bouteille prémix).
- Les autonomies sont calculées pour une consommation de 150 bars sur un bloc 4 litres gonflé à 200 bars. En utilisant un recycleur asservi à la respiration comme le DC-55 ou simplement en utilisant un bloc de plus gros volume, les autonomies seraient supérieures.

Tableau 1 : Autonomie possible par rapport à un profil de plongée loisir.

Mélange Bloc % O ₂	Prof. Max. d'utilisation (mélange)	Composition du Mélange Inspiratoire (O ₂)	Prof. Air Equivalente (mélange inspiratoire)	Durée Totale de Plongée (*)	Type Recycleur /Vol. Bouteille/ Autonomie
100 %	6 m	100 %	O ₂ pur	Limitée par exposition O ₂ – max 180 minutes	Circuit fermé / 2 litres/ 3 heures
50 %	22 m	42 %	13 m	95 minutes	Semi-fermé / 4 litres/ 80 minutes
40 %	30 m	31.4 %	24 m	36 minutes	Semi-fermé / 4 litres/ 60 minutes
30 %	43.3 m	25 %	39 m	30 minutes	Semi-fermé / 4 litres/ 40 minutes

(*) Incluant 10 minutes de paliers.

On constate ainsi que des recycleurs semi-fermés de type Ray, Dolphin ou Azimuth, correspondent tout à fait à une utilisation loisir. Les constructeurs spécifient et équipent ces machines pour une utilisation le plus souvent Nitrox et sans palier. Cela se traduit par des blocs mélange de relativement faible capacité et par des systèmes de Bail Out soit absents, soit à faible autonomie. Le plongeur loisir souhaitant réaliser des immersions plus longues à des profondeurs entraînant des paliers devra donc planifier sa plongée et modifier son équipement (bloc et Bail Out) en conséquence (Voir Chapitre 2c).

Tableau 2 - Zones d'évolution et recycleurs appropriés.

Zone Evolution	Recycleurs	Types	Remarques
0-7 mètres	Oxygers Castoro C96	CCR CCR	Militaire Fabrication OMG - Italie
0- 30 mètres	Ray	SCR	Mélange 40% (avec injecteur Draeger 40%) Limité par pression moyenne détendeur (9 bars)
0-40 mètres	Dolphin Azymuth Submatix	SCR SCR SCR	Nitrox 36% Limites P Moyenne (11 bars) Norme CE – Nitrox 0 – 40 mètres. Fabrication Allemande – pas encore norme CE
0- 55 mètres	DC-55 Inspiration Voyager	SCR RMV MGCCR SCR	Militaire. Nitrox 32% max 55 mètres. Norme CE – Nitrox 0-45 mètres Aquatek Italie (formation incluse dans vente) CE
0-65 mètres	Inspiration	MGCCR	Norme CE 0- 100 mètres au Trimix

Notes : CCR = Closed Circuit Rebreather ou Recycleur Circuit Fermé.

SCR = Semi Closed Rebreather ou Recycleur Circuit Semi-fermé.

SCR RMV= Recycleur Circuit Semi-fermé asservi à la respiration du plongeur.

MGCCR = Mixed Gas Closed Circuit Rebreather ou Recycleur Circuit Fermé à gestion électronique.

Remarques sur le choix d'un équipement:

- Le Dolphin et le Ray de Draeger sont des recycleurs complets et ultra-sécurisés. Les débits des injecteurs sont très élevés afin de supprimer quasiment le risque hypoxique. De plus, il y a des pièges à eau qui protègent la cartouche de chaux et permettent d'éviter un retour de chaux en cas d'inondation. Ces recycleurs à la norme CE sont parfaitement adaptés pour l'initiation et la formation à la plongée au recycleur.
- Le Draeger Ray est un recycleur de conception récente qui minimise le nombre de pièces et de joints susceptibles de fuir et offre au plongeur un grand confort respiratoire. Malgré son aspect, peut-être plus frêle que le Dolphin, c'est une machine très intéressante que ce soit pour l'initiation, l'enseignement ou l'exploration à 30 mètres (en utilisant le mélange et l'injecteur correspondants). Le plongeur souhaitant s'orienter vers l'autonomie à 40 mètres choisira de préférence un Dolphin ou un système équivalent pour des raisons de conception explicitées plus loin.
- Pour des recycleurs comme le Dolphin, le Ray ou le Submatix, il existe un injecteur spécifique pour chacune des concentrations d'oxygène suivantes : 32%, 40%, 50%, 60% et 100%. Ceux ci permettent d'augmenter le domaine d'utilisation et/ou de faire varier l'autonomie tout en gardant les marges de sécurité mises en place (Draeger garantit que pour une VO_2 max de 3 litres/minute, le mélange inspiratoire contient toujours plus de 17% d'oxygène).
- Il est intéressant pour la photo ou la vidéo d'évoluer dans la zone 0-6 mètres avec un appareil en circuit fermé de façon à ne produire aucune bulle et ainsi à minimiser le bruit émis par le plongeur. Pour ce faire, un appareil comme le Castoro C96 (de OMG Italie) offre de bonnes performances avec environ 2 heures d'autonomie pour un bloc de 2 litres et une cartouche de chaux de 1.5 kg. Attention cependant, car l'exposition longue à des valeurs de PpO_2 de 1.4 bars à 1.6 bars peut entraîner, notamment en cas d'effort prolongé, des problèmes de crise hyperoxique. Les appareils à oxygène pur en circuit fermé demandent donc une formation très spécifique, ainsi que des précautions additionnelles (surveillance, sanglage de l'embout en bouche) liées au risque de convulsion (26). Ainsi les appareils à circuit fermé, du type Castoro, malgré leur simplicité ne sont pas destinés au plongeur recycleur débutant. Pour le débutant, dans la zone proche, on préférera un appareil semi-fermé, mais équipé d'un injecteur permettant d'utiliser des mélanges riches en O_2 (50% ou 60%) ce qui permet d'éviter les risques d'hypoxie, sans être trop exposé au risque hyperoxique, comme cela serait le cas avec un appareil circuit fermé à O_2 pur, notamment en cas de dépassement accidentel de la profondeur limite.

- La limite de profondeur pour un circuit semi-fermé est donnée par le mélange Nitrox utilisé mais aussi et surtout par la garantie du constructeur en fonction des pièces et matériaux de fabrication. En effet, sur des appareils tels que le Dolphin ou le Ray, l'injection de gaz se fait au travers d'une buse sonore. ***Or cette buse ne délivrera la quantité souhaitée que si la différence de pression entre la pression moyenne et la pression ambiante est égale au minimum à 2 fois la pression ambiante (1, 11).*** Le Dolphin est équipé d'un détendeur compensé dont la moyenne pression est constante et fixée à 17 bars, ce qui donne une profondeur max théorique d'utilisation de 75 mètres. Pour le Ray, le premier étage délivre une moyenne pression égale à 9 bars au dessus de la pression ambiante, ce qui correspond à une profondeur max de 35 mètres. Au delà, il y a un risque d'hypoxie, si la buse ne parvient pas à fonctionner correctement.
- On peut bien entendu modifier l'appareil en augmentant la moyenne pression délivrée par le premier étage, mais toute modification, que ce soit de débit ou de tarage de détendeur entraîne la perte de la norme CE. De ce fait, comme précisé dans l'arrêté d'août 2000, un appareil modifié ou bricolé ne peut plus être utilisé en formation.
- L'Oxygers et surtout le DC-55 (version 92) mentionnés dans le tableau précédant sont sans conteste des machines formidables. Hélas, elles sont réservées à des utilisations militaires et bien qu'elles soient en train d'être remplacées (l'Oxygers par le FROG et le DC-55/92 par un appareil 0-80 mètres), elles ne sont pas disponibles dans le commerce.
- Le Voyager d'Aquatek est un appareil semi-fermé qui fonctionne avec une bouteille d'O₂ et un diluant Nitrox ou Trimix. Il y a donc une bouteille pour le fond et une seconde pour la décompression. Le système peut aussi être utilisé en circuit fermé O₂ ou en semi-fermé avec 2 bouteilles Nitrox.



Cet appareil a reçu en 2003 la norme CE. Il est assez complexe à mettre en œuvre du fait des possibilités multiples d'utilisation et de dosage. De même que pour l'Azimuth, cela ne le désigne pas pour une utilisation par des débutants mais cela peut être un appareil très intéressant pour des plongeurs à la recherche d'une machine performante, notamment dans le cadre de plongeurs recycleurs souhaitant évoluer vers l'autonomie dans l'espace lointain.

- Le AP Valves Inspiration, et bientôt l'Evolution sont les seuls recycleurs à gestion électronique fabriqués et disponibles en Europe. L'Inspiration est un appareil complexe du fait de sa gestion de la composition du mélange respiré par 3 capteurs O₂ et 2 microprocesseurs. Ce système qui contrôle l'ouverture et la fermeture d'un solénoïde placé sur l'alimentation du circuit inspiratoire en O₂ est incompatible avec la moindre trace d'humidité qui risque d'en fausser le fonctionnement. Cet appareil a reçu la norme CE pour utilisation Nitrox de 0 à 45 mètres ainsi que pour utilisation Trimix ou Hélio₂ de 0 à 100 mètres. Le système électronique maintient automatiquement la pression partielle d'oxygène dans le mélange inspiratoire à une valeur comprise entre 1 et 1,4 bars, fixée par le plongeur. Pour la plongée profonde, un gaz diluant à très faible concentration en oxygène est utilisé. L'intérêt d'une valeur élevée de PpO₂, en dépit du risque hyperoxique est de réduire la saturation en diluant et ainsi d'effectuer moins de paliers de décompression tout en respirant un mélange suroxygéné (100% O₂ au palier de 3m). L'autonomie de l'appareil dans sa configuration commerciale est de plus de 3 heures. C'est un appareil assez facile à utiliser mais qui demande beaucoup de vigilance dans la phase de préparation et de calibration comme lors de l'immersion. Une dizaine d'accidents mortels a été recensée avec cet appareil, mais il est quasi impossible d'obtenir des informations validées et factuelles sur leurs causes. Pour ses partisans, l'Inspiration est un recycleur très fiable aux possibilités immenses, pour d'autres, ce serait une machine potentiellement dangereuse car comme l'indique Jean-Luc Diainville, Directeur

d'Aqualung : « la fabrication du mélange respirable en plongée est un défi à la sécurité, qui n'a son équivalent dans aucune autre activité à risque » (voir Annexe II). Tous s'accordent cependant sur le fait que le système de mesure de la pression partielle d'oxygène est le talon d'Achille de ce recycleur. Une attention toute particulière doit donc y être apportée et un remplacement périodique est indispensable.

- L'Inspiration est donc un recycleur très technique qui permet d'évoluer dans la zone 0-45 mètres. Mais c'est un recycleur assez cher (plus de 6500 Euros) et avec un coût d'entretien élevé du fait du nombre de cellules O₂ (80 euros pièce). Il est donc moins optimisé d'un point de vue coût pour ce domaine que des recycleurs comme le Ray ou le Dolphin qui ont eux été spécialement conçus pour cette zone. Il apparaît que les performances potentielles (autonomie, utilisation trimix, décompression O₂) de l'Inspiration le destine à un groupe d'utilisateurs plus restreint, attiré par la plongée profonde. Attention cependant, car pour cette utilisation, le plongeur devra se former au Trimix, connaître son appareil, en ayant notamment une bonne expérience de la plongée au recycleur en mélange Nitrox et se doter d'un ensemble de sécurités supplémentaires (bloc de secours, ligne de vie etc.) ainsi que d'une logistique de plongée lourde. Le risque serait de croire qu'une plongée profonde peut s'effectuer facilement dans le cadre d'une activité loisir.
- L'apprentissage et la découverte du recycleur doivent se faire sur des machines simples, fonctionnant au Nitrox et sans modification de la composition du mélange inspiratoire lors de l'immersion. Cela semble être dans tous les cas, que l'on se destine ou non à la plongée profonde, une étape indispensable avant de passer à un recycleur tel que l'Inspiration. Il est peut être regrettable que AP Valves dans sa stratégie de développement commercial propose des formations sur Inspiration dès le plongeur deux étoiles (ou équivalent), sans expérience sur SCR en pré requis. Quant au passage à l'utilisation de diluants hypoxiques type Trimix, il ne devrait se faire que de manière très encadrée et après de nombreuses heures d'immersion dans la zone 0 – 45 mètres.



Inspiration, à faible profondeur...

Attention !

Quel que soit le recycleur choisi pour une pratique en exploration ou en enseignement, en club ou hors club, l'appareil doit avoir la norme CE, et l'utilisateur doit pouvoir justifier de son achat et de son entretien. En cas d'accident, et en l'absence de l'un ou l'autre de ces documents, les assurances pourraient refuser d'intervenir. Les appareils bricolés, ou 'home made' même s'ils ont un très grand intérêt pédagogique seront donc à bannir de nos formations.

2 c/ Sécurisation des recycleurs (Bail Out, Calcul d'autonomie, Mesure de la PpO₂)

Lorsque l'on plonge au recycleur, deux types de problèmes d'ordre matériel peuvent survenir :

- Inondation du système, suite à une rupture de pièce ou d'un joint.
- Arrêt de l'injection de gaz par rupture de joints, colmatage d'un injecteur, erreur de gonflage ou mauvais fonctionnement du système de contrôle électronique.

Dans les deux cas, le plongeur qui dispose d'un système d'alarme se retrouve alors dans l'incapacité de respirer sur le recycleur. Il doit donc rapidement passer sur son système de secours. Aucun des recycleurs disponibles dans le commerce n'est conçu sur le principe de la redondance (décrit par Olivier Isler (7)) qui permettrait en cas de panne du premier circuit de passer sur un second circuit de recycleur et donc de pouvoir gérer sa remontée en disposant d'une autonomie non liée à l'embarquement de nombreuses bouteilles de secours. Le plongeur passe donc sur un système de secours, le fameux Bail Out qui lui fonctionne en circuit ouvert. Son autonomie est alors considérablement réduite dans la mesure où les recycleurs sont équipés de bloc de 4 à 6 litres et de système de Bail Out de 2 à 3 litres. En circuit ouvert, cela correspond à une autonomie de l'ordre de 10 à 15 minutes.

Le système de Bail Out doit toujours correspondre à la plongée effectuée. En cas de panne du recycleur, en fin de plongée, le Bail Out doit permettre d'effectuer, avec une marge de sécurité de 50% au minimum, la remontée ainsi que la décompression correspondante au mélange du Bail Out.

Quel mélange choisir pour le système de Bail Out ?

- Si l'on choisit d'utiliser le même mélange que celui de la bouteille du recycleur, alors il conviendra de ne pas dépasser la profondeur maximale possible avec ce mélange. Or le % O₂ dans le mélange inspiratoire étant d'environ 20% inférieur à celui du bloc, le plongeur pourrait évoluer à une profondeur supérieure sans que l'alarme de PpO₂ ne se déclenche (exemple un mélange bouteille 40% donc maximum 30 mètres, donnera un mélange inspiratoire à 32% permettant d'évoluer à 40 mètres). Il y a donc risque hyperoxique en cas de passage sur le système de Bail Out, lors d'un dépassement accidentel de la profondeur plancher.
- On peut aussi choisir un mélange différent du Nitrox embarqué mais qui doit toujours être plus faible en oxygène. Beaucoup utilisent de l'air dans le Bail Out. L'avantage est l'absence de risque hyperoxique mais en cas de passage sur le Bail Out, un plongeur qui respirerait un mélange 32% à 40 mètres, se retrouverait soudain à respirer un mélange qui passe en un instant d'une pression partielle d'azote de 3.4 bars à une pression de 4 bars. Il y a dans ce cas un risque de Narcose non négligeable. De plus lors de la décompression, il faudra tenir compte du fait que l'on effectue les paliers non plus au Nitrox mais à l'air. De même, les indications de décompression données par l'ordinateur relié au recycleur ne seront plus valables.
- La mise en place d'un système de Bail Out efficace, doit donc tenir compte de tous les aspects de la plongée ainsi que du pire scénario. Ce n'est pas juste une bouteille de sécurité que l'on emmène, histoire de se rassurer, mais bien un système d'évacuation dont la pertinence doit être évaluée avant chaque plongée. Ceci fait partie pour le plongeur de la phase de préparation car un système de Bail Out parfaitement adapté pour une plongée peut se révéler fortement insuffisant pour une autre, comme dans les exemples suivants.

Exemples de calcul d'un système de Bail Out :

1/ On souhaite effectuer une plongée de 25 minutes sur une épave – Fond maxi 43 mètres.

On choisit un recycleur type Dolphin avec bloc 6 litres gonflé à 200 bars – Injecteur 32% à débit 15 litres/minute – mélange Nitrox 30%. Autonomie 60 minutes (restera alors 50 bars dans le bloc)

Par sécurité, on considère que l'on respire un mélange à 21% (ce qui correspond à une consommation de environ 1.8 litres O₂ par minutes, donc effort assez important du type déplacement à 40 mètres avec courant).- Voir Tableau O₂ en Annexe 1.

Durée de la plongée : 25 minutes
Durée de la remontée : 4 minutes
Durée de la décompression (mélange 21%) : 30 minutes (5 minutes à 6 mètres, 25 minutes à 3 mètres)

Durée totale : 59 minutes.

Si l'on doit passer sur Bail Out, soit dans le pire cas après 25 minutes par 43 mètres. En considérant un rythme respiratoire de 20 litres/minute, on doit avoir disponible en gaz (a Patm) :

Pour la remontée : 264 litres

Pour la décompression : 810 litres

Soit un total de 1074 litres, plus 20% de marge de sécurité, soit 1200 litres.

Cela correspond à un bloc de 6 litres, gonflé à 200 bars.



Recycleur et Bail Out adapté

2/ Pour information, le recycleur Dolphin est vendu avec une bouteille Bail Out de 2 litres à 200 bars et un bloc Nitrox de 5 litres. Si on considère une plongée à 40 mètres, le constructeur donne une autonomie de 50 minutes. On plonge avec un mélange 32%, ce qui donne pour une VO_2 de 2.5 litres/minute, un mélange inspiratoire de 21%. Pour une profondeur de 40 mètres et une durée totale de 50 minutes, les tables MN90 indiquent :

Durée de la plongée : 25 minutes

Durée de la remontée : 4 minutes

Durée de la décompression : 21 minutes (2 minutes à 6 mètres, 19 minutes à 3 mètres)

En cas de panne après 25 minutes par 40 mètres, on doit avoir dans le Bail Out.

Pour la remontée : 264 litres

Pour la décompression : 558 litres

Soit un total de 822 litres, plus 20% de marge, soit 990 litres

Cela correspond à un bloc de 5 litres gonflé à 200 bars !

Ces deux plongées sont réalisables avec un Dolphin ou un Ray (équipé d'un injecteur 32%). Le Ray est équipé d'un détendeur de secours directement branché sur le bloc Nitrox, le Dolphin est quant à lui fourni avec un bloc de Bail Out de 2 litres. Attention donc, à bien s'équiper d'un Bail Out correspondant à la plongée à effectuer. Le constructeur, lui, indique que ses appareils sont destinés à des plongées sans paliers !!!!

3/ Si l'on considère une ballade à 30 mètres avec un mélange 40% (débit injecteur 10 litres par minute) avec un Ray équipé d'une bouteille de 5 litres gonflée à 200 bars- On dispose d'une autonomie théorique de 70 minutes. Le mélange inspiratoire sera de 30 % pour une consommation O_2 de 1.5 litres/minute. On a donc une profondeur équivalente air de 25 mètres.

Durée de la plongée : 45 minutes

Durée de la remontée : 3 minutes

Durée de la compression : 16 minutes à 3 mètres.

En cas de panne après 45 minutes à 30 mètres, on dispose dans le bloc de 116 bars, soit au total 550 litres.

Si on passe sur le détendeur de secours du Ray, en circuit ouvert sur ce même bloc, on doit alors effectuer, la remontée et le palier, soit un besoin de :

- 120 litres pour la remontée

- 416 litres pour le palier, soit au total 536 litres.

De manière ***théorique*** on peut donc effectuer sa remontée sur le système de Bail Out du constructeur.

Autonomie du recycleur,

Les calculs d'autonomie, sont basés sur la formule suivante :

$$\text{AUTONOMIE (minutes)} = 0.75x (\text{Réserve de gaz (litres)}) / \text{débit Injecteur (litres /minute)}$$

Exemple : Injecteur 8 litres/minute ; bloc de 4 litres gonflé à 200 bars
Autonomie = $0.75 \times 800 / 8 = 75$ minutes

Pourquoi, 0.75% ? Et bien pour se laisser un peu de sécurité, 75% d'une bouteille gonflée à 200 bars c'est 150 bars, soit une réserve de 50 bars, ce qui va dans le sens de la sécurité.

Et le débit, il ne varie pas avec la profondeur ? En fait, cela dépend des recycleurs, mais pour un circuit semi-fermé à débit continu, l'injection de gaz se fait au travers d'une buse sonique qui contrôle un débit massique, c'est à dire que la quantité de gaz (le nombre de molécules) reste la même quelle que soit la pression ambiante. Ainsi lorsque la profondeur augmente, le volume de gaz injecté diminue. C'est aussi pour cela que ces appareils deviennent très confortables dès que l'on dépasse 10 mètres.

Quelle est l'influence de la fréquence respiratoire ? Les injecteurs sont calculés pour une consommation oxygène de l'ordre de 3 litres/minute. Le débit de la buse est donc constant. Dans le cas, d'un essoufflement, ou d'une respiration ample et rapide, le plongeur respirera alors sur le système de By-pass, qui, puisqu'il fonctionne comme un détendeur en circuit ouvert, aura pour effet de réduire considérablement l'autonomie du recycleur (voir chapitre 3a).

Autres paramètres qui influent sur l'autonomie ?

- Le plongeur est limité par son exposition à l'oxygène, ainsi son % d'exposition oxygène sur le système nerveux (% SNC) ne doit jamais dépasser 100% sur une plongée. (voir chapitre 3c)
- L'autonomie du recycleur est aussi donnée par la capacité de la cartouche de chaux à absorber le CO₂. (voir chapitre 3b)

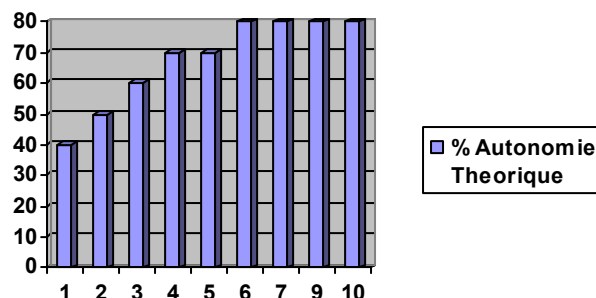
Comparatif d'autonomie:

<i>Equipement</i>	<i>Circuit ouvert / Bloc 15 litres</i>	<i>Ray Injecteur 40% / Bloc 5 litres (débit injecteur 10 l/minute)</i>
<i>Plongeur</i>	En forme, consommation 15 litres d'air/minute	En forme, consommation 1 litre O ₂ /minute
<i>Autonomie à 35 mètres/ 50 bars</i>	33 minutes	75 minutes
<i>Paliers (35 minutes à 35 mètres)</i>	2 minutes à 6 mètres, 27 minutes à 3 mètres	17 minutes à 3 mètres
<i>Bilan</i>	Risque de panne sèche ! (10 bars)	Pas de problème ! (90 bars)

On constate donc la supériorité des recycleurs par rapport à la plongée à l'air en circuit ouvert.

Attention cependant car ces autonomies ne sont atteintes que lorsque le plongeur ne perd quasiment pas de gaz. On le voit sur le schémas suivant, le plongeur atteint à peine 80% de l'autonomie théorique après 10 plongées et ce n'est qu'après de nombreuses heures d'immersion (50 heures ou plus) qu'il atteindra les 100%. Puis, soit par modification du matériel, soit en accumulant de l'expérience, les durées de plongée vont s'allonger et il sera nécessaire de parfaitement planifier son Bail Out et une évacuation potentielle.

Evolution de % d'autonomie théorique, sur les 10 premières plongées au recycleur (Renaud)



Mesure de la Pression Partielle d'oxygène :

Selon l'arrêté de août 2000, le recycleur doit être équipé d'un moyen de contrôle de la PpO₂. En général les recycleurs de type semi-fermé ne sont pas vendus avec ces appareils. Ces systèmes de mesure sont composés d'une ou plusieurs cellules O₂ qui seront placées au sec sur le circuit inspiratoire du recycleur et d'un moyen de lecture directement relié à la cellule (Oxygauge, Inspiration), ou connecté par transmission magnétique à un récepteur (Oxy 2 et ordinateur Air ZO2 Uwatec) qui lui pourra être immergé. Le fonctionnement des cellules est décrit dans le chapitre 3a.

La sécurisation d'un recycleur passe donc par l'installation de ces capteurs O₂, soit directement sur le sac inspiratoire, ou à la sortie de la cartouche de chaux (mais on a dans ce cas, le problème des poussières qui risquent de très rapidement dégrader la cellule) ou encore sur le tuyau annelé coté inspiratoire. Il faut systématiquement veiller à ce que :

- La cellule soit protégée des eaux de condensation, de la salive et des poussières de chaux.
- La connexion de la cellule au circuit soit étanche.

La plupart des constructeurs proposent des kits d'adaptation, ce qui permet de conserver la norme CE de l'appareil.

Points Clefs :

- La plupart des recycleurs sur le marché répondent du point de vue de l'autonomie au besoin du plongeur loisir entre 0 et 45 mètres.
- Dans la pratique, l'autonomie du plongeur est supérieure à celle d'un circuit ouvert. Il faut une bonne dizaine de plongées avant de pouvoir exploiter toutes les possibilités de l'appareil.
- Selon l'arrêté de août 2000, mais aussi de façon consensuelle en Europe, seuls les recycleurs possédant la norme CE sur les appareils respiratoires peuvent être utilisés en plongée loisir, pour la formation et l'exploration, dans le cadre d'une activité club.
- Seuls 6 des recycleurs utilisables en plongée loisir ont aujourd'hui la norme CE. Il existe de nombreux autres modèles (par exemple le Submatix) qui ne l'ont pas. Aucun des modèles américains n'a été testé pour la norme CE.
- En France, un moyen de mesure de la PpO₂ est obligatoire.
- Le Draeger Dolphin et le Draeger Ray sont conçus pour être facile d'utilisation et pour des plongées sans paliers. Ce sont d'excellents appareils pour l'école et la pratique loisir.
- Le Draeger Ray et Dolphin, grâce aux changements possibles d'injecteurs, sont des recycleurs parfaits pour le plongeur loisir entre 0 et 45 mètres.
- Les systèmes de sécurité / Bail Out doivent être mis en place par l'utilisateur en fonction des plongées effectuées. Les recycleurs commerciaux sont soit non équipés, soit disposent d'un système de très faible autonomie.
- Les recycleurs de type circuit fermé oxygène où a mélange de gaz demandent une formation plus poussée que les recycleurs circuit semi-fermé.
- Le Azimuth ainsi que le Voyager se prêtent bien à une utilisation loisir, et permettent d'effectuer des plongées un peu plus profondes ou plus longues en sécurité.
- Le Castoro C96 permet de plonger à l'oxygène, mais demande une formation plus poussée. Du fait des risques potentiels et de la limite de profondeur, c'est un appareil qui est moins destiné à la plongée loisir, mais qui peut intéresser le photographe ou le vidéaste.
- Le AP Valves Inspiration est un recycleur performant mais moins optimisé dans une optique de plongée loisir. Son utilisation possible en plongée profonde en utilisant un diluant trimix, demande une formation poussée et une logistique de plongée assez lourde. Il s'adresse à des plongeurs recycleur confirmés.

2 d/ Présentation des organisations et formations recycleur existantes

Depuis les années 90, de nombreuses organisations, pour la plupart commerciales, offrent des formations de plongeur recycleur. Suivant les pays et les standards pédagogiques, les cursus diffèrent, mais les bases sont assez similaires. Souvent elles ont été mises au point en partenariat avec les fabricants.

Les fondamentaux sont les suivants :

- Formation sur recycleur circuit semi-fermé puis sur recycleurs de type circuit fermé oxygène ou à mélange de gaz
- Niveau d'entrée: en fonction des pays, minimum un équivalent du Niveau I et un diplôme Nitrox de base avec parfois des plongées requises (de 5 à 50).
- Profil de sortie :
En fonction des prérogatives et des lois, utilisation du recycleur jusqu' à 40 mètres maximum.
Connaissance de base sur le fonctionnement d'un recycleur.
Choix du recycleur et du mélange en fonction de la plongée.
Montage / Démontage / Entretien.
Procédures d'urgence (Au minimum, passage sur embout de secours).
Notion de physique (calcul PpO₂, rôle de la chaux).
Préventions des accidents spécifiques (O₂, CO₂).
- Qualification par appareil.
- ***En Europe, les formations sont conduites sur du matériel aux normes CE. Lors de la pratique, la PpO₂ ne doit jamais dépasser 1.4 bars et les plongées doivent rester dans la courbe de sécurité, avec une exposition à l'oxygène contrôlée (max. 100% de l'indice SNC).***

Du fait des différences importantes entre les recycleurs et de leur évolution rapide, le principe de qualification par appareil semble être adopté globalement. Certaines organisations mettent ensuite des systèmes de passerelle en place, souvent basés sur une durée minimum d'immersion complémentaire sur le nouvel appareil.

En ce qui concerne les recycleurs de type circuit fermé à mélange de gaz avec possibilité d'utilisation de Trimix, on dépasse complètement le cadre de la plongée loisir et seules quelques écoles, dont les formateurs ont été habilités par le constructeur (AP Valves pour l'Inspiration), délivrent ce type de formation.

Panorama des formations accessibles en Europe.

<i>Organisation</i>	<i>Origine /Présence Europe (France)</i>	<i>Type Organisation</i>	<i>Niveaux proposés Plongeur recycleur</i>
ANDI	USA / Oui sauf France	Privée / Moniteur sous licence	4 - SCR et MGCCR
ANMP	France/ France	Syndicat / Moniteur sous licence	Plongeur Recycleur SCR
BSAC	GB / GB seulement	Fédération	Initiation / Awareness
CMAS	Europe/ Oui	Fédération	Plongeur Recycleur SCR
CMAS Germany/ITD	Allemagne/ Allemagne	Privée / Moniteur sous licence	Plongeur Recycleur SCR
FFESSM	France/France	Fédération	0 (1 niveau prévu)
IANTD	USA/Oui, France	Privée / Moniteur sous licence	3 SCR et MGCCR
IART	Allemagne/Oui, France	Privée / Moniteur sous licence	3 SCR et MGCCR
PADI/NRC	USA/ Oui, Allemagne, France	Privée / Moniteur sous licence	2 SCR et MGCCR
TDI	USA/Oui, France	Privée / Moniteur sous licence	1 SCR ou MGCCR
Rab/VDsT	Allemagne/ Oui	Fédération	1 SCR et MGCCR

Détails des formations

ANDI (American Nitrox Diver International)

Présente par licences en Allemagne/ Autriche / Benelux/ Italie/ Grèce / pays Nordiques, ANDI est très axée sur la plongée au recycleur. Les formations sont faites par famille de recycleur SCR ou MGCCR. En Europe cela correspond néanmoins encore à des qualifications machines :

SCR : Draeger Dolphin ou Ray.

MGCCR et CCR : AP Valves Inspiration.

Formations :

- Introduction au recycleur : Ouvert à tout plongeur titulaire du Open water minimum (Niveau 1 FFESSM) ce programme non qualifiant est composé de 2 heures de cours sur divers aspects de la plongée au recycleur et 2 heures en piscine ou en bassin extérieur pour une découverte de la plongée sans bulles.
- Plongeur recycleur circuit semi-fermé : A partir du niveau Open water + formation Nitrox + 50 plongées. Formation des plongeurs sur appareil semi-fermé avec mélange Nitrox. Evolution jusqu'à 40 mètres sans décompression. Le contenu de formation est de 12 heures de cours, 3 heures de plongée piscine et 4 plongées en extérieur. (SCR level 2)
- Plongeur recycleur circuit fermé à mélange de gaz (MGCCR) : A partir du niveau Open water+ formation Nitrox + 50 plongées. Ce programme a pour but de former le plongeur à des plongées sur max 40 mètres et sans décompression, en utilisant un appareil de type Inspiration ou un équivalent américain avec mélange Nitrox. Le contenu de formation est de 18 heures de cours, 4 heures de plongées piscine et 4 plongées en extérieur. Le temps de plongée total doit être au minimum 150 minutes. (MGCCR Niveau 2)
- Plongeur recycleur Technique (Technical Rebreather Diver Level 3) : Pour plongeur titulaire du SCR level 2 ou MGCCR level 2 et d'un minimum de 100 plongées, ce programme forme le plongeur à des plongées jusqu'à 50 mètres avec décompression. Les mélanges utilisés sont le Nitrox et l'Héliox avec des appareils MGCCR ou SCR. Le contenu de formation est de 16 heures de cours, 2 heures en piscine et 4 plongées en extérieur avec un temps d'immersion minimum de 150 minutes.
- Explorateur recycleur (CCR ou MGCCR level 5) : Ouvert au titulaire du niveau 3 de plongeur recycleur ayant plus de 200 plongées dont au moins 25 avec recycleur, ce programme a pour but la formation d'explorateurs sous marins pouvant évoluer avec des recycleurs *jusqu'à 100 mètres de profondeur*. Le contenu des cours met l'accent sur la logistique de surface, l'équipement, la sécurité et la décompression. Plus de 24 heures de cours, 4 heures en piscine et 6 plongées en extérieur avec un temps d'immersion minimum de 240 minutes.

Les formateurs, sont membres ANDI et travaillent sous licence. Il existe deux niveaux d'instructeur recycleur (Instructor et Instructor Trainer).

ANMP Association Nationale Moniteurs de Plongée

A partir de 2001, l'ANMP met en place une qualification moniteur recycleur semi-fermé pour ses membres, en reconnaissant les formations IANTD France, NRC ou TDI sur Draeger Ray ou Dolphin Cette qualification permet ensuite à son titulaire de délivrer une **compétence** recycleur, dont le niveau d'entrée correspond à la réglementation en vigueur en France (Niveau 3 et Nitrox Base). Une dizaine de structures professionnelles offrent cette qualification en France.

BSAC (British Subaquatic Club)

La fédération britannique a mis en place depuis 3 ans un groupe de travail (le RWG pour Rebreather Working Group) dont les buts sont :

- Valider et mettre à jour, une liste d'appareils qui peuvent être utilisés dans le cadre des activités du BSAC. Au 1/04 les appareils suivants sont approuvés pour un usage loisir :
 - Draeger DOLPHIN and RAY
 - San O Sub Azymuth
 - AP Valves Buddy Inspiration
- Le BSAC n'ayant pas encore de cursus de formation, le RWG reconnaît les cursus des organisations IANTD, TDI, ANDI et IART.
- Tout titulaire d'une de ces formations peut donc pratiquer au sein de la BSAC avec une profondeur max de 70 mètres.
- Le RWG émet aussi un nombre de recommandations quant à l'utilisation des recycleurs et est en train de définir un cursus de formation recycleur pour le BSAC.
- Le RWG a aussi évalué parmi les formations BSAC existantes, les points d'entrée possibles de l'utilisation en formation ou en enseignement du recycleur. Dès le niveau 2 (Sport Diver) le RWG reconnaît les possibilités d'utilisation du recycleur, soit comme développement de l'aquaticité soit comme connaissance pour le futur directeur de plongée. Au niveau des moniteurs, le RWG recommande la connaissance de ces appareils du fait de leur présence dans l'environnement du plongeur.
- Le BSAC a déjà mis en place deux cours de découverte du recycleur :
 - Le Rebreather Pool Expérience (découverte piscine) ; ouvert à tous, cette super séance de baptême a pour but de faire découvrir la plongée au recycleur et de donner quelques infos sur la sécurité et les choix de matériel en fonction de ses objectifs.
 - Le Rebreather Awareness Course consiste en une journée de cours ouverte à tout titulaire au minimum du niveau 2 et d'un diplôme Nitrox, durant laquelle sont présentés les circuits fermés et semi-fermés, les règles de sécurité et d'assistance. Une plongée piscine au recycleur y est aussi effectuée. Le but de cette formation est de permettre à un plongeur en circuit ouvert de se sentir en sécurité lorsqu'il plonge ou organise une sortie plongée avec une ou des personnes équipées de recycleurs.

CMAS

Assez peu d'informations sur les cursus proposés par la CMAS. En 2003, une formation d'instructeur recycleur a eu lieu, en partenariat avec le RaB, une organisation allemande (voir page30). On trouve ces deux cartes de plongeur et instructeur sur le site CMAS. Elles semblent indiquer une formation par appareil (Draeger) mais hélas, sans autres précisions...



Carte Cmas Diver Recycleur



Carte Cmas Recycleur Instructeur

CMAS Germany - ITD

CMAS Germany est une organisation privée apparemment conventionnée par la CMAS (OCC). International Tek Divers (ITD) une autre organisation allemande créée en 1995, qui offre des cursus utilisateur et formateur sur Dolphin et Ray et travaille en partenariat avec la CMAS Germany pour délivrer des formations de plongeurs Nitrox, Trimix ou Recycleur. Ils offrent une formation plongeur (à partir du Niveau 2 + Nitrox Base) recycleur semi-fermé, dont le contenu est assez superficiel (montage. / démontage) ainsi qu'une formation moniteur recycleur (même contenu que pour le plongeur, mais

avec en pré requis un diplôme CMAS* Instructor). Le moniteur doit ensuite s'acquitter d'une cotisation annuelle s'il souhaite garder son titre.

FFESSM

Un groupe d'étude dirigé par Patricia Breton (IN) a été mis en place et un cursus de formation recycleur pour la plongée loisir est à l'étude.

IANTD (*International Association Nitrox and Technical Divers*)

L'IANTD est une organisation privée de référence pour l'enseignement de la plongée au recycleur. Les instructeurs sont sous licence de IANTD (USA). En étudiant les standards de formation du 30 Juin 2001 (15) on trouve les niveaux suivants :

Formations :

- **Recycleur Expérience** : Concept de découverte de la plongée au recycleur, non qualifiant, le plongeur doit avoir minimum 15 ans, un niveau minimum Open water ou équivalent et 10 plongées en circuit ouvert. Une rapide présentation de l'appareil ainsi que des moyens de contrôle du niveau d'immersion est suivi par une immersion sur un fond max de 15 mètres.
- **Plongeur recycleur Open Water, (Rebreather Diver)** : Dès l'âge de 18 ans sans autre qualification, le plongeur devra compléter 240 minutes d'immersion sur 6 plongées dont 4 au recycleur lors de ce premier cursus. Le plongeur Open water recycleur pourra plonger encadré dans la zone 0 - 18 mètres. Avec des mélanges 21 - 40% en oxygène.
- **Plongeur recycleur qualifié**. Pour un recycleur semi-fermé (type Dolphin), le plongeur doit être titulaire d'un diplôme Open Water +Nitrox base. Pour un recycleur circuit fermé à mélange de gaz, le plongeur doit avoir le niveau Nitrox Avancé (avec aussi un Advanced Open Water). Ce programme qualifie le plongeur pour UN appareil spécifique. Les contenus théoriques sont très complets. Dans la formation pratique, on retrouve les points clefs suivants:
 - Vérification Pré plongée.
 - Rinçage du système.
 - Modification des PpO₂ à la descente et la montée (pour recycleur circuit fermé à mélange de gaz).
 - Vérification départ immersion (fuite/ pression) à max 6 mètres (Buddy check).
 - Passage sur circuit ouvert de secours.
 - Stabilisation à tout niveau.
 - Manipulations, deuxième détendeur, système injection, réglage etc.
 - Contrôle PpO₂ pendant l'immersion / validité des données.
 - Réaction à la panne d'air et aux situations d'urgence :
 - Hypoxie
 - Hyperoxie
 - Hypercapnie
 - Inondation du système
 - Mauvais fonctionnement du solénoïde d'injection O₂ (sur un recycleur circuit fermé à mélange de gaz)
 - Utilisation manuelle du système/ maintien volume respiratoire minimum.
 - Scénario complexe d'évacuation (hyperoxie du plongeur assistant un plongeur dont le recycleur ne fonctionne plus).
 - Remontée et décompression.
 - Identification de problèmes typiques:
 - Sac inspiratoire se remplissant rapidement.
 - Variation brutale de la flottabilité.
 - Bruit de bulle soudain, ou absence totale de bruit ou de bulles.
 - PpO₂ alarmes (haute ou basse).
 - Rinçage, entretien et rangement.

- Un minimum de 240 minutes d'immersion dont au moins 4 plongées en milieu naturel d'au moins 30 minutes chacune est exigé pour les recycleurs de type semi-fermé, alors que pour les un recycleurs circuit fermé à mélange de gaz (MGCCR), 450 minutes sont demandées dont un minimum de 8 plongées en milieu naturel de plus de 30 minutes. Après sa formation, le plongeur peut évoluer en recycleur jusqu'à un maximum de 40 mètres, en autonomie et en fonction des lois en vigueur dans le pays.
- En France, les qualifications IANTD plongeur ou moniteur sont obtenues sur Dolphin et sur Inspiration. En Allemagne, l'IANTD semble s'orienter vers l'Inspiration. Les recycleurs à PpO₂ constante semblent maintenant avoir la faveur de cette organisation, car cela leur permet de relier ces formations aux plongées trimix profondes.

Réf : IANTD France – Jean Pierre Imbert / IANTD Germany – Frank Gottschalch

IART (*International Association of Rebreather Trainers*)

Crée en 1997 en Allemagne dans le but d'offrir des cursus de formation Nitrox, Trimix, Recycleurs de type semi-fermé et circuit fermé à mélange de gaz. Ce sont des formations pointues qui semblent assez orientées vers la plongée profonde.

Niveau Entrée : Age minimum 18 ans.

50 plongées, CMAS**, Nitrox confirmé et brevet de secourisme.

Formations :

Qualification Circuit semi-fermé (SCR) et Circuit fermé à mélange de gaz (MGCCR).

- SCR et MGCCR Niveau 1 – Nitrox – 1 seul mélange.
- SCR et MGCCR Niveau 2 - Tous mélanges Nitrox (CCR 1 + 50 heures d'immersion).
- MGCCR Niveau 3 - Trimix (MGCCR 2 + 50 heures d'immersion).

Les cursus d'instructeurs demandent un minimum de 50 heures d'immersion pour le Niveau I, 30 heures de plus et la certification de 10 élèves plongeur recycleur Niveau 1 pour l'instructeur de Niveau II. Pour être instructeur Niveau III sur recycleur circuit fermé à mélange de gaz, il faut encore compter 80 heures d'immersion et la formation de 10 élèves recycleur Niveau 2.

Réf : IART France Cédric Verdier

NRC (*Nitrox and Rebreather College*)

Depuis 2003, NRC est en relation avec PADI et offre des formations Nitrox et Recycleur de type semi-fermé, reconnues par PADI.

Formations

Recycleur circuit Semi-fermé (SCR)

Niveau entrée : Age minimum 16 ans

CMAS 2* ou équivalent (En France – Niveau 3 Minimum)

20 plongées minimum

Diplôme Nitrox Base

Plongeur sur RAY ou Dolphin : Cette formation est basée sur un livret de formation qui reprend le contenu du manuel d'utilisation du fabricant des appareils concernés. S'y rajoute un survol des lois physiques et d'une table de décompression (PADI). Le temps minimum d'immersion n'est pas précisé et la qualification peut s'obtenir en piscine comme en extérieur.

NRC offre ensuite un cursus de formation d'instructeur avec les différents niveaux suivants :

Assistant Instructeur Recycleur /Instructeur Recycleur

Instructeur 2eme degré (Staff Instructor) / NRC Instructor Trainer

Réf : NRC France – Jean François André

TDI (*Technical Diving International*)

TDI propose en Europe des formations d'utilisateurs spécifiques par appareil en étant en relation avec des fabricants, notamment Aquatek et AP Valves. Les niveaux d'entrée correspondent aux lois en vigueur dans les pays où sont conduites les formations. En France le Niveau 3 et Plongeur Nitrox ou équivalent sont requis. TDI France propose un niveau de Plongeur recycleur sur circuit semi fermé, sur Draeger Ray et Dolphin, comprenant une formation théorique de 6 heures et une formation pratique avec un minimum de 100 minutes d'immersion réparties sur 4 plongées en milieu naturel. TDI propose aussi des formations sur Inspiration, en diluant air et dernièrement en diluant Trimix.

Réf : TDI (France) Didier Lefèvre / (Italie) Aldo Ferruci

RaB /VDST (Rebreather Advisory Board e. v) / Fédération de plongée Allemande (affiliée CMAS)

Fondée en 1995 par le Docteur Luchtenberg, le RaB est une association allemande émanant de Draeger, afin de permettre la mise en place de formations pour les utilisateurs et les encadrants de recycleurs Ray ou Dolphin. Cette association travaille au sein de la fédération allemande et contribue à définir les standards de formation.

Formations RaB

Plongeur Recycleur de type semi-fermé ou circuit fermé à mélange de gaz (SCR/MGCCR):

Niveau d'entrée ; CMAS **, Nitrox base, 18 ans et 80 plongées minimum (160 pour les formations MGCCR), licencié à un organisme affilié CMAS.

La formation consiste en une partie théorique et une partie pratique qui inclut au minimum : pour le SCR, 60 minutes en piscine et 120 minutes en extérieur. Pour le MGCCR, 90 minutes en piscine et 180 minutes en extérieur.

Formateur Recycleur SCR :

Niveau d'entrée Instructor CMAS *, 300 plongées minimum, Plongeur Recycleur (20 plongées minimum). Licencié et formateur plongée en exercice.

La formation consiste en une approche théorique (connaissance et enseignement) et pratique (enseignement d'une séance sur un thème théorique et pratique de la plongée au recycleur).

Instructeur Recycleur SCR/MGCCR :

Niveau d'entrée Instructor CMAS **, 600 plongées minimum, Plongeur Recycleur (50 plongées dans la dernière année). Licencié et formateur recycleur en exercice

Examen théorique et pratique de haut niveau.

Master Trainer : Formateur d'Instructeur. Ce titre est décerné par le RaB en fonction de l'expérience des Instructeurs.

Le RaB est une association qui jouit d'une grande notoriété en Allemagne et au sein de la CMAS.

Points Clefs: (Formations Existantes)

- De nombreuses formations existent déjà, et pour le moment plus au sein d'organisations privées que de fédérations. Le RaB et l'IANTD qui sont impliqués depuis longtemps, notamment en Allemagne et aux USA dans le développement de la plongée recycleur apparaissent comme des références en ce qui concerne les cursus de formation et la pédagogie spécifique des recycleurs. Des durées cumulées d'immersion assez longues, ainsi que la réaction aux situations d'urgence sont les deux principaux piliers de leurs formations.
- Au niveau des fédérations, la fédération allemande coopère avec le RaB qui offre un cursus complet de formations recycleur tandis qu'en Angleterre, le BSAC reconnaît les formations d'organisations privées. Le BSAC et la FFESSM sont aujourd'hui en train de réfléchir sur leur cursus.
- Quelle que soit l'organisation, tous les cursus de formation aboutissent à une qualification par type d'appareils (CCR, MGCCR ou SCR) et le plus souvent par appareil. Les appareils que l'on retrouve partout sont, le Ray, le Dolphin, l'Inspiration et l'Azimuth.
- Au niveau de la pratique, on observe une forte disparité dans le nombre d'heures de formation et d'immersion requises. Pour un même niveau de pratique, les variations vont de 2 à 50 heures.
- La plupart offrent un cursus DECOUVERTE non qualifiant ouvert à tout plongeur diplômé.
- Le BSAC a mis en place, en plus d'un cursus DECOUVERTE, un cursus d'INFORMATION (Awareness) destiné au directeur de plongée ou au compagnon de palanquée, quand un plongeur recycleur se présente dans une structure.
- Une seule organisation, IANTD propose aux USA, un cursus de base type Open water, directement sur recycleur, première et unique filière de formation parallèle à celle de la plongée à l'air.
- Toutes les organisations offrent des cursus loisir (0 – 40 mètres) sur des appareils type Ray ou Dolphin. De plus en plus proposent aussi ces cursus sur Inspiration.
- Les cursus loisir des organisations privées sont généralement en deux niveaux : Niveau de Base et Niveau Confirmé. Les différences entre les niveaux sont soit la variété des gaz utilisés soit la profondeur d'évolution (mais dans la limite de 40 mètres). Seul le RaB propose un niveau unique de plongeur recycleur SCR ou CCR à partir du CMAS 2*. En France, IANTD, TDI et NRC proposent aussi un niveau utilisateur, à partir du niveau III.
- Tous demandent un niveau de base Nitrox avant de passer sur recycleur. Ce niveau peut parfois s'acquérir pendant la formation recycleur.
- Dans la plupart des formations, l'accent est peu mis sur l'autonomie, l'assistance et le sauvetage. Seule l'IANTD offre une vraie formation théorique et pratique sur l'assistance et le sauvetage du plongeur recycleur, au niveau plongeur recycleur confirmé.
- Les appareils à circuit fermé sont considérés par tous comme plus complexes que les semi-fermés. Ces organisations proposent des cursus MGCCR, soit placés après un cursus de base sur SCR (chez NRC), soit en parallèle d'un cursus sur SCR (chez TDI). Les pré-requis (nombre de plongées, entre autres) sont plus importants, mais il est possible de plonger avec un recycleur circuit fermé à mélange de gaz sans avoir plongé avec un semi-fermé.
- Il existe déjà quelques cursus de formation plongée profonde au recycleur circuit fermé à mélange de gaz (MGCCR). Pour cela, les organisations (ANDI, IART, TDI) demandent des niveaux d'entrée de plongeur Trimix. Les profondeurs d'évolution vont jusqu'à 100 mètres.

3- ELEMENTS THEORIQUES DE LA PLONGEE AU RECYCLEUR

3 a/ Matériel

- Les éléments constitutifs
- Les différents principes de recycleur

3 b/ Physique et Chimie

- La Chaux et l'absorption du CO₂
- Calcul de la PpO₂ pour Recycleur Semi Fermé

3 c/ Accidents et Prévention

- Hypercapnie
- Hypoxie
- Hyperoxie
- La décompression
- Les contaminations
- Intoxication à la soude
- Analyse des risques inhérents à la plongée recycleur

Note : L'objet de ce chapitre est de présenter les éléments théoriques de la plongée au recycleur en les reliant aux aspects pratiques qui en découlent. Les différents paragraphes peuvent servir de référentiel pour un moniteur souhaitant construire son intervention théorique.

3 a/ Matériel

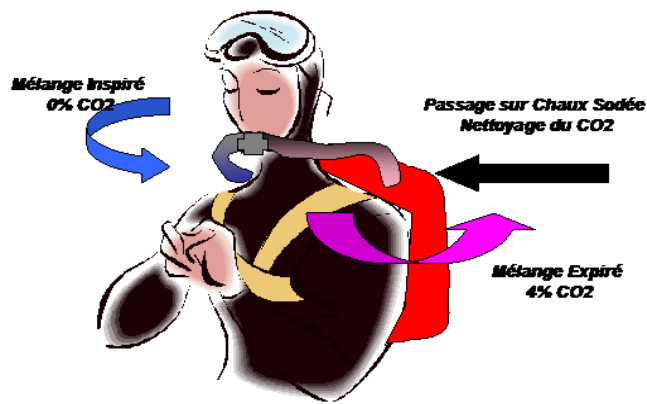
Les Eléments Constitutifs

L'embout avec soupapes

Tous les recycleurs disposent d'un embout pouvant s'ouvrir et se fermer par un système de tubes concentriques. Ce système permet d'isoler le recycleur du milieu extérieur lorsque le plongeur n'a pas l'embout en bouche. Cela évite les entrées d'eau et, dans le cas de système à oxygène pur, l'entrée de diluant dans le circuit de gaz. Une fois en bouche, l'embout est mis en position ouverte, ce qui met en contact les voix aériennes du plongeur avec le circuit du recycleur. Il n'y a plus d'échange gazeux avec l'extérieur, sauf si le plongeur expire par le nez (ce qui est à éviter).

Certains embouts sont équipés de part et d'autre de soupapes de non retour qui vont orienter la circulation du mélange, selon le circuit suivant :

Sac Inspiratoire → Plongeur → Sac Expiratoire → Cartouche de chaux → Sac Inspiratoire



Ces soupapes anti-retour sont constituées d'un support plastique et d'une membrane circulaire silicone fixée en son centre. Elles sont similaires à la soupape d'expiration d'un deuxième étage de détendeur, et permettent de laisser passer le gaz uniquement dans un sens, tout en offrant une résistance minimale. Ces soupapes empêchent le mélange expiré par le plongeur de retourner dans le sac inspiratoire. Ce gaz doit impérativement être débarrassé du CO₂ qu'il contient par passage sur la chaux, avant de repartir dans le circuit inspiratoire. Sur certains recycleurs, ces soupapes se trouvent au niveau de la cartouche de chaux. Dans tous les cas, il convient d'en vérifier le bon fonctionnement avant chaque plongée.

Les tuyaux annelés :

De part et d'autre de l'embout se situent les tuyaux annelés. Le volume de ces tuyaux contribue au confort du plongeur. D'apparence simple, ces tuyaux doivent être cependant bien étudiés car ils doivent avoir :

- une longueur suffisante pour pouvoir permettre au plongeur de tourner légèrement la tête de chaque côté et permettre la prise de l'embout sans difficulté.
- un diamètre suffisant pour éviter une trop grande résistance inspiratoire ou expiratoire. Mais, pas trop large afin de ne pas créer un volume mort de gaz non traité ainsi qu'une perte de charge trop importante. Ceci aurait pour effet d'augmenter l'effort inspiratoire ainsi que la concentration en CO₂ dans le mélange inspiré.

Ainsi, des tuyaux trop gros ou trop longs peuvent entraîner des problèmes d'hypercapnie.

Les tuyaux annelés ont une structure en soufflet. Ces soufflets ont deux fonctions :

- permettre la souplesse et les mouvements du tuyau,
- retenir les eaux de condensation résultant de l'absorption du CO₂ sur la chaux du côté inspiration et de la condensation de la vapeur d'eau expirée par le plongeur. Ces anneaux jouent le rôle de petits pièges à eau. Lors d'une plongée longue ou en eau froide, suite à un mouvement de la tête, le plongeur peut ressentir une arrivée d'eau. Même si cela surprend au début, ce n'est que de l'eau douce résultant de la condensation. Pas de soucis donc, il ne s'agit pas d'une fuite ou du fameux cocktail de soude.

Enfin, suivant les modèles, les tuyaux annelés peuvent être légèrement lestés par des bagues de métal positionnées à un ou deux endroits sur la longueur du tuyau. Cela a pour effet de réduire l'inconfort résultant d'une trop grande flottabilité des tuyaux lors de l'immersion. Attention cependant à ne pas trop lester, car il faut impérativement en cas de perte de l'embout, que l'ensemble s'élève au dessus du niveau du sac inspiratoire. Cela évite à l'eau de pénétrer car la pression du circuit est supérieure à la pression ambiante au point de fuite. Dans le cas contraire, une perte d'embout signifierait immédiatement l'inondation du système (destruction des capteurs PpO₂, remplissage des sacs respiratoires, blocage du système d'injection et détérioration de la chaux sodée).



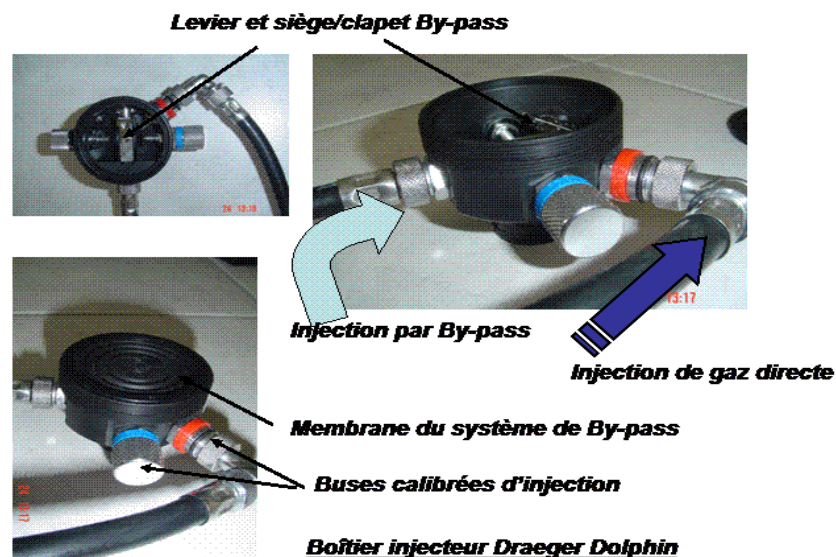
Les classiques : Tuyau annelé, embout, et sonde oxygène (ici un Oxy 2 de Uwatec)

L'injecteur :

Ce système va permettre d'injecter du mélange frais ou de l'oxygène pur dans la boucle de respiration afin d'éviter que le plongeur ne respire peu à peu un mélange hypoxique. Suivant les modèles de recycleur, on peut trouver un des 3 types d'injecteurs suivants:

- Injecteur à débit massique continu : Placé à une entrée Moyenne Pression, un cône percé en céramique permet de contrôler le flux de molécules de gaz traversant le sommet du col. Lorsque la bouteille est ouverte, le rapport entre la pression d'entrée et de sortie du cône, ainsi que le diamètre de l'ouverture de sortie permettent de contrôler le flot massique. Une masse constante de mélange est injectée indépendamment de la pression absolue. Ce type de système est très performant, mais gare au colmatage du cône qui entraîne l'arrêt immédiat de l'alimentation en gaz et le risque d'une syncope hypoxique. Sur ce type d'injecteur, le débit volumique diminue quand la profondeur augmente, le débit massique restant constant. Ceci explique que les recycleurs de type semi-fermés sont plus confortables en dessous de 10 mètres.
- Injecteur à la demande : Conçu sur le principe d'un deuxième étage de détendeur, ce type d'injecteur envoie du mélange dès que le volume respiratoire du recycleur diminue. Cela peut se faire par un système de levier lié au sac inspiratoire, ou par l'utilisation d'un sac inspiratoire en soufflet qui, lorsque le volume diminue, vient appuyer sur le levier et libérer le mélange. C'est le principe des recycleurs à la demande, en circuit fermé O₂ comme le DC 55 avec injection de mélange couplée à la respiration du plongeur.
- Injecteur O₂ couplé à des capteurs O₂ : Le cœur de ce système est un solénoïde ou électrovanne (système de siège/piston dont le piston est activé par un champ magnétique). Le solénoïde est placé après un réducteur de pression entre la bouteille O₂ et le sac inspiratoire. L'ouverture et/ou la fermeture de ce système sont commandées par la valeur de la pression partielle d'oxygène dans le système. Cela permet de concevoir des recycleurs à PpO₂ constante (par opposition aux systèmes précédents qui sont à fraction O₂ inspiratoire constante).

Le système de By-pass :



Le By-pass est un système qui permet d'injecter du mélange dans le système en court-circuitant (By-pass) le système d'injection normale soit automatiquement soit manuellement. Il est présent sur les recycleurs à circuit fermé à mélange de gaz et certains semi-fermés (comme ici sur le Dolphin). Lors

d'une descente rapide, le système d'injection de mélange dans le sac inspiratoire peut ne pas compenser la variation de volume importante résultant de l'augmentation de la pression. Le volume du sac inspiratoire diminuant, le plongeur risque de ressentir une sensation d'asphyxie. Le By-pass libère alors une quantité de gaz et rétablit le volume du sac. Ce système est généralement conçu comme un deuxième étage, dont la partie sèche serait le sac inspiratoire. Si celui-ci se met en dépression, cela entraîne le mouvement d'un système classique levier/membrane (voir photos) et l'ouverture de l'arrivée de mélange. En cas d'essoufflement, le plongeur en inspirant fortement peut aussi provoquer l'ouverture du système et recevoir une quantité de mélange supérieure à celle donnée par l'injecteur. En ce qui concerne les systèmes à contrôle électronique, il y a possibilité de passer en manuel et de court-circuiter le solénoïde (surtout si celui-ci a décidé de ne plus fonctionner). Le plongeur doit alors par un système de bouton poussoir (comme au bon vieux temps de Hans Haas) contrôler l'arrivée d'oxygène. On se doute que seuls des plongeurs très entraînés peuvent se sortir d'une telle situation et que le temps de réponse des capteurs O₂ se doit d'être extrêmement court.

Les bouteilles

Les recycleurs sont généralement équipés de bouteilles et de robinetteries O₂. Cela permet de plonger avec des mélanges différents et supérieurs à 40% en oxygène. Cela permet aussi le gonflage suivant la méthode des pressions partielles, c'est-à-dire en injectant de l'oxygène pur dans le bloc puis en complétant le gonflage à l'aide d'un compresseur équipé d'un surfiltreur.

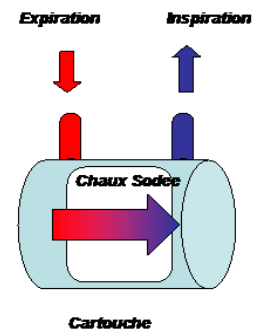
Ces blocs sont de capacités variables, en acier ou aluminium. Ils sont soumis à la réglementation oxygène et à une ré-épreuve tous les deux ans (pas de TIV possible). La majorité des recycleurs sont équipés de blocs ayant des robinetteries de type DIN. Des adaptateurs sont disponibles afin de gonfler sans problème. Lors d'un voyage, deux options se présentent :

- Soit prendre un adaptateur DIN/sortie O₂ et utiliser des blocs Nitrox 10 litres Alu fournis sur place.
- Soit emmener les blocs O₂ du recycleur. Il suffit de laisser quelques bars à l'intérieur afin de pouvoir les vider complètement lors du passage au contrôle des bagages. Ainsi persuadés que la bouteille est vide, les contrôleurs acceptent de la passer au rayon sans exiger le démontage de la robinetterie.

Le réservoir de chaux (ou cartouche de chaux ou canister)

Ce réservoir contient la chaux sodée qui se présente sous forme de granulés de diamètre de 3 à 5 millimètres. Deux grilles à l'intérieur, permettent de soutenir la chaux dans la cartouche sans que les granulés puissent passer dans le système. Ces grilles sont généralement maintenues en compression sur la chaux de façon à garder la chaux sous forme d'un filtre compact au travers duquel le mélange à traiter ne pourra pas trouver de chemin préférentiel (ce qui entraînerait une saturation locale rapide de la chaux et la non absorption du CO₂). Le gaz est amené sur la chaux par le tuyau d'entrée de la cartouche. Le flot de gaz peut être :

- Axial : Circulation dans l'axe de la cartouche, autonomie de la chaux environ 90 minutes/kg.



- Radial : Le gaz arrive perpendiculairement à l'axe de la cartouche et diffuse à travers une couche plus fine de chaux. Ce principe permet de diminuer la résistance expiratoire, d'améliorer l'utilisation de la chaux, mais devient inefficace en cas de mauvais remplissage de la cartouche.

Il existe donc des conceptions différentes mais toutes forcent le gaz expiré à traverser la cartouche en restant le plus longtemps possible au contact de la chaux.

Le réservoir a généralement une contenance comprise entre 1,5 kg et 4 kg de chaux suivant les modèles de recycleurs. La quantité de chaux embarquée est avec, entre autres, le débit et le volume de gaz disponible, un des paramètres qui permettent de calculer l'autonomie d'un recycleur.

Les faux poumons (ou sacs respiratoires)

Tous les recycleurs comprennent un ou deux sacs qui vont contenir le mélange respiratoire du plongeur. Si il n'y a qu'un sac, il s'agit alors toujours du sac inspiratoire dans lequel le gaz nettoyé sur la chaux va se mélanger à l'apport de gaz frais. Ce sac souple est généralement d'une contenance de 3 à 6 litres, soit sous forme d'une simple enveloppe plastique, soit sous forme d'un soufflet. Cette structure souple, permet au sac de se vider lors de l'inspiration et de se remplir lors de l'expiration du plongeur. Ainsi l'ensemble plongeur / recycleur a un volume gazeux fixe. Lorsque le plongeur expire à fond, le phénomène bien connu de poumon ballast ne se produit plus, car le gaz expiré retourne dans le sac qui se gonfle immédiatement. Cette constatation n'est vraie que pour les recycleurs à circuit fermé, car dans le cas d'un recycleur semi-fermé, l'injection en continue contribue à légèrement gonfler le sac inspiratoire, et le plongeur devra donc à intervalle régulier purger l'excès de gaz afin de maintenir son niveau d'immersion. Ce phénomène apparaît surtout à faible profondeur.

Certains recycleurs sont aussi équipés d'un sac souple expiratoire. L'utilisation d'un sac inspiratoire et d'un sac expiratoire permet d'équilibrer les efforts ventilatoire à l'inspiration et à l'expiration. Les sacs doivent pouvoir se gonfler et se dégonfler librement de façon à ne pas augmenter la résistance respiratoire. Sur la plupart des recycleurs, ils sont placés dans une enceinte fixe, légèrement au dessus des poumons du plongeur. En fonction de leur position par rapport aux poumons du plongeur, l'une ou l'autre de ces phases respiratoires pourra être facilitée. Ainsi des sacs placés dans le dos du plongeur permettront un effort expiratoire plus faible et faciliteront le passage du gaz au travers de la cartouche de chaux. Les recycleurs de dernière génération comme le Ray ou l'Inspiration ont les deux sacs positionnés à cheval sur chaque épaule du plongeur. Cela semble le meilleur compromis pour diminuer l'effort ventilatoire. Le sac expiratoire sert aussi à capturer l'eau qui a pu se former par condensation ou par salivation. Il protège ainsi la cartouche de chaux.

Les sacs ou soufflets sont équipés de drains afin de pouvoir les désinfecter, les rincer et les sécher convenablement. Cet entretien est nécessaire après chaque plongée ou journée de plongée.

Les capteurs O₂



Cellule pour Oxygauge



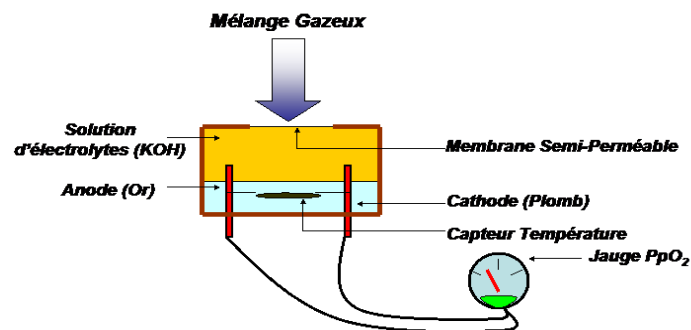
Cellule pour Oxy 2

Les capteurs O₂ permettent au plongeur de connaître pendant la plongée la pression partielle ainsi que la fraction d'oxygène dans le circuit respiratoire. Ils ne doivent en aucun cas se substituer au calcul préparatoire de la plongée, mais venir confirmer ce qui a été planifié par le plongeur. Ces capteurs ou cellules O₂ sont reliés à des instruments de contrôle à lecture digitale qui permettront notamment d'alerter le plongeur en cas de :

- variation brusque de la PpO_2 ,
- PpO_2 non stable,
- PpO_2 inférieure à 0.3 bars ou supérieure à 1.6 bars.

Ces instruments peuvent être équipés d'alarme sonore ou visuelle et les points de déclenchement peuvent être modifiés par le plongeur (sans sortir de la fourchette indiquée précédemment).

La cellule fonctionne sur le principe d'une pile. Le gaz au contact de la cellule, traverse une membrane semi perméable et vient se dissoudre dans une solution d'électrolytes (de la soude ou de la potasse). A l'intérieur de ce compartiment liquide, se trouvent une anode en or et une cathode en plomb. Lorsque le plomb se trouve au contact de l'oxygène dissous, se forme alors de l'oxyde de plomb ce qui génère une différence de potentiel entre l'anode et la cathode et donc un courant électrique. Plus la concentration en oxygène est importante, plus le courant est important.



Cette cellule est reliée à un indicateur de contrôle calibré. Ces systèmes mesurent la pression partielle d'oxygène (12). Si ils sont reliés à une mesure de la pression absolue, ils peuvent aussi alors fournir le pourcentage O_2 dans le mélange respiratoire. C'est le cas pour l'Oxy 2 couplé à l'Air ZO2 Nitrox de Uwatec. L'Oxygauge de Draeger ne fournit lui, que la pression partielle.

Une grande attention doit être apportée aux cellules car :

- Anode et cathode sont très fragiles,
- Elles craignent l'eau qui a pour effet de diluer la solution électrolytique et de détruire les contacts électriques,
- Elles fonctionnent entre 0 et 50 degrés Celsius (le gaz en sortie de cartouche de chaux peut parfois atteindre 55 degrés),
- Elles se saturent en permanence et ont une durée de vie de un an maximum,
- Elles sont très chères (de 80 à 120 Euros pièce).

En fonction de la qualité des cellules, le temps de réponse peut varier de 4 à 30 secondes. Pour un recycleur semi-fermé, une réponse de l'ordre de 15 secondes est tout à fait acceptable, mais pour un recycleur à circuit fermé à mélange de gaz contrôlé par électronique, il importe d'avoir des cellules à réponse rapide. Le temps de réponse est contrôlé par la membrane semi-perméable et inversement proportionnel au prix du capteur.

La plupart des recycleurs à gestion électronique ont entre 3 et 4 cellules O_2 . Dans le cas de l'Oxygauge, il n'y a qu'une seule cellule, dans le cas de l'Oxy 2, deux comme son nom l'indique.

Qu'il y ait une ou trois cellules, dans tous les cas une défaillance de cellule lors de la plongée, entraîne l'arrêt immédiat de cette immersion... parfois avec regret, mais cela doit impérativement faire partie de la discipline du plongeur recycleur, car on ne connaît jamais la cause exacte d'un arrêt de fonctionnement.

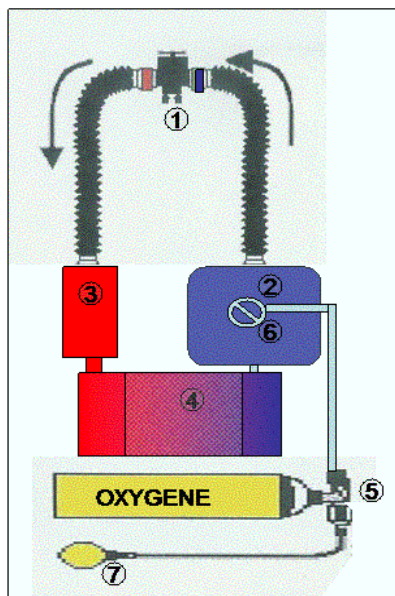
Les différents principes de recycleur

Recycleur Circuit Fermé O₂ (Closed Circuit Rebreather)

L'utilisation de l'oxygène pur permet d'avoir un système qui ne génère aucune bulle et quasiment aucune perte de gaz. Il n'y a pas de gaz inerte dans le circuit respiratoire, donc pas de risque de d'accident de décompression. En contrepartie, l'utilisation de ces recycleurs est limitée à une profondeur de 6 mètres (sauf si vous êtes d'origine soviétique...).

L'oxygène est consommé par l'organisme et le gaz carbonique résultant de la respiration est absorbé par réaction chimique sur la chaux sodée. Grâce aux soupapes ou valves de non retour placées (en général) au niveau de l'embout, le gaz circule du sac inspiratoire au poumon du plongeur, puis des poumons au sac expiratoire et à la cartouche de chaux. Le gaz débarrassé du CO₂ repasse ensuite dans le sac inspiratoire. Au rythme de la consommation du plongeur, la quantité d'oxygène dans le circuit diminue. Afin de maintenir le volume du sac inspiratoire constant, l'oxygène est alors amené dans le circuit soit par un système d'injection manuel (ancien système, que le plongeur devait manipuler à intervalles réguliers durant son immersion), soit par un système à la demande (type deuxième étage), qui ré-injecte du gaz dans le sac ou le soufflet dès qu'ils atteignent leur volume minimal.

Il n'y a généralement pas de soupape de surpression sur le sac expiratoire, il convient donc d'expirer par le nez lors de la remontée (si on remonte à un rythme plus rapide que celui de la consommation de l'oxygène) afin d'éviter les problèmes de surpression pulmonaire. De même, il est très important d'éviter la présence de gaz inerte dans le système en effectuant un rinçage pulmonaire avant l'immersion. Ce gaz inerte pourrait en maintenant le volume du sac inspiratoire entraîner un risque d'hypoxie. Ce genre de système demande donc une formation et une grande vigilance dans son utilisation, notamment au niveau de la profondeur maximale d'évolution.



Légende : Circuit Fermé O₂ (CCR)

- 1- Tuyaux annelés et embout buccal
- 2- Sac Inspiratoire
- 3- Sac Expiratoire/ Piège à eau
- 4- Cartouche de Chaux Sodée
- 5- Détendeur 1^{er} Etage
- 6- Injecteur à la demande (2eme Etage)
- 7- Manomètre

Recycleur Circuit Semi Fermé Nitrox (Semi Closed Rebreather) avec injection continue de gaz

Le mélange Nitrox, permet d'utiliser les recycleurs semi-fermés à des profondeurs supérieures aux systèmes circuit fermé O₂ en diminuant le risque hyperoxique.

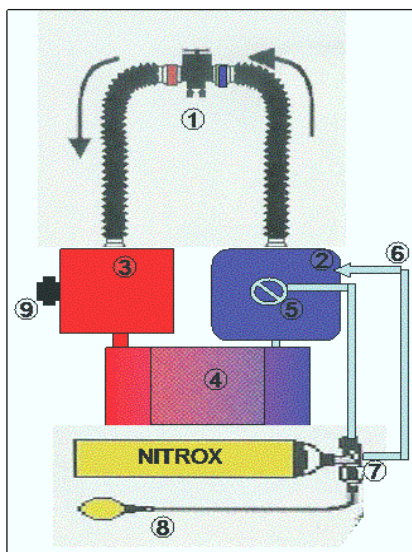
Le principe reste le même, le plongeur inspire le mélange du sac inspiratoire et le rejette dans le sac expiratoire et la cartouche de chaux sodée pour l'absorption du CO₂. Ce mélange à concentration O₂ plus faible repart dans le sac inspiratoire. Afin d'éviter que le mélange inspiratoire ne continue à s'appauvrir et pour que le % O₂ reste constant (ou à peu près, selon la fréquence respiratoire du plongeur), un injecteur à flot massique envoie du mélange frais en continu durant la plongée. Ce

Le système injecte une quantité massique d'oxygène constante (correspondant généralement à 3 fois la consommation moyenne O₂ du plongeur) grâce à un système de buse conique qui limite le nombre de molécules traversant le cône (aussi appelée buse sonique, car le gaz atteint la vitesse du son en sortie). Afin que ce système fonctionne, il est important que la différence entre la moyenne pression du détendeur (pression d'entrée du cône) et la pression ambiante (pression de sortie du cône) soit toujours supérieure à deux fois la pression ambiante. Le débit massique restant constant, le volume de gaz injecté diminue lorsque la profondeur augmente. Ce type de recycleur est donc beaucoup plus confortable au delà de 10 mètres que proche de la surface. La fraction d'oxygène du mélange inspiratoire reste assez stable à environ 80% de la valeur du mélange bouteille. Du fait d'un excès de gaz injecté par rapport à la consommation du plongeur et afin de garder constante la fraction d'oxygène dans le circuit, le sac expiratoire est équipé d'une soupape de surpression, de faible tarage (entre 18 et 25 mbars), qui permet au gaz excédentaire de s'échapper lors de la plongée. Ce recycleur génère donc des bulles lors de l'immersion, notamment à faible profondeur.

En cas d'effort intense ou lors d'une descente rapide, en plus de l'injection à débit continu le plongeur peut aussi disposer du mélange injecté par le By pass. Ce système équivalent à un deuxième étage est connecté sur le sac inspiratoire et s'ouvre lors d'une dépression dans ce dernier. Il permet d'obtenir un apport de gaz supplémentaire.

Ce type de recycleur permet donc d'atteindre des profondeurs de l'ordre de 40 mètres, mais a le désavantage de ne pas permettre une utilisation optimale du gaz embarqué, du fait de débit d'injection très supérieur à la consommation du plongeur.

Pour ce type de recycleur, la formule de calcul de la valeur du pourcentage oxygène dans le mélange inspiratoire est développée dans le chapitre 3b (page 45).



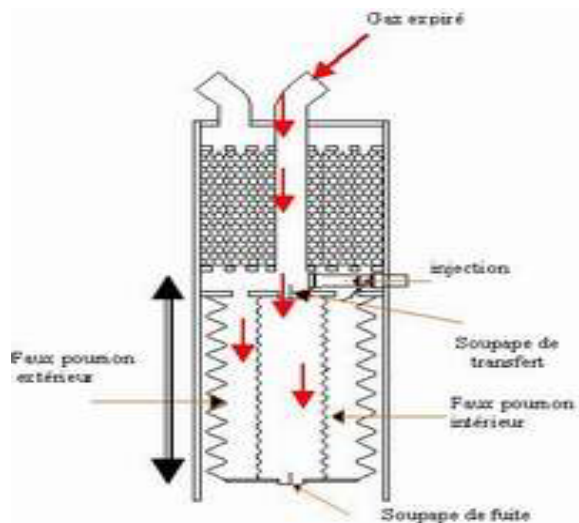
Légende : Circuit semi fermé Nitrox

- 1- Tuyaux annelés et embout buccal
- 2- Sac Inspiratoire
- 3- Sac Expiratoire / Piège à eau
- 4- Cartouche de Chaux Sodée
- 5- Injecteur à la demande (2eme Etage)
- 6- Injecteur débit continu – (Flot massique)
- 7- Détendeur 1^{er} Etage
- 8- Manomètre
- 9- Soupape de surpression

Recycleur Circuit Semi-Fermé à Fuite Proportionnelle et injection à la demande (SCR – RMV)

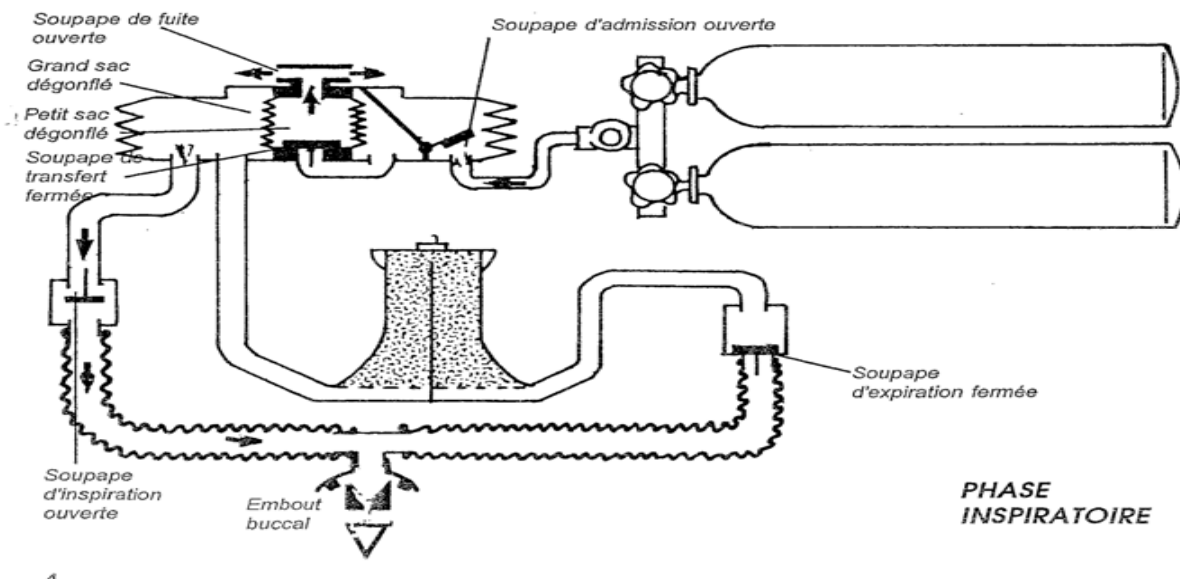
Basés sur le même principe que les SCR, ces recycleurs permettent d'optimiser l'utilisation du gaz grâce à un système couplé au rythme respiratoire du plongeur (RMV). Le principe consiste tout d'abord à utiliser un mécanisme de deuxième étage de détendeur dont l'ouverture est asservie au volume du sac respiratoire, mais surtout à maintenir constante la fraction d'oxygène dans le système. Pour ce faire, il convient de renouveler régulièrement une partie du gaz du circuit et ceci est obtenu par l'utilisation d'un soufflet concentrique placé à l'intérieur du soufflet respiratoire.

Lorsque le grand soufflet se vide, une quantité de gaz proportionnelle (1/12) au volume du circuit s'échappe. Il en résulte un renouvellement d'une partie du mélange sur chaque cycle et permet d'éviter au mélange respiratoire de s'enrichir en gaz inerte. C'est le principe du DC 55 puis du DC 92 ou du Halcyon RB 80 présentés ci contre.



Sacs concentriques (1/8) et cartouche de chaux axiale sur le Halcyon RB 80 (27)

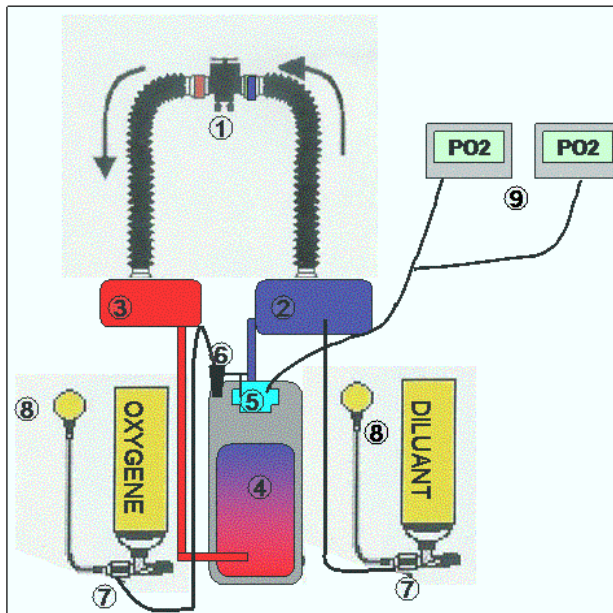
Sur le schéma suivant, extrait du manuel d'utilisation du DC55, on voit clairement les deux soufflets concentriques, ainsi que les soupapes qui permettent l'échappement d'une partie du volume du gaz.



Ce type de recycleur permet une optimisation de l'utilisation du gaz, mais du fait de ce principe de fuite proportionnelle, il y a toujours quelques bulles qui s'échappent de l'appareil. C'est d'ailleurs un des contrôles de sécurité les plus importants car une absence de bulles signifierait que le système a cessé de fonctionner et que le plongeur respire un mélange sans injection de gaz frais. Une à deux minutes plus tard, le plongeur risque de respirer un mélange hypoxique. Ceci démontre à nouveau l'intérêt de la sécurisation des appareils par l'ajout d'une mesure de PpO_2 .

Pour ce type de recycleur, la formule de calcul de la valeur du pourcentage oxygène dans le mélange inspiratoire est développée en Annexe III.

Recycleur circuit fermé à PpO₂ constante par mélange de gaz et régulation électronique (MGCCR)



Légende : Circuit Fermé MGCCR

- 1- Tuyaux annelés et embout buccal
- 2 - Sac Inspiratoire
- 3- Sac Expiratoire/ Piège à eau
- 4- Cartouche de Chaux Sodée
- 5-Cellules de mesure PpO₂
- 6- Solénoïde d'injection O₂
- 7- Détendeur 1^{er} Etage
- 8- Manomètre
- 9- Ordinateur de Contrôle de PpO₂

Tous les recycleurs présentés précédemment ont pour principe de maintenir une fraction constante d'oxygène dans le circuit respiratoire. Cette fraction est de l'ordre de 80% du mélange bouteille pour une consommation d'oxygène moyenne (on verra ces calculs dans le chapitre 3b). Donc lorsque la profondeur augmente, la pression partielle d'oxygène augmente proportionnellement. Lorsqu'elle atteint une valeur de 1.6 bars, le plongeur doit stopper sa descente et limiter sa profondeur.

Les recycleurs circuit fermé à mélange de gaz peuvent, en théorie, permettre d'atteindre plusieurs centaines de mètres, car ils fonctionnent sur le principe d'une pression partielle d'oxygène constante. Une bouteille d'oxygène et un système d'injection vont permettre de fournir l'oxygène nécessaire au plongeur et de maintenir constante la pression partielle O₂ dans le circuit. Une deuxième bouteille de diluant, type Nitrox, HélioX ou Trimix en fonction des profondeurs d'utilisation, est utilisée pour maintenir le volume du système. Le diluant est composé de manière à être respirable à la profondeur maximale prévue. Lors de la descente, la composition du gaz respiré évolue en permanence, de façon à maintenir une pression partielle d'oxygène fixée par le plongeur entre 1 et 1,4 bars. A la sortie de la cartouche de chaux, un ensemble de trois cellules permet de connaître la pression partielle d'O₂ et envoie cette information à deux ordinateurs se contrôlant mutuellement. Ces ordinateurs pilotent ensuite le fonctionnement du solénoïde d'injection d'oxygène en fonction de la consigne entrée par le plongeur. Le diluant est ajouté soit par un système de By-pass, ou manuellement par le plongeur de façon à maintenir le volume du circuit constant ou à diminuer une PpO₂ excessive suite à un mauvais fonctionnement de l'injecteur O₂.

Ce principe permet d'injecter uniquement la quantité d'oxygène consommée par le plongeur. Ce type de recycleur est totalement silencieux et ne génère aucune bulle, tout en permettant d'évoluer à très grande profondeur. Ce sont des machines fantastiques qui équipent la plupart des marines anglophones, mais pas la marine française qui a fait le choix du prémix et non du mélange fabriqué durant la plongée, pour des raisons de fiabilité et de sécurité.

Ce type de système peut être utilisé entre 0 et 55 mètres en utilisant de l'air comme diluant. Au delà de cette profondeur, l'utilisation de ces appareils implique de bien connaître les contraintes liées aux mélanges hypoxiques de type HélioX ou Trimix (fabrication, analyse, décompression) et d'avoir suivi une formation spécifique de façon à savoir réagir en cas de défaillance du système de contrôle de la PpO₂. Le Buddy Inspiration est homologué suivant la norme CE pour une profondeur maximum de 50 mètres avec diluant air et pour une utilisation entre 50 et 100 mètres avec diluant Trimix.

3 b/ Physique et Chimie

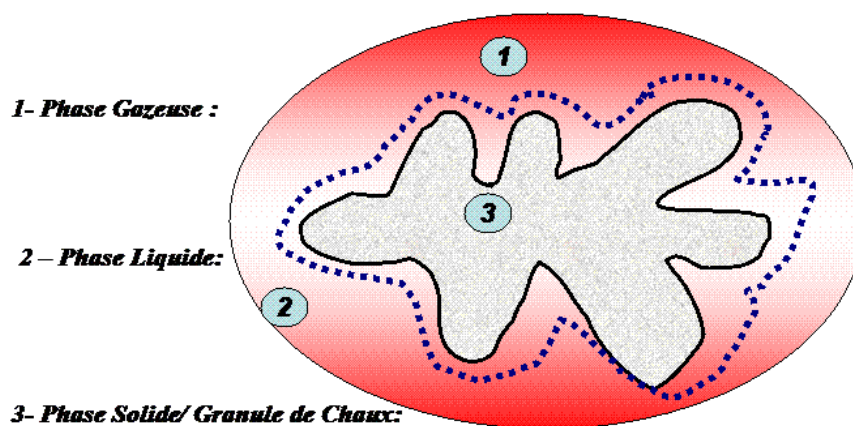
La chaux et l'absorption du CO₂

Souvent considérée comme le cœur du recycleur, la chaux est principalement composée d'hydroxyde de calcium, de formule chimique Ca(OH)₂ (à plus de 70%), de différents hydroxydes alcalins (principalement de la soude NaOH (5 à 10 %) ou parfois de la potasse KOH) et de quelques phosphates. La chaux se présente sous forme de grains poreux. Cette structure en granulés permet d'obtenir une grande surface d'échange avec le gaz. Les granulés ne doivent cependant pas être trop fins, car quand bien même la surface d'échange seraient augmentée, la perte de charge serait très importante et conduirait rapidement à l'essoufflement du plongeur. Une taille moyenne de 5 mm semble donc optimale.

Avant chaque plongée, ou chaque journée de plongée, et en fonction de la capacité de l'appareil, le plongeur remplit sa cartouche de chaux sodée. Il doit s'assurer que la cartouche est complètement remplie afin que lorsque la cartouche est refermée, la chaux soit en légère compression afin d'éviter la formation de chemins préférentiels tout en offrant une résistance à l'expiration minimale. Ces chemins préférentiels permettraient au mélange de traverser la cartouche sans être suffisamment en contact avec la chaux. La conception de la cartouche de chaux est très importante car il y a une opposition de principe entre la nécessité d'avoir une surface d'échange maximale et une perte de charge minimale au travers de la cartouche.

La réaction chimique conduisant à l'absorption du CO₂ présent dans le mélange expiratoire du plongeur se fait en plusieurs étapes dans différentes phases :

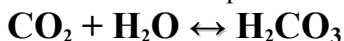
Que se passe-t-il autour d'un granule de chaux?



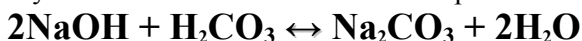
1 - Phase gazeuse : Le CO₂ est amené au contact de la chaux

2- Phase liquide :

Réaction du CO₂ qui se dissout dans le film liquide (H₂O) pour former l'acide carbonique.



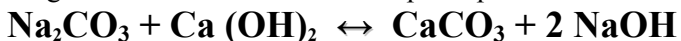
Il y a ensuite neutralisation de l'acide par la soude, pour former du carbonate de sodium et de l'eau.



On constate que cette réaction entraîne la production d'eau.

3- Phase Solide :

Réaction du carbonate de sodium avec l'hydroxyde de calcium (la chaux), il y a alors formation de carbonate de calcium et relâche de soude caustique. Le carbonate de calcium est un solide qui reste sur les granulés de chaux et en sature peu à peu la surface.



Il est important de noter que cette réaction chimique est *exothermique*, c'est à dire que l'absorption du CO₂ libère de la chaleur. Cette énergie est non négligeable car lors d'une plongée, le coeur de la cartouche peut atteindre jusque à 60 degrés Celsius. De plus, la réaction est beaucoup plus efficace à haute température, et les recycleurs sont conçus pour limiter les pertes calorifiques au niveau de la cartouche. Cette exothermie permet dans la plupart des recycleurs de respirer un air chaud, ce qui augmente le confort du plongeur et diminue ses pertes thermiques, sachant qu'une grande partie du refroidissement du plongeur lors d'une immersion à l'air provient de la nécessité de réchauffer le gaz inspiré (refroidi par la détente en circuit ouvert).

Du fait de la nature des réactions qui conduisent à l'absorption chimique du CO₂, la composition de la chaux et sa contenance en eau sont déterminantes pour son efficacité.

Il est donc important de toujours utiliser une chaux sodée destinée aux appareils à recyclage de gaz.

Les caractéristiques techniques de la chaux sodée sont les suivantes :

Chaux Sodée Draeger Diversorb

Composition :	Hydroxyde de Calcium, Hydroxyde de Sodium, Phosphates, Eau
Forme :	Granules sphériques ou hémisphériques
Couleur :	Blanche
Odeur :	Aucune
Taille des granulés :	4 à 6 mm
Contenance en Eau :	10 à 20%
Masse Volume :	800 – 900 g/litre
Capacité Absorption CO ₂ :	Dépendant du rythme respiratoire et du recycleur (*)

(*) Empiriquement, l'auteur a constaté que pour un effort modéré (VO₂ entre 1 et 1.5 litres/minute), *l'autonomie pour un système Axial est de l'ordre de 90 min/kg de chaux (1, Mesures personnelles).*

Afin de bien fonctionner, la chaux doit :

- Se présenter sous forme de granulés réguliers et non cassés. Les poussières de chaux peuvent traverser les filtres de la cartouche et être entraînées dans le mélange inspiratoire, ou venir se combiner avec de l'eau de condensation dans le circuit. Cette combinaison forme un mélange caustique qui peut venir détériorer certaines parties de l'appareil (notamment les cellules O₂) ou incommoder le plongeur. Certaines chaux contiennent trop de poussières et doivent être tamisées avant emploi. Plus le conditionnement de la chaux est grand, par exemple en bidon de 20 kg ou plus, plus la chaux se trouvant en fond de bidon sera endommagée. Il est donc plus intéressant de choisir des conditionnements de type 8 à 10 kilos voire moins.
- Être libre de toute impureté (sables, etc.) et ne pas avoir d'odeur.
- Être stockée hors du soleil et à l'abri du gel (dans les deux cas, la teneur en eau de la chaux serait modifiée et l'efficacité de la chaux diminuée).

Précautions d'emploi :

Quand la chaux se trouve en présence d'eau, se crée alors une solution aqueuse alcaline (de pH supérieur à 12) extrêmement agressive pour la peau, les yeux et les muqueuses. Il faut donc lors du remplissage de la cartouche de chaux prendre les précautions suivantes :

- Effectuer l'opération dans un endroit sec,
- Ne pas respirer les poussières pouvant se dégager lors du chargement,

- Porter des lunettes de protection (ou son masque de plongée !) afin d'éviter les projections dans les yeux,
- En cas de contact, rincer abondamment pendant au moins 15 minutes pour éviter la brûlure chimique, et appeler les secours.

Utilisation / Durée

Les fabricants de recycleur donnent des durées d'utilisation calculées sur la base de la bouteille fournie avec le recycleur et de la taille de la cartouche de chaux sodée. En plongée loisir, sans effort soutenu de longue durée, on a pour une cartouche contenant 1.3 kg de chaux, une autonomie d'environ 2 heures. Pour une cartouche de 2,5 kilos on a 3 à 4 heures d'autonomie.

Il faut cependant considérer que ces valeurs ne sont valables que pour une chaux neuve, une cartouche correctement remplie et une production normale de CO₂. De la chaux compactée par une fuite d'eau dans la cartouche n'offrira qu'une surface d'échange très faible et donc ne pourra pas efficacement éliminer le CO₂. Un risque très important d'hypercapnie menacera alors le plongeur.

Durant une utilisation normale, la chaux se mouille d'un film d'eau résultant de la réaction chimique du CO₂ sur l'hydroxyde de calcium. Cela peut parfois entraîner le compactage de la chaux et en diminuer son efficacité.

Après utilisation, la chaux humide peut se dégrader, car le milieu alcalin favorise la prolifération de certains champignons.

La chaux usée doit être jetée dans les poubelles traditionnelles (au niveau tri, la soude usée est considérée comme de la lessive). Ceci est tout à fait légal et apparaît sur la fiche de sécurité du produit.

Points Clefs : (Utilisation de la chaux)

Dans tous les cas, il est impératif de :

- Ne jamais dépasser une utilisation de plus de 90 minutes par kilogramme de chaux (en cartouche axiale).
- Pour des utilisations successives, il est conseillé de prendre une marge de sécurité de 50% sur la durée d'utilisation (29).
- En cas d'utilisation de la cartouche axiale sur plusieurs plongées, la durée totale cumulée ne doit jamais dépasser le calcul théorique de 90 minutes par kilogramme. De plus, ces plongées doivent impérativement être effectuées sur une période de 24 à 48 heures maximum (28).
- Remplacer immédiatement la chaux en cas d'inondation de la cartouche.
- Ne pas manipuler de chaux mouillée à mains nues et sans protection des yeux.
- Ne jamais stocker et recharger une chaux déjà utilisée.
- Ne pas utiliser une chaux présentant une odeur forte.
- Ne jamais rejeter la chaux usée à l'eau ou dans l'environnement.

Attention ; La durée de 90 minutes par kilogramme de chaux est donnée à titre indicatif et suite à des essais effectués sur des appareils Draeger. On ne peut pas fixer de manière formelle la durée d'utilisation avec la quantité de chaux, car la capacité d'absorption d'une cartouche dépend de la quantité de chaux, de la forme de la cartouche et de la quantité de CO₂ produite par le plongeur (29).

Calcul de la PpO₂ pour Recycleur Semi-Fermé

Connaître le pourcentage d'oxygène dans le sac inspiratoire est une donnée vitale pour le plongeur recycleur. On dispose pour cela de capteurs O₂ qui permettent de connaître la pression partielle O₂ et en fonction de la profondeur d'en déduire le % d'O₂. Cependant, il convient de pouvoir valider ces valeurs en connaissant de manière théorique les valeurs de % en fonction du rythme respiratoire.

Cela permettra au plongeur d'identifier rapidement un problème de fonctionnement soit de la mesure, soit du recycleur. En première approximation, on considère l'oxygène entrant et sortant du sac inspiratoire en tenant compte des différents débits d'entrée et de fuite, ainsi que de la consommation du plongeur.

Bilan Oxygène

Entrée : Débit injection (Q_I) x Fraction O₂ Bouteille (F_{O₂B}) (en litre/minute)

Sortie : Consommation O₂ (V_{O₂}) + Fraction O₂ respirée (F_{O₂R}) x Débit Soupape (Q_S)

Et on a, pour les débits volumiques

$$Q_I = Q_S + V_{O_2}$$

Entrée = Sortie :

$$Q_I \times F_{O_2B} = V_{O_2} + F_{O_2R} \times (Q_I - V_{O_2})$$

Ce qui donne :

$$F_{O_2R} = (Q_I \times F_{O_2B} - V_{O_2}) / (Q_I - V_{O_2})$$

Exemple : Draeger Ray Injecteur 50%, débit = 8 litre/minute, mélange 50% O₂/N₂,
VO₂ plongeur = 1 litre/minute

On a : $F_{O_2R} = (8 \times 0.5 - 1) / (8 - 1) = 3/7 = 42.8 \%$

Si on considère maintenant, une VO₂ légèrement supérieure à 1.5 litres/minute on obtient :

$$F_{O_2R} = (8 \times 0.5 - 1.5) / (8 - 1.5) = 2.5/6.5 = 38.5 \%$$

Afin de rapidement connaître la valeur de la fraction oxygène dans le circuit inspiratoire, on peut donc prendre comme approximation pour un effort modéré:

$$F_{O_2R} = 0.8 \times F_{O_2B}$$

Cela permet rapidement de contrôler si le système fonctionne, et d'avoir une idée du rythme respiratoire.

On retrouve en Annexe I, une série de tableaux montrant les valeurs de % O₂ en fonction des différents injecteurs et du rythme respiratoire du plongeur, aux différentes profondeurs d'utilisation. On constatera que l'approche surface est un moment critique avec ce type de recycleur.

A partir de la formule du recycleur semi fermé (SCR) on peut en déduire différents éléments, qui éclairent sur le mode de sécurisation choisi par le constructeur :

- Calcul du débit minimum requis pour un % O₂ Inspiratoire de 20% minimum, en cas de forte demande O₂ (16) :

$$Q_{I \min} = (V_{O_2 \max} (1 - 0.2)) / (F_{O_2B} - 0.2)$$

Exemple : Pour un mélange 40% et une VO₂ max de 2,5 litres/minute, cela donne un débit minimum de : 10 litres/minute, ce qui correspond à l'injecteur 40% de Draeger (11).

3 c/ Accidents et Prévention

- Accidents Biochimiques
 - 1- Hypercapnie
 - 2- Hypoxie
 - 3- Hyperoxie
 - 4- Intoxication à la soude
- Les barotraumatismes
- La décompression
- Les risques de contamination
- Analyse des risques inhérents à la plongée recycleur

Note : Le but de ce chapitre n'est pas de revoir tous les accidents de plongée, tels qu'ils sont présentés dans les cursus classiques de formation des plongeurs, mais de s'intéresser aux accidents pouvant résulter de l'utilisation d'un recycleur.

Accidents Biochimiques :

1-Toxicité du CO₂ : L'hypercapnie :

Causes / Mécanisme:

L'hypercapnie est liée à la pression partielle de CO₂. Pour chaque litre d'oxygène que nous consommons, nous produisons environ 0.8 litres de CO₂.

Dans un recycleur ce CO₂ est éliminé par la chaux sodée, mais il peut y avoir certains cas dans lesquels le phénomène d'hypercapnie apparaît :

- Effort violent avec élévation endogène de la PpCO₂ intra-pulmonaire.
- Effort violent avec élévation de la PpCO₂ dans l'espace mort du recycleur.
- Mauvaise élimination du CO₂ par la chaux (chemins préférentiels, chaux mouillée ou saturée).
- Défaillance d'une soupape de non retour, entraînant un volume de gaz expiré non traité.

Symptômes

Ils sont les suivants par ordre de gravité :

- Perte de concentration.
- Maux de tête, essoufflement, excitation (entre 20 et 70 millibars de PpCO₂).
- Syncope (au delà de 90 millibars de PpCO₂).

De plus, une forte concentration de CO₂ peut favoriser le déclenchement de crise hyperoxique ou la mise en route d'un accident de décompression. Il convient donc de traiter l'hypercapnie dès les premiers symptômes.

Conduite à tenir :

- Cesser ou faire cesser tout effort en maintenant le niveau d'immersion (une remontée entraînerait une baisse de la PpO₂ ce qui aggraverait la situation).
- Effectuer ou faire effectuer un rinçage du système. L'inspiration par la bouche et l'expiration par le nez vident le sac inspiratoire qui se remplira du mélange bouteille sans CO₂ et riche en oxygène. Vérifier la PpO₂ et sa stabilité ainsi que la pression restante dans la bouteille.
- Si les symptômes persistent, passer ou faire passer sur système de Bail Out et entamer la remontée en assistant le plongeur.

En surface :

- Traitement par oxygénothérapie et si la victime n'est pas allergique lui administrer de l'aspirine ou du paracétamol.
- Faire évacuer si les symptômes persistent et/ou si il y eu une procédure de décompression non effectuée.

Dans une étude parue récemment, les médecins de la Marine Nationale indiquent que sur 96 accidents recensés (sur ca. 500 000 plongées depuis 1979), l'hypercapnie est apparue 22 fois et la plupart du temps pour des causes endogènes. Il convient cependant de pondérer ce résultat car premièrement les nageurs de combat sont généralement en bonne condition physique, mais de plus les plongées militaires en exercice sont extrêmement sécurisées du fait de la pertinence du matériel utilisé et de la logistique déployée. Dans le cadre de la plongée loisir, cet accident serait vraisemblablement plus susceptible d'apparaître en cas d'effort soutenu (courant) et de matériel mal préparé (voir plus loin prévention).

Au niveau technologique, il n'existe pour le moment pas de capteur de la PpCO₂ pour les recycleurs. Une variation anormale de la PpO₂ peut être l'indicateur d'un mauvais fonctionnement, ou d'efforts violents entraînant une consommation d'oxygène supérieure à l'oxygène fourni par la machine, mais cela n'indique pas forcément une élévation de la PpCO₂.

Prévention :

Préventions des causes endogènes :

- Bonne condition physique et psychique.
- Entraînement, accoutumance et bonne technique.

Préventions des causes exogènes :

- Bonnes conditions de plongée.
- Choix pertinent des proportions du mélange gazeux.
- Vérification du débit délivré par l'appareil en fonction du mélange utilisé.
- Vérification de l'étanchéité du recycleur (respect de la procédure de pré plongée).
- Vérification de la qualité de la chaux :
 - Pas de durée de plongée supérieure aux données théoriques de saturation de la chaux (en fonction de l'appareil et des efforts fournis, de l'ordre de 90 minutes par kilogramme de chaux au maximum).
 - Pas d'utilisation d'une cartouche de chaux ayant été inondée et pouvant présenter des passages préférentiels.
 - Pas d'utilisation d'une cartouche de chaux sur une période supérieure à 48 heures.

2-Toxicité de l'oxygène : l'hypoxie

Causes :

Cet accident n'est pas à proprement parler lié à la toxicité de l'oxygène mais au manque d'oxygène. Les symptômes d'hypoxie commencent à être observés pour des PpO₂ inférieures à 0.16 bars. Ces symptômes sont très diffus et le plongeur s'endort soudainement sans avoir vraiment conscience de ce qui se passe. Tous les témoignages de plongeurs ou d'apnéistes ayant été victimes d'une hypoxie indiquent qu'ils n'ont aucun souvenir des circonstances de l'accident et du moment de son déclenchement. L'hypoxie est un des accidents les plus sévères en plongée en recycleur. Ses causes sont les suivantes :

- % O₂ insuffisant dans le mélange utilisé.
- Débit de l'injecteur de mélange insuffisant ou non approprié au mélange utilisé.
- Mauvais fonctionnement du système de renouvellement du mélange ou injecteur bouché, passage du recycleur en circuit fermé sans injection de gaz frais. Il en résulte une baisse rapide de la PpO₂ (sur le Draeger Ray, 2 minutes suffisent pour passer de 1 à 0.16 bars de PpO₂ en cas d'arrêt du système d'injection).
- Une ou l'autre des causes précédentes avec absence ou défaillance de l'indicateur de PpO₂.
- Variation brutale de la PpO₂ lors de la remontée du fait de la variation de la pression ambiante, surtout dans la zone 0 -10 mètres (cf. Rdv syncopale des 7 m). Ceci peut survenir avec ou sans jauge oxygène car les cellules ont une réponse de l'ordre de 5 à 30 secondes suivant les modèles.
- Pour cette raison, **l'hypoxie survient souvent lors de la phase de remontée.**

Symptômes :

- Très peu de signaux d'alarme.
- Le sujet devient inerte, avec parfois quelques mouvements spasmodiques des membres.
- Syncope.

Conduite à tenir :

En présence d'une victime de syncope en recycleur, il convient de :

Ne pas remonter une victime en la maintenant sur son système de recycleur. Lors de la remontée la PpO_2 chuterait encore du fait de la variation de la pression ambiante ce qui entraînerait la mort de l'accidenté.

- Fermer l'embout du recycleur. Mettre et maintenir dans la bouche de la victime, le deuxième étage du système de Bail Out, après s'être assuré que celui-ci fonctionne. Entamer la remontée à vitesse contrôlée. Vérifier l'état de la victime.
- Dès le retour en surface, entamer les manœuvres de premiers secours. Pendant le retour vers le bord ou le bateau, pratiquer le bouche à bouche ou l'injection forcée de mélange à l'aide du détendeur de secours.
- Dès le retour de la conscience, traitement par oxygénothérapie et évacuation vers un centre hyperbare.

D'après l'étude de la Marine Nationale, l'hypoxie ne représente que 16% des accidents enregistrés. Cependant le déclenchement de cet accident étant étroitement lié à des problèmes de procédure (vérification du système, entretien, vérification des mélanges, test de pré-plongée), il convient de particulièrement attirer l'attention du plongeur loisir afin que celui-ci ne se fie pas aveuglement aux valeurs indiquées par sa jauge oxygène, mais qu'il s'assure systématiquement que son système est en parfaites conditions avant et pendant la plongée.

Prévention :

- La formation du plongeur recycleur est très importante face à cet accident traître.
- Il faut impérativement respecter les procédures de vérification pré-plongée :
 - Vérification du mélange utilisé.
 - Vérification du fonctionnement des soupapes de l'embout ou du système de circulation du mélange.
 - Vérification du débit d'alimentation en gaz ou de l'étanchéité du système de renouvellement du gaz.
 - Vérification des fuites.
 - Dès l'immersion et pendant la plongée, pour les circuits semi fermés, vérifier la présence de bulles lors de l'expiration. Leur absence pour ces systèmes serait liée à un mauvais fonctionnement du système d'alimentation en gaz.
- L'assistance ou le sauvetage d'un plongeur au recycleur demande de la pratique et des connaissances spécifiques (Voir Chapitre 6c).

3-Toxicité de l'oxygène : l'hyperoxie

Deux phénomènes bien décrits:

- Effet Paul Bert : Effet lié à la toxicité de l'oxygène sur le système neurologique pour une pression partielle O₂ supérieure à 1,6 bars. Une forte pression partielle O₂ entraîne le déclenchement d'une crise hyperoxique de type épileptique qui peut aussi être favorisée par la présence simultanée d'une forte teneur en CO₂ ainsi que par la durée d'exposition à ces pressions. C'est typiquement ce que rencontrent les nageurs de combat après de longues heures d'effort sur circuit fermé à une PpO₂ de 1,6 bars. Pour le plongeur loisir, le risque, est le même que lors de l'utilisation de Nitrox et est dû à un dépassement de la profondeur plancher fixée par le mélange inspiratoire.
- Effet Lorrain Smith : Effet lié au caractère oxydant de l'oxygène sur le système ventilatoire suite à une exposition de longue durée de l'ordre au minimum de 8 à 12 heures à des PpO₂ supérieures à 0,5 bars. Pour le plongeur recycleur qui va profiter de l'autonomie très grande de son appareil, c'est un risque mineur, mais il convient cependant de tenir compte de la durée d'exposition, notamment si celle-ci se fait à des pressions partielles supérieures à 1 bar.

Ces deux accidents potentiels connus du plongeur Nitrox se retrouvent en plongée recycleur, du fait de l'utilisation d'O₂ pur ou de mélanges Nitrox suroxygénés. Ils sont décrits dans le cursus du plongeur Nitrox et devraient être connus par le plongeur souhaitant s'initier au recycleur.

Effet Paul Bert – Atteinte du Système Nerveux Central

Causes :

- % O₂ mélange trop élevé pour profondeur de plongée.
- Dépassement de la profondeur maximum.
- Durée d'exposition (indice de toxicité neurologique O₂).

L'immersion, le froid et les efforts sont des facteurs favorisants.

Symptômes :

Signes prémonitoires :

Quand ils existent, ils surviennent quelques secondes avant la crise (26 et 32),

- Troubles de la vision (rétrécissement champ visuel, effet tunnel).
- Troubles auditifs (bourdonnements).
- Nausées.
- Anxiété.
- Secousses musculaires, contractions des muscles de la face.

La crise :

- Perte de connaissance, suivie immédiatement d'une crise qui évolue en différentes phases :
- Phase tonique de raidissement.
- Phase clonique (2 à 3 minutes) avec agitation intense convulsive (morsure de la langue, émission d'urine).

Si on soustrait la victime à cette forte pression partielle d'oxygène, la crise passe en phase résolutive de dépression post-critique de type coma (pendant une dizaine de minutes), suivie d'un retour progressif à la conscience.

Attention ; Il est souvent rapporté par les plongeurs que la syncope survient sans aucun signe précurseur (26 et 32).

Conduite à tenir :

- Remonter la victime en s'assurant que l'embout est bien maintenu dans la bouche. Cette remontée doit s'effectuer à vitesse raisonnable afin d'éviter la surpression pulmonaire.
- Au retour en surface, faire respirer l'air ambiant ce qui entraînera une disparition des manifestations convulsives.
- Attention aux risques potentiels liés d'accidents de décompression ou de surpression pulmonaire.

Prévention :

- Respect absolu de la profondeur plancher du mélange bouteille.
- La sensibilité à l'hyperoxie varie avec de nombreux paramètres, le froid, le stress, la forme physique, les efforts. Ainsi on préférera se limiter à une PpO₂ max de 1,4 bars dans la majorité des cas, la limite de 1,6 bars étant réservée pour des plongées dans des conditions optimales.
- Attention aux durées d'exposition à PpO₂ supérieure à 1,3 bars avec effort (dans le cas d'une exploration sur épave profonde avec courant par exemple).
- Pour les systèmes à 2 bouteilles, attention à la confusion entre diluant et oxygène pur lors des manœuvres de rinçage ou de changement de source de gaz lors de la remontée.
- L'utilisation d'un ordinateur Nitrox permet de vérifier son % SNC (exposition oxygène du Système Nerveux Central). Sinon, il convient de garder en tête la durée maximum d'exposition en fonction de la pression.
- Le % SNC se calcule en divisant le temps de plongée effectué, par la durée max d'exposition donnée en table III à la PpO₂ d'exposition correspondante (31).

Tables NOAA Exposition O₂ (22 et 31)

Pression Partielle O ₂ (bar)	Durée d'exposition max (sur 1 plongée) en minutes	Durée cumulée max d'exposition sur 24 heures
1.6	45	150
1.5	120	180
1.4	150	180
1.2	210	240
1.0	300	300
0.8	450	450
0.6	720	720

Ainsi pour une plongée de 30 minutes à 30 mètres, en respirant un mélange à 35% (soit 1,4 bars PpO₂), on a un %SNC = 30/150 = 20%

Effet Lorrain Smith : Toxicité Pulmonaire

Causes :

- Exposition prolongée à des PpO₂ supérieures à 0,5 bars ou expositions répétées trop fréquemment (séjour plongée par exemple).

Symptômes :

- Toux sèche.
- Douleur en fin d'inspiration.
- Sensation de manque de souffle.
- Irritation des voies aériennes.
- Inflammation pulmonaire (avec destruction du surfactant alvéolaire).

Conduite à tenir :

- Fin de plongée dès les premiers symptômes.
- Attendre au moins 24 heures et la disparition des symptômes avant de replonger.
- Consulter un médecin si les symptômes réapparaissent.

Prévention :

Lors de plongées répétées ou longues, le plongeur doit être capable de quantifier son exposition (1 et 31) notamment en utilisant la méthode des OTUs (Oxygen Tolerance Unit).

Les OTUs sont calculées selon la formule suivante :

$$OTU = T \times (2(PpO_2 - 0.5))^{0.83}$$

Ou T = temps en Minutes, PpO₂ = pression partielle d'exposition maximale en bar.

Exemple : Pour une plongée de 3 heures à PpO₂ = 1,6 bars, on a

$$OTU = 3 \times 60 \text{ min.} \times (2(1,6 - 0.5))^{0.83} = 180 \times (2.2)^{0.83} = 346$$

$$\% \text{ SNC} = 180/150 = \mathbf{120\%}$$

Donc en plongée loisir, on reste plus exposé à la toxicité neurologique qu'à la toxicité pulmonaire (OTUs).

La dose cumulée maximum admissible selon Hamilton est de 850 sur 24 heures. Mais en cas de plongées à répétition dans le cas d'un séjour, on utilise la table suivante :

Table d'expositions successives (1) d'après Hamilton, REPEX Habitat Diving Procedure ,1988)

<i>Nombre de jours consécutifs</i>	<i>Dose Moyenne Admissible /Jour</i>	<i>Dose Cumulée Maximum</i>
1	850	850
2	700	1400
3	620	1860
4	525	2100
5	460	2300
6	420	2520
7	380	2660

Il convient donc lors d'un séjour plongée de bien tenir compte de la durée totale cumulée d'exposition et du nombre d'OTUs de façon à éviter des problèmes de toxicité pulmonaire. Ceci étant, cela concerne quand même assez peu le plongeur loisir, même passionné de recycleur.

Au niveau de la Marine Nationale, les médecins rapportent dans leur étude des accidents de type hyperoxique dans 19% des cas. Une perte de connaissance suivie de mouvements convulsifs est observée dans 60% des cas chez des plongeurs utilisant un appareil de type circuit fermé (Oxygers) à oxygène pur. Les crises surviennent lors d'immersion longue à des profondeurs de 5 à 6 mètres.

L'évolution est favorable dès la reprise de la respiration à l'air, cependant il y a risque de noyade et de surpression pulmonaire, c'est pourquoi les plongeurs militaires sont systématiquement encordés et portent une sangle d'embout. Ces précautions permettent :

- d'éviter la noyade en maintenant l'embout en bouche.
- une réaction rapide du coéquipier qui se rend immédiatement compte de la perte de connaissance de l'autre plongeur.

Si l'on étudie les contenus de formation de plongeur recycleur loisir, on constate qu'aucune n'a fait le choix d'enseigner cette méthode de sécurisation du plongeur en immersion. En recycleur semi-fermé Nitrox les risques sont faibles si l'on respecte les limites de profondeur, mais dans le cas des circuits fermés, ou les risques d'hyperoxie sont plus grands (exposition, mauvais fonctionnement de l'injecteur O₂), il faut à mon sens au moins recommander le port de la sangle d'embout. Cela confirme le fait que les appareils à forte pression partielle O₂ demandent une formation spécifique et ne sont pas réservés aux plongeurs recycleur débutants.

4- Intoxication à la Soude (cocktail caustique)

En cas d'inondation du système, la chaux sodée réagit avec l'eau pour former une solution caustique de soude et de potasse. Si le plongeur ne réagit pas à temps à l'arrivée d'eau, cette solution peut parvenir jusqu'au tuyau annelé et dans la bouche du plongeur. Les conséquences peuvent être graves en cas d'absorption. D'autre part, des poussières de chaux peuvent se mêler à l'eau de condensation et créer des petites quantités de ce cocktail caustique.

Il convient donc de connaître les premiers symptômes de façon à passer immédiatement sur le système de secours.

Symptômes :

- Sensation de métal sur la langue,
- Démangeaison du palais ou brûlures de la gencive et de la langue,
- Liquide savonneux arrivant à l'inspiration.

Attention ! Les conséquences de l'ingestion massive sont plus graves :

- Vomissement (avec sang),
- Spasmes de la glotte,
- Gonflement de l'oesophage,
- Brûlure et œdème pulmonaire.

Conduite à tenir :

- Passer sur système de secours,
- Rincer sa bouche plusieurs fois,
- En cas d'ingestion de liquide :
 - o Faire boire beaucoup d'eau,
 - o Ne pas faire vomir, mettre la victime en PLS, surveiller,
 - o Placer sous oxygène,
 - o Faire évacuer la victime.

Prévention :

- N'utiliser que de la chaux destinée aux recycleurs (celle-ci contient une faible proportion de soude caustique).
- Veiller à ne pas avoir de poussière dans la chaux.
- Vérifier l'absence de fuites dès l'immersion.
- Dès les premiers signes d'inondation (comme un bruit de bouteille plastique que l'on immerge et qui se remplit d'eau, c'est un bloup bloup très caractéristique !!) passer sur le système de secours.
- Au moindre goût sur la langue, cracher, rincer et passer sur le système de secours.

Les Barotraumatismes

Oreilles, Masques, Sinus :

Les risques sont les mêmes pour un plongeur utilisant un recycleur que pour un plongeur en circuit ouvert. Cela fait partie de la formation de base du plongeur. Ces accidents ne seront donc pas traités dans ce chapitre.

Surpression Pulmonaire :

La création d'un circuit fermé entre poumons et recycleur entraîne des risques spécifiques de surpression pulmonaire, car si le système se met en surpression c'est toujours le maillon le plus faible qui lâche, c'est-à-dire, hélas ! les poumons du plongeur...

Causes :

- Lors d'une remontée rapide, le sac inspiratoire ainsi que le sac expiratoire risquent de se gonfler et d'entraîner une surpression du système recycleur par rapport à la pression dans les poumons du plongeur. Le plongeur ne peut donc plus souffler par la bouche. Pour un circuit fermé qui n'a pas de soupape de sécurité sur le sac expiratoire, ou pour un semi-fermé dont la soupape ne fonctionnerait plus, cette surpression est atteinte très rapidement. Si le plongeur ne souffle alors pas par le nez, il y a risque de surpression pulmonaire.
- En cas de problème, lors d'une irruption d'eau, ou une arrivée de cocktail de soude, le plongeur peut réagir par un spasme glottique. Une remontée panique, entraînerait un risque de surpression.
- Remontée d'une personne en phase tonique de crise épileptique / neurotoxique (26).

Symptômes :

Il s'agit du même accident que pour la plongée en circuit ouvert à l'air. Ces symptômes sont enseignés au cours des différents niveaux fédéraux.

Conduite à tenir :

Idem. Et :

- Administration d'oxygène (même si la surpression est consécutive à une crise neurotoxique).

Prévention :

Idem. Et :

- Toujours vérifier avant la plongée le fonctionnement des soupapes de surpression du sac inspiratoire.
- Favoriser l'expiration lors de la phase de remontée en expirant par la bouche mais aussi régulièrement par le nez (c'est la fin de la plongée, peu importe si l'on perd un peu de gaz).
- En cas d'arrivée d'eau ou de soude et de possible spasme glottique, le plongeur doit passer sur son système de secours et entamer la remontée après avoir récupéré un rythme respiratoire normal.
- Lors d'une remontée rapide, bien expirer par le nez, et si possible passer sur système de Bail Out.
- L'utilisation d'un circuit fermé à O₂ pur, sans soupape de surpression demande une formation spécifique.
- Face à un plongeur recycleur inconscient, il convient rapidement de lui placer et maintenir en bouche son détendeur de secours en circuit ouvert, afin de pouvoir contrôler sa respiration et l'expiration lors de la remontée.
- L'assistance ou le sauvetage d'un plongeur au recycleur demande des connaissances spécifiques (voir chapitre 6c).

La décompression

Il s'agit du même phénomène que pour la plongée en circuit ouvert à l'air. Ces mécanismes sont enseignés au cours des différents niveaux fédéraux

Les recycleurs ou toute autre avancée technologique ne suppriment pas les inconnus de la décompression ou des réactions de l'organisme à de fortes pressions partielles de gaz (Neurotoxicité, Narcose, SNHP).

A l'exception du plongeur à l'oxygène pur, les plongeurs recycleurs sont soumis aux risques de la décompression. Mais, l'utilisation de mélange Nitrox, la respiration d'un gaz chaud et humide contribue à diminuer les risques d'accidents de décompression (moins de saturation, moins de déshydratation, moins de CO₂).

Il convient cependant de bien connaître les procédures de décompression et leur adaptation à la plongée au recycleur.

Dans le cas d'une utilisation d'un recycleur semi fermé Nitrox, la procédure de décompression ne doit pas être calculée sur le % Azote du mélange dans la bouteille, mais sur le % Azote du mélange inspiré. On peut par sûreté considérer la règle suivante pour les recycleurs semi-fermés

:

$$\% \text{Oxygène Inspirée} = \% \text{O}_2 \text{ Bouteille} \times 0.8 \quad (\text{voir page 45})$$

$$\% \text{Azote Inspiré} = 100\% - \% \text{Oxygène Inspiré.}$$

Attention : en cas d'effort soutenu ou d'un début d'essoufflement, le plongeur devra considérer pour la décompression, sa plongée comme effectuée à l'air.

Exemple : Pour un mélange Nitrox 40/60 utilisé à 30 mètres en circuit ouvert, la profondeur équivalente air sera de 20 mètres.

Pour un mélange Nitrox 40/60 utilisé à 30 mètres en recycleur, le plongeur respire un mélange (40x0,8) 32% O₂ et 68 % Azote. La profondeur équivalente air sera de 24 mètres.

Pour une plongée de 40 minutes, cela représente une différence de durée de palier de 10 minutes.

De même, pour le plongeur utilisant un ordinateur Nitrox, non relié à son système inspiratoire, il devra rentrer une valeur de fraction oxygène inférieure de au moins 20% à celle réellement dans la bouteille, ou considérer pour plus de sécurité qu'il plonge à l'air.

Dans l'étude de la Marine Nationale, 14 accidents de décompression, soit 15 % sont rapportés. Ils ont eu lieu lors de plongées profondes au delà de 35 mètres et de plus de 20 minutes avec des recycleurs de type DC 55. Ce résultat est peu surprenant dans la mesure où un DC 55 à 55 mètres (mélange inspiré ca 28% O₂) a une autonomie de plus d'une heure...

Prévention :

- Bonne planification de la plongée et estimation conservatrice du mélange inspiré.
- Attention à la remontée et la décompression sur Bail Out si le mélange est différent de celui inspiré.
- L'utilisation d'un ordinateur (type Uwatec Air Z02 + sonde Oxy2), relié à la mesure de la PpO₂ est conseillée, car ce type d'ordinateur prend en instantané la valeur exacte de PpN₂ à laquelle est exposé le plongeur. C'est le mode de calcul de décompression le plus correct.
- En cas de problème, soit matériel, soit physique, la décompression devra être effectuée en considérant l'air comme mélange inspiratoire.

Photo : Oxy 2 monté sur le tuyau annelé coté Inspiratoire.



Dans le cadre de la plongée loisir, avec utilisation de mélange type Nitrox et des durées de plongée raisonnables, les recycleurs semi-fermés peuvent contribuer à améliorer la sécurité des plongeurs vis-à-vis des accidents de décompression. L'expérience de croisières en Mer Rouge l'a clairement montré, on plonge très souvent, à des profondeurs tout à fait honnêtes (aux environs de 30 mètres) avec très peu de décompression. Le plongeur reste en bonne forme et est moins fatigué. Le tableau suivant donne les profils de décompression recycleur et air pour une journée type, en séjour plongée (croisière Mer Rouge en Avril 2003).

	1ere Plongée	2eme Plongée (Intervalle 4 heures)
Appareil/mélange	Ray (Nitrox 40/60)	Ray (Nitrox 40/60)
Prof Max/durée	33m / 35 min	33m / 35min
Décompression (profil carré)	12 min/ 3m	25 min / 3m
Equivalent Air	2min à 6m 27min à 3m	9min à 6 m 39 min à 3m
Gain Recycleur/Air	17 minutes	23 minutes

Lors d'une utilisation d'un ordinateur de plongée type Nitrox, et de profils non carrés (remontée lente et évolution dans la zone des 20 mètres) aucun palier n'apparaît par rapport à un plongeur à l'air ayant le même profil mais qui lui devra selon son ordinateur effectuer un palier de quelques minutes à 3 m. Le recycleur semi fermé permet de bénéficier des effets de la plongée Nitrox avec une grande autonomie. Lors de croisière, une saturation moindre est un facteur de sécurité supplémentaire. Quant à la photo suivante, elle montre l'intérêt de ne pas produire de bulles...



Rencontre sous marine (photo J. Tongio 2003)

Dans l'utilisation des recycleurs, on voit aussi se développer un certain engouement pour la plongée profonde au Trimix avec des appareils de type circuit fermé à mélange de gaz (MGCCR). Les effets de l'hyperoxie et de la narcose sont diminués par l'utilisation de mélange de gaz avec de l'Hélium. L'Hélium est un gaz qui se dissout extrêmement rapidement dans l'organisme et il convient donc d'être très prudent quant aux procédures de décompression. Quelques tables validées et des ordinateurs de décompression sont maintenant disponibles. Cependant les incursions profondes ont toujours été liées à

des structures logistiques lourdes (caissons, cloche, gaz multiples, encadrements, plongeur de sécurité), et il peut sembler dangereux de vouloir étendre ce type de plongée à une activité de loisir.

Les risques de contamination

On a beaucoup parlé des risques de contamination liés aux détendeurs club qui circulent de bouche et bouche, ou lors d'échange d'embout en cas de panne d'air. Du fait des risques potentiels, des procédures de désinfection du matériel ainsi que des manœuvres de simulation pour l'apprentissage des techniques d'échange d'embout ont été mises en place par la FFESSM.

Dans le cas du recycleur, on peut faire l'analogie avec une opération à poumon ouvert. Une fois l'embout en bouche, notre volume pulmonaire est composé, des poumons que la nature nous a donnés, mais aussi des tuyaux annelés et des sacs inspiratoire et expiratoire. Cependant, alors que le corps humain a ses défenses naturelles, les sacs et les tuyaux, toujours humides et chaud fournissent un environnement idéal pour le développement des virus et bactéries de toutes espèces. Ces micro-organismes peuvent être amenés par la respiration du plongeur, mais aussi lors du stockage et du montage par simple contact avec l'air. L'humidité et la nature des matériaux feront ensuite le reste. Les risques sont bien sûr démultipliés dès lors que le recycleur est utilisé par plusieurs personnes.

Quels sont les risques ?

Pour une utilisation personnelle, il y a risque de voir se développer une flore bactérienne dans les parties humides du recycleur, ainsi qu'au niveau de l'embout, lorsque ceux-ci ne sont pas nettoyés et désinfectés avant stockage.

Dans le cadre d'une activité école, ou de location de matériel, le développement de maladies contagieuses graves au cours des dernières années, entraîne statistiquement la possibilité qu'un sujet infecté se retrouve au contact du matériel.

Selon le Dr André Grousset (24), en cas d'utilisation d'un équipement par plusieurs personnes, les risques de contamination sont importants car la salive contient des virus et des bactéries. En milieu humide, ou si la salive n'est pas desséchée, ces virus et bactéries ont une durée de vie assez longue. On peut citer les résultats suivants dans la salive humide (32) :

- Le virus Herpes survit entre 4 et 5 heures,
- Le virus de l'Hépatite B plus de 24 heures,
- Le virus HIV lui, ne se transmet pas par la salive.

Quant à l'activité bactérienne, elle pourra continuer à se développer dans un sac expiratoire mal nettoyé ou stocké humide.

Il est donc obligatoire après chaque utilisation de suivre la procédure suivante :

- Rinçage (avec une eau savonneuse)
- Désinfection (nettoyage des pièces et de l'intérieur des sacs avec une solution désinfectante)
- Rinçage abondant
- Séchage

Ces manœuvres ne prennent que quelques minutes et permettent de profiter du recycleur en toute sécurité même lors d'une utilisation club ou location.

Quel désinfectant utiliser ?

Tout d'abord, on rince avec une eau savonneuse. Le savon décroche les résidus organiques hydrophobes ainsi que de nombreux microbes et permet le lavage correct des pièces. Le savon tue peu mais il joue un rôle non négligeable dans le processus d'entretien du matériel. Il participe notamment au ralentissement de la formation d'un bio film sur les parois humides des tuyaux annelés et des sacs respiratoires. Le bio film est une préoccupation constante car les microbes s'y logent et deviennent plus inaccessibles aux désinfectants (30).

Vient ensuite la désinfection. Le produit le plus efficace à moindre coût est l'eau de Javel. Une solution au 1/10^{ème} avec un temps de contact de quelques minutes permettra de bien désinfecter les sacs. Il convient de correctement rincer afin de protéger les pièces et de ne pas avoir de goût de Javel lors de la plongée suivante. En effet, l'eau de Javel travaille vite et bien contre les micro-organismes mais corrode les métaux et peut rendre certains plastiques cassants.

Il existe de nombreux autres produits désinfectants tels que les amines (mais quelle odeur !!), l'iode (mais gare à la coloration), l'ammonium quaternaire ou le glutaraldehyde. Le glutaraldehyde, toxique à haute dose comme la plupart des désinfectants peut être utilisé en solution aqueuse de l'ordre de 2 à 3%. Ce produit est très actif sur les pathogènes et n'endommage pas le matériel (à l'opposé d'une solution d'eau de Javel trop dosée...). Néanmoins, cette solution reste toxique en cas de mauvais rinçage. La FFESSM recommande pour la désinfection des détenteurs et recycleurs le Chlorure de Didecyl dimethyl Ammonium (Esculase).

L'utilisation d'eau de Javel, notamment sous forme de pastilles qui permettent de bien doser la solution aqueuse reste vraisemblablement le traitement le plus efficace et au temps de contact requis le plus court.

En Pratique :

Pour une utilisation en école ou en location, l'élève démonte, rince et désinfecte son recycleur après la plongée. Cela fait partie intégrante de la formation que de consacrer quelques minutes de soin pour l'appareil qui vient de lui permettre d'effectuer une magnifique plongée (du moins on peut l'espérer).

Il est par contre plus difficile lors de sessions de baptêmes recycleur avec un Draeger Ray, de nettoyer complètement les appareils entre chaque utilisation. Une méthode consiste à disposer d'un bac de désinfection ainsi qu'un bac attendant d'eau pour le rinçage. Ces bacs sont utilisés pour la désinfection et le rinçage entre chaque baptême du tuyau annelé et des embouts. Un vaporisateur (type lavage des vitres) dans lequel on a préparé une solution diluée de Javel est utilisé pour envoyer rapidement du désinfectant à l'intérieur des sacs, sans pour autant les démonter. On ouvre ensuite, après une ou deux minutes, les orifices de purge puis en rinçant à l'eau on laisse les liquides s'écouler. En moins de 5 minutes le recycleur est reconditionné.

En ce qui concerne des machines plus complexes comme le DC 55 ou le Dolphin, seul un nettoyage du tuyau annelé est possible. Dans le cadre d'une activité découverte, ce ne sont pas les machines les mieux adaptées.

En conclusion :

La plongée au recycleur est elle plus risquée que la plongée en circuit ouvert?

A ce jour, on ne dispose pas de suffisamment de données, notamment en ce qui concerne la plongée loisir au recycleur pour faire une comparaison valable entre les risques de la plongée à l'air et de la plongée au recycleur. La population de plongeurs loisir recycleur est encore très réduite, du moins en Europe et très peu fédérée (sauf par le biais de l'AHR, une association qui regroupe un petit nombre de passionnés). Il n'est donc pas possible d'avoir un retour d'information sur les accidents. Ça et là, la presse ou Internet relatent des accidents pour lesquels les circonstances semblent relativement mal décrites mais où souvent le comportement de l'utilisateur face à sa machine semble être incriminé : mauvais entretien (capteurs O₂, injecteurs), pas de contrôle pré-plongée, mauvais mélange ou profondeur trop importante. Ceci fait apparaître deux points clefs par rapport à l'analyse de risque:

- L'étude conduite par la Marine Nationale (23) et présentée dans le paragraphe suivant, concerne des plongeurs formés et encadrés. On y retrouve les accidents classiques de la plongée, liés à des circonstances de plongée parfois extrêmes, mais peu ou pas, à des problèmes de matériel ou de manque de formation.

- Pour le plongeur loisir, les sources d'information et de formation sont encore très éparpillées et peu structurées. Dans ce domaine, Internet propage tout et son contraire, souvent de manière assez irresponsable par rapport à la prévention des accidents et des modifications d'appareils. Beaucoup de plongeurs en recycleur ont encore une formation de type autodidacte et leur analyse personnelle des risques qu'ils encourent est souvent liée à des informations parfois non fondées, pêchées dans le vivier Internet. Pour que la plongée au recycleur ait un futur, il convient de mettre en place un vrai cursus fédéral afin de limiter toutes les dérives.

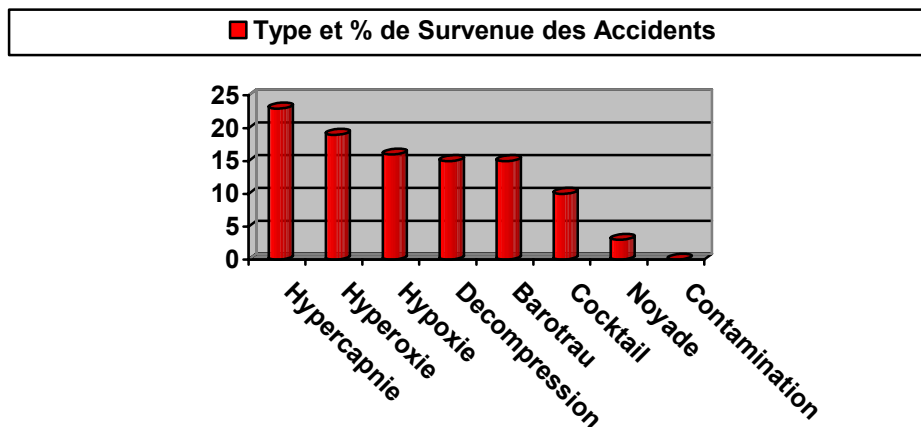
Analyse des risques inhérents à la plongée recycleur

La plongée loisir au recycleur en est encore à ses débuts. Au niveau militaire, elle est pratiquée intensément depuis plus de cinquante ans. Les données collectées par les militaires nous permettent une première analyse qualitative des risques.

Dans le graphique suivant, les résultats de la Marine Nationale (23) sont rapportés en fonction du % de survenue de chaque type d'accident. Si les problèmes de contamination n'y figurent pas, les journées baptêmes ne faisant pas encore partie de la formation des nageurs de combat, on s'aperçoit que les accidents biochimiques figurent en bonne place. Ceci peut s'expliquer par le fait que les recycleurs sont par nature des appareils biochimiques :

Bio – parce qu'en symbiose respiratoire avec le plongeur.

Chimique – parce que tout fonctionne sur l'utilisation de gaz spécifique et d'un réactif d'absorption.



*Répartition des Accidents par Type en plongée au recycleur.
D'après l'étude de la Marine Nationale (23) de Novembre 2003.*

On trouve en premier l'hypercapnie, ce qui est explicable par la nature des missions conduites par l'armée et par le fait que la chaux, même bien vérifiée, peut faillir. L'hyperoxie, ensuite peut s'expliquer par l'utilisation d'appareil O₂ pur. Puis viennent:

- L'hypoxie et les cocktails caustiques qui sont liés à des problèmes matériels.
- Les accidents de décompression, liés aux recycleurs Nitrox utilisés dans la zone des 40 mètres et à leur grande autonomie.

Dans une pratique loisir, entre 0 et 45 mètres, on risque de retrouver ces mêmes accidents, l'hypercapnie étant vraisemblablement le plus fréquent.

Il faudra aussi être très vigilant face aux risques de barotraumatismes pour les débutants, ainsi qu'aux problèmes de désinfection des appareils dans une utilisation club.

Il y a donc des risques inhérents à la nature des recycleurs, que ce soit par mauvais fonctionnement ou simplement par oubli des règles physiologiques de base.

La connaissance des lois physiques et physiologiques est donc d'une grande importance pour le plongeur recycleur. C'est sur la compréhension intime de ces phénomènes que se basera la vraie prévention des accidents et le respect des procédures. Car, comme on le verra dans le chapitre suivant, il est très important de bien préparer son matériel et de systématiquement effectuer les tests de contrôles avant chaque plongée. Cette phase de préparation et de réflexion pourrait sembler lourde ou superflue au plongeur loisir, souvent soucieux de profiter rapidement de son équipement et d'optimiser l'utilisation de son temps libre.

Il conviendra donc d'insister sur le POURQUOI de ces procédures et de toujours lier physiologie et prévention tout au long du cursus du plongeur recycleur. La formation et l'explication de l'importance des procédures sont les meilleures préventions des accidents de plongée en recycleur.

4 – ELEMENTS PRATIQUES DE LA PLONGEE AU RECYCLEUR PROPOSES PAR L’AUTEUR

4 a/ Les vérifications et procédures obligatoires

- Avant la plongée,
- Pendant la plongée,
- Après la plongée.

4 b/ Exercices pratiques d’aisance

4 c/ Assistance et Sauvetage d’un plongeur au recycleur

Notes :

- Les exercices proposés dans les 3 paragraphes suivants, correspondent aux compétences pratiques de base que devrait posséder le plongeur utilisant un recycleur de type semi-fermé. Pour les autres types d’appareils, ces compétences sont applicables, mais doivent être complétées par des manoeuvres pratiques plus spécifiques pour des appareils à circuit fermé à mélange de gaz.
- Les exercices sont classés par ordre de difficulté. Dans le chapitre 5, ils seront attribués aux différents niveaux de pratique proposés.

4 a/ Les vérifications et procédures obligatoires

Avant la plongée :

Contrôles et procédures -Au sec :

- ***Toujours connaître le mélange que l’on respire :***
 - Identification, vérification et marquage du mélange bouteille.
 - Etalonnage et vérification de sa jauge oxygène (type oxygauge ou oxy2).
 - Profondeur max de plongée, temps sans décompression.
 - Calcul de la décompression théorique en cas de dépassement.
- ***Est ce que le recycleur fonctionne ?***
 - Etat général ; pas de pièces cassées ou de sacs déchirés ?
 - Remplissage de la cartouche de chaux.
 - Chaux fraîche ou utilisée partiellement depuis moins de 24 heures.
 - Pas de poussière et tassage correct.
 - Installation de la ou des bouteilles et des détendeurs- vérification de la pression
 - CONTROLE DU DEBIT MASSIQUE DE L’INJECTEUR ou du système d’alimentation (SCR RMV ou CCR). (11)
 - Contrôle du By-pass (inspiration forte)
 - Contrôle du sens de circulation (vérification soupapes embout ou machine)
 - Fonctionnement de l’embout buccal.
 - Montage correct, essais ouverture/fermeture du bloc fond/décompression.
 - Vérification des FUITES :
 - En Dépression
 - En Pression
 - Vérification des soupapes d’évacuation (SCR ou SCR RMV).
 - Essais de respiration et stabilisation PpO₂ inspiratoire.
 - Rinçage si CCR ou si % O₂ supérieur à 50% (sinon ce n’est pas nécessaire).
 - Lestage (50% sur la machine, 50% largable).
- ***Sortie de Secours?***
 - Volume Bail Out suffisant. Mélange adapté à la profondeur de la plongée.
 - Vérification pression bouteille et fonctionnement détendeur.
 - Système de secours en position ouverte.
 - Accessibilité du détendeur de secours.
 - Vérifier que tout ou partie du lest est bien largable.

Contrôles et procédures - Dans l'eau, juste sous la surface :

- **Toujours connaître le mélange que l'on respire :**
 - Vérification de la PpO₂ et de sa stabilité.
 - Bouteille ouverte à fond, indication manomètre (attention en recycleur l'aiguille descend très doucement).
- **Est ce que le recycleur fonctionne ?**
 - Confort Inspiratoire/ Expiratoire.
 - Léger bruit de l'injection ou du déclenchement du système d'injection à la demande.
 - Présence de fuite (autre que sur la soupape du sac expiratoire) : **Le Bubble Check !**
 - Sur SCR, ou SCR RMV, vérifier que des bulles sortent à l'expiration.
 - Lestage (comme en plongée classique, il est préférable d'être un peu léger au départ).



Derniers contrôles au départ de la plongée

Pendant la plongée :

- **Toujours connaître le mélange que l'on respire :**
 - Utiliser la règle des 80% du mélange bouteille, et vérifier que l'indication de la PpO₂ correspond. (80% du pourcentage bouteille multiplié par la pression ambiante)
 - Ne pas dépasser la profondeur plancher.
- **Est ce que le recycleur fonctionne ?**
 - Descendre doucement, ou en contrôlant le volume du système, pour éviter
 - Ecrasement/fuite au niveau des sacs ou de la cartouche.
 - Sensation d'asphyxie.
 - Confort respiratoire, absence d'essoufflement.
 - Stabilisation et/ou réglage tarage de la soupape du sac expiratoire.
 - Absence de bruit suspect (inondation).
 - Vérification mutuelle de l'échappement des bulles.
 - Contrôle des paramètres de plongée.
 - Contrôle régulier de la pression bouteille.
- **Attention à la remontée !**
 - La pression absolue diminue, il faut donc vérifier que le % d'O₂ se stabilise bien
 - Ne pas hésiter à effectuer une ou deux **lunettes** (expirer par le nez, comme pour un vidage de masque ou anciennement **de lunettes**, pour permettre au sac inspiratoire de se remplir de mélange frais).
 - Favoriser l'expiration par le nez et contrôler le volume des sacs par manipulation de la soupape de surpression.
 - Contrôle des paramètres de décompression
 - Largage parachute de palier (on ne vous repère pas aux bulles...)

Après la plongée :

- Contrôle des co-équipiers.
- Démontage de l'appareil.
- Vérification et rangement des sondes oxygène (sèches et sans poussière de chaux, dans un récipient fermé, pour éviter une saturation O₂ excessive).
- Rinçage et désinfection du tuyau annelé, de l'embout et des sacs.
- Séchage et rangement.
- Jeter la chaux dans une poubelle, ou conserver la cartouche fermée et à l'abri soleil / humidité pour la plongée suivante (dans les 24 heures).
- Consigner les paramètres de la plongée, le % SNC, ainsi que le nouveau vécu dans son carnet.

Points Clefs : (Contrôles recycleur)

- Toujours connaître le mélange que l'on respire !
- Est ce que le recycleur fonctionne ?
- Attention à la remontée !
- Sortie de Secours ?

4 b/ Exercices pratiques d'aisance

Lestage :

- L1 / Immersion en phoque, stab vide, par expiration nasale ou purge partielle du sac expiratoire (avec maîtrise de la respiration).
- L2 / Stabilisation par 20 mètres de fond ; effectuer plusieurs cycles respiratoires (sans appui au fond).
- L3 / Contrôle du niveau d'immersion par manipulation des purges.
- L4 / Maintien d'un palier de décompression entre 5 et 3 mètres.
- L5 / Capelage / Décapelage sur un fond.

Respiration :

- R1 / Manipulation embout buccal et purges.
- R2 / Rinçage du circuit.
- R3 / Respiration buccale uniquement en immersion avec effort modéré.
- R4 / Sur un fond de 6 mètres, déplacement sur les mains, en contrôlant le rythme respiratoire.
- R5 / Manipulation purge sac expiratoire.
- R6 / Contrôle expiratoire lors de remontée à vitesse contrôlée.
- R7 / Respiration sur By pass (en effort).
- R8 / Réaction à un abaissement de la PpO₂ en cas d'arrêt accidentel de l'injection.

Note : Concernant le rinçage, R2, la procédure donnée par la marine nationale (26) est la suivante :

1. Inspirer profondément dans l'appareil et expirer à l'extérieur (balayage poumons).
2. Inspirer profondément dans l'appareil et expirer dans l'appareil (balayage cartouche).
3. Inspirer profondément dans l'appareil et expirer à l'extérieur (balayage poumons), vérifier sur l'oxymètre la stabilité de la PpO₂ du système.

Déplacement

- D1 / Déplacement en pleine eau, ventral, dorsal, latéral, changement de position.
- D2 / Exercice de déplacement en surface.
- D3 / Mise à l'eau d'une embarcation (saut droit ou bascule).
- D4 / Exercice d'immersion longue avec distance à parcourir (i.e 30 minutes / 1000 mètres).

Sécurité :

- S1 / Contrôles de fonctionnement de son recycleur avec moniteur (Surface / Immersion).
- S2 / Lâcher et reprise d'embout, avec purge expiratoire
- S3 / Perte accidentelle et reprise d'embout.
- S4 / Passage sur système de Bail Out.
- S5 / Remontée contrôlée sur système de secours.
- S6 / Réaction à une chute de la PpO₂ inspiratoire.
- S7 / Réaction à une valeur trop élevée de la PpO₂ inspiratoire.
- S8 / Contrôles de fonctionnement des recycleurs (le sien et un autre) en autonomie.
- S9 / Calcul et respect de la procédure de décompression.

4 c/ Assistance et Sauvetage d'un plongeur au recycleur

Assistance d'un plongeur en difficulté (AS 1):

- Maîtrise du Niveau d'immersion, à l'aide des deux gilets si besoin. Faire cesser l'activité de l'assisté (se calmer et respirer).
- Analyse rapide du problème et des paramètres pression bouteille / PpO₂.
- Si besoin, suggérer et assister la fermeture de l'embout buccal du circuit fermé et le passage sur circuit ouvert (si pression suffisante). En cas de panne complète, passage sur détendeur de secours de l'assistant.
- Remontée assistée à vitesse contrôlée en prenant en compte les différents volumes (sacs, stab).
- Arrêt entre 5 et 3 mètres.
- Largage parachute surface.

Sauvetage d'un plongeur au recycleur (AS2):

- Maintien du niveau d'immersion.
- Mise en bouche de l'accidenté du détendeur circuit ouvert du Bail Out en le faisant fuser. Contrôle de la respiration. Toujours maintenir l'embout en bouche et effectuer la fermeture de l'embout buccal afin d'éviter l'inondation du circuit fermé (changement de flottabilité). Lors de toutes les phases du sauvetage, l'embout de secours doit être maintenu dans la bouche de l'accidenté.
- Contrôle paramètres du système de Bail Out, pression, nature du gaz.
- Remonter à vitesse contrôlée, en prenant en compte les différents volumes (sacs, stab).
- Faire surface, assurer la flottabilité de l'accidenté.
- Signaler l'accident à la sécurité surface.
- Tractage de surface.

5- ANALYSES D'EXPERIENCES

5 a/ Expériences de formations

5 b/ Propositions de Niveaux de pratique de la plongée au recycleur

5 a/ Expériences de formations

1- Découverte et Initiation au recycleur pour Plongeur confirmé

Niveau plongeurs N3, E2, E3 ou E4 (de la FFESSM)

Appareils Draeger Ray, Draeger Dolphin, Aqualung DC 55.

Fond maxi 15 mètres – Mélange Nitrox 50/50

Les machines sont préparées et vérifiées avant l'arrivée des plongeurs.

Briefing Type :

Introduction et questionnement :

- qui a déjà plongé au recycleur ?
- qui a déjà plongé avec un vêtement sec ? (rapport à l'utilisation des purges de sacs).

Présentation de la machine :

Recycleur fermé ou semi fermé, à débit continu ou à la demande. Un schéma type peut être utilisé de façon à présenter les éléments constitutifs (les faux poumons, la cartouche de chaux, l'embout avec position ouverte et fermée).

Explication du recyclage du mélange :

Démonstration de la circulation forcée du mélange à travers la machine.

Rôle de la chaux et donc intérêt à ne pas faire arriver d'eau dessus (on décrit très brièvement le goût potentiel de la soude caustique résultant du mélange eau et chaux).

Démonstration de l'utilisation de l'embout, avec position ouverte et fermée.

Respiration par la bouche.

Description du confort respiratoire et des très faibles résistances. Analogie avec la respiration sur le tuba, courte et tranquille, différente de celle sur détendeur. Explication de l'expiration par le nez, notamment lors de la remontée pour éviter l'effet « joues de hamster ». Il convient de bien insister que la respiration sur un recycleur se fait par la bouche de façon à ne pas perdre le gaz, et que c'est uniquement dans les phases de remontée que l'on laissera s'échapper le surplus de mélange par le nez.

Signes non conventionnels :

Signe de l'expiration nasal (index tendu tapotant le nez).

Signe embout ouvert/fermé (avec le poing).

On introduit le rinçage (peu utile sur mélange 50%) avec inspiration par la bouche et expiration par le nez, puis par la bouche, sur 2 cycles de façon à équilibrer le mélange pulmonaire avec le mélange bouteille.

Signe de purge (stab ou soupape de sac expiratoire) avec le plat de la main.

Lestage :

Ne pas sur-lester. Le plongeur doit annuler la flottabilité de sa combinaison. Le moniteur leste le recycleur si besoin suivant les modèles. Si le baptisé est déjà familier de l'utilisation d'un vêtement sec, il pourra lui même manipuler la purge du sac expiratoire pour modifier sa flottabilité.

Le moniteur prévoit un lest de 2 kg qui pourra être passé au baptisé dans la phase de descente et lors du retour vers 4 mètres, afin de prendre en compte les variations de volume. L'encadrant dans une première phase gèrera la flottabilité par l'utilisation de la purge du gilet et de celle du sac. Dans un

deuxième temps, on introduit le signe de purge du sac (la main à plat tapote l'épaule) afin que le plongeur puisse effectuer lui-même cette opération, notamment lors des phases de remontée.

Consignes au plongeur:

Consignes de sécurité type :

- Ne pas bloquer sa respiration.
- Valsalva ou équivalent.
- Ne jamais retirer son embout sous l'eau ou juste à la sortie de l'eau sans l'avoir préalablement fermé.
- Expirer quelques fois, par le nez lors de la remontée, afin d'éviter les joues de hamster, ou sur signe du moniteur.

Consignes d'immersion. :

- Descente lente pour éviter effet d'asphyxie (volume du sac inspiratoire pouvant diminuer lors d'une descente rapide)
- Pas d'utilisation du gilet (uniquement sur signe du moniteur pour éviter un problème de remontée rapide résultant de la variation simultanée des volumes des sacs et volume du gilet).

Description de la plongée.

Par sécurité, le moniteur dispose d'un circuit ouvert avec détendeur de secours.

Après capelage de l'appareil, l'élève met son embout en bouche et le moniteur ouvre simultanément la bouteille. L'élève effectue alors le rinçage de l'appareil.

Rappel des signes non conventionnels (expiration nez, embout, soupape).

Avant l'immersion, contrôle de la PpO₂ par l'élève et le moniteur sur appareil de mesure (Oxygauge ou Oxy 2) et de la pression bouteille.

Mise à l'eau à l'échelle ou sur un fond en pente douce, immersion lente par purge du gilet et/ou légère purge du sac expiratoire (tête en haut).

Sous la surface, on commence par un contrôle des fuites, et un petit temps d'adaptation respiratoire à 1 ou 2 mètres. On se laisse ensuite doucement glisser sur 6 – 7 mètres pour vérification du lestage et réglage du tarage des purges du sac expiratoire (si besoin).

Progressivement, on descend sur 10 – 15 mètres, profondeur à laquelle on effectue la majeure partie du baptême. C'est en effet dans cette zone que le système de débit massique constant devient le plus agréable car la PpO₂ est élevée (sur mélange Nitrox 50/50 on a environ 0.75 – 1 bars) et les variations de flottabilité sont faibles (débit volumique plus faible), ce qui diminue les pertes de gaz et permet à l'élève de vraiment profiter de la machine.

Le retour se fait tranquillement en remontant à vitesse lente, afin de bien contrôler les différents volumes. On fait régulièrement le signe de l'expiration par le nez pour éviter que l'élève ne ressente l'effet « joues de hamster ».

Dès le retour surface, on s'assure que l'embout est en position fermée, puis on ferme la bouteille.

C'est le moment d'exprimer les impressions ressenties !

Retour d'expériences:

Sur environ 80 baptêmes, nous n'avons rencontré aucun problème, mais toujours beaucoup d'enthousiasme : Le silence, la liberté de mouvement et même l'impression d'être un poisson !

Lors de cette première plongée, les consommations en gaz sont de l'ordre de deux fois la consommation théorique donnée par le constructeur du fait de nombreuses pertes de gaz dues à l'inexpérience, mais les différences par rapport à la plongée en circuit ouvert sont déjà notables. En moyenne sur un baptême de 30 minutes sur 15 mètres, un élève consomme ca. 400 litres de mélange, soit une consommation moyenne de 13 litres/ minutes (alors que le débit d'injection est de 7-8 litres par minutes), ce qui est environs 4 fois moins qu'en circuit ouvert.

Beaucoup souhaitent ensuite replonger et apprendre à monter le recycleur. Mais, seules 6 personnes (en 2003), soit moins de 10% franchissent le pas de l'achat d'une machine ou d'une formation complète après cette première expérience.

Les aspects logistiques (fabrication du mélange, achat de la chaux) et financiers (investissement de base et coût par plongée) bloquent encore les utilisateurs potentiels.

Points Clefs : (Baptême)

- Présentation succincte des appareils et du principe de recyclage du mélange.
- Explication de la respiration et de la manipulation de l'embout.
- Eviter le sur-lestage. Contrôle des purges par l'encadrant.
- Baptême entre 0 et 15 mètres.
- Taux de réussite du baptême 100%, mais taux d'achat ou poursuite de la pratique, moins de 10%.

Formation complémentaire : Plongeur recycleur autonome

Plusieurs personnes, soit en louant, soit ayant fait l'acquisition d'un recycleur se sont formées au sein de mon club. Le contenu de la formation proposée est le suivant :

ATTENTION !

En formation, par sécurité, le moniteur est en Recycleur SCR avec Bail Out séparé. L'utilisation d'un détendeur de secours sur le Bail Out est recommandée pour des plongées au delà de l'espace médian ou si l'élève n'est pas équipé d'un système de Bail out indépendant de sa réserve de gaz.

Niveau d'entrée : E3, N4 (FFESSM) avec Nitrox confirmé.

- Autonomie montage/démontage/entretien de leur recycleur.
- Gestion de la chaux.
- Préparation et vérification avant plongée (Chapitre 4-a).
- Exercices d'aisance (Chapitre 4 -b).
- Assistance (Chapitre 4-c).
- Immersion longue avec déplacement (ca 1 heure avec distance minimum de 2000 mètres).
- Au total, 8 à 15 heures minimum d'immersion.
- Calcul autonomie et PpO₂ – Mise en place du Bail Out en fonction de la plongée.
- Discussions et lectures.

Les plongées, exercices, temps d'immersion ainsi qu'une qualification finale étaient inscrits sur le carnet de plongées et contresignés par mes soins. Un carnet spécialement utilisé pour les plongées au recycleur était mis en place.

2 - Baptême de plongée : Première immersion en Recycleur

Découvrir la plongée, en commençant au recycleur ? Pourquoi pas ! J'ai eu l'occasion d'effectuer deux vrais baptêmes à l'aide d'un recycleur Ray. Le briefing se fait de manière très peu différente du briefing classique. Il faut insister sur la respiration tranquille et la prévention des barotraumatismes et passer de manière *très* rapide sur le matériel utilisé.

La mise à l'eau se fait sur un fond, descendant en pente douce sur 2-3 mètres.

Le recycleur bien sanglé et près du corps n'entraîne aucun déséquilibre ou inconfort chez le baptisé, qui se sent tout de suite à l'aise. La respiration douce et totalement silencieuse enlève tout le stress lié à la première immersion, au bruit du détendeur, à la résistance inspiratoire et au bruit des bulles. Le baptisé

peut donc tranquillement faire passer ses oreilles et découvrir le plaisir de respirer et de se déplacer sous l'eau. On compense un léger sur lestage par l'utilisation du gilet, qui comme pour un baptême classique, est géré uniquement par le moniteur.

L'utilisation d'un mélange riche en O₂ (50% ou plus) et de chaux neuve assurent un grand confort respiratoire et supprime les risques de type hypercapnie ou hypoxie.

Au total 100% de réussite et même si le nombre de baptêmes effectués ne permet pas de conclure, il demeure que le recycleur semble apporter un plus de confort par rapport à un scaphandre classique.

Points Clefs :

- Appareil très stable – Confort pour le baptisé.
- Aucun bruit, aucune bulle, potentiellement stressante.
- très grand confort respiratoire, pas de résistance inspiratoire.
- Accès très simple, voir naturel pour les ados.

3 - Initiation au Recycleur pour un groupe d'adolescents

Après plusieurs années de pratique de la plongée enfant et adolescent, je souhaitais voir quelle perception les ados pourraient avoir des recycleurs, et ce que l'utilisation de ces appareils pourrait apporter au plan pédagogique. Au passage, il était intéressant de revenir sur quelques données théoriques plutôt rébarbatives pour eux lors de la préparation du niveau 2, du type composition de l'air, pression partielle, ou le rôle de l'oxygène et de l'azote.

Nous avons donc effectué 2 séances de 4 heures avec un groupe de 12 ados entre 13 et 16 ans, tous titulaires du Niveau 1 (FFESSM). Chaque séance était constituée d'une intervention en salle, puis d'une partie plongée en piscine.

Equipements : 2 recycleurs Draeger Ray – Nitrox 50/50 .

Encadrement 2 moniteurs E3 Nitrox (et recycleur), une E2 Nitrox/recycleur.

Première Séance :

Partie Théorique :

Présentation du principe de recyclage d'un mélange. Rôle Oxygène et Azote. Notions de pressions partielles et de mélanges Nitrox.

Ensemble nous élaborons le schéma de principe d'un recycleur en essayant de trouver des réponses aux questions :

- Comment enlever le gaz carbonique ?
- Comment maintenir assez d'oxygène dans le circuit pour notre consommation ?
- Comment éviter que le gaz débarrassé du CO₂ se mélange avec le gaz expiré ?

On aboutit ensemble à un schéma de principe très complet d'un recycleur semi fermé.

A partir de ce travail on monte ensuite ensemble un des recycleurs et chaque ado est en mesure d'identifier le rôle des différents éléments par rapport à ce schéma de principe.

La chaux est rapidement surnommée "litière à chat". Pour des raisons de sécurité, la chaux n'est manipulée que par les encadrants.

Projection commentée d'un film de Christian Petron sur les conditions de tournage d'un film sur les baleines à bosses. Dans ce court métrage, Christian décrit les différents recycleurs (Oxygers et DC55) qui lui permettent d'approcher et de filmer les baleines jusqu'à 40 mètres de profondeur. On y retrouve la présentation de très bons schémas, les conditions d'utilisation de chaque appareil, ainsi qu'un comparatif sonore entre un circuit fermé, un circuit semi fermé et un circuit ouvert. L'ensemble est extrêmement pédagogique, entre-coupé de plans magnifiques sur les baleines. Bien sûr, l'impact est très fort au niveau des adolescents et vient renforcer le travail fait en groupe préalablement.

Durée 1h 30

Partie Pratique :

En piscine, le groupe est scindé en 2 sous groupes de 6 ou 7. Le premier sous groupe s'entraîne normalement en PMT, alors que le second rejoint les 3 moniteurs qui vont effectuer les baptêmes recycleurs.

Le briefing est fait ensemble, on insiste sur 3 points :

- Prévention des barotraumatismes.
- Respiration calme par la bouche et expiration par le nez limitée pour permettre le recyclage.
- Prévention des entrées d'eau par l'embout- rappel des positions ouverte/fermée.

Un moniteur reste au bord afin d'équiper les adolescents.

La durée de l'immersion est de l'ordre de 15 minutes pour chacun.

Entre chaque baptême, le tuyau annelé ainsi que les sacs respiratoires sont rincés avec une solution diluée de désinfectant (eau de Javel).

Tous les baptêmes s'effectuent sans problème et pour le plus grand plaisir des ados.

Durée 2h 30



Palanquée d'ados au recycleur ! (Photo J. Tongio)

Seconde séance

Partie Théorique :

Rappels de la première Séance.

- Pression Partielle O₂, profondeur max d'utilisation.
- Rôle de la chaux et réaction avec l'eau. Qu'est ce que la soude caustique et pourquoi il est impératif de ne pas avoir d'entrée d'eau !

Visionnage d'un film sur la protection des fonds et de la faune marine, contenant de très belles images tournées par des plongeurs en recycleur, puis présentation d'un petit film sur une raie manta, tourné en Mer Rouge en recycleur.

Durée 1h 30

Partie Pratique :

En piscine, de nouveau on scinde en sous groupes. Le briefing a pour objet les points de pratique suivants :

- Montage des machines,
- Evolution en palanquée,
- Aide à l'équipement entre adolescents,
- Maîtrise de la flottabilité,
- Evolution en tandem.

Les adolescents montent les machines sous la direction des moniteurs.

Ils évoluent ensuite par deux dans l'eau, le binôme suivant aide le précédant à se préparer. Les manœuvres de rinçage et de désinfection sont ensuite faites par leurs soins avant de passer les recycleurs au binôme suivant.

Durée 2h 30

Points Clefs :

- Très grande rapidité d'acquisition du montage et de l'utilisation.
- Le principe d'un recycleur apparaît très naturel et simple aux ados.
- Très forte adhésion au projet et envie de découverte de sensations nouvelles.
- Le Draeger Ray est très simple et se prête très bien à l'école recycleur.
- Le recycleur est un moyen ludique d'amener des notions complexes car il y a application directe. Les ados restent quand même assez réfractaires aux calculs de pressions partielles ou de profondeur max...
- Ces séances augmentent l'aisance des plongeurs, on le constate quand ils repassent en circuit ouvert.
- Ces séances de découverte intéressent autant filles que garçons, même si les projections personnelles sont différentes (nageurs ou nageuses de combat pour les uns, vidéastes ou... poisson pour les autres).
- Tous souhaiteraient ensuite utiliser les recycleurs en milieu naturel, pour pouvoir profiter pleinement de l'approche de la faune.
- Cette expérience confirme la facilité d'accès de la plongée au recycleur. Dans le cadre, d'une activité encadrée, une ouverture vers les niveaux I, ne semble poser aucun problème.

5 b/ Propositions de l'auteur de Niveaux de pratique de la plongée au recycleur

Ces expériences permettent de constater que la plongée au recycleur est facile d'accès et abordable très rapidement dans la progression du plongeur. Elles mettent aussi en évidence les différents niveaux de pratiques loisir possibles, en fonction du niveau et des attentes des personnes. Les propositions suivantes sont issues d'une réflexion sur l'enseignement et la pratique du recycleur. Elles vont aussi dans le sens de ce qui se fait au delà de nos frontières, mais ne doivent être prises que comme des chemins possibles dans le cadre de la démarche actuelle de la FFESSM. Ces propositions reprennent aussi une idée phare développée par Eric Bahuet dans son mémoire d'IN (27), celle de caler les formations recycleurs sur celles des gaz utilisés. Dans le cadre de la plongée loisir, il s'agit de mélange Nitrox, abordable des le Niveau I de plongeur FFESSM.

Ces propositions ne pourraient être applicables qu'à la suite d'une modification de l'arrêté de août 2000 quant au niveau minimum de pratique.

Initiation/Découverte

Dès le Niveau I, cette formation, non qualifiante aurait pour but de faire découvrir au plongeur, le plaisir de la plongée sans bulle, dans la zone 0 – 10 mètres. Une mention de cette formation, sous forme par exemple d'un autocollant à remplir (date, formateur) collé dans le carnet, ainsi qu'un certificat de baptême recycleur viendraient attester de cette expérience.

Temps d'immersion : minimum 30 minutes.

Plongeur Recycleur 1 – Semi Fermé (qualification par appareil ayant reçu la norme CE) (PR1)

Dès le Niveau I et l'obtention du diplôme Nitrox FFESSM, cette formation PR1 entre 0 et 20 mètres, permettrait au plongeur d'évoluer dans sa zone de prérogatives et dans la limite de profondeur de la plongée Nitrox 40% loisir (max 30 mètres) en compagnie d'un moniteur recycleur. La qualification serait obtenue pour l'appareil sur lequel la formation est effectuée. A l'issue de la formation, un carnet spécifique plongeur recycleur serait donné au plongeur faisant mention du nom et de la famille du recycleur. Un système de passerelle pourrait être envisagé pour une qualification sur un autre appareil de même famille. Temps d'immersion en formation: minimum 4 heures.

Plongeur Recycleur Autonome 2 – Semi-fermé ou circuit fermé (PR2)
(Qualification par appareil ayant reçu la norme CE)

Un plongeur titulaire au minimum du Niveau 2 (FFESSM), de la qualification Plongeur Recycleur 1 (PR 1), du RIFAP et du diplôme Nitrox Confirmé FFESSM, pourrait suivre la formation PR2. A l'issue de cette formation, il pourrait évoluer en autonomie dans sa zone de prérogative et dans la limite de profondeur de la plongée loisir au Nitrox (max 45- 50 mètres). La qualification PR2 serait notée dans le carnet spécifique du plongeur recycleur en faisant mention du nom et de la famille du recycleur sur lequel la formation a été effectuée. Un système de passerelles pourrait être envisagé pour une qualification sur un autre appareil de même famille ou d'un autre type (dans ce dernier cas, les heures d'immersion requises devraient être augmentées)

Temps d'immersion en formation PR2: minimum 6 heures.



Plongeurs Recycleur en Autonomie (Mer Rouge 2003 – Photo R. Jourdan)

Formateur /Encadrant

En ce qui concerne les formateurs, une double formation d'encadrant classique et de plongeur recycleur devrait être requise. Ici comme ailleurs, le diplôme ne fait pas la compétence. Il conviendrait donc de rajouter un nombre d'heures d'immersion minimum après le passage du PR2 (au moins 20 heures) afin que le futur formateur recycleur ait un vécu suffisant pour pouvoir identifier et motiver les phases clefs d'une progression recycleur, notamment en ce qui concerne les réactions aux situations d'urgence.

Ainsi on pourrait proposer :

E2 + PR2 + minimum 20 h d'immersion devient Encadrant Recycleur 1 (ER 1).

E3 + PR2 + minimum 20 h d'immersion devient Encadrant Recycleur 2 (ER 2).

E4 + PR2 + minimum 20 h d'immersion devient Encadrant Recycleur 3 (ER 3).

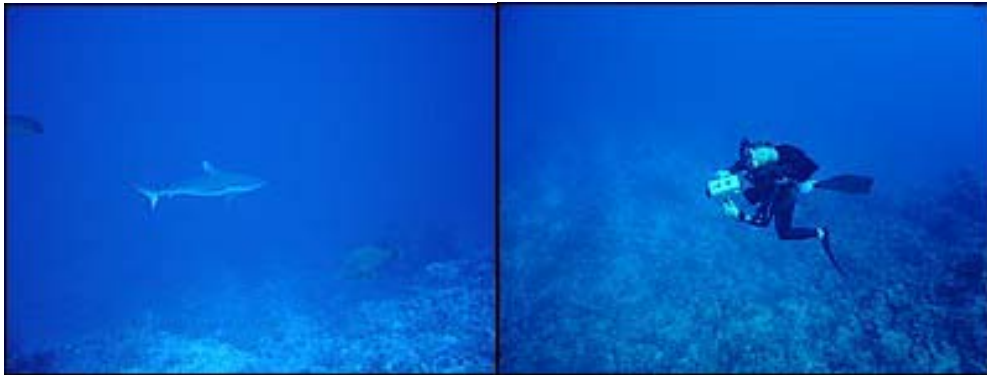
En fonction des différents niveaux proposés, on pourrait suggérer les normes d'évolution d'encadrement suivantes :

En Formation : Directeur de Plongée : ER2 Minimum

	Niveau Plongeur (Minimum)	Niveau Encadrant (Minimum)	Effectif de la palanque
Initiation Découverte 0 – 10 m	N1	ER1	ER1 + 1 élève
Formation Encadrée 0 - 20 m	N1 + Plongeur Nitrox	ER1	ER1+2 élèves
Formation Encadrée 0 - 40 m	N2 + Plongeur Nitrox Confirmé	ER2	ER2+2 élèves
Formation Encadrée 0 – 45 m	N3 + Plongeur Nitrox Confirmé + PR1	ER3	ER3+2 élèves

En Exploration : Directeur de Plongée ER2 Minimum

Pratique	Niveau Plongeur (Minimum)	Niveau Encadrant (Minimum)	Effectif de la palanquée
Baptême 0- 6 m	Tous Niveaux	ER1	ER1 + 1 plongeur
Explo Encadrée 0 – 20 m	PR1	ER1	ER1 + 2 plongeurs
Explo Encadrée 0 - 40 m	N2 + PR1	ER2	ER2 + 2 plongeurs
Autonomie 0-20m	N2 + PR2	Autonome	Max 3 plongeurs
Autonomie 0-45 m	N3 + PR2	Autonome	Max 3 plongeurs



*Rencontres ...
(Photos J. Tongio)*



6- PROPOSITIONS DE L'AUTEUR DE CONTENUS DE FORMATION

6 a/ Initiation/Découverte

6 b/ Plongeur Recycleur Semi-Fermé (PR1)

6 c/ Plongeur Recycleur Autonome Circuit Semi-Fermé/ Circuit Fermé(PR2)

6 a / Initiation / Découverte

Profil d'entrée : Etre titulaire du Niveau 1 de la FFESSM ou d'un brevet admis en équivalence

Age Minimum 14 ans.

Licencié FFESSM

Etre en possession d'un certificat médical de non contre indication à la pratique de la plongée subaquatique de moins d'un an, établi par un médecin fédéral ou titulaire du C.E.S médecine du sport, médecin hyperbare ou médecin de la plongée.

Le but de cette formation serait de démystifier le recycleur, il conviendrait donc de prévoir une séance de 3 à 4 heures dans laquelle on inclura les phases suivantes :

- Présentation du recycleur utilisé.
- Explication rapide du principe de recyclage du mélange.
- Présentation de documents (vidéos, ouvrages) mettant en évidence l'intérêt de la plongée au recycleur, notamment pour l'approche de la faune.
- Plongée de découverte d'une durée minimum de 30 minutes entre 0 -10 mètres. (En ce qui concerne la préparation de cette immersion et les consignes de sécurité, voir description au chapitre 5a).
- Puis un débriefing (comment poursuivre, quel équipement acheter etc.).

A l'issue de cette initiation, une mention serait apposée sur le carnet de plongée.

Un diplôme de baptême recycleur serait remis au participant.

6 b/ Plongeur Recycleur Semi-Fermé (PR1)

Profil d'entrée : Etre titulaire du Niveau 1 de la FFESSM ou d'un brevet admis en équivalence

Etre titulaire de la qualification de Plongeur Nitrox FFESSM ou d'un brevet admis en équivalence.

Age Minimum 18 ans.

Licencié FFESSM

Etre en possession d'un certificat médical de non contre indication à la pratique de la plongée subaquatique de moins d'un an, établi par un médecin fédéral ou titulaire du C.E.S médecine du sport, médecin hyperbare ou médecin de la plongée.

Profil de sortie : Plongeur encadré dans la zone des 0-20 mètres sur appareil de type SCR à la norme CE. Utilisation de mélange Nitrox 40/60. A l'issue de cette formation le plongeur recycleur recevrait une qualification faisant mention de l'appareil correspondant. Le PR1 avec ce même appareil est capable de :

- Contrôler et utiliser un mélange 40/60 (avec l'injecteur correspondant)
- Gérer son propre matériel (Montage / Démontage/ Rinçage).
- Savoir émettre et recevoir les signes spécifiques recycleur.
- Signaler rapidement un problème à son encadrant.
- Interpréter l'information donnée par son indicateur PpO₂
- Passer sur Bail Out, sans inonder son recycleur.
- Réagir à une inondation de son appareil.

Proposition de formation par compétences :

Cette proposition s'articule autour des 6 compétences de bases des cursus FFESSM.

En Italique, on retrouve les groupes de procédures et les exercices présentés dans le chapitre 4

Plongeur Recycleur (PR1)

Compétence 1a – Utiliser son matériel

Connaissances, savoir-faire et savoir- être	Commentaires et limites	Critères de réalisation
Connaître le principe de fonctionnement de son recycleur et en identifier les éléments clefs.	Comprendre ce qui assure la qualité du mélange inspiré et l'étanchéité du système.	L'élève doit être capable de montrer le parcours du mélange dans le recycleur et le système d'alimentation en gaz frais.
Vérification du mélange utilisé. Connaître son mélange	Utilisation d'un oxymètre et connaissance de la profondeur plancher.	Contrôle pratique et exercices dirigés.
Vérification Alimentation. Connaître son mélange	Connaissance des valeurs limites et savoir effectuer la mesure du débit gazeux.	L'élève effectue ce contrôle, avec son encadrant, avant chaque plongée.
Vérifier l'intégrité et la fonctionnalité de chaque élément. Est ce que le recycleur fonctionne ?	Associer chaque élément de son recycleur au test permettant de contrôler son fonctionnement.	Tests de sens de circulation. Test du débit gazeux. Test du détendeur de secours. Eléments de filtrage du CO ₂ .
Chargement de la chaux.	Connaître les limites d'utilisation de la chaux et les précautions de manipulation.	Pas de sur utilisation de la chaux. Contrôle des points clefs par oral.
Montage de son recycleur Est ce que le recycleur fonctionne ?	Capacité à détecter un problème de montage.	L'élève réalise seul son montage sous la surveillance de l'enseignant. S1
Vérifications au sec. Est ce que le recycleur fonctionne ?	Test de fuite en surpression et dépression et essais de respiration.	Lecture de la PpO ₂ , l'élève doit être capable de vérifier si la valeur est correcte. Exercices R1 et R2
Montage et vérification du Bail Out. Sortie de Secours ?	Pas de calcul du Bail Out.	L'encadrant s'assure que le système de Bail Out est adéquat pour la plongée. L'élève s'assure de son fonctionnement.
Démontage et rinçage.	Connaissance des procédures de désinfection, de rinçage et de stockage.	L'élève effectue ses manipulations sous la surveillance de l'enseignant.

Compétence 1b - Comportements et gestes techniques en Surface

Connaissances, savoir-faire et savoir- être	Commentaires et limites	Critères de réalisation
Stabilisation de la PpO ₂ par respiration et rinçage. Connaître son mélange.	Respirer calmement et effectuer un cycle de rinçage.	Contrôle de la valeur de PpO ₂ avec l'encadrant. Exercices R1 et R2
Mise à l'eau / immersion par saut droit ou bascule	Calme et efficace sans endommager le recycleur.	Exercices D3
Vérification sous la surface Est ce que le recycleur fonctionne ?	Contrôle respiration et fuites.	Evaluation autonome du fonctionnement de son recycleur et de celui de son compagnon de palanquée.

Plongeur Recycleur (PR1)

Compétence 2 - Immersions et retour en surface

<i>Connaissances, savoir-faire et savoir- être</i>	<i>Commentaires et limites</i>	<i>Critères de réalisation</i>
Immersion et lestage.	Immersion efficace en maintenant un volume mini de sacs.	Pas de sur lestage. Exercices L1 et L3 par fond de max 6 mètres.
Maîtrise du déplacement.	Pas de performances, mais bonne maîtrise du palmage.	Exercices D1, D2, R3 et R4.
Maîtrise de la remontée Connaître son mélange	Contrôle de l'expiration, des sacs et des gilets, vérification de la PpO ₂ . Connaître et éviter le phénomène de joues de hamster.	Maîtrise de la vitesse aux instruments et par repères visuelles- Arrêt entre 5 et 3 mètres. Connaissance des risques de chute de PpO ₂ .
Maintien d'un palier de décompression.	Respiration calme, purge des sacs si nécessaire. Contrôle de la PpO ₂ et rinçage du système.	Exercices L3 et L4, R5.

Compétence 3 – Maîtrise de la respiration

<i>Connaissances, savoir-faire et savoir- être</i>	<i>Commentaires et limites</i>	<i>Critères de réalisation</i>
Ventilation sur Recycleur.	Maîtrise des volumes de sac et de la respiration sur By pass.	Pas d'essoufflement en immersion. Exercices R3, R4, R5.
Lâcher et Reprise d'embout.	Deux techniques Embout ouvert et Embout fermé.	Pas d'entrée d'eau. Exercices S2, S3.
Vidage de Masque.	Maîtrise de la dissociation bucco nasale.	L'élève enlève lui même son masque. Le vidage doit être fait avec une utilisation minimale de gaz.

Compétence 4 – Réactions aux situations d'urgence

<i>Connaissances, savoir-faire et savoir- être</i>	<i>Commentaires et limites</i>	<i>Critères de réalisation</i>
Communication : - Gestes Techniques (expirer, purger). - Signaler un problème.	Signes classiques de plongée et signes non conventionnels (PpO ₂ anormale, inondation).	Encore à harmoniser entre écoles. Ces signes font parties du briefing.
Passage sur Bail Out et remontée à vitesse contrôlée Sortie de Secours ?	Le recycleur doit être isolé avant passage sur circuit ouvert. Contrôle de la vitesse par visuel et instruments.	Maîtrise Parfaite – Exécution rapide des gestes. Exercices S4, S5.
Réaction aux valeurs anormales de la PpO ₂ Connaître son mélange.	Connaissances des valeurs de PpO ₂ limites. Analyse de la lecture de l'oxymètre. Passage sur système de Bail Out si nécessaire.	Contrôle par oral suivant différents scénarios. Utilisation de plaquettes sous marines. Exercices S6, S7.
Réaction à une inondation Est ce que le recycleur fonctionne ?	Avertissement sonore et variation de la flottabilité doivent être connus.	Mise en situation par utilisation lest supplémentaire et passage sur Bail Out.

Plongeur Recycleur (PR1)

Compétence 5 – Evolution dans l'espace Médian

Pas d'exercices d'assistance au PR1. Le plongeur doit apprendre à maîtriser son recycleur et à être capable d'en évaluer en permanence le fonctionnement. Le nombre d'heures d'immersion contribue à ce phénomène de prise en main de son appareil.

Attention :

L'enseignement des compétences 1 à 5 devrait se faire :

- Pour les exercices de sécurité, sur un fond maximal de 6 mètres,
- Pour les exercices de lestages ou de remontée, sur un fond maximal de 15 mètres.

Compétence 6 – Connaissances Théoriques élémentaires

<i>Connaissances, savoir-faire et savoir- être</i>	<i>Commentaires et limites</i>	<i>Critères de réalisation</i>
Rappel connaissances théoriques Nitrox.	Contrôle du gaz, Profondeur Plancher et Profondeur Air Equivalente.	Evaluation par oral.
Principe et lecture de la jauge oxygène.	Analyse de la PpO2 en fonction de la profondeur et du rythme respiratoire.	Insister sur variation lors de la remontée. Contrôle par oral.
Prévention des Accidents : <ul style="list-style-type: none">- Hyperoxie- Hypoxie- Essoufflement- Cocktail de chaux- Risques infectieux	Identifier les causes et connaître la prévention.	Savoir relier les procédures de préparation et la prévention de chaque accident. Contrôle par oral.
La décompression.	Rappel des connaissances de base de la formation Nitrox	Notion de profondeur équivalente. Profil de plongée sans palier.
Calcul d'autonomie.	Connaissances des différents paramètres influant sur l'autonomie (gaz dispo, débit, capacité chaux, effort, profondeur).	Pas de calcul, mais une information sur l'autonomie théorique. Importance de la lecture du manomètre durant la plongée.
Prérogatives.	Plongée avec Nitrox40/60	Contrôle par oral.

6 c/ Plongeur Recycleur Autonome Semi-Fermé ou circuit Fermé (*) (PR2)

Profil d'entrée : Etre titulaire du Niveau 2 de la FFESSM ou d'un brevet admis en équivalence
Etre titulaire de la qualification de Plongeur Nitrox Confirmé FFESSM ou d'un brevet admis en équivalence.
Age Minimum 18 ans.
Licencié FFESSM
Etre titulaire de la qualification de Plongeur Recycleur (PR1).
Avoir effectué un minimum de 4 heures en immersion au recycleur après obtention du PR1, validées par un moniteur recycleur.
Etre en possession d'un certificat médical de non contre indication à la pratique de la plongée subaquatique de moins d'un an, établi par un médecin fédéral ou titulaire du C.E.S médecine du sport, médecin hyperbare ou médecin de la plongée.

(*) Le constructeur de Buddy Inspiration impose aux formateurs d'avoir reçu une formation dispensée par un instructeur habilité par AP Valves. (Début 2004, à peine une dizaine de personnes en France).

Profil de Sortie : Plongeur autonome dans la zone correspondante à ses prérogatives, sur appareil de type SCR ou MGCCR à la norme CE. Utilisation de tout mélange Nitrox dans une profondeur max de 50 mètres. A l'issue de cette formation le plongeur recycleur recevrait une qualification recycleur par appareil. Le PR2 avec ce même appareil est capable de :

- Gérer son propre matériel (Montage / Démontage / Contrôles / Rinçage / Désinfection).
- Vérifier l'équipement de son compagnon de plongée.
- Evoluer en autonomie en palanquée recycleurs ou mixte dans la limite de ses prérogatives de plongeur et du mélange Nitrox utilisé (N2 max 20 mètres, N3 max 45 mètres).
- Effectuer une remontée d'urgence en cas de mauvais fonctionnement de son appareil.
- Porter assistance à un compagnon.
- Planifier la plongée et l'équipement correspondant.

Proposition de formation par compétences :

Les compétences 1 à 4 sont celles acquises lors du PR1

Dans le cadre de sa formation PR2, le plongeur devrait effectuer au minimum 6 heures d'immersion. Cela lui permettra de renforcer son autonomie dans la gestion de son matériel, d'augmenter ses sensations par rapport au fonctionnement de son appareil et de se préparer à l'assistance d'un compagnon.

Rappel : La durée d'immersion est l'un des paramètres pédagogiques les plus importants pour l'apprentissage du recycleur. Le plongeur recycleur est quasiment en phase d'apprentissage permanent lors de ses 50 premières heures d'immersion. Richard Pyle (19) considérait, lui, que après plus de 100 heures on commençait à apprendre..

L'enseignement de la compétence 5 devrait se faire :

- *En phase d'acquisition dans la zone 15 à 6 mètres,*
- *En phase de perfectionnement dans la zone 20 à 5 mètres.*

Durant les phases d'immersion, en exploration, il conviendrait aussi de vérifier la technique et la condition physique du plongeur recycleur. Un exercice du type D4 (immersion longue avec déplacement et orientation) pourrait alors être un moyen d'évaluation intéressant.

Plongeur Recycleur Autonome (PR2)

Compétence 5: Assistance et Sauvetage

Connaissances, savoir-faire et savoir- être	Commentaires et limites	Critères de réalisation
Mise en place et utilisation du système de secours.	Capacité, emplacement, mélange utilisé, passage circuit fermé à circuit ouvert de secours.	Connaissance autonomie du Bail Out, positionnement cohérent, gestuelle précise et efficace.
Conduite de palanquée.	Gestion autonomie et profondeur max. Contrôles réguliers. Maîtrise de la décompression. Signalisation du retour surface.	Briefing Pré Plongée. Parfaite maîtrise de sa flottabilité et sens de l'observation. Evaluation par mise en situation.
Assistance d'un plongeur (d'une profondeur de 20 mètres).	Vérification rapide de la qualité du mélange- Passage sur système de secours si nécessaire. Gestion des différents volumes.	Qualité des contrôles. Maîtrise de la vitesse de remontée. Maintien du palier de sécurité. Signalisation par parachute. Exercice AS1.
Sauvetage d'un plongeur (d'une profondeur de 20 mètres).	Passage sur système de secours (ouvert). Gestion des différents volumes. Gestion des variations de flottabilité (inondation). Maintien de l'embout en bouche.	Réaction rapide et efficace. Système recycleur isolé et passage simultané de la victime sur embout de secours. Approche prudente de la surface (pas de bulles, qui signalent la palanquée !) Exercice AS2.
Sécurisation surface et retour au sec.	Maintien des voies aériennes hors de l'eau. Signal de détresse, tractage, deséquipement. Premier secours.	Délestage, maintien voies aériennes hors de l'eau, gestuelle efficace et rapide.
Mise en œuvre des premiers Secours	Spécifiques au recycleur. (hypoxie, empoisonnement, hypercapnie).	Mise en situation fictive.



Plongeur Recycleur Autonome (PR2)

Compétence 6 Connaissances théoriques

Connaissances, savoir-faire et savoir- être	Commentaires et limites	Critères de réalisation
Histoire et évolution des recycleurs.	Différentes utilisations et les choix techniques à travers quelques dates.	Evaluation par oral.
Principe de fonctionnement des SCR et MGCCR et de leur différents éléments constitutifs. Avantages et limites d'utilisation.	Reconnaître chaque élément sur un recycleur et savoir expliquer le principe de renouvellement du mélange.	Evaluation par oral.
Autonomie : <ul style="list-style-type: none"> - Choix du mélange et profondeur maximale. - Relation entre mélange disponible et système de recyclage. - Autonomie de la cartouche de chaux. - Calcul du Bail out 	En fonction de l'appareil utilisé, l'élève doit être capable de planifier une plongée, de connaître l'autonomie de son appareil et de préparer son Bail Out. Choix du gaz et autonomie.	Evaluation par écrit sur des cas réels de pratique.
Mélange Inspiré: <ul style="list-style-type: none"> - Calcul théorique de la PpO₂ Inspiratoire. - Profondeur limite - L'oxymètre - Saturation (oxygène et azote). 	Connaissance théorique et pratique de la nature du mélange inspiré, avec les préventions qui en résultent : <ul style="list-style-type: none"> - Profondeur Max. - Exposition O₂ (SNC). - Décompression. 	Evaluation par écrit sur des cas réels de pratique et en fonction du type d'appareil utilisé.
La décompression <ul style="list-style-type: none"> - Calcul de profondeur équivalente, utilisation des tables. - Les ordinateurs Nitrox. 	Utilisation de tables validées Air ou Nitrox. Connaissance des ordinateurs et de leur réglage pour utilisation recycleur.	Evaluation par écrit et par oral en fonction des choix matériels de l'élève.
Prévention et Traitement des accidents : <ul style="list-style-type: none"> - Hyperoxie - Hypoxie - Hypercapnie - Cocktail de chaux - Risques infectieux 	Maîtrise de la relation entre problème technique et/ou non respect d'une procédure et survenue d'un accident.	Evaluation par écrit et par oral en fonction du type d'appareil utilisé.
Prérogatives et réglementation.	Correspondant aux mélanges utilisés.	Contrôle par écrit.

7- QUEL AVENIR POUR LA PLONGEE LOISIR AU RECYCLEUR ?

7 a/ Un produit nouveau et des adaptations nécessaires.

7 b/ Le point de vue du constructeur, entretien avec Jean Luc Diainville (Aqualung)

7 c/ Et si on imaginait demain ?

7 a/ Un produit nouveau et des adaptations nécessaires.

Pour les structures commerciales, l'apparition des recycleurs de loisir permet d'offrir une nouvelle prestation, soit sous forme de découverte, soit sous forme de formation, et à court terme simplement d'offrir une nouvelle façon de plonger en exploration et de re-découvrir des sites connus. On peut aussi combiner divers aspects de la plongée comme la vidéo, la photo ou la biologie. Aujourd'hui, la plupart des structures professionnelles françaises déjà impliquées dans les recycleurs offrent des baptêmes découverte et de la formation à partir niveau III. Elles décernent la qualification ANMP et/ou celle d'une organisation étrangère, type TDI, NRC ou IANTD. Mais il y a encore peu d'offres de ces nouveaux produits, comme par exemple location de matériel avec formation rapide et exploration encadrée. Il est d'ailleurs intéressant de voir en Egypte la vitesse à laquelle se développent ces pratiques notamment dans les bases plus spécialement destinées aux touristes allemands (qui sont eux de vrais passionnés des recycleurs !).

En France, peu de structures se lancent dans le recycleur, parce que le cadre législatif est trop restrictif et qu'un public potentiel au minimum plongeur niveau III, ne justifie pas encore les investissements requis.

On peut penser que c'est la mise en place d'un cursus fédéral, la reconnaissance des formations existantes et surtout l'ouverture vers des plongeurs moins confirmés qui rendra ces produits vraiment attractifs, à la fois pour les clubs et pour les clients. Pour des destinations comme les Antilles, Tahiti ou même Merouville en Corse, c'est à mon sens un potentiel réel.

Au niveau des clubs associatifs, la pratique du recycleur risque de rester encore pour quelques temps le fait de passionnés, un peu comme pour le Nitrox, du fait des difficultés d'accès au gaz et des contraintes financières. Pourtant, c'est la demande qui fait l'offre, et les clubs trouveront les moyens de financer les investissements nécessaires par le biais des cotisations, mais aussi par le biais de la facturation de prestations spécifiques. On voit déjà ce phénomène avec le Nitrox et prochainement le Trimix. La clef pour le développement en club associatif, c'est de nouveau la possibilité de délivrer une formation fédérale qui soit reconnue par les autres structures, car à ce moment là, la demande sera importante. Quant à l'accès au gaz, on verra plus loin que des solutions sont possibles, notamment si on considère une plongée loisir au Nitrox 40/60.

L'auteur propose les adaptations suivantes:

- Modification de l'arrêté de 2000, pour une ouverture de la pratique dès le niveau I, comme suggéré dans ce mémoire.
- Mise en place d'un cursus fédéral, qui par le biais de la CMAS soit reconnu par les autres organisations et permette à nos plongeurs de parcourir le monde (et ses merveilles, surtout si on les approche de manière silencieuse...).
- Reconnaissance des formations existantes (peut-être pas toutes, mais IANTD, TDI, NRC, Rab et d'autres) sur la base de ce qui se fait en Grande Bretagne par exemple.
- Mise en place de cadres fédéraux et d'outils pédagogiques spécifiques (vidéos, planches).

En offrant ces formations et en proposant des plongées peu profondes à la découverte de la faune, on peut espérer que la perception des recycleurs évoluera, et que ces machines ne seront plus considérées comme réservées à des plongées extrêmes mais bien comme des équipements sûrs et performants accessibles à tous.

7 b/ Le point de vue du constructeur, entretien avec Jean Luc Diainville (Aqualung)

On retrouve en Annexe II, un entretien avec Jean Luc Diainville, directeur général de Aqualung France, réalisé lors du Salon de la plongée de février 2004, à Paris.

En 2000, la société Aqualung reprend la distribution des recycleurs de plongée loisir de Draeger, le Ray et le Dolphin. Pour une société qui a une telle expérience dans le domaine des recycleurs militaires cela pouvait sembler curieux. Lors de cet entretien, M. Diainville, nous explique le processus qui a amené à cette décision et nous précise sa vision de l'utilisation des recycleurs en plongée loisir.

Les points clefs de cet entretien sont les suivants :

- Draeger n'ayant pas réussi à se positionner sur le marché de la plongée loisir, cette coopération permettait de bénéficier de l'excellente image et de la position de Aqualung, afin de présenter deux recycleurs spécialement conçus pour le plongeur sportif.
- Pour Aqualung, c'était aussi un développement intéressant car cela leur a permis d'entamer une réflexion sur les recycleurs pour le plongeur sportif, alors qu'ils fournissent depuis de nombreuses années le secteur militaire. Après 3 ans, le bilan est très mitigé, du fait des limitations du marché (absence de formation, peu de structures), mais aussi d'une certaine défaillance du support technique de la part de Draeger.
- Jean Luc Diainville développe aussi de nombreux points de sécurité. Il souligne les limites des appareils à PpO₂ constante, trop dépendants d'une électronique embarquée dont la fiabilité est encore très aléatoire. Il évoque le risque de la confusion des genres pour les formateurs ou pour les utilisateurs s'improvisant concepteur d'appareils, ainsi que l'intérêt de limiter les manipulations de gaz surox et de bien différencier les équipements afin d'éviter des erreurs pouvant être mortelles. Enfin il souligne la nécessité de formation permettant à l'utilisateur de connaître et de ne pas enfreindre les limites de son appareil.
- Mais, chez Aqualung, on reste convaincu qu'il y a un vrai futur pour la plongée loisir au recycleur, surtout si le cadre législatif ainsi que la création de nouveaux cursus de formation permettent l'ouverture de cette pratique très tôt dans la carrière du plongeur. Jean Luc Diainville fait le parallèle avec le ski et le surf, ou le surf, pratique nouvelle de la glisse, peut être abordé sans même jamais avoir appris à skier.
- Pour le moment, le marché n'est pas à la hauteur des plans marketing des fabricants. Son développement se fera par un travail en commun des différents acteurs de la plongée, chacun apportant la spécificité de sa fonction. Pour Aqualung, la stratégie n'est pas d'avoir des formateurs/vendeurs mais de se positionner en tant que expert et fabricant, et de développer un modèle de recycleur qui réponde aux attentes ou problèmes des clubs, notamment par rapport à la manipulation de la chaux et aux mélanges de gaz et à la solidité des appareils.
- Il y a en ce moment chez Aqualung et l'Air Liquide une réflexion sur la commercialisation d'un gaz Nitrox 40/60 préfabriqué et sur le développement d'un nouveau recycleur, simple et robuste.
- Ainsi, selon Jean Luc Diainville, même s'il y aura toujours des plongeurs en circuit ouvert à l'air, les recycleurs ont un très bel avenir !

Il est intéressant de constater que les points de vue de Jean Luc Diainville rejoignent souvent ceux développés dans ce rapport et cela met à mon sens en évidence la validité du concept de l'utilisation des recycleurs en plongée loisir. L'idée étant non pas d'amener le plus grand nombre à une pratique dangereuse pour agrandir le marché de la plongée loisir, mais bien d'offrir des appareils sécurisés ainsi que des formations spécifiques afin que tout plongeur puisse s'initier au plaisir de la plongée sans bulle dans les limites de l'espace médian, voir plus tard de l'espace lointain.

7 c/ Et si on imaginait demain ?

D'un point de vue technique, de nouvelles technologies apparaissent qui permettront de faciliter encore plus la pratique du recycleur.

- Déjà plusieurs sociétés américaines, comme Nuwair ci contre, proposent des compresseurs à membrane NITROX 32, 36 et 40 % à 300 bars (par réglage automatique). Ce système a pour avantage de fabriquer du Nitrox jusqu'au 40/60 à partir de l'air ambiant par une technologie de membrane semi-perméable à l'oxygène. Plus de bouteille d'O₂ à manipuler, plus de risques de gonflage aux pressions partielles, c'est le futur du Nitrox et du recycleur, en ce qui concerne la fabrication des mélanges.



- Bouteilles 6 litres en fibres de Carbone, 300 bars. Présentées lors du salon de Düsseldorf en novembre 2003, ces bouteilles ne s'oxydent pratiquement pas, ce qui est un avantage énorme lorsque l'on plonge avec du Nitrox 32% ou plus (les clubs à Tahiti ou en Mer Rouge n'utilisent plus que des blocs alu pour le Nitrox tant les blocs acier se corrodent rapidement). De plus une pression d'utilisation de 300 bars permet d'augmenter encore l'autonomie des recycleurs. (Ici montées sur un Inspiration).

- Système à ozone pour désinfection de l'appareil : là, encore c'est techniquement possible, et l'on peut concevoir un système de création d'ozone (par courant électrique) qui vienne se brancher sur le recycleur et en assurer rapidement sa désinfection.
- Enfin les recycleurs eux-mêmes continueront à se développer. Des modèles hybrides combineront une gestion mécanique du renouvellement du mélange respirable en parallèle à une mesure électronique permanente du mélange inspiré accouplé au système de décompression.

CONCLUSION : LES RECYCLEURS EN PLONGEE LOISIR, UTOPIE OU REALITE ?

Dans ce mémoire, de nombreux aspects de cette pratique nouvelle ont été évoqués. Cela a permis de mettre en évidence quelques éléments de réponse à cette question:

- Des recycleurs simples et adaptés à la pratique loisir entre 0 et 45 mètres existent et offrent des performances tout à fait intéressantes.
- Les premières machines complètes sont abordables pour un budget de l'ordre de 2500 Euros.
- Les consommables comme le gaz et la chaux deviennent de plus en plus accessibles dans les magasins et les centres de plongée. Les coûts ont déjà diminué et continueront à le faire quand le nombre de pratiquants augmentera.
- Le plongeur bénéficie d'une autonomie augmentée par rapport à la plongée en circuit ouvert, des avantages de la plongée Nitrox au niveau de la décompression et de la possibilité d'approcher la faune de manière silencieuse.
- L'apprentissage de la plongée au recycleur est très spécifique et un plongeur peut très rapidement, même après le passage du niveau I FFESSM s'orienter vers ce type de pratique.
- Une analyse des dangers potentiels permet de rapidement mettre en évidence l'importance du respect des procédures et de la compréhension des phénomènes physiques de la plongée. L'utilisation d'un recycleur pourrait se révéler dangereuse pour le plongeur inexpérimenté ou trop sûr de lui-même. La sécurité, la prévention, le plaisir mais surtout l'avenir de cette pratique passent par des formations pratiques et théoriques adaptées. La plongée au recycleur n'est pas plus ou moins dangereuse que la plongée à l'air, mais tout comme elle, elle a ses règles et ses limites que le plongeur ne doit pas enfreindre. Il convient donc de mettre en place au plus vite des cursus de formation adaptés.
- Une pédagogie axée sur la pratique et l'évolution progressive vers l'autonomie peut être mise en place. Connaître son mélange respiratoire, savoir en permanence si son recycleur fonctionne et être capable de remonter ou d'assister un autre plongeur en cas de problème sont les éléments essentiels que l'on doit retrouver dans tout cursus de formation.
- Dans la pratique, on constate que l'acquisition de l'utilisation d'un recycleur est très rapide, et il revient ensuite au formateur de consacrer plus de temps à l'enseignement des réactions aux situations d'urgence de façon à ce que le plongeur recycleur soit capable de gérer de manière autonome son équipement ainsi que sa sécurité.
- Ces cursus de formation existent déjà chez nos voisins Allemands ou Outre Atlantique. En France, ils sont en train de se mettre en place, et contribueront à la poursuite du développement de la plongée loisir au recycleur.
- L'offre loisir est elle aussi en pleine expansion et de nombreuses structures commerciales s'équipent de recycleur voire se créent autour de ce thème afin d'offrir initiation, formation et explorations à un public qui devrait très rapidement ne plus être limité aux seuls plongeurs de Niveau III.

La plongée loisir au recycleur est donc bien une réalité. L'intérêt du public, les demandes de formation, les images dans la presse ou dans des films, le nombre d'appareils vendus le confirment. Tout cela est en augmentation constante aujourd'hui et reflète bien cette nouvelle évolution de notre pratique. Il en va de même de notre cadre réglementaire, car l'arrêté de août 2000 sera très prochainement modifié ou remplacé.

La plongée au recycleur ne remplacera pas la plongée à l'air en circuit ouvert, mais elle est en train de trouver sa place dans notre environnement car au delà de l'aspect ludique, elle permet au plongeur d'apprécier plus encore les merveilles du monde sous marins.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Jeffrey E. Bozanic , *Mastering Rebreathers* , Best Publishing Company 2002.
2. Daniel David, *Pierre Aimable de St Simon Sicard, l'inventeur du premier recycleur*, Subaqua n°176, Mai 2001.
3. Claude Riffaud, *La grande aventure des hommes sous la mer*, Albin Michel 1988.
4. Martyn Farr, *The strongman, the rebreather and the tunnel*, Diver Septembre 1999.
5. Mark Dorfman, *A chronology of the recreational diving industry*, publié sur www.southwestdiver.com/historyscuba.html, 2002.
6. M. Valeri, History of rebreather in USSR, publié sur <http://mitglied.lycos.de/dg8fz/rebreather/Valeri/history.htm>, 2002.
7. Olivier Isler, *L'avenir des recycleurs*, Article présenté au congrès international de plongée souterraine à Dijon en Avril 2000, publié sur <http://hippoconsulting.free.fr/ahr/histoire/evolution.htm>
8. Draeger Company, Lubeck Germany, *Historical ways of air supply / Hermann Stelzner*, publié sur www.divingheritage.com 2001.
9. Henri Paole, *Histoire des recycleurs*, Bulletin de l'AHR, publié sur <http://www.ahr-france.com>; 1999.
10. Valérie Macon, Paul Poivert, Jan Oldenhuizing, *Dossier recycleurs*, Octopus n° 21, août 1999.
11. Draeger, *Draeger ray, Instruction for Use*, 90 21 365- GA 2215.000, Second Edition août 1999.
12. Draeger, *Oxygauge, Instruction for Use*, 90 21 373 – GA 2215.100, Second Edition Octobre 1999.
13. OPS, *Manuel d'utilisation et d'entretien du DC 55*, Operational Professional Systems , 1990.
14. Dietmar Luchtenberg, *Rebreather tauchen*, Meyer& Meyer Verlag , Aachen 2000.
15. IANTD, Standards et Procedures, introduction and Sport Diver Programs, Juin 2001, publié sur www.iantd.com, 2001.
16. Jean Pierre Imbert, *Plongeur Recycleur, Manuel et Support de cours IANTD*, Divetech, 2000.
17. Roland Knebel, Volkmar Goeldner , Dirk Goeldner, *NRC User manual for Draeger Ray and Dolphin Version 1.1*, NRC Germany, 2000.
18. Sylvain Lespargot, *Les recycleurs, une école de rigueur*, Subaqua n° 171, Septembre 2000.

19. Richard Pyles, *A learner's guide to closed circuit rebreather operations*, Proceeding of rebreather Forum, 26-28 Septembre 1996, Redondo beach, california USA, publié sur www.metacut.com/rebreathers/RichPyleArticle_1.htm, 1996.
20. Jean Pierre Montagnon, *Le tour des recycleurs*, Subaqua n° 190, Septembre 2003.
21. Henri Paole et François Olivier Corman, *Principe général des recycleurs aux mélanges*, AHR info n° 13, Octobre 2003.
22. Dick Rutkowski, *Nitrox manual*, Hyperbarics International, Inc, 1994.
23. Docteurs J-E Blatteau, J-M Guigues, F-X Remy, M. Hugon, F-M Galland, C. Robinet, *Plongées aux recycleurs ; l'expérience de la Marine Nationale*, Octopus n° 43, Juin 2003.
24. Docteurs André Grousset, François Galland, *La décontamination du matériel de plongée est-elle une nécessité ?* Quatrième Journée Toulonnaise de Médecine de la Plongée, Novembre 2000.
25. R.G. Brereton, *US Navy Seal, Combat manual*, 0502-LP-190-0650 US Navy, Lancer 1974
26. Marine nationale, *Instruction sur la Plongée autonome, Tome III Plongée à l'oxygène et aux mélanges*, Marine Nationale, 1990.
27. Eric Bahuet, *Avec ou sans Bulle ?* Mémoire Instructeur National FFESSM, Octobre 2003.
28. Joerg Hess, CO2 Absorption in Rebreather Diving, Technik@FST-eV.com, publié sur www.IART.de, 2001.
29. Henri Paole (Président AHR Europe), Communication personnelle, Avril 2004.
30. Blaise Henry (Manager Biocide Dow Europe), Communication personnelle, Mai 2004.
31. Jean Louis Blanchard et Jean Yves Kersalé, Manuel de plongée au Nitrox, CTN de la FFESSM, Février 1996.
32. Docteur Bernard Schittly, Communication personnelle, Mai 2004.

ANNEXES

Annexe I : Calcul du Pourcentage O₂ dans le mélange inspiré pour un SCR.

Annexe II : Quel *futur pour la plongée loisir au recycleur* ? Entretien avec Jean Luc Diainville, directeur général de Aqualung France, Paris Février 2004.

Annexe III : Fraction d'oxygène dans le mélange inspiré pour un recycleur SCR-RMV type DC 55.

ANNEXE II : **QUEL FUTUR POUR LA PLONGEE LOISIR AU RECYCLEUR ?**
INTERVIEW PAR L'AUTEUR DE M. JEAN LUC DIANVILLE (DIRECTEUR AQUALUNG
FRANCE)

Salon de la plongée – Paris (Porte de Versailles) 6 Février 2004
(Publication avec l'aimable autorisation de M. Diainville)

Bonjour M. Jean Luc Diainville, pouvez vous d'abord rappeler votre position exacte au sein de la société Aqualung ?

Je suis directeur général de la société Aqualung France depuis septembre 2001;
Aqualung s'inscrit dans un groupe international de PME où il y a 12 compagnies dont 4 fabriquent du matériel et le distribuent et 8 autres qui ne font que de la distribution.
Au sein du groupe Aqualung, Aqualung France est le pôle d'expertise pour la maîtrise des flux respiratoires hyperbares. Ceci inclut le design et la fabrication de détendeurs et de recycleurs. Ces derniers sont à priori à usage militaire aujourd'hui et peuvent être à usages sportif et civil demain.
J'ai rejoint le groupe Aqualung en 2000 après avoir passé 21 ans dans la Marine Nationale. A l'exception de deux ou trois années, ma carrière dans la marine fut consacrée à la plongée et aux interventions sous la mer. J'ai une formation de plongeur démineur, ce qui me destinait à utiliser les appareils à recyclage de gaz. En effet, c'est la plongée militaire et le souci de silence et d'autonomie, d'amagnétisme qui ont amené tout naturellement de passer du détendeur à la demande avec la technologie traditionnelle du métal, forgé à l'époque, au monde silencieux des appareils à recyclage de gaz. Au départ ces appareils furent développés par la société Fenzy des années 1950 – 1955

Depuis combien de temps est impliqué Aqualung dans la plongée?

Un petit historique de la société d'abord. C'est important et c'est assez amusant ! La raison sociale juridique d'Aqualung est toujours la Spirotechnique, société créée en 1947 par Air Liquide dont nous sommes toujours à 100 % filiale.

Pourquoi la Spirotechnique est créée en 1947 ?? Pour industrialiser et commercialiser le premier détendeur à la demande, fabriqué par Cousteau et Gagnan dont le brevet a été déposé sous le nom « Aqualung » en 1943.

De 1947 à 1999, le groupe Aqualung International/Air Liquide rachète également plusieurs compagnies spécialistes de matériel de plongée, incluant US Divers, Technisub, Sea Quest, et Apeks. Aqualung France est le concepteur et le fabricant des appareils respiratoires sous pression, c'est donc la Spirotechnique qui existe depuis 1947.

Et au niveau des recycleurs ?

On a pris l'héritage de Fenzy, Fenzy avait un département terrestre et sous-marin et à ce moment là aux alentours de 1975, lorsque Fenzy a cédé son affaire en partie à Bacou qui a pris en charge les appareils terrestres, et à la Spirotechnique qui a repris les compétences de Fenzy en termes d'appareils sous-marins. Fenzy avait une très bonne connaissance en matière de flux hyperbares. J'ai été dans la marine de 1979 à 2000, et j'ai toujours connu la Spirotechnique comme étant le fournisseur et l'expert de la marine pour les appareils à recyclage de gaz militaires.

Il y a près de trois ans Aqualung passe un accord avec la société Draeger pour distribuer deux recycleurs conçus par Draeger Allemagne, pouvez vous préciser comment cela s'est fait et surtout après trois ans, quel regard vous portez sur cet accord ?

Il faut tout d'abord rappeler quelque chose, Aqualung est la seule compagnie fabricant du matériel de plongée à la fois pour le secteur sportif et militaire. Nos concurrents dans le secteur de la plongée sportive ne sont pas les mêmes que dans la plongée militaire ! Scubapro, Mares, Cressi et Beuchat dans

la plongée sportive ; Draeger, Fullerton, Divex dans la plongée militaire. Aucun de nos compétiteurs n'a une activité commune plongée sportive et militaire.

C'est important ! Parce que si Draeger est venu nous voir pour nous proposer la distribution de leurs produits de loisir, c'est parce qu'ils ont échoué dans la distribution de leurs appareils à recyclage de gaz, le Dolphin et le Ray et avec leur gamme de plongée sportive de manière générale !

Chacun de ces deux marchés demande une approche différente et pour cette raison nos compétiteurs ne semblent pas pressés d'avoir une compétence dans les deux domaines

Draeger a passé beaucoup de temps et d'énergie à convaincre le public de la plongée sportive, qu'ils étaient non pas des fournisseurs d'appareils pour la sécurité civile ou pour le milieu médical mais de véritables fabricants et distributeurs de matériel sportif. Ils ont donc dépensé beaucoup d'argent... et bu le bouillon ! Pourquoi ?? Parce que le marché de la plongée recycleur sportif est une niche ! C'est un tout petit marché ! Et donc la rentabilité n'était pas au rendez-vous de leurs efforts de communication, de marketing et de vente !

Alors ils sont venus nous voir ! Nous avons en fait deux solutions possibles : considérer qu'il fallait être un compétiteur de Draeger dans ce petit domaine ou bien passer un accord de partenariat avec eux et partager la niche à deux, ou un peu plus en comptant les quelques autres fabricants de matériel électronique comme AP Valves avec le Buddy Inspiration. La solution la plus sage était de dire, écoutez faisons une route ensemble, nous avons la connaissance de la distribution du marché sportif et vous avez la connaissance de la fabrication de recycleurs pour les sportifs.

Nous avons aussi cette connaissance, mais à l'époque nous n'avions pas encore voulu explorer cette ouverture des recycleurs vers la plongée sportive par manque de rentabilité de ce marché et par manque d'intérêt. C'était tout un débat que nous n'avions pas encore eu en interne. Donc OUI alors à la distribution Draeger parce que pour attaquer ce petit marché, nous étions confortables à l'idée de partager nos deux compétences et de faire un petit bout de chemin ensemble.

Maintenant quel regard je porte après deux ans de distribution ?? Très mitigé ! Assez déçu même ! Déçu sur un point auquel je m'attendais, c'est à dire la formation.

Le Ray, pour le moment est un échec commercial car le public, qui aujourd'hui, regarde avec un certain intérêt le recycleur n'a qu'une idée en tête, c'est de faire plus de 40 mètres avec ! Et il y a encore très peu de gens qui se sentent concernés par le recycleur sportif loisir pour une raison d'image, de mauvaise communication autour de cette discipline et surtout d'absence de formation en dessous d'un niveau 3. Donc, c'est clair qu'aujourd'hui, il n'y a rien qui permette de mettre en avant la démocratisation de l'utilisation des recycleurs. Regard mitigé de ce point de vue là, mitigé aussi parce que Draeger n'a pas été capable de résoudre un problème technique d'indisponibilité des capteurs à oxygène. L'arrêt de août 2000 demande à avoir un analyseur d'oxygène sur tous les recycleurs, or celui de Draeger a failli. L'oxygauge n'était pas fiable et ils n'ont pas su le remplacer. Clairement on ne s'attendait pas à cet échec car Draeger a quand même une large compétence dans le matériel de mesure d'oxygène. Et ça, ça nous a énormément pénalisés dans la distribution du marché. Enfin, troisième point, c'est l'autorisation de vendre librement ce produit à l'export. Ce n'est pas si simple que ça, parce que c'est un bien considéré par le gouvernement comme un « bien à double usage », qui nécessite que vous soumettiez votre vente pour l'Italie, pour Taiwan, pour Hong Kong ou pour la Russie, à un contrôle non pas seulement douanier mais industriel voire du secteur de la défense. C'est une procédure très longue à obtenir qui peut dépasser plus de quatre mois. Le secteur sportif n'est pas prêt à accepter des délais de livraison si longs, dûs uniquement à des procédures administratives. On peut comprendre la crainte que peuvent susciter ces appareils en termes de discrétion et d'utilisation à des fins terroristes, mais ça ne résiste pas à l'analyse ! Je m'emploie d'ailleurs à faire cette analyse régulièrement avec les acteurs des commissions d'exportation de ces matériels mais comme ils changent souvent, c'est une tâche difficile et cela reste un frein à la vente.

Voilà les trois freins, aujourd'hui, à la libération de l'utilisation du recycleur, le principal obstacle étant celui de l'absence de formation !

[A votre avis, la plongée loisir au recycleur dans la zone 0 – 40 mètres, utilisant des mélanges Nitrox va-t-elle rester une niche ou y a t il des moyens, et vous avez déjà évoqué la formation, pour la développer ?](#)

Je reste persuadé que si demain, les centres de plongée reçoivent l'autorisation de former des plongeurs au recycleur n'ayant peut-être même jamais plongé auparavant, il y aura véritablement une ouverture du marché. J'aime faire la comparaison avec le ski et le surf. Aujourd'hui si on se lance dans le surf, il vaut mieux ne jamais avoir appris à faire du ski, et cette comparaison je l'applique volontiers entre la plongée à circuit ouvert et la plongée au recycleur. Alors, l'ouverture vers les débutant est un premier objectif, d'autant plus si les fabricants sont capables de proposer des appareils encore plus simples que ceux qui existent à l'heure actuelle sur le marché. Je ne vais pas vous dire comment parce qu'on étudie actuellement la question...

[Auriez dans vos cartons un projet de sortie d'un appareil Aqualung destiné à la plongée loisir 0 – 40 mètres?](#)

Bien entendu Aqualung a largement la capacité à mener à bien ce projet avec notre important background dans la plongée militaire, nous sommes techniquement très au point dans ce domaine. Il est clair que si nous lançons un produit il devra être « keep it simple » mais pour moi surtout « simple safe and robust » ! De la robustesse, car on veut quelque chose qui ne pose pas de problème et qui soit véritablement adapté au débutant au sein d'un centre ou d'un club, c'est à dire à quelqu'un qui par définition ne prend pas forcément bien soin de son matériel. Il faut aussi qu'il soit très simple. Aujourd'hui, pour moi, l'appareil idéal n'existe pas sur le marché donc il faut le développer, et comment le développer ? En collaboration avec Draeger ou tout seul, on a des positions très souples sur le sujet. Ils souhaiteraient être associés, on a pour l'instant dans le domaine sportif un excellent partenariat avec eux, on regrette l'histoire de l'analyseur d'oxygène mais à part ça on a une très bonne relation donc, oui, le sujet est ouvert. Alors je ne peux vous dire comment il sera traité parce qu'on a pas encore établi un plan d'action, on attend surtout de savoir quel sera le résultat des négociations aujourd'hui en cours, je crois, en interne de la Fédération Française pour la libéralisation de l'enseignement.

[Passons maintenant aux aspects formation. Aujourd'hui pour les recycleurs que vous distribuez dans votre réseau de vente, avez vous mis en place des centres écoles et est-ce que ça fait partie de votre stratégie marketing ? Ou restez vous au niveau de la distribution et de la vente ?](#)

Tout d'abord, la formation n'est pas notre métier ! Personnellement, je suis assez irrité de voir dans le milieu de la plongée tous ces gens qui veulent être compétents dans tous les domaines, qui prétendent avoir, aussi bien dans le domaine de la fabrication que dans le domaine de la formation, une compétence universelle. NON, Aqualung ne fait pas et ne fera pas de formations. Bien sûr on peut recommander de se retourner vers des organismes de formation qui sont compétents dans le domaine et qui proposent un certain nombre de cursus qui allient à la fois l'ouverture, la découverte, l'initiation, l'accès aux débutants et la sécurité. Je n'ai pas de recette miracle, mais avec pourtant mon background de plongeur militaire qui m'encouragerait à être très sécurisant, à avoir une approche très exigeante, très rugueuse, de l'enseignement de la plongée, je pense qu'il y a une approche possible en réalisant un parfait compromis entre la réalité des loisirs d'aujourd'hui, l'accès à de nouvelles technologies comme celles des recycleurs en sécurité et la plongée de loisir. Il y a très certainement des moyens très simples de plonger au recycleur et il faut savoir démystifier cette plongée, notamment de son aspect militaire et dangereux, car, pour le militaire, le danger, ce n'est pas la plongée au recycleur, c'est la mission en elle-même qui est dangereuse !

[Aujourd'hui en France, l'arrêté d'août 2000 limite cette pratique au niveau 3. En ce qui concerne le baptême et la découverte il n'y a pas de précision. La fédération est en train de réfléchir sur un cursus et il y a des projets qui devraient se réaliser. A votre avis quel devrait être le rôle d'une fédération à la fois dans le développement de cursus de formation et au niveau des modifications possibles de cet arrêté ?](#)

Ce que j'attends des organismes de formation, c'est qu'ils prennent une bonne dimension technique de la pratique. C'est déjà en cours, il y a des experts dans ce domaine au sein de la fédération, au sein de PADI aussi je crois, je ne suis donc pas inquiet pour la compétence technique nécessaire à tout encadrant. Ensuite, c'est d'engager le processus de formation qui rend cette technique des recycleurs accessible à tout le monde. Après, les démarches pédagogiques nécessaires à concilier les loisirs, l'aspect technique et la sécurité, je ne suis pas suffisamment expert pour en juger.

Je pense, pour avoir subi une formation complète dans le domaine du recycleur, que les recycleurs aujourd'hui sont accessibles aux débutants si tant est qu'il y ait la formation ad hoc. Notamment en termes de physiologie de la plongée, car après tout on enseigne des tas de choses en physiologie de la plongée à l'air qui ne sont pas toujours simples et il y a des aspects de la physiologie au recycleur qui me semblent d'une complexité relativement équivalente et accessible à n'importe quel débutant qui veut s'ouvrir à ce type de plongée.

Pour moi, il n'y a pas d'obstacle majeur à apprendre à plonger au recycleur aux premiers niveaux, à condition qu'on ait une approche pédagogique dans ce domaine là !

[Voyez-vous des facteurs économiques qui limiteraient le développement de la plongée loisir au recycleur, comme l'accès au gaz, l'accès à la chaux ?](#)

Oui, il y a aussi les aspects techniques. Concernant la chaux sodée, on peut simplifier grandement les problèmes, pour la disponibilité ou le changement de la chaux, on peut faire quelque chose dans ce domaine.

En ce qui concerne l'emploi de l'oxygène ou des mélanges suroxygénés, là il y a un domaine réel à creuser et peut être des recommandations, voir des interdictions à faire en ce qui concerne la pratique de la plongée. Je recommanderais, avec Air Liquide qui a un long passé dans ce domaine là, l'emploi de mélanges qui sont peu suroxygénés. Il faut sans doute avoir une approche de la plongée loisir entre 0 et 45 mètres, et j'aurais même une approche beaucoup plus restrictive. Aujourd'hui, le recycleur, on peut le décliner jusqu'à plus de 45 mètres et ce n'est pas à cette profondeur qu'on aura des soucis avec les mélanges Nitrox puisqu'ils sont de moins en moins riches en oxygène. C'est plutôt un aspect de décompression, de plongée profonde tout simplement, de physiologie qu'il faut prendre en compte, comme pour la plongée à l'air. Travaillons donc sur les deux points où la plongée Nitrox est valorisante : les plongées successives et les toutes premières plongées des débutants. Pour la plongée à faible fond il n'est pas indispensable de choisir de l'oxygène pur voir des 60, 70 ou des 80% d'oxygène,

Je pense qu'il y a un gaz, le NITROX 40 %, qui permet de minimiser les risques, surtout si on fait du transfert de gaz préfabriqué ! Et avec des procédures de transfert de gaz inférieur à 40%, on couvre, à mon avis de manière assez exhaustive la gamme de profondeur entre 0 et 40 mètres.

Le Nitrox 40% est un bon gaz qu'il faut promouvoir et il est, je pense, inutile d'en chercher davantage ; après tout on a un bon compromis à tous les niveaux : risque lié à l'oxygène amoindri, profondeur liée au mélange intéressante et enfin manipulation facile, je pense que c'est le gaz à mettre en avant pour la pratique d'une plongée au recycleur démocratisée.

Cependant, et j'insiste sur ce point, toutes les mesures réglementaires tendant à distinguer le matériel Nitrox de celui utilisé pour la plongée à l'air, et à en empêcher l'utilisation commune, sont d'excellentes décisions pour la sécurité de la plongée.

[C'est un peu le problème d'un appareil comme le Ray qui est un appareil parfaitement adapté à la pratique loisir mais qui est vendu avec un système d'injection d'un mélange 50%. Ce mélange est plus difficile à obtenir dans les clubs qui font du Nitrox, qui offrent généralement du 36% ou du 40%, de plus ça limite la plongée avec cet appareil à une profondeur de 20m ! Avec un injecteur 40% et le mélange correspondant, le Ray devient une machine très intéressante !](#)

Oui, le Ray était une réponse à effectivement un certain nombre de problèmes, mais commercialement et surtout au niveau de la formation, il n'a pas suscité l'intérêt qu'il mérite. Il faudra redémarrer sur quelque chose d'autre et cette question est ouverte entre Draeger et nous en ce moment. Tout dépendra, encore une fois, de la formation. Mais pour en revenir aux 40% et au transfert, je ne suis pas en train de dire qu'il ne faut pas prendre de précautions sur le matériel et la conception du matériel. Aujourd'hui on considère que 23% d'O₂ c'est déjà du surox, et je crois que c'est bien d'avoir cette précaution et cette approche, parce qu'on est pas à l'abri de l'erreur humaine. Le danger c'est de pouvoir remplir des bouteilles qu'on a utilisées avec un air sale et pollué, plein d'huile, avec du 40 ou du 60%. Il faut que l'équipement soit spécifique et je pense notamment aux raccords, aux robinets, à toute la partie HP, qui doivent être dédiés à une utilisation surox. Même si cette définition commence à 23% d'oxygène. Ensuite, oui à ce qu'on utilise librement du 40% par des pompes de transfert qui ne sont pas chères, sont sécurisantes et qui simplifieraient la logistique, tout en respectant les règles d'emploi liées à l'oxygène. Je suis personnellement ouvert à une étude des installations de remplissage de gaz suroxgénés avec Air Liquide pour la plongée recycleur, mais si je viens vers Air Liquide en leur disant « vous savez j'ai un marché de 60 recycleurs par an... » Vous comprenez... il y a aussi la logique du marché !

[A ce propos, on voit une présence grandissante des fabricants, notamment Anglais, sur les salons ?](#)

Je pense que malheureusement le marché n'est pas à la hauteur des attentes des fabricants, j'en veux pour preuve qu'ils se retournent tous vers des marchés militaires parce que dans ce domaine il y a encore une demande. Le marché du recycleur loisir est très frustrant et décevant, ces fabricants n'ont pas le retour sur investissement qu'ils espéraient. Demain, si le marché le demandait on pourrait voir des tas de recycleurs apparaître. Il faut bien qu'il y ait une concurrence, c'est souhaitable même ! Maintenant il faudra quand même faire attention car c'est quand même un domaine technique qui demande à mon sens d'avoir une bonne connaissance de la technologie. Aujourd'hui il y a 4 ou 5 fabricants capables de faire ça dans les « normes de l'art ».

[Est-ce que c'est le rôle du fabricant de développer le marché ? Ou est ce que c'est le rôle des partenaires qui encadrent le monde de la plongée, les fédérations, les associations de moniteurs ?](#)

C'est le rôle de tout le monde ! Mais chacun dans son domaine, il faut éviter de faire dire finalement aux formateurs comment le matériel doit être fait ; par exemple s'ils interviennent en disant on ne veut pas de raccord spécifique pour le surox, ça c'est un domaine qui à la limite n'est pas de leur compétence. Je n'irais pas dire : il faut plonger de la façon suivante ! Je pense que de leur côté ils n'ont pas tous les éléments pour dire voilà ce qu'il faut comme matériel. Il faut laisser véritablement chaque acteur prendre ses responsabilités dans son domaine respectif. Je comprends très bien la Fédération quand elle est frileuse à l'idée de dire « je vais démocratiser l'enseignement du recycleur », il faut qu'elle prenne la mesure de ce projet et qu'elle prenne sa décision en toute connaissance et c'est valable pour tous les organismes de formation. On travaille déjà avec des centres Draeger, dont certains sont présents sur le salon de la plongée, qui enseignent la plongée avec ces appareils. Ils souhaitent voir le marché du recycleur clairement défini et se demandent également si il faut continuer à investir dans ce domaine là. Chez Aqualung nous nous posons la même question. Nous sommes prêts à faire beaucoup, parce qu'on est passionné de plongée dans le domaine des recycleurs, si tous les acteurs travaillent ensemble pour promouvoir cette activité au sein du monde de la plongée, chacun dans son domaine ; il faut que les moniteurs soient là, il faut que les centres suivent, donc il faut que l'industriel offre un matériel qui soit très facile d'emploi pour eux, qui résolve tous les problèmes que l'on connaît

aujourd'hui, changement de chaux, désinfection, et autres. A nous de comprendre leurs difficultés ou en tous cas leur contexte de travail et d'apporter une réponse intelligente qui respecte la sécurité.

La notion de formation, pour vous, reste bien séparée de la notion de vente ?

Oui ! Lors de la conférence sur les recycleurs en 2003, j'avais dit « les recycleurs : mode, passion ou marché de la plongée ? » C'est à mon avis exactement la question qu'il faut se poser. Est-ce que c'est une mode, est ce que c'est une passion de « quelques irréductibles gaulois » ou est ce que c'est un véritable marché ? ... Il faut se donner les moyens de véritablement répondre à cette question, si c'est un marché il faut véritablement écouter tout le monde mais surtout ne pas interférer. Alors passer des accords avec Pierre, Paul ou Jacques, c'est pour moi une approche commerciale, et Aqualung n'a pas forcément cette démarche, je ne dis pas qu'il ne faut pas l'entrevoir mais ce n'est, pour moi aujourd'hui, pas la bonne approche. Proposons un appareil qui corresponde aux attentes des utilisateurs et des formateurs ! Voilà ! Un ou plusieurs appareils...

Les adeptes de plongées profondes et techniques semblent préférer des appareils à PpO₂ constante avec gestion électronique. Mais cette utilisation extrême des recycleurs ne porte-t-elle pas préjudice à l'image de la plongée loisir au recycleur ?

On sait, en général dans le milieu des recycleurs, que je ne suis pas un fervent supporter ou admirateur des appareils électroniques parce que malheureusement le marché de la plongée n'est pas celui de l'aéronautique, ni celui des machines à laver ou des voitures. Aussi, les industriels de la plongée n'arriveront jamais, à mon sens, à financer la recherche pour la fiabilisation des composants électroniques et des circuits informatiques nécessaires à l'aboutissement de ce type d'appareils. La fiabilité pour moi est perfectible et elle le demeurera tant que la taille du marché ne permet pas de financer cette fiabilisation des produits. C'est un point important, il faut rester lucide sur la taille de notre marché sachant qu'on est dans l'eau et qu'à 80 mètres, eh bien ! la surface est loin !

Ensuite, le recours à cette technologie s'est imposée un peu pour deux raisons, la recherche de l'autonomie, on veut toujours plonger le plus longtemps possible, et la recherche de la profondeur, et pour cela, le principe de la PpO₂ constante est une bonne réponse. Mais il existe des moyens mécaniques, qui permettent à profondeur constante, d'avoir une stabilité remarquable de la PpO₂ ! , c'est le principe du double sac et de la fuite proportionnelle. Des études ont été faites. Le docteur Nuckols de l'US Navy, qui a publié largement sur le sujet, a montré que le système de la fuite proportionnelle était le concept d'appareil qui offrait la meilleure stabilité de la PpO₂ à profondeur constante quel que soit le rythme ventilatoire du plongeur. Juste après, il y a la gestion électronique à PpO₂ constante également.

Mais cette technologie de la PpO₂ constante a un inconvénient majeur : elle fabrique le gaz en plongée. J'ai beau chercher dans d'autres domaines sportifs ou en tous cas à risque, je ne trouve pas de comparaison où on choisit de partir avec un gaz qui n'est pas respirable à la profondeur où on se trouve si il n'y a pas une gestion électronique et une fabrication du mélange en plongée. Au niveau de l'analyse de risques, je trouve que c'est partir sur un concept risqué, et puis, on peut améliorer comme on veut la technique des appareils de plongée ; mais on ne change pas les problèmes de la physiologie. La plongée est avant tout une affaire de physiologie ! Si demain on arrive à inventer la pilule qui va diviser par deux les temps de décompression on aura fait un immense pas en avant !

Serait ce un scoop d'Aqualung ? (Rire)

Non pas du tout malheureusement !!! (Rire). Aujourd'hui certains vendent des appareils en disant 4 heures à 80m, mais c'est faux car il n'y a aucune expérience réelle de tables validées par des expériences humaines sur cette durée à cette profondeur ! Ce ne sont que des tables calculées et quand on sait l'approximation que représentent aujourd'hui les tables calculées par rapport à ce qui se passe réellement dans l'organisme, il y a de quoi être effrayé !

[Est ce que ce type de plongées profondes au recycleur, dont il est souvent fait état dans la presse, n'est pas en train de freiner une approche loisir de la plongée au recycleur ?](#)

Oui, mais peut être un peu moins qu'avant car il y a maintenant des gens qui ouvrent d'autres horizons en disant que la plongée au recycleur, et bien pourquoi pas pour les débutants ? Cette démarche n'existait pas il y a 5 ans. Donc je dirais que les Tech Divers avec tout le respect que j'ai pour eux, parce qu'ils prennent des risques extraordinaires, sont des aventuriers qui suscitent l'admiration. Mais ils ne doivent pas donner une image rétrécie et finalement partielle de la plongée au recycleur. Cette approche Tech Diving fait que les plongeurs débutants ou loisirs qui représentent 90% de la population des plongeurs, et bien lorsqu'ils rentrent aujourd'hui dans le salon, ils ne se sentent pas concernés par les recycleurs parce que pour eux c'est une affaire de gens sérieux très compétents et aventuriers. Mais ce n'est pas vrai ! Ça a longtemps masqué, et ça continue, le réel potentiel de la plongée au recycleur. Malgré ça, il y a désormais de nouvelles approches et j'espère que cela va se poursuivre et aboutir à des choses concrètes.

[Au niveau des cursus de formation, est ce que vous envisagez plutôt une formation avec une seule compétence utilisateur recycleur, ou une approche par niveaux comme pour le Nitrox, ou comme pour le niveau 1 et niveau 2 etc. ?](#)

Vous me ramenez sur le terrain de la formation où je ne suis pas expert et sur lequel je ne peux que donner un sentiment personnel à partir de mon expérience. Je suis tenté par la solution d'une filière parallèle et indépendante pour le recycleur, comme pour le ski et le surf. Aujourd'hui, celui qui commence à apprendre à surfer, et bien peut très bien apprendre à skier aussi mais il est complètement indépendant dans son processus. Pour le recycleur, le plongeur peut aussi démarrer directement sa formation sans avoir appris à utiliser un circuit ouvert, avec un bémol tout de même car sur un recycleur un bail out est un circuit ouvert. Mais ça peut être une formation à l'utilisation d'un appareil de secours et non pas d'un appareil normal. Je force un peu le trait pour montrer que à mon avis, il faut vraiment démarrer le recycleur le plus tôt possible. Je ne pense pas qu'il y ait de véritable interdit ou que ce soit dangereux surtout si on a bien insisté sur de nombreux points pédagogiques. Je pense que tout passe par la pédagogie. Je ne suis pas un expert en pédagogie, mais tout passe par une formation, une culture. Ces appareils ne pardonnent pas si vous dépassez certaines limites ! C'est une approche qu'on n'a pas forcément dans la plongée à l'air. Ensuite, il est difficile de convaincre, et de faire bouger les choses dans le système français. La plongée est soumise à des décrets interministériels et n'est pas simplement confiée à des organismes professionnels. Alors si on fait les choses, n'essayons pas de les faire graduellement parce que ça va prendre un temps fou et on va peut être passer à côté d'une opportunité. Donc analysons bien le contexte, le marché, les possibilités, les risques, les contraintes et les avantages et proposons un cursus de formation. Et si ce cursus dit oui pour des niveaux 1, alors allons-y ! Prenons une décision consensuelle avec l'ensemble des acteurs de la plongée et à ce moment là ouvrons la porte complètement plutôt que de juste l'entrouvrir.

[Une dernière question ouverte, quel futur pour la plongée loisir au recycleur ?](#)

Je pense, encore une fois que si la formation fait des grands pas, il y a un beau futur ! Parce que c'est une plongée confortable, silencieuse, rassurante par certains côtés, car on est pas agressé par le bruit des bulles et que l'on a une meilleure approche de la faune ! Il y a là un sacré pari pour la promotion du marché de la plongée en général ! Est ce que demain tout le monde plongera au recycleur, NON pas du tout, car il est quand même encore plus simple aujourd'hui de plonger avec un détendeur et avec l'air du Bon Dieu ! Mais il y a réellement une ouverture qui est très intéressante pour le marché de la plongée, j'en suis absolument persuadé !

[Mr Diainville, merci beaucoup!](#)

ANNEXE III :

Fraction d'oxygène dans le mélange inspiré pour un recycleur SCR-RMV type DC 55

Taux d'équilibrage O₂ dans les appareils à circuit semi fermé type DC 55 (RMV)
Marine Nationale (21, 26)

Dans les appareils à circuit semi fermé, le mélange gazeux inspiré est de l'ordre de 80% du mélange bouteille pour une VO₂ moyenne d'environ 1 litre/minute. Dans le cas d'un DC 55, soit un SCR-RMV, le bilan instantané O₂ est plus fin et a été mis en évidence par la Marine Nationale (26) et démontré par Henri Paole et François Olivier Corman (21). Sans présenter la démonstration complète qui demande un bilan différentiel, le taux d'équilibrage théorique est donné par les formules suivantes :

$$\mathbf{FN2_I = FN2_B \times (Pabs + KCo) / (Pabs - Co)}$$

et

$$\mathbf{FO2_I = 1 - FN2_I}$$

soit

$$\mathbf{FO2_I = 1 - FN2_B \times (Pabs + KCo) / (Pabs - Co)}$$

FN2_I : Fraction Azote inspirée par le plongeur.

FN2_B : Fraction Azote dans la bouteille.

Pabs : Pression Absolue à la profondeur de la plongée.

Co : Coefficient de consommation de l'oxygène à la pression atmosphérique (il varie entre 0.035 et 0.055 ; on adopte généralement 0.05 pour un effort soutenu).

K = Rapport entre le volume respire et le volume de la fuite proportionnelle (ce coefficient est égal à 12.7 pour le DC 55/92).

FO2_I : Fraction Oxygène inspirée par le plongeur.

Exemple : Pour une plongée à 30 mètres avec un DC 55, mélange bouteille (Nitrox 40/60)

On a :

$$\mathbf{FO2_I = 1 - 0.6 (4 + 12.7 \times 0.05) / (4 - 0.05) = 30\%}$$

Ceci correspond à un effort soutenu , soit une VO₂ de 1.5 à 2 litres/minute, si on adopte une valeur plus basse, correspondant à une VO₂ de 1 litre/minute, soit un Co de 0.035, on obtient une fraction O₂ de 32.7%.

On vérifie ainsi la règle des 80% pour un effort modéré, énoncée dans le chapitre 3b.