

# De la redondance des recycleurs en plongée spéléologique



Photographie 1 : Redondance asymétrique, la Mescla (06).  
Circuit fermé KISS + Circuit ouvert secours.

## Bernard GIAI-CHECA

Moniteur plongée souterraine F.F.S.  
École française de plongée souterraine  
C.M.S. - C.D.S. 06  
bernard.giai-checa@wanadoo.fr

Écrire un document technique sur la plongée souterraine en recycleurs me démangeait depuis longtemps. Le publier dans l'organe principal de communication de notre fédération me paraissait justifié. Cependant, m'adressant à quelques plongeurs, quelques porteurs (jamais assez !) et une majorité de spéléologues non plongeurs, un de mes soucis fut d'essayer de rendre abordable et compréhensible cet article (dans la limite du possible). Ainsi certaines approches ont été volontairement simplifiées lorsque je l'ai jugé utile et je ne me suis pas attardé sur des détails trop pointus ou des techniques qui mériteraient un développement substantiel dans *Info-Plongée*. Après ces avertissements, plongeons ensemble (pour une fois) dans nos cavités noyées...

## Vers une technique légère en plongée spéléologique

Imaginez-vous assis au bord d'une vasque, les pieds dans l'eau, harnachés d'un scaphandre autonome, dont les performances vous permettent de rester plus de 12 heures « dans un liquide » indépendamment de la profondeur. Sans bouteilles relais, vous envisagez d'aller « au bout du monde » ! Votre logistique est simplifiée (pas de bouteilles de sécurité) et l'assistance est réduite. Vous gérez la plongée ainsi que les paliers (pas de grappe de bouteilles de décompression) loin de l'organisation généralement mise en œuvre pour les plongées complexes. Confiant parce que le scaphandre vous permet d'envisager sereinement une majorité de pannes potentielles (à travers diverses redondances en particulier), vous vous concentrez et vous écoutez le siphon qui murmure doucement : « viens, viens, ... »<sup>1</sup>.

Mais revenons à la réalité. Ce scénario brosse en fait le cahier des charges du projet sur lequel nous travaillons depuis trois ans. Des plongeurs cannois (Les Palmes d'Or) et un groupe international (DrägerKiss) articulent leurs recherches autour des recycleurs et des mélanges synthétiques dans un but d'exploration (plongée en mer sur des épaves profondes pour certains et plongée spéléologique en ce qui me concerne). L'objectif de cet article est de synthétiser ces trois années de travail.

La définition et l'élaboration de nouvelles machines (concepts, matériaux, technologies et techniques) s'effectuent essentiellement grâce à l'outil informatique (Internet et logiciels spécialisés). Ensuite la fabrication ou l'assemblage des prototypes est réalisée de manière semi-artisanale. Des tests et des essais jalonnent nos recherches et leurs résultats permettent finalement de valider ou invalider nos scaphandres. Après plusieurs tentatives et retours en arrière, nous avons développé des **recycleurs en circuit fermé redondants** modelés suivant nos contraintes. Ces appareils sont autonomes et ils répondent à nos critères de sécurité en matière de plongée souterraine.

Loin des expéditions à structure pyramidale, qui multiplie les bouteilles et les plongées préparatoires pour une pointe, nous nous orientons vers **une plongée souterraine en technique légère**, car nous voulons privilégier la fluidité et la rapidité. Nous sommes persuadés que l'efficacité passe par un développement constant du scaphandre et des techniques associées. Mais avant de décrire les spécificités de nos machines et de notre démarche, faisons quelques rappels sur la physiologie humaine et le fonctionnement d'un scaphandre recycleur.

1 - Allusion au siphon aval du Blackboxis (expédition Papou 2003).

# Le principe des appareils à recyclage de gaz

L'air « pur » inspiré est constitué d'environ 20% d'oxygène ( $O_2$ ) et 80% d'azote ( $N_2$ ). À l'expiration il ne contient plus que 16% d'oxygène. Les 4% disparus sont remplacés par 4% de gaz carbonique ( $CO_2$ ). Par contre il reste toujours 80% d'azote. Pourquoi ?

## Les échanges gazeux : de l'alvéole au scaphandre

La physiologie de l'alvéole pulmonaire (élément structural du poumon) et celle de la cellule humaine permettent d'expliquer ce phénomène (« hématoxe » et « échanges tissulaires » pour le plongeur averti) en mettant en évidence qu'à chaque cycle respiratoire, 4% d' $O_2$  ont été métabolisés et 4% de  $CO_2$  rejetés par le corps humain. L'azote est un gaz neutre et inerte dans ces échanges gazeux et son rôle est de diluer l'oxygène qui devient toxique à trop fortes doses et pressions (pour simplifier) ; à l'expiration il est totalement restitué et rejeté.

Ce mécanisme nous permet d'introduire une définition du « **scaphandre autonome** » : sans intervention extérieure, il fournit l' $O_2$  nécessaire à l'organisme combiné à un diluant et il élimine le  $CO_2$  excédentaire. Le détenteur classique gréé sur une bouteille (circuit ouvert) fait partie de cet ensemble. Le fonctionnement idéal s'effectuerait suivant un processus en phase inversée avec le corps humain (figure 1). Dans la réalité le rendement (associé à la synchronisation sur les besoins exacts) est plus ou moins élevé selon la conception de la machine. Construire un recycleur permet d'alléger l'optimisation de ces échanges.



Photographie 2 : Sacs respiratoires et cartouche de chaux (Dräger), circuit pneumatique.

Figure 2 : Principe du scaphandre recycleur.

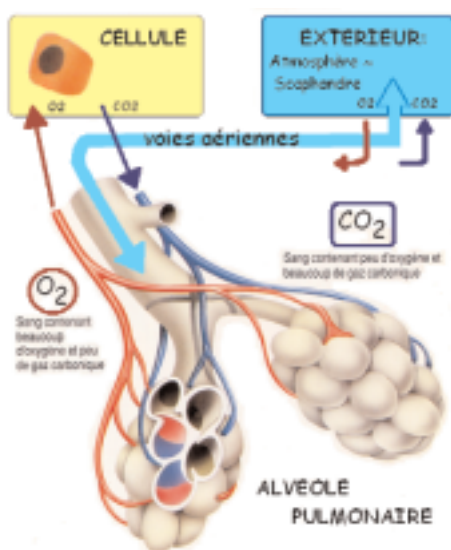


Figure 1 : De l'alvéole au scaphandre.

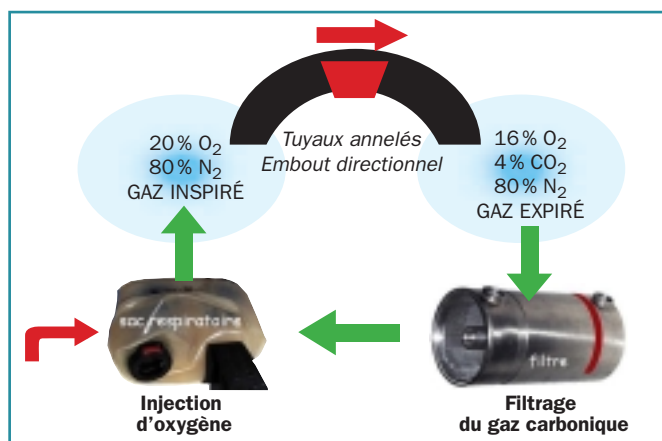
## Le recycleur : du sac poubelle à la boucle respiratoire

Par définition un recycleur recycle les gaz expirés. Cette respiration en boucle implique par conséquent une modification rapide (voire immédiate) de la composition de l'air expiré de manière à rétablir des proportions acceptables par l'organisme humain, car notre corps ne peut pas fonctionner (survivre) si les quantités de gaz respirés (plus précisément les pressions partielles) ne se situent pas dans certaines fourchettes connues. Au-delà le plongeur sera confronté à différents problèmes : crise hypoxique ou

hyperoxique, essoufflement, ivresse des profondeurs (narcose), etc. ; ces incidents / accidents biochimiques peuvent

amener une perte de connaissance (syncope) et une noyade. Nous avons besoin concrètement d'un minimum d'oxygène, mais sans aller dans l'excès, tout comme trop de gaz carbonique est un danger potentiellement mortel ! Faites l'essai de respirer en mettant la tête dans un sac poubelle plastique, vous ne tiendrez pas longtemps...

Pourtant ce sac poubelle est fondamental, car il va constituer le point de départ de la construction d'un recycleur. Renommons ce sac plastique « faux poumon ». Respirons à nouveau dedans en rajoutant cette fois-ci une injection d'oxygène qui compense le déficit et éliminons le gaz carbonique par l'intermédiaire d'un filtre. Constitué par une cartouche remplie de chaux sodée ( $BaOH$  et  $CaOH$  pour les chimistes), les gaz vont y circuler de manière linéaire ou radiale et une réaction chimique va fixer le gaz carbonique (photographie 2). On considère que 6 kg de chaux (environ 6 l) permettent d'épurer un mélange pendant 24 h (donnée militaire). Rajoutons finalement un embout directionnel qui permet de faire circuler les gaz dans un seul sens (clapets anti-retours) et qui est connecté au sac respiratoire par l'intermédiaire de tuyaux annelés en caoutchouc synthétique (photographie 3). Nous venons de bâtir une machine, dont la structure est la base commune de presque tous les recycleurs (figure 2). Ensuite l'injection des gaz et la gestion des diluants de l'oxygène (azote, hélium) différencient principalement les machines. Pour nous situer, décrivons rapidement les différents types de scaphandres recycleurs.



## Les différentes familles de recycleur

Le principe du recyclage des gaz a permis des incursions sous marines bien avant l'avènement du « classique » détendeur à la demande qui a révolutionné le monde de la plongée autonome : amélioré et éprouvé, il est devenu la référence incontournable. Le recycleur a très certainement été délaissé, car il manquait de fiabilité et demandait une maintenance contraignante. Seules certaines activités spécifiques (photographie, biologie, etc.) ainsi que les Armées ont persisté dans ces technologies pour des raisons d'autonomie et de signature faible. Depuis plusieurs années le recycleur redevient à la mode, car ses spécificités redécouvertes sont appréciées par les plongeurs. L'autonomie importante correspond parfaitement aux besoins des spéléologues habitués à des profils longs et profonds. Une analyse systématique de ces appareils permet d'identifier globalement trois familles. Sans rentrer dans les particularités et les détails de construction (développés depuis longtemps dans les articles spécialisés), esquissons rapidement les « traits de caractère » de ces familles.

### Les circuits fermés oxygène pur (C.F.O.)

Ils représentent la première catégorie et ils sont l'outil de travail des nageurs de combat (Oxygers par exemple). Ce sont des machines techniquement rudimentaires et limitées en profondeur à 6 m à cause de la toxicité neurologique de l'oxygène respiré sous pression, qui induit une crise hyperoxique.

### Les circuits semi-fermés (C.S.F.)

Ils définissent un second domaine. La boucle respiratoire (faux poumons, cartouche de chaux sodée, tuyaux annelés et embout directionnel) est soit alimentée en permanence (circuits semi-fermés passifs (**CSFP**) tel que le Dolphin Dräger), soit rafraîchie périodiquement (circuits semi-fermés actifs (**CSFA**) tel que le DC55 asservi au rythme respiratoire) par du gaz neuf qui permet de maintenir des proportions d'O<sub>2</sub> et d'azote/hélium acceptables pour un être humain normalement constitué. Ce système n'est pas le plus efficace, car à chaque expiration un certain volume de gaz s'échappe de la boucle respiratoire par une soupape (photographie 3).

Ainsi dans le cas du DC55, l'asservissement à la respiration permet d'éjecter à chaque cycle respiratoire 1/10<sup>e</sup> des gaz contenus dans le faux poumon (élimination proportionnelle) et de les remplacer par du gaz neuf oxygéné. En ce qui concerne le Dolphin Dräger, l'injection du gaz « neuf » est effectuée par l'intermédiaire d'une buse calibrée qui assure un certain débit (dépendant du gaz) et une quan-

tité d'oxygène relativement stable vis-à-vis du travail musculaire et de la résistance au froid du plongeur.

Soulignons que l'autonomie de ces appareils ne dépend pas de la profondeur. Comparé à un circuit ouvert classique, le rendement est approximativement et en moyenne dans un rapport cinq<sup>2</sup> pour les **CSFP** à débit massique.

La technologie des **CSF** est robuste, fiable et sécuritaire et il n'y a pas d'intervention sur la machine durant la plongée. Pour ces raisons, beaucoup de plongeurs souterrains se sont orientés vers ces scaphandres (ED004, Halcyon, RB80, RI2000, Joker, etc.) malgré le recyclage partiel des gaz. La philosophie et la gestion des circuits fermés, que nous allons aborder maintenant, sont différentes.

### Les circuits fermés (C.F.)

Automatiques (C.F.A.) et manuels (C.F.M.) constituent un univers à eux seuls. La quantité d'oxygène strictement nécessaire au plongeur est introduite dans le faux poumon. Un diluant de l'O<sub>2</sub> (azote ou hélium) est injecté dans la boucle respiratoire pour jouer son rôle vis-à-vis de l'oxygène et pour maintenir le sac gonflé durant les phases de compression qui vont l'écraser (loi de Boyle-Mariotte pour les plongeurs). Il n'y a plus de rejet de gaz à l'expiration : le recyclage est total (sauf pour les phases de remontée).

L'apport d'oxygène pur demande une vigilance accrue et un contrôle régulier du mélange respiré. C'est pourquoi des capteurs mesurent et permettent de réajuster à tout moment la quantité d'oxygène (pression partielle ou concentration) présente dans le faux



Photographie 3 : Redondance symétrique, prototype de demi-recycleur.

poumon. Ce réajustement est soit automatisé par l'intermédiaire d'une électrovanne (Buddy Inspiration par exemple), soit manuel (KISS par exemple). Dans les deux cas, il est nécessaire d'**embarquer de l'électronique**, qui ne fait pas bon ménage avec l'eau et confier sa vie à un circuit imprimé et à une cellule oxygène rebute parfois le plongeur. Pour modérer cette faiblesse des **CF**, la redondance des cellules (deux ou trois) et de l'électronique est la solution actuelle. De plus, le module d'oxymétrie est spécialement préparé et localisé dans la machine de manière à échapper le plus possible à une noyade potentielle de l'appareil et aux **phénomènes importants de condensation** dans les **CF**.

Le recycleur en circuit fermé implique vérifications et interventions (suivant la technologie). Ce « **pilotage** » pourra être ressenti comme une contrainte, mais les automatismes et le rendement quasi optimal de ces machines la feront vite oublier. Dans notre projet nous nous sommes tournés vers des **CFM** de type KISS car ils se rapprochaient fortement de nos



objectifs : simplicité et efficacité. Nous avons amélioré et affiné l'électronique embarquée, rendu le circuit pneumatique plus fiable et finalement développé des procédures d'urgence de manière à rendre cette technique compatible avec des incursions sous plafond. Nous faisons une description synthétique de cette technologie dans le chapitre suivant (sans détailler la construction artisanale).

Pour conclure cette énumération des recycleurs « cohabitants » à l'heure actuelle, il est important de lister quelques avantages communs de ces scaphandres par rapport au circuit ouvert classique. Les différences les plus visibles sont entre autres la diminution ou la disparition des bulles d'expiration, le silence résultant et l'absence de poumon ballast. Les avantages fondamentaux sont **l'autonomie**

et **la déperdition réduite de chaleur par la respiration**. Cette circulation de gaz chauds (sortant de nos poumons et réchauffés aussi grâce à la réaction chimique exothermique d'absorption du gaz carbonique) permet de lutter contre le froid, ennemi du plongeur. Il existe bien d'autres nuances, mais je vous renvoie encore une fois aux documents spécialisés, car ce n'est pas l'objet de cet article... ●

## Le système KISS (CFM)

*L'acronyme KISS signifie « Keep It Simple and Stupid » en langue anglaise. On pourrait le traduire par « restons simples et bêtes ». Il désigne une technique d'injection et de gestion des gaz dans la boucle respiratoire, dont nous nous sommes en partie inspirés pour concevoir nos machines. Méthode simple et robuste, plus connue au Canada et aux USA, elle correspond aux critères de notre cahier des charges.*

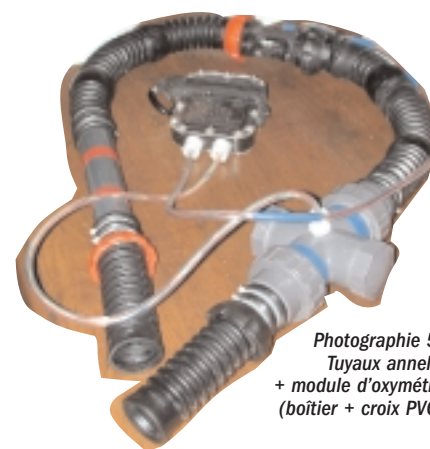
### L'injection d'oxygène

Partant du constat qu'un être humain consomme en moyenne 0,3 l/minute d'oxygène au repos (CMR) et 1 l/minute d'oxygène durant des efforts modérés de palmage (CMEM), nous avons élaboré un circuit pneumatique d'injection de l'oxygène pur. Pour les spécialistes, les pièces maîtresses de ce circuit sont un détendeur (1<sup>er</sup> étage à membrane Poseïdon modifié) non asservi à la pression hydrostatique et en aval un système de ralentissement du flux (restricteur Bird, vanne à aiguille Swagelok ou buse oxygène Dräger). Il permet d'obtenir un débit fixe suivant la pression intermédiaire du détendeur (photographie 4).

Le débit souhaité dépend du métabolisme de chacun et il correspond approximativement à 80 % de la CMEM, soit 0,8 l/minute. Cette quantité d'oxygène arrive dans le sac respiratoire

sans couvrir totalement les besoins du plongeur : par conséquent, le mélange s'appauvrit très lentement durant le palmage. Un réajustement est nécessaire toutes les 20 minutes en moyenne (donnée personnelle) et moins si les efforts sont plus soutenus. Pour alimenter le faux poumon en oxygène nous utilisons une vanne poussoir manuelle (mjv2 Clippard Minimatrics). Quelle quantité d'O<sub>2</sub> doit-on apporter ?

Nous en avons déjà parlé dans le chapitre précédent : la réponse est fournie par l'analyse du mélange (oxymétrie) effectuée par l'intermédiaire de plusieurs cellules (redondance des capteurs) d'oxygène (cellule Teledyne R22D) disposées dans le tuyau annelé inspiratoire et connectées à un circuit électronique artisanal situé dans un boîtier étanche fonctionnant à pression ambiante (photographie 5). Après **calibration**, nous lisons les mesures numériques sur deux ou trois voltmètres à affichage LCD (3 digits ?) et deux diodes (rouge et verte) ramenées au niveau du masque et de l'embout (photographie 1) nous informent sur la tendance du mélange (trop ou pas assez d'O<sub>2</sub>). Une lecture régulière des instruments (synchronisée sur une alarme sonore pour certains) assure un « pilotage » correct du recycleur par des injections manuelles d'oxygène : le plongeur maintient de la sorte une pression partielle d'oxygène (PPO<sub>2</sub>) constante dans le mélange, utile pour pouvoir rentrer dans des tables de plongée et optimiser la saturation (quantité optimale d'O<sub>2</sub> respirée à tout moment).



Photographie 5 :  
Tuyaux annelés  
+ module d'oxymétrie  
(boîtier + croix PVC).

### L'injection de diluant

Elle est gérée de manière automatique par l'intermédiaire d'un détendeur (Dräger Automatic Diluent Valve) branché sur le sac respiratoire. L'oxygène ainsi dilué n'est pas toxique. Pour des plongées jusqu'à 50 m le diluant utilisé est généralement de l'air. Au-delà, on introduit de l'hélium (He) dans le mélange diluant (trimix, héliox) pour réduire les effets narcotiques de l'azote et les problèmes d'essoufflement engendrés par la viscosité des gaz comprimés (le poids moléculaire de l'He, gaz neutre, est très faible). L'hélium pose à son tour des problèmes lors de compressions rapides à grandes profondeurs (Syndrome Nerveux des Hautes Pressions). Mais c'est un autre débat...

L'ensemble du système KISS est protégé par une coque rigide (photographie 4) que nous avons moulée par stratification (tissu de verre et résine polyester) et qui donne entière satisfaction par sa robustesse et sa compacité. Nous avons essayé de conserver toutes ces techniques pour construire les circuits redondants, que nous allons aborder maintenant. ●



Photographie 4 : Circuit fermé KISS artisanal.

## Risque accepté et redondance

La redondance est fondamentale pour le plongeur souterrain mais aussi pour le plongeur profond (plafond virtuel). Elle constitue le sujet central de cet article. Appuyons-nous sur sa définition et sur la notion de fiabilité -pour établir une base de réflexion.

### Définition de la redondance

Nous lisons dans le Grand Larousse Universel : « Redondance : n.f. (Latin *redundancia*). Mise en œuvre de moyens indépendants capables de remplir une fonction donnée, de sorte que, en cas de défaillance de l'un et parfois de plusieurs de ces moyens, la fonction puisse être assurée ». Cela signifie clairement que la multiplication des scaphandres abaisse le risque d'une panne totale. Combien de sources de gaz doit-on emmener dans un siphon pour rendre le risque acceptable ? Une étude de probabilité donne la réponse.

### Fiabilité du scaphandre

Formalisons la constatation précédente ; on obtient l'assertion mathématique suivante<sup>3</sup> : la probabilité de panne simultanée de plusieurs scaphandres est inférieure à celle d'une seule machine. Supposons maintenant qu'un scaphandre tombe en panne 1 plongée sur 200 en moyenne (ce qui est réaliste) et analysons une plongée avec deux appareils. En admettant que le « ou » corresponde à l'opération « addition » en calcul statistique, l'un ou l'autre des deux scaphandres tombe en panne 1 plongée sur 100 ( $1/200 + 1/200 = 1/100$ ). Dans cette situation, l'appareil fonctionnel permet de ressortir du conduit noyé.

### Le risque accepté

En admettant que le « et » représente la multiplication, la probabilité de panne totale de l'une et l'autre des deux machines est de 1 plongée sur 40000 ( $1/200 \times 1/200 = 1/40000$ ). Si on la compare au nombre moyen de plongées qu'un spéléonaute effectue durant « sa carrière », le risque devient acceptable, sachant qu'il pourra encore l'abaisser par un

entretien rigoureux du matériel. En circuit ouvert classique, plusieurs décennies de plongée spéléologique ont montré que le bi-bouteilles séparées (gérées alternativement suivant la règle des tiers ou des cinquièmes) est une référence sécuritaire absolue en France (photographie 6). Dans d'autres pays et notamment aux États-Unis, les plongeurs utilisent des bi-bouteilles connectées. Un robinet d'isolation manœuvrable en plongée permet de séparer les deux scaphandres en cas de problèmes. Le risque accepté est différent, mais il s'explique par l'adaptation du plongeur au profil des siphons.

Globalement, le plongeur souterrain considère que doubler les scaphandres est suffisant dans des conditions standards et il accepte le risque faible d'une panne totale. Dans des situations particulières où la probabilité de panne est accrue (risque de givrage en eaux froides par exemple), tripler les bouteilles (ou plus) permettra de rester dans les limites d'un risque acceptable. On retrouve ce schéma en spéléologie, où doubler et tripler les amarrages répond aux mêmes soucis de sécurité (tout en rassurant les plus timorés !).

Nous avons accepté cette démarche et doubler les scaphandres constitue notre base de redondance pour les recycleurs (nous avons abandonné l'idée de tripler les machines et d'utiliser le recycleur en situations dégradées par la méthode des rinçages ou le basculement du scaphandre de circuit fermé en semi-fermé). Cependant nous allons démontrer que **l'addition simple de deux machines ne forme pas forcément le recycleur redondant sécuritaire et efficace** correspondant à notre norme en matière de plongée.



Photographie 6 : Bouteilles séparées. Calernaüm (06).

## Une nouvelle approche des recycleurs redondants

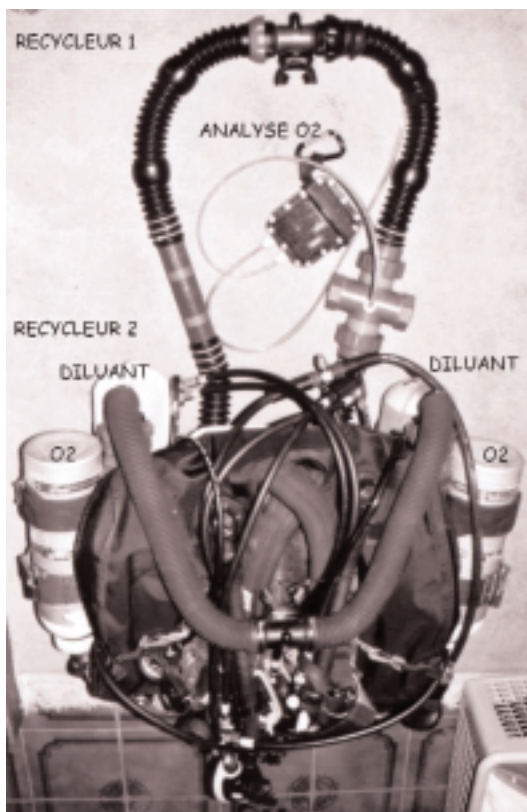
*Au cours de nos expérimentations, nous avons défini plusieurs niveaux de redondance, que nous allons lister de manière chronologique en rapport avec les situations auxquelles nous avons été confrontés (problèmes de poids, de compacité, de sécurité, de pannes, de pilotage, etc.). Dans un objectif de synthèse nous avons mis au point un langage formel pour classer et comparer les machines. J'en donnerai un aperçu succinct et très simplifié, mais cependant, il est important de retenir que c'est l'expérience du terrain qui a permis de bâtir ce canevas.*

### La redondance asymétrique

Dans cette première configuration le plongeur dispose de deux sources de gaz de performances ou qualités différentes (autonomie, confort, gestion, disposition, etc.). Pour le spéléologue, cette situation correspond à posséder un autobloquant en cordelette qui se substituera à une poignée perdue, par exemple.

Le cas le plus trivial de redondance asymétrique est **l'utilisation conjointe d'un recycleur unique et d'un circuit ouvert annexe** (bouteille classique), qui est censé servir de secours en doublant les gaz (bouteilles de sécurité emportées sur soi) ou en permettant au minimum de rejoindre une autre source (bouteilles de sécurité disposées le long d'un siphon par exemple).

3- La physique appliquée à la plongée, J.-C. Ripoll.



Photographie 7 : Redondance asymétrique (principal KISS + secours fermé stab).

Cette technique est utilisée par une majorité de plongeurs souterrains, car elle est facile à mettre en œuvre. Nécessitant une logistique lourde, elle réduit fortement l'efficacité du recycleur, incitant certains à faire confiance à une unique machine ou à leur binôme de plongée. Plusieurs explorations dans Wakulla Springs (USA) ont été réalisées sur ce schéma. De même nos premières plongées tests en siphon ont été effectuées avec un circuit fermé KISS et des bouteilles secours classiques. La logistique importante, l'hydrodynamisme réduit, la puissance étouffée du recycleur et le poids limitant en post-siphon ont été des critères de renoncement.

La redondance asymétrique englobe aussi l'**utilisation de deux recycleurs ayant des performances différentes** (manipulations, confort, autonomie, alimentation, etc.). En général le plongeur pilote une machine principale et dispose d'un secours construit suivant une technologie simplifiée. Il respire sur le principal et passe sur le secondaire en situations dégradées (fuite sur le circuit pneumatique, défaut dans le module d'oxymétrie, boucle respiratoire noyée, etc.).

Nous avons développé cette technique en associant un circuit fermé KISS à un second circuit fermé, dont le sac respiratoire était constitué par le gilet de stabilisation connectée à des

tuyaux annelés et à deux demis filtres épurateurs de gaz carbonique (photographie 7). Oxygène et diluant étaient injectés par l'intermédiaire d'inflateurs de direct systèmes traditionnels. Après plusieurs essais, il s'est avéré que le déséquilibre des performances et le mélange problématique de la respiration et de l'équilibrage dans certains profils de plongée (remontée d'urgence dans un puits par exemple) ne garantissaient pas totalement notre sécurité.

Pour donner une idée de notre classification des machines suivant leurs performances, décrivons en langage formel une situation à problème où une des deux machines tombe en panne. Pour cela, paramétrons la machine avec deux variables : la boucle respiratoire « a » et les gaz « G » (dans la réalité nous utilisons beaucoup plus de paramètres pour arriver à simuler et comparer les scaphandres). Si **R(a,G)** et **R(b,G)** représentent deux recycleurs R avec des boucles respiratoires respectives « a » et « b » et des quantités de gaz « G » identiques, la situation de panne pourra s'écrire de la manière suivante :

**R(a,G) + R(b,G) à R(alb,G) :**  
**redondance asymétrique**

Dans notre langage « + » signifie « **utilisation alternative** », « ~ » signifie « **équivalent** » et « à » signifie « **dégradation** ». De même « & » signifie « **et** » et « l » signifie « **ou** ». La réaction précédente s'interprète ainsi : après dégradation du système la boucle « a » ou la boucle « b » restera fonctionnelle et une seule quantité de gaz « G » restera disponible : ceux du recycleur en panne sont inutilisables ! Notons que la redondance est ici asymétrique sur les boucles respiratoires.

### La redondance symétrique

À l'opposée de la redondance asymétrique, le plongeur dispose maintenant de deux sources de gaz de performances et qualités équivalentes, en l'occurrence deux recycleurs identiques. En spéléologie, cela correspondrait à disposer d'une poignée de rechange dans un contexte de réchappe.

L'étape suivante de notre démarche a donc été de construire un double recycleur **KISS + KISS**, où nous respirions alternativement sur les deux machines. Les règles de consommation

(tiers et cinquièmes) passèrent au second plan, car chacun des scaphandres possédait une autonomie de huit heures, durée largement supérieure à nos temps fond. Il faut noter qu'actuellement c'est la capacité d'absorption du gaz carbonique qui est le facteur limitant du recycleur et non pas la quantité de gaz emportée.

### Avantage

La respiration alternative permet d'entretenir périodiquement les réactions chimiques de filtrage, ce qui est un gage de sécurité, car un filtre froid est inefficace et demande un certain temps pour s'initier. De plus, comme sur un scaphandre classique, l'accès cyclique assure que les deux machines sont fonctionnelles à un instant donné.

### Inconvénient

La difficulté majeure réside dans la gestion en parallèle et en continu de deux boucles respiratoires en circuit fermé, car à tout instant les deux appareils doivent être respirables (mélanges dont les proportions des constituants sont dans la « norme » du plongeur). De plus, si on veut planifier une décompression, les mélanges doivent être identiques dans les deux faux poumons. En langage formel on est sûr de disposer après dégradation d'une boucle respiratoire « a », mais cependant on perd toujours la moitié des gaz :

**R(a,G) + R(a,G) à R(a,G) + R(0,G)**  
**~ R(a,G) : redondance symétrique**

Cette technique est satisfaisante, mais perfectible. Elle nous a assuré une gestion et une sécurité se rapprochant des standards de l'E.F.P.S. en circuit ouvert. Au cours de l'année 2003, ce système de redondance m'a permis de parcourir les siphons de la grotte de la Mescla (Alpes-Maritimes) jusqu'au terminus actuel (-80 m) en utilisant simplement 2 x 4 l de diluant HélioX (oxygène et hélium) et 2 x 2 l d'oxygène pur (S2 en propulseur).

### La redondance évolutive

Après les considérations de symétrie, nous avons défini une redondance, où le système peut évoluer (ou se transformer) de manière automatique (ou manuelle) suivant la situation ou les besoins du plongeur. En technique de réchappe, le spéléologue remplace par



exemple sa poignée perdue par un bloqueur de pied.

Dans ce cadre, nous avons principalement développé la communication entre les recycleurs, car la mise en « contact » des boucles respiratoires permet une **homogénéisation des gaz**. De la sorte on résout le problème majeur de notre machine précédente : la gestion est simplifiée et on est assuré de disposer de gaz respirables et identiques lors d'un changement de recycleur.

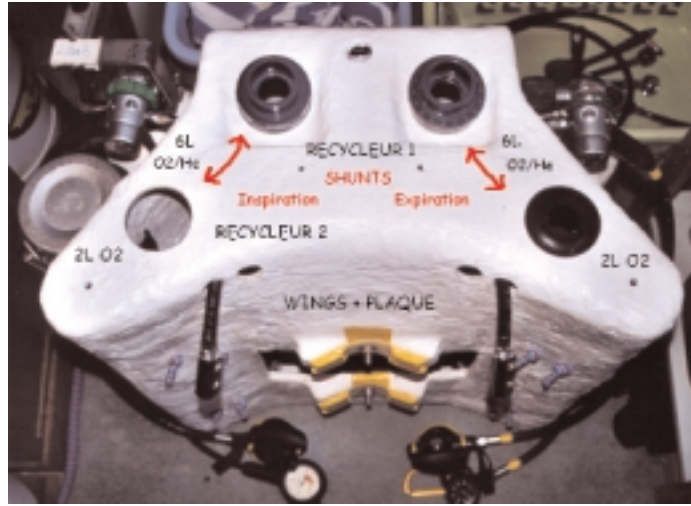
Nous avons élaboré un shunt permettant de relier les sacs respiratoires entre eux mais aussi de les séparer rapidement (la gestion se rapproche de celle des bi-bouteilles avec vanne d'isolation pour séparer les bouteilles). Ce système **KISS-KISS** nous donne entière satisfaction (photographie 8), car il y a maintenant moins de paramètres à gérer et les manipulations sont réduites. De plus les deux boucles respiratoires affichent des valeurs identiques de PPO2, ce qui est un moyen supplémentaire de vérifier la **pertinence des mesures**. En langage formel, il est évident qu'avant dégradation, nos deux recycleurs sont équivalents à une unique machine disposant de deux boucles et d'une quantité unique de gaz. Après dégradation, les résultats sont les mêmes que précédemment :

$R(a,G) + R(b,G) \sim R(a\&b,2G)$  à  
 $R(alb,G)$  : redondance évolutive  
 asymétrique

$R(a,G) + R(a,G) \sim R(2a,2G)$  à  
 $R(a,G)$  : redondance évolutive  
 symétrique

Et, ultime avantage, les cartouches de chaux sont traversées en continu (avec des flux différents) par du gaz ce qui permet **d'entretenir les réactions chimiques** et d'assurer le bon filtrage sur les deux machines à tout instant (disposition fondamentale pour la plongée profonde).

Dans ce même cadre, nous avons mis au point d'autres modifications liées à la redondance évolutive, mais je n'ai pas la place d'explicitier ces aménagements, qui concernent particulièrement la gestion des gaz et le circuit pneumatique. Notons que la redondance évolutive peut être symétrique ou asymétrique. À ce niveau, notre objectif fut de minimiser poids et volume et



Photographie 8 : circuit redondant évolutif KISS-KISS.



Photographie 9 : recycleur semi-fermé artisanal redondance symétrique.

surtout de travailler sur la sécurité et l'optimisation de la gestion des pannes. C'est pourquoi nous avons introduit la redondance modulaire, sujet de nos recherches actuelles.

### La redondance modulaire

Jusqu'à présent nous avons assuré la redondance de notre scaphandre en le doublant, ce qui revient à emporter sur soi au minimum deux fois plus de poids et de volume. Par contre, si on essaye de décomposer le recycleur en différents organes (boucle respiratoire, filtrage, gaz, circuit pneumatique, etc.) et que l'on assure la redondance de chacun, on peut organiser la machine de manière plus compacte et plus efficace : un unique recycleur avec tous ses organes doublés.

En effet lorsqu'un organe est défaillant, le relais est pris par son jumeau sans que cela modifie le fonctionnement des autres organes de la machine. La physiologie du corps humain est le plus bel exemple de

redondance modulaire (2 poumons, 2 reins, etc. mais 1 cerveau et 1 cœur : je laisse les spéléologues philosophes disserter...). Sous terre, le spéléologue malchanceux disposerait par exemple d'une gâchette pour remplacer celle de sa poignée cassée. Dans le langage formel de simulation des performances, il apparaît clairement que maintenant nous conservons l'ensemble des gaz après dégradation, ce qui traduit la redondance modulaire des boucles respiratoires :

$R(a,G) + R(b,G)$  à  $R(alb,2G)$  :  
 redondance modulaire asymétrique




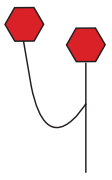
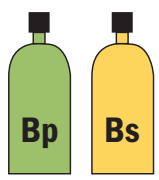
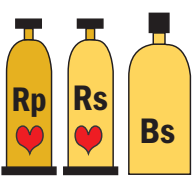
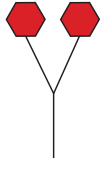
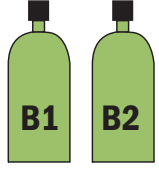
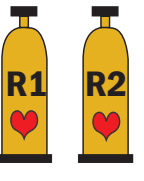
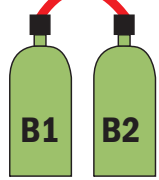
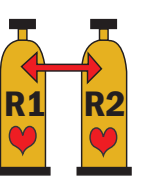
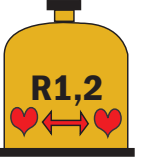
$R(a,G) + R(a,G)$  à  $R(a,G) + R(0,G)$   
 $\sim R(a,2G)$  : redondance modulaire  
 symétrique

Nous avons ainsi construit un unique recycleur et assuré la redondance des organes « nobles » qui se

suffisent à eux-mêmes. Ce système, le **KISS Mod**, a commencé d'être testé : il associe l'autonomie, la sécurité, un poids et un volume plus réduits. La version la plus récente du scaphandre fonctionne sur un schéma d'injection plus généraliste que le KISS, qui permet de jongler de semi-fermé (photographie 9) en fermé avec une intervention réduite sur la machine. On a voulu optimiser la gestion des gaz en conditions difficiles (turbidité entraînant une impossibilité de lecture des afficheurs, étroitures où les mains ne sont pas forcément disponibles, etc.). ●

## Le futur et les problèmes connexes

*Le développement d'un recycleur redondant évolutif modulaire est pour nous un objectif central. Il conditionne en partie nos futures explorations. Au-delà, il permet de rassembler des plongeurs et des spéléologues à travers un objectif commun de recherche. En espérant que cet article ne se soit pas transformé en simple somnifère pour stygophobe endurci, je voudrais encore insister sur le fait que ces quelques explications étaient attendues et que l'importance du sujet méritait ce développement. Qu'il puisse donner des idées et éveiller la curiosité ! Pour terminer, j'aimerais lister les problèmes connexes (autres que le scaphandre) sur lesquels nous nous penchons parallèlement.*

			<b>Pas de redondance (scaphandre unique)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 amarrage</li> <li>- 1 bouteille B</li> <li>- 1 recycleur R (organes : ❤️)</li> </ul>
			<b>Redondance asymétrique (majorité des plongeurs)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 amarrages dont un seul est sollicité</li> <li>- 1 bouteille principale BP</li> <li>+ 1 bouteille secours BS</li> <li>- 1 recycleur principal RP</li> <li>+ 1 secours (1 recycleur RS ou des bouteilles BS)</li> </ul>
			<b>Redondance symétrique (quelques plongeurs)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Y avec sollicitation des 2 amarrages</li> <li>- 2 bouteilles (B1, B2) avec respiration alternative selon « la règle des tiers »</li> <li>- 2 recycleurs (R1, R2) identiques avec utilisation alternative</li> </ul>
			<b>Redondance évolutive (technique originale)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 bouteilles (B1 + B2) connectées et séparables par un robinet d'isolation</li> <li>- 2 recycleurs (R1, R2) connectés et séparables (homogénéité des gaz, entretien des réactions et pertinence de l'analyse)</li> </ul>
			<b>Redondance modulaire (technique originale)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 recycleur R1,2 dont tous les organes sont redondants et se suffisent à eux-mêmes</li> <li>- pas d'équivalent en circuit ouvert</li> </ul>

### La décompression

La décompression en recycleur (en PPO2 constante pour les spécialistes) nous a orientés vers de nouvelles modélisations : Varying Permeability Model (VPM) et Reduced Gradient Bubble Model (RGBM). Grâce à un logiciel (V-Planner) et des ordinateurs de plongée (HydroSpace Engineering Explorer) nous planifions nos décompressions, qui nous transforment parfois en cobayes lorsque nous plongeons avec des mélanges HélioX (oxygène/hélium).

### La propulsion

La propulsion passe aussi par la redondance. La gestion alternative de deux propulseurs (ou plus) résout une majorité de problèmes liés aux déplacements et à la consommation. Nous essayons aussi d'améliorer l'hydrodynamisme en travaillant sur la position, le volume des bouteilles et l'ergonomie du scaphandre.

### La progression post-siphon

La progression post-siphon et le fond de trou nous imposent de minimiser le poids du matériel et de développer la modularité du scaphandre pour le transport (déstructuration). De la même manière, certaines conditions de plongée (froid, plongée solitaire, etc.) nous obligent à réfléchir sur de nouvelles techniques, dont en particulier un masque facial adapté au recycleur redondant. ●

### Remerciements

Ce travail est collectif et je le partage avec des spécialistes de l'activité, dont Philippe Chappot, Christian Foucras, Christian Gastaldi, Jean-Michel Urbani et Jacques Vettier. Je les remercie de nos longues discussions, de nos journées de bricolage et de nos plongées expérimentales. Je remercie aussi l'E.F.P.S. pour son soutien ainsi que Jérôme Espla, Gilbert Fernandes et Robert Le Pennec pour leurs photographies.

Photographie 10 : Techniques légères en plongée spéléologique, grotte de la Mescal (Alpes-Maritimes).

