

Les stratégies de redondances et leurs variantes, dans l'utilisation de recycleurs à circuit fermé en plongée souterraine

1 Introduction :

Après de nombreuses années d'hésitation l'utilisation de recycleurs en plongée souterraine se démocratise. De nombreux plongeurs souterrains s'équipent suite à l'arrivée sur le marché de nouvelles machines. Les premiers recycleurs à apparaître dans le milieu, sont les semi fermés (RSF ou SCR pour Semi Closed Circuit Reabreathers). Actuellement la tendance s'oriente très nettement vers l'utilisation des Recycleurs à Circuit Fermé, dit RCF ou CCR en langage international (Close Circuit Rebreather). La suite de l'article sera développé autour de cette dernière machine qui est la plus utilisée aujourd'hui.



Photo 1 par François Brun : Pascal Bernabé en RCF Voyageur

Les bénéfices de l'utilisation de ces appareils en plongée souterraine sont multiples :

- Utilisation de la PpO₂ constante, la fabrication du gaz se faisant à l'intérieur de recycleur
 - o Pour la décompression en association d'un ordinateur de plongée adapté
 - o L'utilisation de qu'une seule bouteille de diluant quelque soit la profondeur
- Une autonomie très importante,
- l'absence de stress sur les consommations,
- le silence de fonctionnement,
- Pas de bulles donc moins de touille,
- le rendement poids/consommation par la diminution du nombre et du volume des bouteilles et donc leur poids.
- les modes dégradés.

Ils ont aussi des inconvénients :

- Besoin d'un contrôle précis et permanent du mélange respirable (vérification de la PPO2),
- formation technique
- coût
- maintenance, entretien exigeant
- composants complexes sources de pannes.

2 Les grandes typologies de machines disponibles :

elles correspondent à la façon dont est gérée l'injection de l'oxygène dans la machine.

Soit à gestion électronique : le eRCF.

- Il est piloté par 2 ordinateurs, l'un principal, l'autre redondant.
- Le plongeur ne fait que contrôler la bonne composition du gaz qu'il respire par la lecture des ordinateurs.
- Ce sont des machines complexes et onéreuses

Soit à gestion mécanique ou manuelle : le mRCF.

- C'est le plongeur qui pilote lui même sa machine, par une action directe sur la fabrication du gaz qu'il respire.
- L'injection est mécanique et manuelle.

Suivant le type de recycleur et de réalisation, les prix vont de 1 000 à 15 000 euros formation comprise.

Sur le marché, nous trouvons des machines homologuées CE, développées pour la plongée mer, et souvent peu ou mal adaptées à la plongée sous plafond en raison notamment, de leur sensibilité aux chocs, des parties proéminentes de la machine (faux poumons par exemple), de la configuration dorsale. De belles explo sont tout de même réalisées avec ce type d'appareil

Pour la plus part, ils sont à gestion électronique : Buddy Inspiration, l'Ourobouros et le Megalodon (homologation CE en cours), exception faite pour le Voyager et le Submatix(mRCF). Ils sont tous alimentés par un ensemble de 2 blocs/ détenteur, 1 pour le diluant et 1 pour l'oxygène, embarqués dans le recycleur.

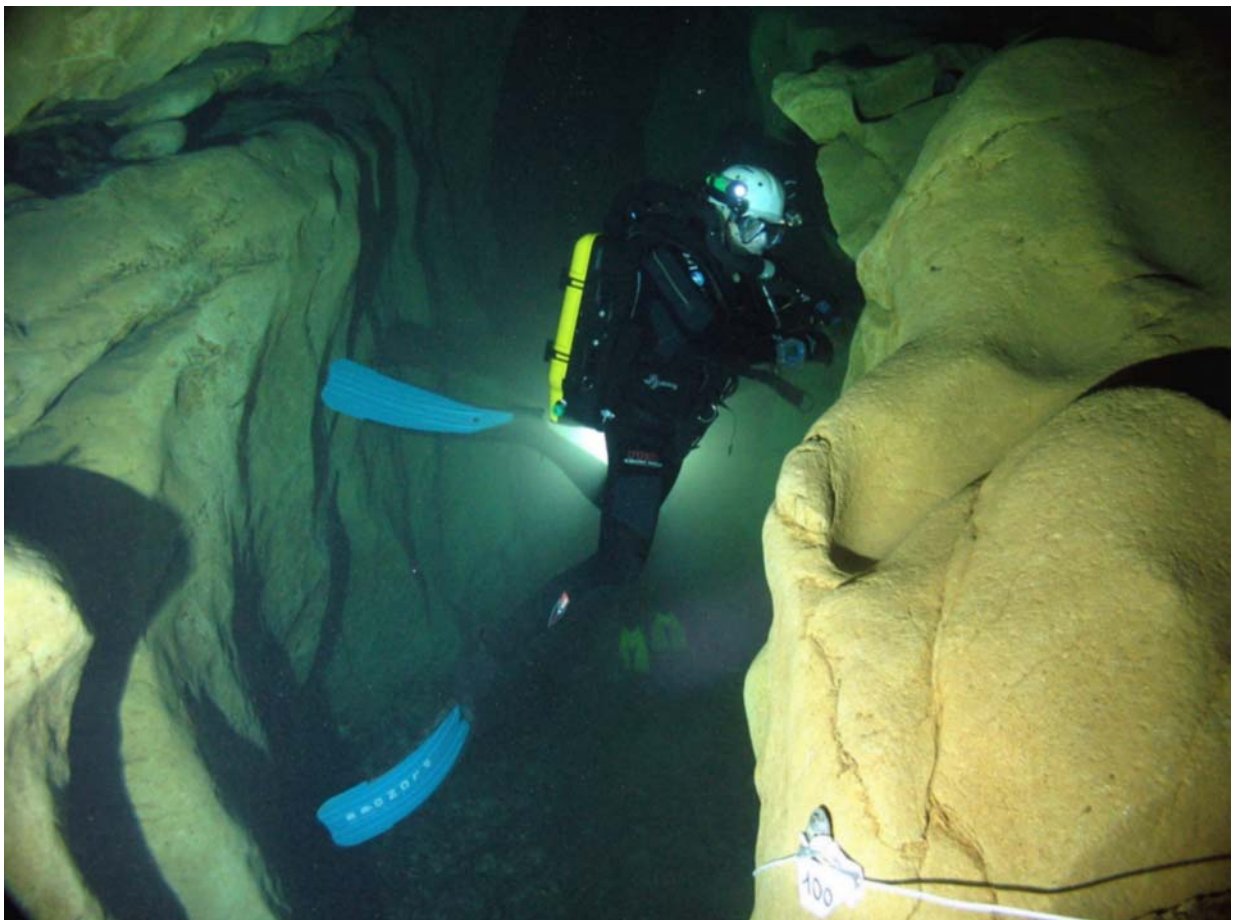


Photo 2 par Xavier Méniscus : Serge Césarano en Buddy Inspiration

Nombre de plongeurs souterrains, ne trouvant pas sur le marché commercial un recycleur adapté aux besoins spécifiques du milieu, se sont tournés vers des appareils vendus en dehors de l'Europe, mieux protégés contre les chocs, mais non certifiés CE car fonctionnant sur un mode mécanique : le Kiss venant du Canada, le rEvo fabriqué en Belgique mais vendu en Suisse pour s'affranchir de la norme CE, les EDO Helvétiques, et dernièrement une version mCCR du Mégalothon.



Photo 3 Par Josée Bron : Laurent Bron en rEvo2

Certains ont choisi des recycleurs d'origine militaire : le eRCF anglo-saxon MK 15/16 et l'IDA Russe ou le Castoro 96, transformé en mRCF en y ajoutant un système d'injection d'oxygène manuel de type vanne kiss. Beaucoup modifient leur machine pour une meilleure sécurité sous plafond, même les CE qui du coup, perdent leur homologation. Ils y rajoutent le plus souvent, des connecteurs, pour permettre d'alimenter le recycleur par des bouteilles relais.

D'autre se sont tournés vers des fabrications artisanales, ou ont développé leur propre machine, dite « maison », par esprit bricoleur, mais aussi pour des raisons financières. La famille des JOKI, le BOBY des provençaux, le BOTS de R Stanton, le DDD, le HB2 (Henri Baptiste Bénédictini) ou la famille des X-Men (X Méniscus). Plus compacts, légers et indépendants, portés en relais soit dans le dos soit en ventral, mais latéralement. Ils sont plus spécifiques et adaptés au milieu. Ils utilisent pour cela un embout latéral inventé par Fréd Badier, et viennent en complément d'un ensemble bi bouteille dorsal classique de gros volume. Mais ils peuvent aussi être portés en dorsal et alimentés par de gros blocs, à l'aide d'un châssis

Et pour finir une infime minorité ont transformé des recycleurs semi fermés Dräger Ray et Dolphin en mRCF, en y ajoutant notamment, une injection d'oxygène et des sondes pour contrôler le mélange respiré.

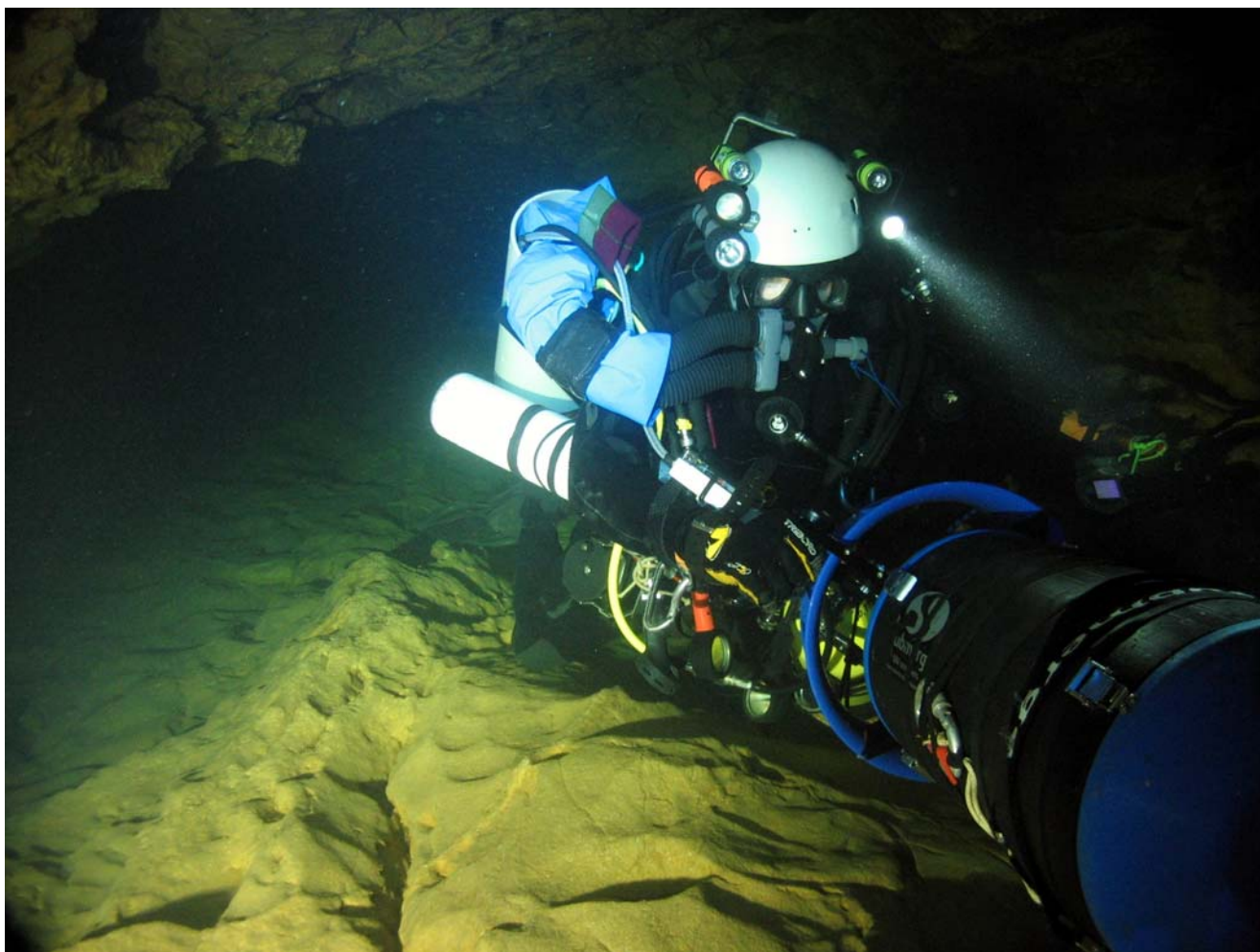


Photo 4 par Xavier Méniscus : Baptiste Bénédictini en HB2

3 La redondance lors d'une plongée souterraine en recycleur

Un petit rappel pour commencer : en circuit ouvert, nous utilisons un ensemble bi bouteille séparé avec un détendeur sur chaque bloc. La règle des consommations préconisée est celle des quarts : $\frac{1}{4}$ à l'aller, et un autre $\frac{1}{4}$ au retour sur chaque bloc. A la sortie, nous nous retrouvons alors avec la moitié du gaz dans nos bouteilles. A moitié vides ou à moitié pleines, à vous de choisir !

En cas de panne sur un ensemble bouteille / détendeur, au point le plus éloigné, nous rentrons sur un seul bloc dans lequel il reste $\frac{3}{4}$ de gaz, alors que le besoin théorique n'est seulement que de deux fois $\frac{1}{4}$ pour rentrer. Le dernier $\frac{1}{4}$ servant de sécurité, pour pallier le stress, la touille, un emmêlage dans le fil ...

En utilisant cette règle, cela revient à dire que nous ne nous autorisons **qu'une seule panne importante** sur notre scaphandre en plongée souterraine.

En ce qui concerne le plongeur recycleur lorsqu'il s'engage dans une cavité, il lui faut de même penser à prendre la redondance nécessaire pour rentrer, en cas de panne sur sa machine. Contrairement à la plongée en mer, la bouteille de 3 litres de diluant alimentant le recycleur ne permet pas toujours de regagner la surface en circuit ouvert.

La question qui se pose est donc : **Quel type de redondance prendre avec soi ?**



Photo 5 par Xavier Méniscus : Serge Césarano en Buddy Inspiration

La suite de cet article analysera les différentes stratégies de redondances possibles parmi les plus utilisées aujourd'hui. Il donnera des éléments de réponses aux questions que l'on se pose généralement en abordant cette activité.

Il y a tout d'abord une question primordiale à se poser :

- Nous autorisons-nous une seule panne sur notre scaphandre, formé par l'ensemble recycleur/bloc/détendeur, comme dans la pratique courante de la plongée souterraine en ouvert ?
- Ou alors, le recycleur, par sa complexité, doit-il être considéré comme un facteur de panne supplémentaire en plus du risque propre à l'ensemble blocs/détendeur traditionnel, servant pour son alimentation mais aussi en secours ? Soit 2 pannes pendant la plongée.

Sachant qu'un recycleur possède des composants complexes, source de panne, mais aussi qu'il peut subir plusieurs incidents, avant de devenir complètement inutilisable. Par leur conception, les RCF possèdent différents systèmes redondants, qui permettent au plongeur, tant que l'appareil n'est pas complètement noyé, et que la chaux fixe le CO₂, de continuer à respirer dessus pour rentrer. Nous appelons ça « les modes dégradés ».

Résumons :

- **Une panne, comme sur un circuit ouvert ?**
- **2 pannes, le recycleur apportant un facteur de panne supplémentaire ?**
- **Composants complexes sources de panne ?**
- **Possibilité de mode dégradé ?**

Vos réponses déduiront votre stratégie de redondance parmi celles adoptées et pratiquées actuellement dans le milieu de la plongée souterraine.

4 Les différents types de redondances utilisables avec un RCF:

Il en existe 3 principales, avec chacune leurs variantes.

4.1 La redondance assurée par les modes dégradés du recycleur, méthode Coué !! :

Principe de base : On compte sur la fiabilité et l'utilisation des modes dégradés du recycleur pour rentrer ! La probabilité de panne totale du recycleur est acceptée.

L'autonomie de la plongée sera calculée sur celle du recycleur (durée de vie de la chaux).

On ne prend bien qu'un seul avion pour franchir un océan. Mais celui-ci possède différents systèmes de secours pour continuer à voler. 2 moteurs ou plus, 5 ordinateurs, chacun en 2 partie possédant 2 langages informatiques différents pour éviter la contamination par un virus, etc.



Photo 6 par Xavier Méniscus : Serge Césarano en Buddy Inspiration

La fiabilisation ou durcissement d'une machine :

- En premier lieu la fiabilité est liée à la qualité de fabrication de la machine. Bien sûr des éléments principaux mais aussi de tous les accessoires dont le montage et le démontage est fréquent. Elle doit de toute façon comporter les éléments suivants en base :
 - o La mesure de la PpO₂ s'effectue sur 2 à 3 sondes
 - o La lecture de la PpO₂ s'effectue sur plusieurs afficheurs digitaux séparés et tête haute (HUD)
 - o La gestion électronique de la PpO₂ est doublée, grâce à 2 ordinateurs, l'un principal, l'autre redondant, qui pilotent l'injection d'oxygène
- En plus de cela de petites modifications permettent de démultiplier les solutions de réchappe comme :

- Doubler l'alimentation, en plus des petites bouteilles embarquées par la machine, rajouter en relais, une petite bouteille de diluant et d'oxygène, des raccords automatiques avec anti-retour permettant de se raccorder sur les circuits principaux du recycleur.
- Les injections de diluant sont doublées dans le recycleur :
 - La principale, gérée automatiquement et mécaniquement par l'ADV
 - Celle de secours, gérée par l'intervention volontaire du plongeur en injectant lui-même son diluant manuellement
- Les parties extérieures du recycleur sont renforcées : coque de protection, tuyaux et flexibles blindés.

Les modes dégradés c'est quoi ?

Un recycleur à circuit fermé possède, par conception, différents composants redondants qui peuvent prendre le relais en cas de panne des composants principaux. Il peut donc subir un ou plusieurs incidents tout en restant viable donc utilisable.

En cas de panne totale sur l'ensemble sonde/oxymètre/injection d'oxygène, on peut encore « faire la lunette » : passage en mode semi fermé, en expirant à l'extérieur du RCF, après 8 à 10 cycles respiratoires, puis re-compléter la boucle avec du gaz frais. Ne peut se faire qu'avec un gaz sur oxygéné. A -6m passage en fermé, l'oxygène branché à la place du diluant et rinçage adéquat de l'appareil.

- En cas de noyade accidentelle et partielle du recycleur, possibilité d'évacuer toute l'eau située dans le piège à eau ou le faux poumon expiratoire, par la soupape d'expiration, possible si la conception de l'appareil le permet
- En cas de panne de diluant lors d'une remontée directe sans passage par un nouveau point bas, plus besoin de diluant pour alimenter le RCF . Possible à condition que les rinçages éventuels ne soient pas trop importants.
- En cas de chaux saturée, lorsqu'un début de crise hypercapnique commence, on passe en circuit ouvert pour faire chuter le taux de CO2 dans son organisme. Pendant ce temps, le gaz ne circulant plus dans le recycleur, la chaux fixe le CO2 par un temps d'exposition plus important. Après plusieurs cycles respiratoires, ayant éliminé le CO2 dans son organisme et à l'intérieur du recycleur, on repasse en circuit fermé. Le taux de CO2 va alors remonter doucement. On répétera l'opération jusqu'à faire surface. On garde ainsi une certaine autonomie. Plus on remonte, plus le % de CO2 dans la boucle sera supportable, par la chute des pressions partielles. A -6m au palier, sous oxy et au repos, notre organisme admettra une chaux usagée et un taux de CO2 beaucoup plus important.

Les seules possibilités d'avoir son recycleur hors service sont :

- Avoir une noyade totale de la machine, qu'elle soit accidentelle ou par rupture d'un élément vital de l'appareil (expl : boucle).
- Une chaux défectueuse ou saturée
- Avoir un ensemble de plusieurs pannes, qui rendent impossibles les modes dégradés.

Conséquence :

- **Avantages :** Peu de matériel nécessaire. Une configuration peu encombrante, légère pour une meilleure agilité dans l'eau. Moins de matériel implique, en théorie, moins de pannes. Une équipe d'assistance réduite.
- **Inconvénients :** Une réchappe uniquement basée sur l'équipement de base, utilisé en mode dégradé, ce qui impose une connaissance parfaite de la machine et une maîtrise non moins parfaite de ses émotions et de ses réactions. Une formation et un entraînement régulier dans l'utilisation des modes dégradés sont indispensables pour maîtriser les solutions de repli. La qualité de fabrication, la fiabilité du montage et de l'entretien du recycleur impliquent un investissement de départ et un budget de fonctionnement important. L'utilisation de petites bouteilles implique une bonne maîtrise des rinçages en profondeur, ils seront de toute façons limités en nombre!!

4.2 La méthode Alpine :

Principe de base : En complément de la méthode Coué, on rajoute près de la surface, bouteilles et détendeurs pour réaliser une partie du retour et la décompression en circuit ouvert. La probabilité de panne du recycleur au point **le plus extrême** est acceptée. Malgré tout, l'autonomie de la plongée ne sera calculée que sur celle du recycleur.

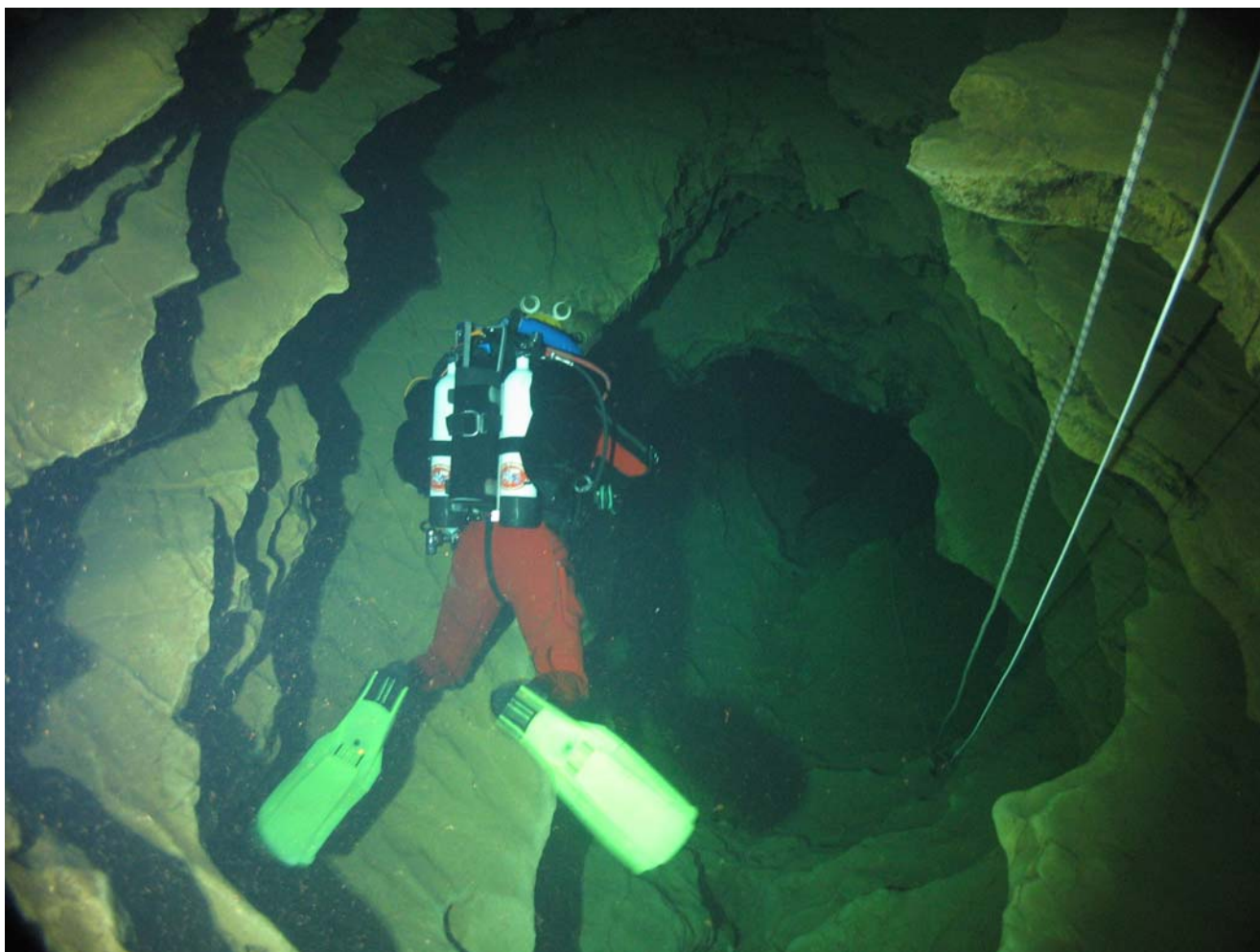


Photo 7 par Xavier Méniscus : Gaby Hude en X-Men2

Au point le plus éloigné, on compte sur les modes dégradés multiples du recycleur pour rentrer. En décompression la probabilité de panne totale est plus conséquente du fait de la durée d'exposition. On installera avec une petite équipe, juste la quantité de gaz nécessaire pour réaliser une partie de son retour et de ses paliers en circuit ouvert.

Conséquence :

- **Avantages :** Peu de matériel supplémentaire, quelques bouteilles de déco. Une configuration peu encombrante, légère pour une meilleure agilité dans l'eau au point le plus éloigné ou le plus profond. Une solution de repli partielle en circuit ouvert sur du matériel et une technique éprouvés. Moins de matériel, moins de pannes. Une équipe légère.
- **Inconvénients :** Les inconvénients de la méthode Coué cités ci-dessus sont bien sûr toujours présents car l'utilisation des modes dégradés devra se faire au point le plus éloigné et/ou le plus profond !

4.3 La redondance assurée en circuit ouvert

Principe de base : En cas de panne, même au point le plus extrême, on passe en circuit ouvert pour rentrer, grâce aux bouteilles déposées préalablement dans la cavité, portées en relais ou en dorsal en fonction du type de recycleur utilisé. L'autonomie de la plongée sera calculée sur le volume des gaz secours et non plus sur celle du recycleur.

C'est la méthode la plus utilisée actuellement dans le milieu de la plongée souterraine.



Photo 8 par Josée Bron : Laurent Bron en rEvo2

On prendra en compte la possibilité d'une panne totale du recycleur. La plupart du temps, la solution du mode dégradé sera considérée, mais ne sera pas retenue comme un mode redondant suffisant. Cette solution permet aussi plus facilement la récupération d'un incident sur le recycleur ou sur le plongeur ; (essoufflement, intoxication par le gaz circulant dans la boucle), grâce à sa simplicité de fonctionnement et l'aisance respiratoire qu'il procure. On revient à une méthode connue : l'utilisation du bon vieux détendeur, et de sa bouteille. Si nous transportons en relais un gaz fond et un gaz de déco, il s'agit simplement de s'assurer d'utiliser le bon gaz à la bonne profondeur. Le détendeur doit être facilement accessible, positionné sur la bouteille de façon à l'avoir « sous la main ». Pour plus de rapidité, certains embouts de recycleur incorporent un détendeur, alimenté par un flexible reliée à la bouteille qui alimente aussi le recycleur. Le passage en circuit ouvert se fait simplement en tournant la manette qui ferme l'embout. Il faut naturellement s'assurer que le gaz qui alimente le recycleur soit respirable, et qu'il ne soit pas la source de l'incident.

Le passage en circuit ouvert pour rentrer, oblige à re planifier la décompression. En effet l'utilisation de la PpO2 constante en RCF conduit à une décompression beaucoup plus courte qu'en circuit ouvert. Ceci imposera l'utilisation de tables de secours appropriées, et déterminera la quantité et les types de gaz à installer tout au long du trajet et à prendre en relais. L'utilisation d'un ordinateur multigaz permettant de switcher d'une déco à PPO2 constante vers une déco classique permet d'optimiser la nouvelle déco mais n'affranchit pas le plongeur de son jeux de tables de secours.

L'avantage des recycleurs compacts latéraux spécifiquement adaptés à la plongée souterraine, type JOKI, BOBY, DDD, BOTS, est de pouvoir emporter de gros blocs dorsaux, pouvant même aller jusqu'au tri 20 L. En ajoutant ce type de recycleurs sur une configuration standard de la plongée souterraine plus une petite bouteille d'oxygène, on double, voire quadruple son autonomie. On évite, comme cela, de porter des relais qui freinent la progression et l'aisance du plongeur dans l'eau. De plus, ce type de RCF, s'il est hors service, peut être largué pour rentrer plus rapidement ou éventuellement échangé avec une autre machine apportée par un plongeur de soutien. En effet à la remontée, les faux poumons se gonflant, un recycleur prend, s'il n'est pas utilisé, 5 à 8 litres de flottabilité positive, l'air emplissant la totalité du volume des faux poumons, avant de s'échapper par la soupape de surpression. Inversement, en cas de noyade, un recycleur rempli d'eau peut prendre plus de 10 kg de flottabilité négative. Il s'en suit qu'avec un recycleur dorsal non largable, le plongeur devra se lester en conséquence.



Photo 9 par Hervé Chauvez : Patrick Bolagno en BOBY

Depuis le point extrême, il faut bien entendu, pour pouvoir refaire surface, avoir une réserve de gaz « suffisante ». Mais par suffisante, que pouvons nous comprendre ?

En se basant sur les recommandations établies pour l'utilisation des circuits ouverts en plongée souterraine nous pouvons établir les comparaisons suivantes :

1^{er} cas :

- Nous nous autorisons une seule panne sur l'ensemble recycleur/bloc/détendeur, comme dans la pratique courante de la plongée souterraine en circuit ouvert.
 - o Nous faisons le retour sur une seule bouteille, sans garder de réserve, les mode dégradés du RCF seront considérés, mais utilisables à condition de disposer de gaz sur oxygénés.

Exemple : Une plongée en circuit ouvert en bi 20 à 200 bars = 8 000 litres

Demi tour sur la règle des ¼ : bi 20 à 150 bars = 6 000 litres

Soit 2 000 litres pour faire le trajet aller. Il faudra alors 2 000 litres pour rentrer.

Donc pour faire le trajet retour, il faut un volume identique de 2 000 litres pour rentrer en circuit ouvert, soit un rapport de : $8\ 000 / 2\ 000 = 4$,

Concrètement : En redondance, on divisera au maximum par 4 le volume de gaz emporté habituellement en circuit ouvert sur un seul bloc ou plus pour pouvoir réaliser la même plongée en RCF. Soit une bouteille de 10 litres à la place d'un bi 20 en circuit ouvert.

Ce cas ne permet pas d'avoir une réserve de gaz en sécurité. On peut transposer cela à l'ancienne règle des 1/3 du CO qui n'est plus enseignée

2^{er} cas :

- Nous nous autorisons une seule panne sur l'ensemble recycleur/bloc/détendeur, comme dans la pratique courante de la plongée souterraine en ouvert, mais avec une réserve de gaz en plus
 - o Dans ce cas, il suffit de transposer la règle des ¼ du circuit ouvert, c'est-à-dire, pouvoir faire le retour sur une seule bouteille, en gardant une réserve de sécurité. Les modes dégradés du RCF seront considérés à condition d'utiliser des gaz sur oxygénés mais ne seront pas retenus comme un mode redondant suffisant .

Exemple : Une plongée en circuit ouvert en bi 20 à 200 bars = 8 000 litres

Demi tour sur la règle des $\frac{1}{4}$: bi 20 à 150 bars = 6 000 litres

Perte d'une bouteille sur incident. Il reste une 20 litres à 150 bars = 3 000 litres alors que 2 000 litres suffisent pour faire le chemin en sens inverse.

Donc pour faire le trajet retour en circuit ouvert, il faut un volume identique de 3 000 litres pour rentrer en circuit ouvert, soit un rapport de : $8\ 000 / 3\ 000 = 2,67$, sans compter le gaz restant dans la bouteille alimentant le recycleur à l'aller

Concrètement : En redondance, on divisera au maximum par 2,67, le volume de gaz emporté habituellement en circuit ouvert, sur un seul bloc ou plus, pour réaliser la même plongée en RCF. On peut aller jusqu'à 3, en prenant en compte le gaz restant dans la bouteille de diluant alimentant le RCF à l'aller, s'il en dispose. Soit une bouteille de 13,5 litres à la place d'un bi 20 en circuit ouvert

3^{ème} cas :

- Par sa complexité, le recycleur rajoute un facteur de panne supplémentaire à l'ensemble blocs/détendeur traditionnel servant pour son alimentation mais aussi en secours. Soit 2 pannes pendant la plongée : Une sur le recycleur, et une autre sur le circuit ouvert lors du retour
 - o Dans ce cas, pour le retour, il faudra prendre la règle des moitiés sur 2 blocs séparés pour rentrer en circuit ouvert. Les modes dégradés du RCF seront considérés à condition d'utiliser des gaz sur oxygénés, mais ne seront pas retenus comme un mode redondant suffisant

Exemple : Une plongée en circuit ouvert en bi 20 à 200 bars = 8 000 litres

Demi tour sur la règle des $\frac{1}{4}$: bi 20 à 150 bars = 6 000 litres

Soit 2 000 litres pour faire le trajet aller. Il faudra donc 2 000 litres pour rentrer.

On double ce volume en cas de panne sur une bouteille : $2\ 000 \times 2 = 4\ 000$ litres

En conséquence pour faire la même plongée en recycleur, il faut un volume de 4 000 litres sur 2 bouteilles séparées pour rentrer en CO, soit un rapport de : $8\ 000 / 4\ 000 = 2$ sans compter la bouteille interne du recycleur.

Concrètement : En redondance, on divisera au maximum par 2, le volume de gaz emporté habituellement en circuit ouvert sur 2 blocs séparés au minimum, pour réaliser la même plongée en RCF. Le gaz restant dans la bouteille de diluant, s'il en dispose, alimentant le RCF à l'aller étant aussi pris en compte. Soit un bi 10 litres, à la place d'un bi 20 en CO

La probabilité des 2 pannes, une sur le recycleur et sur une bouteille sécu au point le plus éloigné est acceptée.

Pour la décompression, la réserve de gaz devra être identique à celle d'une plongée en circuit ouvert, soit portée en relais, soit déposée préalablement par ses équipiers pour être utilisée sur le chemin du retour.



Photo 10 par Xavier Méniscus : Gaby Hude en X-Men2

Remarques générales suite à l'utilisation d'une redondance en circuit ouvert :

- Le gaz respiré dans la boucle d'un recycleur étant plus chaud, le passage en circuit ouvert, refroidira le plongeur. Il faudra s'équiper en conséquence, ou utiliser un gilet chauffant pour les longs paliers.
- Il est recommandé d'avoir la possibilité de pouvoir connecter des arrivées de diluant et oxygène externes par des flexibles avec des raccords rapides branchés sur le recycleur ce qui facilite la gestion des modes dégradés de la machine (passage à la lunette et en circuit fermé oxy à 6m)



Photo 18 par Xavier Méniscus : Recycleur Oxy Michelin palier -6m

Attention :

Avec le temps, on pourra oublier les réalités de consommation du circuit ouvert, de plus en plus de plongées extrêmes se faisant en recycleur sans avoir jamais été faites en circuit ouvert ! L'utilisation d'un outil de calcul de déco permettant de déterminer la consommation peut être utile. Il est toutefois indispensable pour déterminer le jeu de tables de secours. On considèrera une conso moyenne allant 20 à 35 L/min suivant les individus, le courant, les efforts et la forme physique du moment pour calculer son retour.

En cas de plongée en binôme ou plus, les plongeurs doivent être chacun autonome pour ne compter que sur leur(s) propre(s) bouteille(s) de sécurité. Mais il est préférable que toutes les connexions entre recycleurs et bouteilles relais soient standardisées. Ce qui permet un échange de matériel possible entre plongeurs compatibles.

Avantages et inconvénients de la redondance en circuit ouvert :

- **Avantages :** Financier, relativement abordable, car le plongeur possède généralement déjà le matériel redondant avant d'acquérir un recycleur. Une solution de repli vers une technique connue et maîtrisée avec laquelle, pour la plupart, nous avons appris à plonger. Facilité de récupération d'un incident sur le recycleur, grâce au débit important du circuit ouvert.
- **Inconvénients :** Autonomie limitée par la quantité des gaz de secours. Equipe et logistique importante, dépose préalable des bouteilles de sécurité. Encombrement, manque d'agilité et d'hydrodynamisme à cause du nombre et du volume des relais transportés.

4.4 La redondance assurée par 1 ou plusieurs recycleurs

Principe de base : En cas de panne pour rentrer, même au point le plus extrême, on utilise un second recycleur indépendant, voire un 3^{ème} pour les paliers. L'autonomie de la plongée sera calculée sur celle du recycleur principal

Pour permettre une autonomie presque totale, l'utilisation d'un recycleur redondant a très tôt été envisagée pour les explorations longues et/ou profondes. La logistique du circuit ouvert ayant trouvé ses limites. En Europe, nous ne sommes qu'une petite dizaine à utiliser le double RCF. Le précurseur fut Olivier Isler, au début des années 1990, avec son RI 2000, une configuration très lourde de 3 recycleurs semi fermés électroniques. 2 en dorsal, un 3^{ème} ventral et largable. A la fin du 20^{ème} siècle, la plus part des doubles recycleurs étaient des semi fermés. Puis, avec l'arrivée du RCF mécanique latéral compact, la version du double RCF s'est généralisée. Une petite minorité utilise une solution mixte, un RCF en principal, un RSF en secours, ou encore, des bi recycleurs ayant des éléments communs. D'autres ont abandonné la solution du tout recycleur, trop contraignante, pour revenir sur une redondance en circuit ouvert.

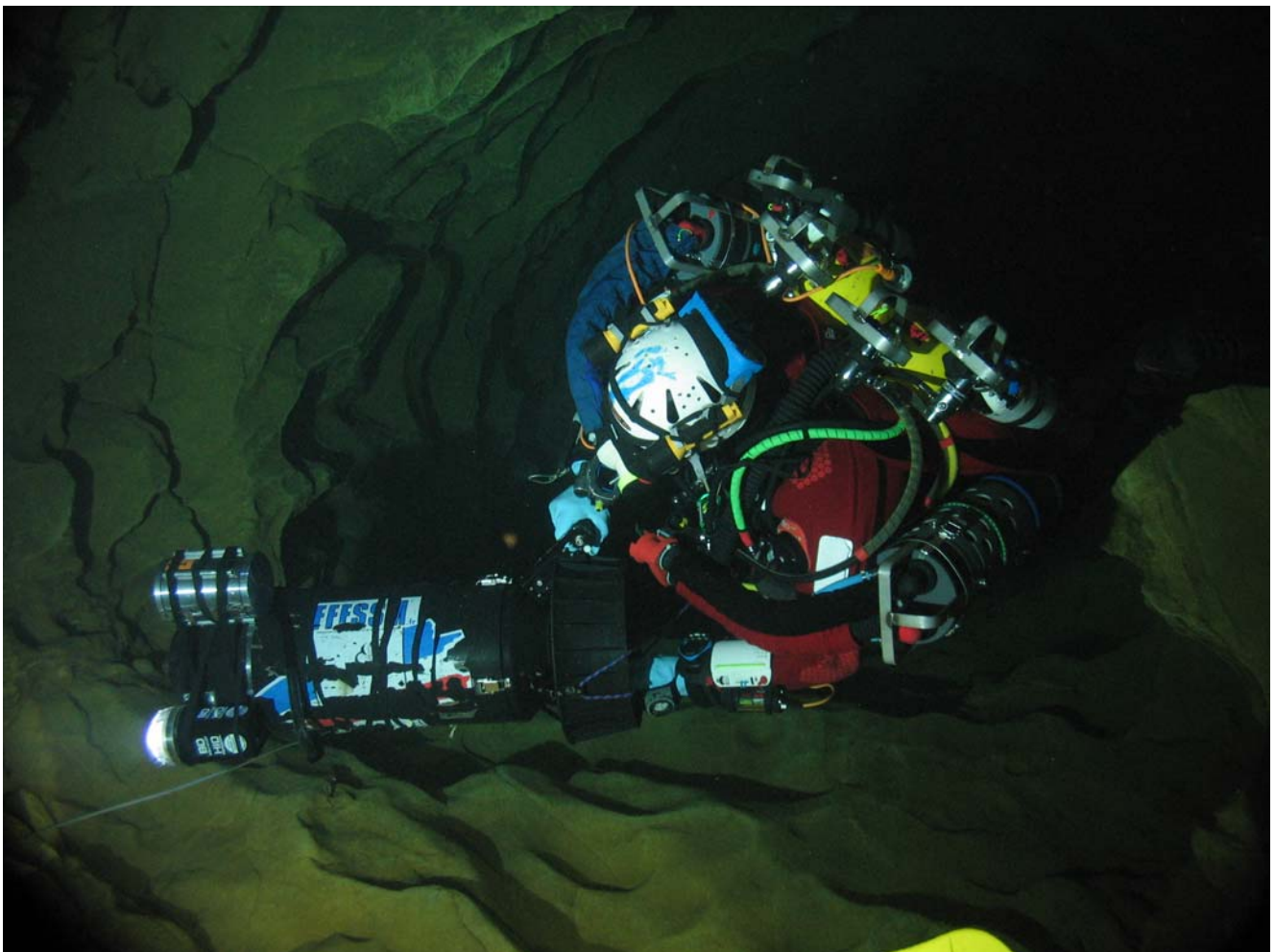


Photo 11 par Xavier Ménéscus : JC Pinna en double JOKI

La configuration en double recycleur pour un plongeur reste tout de même très lourde, encombrante et techniquement difficile à utiliser.

Voici les points à étudier :

- **2 recycleurs, plus 2 bouteilles de diluants identiques et 2 bouteilles d'oxygène**, ainsi que la bouteille pour le gonflage du vêtement Attention à ne pas trop s'approcher du fil avec tout ça !
- Une interconnexion entre les différentes sources de gaz avec des détrompeurs entre oxygène et diluant. Le tout accessible pendant la plongée.

- **En cas de perte d'une bouteille de diluant**, les 2 RCF devront être alimentés par la 2^{ème} bouteille, pour ne pas perdre un recycleur. On utilisera 2 flexibles avec des raccords rapides sur le détenteur de la bouteille restante. La meilleure solution est d'utiliser un connecteur en T ou en Y avec 2 raccords rapides pour alimenter les 2 RCF en même temps, branchés sur n'importe quelle bouteille de diluant.
- **Le mode dégradé** est bien sûr une solution de repli à envisager, devant se faire sur un gaz suroxygéné. Il faudra prévoir la dépose de petites bouteilles de sécu sur le chemin du retour et d'oxygène à -6m. Comme le départ se fait sur le gaz fond, qui peut être hypoxique près de la surface, il faut prévoir une bouteille de gaz respirable, par exemple un nitrox au cas où on aurait à passer en circuit ouvert. Cette bouteille sera par la suite déposée en sécu pour les paliers en mode dégradé. Personnellement j'utilise une bouteille neutre de 6L en Alu de Nitrox 40%, que je dépose à -30m, mais qu'il m'arrive aussi de garder avec moi, pour servir au gonflage du vêtement.
- **Aisance, agilité et hydrodynamisme dans l'eau** : Il faut palmer avec tout ça ! Mieux vaut prévoir d'utiliser des propulseurs pour avancer confortablement et éviter l'essoufflement.
- **Le pilotage de 2 recycleurs** : le principal est actif, le second sera passif ; prêt à fonctionner. Les oxymètres du recycleur en standby sont en fonctionnement pendant la plongée et le diluant doit être connecté sur son ADV pour le gonfler à la descente. L'oxygène ne sera branché que lorsqu'on utilise le recycleur redondant. Ceci dans le but d'éviter le risque de se retrouver avec une PPO2 très haute au moment de l'utiliser. Effectivement si la vanne d'oxy s'ouvre seule (frottement sur le sol, ...) du fait de l'injection permanente d'oxygène la PPO2 peut se retrouver à des valeurs incompatibles avec une utilisation au fond ! Faire aussi attention de bien refermer l'arrivée d'oxygène lorsque le recycleur mécanique n'est plus utilisé, exemple : après un test de bon fonctionnement.



Photo 12 par Xavier Méniscus : Serge Césarano en Buddy Inspiration et JOKI

- **Assurer une redondance active** : En raison du risque de noyage lors du passage d'un recycleur à un autre, la solution d'alterner l'utilisation des 2 RCF comme en circuit ouvert a été abandonnée. La plongée sera réalisée sur un seul recycleur, le second sera testé à des points stratégiques : à la descente, avant d'attaquer une zone profonde, à un passage clé, avant une étroiture ou après un temps donné. Se pose alors la question du passage sur le recycleur redondant en cas de problème, surtout à grande profondeur. Généralement tout doit se faire dans l'urgence. Récupérer d'un essoufflement, d'une intoxication (hypercapnie, hyperoxie, hypoxie) due au gaz respiré dans le recycleur principal, n'est pas facile. Un passage intermédiaire en circuit ouvert peut être bénéfique. Avec des recycleurs relais, on peut emporter un volume de gaz important dans le dos. Cela peut permettre de récupérer vite en circuit

ouvert avant de passer sur le second recycleur. Sur un recycleur dorsal, c'est moins évident, ou alors il faut transporter des relais de volume important. Il faut aussi que la chaux du 2^{ème} RCF soit active rapidement, surtout si l'eau est froide. L'une des solutions est de faire la lunette, sur des cycles respiratoires de plus en plus espacés, avant de passer totalement en circuit fermé au bout de quelques minutes.

- Par expérience, lors d'une plongée à -110m, dans de l'eau à 13°C, j'ai subi une forte hypercapnie due à une chaux défectueuse sur le recycleur principal. Je suis passé directement en circuit fermé sur mon 2^{ème} recycleur. J'ai pu récupérer très vite, sans avoir eu besoin de faire la lunette. Dans des eaux plus froides, ou plus profond (pression partielle de CO2 plus élevée), en aurait été t il de même ?
- **Une gestion de la flottabilité très sensible** : 4 volumes de gaz à gérer. Tout le monde se rappelle la première fois qu'il a utilisé une stab. Et bien avec 2 recycleurs, il faut savoir gérer en même temps le volume du vêtement sec, de la wings, du recycleur principal et du secours, le tout sans poumon-ballast. A chaque changement de profondeur, il y a 4 volumes de gaz qui changent. Ce qui veut dire que l'on « part » beaucoup plus vite, et qu'un écart infime de profondeur ou de volume sert à nous déséquilibrer, surtout près de la surface. A la remontée, attention à ne pas se faire surprendre ! Notamment pour la décompression ! Heureusement, il y a souvent un plafond en plongée souterraine, mais il peut être plus ou moins haut, surtout dans un puits ! Lors de plongées avec des profils en yoyo, il faudra rester très attentif aux variations de flottabilité.
- **Le lestage** : Le volume des faux poumons et la flottabilité du recycleur qui n'est pas utilisé changent. A la descente les faux poumons sont comprimés et vides. A la remontée, ils se gonflent, le recycleur redondant prend de la flottabilité positive, équivalente aux volumes des faux poumons, entre 5 à 8 litres. Il faudra se lester en conséquence, pour être neutre à la remontée au palier de 3 m, comme nous l'avons tous appris dans les écoles de plongée, mais cette fois-ci avec tous les faux poumons gonflés. Dans ce cas, avec 5 à 8 kg de plombs en plus. En conséquence on gonflera la wings plus que d'habitude, c'est elle qui se chargera de compenser la flottabilité perdue. L'utilisation de plombs largables sera envisagée mais difficile à mettre en œuvre en plongée multi siphon.
- **Un mental adapté** : Confier sa redondance à un 2^{ème} recycleur, n'est pas un réflexe naturel. L'engagement aussi devient important, par les distances et les profondeurs atteintes actuellement avec ce type de configuration. En cas de perte d'un recycleur, on perd plus de 8 heures d'autonomie d'un seul coup. Pour certain, la solution pour réduire ce risque est d'utiliser un 3^{ème} recycleur. Les recycleurs latéraux portés en relais, permettent d'échanger un appareil dans l'eau avec un équipier venu aux nouvelles, ou avec son binôme, à condition d'avoir standardisé les connecteurs entre les membres de l'équipe. D'autres ont choisi de déposer leur 3^{ème} recycleur pour les paliers, plus particulièrement un fermé oxygène à -6m, là où la probabilité de panne est la plus importante du fait de la durée d'exposition. Une dernière solution est l'utilisation de 3 recycleurs. Un appareil petit et compact porté en relais ventral ou dans le dos entouré des bouteilles qui l'alimentent, plus 2 recycleurs relais dorsaux latéraux. Des configurations que je teste actuellement avec la famille de mes X-Men (de fabrication maison), en plus de mes 2 JOKI portés en latéral. Multiplier le nombre de recycleurs, multiplie aussi toutes les difficultés citées ci-dessus.



Photo 13 par Hervé Chauvez : Gérald Beyrand en Double JOKI

- **L'utilisation de 2 recycleurs différents** : Il faudra parfaitement savoir faire fonctionner les 2 machines. Le principal peut être un électronique piloté par ses 2 ordinateurs : le plongeur ne fait que contrôler la bonne qualité du gaz qu'il respire. Si le secours est un mécanique, c'est le plongeur qui pilote lui même sa machine, par intervention manuelle sur la fabrication du gaz qu'il respire. Une configuration avec 2 machines identiques reste malgré tout préférable.
- **Une main pour conduire le propulseur**, l'autre pour piloter les injections d'oxygène sur un mRCF. Une 3^{ème} pour gérer les volumes de la wings et du vêtement sec, et une 4^{ème} pour le dévidoir, sans compter la réalisation de la topographie. Un eRCF piloté électroniquement nous libérera d'une action, mais l'œil du plongeur devra rester vigilant sur les contrôles de sa PpO2, comme sur un mRCF. Malheureusement l'évolution ne nous a doté que de 2 mains. Il faudra être bien précis et très méticuleux dans ses actions
- **Trop de matériel tue-t-il la sécurité ?**
- En plus de tous les problèmes techniques cités ci-dessus, le plongeur devra avoir une très bonne maîtrise de sa technique de plongée. Formation, physique, mental, entraînement : ce type de plongée peut être comparée à un sport de haut niveau incorporant une bonne dose de technique.

5 **Eléments de choix pour le recycleur principal associé à un recycleur redondant :**

Plusieurs types de configurations sont envisageables :

- ***Les recycleurs électroniques normalisés CE : Buddy Inspiration, Megalodon, Ourobouros, Sentinel***
 - o Peu de machine de ce type existent en double. Quelques bricoleurs s'y sont essayés, mais rien de très concluant actuellement. La configuration du eRCF étant déjà assez imposante de part sa conception. En ce qui concerne le choix du recycleur redondant il s'est généralement porté sur un RCF mécanique latéral avec ses bouteilles d'oxy et de diluant portées en relais. Une configuration mixte, eRCF + mRCF, où il faut savoir utiliser 2 techniques différentes, elle est malgré tout encombrante avec tous les relais nécessaires. Mais « reposante » par le simple contrôle du bon fonctionnement du eRCF en principal



Photo 14 par Xavier Méniscus : Serge Césarano en Buddy Inspiration + JOKI

- **Les recycleurs mécaniques importés : le Kiss, le rEvo**
 - o Aucune machine de ce type n'existe en double. On utilisera comme pour un eRCF, un recycleur relais avec ses blocs redondants indépendants. Une configuration identique par la technique du mRCF utilisé, mais aussi très encombrante, avec, en plus, le pilotage manuel du recycleur principal à gérer.

Les bouteilles qui alimentent ces 2 familles de recycleur dorsaux, eRCF et mRCF, pourront être de plusieurs types, mais surtout les 2 machines devront être autonomes, chacune possédant son propre bloc de diluant et d'oxygène. Le recycleur redondant sera utilisé en relais ventral ou dorsal. Des connexions extérieures de gaz auront été rajoutées au recycleur principal par des flexibles avec raccords rapides et anti-retour. Ainsi que la possibilité d'une interconnexion entre chaque source de gaz. Certains plongeurs utilisent un unique gros bloc relais de diluant avec 2 robinets, pour alimenter en même temps leur RCF redondant et le RCF principal, avec ou sans sa petite bouteille embarquée propre

- o Un exemple : Rick Stanton et John Volanthen embarquent dans leur recycleur dorsal, les 2 bouteilles d'oxygène et peuvent n'utiliser qu'une seule bouteille de diluant avec 2 robinetteries pour alimenter en même temps leurs 2 RCF
- **Les recycleurs mécaniques importés cylindriques dorsaux : Voyageur, EDO**
 - o Cette famille de recycleur permet de mettre 2 recycleurs, ainsi que plusieurs blocs de plus ou moins de gros volume dans le dos. Une configuration moins encombrante, au niveau des relais ventraux transportés, mais imposante dans l'eau et lourde à porter hors de l'eau. La gestion facilitée par l'utilisation de 2 machines identiques.
 - **Les doubles recycleurs possédant des éléments en communs :**
 - o Très peu utilisés, une seule machine à ma connaissance, celle de Bernard Gaii Chéca. Il a consacré un article à ce sujet. A lire dans Spélunca N° 95
 - **Un RCF + un RSF**
 - o Cette solution n'est pas dénuée de bon sens. Souvent adoptée par d'anciens plongeurs ayant commencé par utiliser un recycleur semi fermé, avant de le transformer ou d'acquérir un RCF. Si on compte sur les modes dégradés du RCF utilisé en principal, et surtout la possibilité de pouvoir faire la « lunette », on prévoira des gaz suroxygénés pour rentrer et pour la décompression. Dans ce cas, ces gaz pourront aussi servir à alimenter un RSF, machine que l'on maîtrise déjà et, surtout, très simple d'emploi. Une configuration mixte, un RCF + un RSF, où il faut savoir utiliser 2 techniques et principes différents.
 - **Les recycleurs latéraux mRCF : JOKI, BOBY, DDD, BOTS, X-Men3 et HB2**
 - o On les utilise avec son bon vieux bi dans le dos, qui peut être de très gros volume, configuration type du plongeur en circuit ouvert que l'on connaît bien et qui fournit une réserve de gaz importante, par exemple pour récupérer d'un incident. Les 2 RCF viennent se rajouter sur les cotés, dans le dos et en relais, les faux poumons les plus proches possibles et sur le même plan que les poumons du plongeur pour un meilleur confort respiratoire. Un gros avantage consiste à gérer une configuration avec 2 recycleurs identiques. L'apprentissage se fera sur la première machine, la 2^{ème} sera rajoutée ensuite et n'apportera pas de difficultés techniques d'utilisation supplémentaires.
 - Ils sont autonomes mais à piloter en permanence manuellement par le plongeur. On les accroche sur soi, une fois dans l'eau. Le plus souvent, une unique petite bouteille d'oxygène en relais pour le recycleur redondant, la principale étant dans le dos, au milieu du bi, ou sur l'un des cotés, au dessus du recycleur. De l'autre, la bouteille pour le gonflage du vêtement lors de plongées Trimix, ou la 2^{ème} bouteille d'oxygène. Des recycleurs largables en cas de problèmes ou échangeables avec un équipier. Une configuration légère à porter en surface, compacte et relativement peu encombrante dans l'eau du fait de la possibilité de décapeler ses recycleurs lors de passages étroits.



Photo 15 par Michel Conte : Xavier Meniscus en Double JOKI

Conséquences :

- **Avantages :** Une autonomie presque totale. Une équipe restreinte. Poursuite des explorations ayant atteint leur limite en circuit ouvert. Le profil de la cavité ne devient plus un élément d'arrêt de l'exploration avec l'utilisation de la PpO₂ constante. Facilité de récupération en circuit ouvert dans le cas des RCF latéraux
- **Inconvénients :** Financier, par l'acquisition de 2 recycleurs voire plus. Utilisation très technique, maîtrise et connaissance de 2 machines qui peuvent avoir des principes de fonctionnement différents. Encombrement important, agilité et hydrodynamisme moindres. Un « engagement » plus important par les profondeurs et distances atteintes. Nécessite un mental et un entraînement adaptés.

6 Conclusion :

Avec l'utilisation d'un recycleur en plongée souterraine, nous venons d'introduire un nouveau facteur de risque de panne. Celui-ci doit-il s'ajouter à l'unique panne que nous nous accordons actuellement dans notre activité en circuit ouvert ? Je le pense, malgré les multiples possibilités de mode dégradé du RCF. L'utilisation d'un recycleur ne nous affranchit pas du risque de panne de notre circuit ouvert. Personnellement, lors d'une redondance en CO, je suis partisan de prendre la règle des $\frac{1}{2}$ sur 2 blocs séparés. (3ème cas, redondance en circuit ouvert)

Les recommandations fédérales actuelles sont : « En cas de panne complète du recycleur, on doit pouvoir ressortir du siphon dans des conditions de sécurité incluant : une autonomie suffisante (tenant compte d'aléas), des gaz adaptés à la profondeur, une éventuelle décompression. Le retour peut s'effectuer soit en OC soit à l'aide d'un recycleur autonome. » La quantité de gaz pour rentrer devra être calculée sur un rapport allant de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ par rapport à la même plongée effectuée en circuit ouvert, répartie sur une ou plusieurs bouteilles suivant les probabilités de pannes que vous accorderez à votre équipement. Tout en sachant que la déco doit aussi être prévue en ouvert Le rapport de $\frac{1}{4}$ pourra être abandonné, tout comme la règle du $\frac{1}{3}$ l'a été pour le CO. Les modes dégradés ne seront pas considérés, mais sachez qu'ils existent, et sachez les utiliser.

Au delà des éléments connus lors des plongées réalisées avant le passage en recycleur, ou la plongée de nouvelles cavités, la consommation retour en CO sera calculée entre 20 à 35 L/min et prendra en compte, les conditions de plongée, le profil et les profondeurs d'exposition.

La réserve de sécurité sera calculée suivant ce qui vient d'être développé, en multipliant l'autonomie nécessaire pour rentrer :

- **Par 2** sur 2 blocs séparés, pour pallier la panne d'un circuit ouvert (3^{ème} cas, redondance en CO)
- **Par 1,5** sur 1 seul bloc, pour garder une réserve de sécu et tenir compte des aléas (2^{ème} cas, redondance en CO)

La quantité de gaz pour le retour ayant été déterminée en fonction des limites que l'on veut bien se fixer, le recycleur permet :

- De prendre son temps pour progresser dans la cavité
- De découvrir avec attention les beautés du milieu
- De travailler ou topographier les lieux
- De chercher un passage au point le plus éloigné qui n'avait pas été trouvé auparavant par manque d'autonomie en circuit ouvert.

Avec l'utilisation du recycleur on vient d'introduire un risque important d'accident physiologique :

- Hyperhoxie
- Hypoxie
- Hypercapnie
- Noyade de l'appareil

Qu'il faut savoir gérer !

Pas facile, car on est souvent dans le coltar quand ça arrive, voir en perte de connaissance très rapide. Par expérience, pas facile de savoir de qui se passe vraiment, lorsque les premiers signes arrivent. Ne pas hésiter à passer en CO, en ayant prévu une quantité de gaz suffisante et adapté à la profondeur, pour pouvoir respirer en CO pendant au moins 5 minutes au point bas, pour retrouver ses esprits pour ensuite gérer l'incident puis rentrer.

« Le retour peut s'effectuer ensuite soit en OC soit à l'aide d'un recycleur autonome. »

L'anticipation, le contrôle de soit, l'expérience sont les meilleurs chances de s'en sortir.



Photo 17 par Xavier Méniscus : Gaby Hude en X-Men2 et propulseur UV-18 DV

Mais attention, tout peut si bien fonctionner pendant sa plongée que l'on peut rapidement acquérir une trop grande confiance en sa machine. Il est alors facile de se faire piéger, et d'aller un peu plus loin que la raison ne nous l'autoriserait. Il faut bien prendre conscience de ses limites, et bien faire attention à ne pas les dépasser. Mais surtout ne pas oublier les réalités des consommations lors de l'éventuel retour en circuit ouvert car les distances et profondeurs nouvellement atteintes n'ont plus rien à voir avec les anciennes.

En utilisant un recycleur, on croit diminuer le volume de ses bouteilles et augmenter son autonomie, mais en réalité, certaines configurations deviennent moins hydrodynamiques et parfois plus volumineuses. Néanmoins, le plaisir que procure l'utilisation du recycleur et l'absence de stress concernant la consommation, compense amplement ses inconvénients. On ne regarde plus ses manomètres, mais seulement ses oxymètres. Le propulseur devient une composante essentielle de la panoplie du plongeur recycleur. Comme le tout permet aussi d'aller plus loin, se pose alors la question de la redondance du scooter ? Sachant qu'en cas de panne, le retour devra se faire à la palme sur une durée et une distance bien plus longue qu'avant. Mais, en RCF, l'autonomie n'est plus un problème, maintenant ! On a le temps de rentrer ! La redondance du propulseur sera-t-elle à calculer comme en circuit ouvert ?

L'ordinateur de plongée à PpO2 constante devient aussi une composante essentielle de l'équipement. Il permet de calculer sa déco sur ce mode en temps réel, donnant une grande flexibilité dans les profils de plongée.



Photo 17 par Michel Conte : Xavier Meniscus en Double JOKI

Avec tous ces nouveaux instruments, l'exploration des cavités a subi un grand bond en avant ces dernières années. En fond de trou ou en multi siphons, le RCF latéral transportable dans un kit, développé spécialement pour la plongée souterraine, commence, avec de belles équipes, à ouvrir de nouvelles possibilités d'exploration. Dans un avenir proche, peu de cavités résisteront encore à leur utilisation.

7 Une autonomie presque totale :

Le tout recycleur n'a pour principale vocation que l'exploration pure. Se pose alors la question de l'autonomie totale du plongeur qui peut embarquer sur lui tout le matériel nécessaire à sa redondance en ayant à sa disposition : l'utilisation d'un 2^{ème} recycleur, voire d'un 3^{ème} déposé pour sa déco, les modes dégradés sur ses machines avec une réserve de gaz fond et suroxygéné importante, ainsi que l'utilisation de 2 ordinateurs de plongée à PpO2 constante et plusieurs scooters.

Quoi de plus ????

Il est alors potentiellement capable, de réaliser de très grosses plongées, avec une équipe d'assistance réduite, voire même en solitaire. Quelques plongeurs aguerris s'y sont essayés avec succès. De même, le franchissement d'une succession de plusieurs siphons, même très profonds, devient largement plus accessible.



Photo 18 par Gaby Hude : Xavier Meniscus en Double JOKI

La plongée d'exploration profonde et lointaine ne sera-t-elle bientôt réservée qu'à une élite, possédant d'importants moyens financiers pour s'équiper ? Bien heureusement, cela ne concerne qu'une minorité de pratiquants. La plupart viennent chercher aujourd'hui le plaisir de plonger, et la découverte du milieu. Les fédérations, en investissant en matériels collectifs, peuvent les aider à intégrer les équipes des commissions régionales.

A chacun maintenant d'adopter sa propre stratégie de redondance suivant ses moyens, ses capacités et ses envies. Car tout est une histoire de compromis. Ce document pourra, j'espère, vous y aider



Photo 19 par Xavier Méniscus : Buddy Inspiration et JOKI

Bonnes plongées sans bulles à tous

Remerciement :

- A la CNPS
- Frédéric Badier, pour ses travaux, dont je me suis inspiré pour réaliser ce document.
- Correction : JP Stefanato
- Organisation et mise en page : JC Pinna
- Photo : Hervé Chauvez, Josée Aline Bron, François Brun, Michel Conte, Xavier Ménéscus
 - o Sujet : JC Pinna, Baptiste Bénédictini, Gaby Hude, Marc Douchet, Gérald Beyrand, Laurent Bron, Serge Césarano, Pascal Bernabé, Xavier Ménéscus

Ménéscus Xavier

<http://www.dailymotion.com/Minibuss>

<http://plongeesouterraine.oldiblog.com/>