



HAL
open science

**Etat des connaissances hydrogéologiques et
spéléonautiques sur les rivières souterraines
sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Cassis,
France).**

B. Arfib, M. Douchet

► **To cite this version:**

B. Arfib, M. Douchet. Etat des connaissances hydrogéologiques et spéléonautiques sur les rivières souterraines sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Cassis, France).. 9th Conference on Limestone Hydrogeology, 1-3 Sept. 2011, Besançon, France, Sep 2011, Besançon, France. hal-01457512

HAL Id: hal-01457512

<https://hal.science/hal-01457512>

Submitted on 14 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etat des connaissances hydrogéologiques et spéléo-plongée sur les rivières souterraines sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Cassis, France)

State of hydrogeological and cave-diving knowledge about the submarine rivers of Port Miou and Bestouan (Cassis, France)

Bruno Arfib¹, Marc Douchet²

- (1) Université de Provence, Laboratoire de Géologie des Systèmes et Réservoirs Carbonatés, Case 67, 3 place Victor Hugo, 13003 Marseille, France, email: bruno.arfib@univ-provence.fr
(2) Président de la Commission Plongée Souterraine, Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins (FFESSM) et Centre de Recherche et de Plongée Souterraine (CRPS), 103 rue Ste-Cécile, 13005 Marseille, email: douchetmarc@wanadoo.fr

Résumé

Les sources de Port Miou et du Bestouan (Cassis, France) sont l'exutoire des plus longues rivières souterraines sous-marines explorées en Europe. Elles représentent des sites exceptionnels d'une part pour les études scientifiques sur les ressources en eau en zone karstique côtière, et d'autre part pour l'exploration en spéléo-plongée. Elles émergent en mer, à quelques mètres de profondeur, et à un kilomètre de distance l'une de l'autre dans la baie de Cassis (Bouches-du-Rhône, France). Des repérages par balise électromagnétique précisent aujourd'hui le tracé de la galerie de Bestouan jusqu'à 1850 m de la mer. Des mesures de salinité et de température lors des explorations spéléo-plongées complètent le suivi en continu des sources pour caractériser le mode d'écoulement de l'eau souterraine sujette à l'intrusion saline.

Abstract

Port Miou and Bestouan springs (Cassis, France) are the outlet of the longest submarine rivers explored in Europe. They are exceptional sites on the one hand for scientific studies on water resources in coastal karst area, and secondly for cave-diving exploration. They flow out at sea, a few meters deep and one kilometer away from each other in the bay of Cassis (Bouches-du-Rhône, France). Vertical location by positioning electromagnetic transmitter was done at the Bestouan subaquatic gallery up to 1850 m from the sea. Measurements of water salinity and temperature during the cave-diving exploration give new data in addition of the continuous monitoring of the springs, to characterize the groundwater flows subject to saltwater intrusion.

1. Introduction

Les karsts côtiers sont étudiés depuis plusieurs décennies (e.g. STRINGFIELD & LEGRAND 1971). Ils sont aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant car ils représentent une ressource potentielle en eau douce et donnent accès à l'étude de nombreux phénomènes physiques, géologiques et biologiques : l'intrusion saline, l'écoulement dans les roches fracturées, le lien terre-mer, les variations du niveau marin passé et futur (e.g. AUDRA ET AL. 2005, ARFIB ET GILLI 2010, BEDDOWS ET AL. 2007, BURNETT ET AL. 2001, FLEURY ET AL. 2007, TULIPANO ET AL. 2005)...

Les sources de Port Miou et de Bestouan sont des sources saumâtres, qui émergent en mer à quelques mètres de profondeur sous le niveau de la mer dans la baie de Cassis. Elles drainent une large partie de la basse Provence calcaire (CAVALERA 2007, CAVALERA ET AL. 2010) et constituent ainsi l'exutoire majeur de cette région, avec un débit variant de quelques mètres cubes par seconde à l'étiage à plus de 50 m³/s en crue (TASSY ET AL. 2010). De plus, ces sources donnent accès à plusieurs kilomètres de conduits karstiques explorables par l'homme.

Cet article présente les données issues de la collaboration des spéléo-plongeurs sportifs et des scientifiques pour mieux connaître ces sources exceptionnelles et le phénomène d'intrusion saline dans le karst. Un repérage précis du développement des conduits karstiques a été acquis. En complément, des mesures de salinité sont faites lors de l'exploration des conduits karstiques, donnant accès à des données nouvelles au cœur de la zone noyée du karst.

2- Bref historique des études et explorations sur les sources de Port Miou et de Bestouan

La source de Port Miou, connue depuis l'antiquité, est étudiée et explorée depuis le milieu du XX^{ème} siècle (DUROZOY ET PALOC 1967, DOUCHET 2011). Dans les années 1970, elle fut aménagée, barrée par un barrage sous-marin dans les terres à 530 mètres de la mer, dont le but était de faire diminuer la salinité de l'eau. L'expérience échoua, mais laisse aujourd'hui un site exceptionnel pour l'étude du karst. La rivière est suivie en continu depuis 2004 par des sondes de mesures physico-chimiques (Thèse CAVALERA (2007),

projet KarstEAU (www.karsteau.fr). Dès les années 1960-70, le repérage d'une cloche à l'air libre propice à l'implantation du barrage ne fut possible qu'avec l'aide des spéléo-plongeurs. En 1981, le développement exploré est porté à 2 000 m, arrêté sur un puits terminal se développant sur une faille. L'exploration du puits passera de -82m sous le niveau de la mer en 1981, à -123m en 1992, puis -147m en 1993, et enfin -150m en 2005, -172m en 2005, -179m en 2008, exploité d'équipes menés par Claude Touloumdjian, Bertrand Léger, Marc Douchet, Jérôme Meynié, Xavier Meniscus...

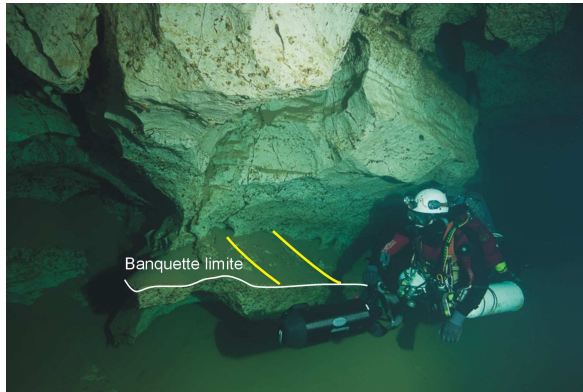


Photo 1 : Progression d'un spéléo-plongeur dans la galerie de Port Miou (Photo Hervé Chauvez)

La source du Bestouan s'écoule à l'entrée du port de Cassis. C'est en 1945 que son griffon est localisé précisément, puis les explorations souterraines débutent dix ans après. Entre 1965 et 1983, le développement sera porté à 2050 mètres (FFESSM, COMEX, Bertrand Léger, Claude Touloumdjian, Francis Leguen). Marc Douchet atteint 2950 m dans la "grande galerie" entre 1990 et 1993 ; et découvre une galerie noyée secondaire, la "galerie du flou", à 2440 m de l'entrée se développant jusqu'à 3000 m (DOUCHET 2011). Les deux galeries s'arrêtent sur des trémies (amas de blocs). Contrairement à la source de Port Miou qui a fait l'objet de mesures dès la construction du barrage dans les années 1970, la source de Bestouan n'a jamais été étudié en continu jusqu'à la thèse Cavalera (depuis 2005).

3. Matériel et méthodes

3.1- Repérage électromagnétique

Le levé topographique des galeries karstiques est classiquement réalisé par des mesures d'azimut, pente et longueur. Toutefois, en galerie noyée ce travail est complexifié par le cheminement en plongée. La topographie de la galerie de Port Miou sera ainsi levée en 1992. La galerie de Bestouan restera explorée mais non topographiée au-delà des 450 premiers mètres. Pour localiser avec précision le tracé de la galerie du Bestouan en surface, des mesures par bobine électromagnétique sont effectuées en 2004-2005. La galerie oscille entre -30 m de profondeur et le niveau de la mer, donnant ainsi accès à des cloches d'air le long du parcours. Les cloches situées à 700 m et 1300 m de l'entrée sont ainsi repérées, par une bobine de 2 mètres de diamètre déployée dans la cavité hors d'eau. Cette technique

est toutefois dépendante de la présence de cavités hors d'eau, ce qui limite son utilisation à Bestouan sur un éventuel dernier point situé à 2650 m dans la galerie du flou. En 2010, une nouvelle mesure est mise en œuvre, toujours basée sur la détection d'un champ électromagnétique en surface, mais cette fois-ci il est émis par une balise étanche (Balise BPS Valade, Photo 2) fonctionnant sous l'eau. Un premier point à 1850 m de l'entrée sera repéré.

3.2- Suivi physico-chimique des rivières souterraines sous-marines

Les variations physico-chimiques des rivières souterraines de Port Miou et du Bestouan sont suivies en continu, dans un forage atteignant la galerie 50 mètres avant la sortie en mer à Bestouan, et au barrage 530 mètres avant la mer à Port Miou. La conductivité électrique, la température, la turbidité, la fluorescence de l'eau sont enregistrées au pas de temps de 15 minutes, et en partie visibles sur internet sur le site karsteau.fr depuis 2009. En complément, les spéléo-plongeurs ont embarqué une sonde CTD (Conductivité électrique, Température, Pression – CTD DIVER) lors de trois plongées sur les rivières, avec un pas de temps d'acquisition de 10 secondes.



Photo 2 : La balise électromagnétique dans la rivière souterraine de Bestouan (Photo Hervé Chauvez)

4. Résultats et discussions

4.1- Le tracé des galeries sous-marines

Le report des différents levés topographiques et des repérages électromagnétiques est présenté sur la Figure 1. Les deux galeries karstiques se développent dans les calcaires à faciès urgonien, typiques des calanques de Marseille.

La galerie de Port Miou est de grande dimension, avec une surface de 200 à 400 m², pouvant localement atteindre des dimensions gigantesques de 40 m de diamètre. La morphologie de la galerie, marquée par un remplissage de plusieurs mètres sous le barrage, et la présence de banquettes limites sur les parois noyées (Photo 1) atteste de

l'histoire polyphasée de son évolution. Cette galerie a été en partie comblée par le passé. Les dimensions pluridécamétriques de la galerie et le puits terminal assimilable à un puits-cheminée sont proche des caractéristiques du karst de Saint Marcel d'Ardèche (MOCOCHAIN ET AL. 2006). La galerie de Port Miou pourrait ainsi être interprétée comme étant la résurgence d'une paléo-rivière de surface s'infiltrant dans une perte en amont. La galerie de Bestouan est beaucoup plus tourmentée, de dimensions modestes de quelques mètres de diamètres, et oscillant plusieurs fois entre 0 et 30 mètres de profondeur.

Le courant est fort, compliquant la progression des plongeurs dans certains secteurs de section réduite. Des dépôts d'argile sont également observés dans les zones plus calmes au fond de la galerie. L'axe principal repéré jusqu'à 1850 mètres est SO-NE (Figure 1). Au-delà, les galeries ne sont pas localisées précisément, et seule une vaste zone de développement est connue. Cette zone correspond à une dépression comblée de sédiments récents à l'allure d'un paléo-poljé (étude en cours P. Rochette/C. Vella/C. Romey – CEREGE).

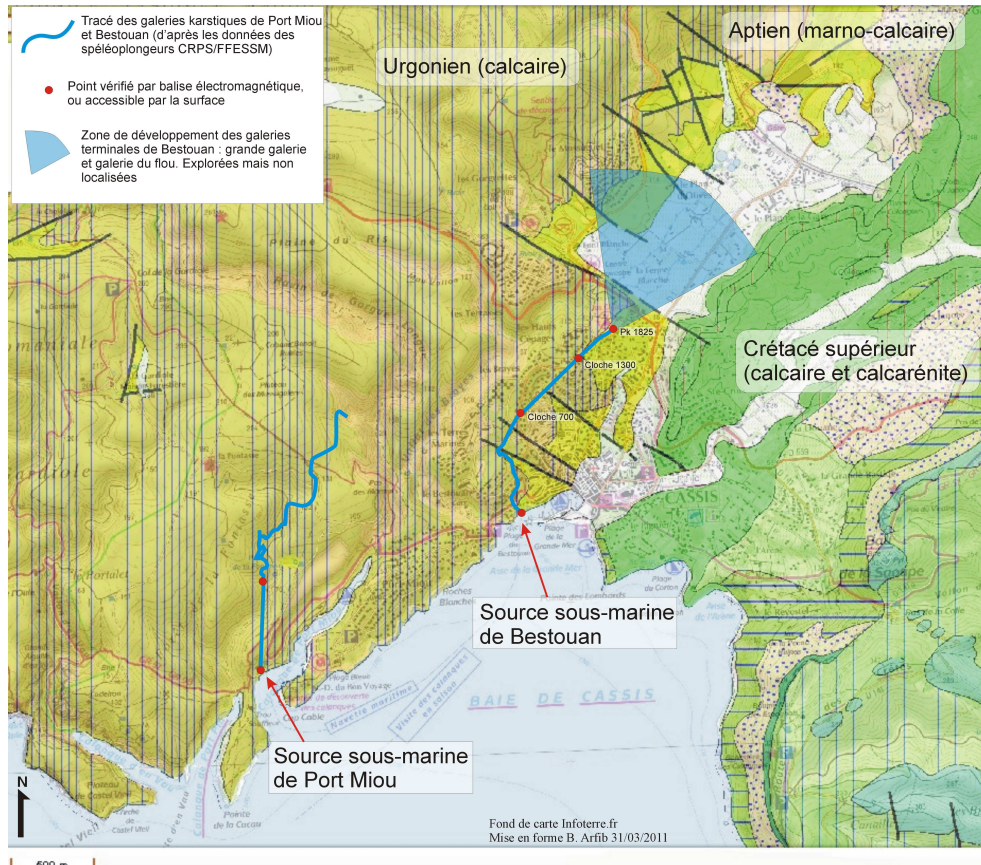


Figure 1 : Tracé des rivières souterraines sous-marines de Port Miou et de Bestouan sur fond de carte géologique (vecteur harmonisé BRGM 1/50 000 – infoterre.fr) et scan 25 en transparence (IGN – infoterre.fr)

Location of the submarine rivers of Port Miou and Bestouan, on a geological map and topographic map in transparency (web site infoterre.fr)

4.2- L'écoulement d'eau douce et d'eau de mer dans les galeries

Les mesures de salinité/température/pression faites au barrage de Port Miou montrent une nette corrélation entre les différents paramètres (Figure 2). L'augmentation du débit génère une diminution de la salinité et de la température de l'eau au point de mesure.

Sur la période présentée, entre octobre 2009 et 2010, deux séries de mesures ont été acquises lors des plongées sur 200 et 250 mètres en amont du barrage de Port Miou, respectivement le 24 octobre 2009 (Figure 3) et le 30 mai

2010 (Figure 4). Ces dates correspondent à la fin de l'étiage estival (octobre) et à la fin de la période de hautes-eaux (mai). On observe une salinité (ou conductivité électrique) légèrement plus douce à la surface de la vasque amont du barrage de PortMiou. Une stratification de l'écoulement est mise en évidence, avec une lentille d'eau plus douce (mais toujours saumâtre) en surface. Cette lentille d'épaisseur de quelques mètres (sur 20 mètres de colonne d'eau totale) au droit du barrage n'est pas rencontrée dans la galerie explorée, probablement du fait de la position du trajet des plongeurs. Ensuite, durant toute la plongée, la salinité et la température de l'eau sont constantes, indiquant qu'il n'y a pas d'arrivée massive d'eau douce ou salée.

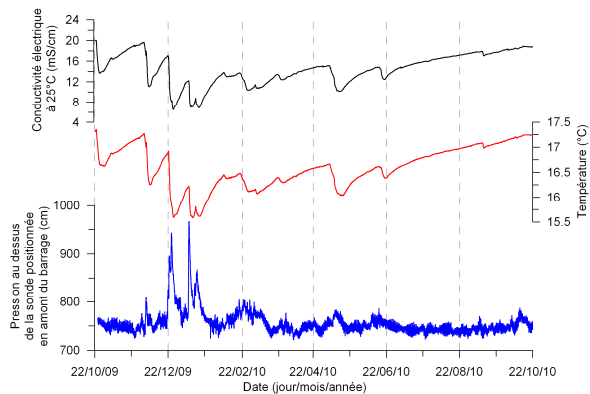


Figure 2 : Enregistrement en continu de la pression, température et conductivité électrique au barrage de Port Miou

Continuous data monitoring of pressure, temperature and electrical conductivity at the underground subaquatic dam of Port Miou

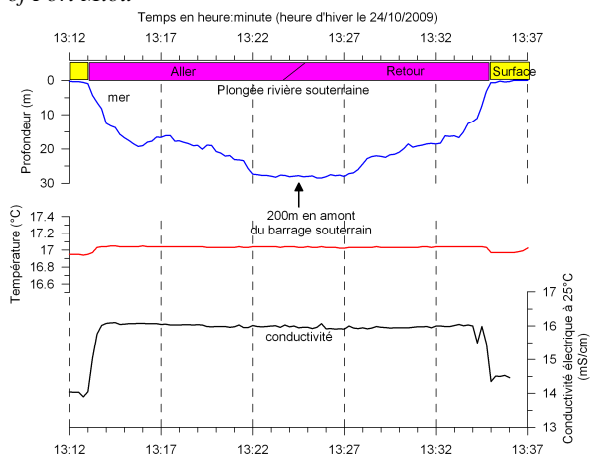


Figure 3 : Enregistrement de la pression, température et conductivité électrique lors de la plongée à Port Miou du 24 octobre 2009

Continuous data monitoring of pressure, temperature and electrical conductivity during the cave-diving exploration at Port Miou the 24th of October 2009 up to 200m upstream the dam

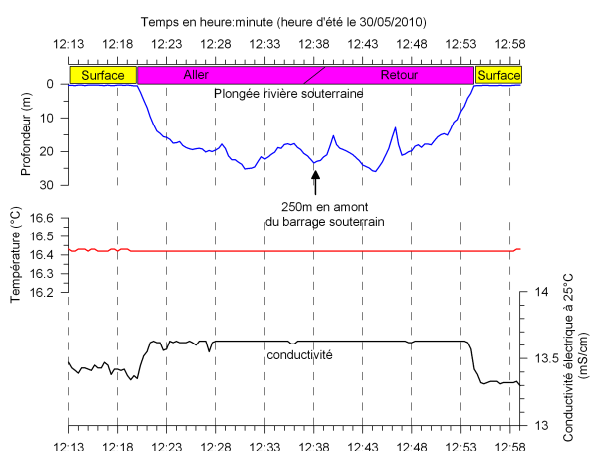


Figure 4 : Enregistrement de la pression, température et conductivité électrique lors de la plongée à Port Miou du 30 mai 2010

Continuous data monitoring of pressure, temperature and electrical conductivity during the cave-diving exploration at Port Miou the 30th of May 2010 up to 250m upstream the dam

La galerie de Bestouan est, comme Port Miou, parcourue par un courant d'eau saumâtre de salinité et de température constantes sur les 850 mètres de distance explorés le 9 novembre 2009 (Figure 5). Il n'y a pas d'arrivée massive d'eau douce ou salée ; la salinité de l'eau étant acquise en amont. Toutefois, l'eau de Bestouan est moins salée et plus fraîche qu'à Port Miou à la même date (le 9/11/09 14h : T=15,85°C, C=8,75mS/cm à Bestouan (Figure 5), T=16,89°C, C=16,67mS/cm à PortMiou (**Figure 2**)). Cet écart entre Port Miou et Bestouan s'observe toute l'année (CAVALERA 2007) mais tend à diminuer en crue.

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'en amont des mesures de l'exploration du 9 novembre 2009, il subsiste un point particulier qui nécessitera des investigations complémentaires. Il s'agit du croisement entre la grande galerie et la galerie du flou. Cette dernière s'appelle ainsi car le courant qui la parcourt crée une zone de flou lorsqu'il se mélange à l'eau de la galerie principale, indiquant probablement un fort contraste de salinité entre ces deux eaux.

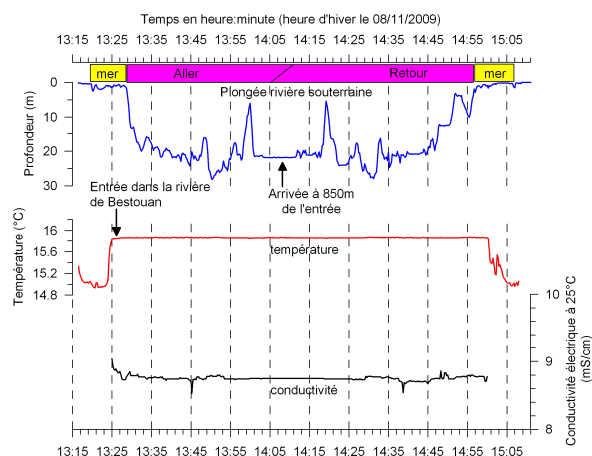


Figure 5 : Enregistrement de la pression, température et conductivité électrique lors de la plongée au Bestouan du 8 novembre 2009

Continuous data monitoring of pressure, temperature and electrical conductivity during the cave-diving exploration at Bestouan the 8th of November 2009 up to 850m from the sea entrance

5- Conclusion

Les deux sources de Port Miou et de Bestouan, pourtant proches l'une de l'autre et drainant le même aquifère, illustrent l'hétérogénéité du karst et la difficulté de prédire l'intrusion saline dans ce type de milieu. En effet, la salinité de l'eau saumâtre de ces sources côtières est acquise en amont des zones explorées par l'homme. A Port Miou, une mince lentille d'eau douce "flotte" sur l'eau saumâtre mais

n'influence pas la salinité de l'eau circulant dans la galerie sur les 250 mètres investigués. L'eau de la source de Bestouan reste beaucoup moins salée que celle de Port Miou, avec une salinité et température constante sur les 850 premiers mètres investigués.

De plus, le positionnement précis de la galerie de Bestouan par balise électromagnétique permet de mettre en relation les zones de divagation et de trémie des conduits karstiques avec un paléo-poljé s'étant mis en place à la faveur d'un effondrement structural affectant l'urgonien et l'aptien. C'est également dans ce même secteur que se mélangent probablement des eaux d'origine et de salinité différentes formant le flou observé par les plongeurs à 2440 mètres de la mer.

Remerciements:

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet KarstEAU, financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil Général du Var, le Conseil Général des Bouches-du-Rhône, et la Région Provence-Alpes-Côtes d'Azur.

Merci aux différents partenaires :

- Plongeurs : Olivier André, Patrick Arrighi, Patrick Bolagno, Serge Carraz, Hervé Chauvez, Michel Guis, Richard Jamin, Christian More, Jérémie Prieur-Drevon, Marc Renaud, Sylvain Ruffier, Claude Touloumdjian et Association Rivière Mystérieuse.

- Réalisation des mesures électromagnétiques : Joan Erra (ARCAS) et Daniel Valade (Balise BPS).

- Etudes sur Port Miou et Bestouan : Eric Gilli, Thomas Cavallera, Conservatoire du Littoral, Camargo Foundation.

Références

ARFIB B., GILLI E. (2010) Karst côtier et sources sous-marines- fonctionnement et exploitation. Ouvrage collectif: Karst et grottes de France sous la direction de P. Audra. *Karstologia Mémoires* 19. 358 p.

AUDRA, P., J.-Y. BIGOT, H. CAMUS, G. CLAUZON, E. GILLI, AND L. MOCOCHAIN (2005), The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the French Mediterranean Sea, *Geodinamica Acta*, 17(6), 389-400.

BEDDOWS, P. A., P. L. SMART, F. F. WHITAKER, AND S. L. SMITH (2007), Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity, *Journal of Hydrology*, 346, 18-32.

BURNETT, W. C., M. TANIGUCHI, AND J. A. OBERDORFER (2001), Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone, *Journal of Sea Research*, 46(2), 109-116.

CAVALERA T., ARFIB B., GILLI E. (2010) Les rivières souterraines de Port Miou et Bestouan : les plus longs réseaux noyés des littoraux européens. Ouvrage collectif: Karst et grottes de France sous la direction de P. Audra. *Karstologia Mémoires* 19. 358 p.

CAVALERA T. (2007), Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port-Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère, 403 pp, Université de Provence, Marseille.

DOUCHET M. (Consulté le 31/03/11) La résurgence de PortMiou. La résurgence de Bestouan. <http://www.plongeesout.com/>

DOUCHET M. (2011b) Port Miou, la complexe. *Subaqua* n°234, pp.62-65

DUROZOY G. ET PALOC H. (1967) Recherches sur les ressources en eaux karstiques du littoral méditerranéen français, *Redbook IAHS Pub.* 72, 457-465

FLEURY, P., M. BAKALOWICZ, AND G. DE MARSILY (2007), Submarine springs and coastal karst aquifers: A review, *Journal of Hydrology*, 339(1-2), 79-92.

MENISCUS, X., AND M. CONTE (Consulté le 31/03/11), Compte rendu d'exploration de la résurgence de Port Miou à -179m, 2008, in <http://www.plongeesouterraine.org>

MOCOCHAIN L., J.-Y. BIGOT, G. CLAUZON, M. FAVERJON ET PH. BRUNET (2006) La grotte de Saint-Marcel (Ardèche) : un référentiel pour l'évolution des endokarsts méditerranéens depuis 6 Ma. *Karstologia* n° 48

STRINGFIELD V.T. & LEGRAND H.E. (1971) Effects of karst features on circulation of water in carbonate rocks in coastal areas. *Journal of Hydrology*, 14, pp.139-157

TASSY, A., B. ARFIB, AND E. GILLI (2010), Access to coastal karst water resources through a salinity study during an exceptional high-water event: the case of Port-Miou (Cassis, SE France), in *Advances in Research in Karst Media*, edited by B. Andreo, F. Carrasco, J. J. Durán and J. LaMoreaux, pp. 49-56, Springer.

TULIPANO, L., M. D. FIDELIBUS, AND A. PANAGOPOULOS (Eds.) (2005), COST Action 621 Groundwater management of coastal karstic aquifers, 367 pp., COST Office.