

## Avec ou sans bulle ?

(Extrait du mémoire d'Instructeur National de Eric BAHUET - disponible dans son intégralité sur le site : [www.plongeesout.com](http://www.plongeesout.com) rubrique articles/recycleur).



(récif artificiel à Palavas, photographie Pierre DESCAMP)

Jean Pierre MONTAGNON a présenté dans le SUBAQUA N° 190 les différents types de recycleurs présents sur le marché. J'utilise l'un d'entre eux et je vous propose de découvrir le potentiel de cette « drôle de machine ».

Rappelons à toutes fins utiles qu'un recycleur permet de recycler le gaz expiré tout en compensant la perte d'oxygène liée à la consommation du métabolisme ! Ce fonctionnement est indépendant du gaz utilisé : il peut s'agir d'un Nitrox, d'un Trimix, d'un HélioX, ...

Pour apprécier le fonctionnement de ces machines, il faut se remémorer quelques notions de physiologie. Notre métabolisme consomme de l'oxygène ( $O_2$ ) et produit du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). A chaque ventilation, l'air expiré est donc appauvri en oxygène et chargé en dioxyde de carbone. Tout recycleur apporte des solutions techniques pour éliminer le dioxyde de carbone produit et effectuer le juste complément en oxygène. La technique avec laquelle ces matériels réalisent cet apport en oxygène en le maintenant à une pression partielle constante ( $ppO_2$ ). En clair, il s'agit de maintenir la même quantité d'oxygène en terme de nombre de molécules. Pour y parvenir, l'appareil effectue, à intervalles réguliers, une mesure de la  $ppO_2$  à l'aide de capteurs spécifiques. L'électronique compare cette mesure avec une valeur prédéfinie par l'utilisateur : le « setpoint ». Si la mesure est inférieure au setpoint, une vanne électrique, appelée solénoïde, est actionnée, et déclenche l'arrivée d'oxygène pur à partir d'une bouteille dédiée. C'est le domaine du sur-mesure. Le recycleur effectue les apports en oxygène en fonction des besoins de l'organisme, c'est à dire des efforts. De là à dire qu'il s'agit d'une usine à gaz, il n'y a qu'un pas ! En théorie, c'est l'appareil idéal car il permet de maximiser la valeur de la  $ppO_2$  dans le système et par conséquence, de diminuer d'autant les pressions partielles des gaz qui influent sur la décompression (azote ou hélium). Ce matériel implémente des solutions généralement peu compatibles avec l'élément liquide : l'électronique et l'électricité. Après les appareils photos et les ordinateurs, c'est au tour des recycleurs... La mesure de la fraction d'oxygène dans la boucle respiratoire

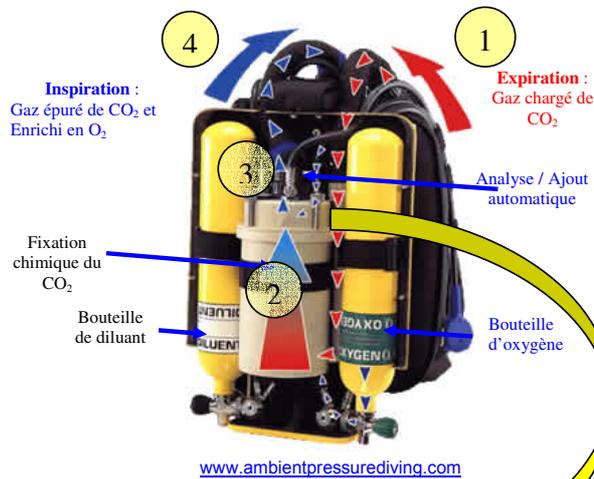
se réalise à l'aide de capteurs qui ont une fiabilité limitée dans un environnement humide. Ceci est vraisemblablement le talon d'Achille de l'appareil. La solution de redondance choisie par le constructeur consiste à multiplier le nombre de ces capteurs.

On trouve donc dans l'INSPIRATION :

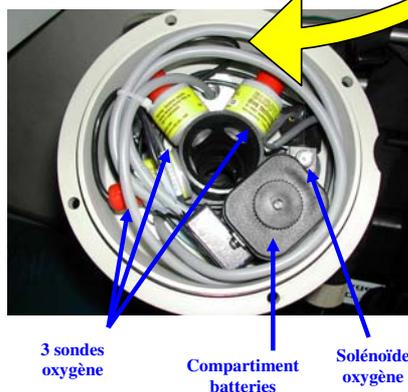
- trois capteurs oxygène qui mesurent la  $ppO_2$
- un mécanisme d'injection commandé par électronique
- une boucle respiratoire constituée de tuyaux annelés et de faux poumons inspiratoires et expiratoires
- de la chaux sodée qui est chargée de fixer le  $CO_2$
- une bouteille de 3 litres d'oxygène pur
- une seconde bouteille de 3 litres qui contient un diluant (Air, Trimix, ...). Il sert à diluer l'oxygène et permet ainsi de s'affranchir de la limite des 6 mètres imposée par la toxicité de l' $O_2$ . En fonction du choix du diluant, le plongeur va recycler par exemple un Nitrox ou un Trimix.

### Principe de fonctionnement

1. expiration dans le faux poumon (sac) expiratoire via un tuyau annelé qui achemine le gaz expiré vers la chaux sodée
2. la chaux sodée fixe le  $CO_2$
3. l'électronique injecte, après analyse, le complément en oxygène nécessaire
4. inspiration via le faux poumon inspiratoire d'un gaz enrichi en oxygène et débarrassé de son  $CO_2$



### Le cœur du système :



Avec cet appareil, on ne se soucie presque plus de la quantité de gaz disponible mais plutôt de la qualité du gaz que l'on respire. Si pour une raison ou une autre, le système injecte trop ou pas assez d'oxygène, c'est l'hyperoxie ou l'hypoxie en perspective ! Pour éviter cette situation peu réjouissante, le constructeur a prévu des alarmes sonores et visuelles. Sa recommandation reste quand même de surveiller la ppO<sub>2</sub> à l'aide des consoles d'affichage très régulièrement. Pour en savoir plus sur le fonctionnement de cet appareil, je vous invite à parcourir son manuel d'utilisation qui a été traduit en Français par Jean Marc BELIN et Eric BAHUET :

<http://www.plongeesout.com> (rubrique articles/recycleur)

Les recycleurs se retrouvent tous autour d'avantages communs : silence en plongée, sensation de faire partie du milieu, approche facilitée de la faune, respiration d'un gaz chaud et humide, autonomie importante, décompression optimisée. Ces derniers points sont principalement mis en valeur avec l'INSPIRATION.

#### Quelle est l'autonomie procurée par un tel recycleur ?

La bouteille d'oxygène de l'INSPIRATION est d'une capacité de 3 litres. Avec 200 bars de pression, nous avons à disposition 600 litres d'oxygène. L'autonomie en oxygène dépend de la consommation individuelle du plongeur. Des tests menés en laboratoire montrent qu'un individu normalement constitué consomme environ 1,5 litre d'oxygène par minute lors d'un effort modéré. L'autonomie atteint donc, dans ces conditions, 400 minutes (soit plus de 6 heures et demie) ! Précisons que la consommation en oxygène dépend des efforts et non pas de la profondeur atteinte. Autrement dit, l'autonomie apportée par ces appareils est indépendante de la profondeur... Dans la pratique, c'est la quantité et la performance de l'absorbant de CO<sub>2</sub> (la chaux sodée) qui limite la durée de la plongée. Cette limite est d'environ 3h00 pour l'INSPIRATION. Un autre facteur limitant est le temps d'exposition à l'oxygène en fonction de la ppO<sub>2</sub> respirée. Les tables d'organismes spécialisés comme le « NATIONAL OCEANIC and ATMOSPHERIC ADMINISTRATION » indiquent une exposition maximale de 3h00 pour une ppO<sub>2</sub> de 1,3 bar (valeur par défaut de l'INSPIRATION).

Qu'en est-il du diluant ? Il n'est pas consommé par l'organisme. Il est utilisé pour injecter du gaz dans les faux poumons afin de compenser leur écrasement lié à l'augmentation de pression lors de la descente. Il sert également à gonfler l'éventuelle combinaison étanche, le gilet de stabilisation ainsi qu'à différentes opérations techniques comme les « rinçages » en gaz de l'unité.

Comparaison de la consommation en litres par minute d'un plongeur en circuit ouvert et d'un second en circuit fermé  
(hypothèse prises : 20 L/min de gaz en circuit ouvert et de

1,5 L/min d'oxygène en circuit fermé).

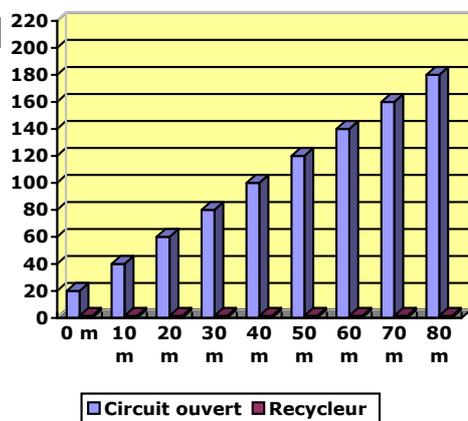
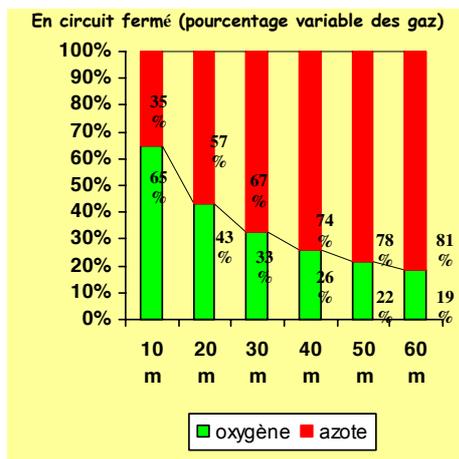
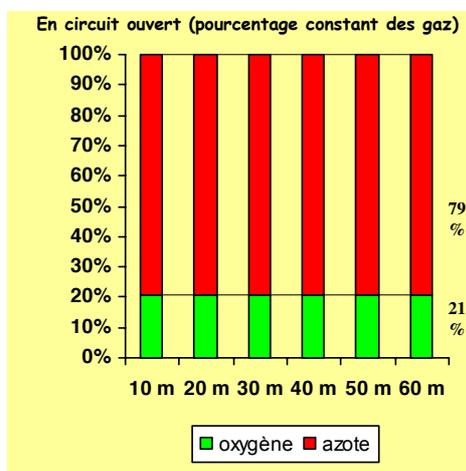
Cette comparaison reste théorique car elle indique une linéarité de la consommation en fonction de la profondeur avec un circuit ouvert, ce qui est loin d'être évident...

#### Quelle décompression possible avec ce recycleur ?

Tous les plongeurs le savent : nous ne pouvons rester impunément sous l'eau sans devoir respecter des paliers. La durée de ces paliers est dépendante du temps passé en immersion, du gaz respiré et de la profondeur d'immersion. En recycleur INSPIRATION, nous plongeons systématiquement avec un mélange : un Nitrox ou un Trimix. Nous sommes donc confrontés à une décompression liée au gaz utilisé mais avec une différence significative liée au fonctionnement de l'appareil : du fait de la respiration d'un mélange à une pression partielle d'oxygène constante et contrairement à un circuit ouvert, le pourcentage d'oxygène du mélange respiré varie en fonction de la profondeur. Par exemple, ce recycleur nous fabrique, avec un diluant comme l'air, un mélange suroxygéné (Nitrox) optimal. On minimise ainsi la quantité d'azote dissoute dans l'organisme et donc la durée des paliers (comparativement au même temps effectué en circuit ouvert à l'air).

On passe ainsi d'un fonctionnement à **pourcentage constant** (circuit ouvert) à un fonctionnement à **pourcentage variable** (circuit fermé électronique).

Illustration :



On remarque dans le schéma ci-dessus que jusqu'à 50 mètres (et avec une  $ppO_2$  paramétrée à 1,3 bar), le pourcentage d'azote respiré avec l'INSPIRATION est inférieur à celui respiré avec un scaphandre traditionnel. Au delà, c'est le contraire. Pour conserver en profondeur toute notre lucidité, nous emploierons rapidement un mélange Trimix (son utilisation devient vraiment peu onéreuse du fait de sa réutilisation sur plusieurs plongées).

Quels moyens de décompression possibles avec un diluant AIR ?

Nous pouvons utiliser :

1. Des tables à  $ppO_2$  constante (exemple : celle de l'US Navy). Mais comme souvent en exploration, on privilégiera rapidement par commodité l'emploi d'un ordinateur.
2. Quel ordinateur ? une première possibilité consiste à utiliser un « classique » modèle Nitrox paramétré avec la valeur du mélange atteinte à la profondeur maximale d'évolution.



VR2

[www.vr3.co.uk](http://www.vr3.co.uk)

Exemple : plongée à 30 m avec une  $ppO_2$  paramétrée à 1,3 bar => Nitrox 32 ( $1,3 \div 4 = 0,32$ ).

C'est évidemment très conservateur car le mélange fabriqué à la descente et à la remontée sera supérieur en oxygène à un Nitrox 32.

3. Un ordinateur spécifique fonctionnant à  $ppO_2$  constante comme le Nexus de la société « AP VALVES » ou le récent VR2 de « Delta P Technology ».

Ils permettent une utilisation en mode circuit ouvert ou circuit fermé. Il sont cependant « limités » à une utilisation air ou Nitrox.



Nexus

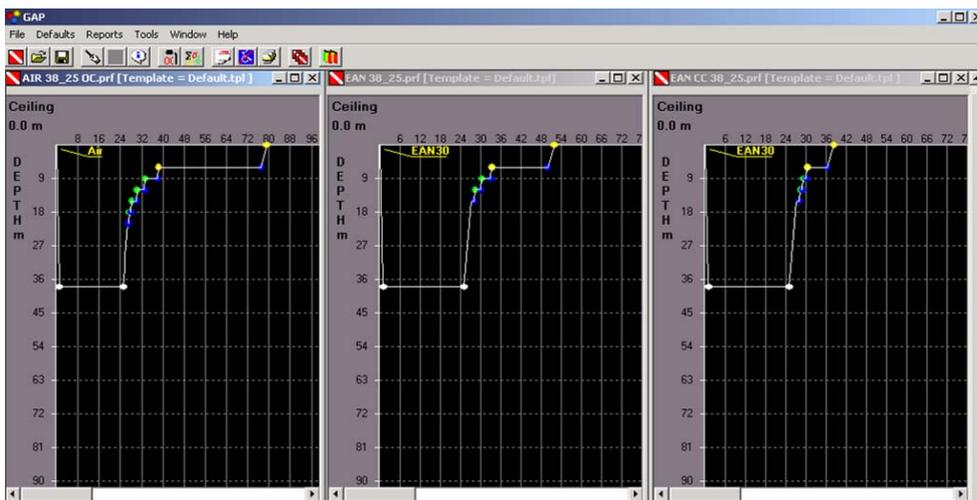
[www.ambientpressurediving.com](http://www.ambientpressurediving.com)

Dans le graphique ci dessous, nous comparons différentes décompressions Air ou Nitrox en scaphandre ou en recycleur circuit fermé. Ces simulations suivantes ont été réalisées à l'aide d'un logiciel de décompression.

Le même profil de plongée (38 mètres, 25 minutes) a été utilisé avec 3 configurations différentes :

1. **une plongée en circuit ouvert à l'air.** Temps total de plongée : **80 minutes** dont 55 de décompression
2. **une plongée en circuit ouvert avec un Nitrox 30%.** Temps total de plongée : **52 minutes** dont 27 de décompression
3. **une plongée en recycleur circuit fermé.** Temps total **38 minutes** dont 13 de décompression !

Les différences sont significatives. Nous connaissons déjà les avantages de la plongée au Nitrox, mais il faut reconnaître qu'avec l'emploi d'un circuit fermé électronique ces avantages prennent une autre dimension. Autrement dit, ce matériel permet d'envisager de nouvelles plongées, vraisemblablement plus engagées : des explorations plus longues que des plongées effectuées en circuit ouvert pour un même temps de décompression ou des explorations de durées identiques mais avec un temps de décompression moindre...



## Quels moyens de décompression possibles avec un diluant TRIMIX ?

1. Les tables : il n'y a pas de tables Trimix élaborées à  $ppO_2$  constante ! On peut choisir d'utiliser des tables Trimix « traditionnelles » mais elles ne permettent pas de tirer parti de la technologie à  $ppO_2$  constante du recycleur !
2. Des logiciels de décompression prennent en compte cette pression partielle constante (Abyss, Proplanner, Dplan, GAP, VPlanner...). Leur utilisation impose la plus grande prudence. L'utilisateur a le libre choix des paramètres de conservatisme ainsi que des gaz utilisés. A ce niveau, cela devient une affaire de spécialistes. Pour autant, il ne faut pas les ignorer car faute d'autres moyens disponibles, les personnes initiées les ont utilisées pendant longtemps. L'arrivée récente des ordinateurs multi gaz va peut être faire évoluer cette situation.
3. Un ordinateur multi gaz prenant en compte la  $ppO_2$  constante !  
Exemple : le VR3 de Delta P Technology.



[www.vr3.co.uk](http://www.vr3.co.uk)

En standard, il autorise une procédure de secours qui permet de basculer en mode circuit ouvert. En option, il propose une connexion directe avec le recycleur. Cela lui permet, à l'aide de sa propre sonde oxygène, de connaître à tout instant la fraction d'oxygène respirée et d'en déduire la décompression adaptée (l'algorithme fonctionne sur une base Bühlmann avec ajout de paliers profonds). Dans le cas d'une utilisation multi gaz Trimix et Nitrox en décompression, il est nécessaire de lui indiquer manuellement le changement de diluant.  
Autre exemple : le modèle Explorer de la société Abysmal Diving Inc.



[www.abysmal.com](http://www.abysmal.com)

**Remarque :** Il est important d'avoir à l'esprit qu'il n'existe pas de bases de données publiques de plongées effectuées à  $ppO_2$  constante !

## Pour quelles plongées ?

Les exemples de plongées qui suivent permettent de cerner plus concrètement les possibilités d'exploration offertes par ce matériel. Régulièrement accompagnés d'amis équipés en circuits ouverts, nous pouvons donner quelques éléments de comparaison. Précisons qu'il ne s'agit en aucun cas d'opposer les matériels et les techniques de plongées. La technique n'est pas une fin en soi. Le matériel nous permet n'est qu'un moyen d'assouvir notre soif d'exploration. Nous sommes convaincus que le recycleur permet simplement d'aller facilement un peu plus loin et d'y rester un peu plus longtemps. Nous sommes également persuadés que rien ne remplace à ce jour les sensations d'aisance et de facilité d'emploi procurées par un simple mono bouteille de 12 litres !

Les plongées qui suivent se sont déroulées sur un terrain de jeu connu de tous : les fonds sous marins aux abords de la presqu'île de Giens.

### **1<sup>er</sup> profil de plongée : l'exploration dans la zone des 40-50 mètres**

**Site de plongée :** l'épave du « Sagona » dit « Le Grec ». Profondeur maximale : 50 mètres.



*(Le Grec, photographie Laurent BALLESTA)*

Pour les raisons techniques évoquées précédemment, les plongeurs en recycleurs ont choisi d'utiliser un Trimix. Il nous donne un équivalent narcose d'environ 20 mètres et procure un excellent confort respiratoire ! Cela peut paraître luxueux mais à quoi bon s'en priver lorsque l'on sait que nous ne consommerons que quelques dizaines de bars d'une bouteille de 3 litres ? Qui plus est, celle-ci sera utilisée pour plusieurs plongées... Présentant une durée d'immersion plus longue, le directeur de plongée autorise les recycleurs à s'immerger les premiers. Avec 50 minutes d'exploration sur l'épave pour 30 minutes de décompression, cette magnifique plongée prend une nouvelle dimension et devient tout simplement exceptionnelle. Cette nouvelle autonomie permet, pour un temps de palier raisonnable, une exploration complète de l'épave en une plongée. Les « circuits ouverts » qui nous suivent montrent rapidement leurs premières bulles. Nous leur cédon la place et nous dirigeons vers la partie avant de l'épave, isolée de quelques dizaines de mètres de la partie principale. La faune, très dense, semble peu effarouchée par notre présence. La chasse des dentis qui se déroule sous nos yeux en témoigne. Nous devons pourtant ressembler à de drôles de tortues avec nos carapaces jaunes ! Nous atteignons les 25 minutes

d'exploration lorsque les plongeurs équipés de 15 litres décident de remonter. L'air commence à se faire rare dans leurs blocs... Il ne faut pas oublier que leur consommation à 50 mètres est 6 fois supérieure à celle de la surface. Pour les recycleurs, ce n'est que le signal de la mi-temps, et nous sommes désormais seuls sur l'épave pour une exploration approfondie de la partie principale.

### **2<sup>ème</sup> profil de plongée : l'exploration profonde.**

Que ce soit sur le magnifique Sec Caramel (60 à 80 mètres), sur l'épave du Heinkel de Carqueiranne (82 mètres) ou sur l'épave de la Guyane (90 à 110 mètres), tous les plongeurs sont logés à la même enseigne et



photo : Laurent Ballesta / L'Œil d'Andromède

*(Le Guyane, -100 m, photographie Laurent BALLESTA)*

utilisent un Trimix. Les temps d'exploration diffèrent évidemment en fonction des matériels utilisés : pour les circuits ouverts, la limite est fixée par la capacité des bi bouteilles utilisés (bi 12 litres et bi 15 litres en l'occurrence). Avec les recycleurs, l'autonomie n'est plus la principale préoccupation. Il faut néanmoins planifier sa plongée car chaque minute passée à 100 mètres à des conséquences importantes sur la durée de la décompression. Les paliers ; même optimisés en recycleur INSPIRATION, demeurent incontournables et nous souhaitons les réaliser dans les meilleures conditions possibles. Le temps d'exploration est donc le résultat d'un compromis entre la durée de la décompression et les conditions météo du moment. Les bi 12 litres se contenteront par exemple de 11 minutes d'exploration (descente comprise) sur la Guyane à 100 mètres, les bi 15 litres de 14 minutes et les recycleurs de 20 minutes. Sans aucune logistique supplémentaire, ces derniers auraient très bien pu décider de prolonger la découverte... Il faut

parfois se faire violence pour remonter. Les paliers semblent, comme toujours interminables et ennuyeux au possible le long de notre ligne de décompression. Le froid se fait sentir et les veinards dont les combinaisons sont équipées de « purge pipi » font des envieux... De retour au port, nous sommes confrontés au traditionnel entretien du matériel et remplissage des blocs. La fabrication des mélanges est souvent fastidieuse et les temps de gonflage sont en rapport avec les quantités consommées. C'est un nouvel avantage en faveur des recycleurs. Nous effectuons de simples et rapides compléments en gaz.

Des matériels comme l'INSPIRATION disposent d'un tel potentiel qu'il ne faut en aucun cas sous estimer l'importance d'une formation de qualité. Il est tentant d'aller profond trop rapidement. Beaucoup d'utilisateurs brûlent les étapes de l'apprentissage pour se mesurer vainement à l'abyme... ce n'est assurément pas la bonne approche. Si nous devions donner un seul conseil aux futurs utilisateurs, il serait certainement d'accepter de tout réapprendre avec des formateurs expérimentés. De nouveaux réflexes sont à acquérir et les procédures de sécurité ne s'improvisent vraiment pas. Comme le précise le manuel d'utilisation de l'INSPIRATION, l'expérience acquise en circuit ouvert, si importante soit-elle, ne sert à rien ! Ce n'est qu'en pratiquant régulièrement et dans des espaces d'évolution peu profonds que l'on construira progressivement son expérience. Ainsi, peu à peu, le plongeur en recycleur apprendra à tirer le meilleur parti de son matériel pour des plongées exceptionnelles.



photo : Laurent Ballesta / L'Œil d'Andromède

*(Le Sec Caramel, -80 m, photographie Laurent BALLESTA)*

Les limites que nous connaissons de la plongée sportive sont désormais repoussées : la durée d'une plongée peut atteindre plusieurs heures, les profondeurs peuvent devenir conséquentes. Ces problèmes, nouveaux pour la plupart des plongeurs « mer », ont été résolus depuis longtemps par les plongeurs spéléo. Il s'agit tout d'abord du froid, conséquence de ces durées d'immersion. L'autonomie de nos éclairages est également mise à rude épreuve. Nous avons dû adapter notre équipement en conséquence et bénéficier de l'expérience acquise par nos cousins « souterrains ». L'équipement du plongeur forme un tout et nous nous attachons lors de la préparation de nos plongées à utiliser des matériels appropriés : recycleur, protection contre le froid et éclairage. Cela a été pour nous l'occasion de revoir notre équipement. Nous avons pu mesurer la qualité de produits Français. Ils sont suffisamment rares dans le domaine de la plongée pour que nous prenions le temps de les citer : TOPSTAR pour nos combinaisons étanches désormais équipées d'une

indispensable « purge pipi » et de sous combinaisons adaptées aux conditions des plongées réalisées. Pour l'éclairage, la technologie HID de BERSUB répond parfaitement à notre besoin d'autonomie et de puissance.

Les plongées engagées nécessitent une organisation sans faille. Celle-ci a été assurée par la structure ESPACE MER de la Tour Fondue (Philippe BERNARDI). Nous remercions Béa, Philippe et Patrick pour leur accueil ainsi que Sabine, la très compétente pilote du bateau Odyssée.

Le groupe de plongeurs : Frank VASSEUR, Emmanuel VASSARD, Philippe BERNARDI, Christophe BARDIN, Gérard CLABE, Laurent BALLESTA, Jean Marc BELIN, Eric BAHUET.

Contacts TOPSTAR : Mr et Mme MILHARES

Contact BERSUB : Pierre BERTOIS