

De l'usage opérationnel des recycleurs pour explorer des siphons

Pierre Boudinet

1. Introduction

Ce qui suit s'appuie sur plus de dix ans d'expérience progressive de plongée de siphons en recycleur par l'auteur. Cela inclut des plongées d'exploration en Allemagne, des plongées lointaines à la palme à plus de 1000 m de l'entrée en France et quelques plongées avec transport de matériel sous terre. Ce qui suit ne concerne pas la « course aux records » personnels comme généraux tels que plongée très profonde mais d'avantage l'utilisation au quotidien, « courante », du matériel.

2. Avantages d'utiliser des recycleurs

L'avantage le plus évident est l'autonomie : pouvoir aller profond et loin (pendant une durée importante) dans un siphon sans devoir transporter un grand nombre de bouteilles comme en circuit ouvert. Néanmoins, cet avantage doit être mis en face d'inconvénients tels que :

- Encombrement et fardage plus importants qu'en circuit ouvert ;
- Mise en place d'une redondance correcte plus malaisée et moins intuitive qu'en circuit ouvert (voir plus bas), on ne peut pas s'appuyer sur l'expérience des plongées précédentes¹ ;
- Coût de la redondance, soit en termes de bouteilles en circuit ouvert à transporter néanmoins, soit en termes de second recycleur à transporter. Alternier entre deux recycleurs est moins facile que d'alternier entre les deux côtés indépendants du scaphandre en circuit ouvert ;
- Fragilité de l'équipement lors du transport et sous l'eau ;
- Atteinte de limites non-liées à la consommation de gaz, telles que froid, quantité maximale de gaz carbonique pouvant être fixée par la chaux sodée (donc durée en lien avec le métabolisme de base), décompression prohibitive, etc.

L'autonomie à d'autres échelles temporelles reste un autre avantage important :

En expéditions de petite taille, lorsque l'accès à un compresseur ou à de l'oxygène est difficile, l'utilisation d'un recycleur permet d'effectuer plusieurs plongées longues là où des techniques de circuit ouvert ne le permettraient pas. Par exemple un recycleur est alimenté par une bouteille qui sert pour plusieurs plongées et sécurisé par une bouteille (au minimum) qui n'est entamée qu'en cas d'incident. Même si l'accès à un compresseur est possible, changer la chaux sodée d'un recycleur prend moins de temps, génère moins de bruit, demande moins d'efforts de portage du compresseur ou de temps de route pour accéder à une station de gonflage.

D'autres avantages sont également très appréciables même si rarement explicitement mentionnés :

- Absence de détente adiabatique comme en circuit ouvert. Cela est un souci en mer chaude mais c'est un grand avantage dans un siphon froid : on respire des gaz réchauffés par la réaction de fixation du gaz carbonique sur la chaux sodée et non-pas refroidis ;
- Furtivité (moindre dérangement de la cavité, de sa faune, de ses riverains et de ses abords immédiats). À noter que la furtivité dépend d'autres éléments tels que l'éclairage et l'absence de bulles créées par la purge d'un vêtement sec ou bien le vidage d'un masque ;

- Réduction d'émission de bulles pouvant décrocher de l'argile – ou des blocs – du plafond de la galerie ;
- L'absence de « poumon-ballast » fait que la flottabilité devient indépendante du rythme et de l'amplitude respiratoire. Après entraînement cela peut procurer un meilleur équilibrage et une meilleure position pour palmer ;
- Autonomie pouvant encore dépendre des efforts fournis (fixation de gaz carbonique) mais ne dépendant plus du rythme respiratoire sauf cas particulier. Autonomie maximale dépassant souvent largement la durée prévue de la plongée : on a moins à se soucier de réserves de temps et d'autonomie en cas d'incident (« garder x bars en cas d'emmêlement »).

3. Sources de danger

1. Liées aux recycleurs eux-mêmes

1. Généralités en siphon

Comme pour le matériel classique, l'absence de surface libre rapidement atteignable décuple les problèmes. De façon non-exhaustive, on peut citer :

- Une panne, dont le mécanisme est souvent différent du circuit ouvert, survenant brutalement ou progressivement loin de l'entrée, avec le risque de ne pas avoir assez de ressource (redondance ou fonctionnement en « mode dégradé ») pour ressortir ;
- La brûlure par ingestion de mélange de chaux sodée et d'eau (« bouillie ») ;
- L'erreur de mélange ou la panne conduisant à respirer un mélange inadapté (hypoxique, hyperoxique, narcotique) ;

2. Différentes catégories de matériel

Les recycleurs gérés électroniquement en circuit fermé (« eCCR ») sont considérés comme la catégorie supérieure de matériel : le rendement théorique est de 100 %, tout l'oxygène consommé des bouteilles est métabolisé, une boucle de rétro-action contrôle en permanence la teneur en oxygène et en injecte juste la quantité nécessaireⁱⁱ.

À l'autre extrême, il existe des matériels, souvent artisanaux, dépourvus de toute boucle de rétro-action, voire de tout contrôle de la teneur en oxygène (en infraction des réglementations françaises). Alimentés avec un débit massique constant réglable ou non par l'utilisateur, ils laissent échapper une partie des gaz (circuit semi-fermé « SCCR ») et n'ont pas un rendement de 100 %.

Entre ces deux marges existent différentes architectures telles que SCCR pourvu d'une boucle de contrôle de la teneur en oxygène et/ou d'une injection d'oxygène à un débit massique légèrement inférieur à celui requis par le métabolisme de base, ou bien encore recycleurs « à purge proportionnelle » : à chaque cycle respiratoire une fraction donnée du mélange, déterminée par la mécanique du dispositif, est expulsée.

Le tableau ci-dessous présente de façon non-exhaustive des risques spécifiques liés à différentes « architectures »

	CCR	Purge proportionnelle	SCCR sans aucun contrôle
Cognition	Saturation cognitive possible due à la lecture obligée des instruments. Au contraire, fausse sensation de sécurité possible : « la machine gère tout ! »	Le siphon impose le profil de plongée. Si « trop loin » en exploration, possibilité de se trouver en hypoxie ou en hyperoxie (rapport cyclique ou mélange inadapté lorsque le siphon « descend » ou « remonte ».	Nécessité de développer des réflexes pour réaliser les situations d'hypoxie, d'hyperoxie, plus généralement de débit massique inadapté
Logiciel	L'existence de modes dégradés et de boucles de sécurité diminue fortement mais n'annule pas le risque de panne logicielle « active » (ouverture intempestive d'électrovannes, mauvaise rétro-action, etc.) rendant le matériel dangereux ou inutilisable	Risque de panne logicielle « passive » type indications affichées erronées.	Aucun logiciel embarqué mais le mélange renseigné dans l'ordinateur de plongée peut différer de celui réellement respiré
Matériel	Risque de panne matérielle (électro-vanne bloquée en position fermée, etc.) La saturation cognitive peut faire ignorer ou mal interpréter les indications d'un HUD	Beaucoup de parties mobiles : risque accru de panne avec ou sans entrée d'eau, permettant ou non d'utiliser encore l'appareil en « mode dégradé ».	Panne matérielle plus probable si matériel « artisanal », plus rapidement identifiée et traitée si l'utilisateur est le constructeur
Métabolisme	Indépendance totale par rapport au métabolisme. Très bon contrôle de la décompression quand tout va bien	Teneur en oxygène dépendant et du métabolisme et du rythme respiratoire	Teneur en oxygène dépendant du métabolisme si débit massique non-ajusté. Incertitudes cachées quant à cette teneur
Autonomie	À cause du rendement maximal, ne serait-ce que vider un masque consomme une quantité non-négligeable de gaz. En cas de panne, un tel appareil porté dans le dos (« appareil principal ») une fois noyé ou inutilisable peut constituer un fardeau impossible à abandonner. Mais si on peut l'abandonner (avec sa BOV) alors les bouteilles qui l'alimentaient ne sont pas forcément utilisables « en circuit ouvert ».	Possibilité de ne pas pouvoir ajuster le « rapport cyclique » si fixé par construction.	Le rendement étant plus faible, l'appareil nécessite de plus grosses bouteilles pour être alimenté. Risque possible de dépassement d'autonomie, surtout si une même bouteille sert et à alimenter le recycleur (par exemple 1/5) et de redondance partielle (par exemple 4/5). Pilotage par un unique paramètre (débit massique ajustable) permettant, avec de bons réflexes, de s'adapter aux situations de descente, remontée, efforts, etc.

2. Liées à l'interaction avec l'emploi de matériel classique

Comme contrairement à de l'équipement classique respirer lentement n'augmente pas l'autonomie, on se retrouve plus ou moins rapidement, par paresse, confort, etcⁱⁱⁱ. à respirer à un rythme « normal » c'est-à-dire plus élevé : cela correspond à une perte d'entraînement au matériel en circuit ouvert. Ce dés-entraînement à respirer lentement doit être pris en compte lors de toute redondance « asymétrique ».

En circuit ouvert, la planification d'une plongée s'appuie sur toutes les plongées précédentes. De plus, sauf pour la décompression, les règles d'autonomie (cinquièmes, quarts, tiers, etc. pour les bouteilles principales, tiers ou 40 % pour les relais) sont indépendantes du temps en lui-même ou de la consommation en elle-même.

Les règles concernant les deux bouteilles principales sont symétriques donc optimales. Ce n'est pas la même chose en recycleur. Protéger un recycleur défaillant avec des bouteilles classiques nécessite d'estimer la quantité de gaz nécessaire sur la seule base de paramètres tels que durée et profondeur. Incidemment le protéger avec un autre recycleur, même du même modèle, ne peut s'effectuer de façon symétrique (c'est-à-dire en testant en permanence l'un et l'autre appareil). Il subsiste un risque plus élevé « d'aller loin, d'avoir un souci et de s'apercevoir que l'appareil de secours ne fonctionne pas ». N'utiliser que des recycleurs empêche de passer même temporairement sur circuit ouvert, ce qui peut être nécessaire pour récupérer d'un essoufflement ou dans certains cas de saturation cognitive (emmêlement en pleine eau sans visibilité par exemple).

« Les connectiques pour l'oxygène et le diluant doivent impérativement être non-compatibles » : les recycleurs « commerciaux » sont alimentés par des bouteilles spécifiques, auxquelles ils sont raccordés par des raccords spécifiques. Bien qu'une permutation de recycleur à recycleur, ou de deux bouteilles de même raccord soient possibles, en cas de protection par des bouteilles de circuit ouvert classiques, ou de coexistence avec ces dernières dans un même siphon, il est impossible avec du matériel commercial aux normes de permuter une bouteille du recycleur avec une bouteille en circuit ouvert.

À l'inverse, un recycleur « fait maison » et conçu pour être alimenté avec toute bouteille de plongée via le Direct System (DS) exposerait à des erreurs de branchement pouvant être graves, notamment ces deux-ci :

- Raccorder le recycleur en profondeur sur une bouteille d'oxygène pur ou de mélange hyperoxique ;
- Raccorder le recycleur sur une bouteille d'air, pire, de mélange hypoxique (trimix) dans une zone pas assez profonde.

Ces erreurs peuvent être prévenues en fermant en profondeur certaines bouteilles ou en les déposant si on n'en a pas besoin plus loin, en étiquetant les DS et, au cours du processus de recherche-développement, en ayant effectué des crash-tests avec une alimentation en air pour développer les réflexes et procédures adéquats^{iv}.

En cas de plongée en binôme avec du matériel en circuit ouvert, réaliser un « échange d'embout » pour revenir à la sortie en suivant un long parcours n'est pas envisageable pratiquement (pour éviter un double drame, c'est même un des avantages de plonger seul). Néanmoins, dans des situations moins engagées, il reste possible d'échanger des relais (par exemple « prêter » un relais à un binôme qui aurait surconsommé pour protéger son retour) ou même, sur de courtes distances dans certaines situations, de « prêter » un détenteur principal au binôme. Une telle aide devient beaucoup plus malaisée en recycleur sans entraînement spécifique, qui doit être anticipé. Incidemment, même dans la vasque d'un siphon ou dans une piscine, tous les embouts de recycleur ne se manœuvrent pas aisément d'une seule main.

3. Liées au contexte commercial et réglementaire

L'achat de la quasi-totalité des appareils commerciaux est soumis à obligation de formation. Toutefois cette formation présuppose que l'utilisateur va employer le matériel en milieu ouvert, milieu pour lequel il est conçu. Or le milieu siphon est très différent, même avec du circuit ouvert, certains réflexes ou procédures salvateurs en milieu ouvert sont inadaptés, voire funestes (« remonter en cas de problème », « cesser la plongée en cas de problème » n'est plus envisageable).

Comme pour une majorité de formations à l'usage d'objets manufacturés, ce type de formation ne reproduit pas, ne synthétise pas, le processus de recherche-développement et suppose que l'utilisateur n'a pas à avoir une connaissance détaillée des rouages internes (matériels ou figurés) du dispositif. En siphon toutefois, le fait de ne pas avoir de représentation mentale correcte d'un incident conduit souvent à ne pas pouvoir le résoudre, à l'aggraver. Au mieux, on le résout mais de façon pas optimale. Exemple : cesser d'utiliser un recycleur « qui bipe » alors qu'on aurait pu continuer de respirer dessus et économiser de la redondance en circuit ouvert en prévision d'autres soucis toujours possibles.

Au contraire, le processus de recherche-développement présidant à la fabrication d'un recycleur utilisable en siphon fournit, au cours des nombreux essais, une formation progressive aux incidents réels et à la façon de les traiter. La réaction et la résistance à l'hypoxie et l'hyperoxie sont très variables, un « entraînement » à ces situations^v présente plus d'inconvénients que d'avantages. Toutefois, même si le sujet est controversé, le développement de l'hypoxie et l'entrée dans des situations hyperoxiques ne s'établissent pas dans un recycleur comme dans une fosse septique qui fermente ou dans un laboratoire de physiologie. Savoir identifier et éviter « par réflexe » les situations pouvant y conduire est de la plus haute importance^{vi}. Deux soucis potentiels sont afférents à une démarche de recherche-développement :

- La possibilité, au cours d'un nombre d'essais réduits (une centaine ?) de ne pas avoir exploré tous les mécanismes possibles d'incident ou de ne pas avoir correctement estimé leurs probabilités, voire carrément de ne pas les avoir anticipés si lacunes de connaissance scientifique ;
- L'adaptation progressive à ce qui serait des défauts rédhibitoires (conception, dimensionnement, etc.) pour tout autre utilisateur et que l'on finit par considérer comme « normaux » : il est encore moins possible de prêter ce genre d'équipement !

4. Examen de quelques limites opérationnelles

Ce qui suit concerne aussi bien un SCCR sans contrôle que les possibles « modes dégradés » d'autres équipements.

1. Profondeur

En zone « peu profonde » il est possible d'alimenter l'appareil à l'oxygène pur (jusqu'à 6 m). Pourvu que le matériel soit correctement purgé au départ, cela évacue tout problème de contrôle de la teneur en oxygène et tout problème du contrôle du débit (s'il n'y en a pas assez on le sent, car la flottabilité diminue, s'il y en a trop des bulles s'échappent). Mais peu de siphons se développent longtemps entre 0 et 6 m et un matériel défectueux ou mal employé peut conduire à une situation d'hypercapnie.

En zone « intermédiaire » (6m à environ 40 m), on respire un mélange suroxygéné mais pas de l'oxygène pur, ce qui introduit plusieurs limites :

- La teneur en oxygène du mélange respiré diffère potentiellement de la teneur en oxygène du mélange injecté, le débit doit être ajusté de façon à contrôler la bonne composition ;
- La décompression doit s'effectuer en en tenant compte ;
- Un débit insuffisant entraîne une situation hypoxique, un débit trop élevé diminue l'autonomie et/ou entraîne une hyperoxie plus ou moins grave.

En zone « profonde » (au-delà de 40 m, là où la plongée en circuit ouvert à l'air commence à atteindre des limites), il faut respirer un mélange normoxique ou hypoxique (à comprendre : « qui serait hypoxique en surface ») :

- La marge de contrôle entre « mélange respiré hypoxique » et « mélange respiré hyperoxique » se rétrécit ;
- Tout écart de composition a une influence notable sur le schéma de décompression (respirer un mélange hypoxique équivaut à plus de gaz inerte, donc une profondeur équivalente accrue - « barre de 18 m » si l'on se livre à des calculs^{vii}) ;
- Même avec des mélanges à base d'hélium, les gaz deviennent plus denses, moins faciles à ventiler : bien qu'il évacue une grande partie de la « pression du temps » éprouvée en circuit ouvert, le matériel reste moins facile à employer avec aisance en zone profonde qu'un circuit ouvert bien réglé, à cause de des pertes de charge dans la boucle.

2. Type d'emploi

Ce qui suit peut correspondre à différentes étapes de mise en œuvre de recycleur, de plus en plus engagées.

Employer un recycleur en décompression permet pour des décompressions importantes d'alléger le stock de bouteilles à mettre en œuvre et pour des décompressions moins importantes d'économiser l'oxygène. Il y a en principe peu d'efforts, et moins d'attention à porter à l'environnement en l'absence de progression : on peut porter une grande attention au bon fonctionnement du matériel et au contrôle de la teneur en oxygène. Enfin, au moins pour certaines cavités, en cas de soucis on reste près de la sortie même si elle ne peut être immédiate. *Cette idée n'est pas originale, la FFESSM l'avait émise il y a plus de 15 ans et plusieurs personnes la pratiquent ou l'ont pratiqué depuis plus de 30 ans.*

Employer un recycleur en exploration, c'est-à-dire aller avec jusqu'au bout de la zone connue pour continuer plus loin, demande d'être entraîné à manipuler et poser du fil d'Ariane avec ce type de matériel. Ce n'est pas forcément évident à cause de la saturation cognitive plus importante qu'il introduit (lire de nouveaux instruments ou développer de nouvelles sensations) et des variations de profondeur rapides éventuelles. En cas d'incident grave, il faut être prêt (matériellement et mentalement) à rentrer sur l'équipement de secours.

Entre les deux pratiques précédentes, même si cela ne fait pas partie des options officielles du matériel commercial, il reste possible d'employer un recycleur en progression : de façon analogue à une bouteille-relais en circuit ouvert, on ne l'emploie que sur une partie du parcours, on le dépose à l'aller, on le reprend au retour. Cette pratique peut éliminer des problèmes de « poser du fil en recycleur » aussi bien que « d'être encombré par le recycleur pour explorer une zone plus étroite ». Par contre, son engagement reste comparable à l'utilisation intégrale d'un recycleur :

- La problématique de la pose-dépose est comparable à une sortie extra-véhiculaire en astronautique, il faut être certain de pouvoir réintégrer le véhicule et refermer correctement le sas ;
- Le scaphandre dorsal doit pouvoir correctement « couvrir » une éventuelle panne ou alors une autre redondance doit être ajoutée ;

- Si scaphandre dorsal (ou « side mount ») il y a, cela implique un encombrement et un fardage au départ assez importants, auxquels il faut être entraîné (exemple : « quel mousqueton ouvrir pour déposer le recycleur et pas le lest ? Ai-je accès facilement à tous mes embouts respiratoires ? »). Plus généralement, l'entraînement suite à modification ou ajout de matériel se trouve alourdi relativement au circuit ouvert, de plus les procédures d'entraînement sont rallongées par la nécessité de tester progressivement, dans des environnements de moins en moins facilitant (exemple : piscine puis vasque puis siphon-école puis parcours plus lointain/profond puis seulement exploration).

3. Rendement global

En siphon, utiliser un recycleur ne se conçoit que dans un but ultime de meilleure efficacité, de meilleur rendement. Or un rendement, c'est ce qui est utile comparé à ce qui est coûteux. Pour déterminer le type de matériel adapté, différentes choses doivent être pesées :

- Le temps nécessaire à la recherche-développement d'un matériel « maison » relativement au temps passer à gagner de l'argent pour acheter un matériel commercial et au temps perdu à la « formation obligatoire » ;
- La variabilité de contexte réglementaire d'un pays à l'autre et les contraintes correspondantes, aussi bien pour l'utilisation proprement dite du recycleur que pour l'oxygène et les mélanges ;
- La flexibilité de l'un ou l'autre des équipements, sa réparabilité à l'étranger « en bricolant », son adaptation à l'environnement ;
- La formation pratique procurée par un taux d'incidents non-nul relativement au risque vital encouru avec un taux de fiabilité trop faible ou à des erreurs fatales initiales trop probables ;
- Le temps perdu à faire de la recherche-développement (au lieu de l'exploration) ou à se former relativement au gain apporté pour des explorations futures ;
- Le coût de la chaux sodée, des cellules d'oxymétrie, des pièces qui s'usent, et celui des mélanges ;
- Le coût global du recycleur relativement à de l'équipement en circuit ouvert. Coût pour acheter mais également coût en termes d'efforts pour transporter, maintenir, réparer « en France », etc.

À cause de tout cela, dans une optique d'exploration spéléologique, le recycleur n'est pas un outil universel, (vouloir) le mettre en œuvre universellement convoque d'autres motivations.

5. Conclusion

L'utilisation du recycleur fait entrer dans un nouveau monde, avec des modalités de fonctionnement différentes. Il est possible d'y voir une rupture, comme le passage des échelles à la spéléologie dite alpine sur corde. Dans ce cas les règles de fonctionnement de ce nouveau monde et les différences avec l'ancien monde doivent être explicitées, puisse ce texte en langue française y contribuer. Merci à Philippe Bertochio, explorateur expérimenté de siphons, pour sa relecture.

- i En circuit ouvert, lors de la plongée précédente, on a pu évaluer la quantité de gaz nécessaire à rentrer à partir d'un point donné. Sachant qu'en pratique, même quand tout va bien, la consommation peut varier en fonction de l'environnement (passage d'étroiture, passage peu profond avec efforts d'équilibrage, etc.) c'est plus compliqué que le simple produit d'une durée et d'une consommation par unité de temps, ou d'une longueur et d'une consommation par unité de longueur. En recycleur protégé par du circuit ouvert, on a une moins bonne prévision des effets de l'environnement sur la consommation en circuit ouvert puisqu'on ne les a pas testés avant.
- ii Un recycleur avec un fonctionnement pas complètement électronique tel que le « Triton » demande d'avantage d'attention, avec risque de surcharge cognitive.
- iii Sans même mentionner un des « réflexes inverses » (analogue à « l'inversion de commande » des premiers essais supersoniques en aviation) qui est qu'en recycleur, plus on respire rapidement plus les gaz passent à travers la chaux par unité de temps et plus l'absorption du dioxyde de carbone est efficace.
- iv À partir de la zone des 50-60 mètres, cela devient impossible car l'air devient toxique même en circuit ouvert. Voir également 4.1.
- v Par exemple, effectuer des paliers à l'oxygène à 7 m, puis à 8 m la fois suivante, puis à 9 m « pour voir ce qui se passe » a un intérêt nul et présente un danger maximal.
- vi Liste non-exhaustive dépendant du matériel et de l'utilisateur :
 - Remontée entraînant une baisse de la pression partielle en oxygène ;
 - Descente rapide après un parcours peu profond et avec un faux-poumon contenant trop d'oxygène ;
 - Ne plus entendre le bruit de la buse d'injection ou des bulles de purge ;
 - Ressentir une diminution de flottabilité (due à un oxygène consommé métaboliquement en non-renouvelé) ;
 - Faire des efforts sans avoir changé les réglages, etc.
- vii Un mélange est hypoxique lorsqu'il contient moins de 0.16 b d'oxygène, hyperoxique lorsqu'il en contient plus de 1.6 b. On peut calculer les profondeurs équivalentes à ces deux compositions correspondant à une plongée à l'air, la différence est de 18 m avec toutes les conséquences en termes de décompression ! Exemple à 50 m : d'une part 0.16 b d'oxygène → 5,84 b d'azote au lieu de 4.80 b → profondeur équivalente 63 m ; d'autre-part 1,6 b d'oxygène → 4,40 b d'azote au lieu de 4.80 b → profondeur équivalente 45 m. La figure suivante, extraite d'un livre à paraître, illustre cela :

