



Déterminations topographiques en milieu noyé

© P. Courbon

■ Paul COURBON

C'est dans ce paysage exceptionnel que débouchent sous l'eau les rivières noyées de Cassis

Autour de la Méditerranée, la recherche de l'eau revêt plus d'importance que dans des pays plus au nord. La saison sèche y étant plus marquée, les écoulements en eau y sont plus instables. Déjà, au début du XIX^e siècle, l'alimentation en eau de la ville de Trieste, principal débouché maritime de l'empire Austro-Hongrois, avait entraîné la recherche de l'eau souterraine dans l'arrière-pays. Ces recherches s'étaient étendues à la Slovénie. En 1853, Adolf Schmidl publie Die Gröten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas, que Martel reconnaît être la première étude raisonnée des cavernes. Son livre suivant : Zur Höhlenkunde (La spéléologie) en fait le fondateur de la spéléologie moderne.*

■ MOTS-CLÉS

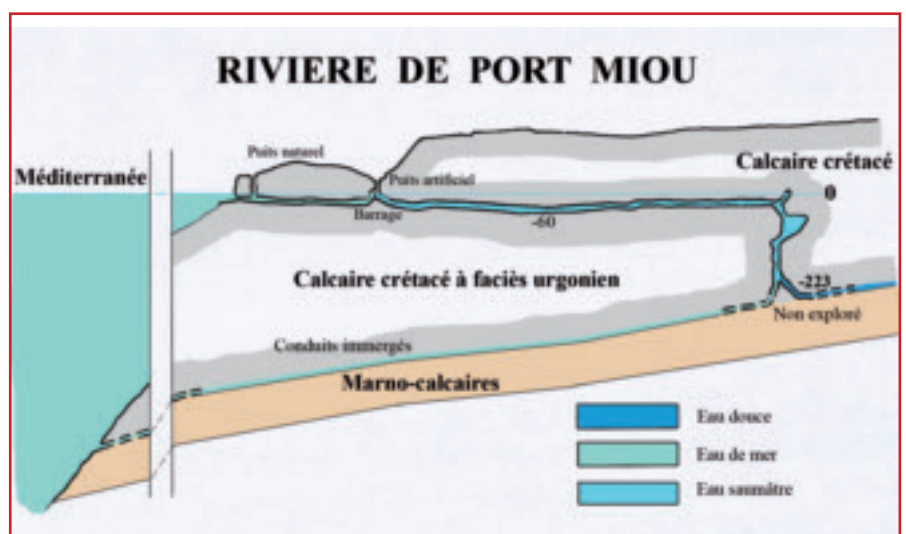
Régression messinienne, scaphandres autonomes, levers en milieux noyés, Doppler acoustique.

de la Méditerranée, on a recensé une centaine d'importants aquifères côtiers. En France, le plus connu, lié à cet épisode messinien, alimente les rivières souterraines de Cassis : Port Miou et Bestouan. La célèbre Grotte Cosquer et ses peintures, accessible par une plongée à - 36 m, obéit sans doute à la même logique, mais elle était accessible par un itinéraire terrestre au cours de la dernière glaciation (Il y a 20 000 ans) qui vit le niveau de la mer baisser d'une centaine de mètres.

■ La régression messinienne

La Méditerranée est un cas particulier dans la recherche de l'eau, car elle a été marquée il y a environ 5,5 millions d'années par un phénomène hors du commun : la régression messinienne. Le détroit de Gibraltar étant fermé, l'évaporation dans le bassin méditerranéen devint plus importante que les apports d'eau par les fleuves et le niveau de la mer s'abaisse de près de 1500 m. Bien que le siphon de la Fontaine de Vaucluse soit loin de la mer, son fond situé 200 m plus bas que le niveau actuel de la mer, est lié à cet épisode messinien. Le niveau de base (la mer) s'étant abaissé, l'eau a pu creuser dans le calcaire des galeries souterraines qui sont maintenant noyées. Juste au bord

*Terme créé en 1896 par le Français Rivière.



Profil simplifié de la rivière de Port Miou. L'eau douce venant d'un bassin d'alimentation coule sur des marnes néocomiennes imperméables. La profondeur de cet écoulement ne peut s'expliquer que par la régression messinienne. La densité plus forte de l'eau de mer crée une charge hydraulique supérieure à l'eau douce, expliquant la remontée d'eau de mer par des conduits immergés.



■ Les rivières mystérieuses

Ainsi dénommées, les rivières de Port Miou et Bestouan débouchent dans la mer à plusieurs mètres de profondeur et ne sont accessibles qu'aux plongeurs. La rivière de Bestouan a été plongée jusqu'à plus de 3 000 m de son entrée, avec arrêt dans une salle remontante à l'air libre ; le point le plus bas de son parcours étant 33 m sous le niveau de la mer. La rivière de Port Miou a été plongée jusqu'à plus de 2 000 m de son débouché en mer. Le plongeur Xavier Meniscus, grâce à la nouvelle technique des recycleurs, y a atteint la profondeur de 223 m sous le niveau de la mer et ça continue !

Cependant, les espoirs de captage de ces rivières, en vue d'une alimentation en eau potable, ont été déçus. Il s'est avéré qu'au cours de la régression mesinienne, des conduits se sont formés à diverses profondeurs, amenant dans les rivières souterraines des remontées d'eau salée, en particulier à la saison d'étiage. Un barrage bâti dans une salle exondée, à 530 m de l'entrée de Port Miou, après creusement d'un puits d'accès à partir de la surface, n'a pas empêché les arrivées d'eau de mer et la formation d'eau saumâtre. Cela limite évidemment l'intérêt de ces rivières, mais un forage en vue de leur captage n'a pas été abandonné, en vue de la lutte contre les incendies. L'eau ainsi puisée sera beaucoup moins salée que celle larguée par les Canadiens et prise en pleine mer !



© Ph. Acquaviva

La calanque de Port Miou lors d'une crue de la rivière souterraine, où est la Grande Bleue ?

Les plongées en rivières souterraines

La première plongée souterraine fut effectuée en scaphandre lourd par Ottonelli à la Fontaine de Vaucluse.



© H. Chauvez

Cette image illustre les difficultés que peut éprouver le plongeur qui veut topographier. Ici, il déroule le fil d'Ariadne, précaution impérative des plongées. Sur son poignet droit on voit une boussole et on devine le profondimètre. Quatre lampes, un attirail énorme, quant aux gants (l'eau est à 14°), facilitent-ils l'écriture?

C'était en 1878 et il atteignit 23 m de profondeur ! Il faut attendre 1943 pour que les améliorations décisives apportées par Cousteau et Gagnan permettent le remplacement des scaphandres lourds par les scaphandres autonomes. La première plongée à Port Miou eut lieu en 1953, sur une quarantaine de mètres.

Dans les années 1980, les mélanges gazeux permettent d'atteindre des profondeurs impensables quelques années plus tôt. En 1983, J. Hasenmayer atteint 205 mètres de profondeur à la Fontaine de Vaucluse. Un progrès énorme est apporté à partir des années 2000 par les scaphandres recycleurs à circuit fermé. En 2005, Xavier Meniscus atteint - 150 m à Port Miou, puis - 223 en 2012. Mais ces profondeurs exigent de très longs paliers de décompression lors de la remontée en surface (21 heures de plongée en 2012).

Topographie en milieu noyé

En plongée, le relevé d'un cheminement obéit à la même logique qu'à l'air libre. Mais là, pas de théodolite ! Pas de distancemètre laser ou infrarouge non plus, ni de mesure des pentes ! Les angles horizontaux sont pris avec une boussole, les distances avec un ruban plastique, les mesures de pente sont remplacées par des mesures de dénivellation au profondimètre, plus précises qu'avec un clinomètre. De plus, le profondimètre faisant impérativement partie de l'équipement du plongeur, autant en profiter.

■ Les difficultés d'un lever en plongée

La plongée dans les rivières souterraines a été marquée par de nombreux accidents dus à la turbidité de l'eau. Dans un conduit noyé, l'eau est souvent très claire, d'une limpidité extraordinaire, qui fait rêver. Mais après plusieurs passages de plongeurs, les particules de glaise déposées sur les parois au cours des crues, se détachent avec les turbulences générées par le mouvement des palmes. La visibilité devient alors parfois inférieure à 1 m. C'est ainsi qu'en 1960, le biologiste américain Conrad Limbaugh mourut dans la galerie d'entrée de Port Miou, vraisemblablement parce qu'il avait tourné en rond dans les grands espaces ou dans l'eau devenue turbide. Aussi, après plusieurs accidents de ce type, une règle d'or a été établie : déroulement par le premier plongeur d'un fil d'Ariadne dont on ne doit à aucun prix s'éloigner.



Doc. Suintoo

Boussole de poignet utilisée par les plongeurs. Sur le meilleur modèle on peut apprécier la demi-graduation, 2,5° sur cette Suintoo, soit 3 gr.

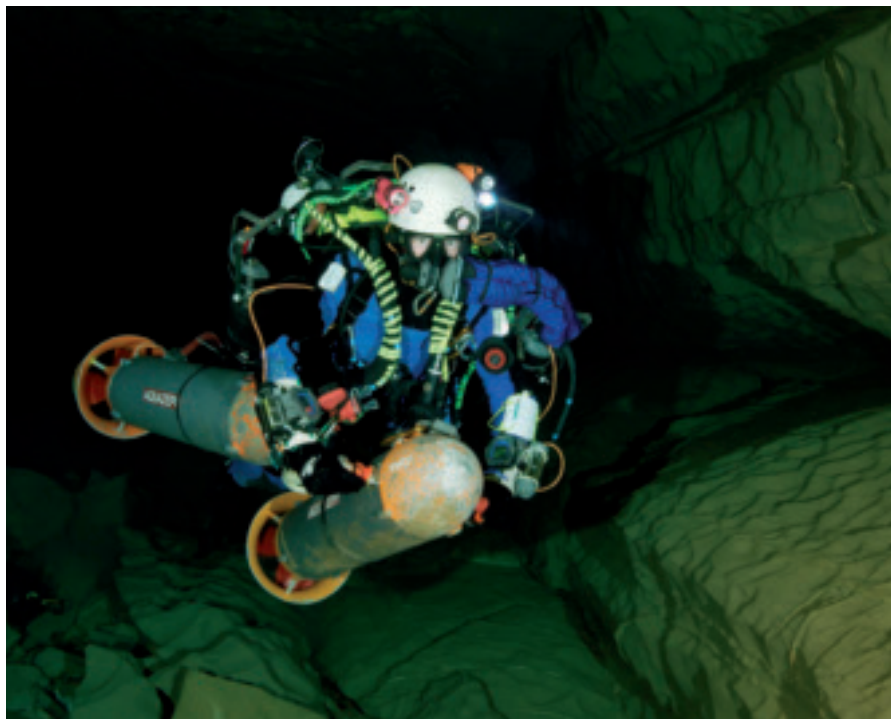
Dans la topographie, on doit suivre ce fil d'Ariane dont le parcours s'infléchit avec les coudes ou aspérités de la paroi. C'est le long de ce fil d'Ariane, cordelette de 3 mm d'épaisseur, que les longueurs sont prises avec un décimètre plastique tenu à ses deux extrémités par les deux plongeurs. Quand on le peut, on s'appuie contre la paroi à l'endroit où le fil d'ariane le touche pour avoir plus de stabilité et un meilleur positionnement.

Les directions sont prises avec une boussole étanche au poignet (*voir figure*). Les plongeurs-topographes rigoureux, ou en ayant la possibilité, s'efforcent de faire une visée directe et une visée inverse. Elles sont exécutées simultanément par chacun des plongeurs tenant les extrémités du décimètre. Ils les notent en même temps que la profondeur donnée par leurs profondimètres respectifs.

Une autre difficulté doit être signalée : c'est le manque de stabilité des nageurs : ils n'ont pas les pieds sur terre, mais flottent dans un liquide où il n'est pas facile de garder une immobilité complète, surtout quand il y a du courant. Dernières difficultés : écrire avec des gants les mesures sur un calepin aux feuilles plastiques (eau de 5° en montagne et de 14° ici, oblige) et impossibilité de correspondre entre les deux plongeurs autrement que par gestes !

■ Topographies levées à Cassis

Deux types de topographie sont envisageables : les levés de type profession-



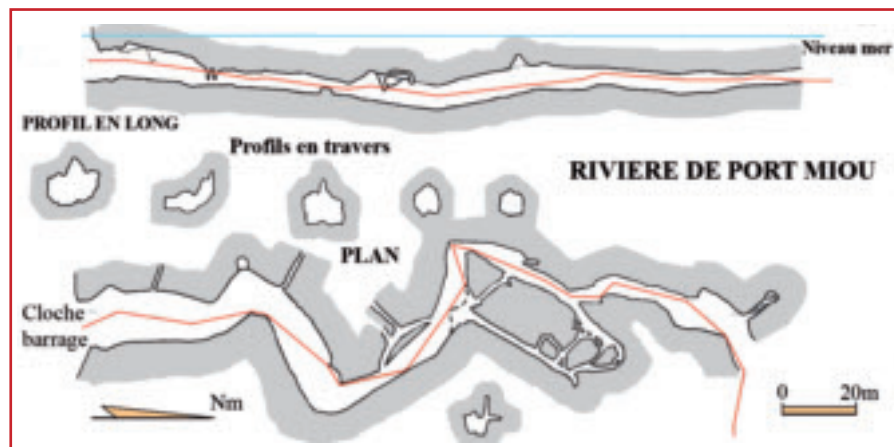
© H. Chauvez

La longueur des rivières de Cassis impose de prendre en double bouteilles d'air et même scooter ! Ici, la poussée d'Archimède permet au plongeur de s'encombrer de 150 kg de matériel ! Et la boussole avec ça ?

nel, aussi soignés que possible dans les zones où les difficultés d'exploration restent raisonnables. Ce type de lever est celui qui a été exécuté d'août à octobre 1968 à Port Miou, entre la mer et la cloche d'air située à 530 m où était prévue la construction d'un barrage. Deux mois pour un lever de 530 m, même si ce n'étaient pas deux mois à temps complet, nous laissons deviner son prix de revient ! Il fut confirmé par un repérage en surface, à partir d'une balise magnétique mise en place dans la

cloche d'air, c'était une première ! Il y eut un écart étonnamment faible (moins de 3 mètres) entre le point donné par la topographie et celui donné par la détermination magnétique. Une autre topographie précise, avec choix des stations contre la paroi, fut faite sur 400 m en amont de la cloche où un barrage fut bâti en 1970 pour éviter les remontées d'eau de mer. Elle servit de comparaison, en novembre 2010 avec les mesures faites par le Cobra Tac que nous verrons plus loin.

Pour les explorations courantes de siphon, ou lors des explorations extrêmes, comme ce fut le cas dans les parties éloignées de Bestouan et Port Miou, on doit se contenter de levés expédiés. Les longueurs et les orientations sont mesurées au mieux. C'est ainsi que le report en surface du point terminal de la topographie sommaire de Bestouan se révéla à près de 200 m du point déterminé par balise magnétique. Il faut dire qu'avec 3 km, le siphon de Bestouan est l'un des plus longs du monde et ses difficultés, la remontée d'un fort courant entre autres, ont nécessité l'emploi de scooters sous-marins. L'exploration jusqu'au point extrême réclame une dizaine d'heures



Tronçon de topographie précise en amont du barrage pour comparaison avec le lever Cobra. Les points de stations sont pris en paroi ou au plafond pour être matérialisés et avoir plus de stabilité. La moyenne des visées est de 20 m.

aller-retour et les plongeurs sont obligés de constituer tout au long de ce trajet des relais avec bouteilles de recharge. Il est alors illusoire de demander aux plongeurs une topographie précise exigeant encore plus de temps.

■ Précision des topographies

Nous avons indiqué l'instabilité du nageur qui ne peut que très rarement garder une immobilité complète. Il en résulte une imprécision sur les points de départ et d'arrivée de la mesure et une imprécision sur la prise de direction. Lors des deux levés exécutés avec soin signalés en supra, la longueur moyenne des visées a été de 20 m. Dans ces plongées à but topographique et d'une longueur limitée, pas de scooter sous-marin ! En admettant une imprécision de $\pm 3gr / \sqrt{2}$ sur la direction directe-inverse à la boussole, on peut admettre une imprécision transversale de 0,66 m sur une visée de 20 m. Beaucoup plus importante que les autres composantes d'imprécision, c'est elle que nous prendrons en compte. Cela veut dire que sur les 530 m de topographie signalés plus haut, nous aurions eu une précision de l'ordre de $\pm 0,66 \text{ m} \times \sqrt{27}$ soit $\pm 3,5 \text{ m}$. Il faut aussi ajouter que le soin apporté à la topographie allongeant le temps de plongée, les topographes portent sur eux des masses métalliques très importantes constituées par deux bouteilles, détendeurs, etc. Il faut y ajouter les lampes qui, proches de la boussole lors de la visée, doivent influencer sur le champ magnétique. Il doit certainement en résulter une erreur systématique lors du lever. Cette erreur systématique s'additionne à chaque visée, au lieu de se composer quadratiquement.

Les repérages électromagnétiques

Ils sont le complément essentiel des levés souterrains dès que l'on veut faire un forage. L'indication approchée donnée en surface par le report du lever souterrain permet d'être proche du lieu où les signaux électromagnétiques sont perceptibles (La portée des signaux dans la roche varie à l'inverse du cube de la distance). Nous avons parlé du



© H. Chauvez

La balise a été suspendue au plafond, de manière à ce que son axe soit bien vertical.

repérage magnétique fait en 1970, en vue de forer le puits permettant d'accéder à la cloche à 530 m de l'entrée. Ce fut le premier repérage à être effectué en spéléologie. L'écart entre la détermination magnétique et la topographie fut de l'ordre de celui indiqué par les calculs précédents, même un peu inférieur.

Le repérage magnétique a été utilisé à plusieurs reprises à Cassis pour positionner en surface plusieurs points clés des rivières de Port Miou et Bestouan.



© Ph. Acquaviva

Le cadre a été agrandi de manière à mieux capter le champ magnétique de la balise.

Je renvoie nos lecteurs à l'article que j'avais écrit sur XYZ en 2003, concernant un forage au Liban [4].

Lever en zone noyée par le "Cobra tac"

En 2010, à l'initiative de Cassis Rivière Mystérieuse, un essai de lever a été exécuté par le "Cobra tac", produit par la société *Teledyne RD Instruments* à San Diego (Californie). Comme le GPS, cet appareil a été conçu au départ pour des applications militaires, avant d'être élargi aux utilisations civiles [1]. A la demande de Louis Potié et Claude Touloumdjian, il a été mis à la disposition des plongeurs du Centre de Recherches et de Plongée Souterraine animé par Marc Douchet, par la société *Teledyne RD Instruments Europe* et son représentant M. Loïc Michel.



© Doc. Teledyne

Le Cobra Tac vu dessus et dessous (avec les émetteurs-récepteurs acoustiques en rouge). On voit les deux poignées pour guidage par le plongeur.

■ Principe général

Le son se déplace presque 5 fois plus vite dans la mer que dans l'air (1 550 m/s). Il a déjà été utilisé soit pour la localisation des sous-marins ou des bancs de poissons. Certaines baleines ou les dauphins l'utilisent pour l'écholocation de leurs proies ou de leurs prédateurs.

Le "Cobra Tac" est un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), utilisant un logiciel Doppler acoustique. La spécificité de ce *Doppler Velocity Log* (DVL), base du système, est l'utilisation de signaux acoustiques codés pour mesurer l'effet Doppler. La mesure de l'effet Doppler (changement de fréquence) se fait par l'intermédiaire du décalage de phase entre les signaux acoustiques codés émis et les signaux réfléchis reçus, les mesures sur la phase don-

nant une plus grande précision que la mesure directe du changement de fréquence [5 p.10]. En outre, comme avec le GPS, il faut résoudre les ambiguïtés concernant le nombre entier de cycles du déphasage reçu.

On imagine alors la difficulté des logiciels de traitement des données et des calculs à mettre en œuvre pour aboutir à un résultat satisfaisant. C'est ainsi qu'un logiciel d'autocorrélation a été mis en œuvre pour prendre en compte tous les éléments. Ce procédé permet un contrôle qualité extrêmement rigoureux et une mesure de vitesse très précise du "Cobra Tac". Nous verrons plus loin comment cette vitesse est utilisée pour le positionnement de l'appareil.

Son utilisation initiale, prévue en mer, devait utiliser les signaux acoustiques réfléchis par tous les micro-organismes tels que plancton ou petits crustacés. On imagine alors la difficulté de la méthode : seule une très petite partie des ondes étant réfléchi. Dans une rivière souterraine, la proximité du fond permet la réflexion des signaux émis. Il faudra alors choisir la puissance et la longueur d'onde des signaux adaptés.

■ Mise en œuvre du Cobra

Comme nous l'avons vu, le "Cobra-Tac" utilise un Doppler Velocity Log pour mesurer sa vitesse de déplacement. Sa distance par rapport au fond de la galerie est aussi mesurée. De plus, le "Cobra Tac" est équipé d'un compas magnétique, de capteurs d'inclinaison et d'un capteur de pression, nous verrons pourquoi plus loin.

Les vecteurs tridimensionnels de la vitesse

Un vecteur vitesse doit être défini par ses trois composantes x , y et z . D'un point de vue pratique, le DVL utilise quatre faisceaux acoustiques en configuration Janus et inclinés à 30 degrés par rapport à l'axe de l'appareil. Des éléments piézo-électriques émettent des impulsions sonores simultanément sur les quatre faisceaux à une fréquence d'environ 5 Hz. Les mêmes éléments piézo-électriques servent de récepteur. La fréquence porteuse du signal est de 1 200 kHz. Toutes les 0.2 seconde, le DVL traite les échos et obtient des vecteurs vitesse immé-



Essai du Cobra Tac, conduit par le plongeur à Port Miou. On distingue en dessous le fil d'Ariane suivi à vue par le plongeur.

diatement transformés en deux vitesses horizontales et une vitesse verticale. Trois faisceaux sont suffisants pour calculer une vitesse selon trois axes x , y , z . L'utilisation d'un quatrième faisceau permet un contrôle de qualité par vérification de la cohérence des quatre vecteurs. Lorsque l'une des mesures est signalée hors tolérance, le calcul du déplacement selon trois axes utilisant trois faisceaux est toujours possible.

Le logiciel de calcul va fournir : la vitesse, l'intensité des échos, la corrélation donnant la qualité des données et le pourcentage des données qui ont correspondu aux critères imposés.



Le transducteur, placé sous le Cobra Tac, qui émet les faisceaux acoustiques et réceptionne leurs échos.

Définition de la trajectoire

Pour avoir une trajectoire géoréférencée, il est d'abord nécessaire, avant la plongée, d'introduire la latitude et la longitude du point de départ dans le système de référence choisi.

Les vecteurs vitesses x , y et z sont déterminés dans un système propre à la géométrie du Cobra, il faudra alors d'autres éléments pour intégrer ces vecteurs dans notre système géoréférencé et reconstituer la trajectoire suivie. Un processeur embarqué calcule en temps réel la position du plongeur en utilisant : la vitesse de déplacement donnée par le Doppler Velocity Log, les indications d'une horloge interne pour transformer la vitesse en distance, les indications du compas et du capteur d'inclinaison pour l'orientation dans le système choisi. Un écran complété par des boutons poussoirs permet, soit d'enregistrer la trajectoire du plongeur et de marquer des points remarquables, soit de guider le plongeur sur une trajectoire prédéfinie. A la fin de la plongée, la trajectoire du plongeur est restituée en quatre dimensions (X , Y , Z et temps).

■ Analyse de l'essai avec le Cobra Tac à Port Miou

Comme vu en supra, l'essai de novembre 2010 a été réalisé à Port

▶ Miou, à la demande de Cassis Rivière Mystérieuse, sur les 400 m déjà topographiés à l'amont du barrage. Piloté par un plongeur, le cobra Tac a effectué un aller retour de 898 m en 55 minutes, déterminant 16 350 points. Revenant exactement au point de départ, il a été constaté un vecteur de fermeture de 9 m, soit 1 % de la distance parcourue [2 et 3].

Cet écart fut la petite déception de l'expérience. Monsieur Loïc Michel l'attribue à la masse énorme des équipements métalliques emportés par le plongeur et qui ont influé sur le compas magnétique du Cobra. Nous avons évoqué ce problème en supra avec les erreurs systématiques pouvant être



L'itinéraire du Cobra Tac, lors de ses essais. Il a été reporté sur carto-explorateur grâce aux latitude et longitude de chaque point. Le plongeur a effectué un aller-retour avec fermeture au point de départ. L'écart de fermeture s'établit à 9m. Curieusement l'aller et le retour correspondent bien dans la partie nord. Il est vraisemblable que la lourde masse métallique portée par le plongeur ait affecté le compas magnétique de l'appareil.

induites par l'équipement des plongeurs sur l'orientation. Sur un autre plan, faire 900 m de topographie en 55 minutes a été un gain de temps si énorme qu'il a justifié entièrement cette expérience.

La proximité des parois et les échos parasites dus aux parois ont constitué une difficulté supplémentaire propre à la mesure dans la Rivière Mystérieuse. Néanmoins, le cobra Tac a bien fait la distinction entre les échos du fond et les échos secondaires des parois.

Le fichier fourni comporte de nombreux éléments tels que : la vitesse, l'intensité des échos, etc. mais surtout les latitudes et longitudes de chaque point en degrés décimalisés. Nous les avons déchargés sans difficultés sur le fichier carto-explorateur de la zone.

Historique des recherches

La présence du cours d'eau souterrain de Port Miou intéressa dès le début la ville de Cassis qui en 1964 se retourna vers la Société des Eaux de Marseille (SEM). Ce fut le début d'une grande aventure réunissant des scientifiques, des ingénieurs, des techniciens et plongeurs et à laquelle s'associèrent le BRGM et la société COYNE. Un puits fut creusé pour atteindre la cloche du point 530 et y construire un barrage empêchant la remontée de l'eau de mer. Mais l'échec de la désalinisation, mit un terme à ces grandes recherches. Les recherches sur Bestouan s'ajoutèrent à celles de Port Miou en 1967. Cependant les plongeurs, avec tous les progrès des techniques de plongées continuèrent à s'intéresser à ces réseaux hors normes. En 2006 est fondée l'association Cassis Rivière Mystérieuse qui coordonne toutes les recherches. Nous avons vu la profondeur atteinte en 2012 à Port Miou. Les spéléologues cherchent dans les gouffres de surface une possibilité de jonction et l'Université d'Aix-Marseille effectue actuellement des études sur les bassins d'alimentation de ces deux rivières. ●

Remerciements

A l'association Cassis La Rivière Mystérieuse, à son président Gérard

Acquaviva et à Louis Potié, qui m'ont permis de reprendre les informations qu'ils ont publiées. A Loïc Michel, représentant en Europe de *Teledyne RD Instrument* qui m'a fourni la documentation nécessaire et a répondu aimablement à mes questions.

Bibliographie

- [1] R. LEE GORDON, 1996, *Acoustic Doppler Current Profiler, Principles of operation, A practical Primer*
- [2] Loïc MICHEL, Marc DOUCHET, Louis POTIE, Gérard ACQUAVIVA et alii, 2011, *Topographie automatique de réseaux karstiques noyés et pénétrables*, rapport de 3 pages.
- [3] Association CASSIS LA RIVIERE MYSTERIEUSE, 2013, *Cassis et ses Rivières*, 94p.
- [4] Paul COURBON, 2003, *Histoire d'eau, positionnement d'un siphon en surface*, XYZ n° 95, pp.37-42
- [5] *Acoustic Doppler Current Profiler, Principles of operation*, 2011, *Teledyne RD Instrument*, San Diego (Ca)

Contact

Paul COURBON
paul.courbon@yahoo.fr

ABSTRACT

During the messinian recession, 5,5M years ago, Mediterranean Sea was 1.500 m lower than to-day. It explains the formation of caves under the actual sea level. The author describes the exploration and survey of two sunken subterranean rivers, close to Cassis (France). He describes also the use of a new topographical equipment to survey inside the sea : the Cobra Tac, an acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Integrating the data from a Doppler Velocity Log (DVL), fluxgate compass, and pressure transducer with Cobra-Tac's on board navigation computer allows a diver to map the bottom topography. The result of this testing survey is given.