

## Qu'est ce qu'un recycleur ? de Richard Pyle

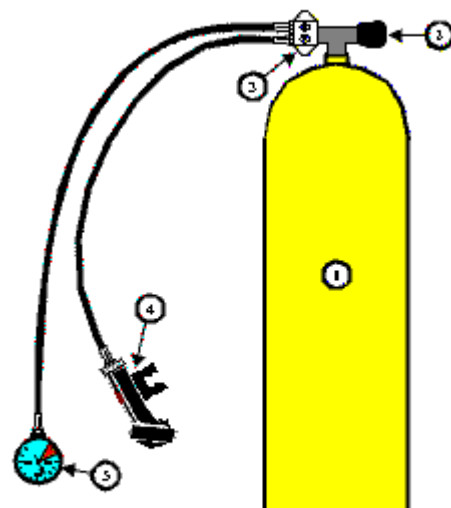
(traduit de l'anglais par Eric Bahuet avec l'aimable autorisation de l'auteur)

Il est utile de se rappeler le mécanisme d'un scaphandre traditionnel pour comprendre ce qu'est un recycleur et son fonctionnement. Les appareils de plongée disponibles sur le marché sont presque tous classés dans la catégorie «scaphandre circuit ouvert». Ce type de matériel (photo de droite) a d'abord été mis à la disposition des plongeurs loisirs par JY Cousteau ; le plongeur respire un gaz comprimé à partir d'un détendeur. Les gaz expirés sont évacués sous forme de bulles à chaque respiration, d'où le terme "circuit ouvert". De par sa construction, le circuit ouvert n'est pas performant car le métabolisme du plongeur utilise seulement une petite partie du gaz respiré, d'où un immense gaspillage d'oxygène à chaque respiration. De plus, la quantité d'O<sub>2</sub> perdue de cette façon augmente avec la profondeur.

Le recycleur est un appareil de plongée fondamentalement différent. Il existe 3 types de recycleurs actuellement utilisés par les militaires et l'industrie: le recycleur *oxygène*, le recycleur *semi-fermé* et le recycleur *circuit fermé*. Comme nous allons le voir plus loin, chacun a ses propres avantages et inconvénients. Tous les recycleurs ont cependant des éléments en commun.

Les conceptions commencent toutes avec *une boucle respiratoire* équipée d'un *embout* qui permet au plongeur de respirer. Si l'ensemble de la boucle respiratoire était fabriqué dans un matériau rigide, le plongeur ne serait pas capable de respirer : le gaz expiré ne pourrait s'évacuer, et le plongeur ne serait pas capable d'inspirer (par analogie, tentez d'inspirer et d'expirer dans une bouteille de soda). Il doit donc y avoir une sorte de sac souple, relié à la boucle respiratoire, qui se gonfle lorsque le plongeur expire et qui se dégonfle lorsque le plongeur inspire. Ce sac se comporte, et c'est un terme assez approprié, comme un *faux poumon*. Si le plongeur continuait à inspirer et expirer à partir de cette boucle respiratoire, la quantité de *dioxyde de carbone* (CO<sub>2</sub>) expirée par le plongeur atteindrait rapidement des seuils dangereux. La boucle respiratoire doit donc inclure également un absorbant de CO<sub>2</sub>, produit chimique (comme par exemple, HP Sodasorb, Sofnolime® ou de l'hydroxyde de lithium), qui récupère et élimine le CO<sub>2</sub> du gaz expiré. Evidemment, la seule cartouche d'absorbant de CO<sub>2</sub> ne saurait permettre au plongeur de respirer indéfiniment ; l'oxygène de la boucle respiratoire étant consommé par le métabolisme du plongeur. Le recycleur doit donc être pourvu d'un dispositif permettant d'injecter de l'oxygène dans la boucle respiratoire afin de conserver le plongeur en vie. Par ailleurs, et simplement pour empêcher le plongeur de respirer le gaz qu'il vient juste d'expirer, le recycleur doit être conçu de telle sorte que le gaz respiré ne puisse circuler que dans un seul sens dans la boucle respiratoire. Cela se réalise généralement à l'aide de soupapes amont et aval positionnées de chaque côté de l'embout ; le gaz inspiré ne peut donc venir que d'une seule direction, et le gaz expiré ne peut se rendre que dans la direction opposée. La vanne de fermeture de l'embout est un autre dispositif commun à la plupart des recycleurs et qui permet d'empêcher l'eau d'inonder la boucle respiratoire en cas de retrait de l'embout en plongée. La différence fondamentale entre les 3 types de recycleurs est la manière dont ils ajoutent du gaz dans la boucle respiratoire, et contrôlent la concentration en oxygène dans le gaz respiré.

### Scaphandre circuit ouvert



- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1-Bouteille                          | 4- 2 <sup>ème</sup> étage de détendeur |
| 2-robinet de conservation            | 5- manomètre                           |
| 3-1 <sup>er</sup> étage de détendeur |  |

## Le Recycleur Oxygène

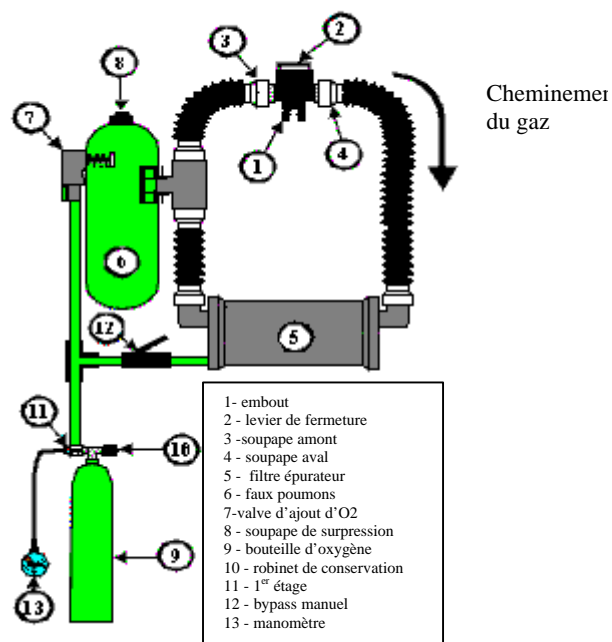
Le recycleur oxygène est le système de recycleur le plus simple, et constitue une base de discussion pour des systèmes plus élaborés. Un recycleur oxygène est constitué des éléments de base décrits plus haut, avec en alimentation une bouteille d'oxygène pur pour compenser l'oxygène consommé par le plongeur. Certains recycleurs oxygène ajoutent de l'oxygène dans la boucle respiratoire à un débit constant qui est calculé pour être très proche de celui consommé par le métabolisme. Cependant, du fait d'efforts physiques, la quantité métabolisée par le plongeur peut évoluer pendant le déroulement de la plongée. En conséquence, un tel système **d'ajout actif** est susceptible d'ajouter trop d'oxygène pendant les périodes de faible activité (et donc un gaspillage du gaz de la boucle), et/ou pas assez d'oxygène pendant les périodes de travail intense (et donc l'obligation pour le plongeur d'ajouter de l'oxygène par une vanne manuelle). Beaucoup de recycleurs oxygène intègrent un système **d'ajout passif**, par lequel l'oxygène est ajouté dans la boucle à un rythme correspondant au métabolisme du plongeur. Une méthode simple permet de déclencher

l'ajout du gaz à l'aide d'une valve mécanique actionnée lorsque le faux poumon est complètement aplati. Au fur et à mesure que le métabolisme du plongeur transforme l'oxygène en dioxyde de carbone et que le CO<sub>2</sub> est éliminé par la chaux de l'absorbant, le volume total de gaz dans la boucle respiratoire diminue. Il arrive un moment où une inhalation profonde du plongeur videra complètement le faux poumon (qui se replie sur lui-même), actionnant ainsi la valve mécanique qui injecte de l'oxygène. Le risque lié au recycleur oxygène est qu'il est impératif de rincer la boucle avec de l'oxygène pur avant le début de la plongée. Si une quantité suffisante d'autres gaz est présente dans la boucle, le plongeur risque l'hypoxie (quantité insuffisante d'oxygène) avant que le repli du faux poumon ne soit suffisant pour actionner la valve mécanique d'ajout d'oxygène. D'un point de vue conceptuel, les recycleurs oxygène sont très simples car ils ne demandent pas un système élaboré de contrôle d'O<sub>2</sub>. Ils sont cependant également très limités dans leurs possibilités du fait de la toxicité de l'oxygène (excès d'oxygène) qui s'avère dangereux au-delà d'une profondeur de 6 mètres. Pour pouvoir descendre en toute sécurité à des profondeurs plus importantes, le mélange de la boucle respiratoire doit être composé d'autres constituants que de l'oxygène pur (par exemple de l'azote ou de l'hélium). On rencontre de tels recycleurs aux mélanges avec les recycleurs *semi-fermés* et les recycleurs *fermés*.

## Le recycleur semi-fermé

A l'inverse des recycleurs oxygène, les recycleurs semi-fermés sont des recycleurs qui utilisent un mélange de gaz autre que le seul oxygène pur. Il y a deux catégories fondamentalement différentes de recycleurs semi-fermés : les *actifs* et les *passifs*. Les plus courants sont, et de loin, les systèmes *actifs*. Conceptuellement, ils sont identiques au recycleur oxygène de type ajout actif, excepté que le gaz fourni est un mélange au lieu de l'oxygène pur. Le gaz est généralement injecté dans la boucle respiratoire à un débit massique constant. En d'autres termes, quelle que soit la profondeur, un même nombre de molécules de gaz est introduit dans la boucle pendant une période de temps donnée. Le débit d'injection de ces systèmes doit être ajusté en fonction du pourcentage d'oxygène du gaz disponible, de telle sorte que le taux d'oxygène dans la boucle égale ou dépasse la consommation d'oxygène par le plongeur.

## Le recycleur oxygène

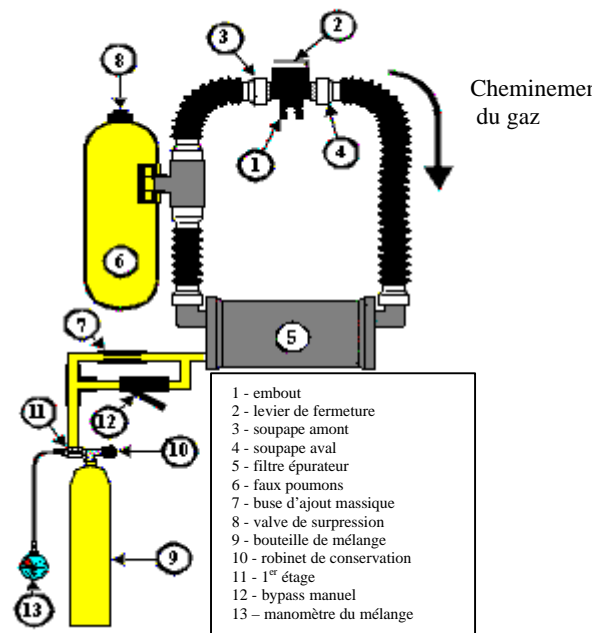


Comparé au recycleur oxygène, ce type de recycleur permet au plongeur de descendre à des profondeurs plus importantes sans risque important de toxicité liée à l'oxygène. L'inconvénient provient du fait que la partie de gaz disponible qui n'est pas de l'oxygène (habituellement de l'azote, de l'hélium, voire les deux) est également ajoutée dans la boucle respiratoire à un taux constant. Cet « autre » gaz n'étant pas consommé par le plongeur, il continue de s'accumuler dans la boucle. Pour empêcher la conséquence évidente de l'augmentation de volume, cet excès de gaz doit être périodiquement évacué de la boucle. Dans l'idéal, seul le composant non oxygène du gaz respiré serait évacué de la boucle, réservant ainsi l'oxygène pour la consommation du plongeur. Etant donné que le gaz de la boucle est plus ou moins bien mélangé, une partie du gaz évacué est de l'oxygène que l'on gaspille.

Un autre problème avec les recycleurs semi-fermés de type ajout actif est que la concentration d'oxygène dans la boucle varie. Tout d'abord, la valeur du pourcentage d'oxygène de la boucle se situe quelque part en dessous du pourcentage d'oxygène du gaz fourni. Cela s'explique par le fait que le corps du plongeur élimine plus rapidement l'oxygène de la boucle que ne sont éliminés les autres éléments du mélange. Par ailleurs, l'oxygène est ajouté dans la boucle à un taux constant mais la consommation d'oxygène par le plongeur varie avec l'effort. En fonction des efforts, la consommation d'oxygène par le métabolisme du plongeur peut varier dans un facteur de 6 dans des conditions normales, et jusqu'à 10 dans des conditions extrêmes. Ces variations influent sur l'importance du décalage entre la fraction d'oxygène dans le gaz fourni et la fraction d'oxygène dans le gaz respiré. Afin de réduire le risque hypoxique, le pourcentage d'oxygène dans le gaz disponible et le débit auquel il est injecté dans la boucle doit être suffisamment important pour répondre aux besoins du plongeur lors d'efforts soutenus. Plus le pourcentage d'oxygène dans le gaz disponible est élevé, plus la profondeur est limitée à cause du risque de toxicité de l'oxygène pendant les périodes de faible activité. Par ailleurs, plus le taux d'injection du gaz est important, plus l'autonomie en gaz est réduite (le gaspillage est plus important). Cependant, devant la variabilité (habituellement imprévisible) des besoins en oxygène pour le plongeur lors d'une plongée, et devant l'incapacité d'un recycleur semi-fermé à débit massique constant à le compenser, les recycleurs semi-fermés à ajout actif sont fondamentalement inefficaces comparés à d'autres recycleurs.

Le système d'ajout passif est une approche différente dans la conception des recycleurs semi-fermés. Ces modèles tentent d'ajuster le taux auquel le mélange fourni est ajouté dans la boucle pour coller au plus près des besoins du métabolisme du plongeur. La façon la plus simple pour réaliser cet ajustement en temps réel est de calquer le taux d'injection du gaz sur la fréquence respiratoire du plongeur. La plupart du temps, la fréquence respiratoire ou le volume respiratoire par minute (RMV), est directement proportionnelle à la consommation métabolique de l'oxygène. Ainsi, la plupart des recycleurs semi-fermés à ajout passif injectent le mélange fourni dans la boucle à un taux dépendant de la fréquence respiratoire du plongeur : la quantité de gaz injecté lors de périodes de RMV élevés est plus importante et elle est moindre lors de périodes de faibles RMV. Alors que cette approche atténue le problème des grandes variations de teneurs en oxygène dans le gaz respiré lors de différents efforts, il y a toujours la nécessité d'évacuer périodiquement un excès de gaz, réduisant ainsi l'efficacité du système.

## Le recycleur semi-fermé



## Le recycleur à circuit fermé

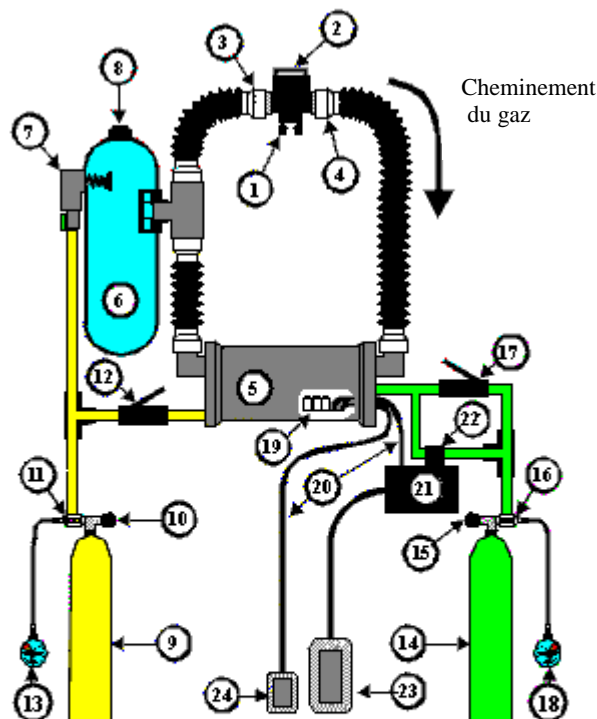
Bien que le terme “recycleur à circuit fermé” soit souvent utilisé pour se référer à différents types d’appareils, il est ici uniquement employé en référence au circuit fermé complet, système de recycleur fonctionnant au mélange. Comme les recycleurs semi-fermés, les circuits fermés fonctionnent avec des mélanges, permettant de descendre à des profondeurs bien supérieures à ce que ne peuvent le permettre les recycleurs oxygène. Cependant, il y a plusieurs différences importantes et fondamentales avec les semi-fermés.

La première différence est la façon dont l’oxygène est ajouté dans la boucle. Alors que les recycleurs semi-fermés injectent de l’oxygène avec d’autres gaz, les circuits fermés disposent d’au moins deux sources de gaz indépendantes. L’une contient de l’oxygène pur, injecté dans la boucle pour remplacer l’oxygène consommé par le plongeur. L’autre source de gaz est appelée le diluant. Il est habituellement composé d’air comprimé ou d’un mélange spécial comme un Nitrox (oxygène/azote avec un pourcentage d’oxygène supérieur à l’air comprimé), un héliox (hélium-oxygène, avec un pourcentage d’oxygène inférieur à l’air comprimé), un néox (néon-oxygène) ou un trimix (hélium-azote-oxygène). Le diluant contient généralement assez d’oxygène pour être respiré directement à la profondeur d’évolution de la plongée à partir d’une bouteille équipée d’un détendeur. Cette source de gaz est utilisée pour maintenir un volume dans le système lors d’évolutions à des profondeurs supérieures où le volume de gaz dans la boucle se trouve comprimé. Dans certains recycleurs, le diluant est aussi utilisé comme source de gaz de secours en circuit ouvert pour répondre à un dysfonctionnement total de l’appareil.

La seconde différence importante entre les fermés et semi-fermés est la façon dont les deux systèmes maintiennent le pourcentage d’oxygène dans la boucle. Alors que la plupart des recycleurs semi-fermés maintiennent (plus ou moins) un pourcentage constant d’oxygène (%O<sub>2</sub>) tout au long de la plongée, les recycleurs circuits fermés maintiennent une pression partielle d’oxygène relativement constante (PpO<sub>2</sub>) dans la boucle. Pour y parvenir, tous les recycleurs circuits fermés intègrent des capteurs électroniques d’oxygène qui surveillent la concentration d’oxygène dans le gaz respiré. Dans la plupart des cas, les recycleurs circuits fermés, intègrent également un système de contrôle électronique de l’oxygène qui ajoute de manière automatique l’oxygène lorsque la PpO<sub>2</sub> descend en dessous d’un seuil prédéfini (ce seuil est appelé le « setpoint » de PpO<sub>2</sub>).

Comme on le verra ci-dessous, les recycleurs circuits fermés ont des avantages et des inconvénients comparés aux circuits ouverts et aux recycleurs semi-fermés. Toutes ces technologies de plongées ont des incidences importantes.

## Le recycleur circuit fermé



1 - embout	13 - manomètre diluant
2 - levier de fermeture	14 - bouteille oxygène
3 - soupape amont	15 - robinet bouteille oxygène
4 - soupape aval	16 - détendeur oxygène
5 - filtre épurateur	17 - bypass manuel oxygène
6 - faux poumons	18 - manomètre oxygène
7 - inflateur d'ajout de diluant	19 - capteurs oxygène
8 - valve de surpression	20 - câbles de liaison oxygène
9 - bouteille de diluant	21 - électronique principale
10 - robinet bouteille de diluant	22 - valve du solénoïde O2
11 - détendeur diluant	23 - Console principale
12 - bypass manuel de diluant	24 - Console secondaire

## Quels sont les avantages des recycleurs ?

En général, les recycleurs, et en particulier les semi-fermés, offrent 3 avantages fondamentaux par rapport aux circuits ouverts traditionnels : une meilleure optimisation de l'utilisation du gaz, une décompression optimisée, et un fonctionnement pratiquement sans bruit.

### Optimisation du gaz

L'avantage le plus significatif du recycleur circuit fermé (et dans une moindre mesure, le semi-fermé) est qu'il augmente de manière importante l'optimisation du gaz. Normalement, un plongeur utilise seulement une petite fraction de l'oxygène inspiré ; lorsque le plongeur expire, la quasi-totalité de l'oxygène quitte les poumons sans avoir été consommée. Lorsque l'on utilise un scaphandre traditionnel, l'oxygène et les autres composants du gaz expiré sont évacués sous forme de bulles. Avec l'augmentation de la profondeur, l'inefficacité d'un circuit ouvert est encore accentuée : du fait de l'augmentation de pression à des profondeurs supérieures, beaucoup de molécules de gaz sont perdues à chaque expiration. Inversement, un recycleur, récupère la majorité ou la totalité du gaz expiré, le traite, et le renvoie au plongeur. Dans le cas de semi-fermés, il n'y a presque pas de bulles expirées. Il n'y a pas de modifications liées à cette optimisation du gaz lors d'évolutions à des profondeurs plus importantes. Ainsi, plus la plongée est profonde, plus l'avantage est du côté des recycleurs (d'un point de vue de l'optimisation des gaz). Par exemple, une bouteille de plongée ordinaire contient assez de gaz pour qu'une personne moyenne puisse respirer pendant environ une heure et demi au repos en surface. La même bouteille durera seulement 45 minutes à 10 mètres de profondeur, et *moins de 10 minutes* à la profondeur de 90 mètres. Mais si cette même bouteille était remplie d'oxygène et utilisée pour alimenter un recycleur circuit-fermé, le plongeur pourrait théoriquement rester sous l'eau pendant *deux jours* – indépendamment de la profondeur !

### Optimisation de la décompression

Le deuxième avantage est l'optimisation de la décompression. Cet avantage ne s'applique qu'aux recycleurs à circuit-fermé, pas aux recycleurs oxygènes ni aux semi-fermés. Les recycleurs oxygène sont limités à des profondeurs où la décompression n'est pas un problème. La raison pour laquelle cela ne s'applique qu'aux circuits fermés et pas aux semi-fermés est relative aux différences de dynamiques du gaz respiré dans ces deux types de recycleurs. Comme décrit précédemment, les semi-fermés maintiennent, plus ou moins, un pourcentage constant d'oxygène dans le gaz respiré, alors que les circuits fermés maintiennent une pression partielle constante d'oxygène dans le gaz respiré. Tout au long de la plongée, le recycleur circuit fermé maintient la concentration d'oxygène du gaz respiré à sa valeur maximale respirable. Cela signifie que la part du gaz respiré qui n'est pas de l'oxygène (celle qui impose une décompression), est réduite à son minimum. Cela permet au plongeur de rester plus longtemps pour un temps de palier équivalent ou de faire moins de palier pour un temps de plongée équivalent.

### Silence

Lors de l'expiration, un plongeur avec un équipement conventionnel rejette une quantité importante de bulles bruyantes. L'effet produit sur les habitants du monde sous-marin est variable, mais dans la plupart des cas, les poissons ont un comportement craintif et ils se refusent à laisser approcher un plongeur de trop près. Les recycleurs semi-fermés réduisent la quantité de bulles expirées, et les circuits-fermés l'éliminent entièrement. Avec les recycleurs, les plongeurs sont capables d'approcher la faune marine de beaucoup plus près tout en perturbant significativement moins leurs habitudes. Cela est particulièrement important pour la capture de spécimen et pour les activités photographiques.

# Quels sont les inconvénients des recycleurs ?

## Discipline et entraînement

Tous les types de recycleurs ont leur propre complexité. Ils induisent de nouvelles formes de risques que les plongeurs en circuit ouvert n'ont jamais rencontrés. La différence fondamentale entre un circuit ouvert et un recycleur est qu'en scaphandre, si un plongeur peut respirer et qu'il n'est pas en dehors des limites de profondeurs recommandées, le gaz respiré va le maintenir en vie (à condition que sa bouteille soit correctement remplie). S'il y a un problème avec le scaphandre, il est généralement assez évident, le plongeur en a connaissance et il peut prendre la bonne décision.

Avec les recycleurs, la composition du gaz respiré peut être modifiée dynamiquement, et, au cours de la même plongée, la concentration d'oxygène peut s'éloigner de la plage d'utilisation viable. Dans le cas de recycleurs oxygène, si la boucle n'est pas correctement rincée avant la plongée, la quantité d'azote qui demeure dans le gaz respiré peut devenir excessive. Avec les recycleurs oxygène à ajout passif, il est possible que le plongeur respire tout l'oxygène présent dans la boucle avant que la soupape d'injection ne se déclenche, laissant ainsi seulement de l'azote. Dans le cas de recycleurs semi-fermés, la concentration en oxygène dans la boucle dépend du niveau d'exercice effectué par le plongeur. Dans certaines conditions, spécialement lors d'efforts importants et/ou lors d'une remontée, la concentration en oxygène dans un semi-fermé peut chuter à des seuils dangereusement bas. La faiblesse inhérente aux circuits fermés réside dans la confiance que l'on accorde à l'électronique pour contrôler la teneur en oxygène de la boucle respiratoire. Chaque photographe sous-marin le sait, l'électronique et l'eau (particulièrement l'eau salée) ne font pas bon ménage. En fait, les circuits fermés, ont acquis une réputation de non-fiabilité ; largement due aux problèmes de contrôle de l'O<sub>2</sub> par l'électronique (ce qui conduit à trop ou trop peu d'oxygène dans la boucle). La plupart de ces problèmes peuvent être évités en rinçant correctement le recycleur avec de l'oxygène pur avant la plongée, en ajustant avec précaution le débit du gaz disponible, en rinçant la boucle avec du gaz frais avant d'entamer la remontée et en intégrant une ou plusieurs sondes oxygène dans les appareils à circuit fermés. Malheureusement, les symptômes liés à l'hypoxie et à la toxicité de l'oxygène ne peuvent pas être considérés comme des signes fiables et annonciateurs de la syncope. Il est donc de la responsabilité du plongeur de s'assurer en permanence, et méthodiquement, de la viabilité du mélange gazeux qu'il va respirer dans la boucle. Ce niveau de contrainte requiert une grande dose de discipline et d'entraînement. Ainsi les plongeurs en recycleur doivent dédier plus de temps à l'entretien de leur équipement que les plongeurs en circuit ouvert. De plus, les recycleurs sont généralement des produits plus compliqués que les équipements circuits ouverts, ce qui explique pourquoi ils demandent plus d'entraînements.

## Coût

Un autre inconvénient des recycleurs est leur coût. Même les recycleurs de conceptions basiques peuvent coûter plusieurs milliers de dollars, et un recycleur circuit fermé sophistiqué jusqu'à 15 000 dollars ou plus. Cependant, après l'acquisition, les dépenses courantes ne sont pas significativement plus importantes que celles d'un scaphandre conventionnel.