

Etude du bassin d'alimentation des sources sous-marines de Port Miou et Bestouan par traçage artificiel : les marnes de l'Aptien sont-elles imperméables?

B. Arfib⁽¹⁾, T. Lamarque⁽²⁾

(1) Aix-Marseille Univ, CEREGE Centre Saint-Charles,
3, Place Victor Hugo (Case 67), 13331 Marseille cedex 3, France
arfib@cerege.fr

(2) SpéléH2O, 405 av. Bucarin, 83140 Six-Fours-Université
speleh2o@wanadoo.fr

Résumé

Les sources sous-marines de Port Miou et de Bestouan drainent la partie ouest de l'aquifère régional de l'Unité du Beausset, entre Marseille et Toulon (SE France). Les sources présentent un fonctionnement typiquement karstique, avec des fortes variations de débit en fonction des pluies. L'aquifère est composé d'un empilement de roches carbonatées, marneuses et gréseuses, qui laisse présager une compartimentation hydraulique entre les calcaires du Crétacé inférieur et ceux du Crétacé supérieur par les dépôts marneux de l'Aptien (Gargasien). Le rôle de ces terrains marneux sur l'écoulement souterrain est investigué par la mise en œuvre d'un traçage artificiel. 30 kg de Sulforhodamine B ont été injectés dans une perte d'un cours d'eau temporaire. Le traceur est détecté sur les sources de la baie de Cassis. Les vitesses d'écoulement et l'étendu du bassin versant des sources sous-marines sont également appréhendés. Les résultats, inattendus, mettent en évidence une karstification intense à travers tous les terrains du Crétacé.

Mots-clés : source sous-marine, traçage artificiel, karst, Port Miou, Bestouan, marnes

I. INTRODUCTION

Les karsts littoraux sont nombreux autour de la Méditerranée. Ils représentent une ressource potentielle en eau locale, jusque sur la zone littorale lorsqu'ils sont protégés du phénomène d'intrusion saline par une barrière géologique naturelle (Fleury, 2007). Dans le cas contraire, les sources karstiques sont généralement saumâtres, et l'amont de l'aquifère reste alors la cible privilégiée pour l'exploitation d'eau douce. Le rôle des structures géologiques et de la nature lithologique des terrains rencontrés, ainsi que la présence de karsts, sont donc des éléments primordiaux à prendre en compte dans la gestion d'un aquifère carbonaté. Les méthodes sont multiples, basées sur l'analyse du signal physico-chimique au niveau de points d'eau (sources, forages), ou sur la caractérisation géologique (fracturation, géologie numérique), ou sur des méthodes hydro-géophysiques... Le traçage artificiel est une méthode adaptée à la caractérisation de l'écoulement, qui dépend des propriétés de la roche réservoir. Le traçage renseigne sur les relations entre un point d'injection et des points de suivi.

Dans la région de Marseille, l'Unité du Beausset se développe vers l'est jusqu'à Toulon, et de la mer au massif de la Sainte Baume au nord. C'est un vaste synclinal formé d'un empilement de terrains jurassico-crétacés, de type carbonaté (calcaires et dolomies), marneux (Albien) et gréseux. Une large partie (plusieurs centaines de km², Cavalera 2007) est drainée vers l'ouest par les sources sous-marines de la baie de Cassis. Les deux sources de Port Miou et Bestouan présentent un fonctionnement typiquement karstique, avec de fortes variations de débit en fonction des pluies. Les limites exactes du bassin d'alimentation ne sont pas connues avec précision. En particulier, la question du rôle de terrains marneux (Moulade et al. 2004) de l'Aptien (Figure 1) qui affleurent au nord des sources sur plus de 80 mètres d'épaisseur (gare de Cassis) restait sans réponse. Constituent-ils un écran à l'écoulement, individualisant les terrains du crétacé du supérieur et ceux du crétacé inférieur, formant ainsi deux aquifères, l'un drainé vers le sud-est (La Ciotat) et l'autre drainé vers le sud-ouest (Cassis)? Ou au contraire, l'eau souterraine peut-elle

traverser ces terrains et une connexion hydraulique est-elle possible entre le Crétacé supérieur et inférieur, faisant ainsi se déplacer vers le sud-est la limite du bassin d'alimentation des sources de Cassis?

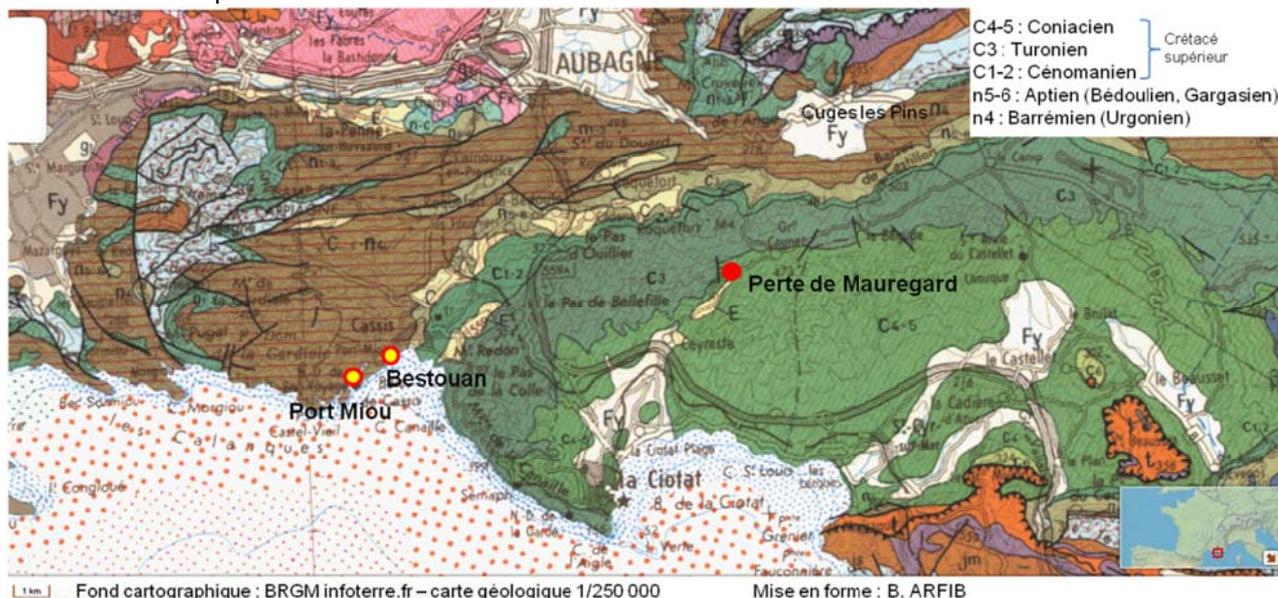


Figure 1: Localisation de la perte de Mauregard et des sources de la baie de Cassis sur un fond de carte géologique 1/250 000.

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé un traçage artificiel à partir d'une perte temporaire d'un cours d'eau située à la limite entre les terrains du turonien et du coniacien, au sud-ouest du plateau du Camp, sous le Grand Caunet (commune de Ceyreste). Il s'agit de la perte de Mauregard (Figure 1), explorable par l'homme jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur, avec arrêt sur un amoncellement de blocs. Le traceur a été recherché sur les sources de la baie de La Ciotat et de Cassis, ainsi que par des prélèvements en forages, par l'installation de fluorimètres automatiques (Schneegg, 2002) et des mesures sur spectrofluorimètre au laboratoire. Les résultats positifs obtenus sur les sources sous-marines de Port Miou et Bestouan permettent de répondre à la question posée, et de discuter du mode d'écoulement de l'eau souterraine dans ce secteur.

II. MATERIEL ET METHODE : traçage artificiel et analyses de fluorescence

II. 1 Injection de traceur artificiel à la perte de Mauregard

Le traceur artificiel utilisé est de la sulforhodamine B. Trente kilogrammes (30 kg), préalablement dilués dans 600 litres d'eau, ont été injectés le 8 février 2011 dans la perte de Mauregard, à sec le jour de l'injection. Le traceur a été poussé par 18 m³ d'eau amenée par les pompiers. La totalité de l'eau s'est infiltrée instantanément au fond de la perte.

Le 14 et 15 février 2011, des pluies importantes sont enregistrées sur la région : jusqu'à 30 mm/jour à la station météo de l'aérodrome du Castellet (10 km du lieu d'injection). Le ruisseau temporaire de Mauregard est en eau et la perte absorbe de l'eau (débit non mesuré, estimé à plusieurs dizaines de litres par secondes durant au moins une journée).

II. 2 Détection de traceur artificiel

Le traceur artificiel est détecté par des mesures en continu in-situ et des analyses au laboratoire sur des échantillons d'eau prélevés quotidiennement sur les sources et forages. Les sources de Port Miou et Bestouan sont chacune équipées d'un fluorimètre de terrain type Albillia, avec un pas de temps de mesure de 15 minutes. Ce sont les sources drainant la baie de Cassis. Dans la baie de La Ciotat, une source (Fontaine Romaine de Ceyreste) est équipée également d'un fluorimètre automatique. L'ensemble des prélèvements d'eau sur les autres points, ainsi que ceux suivis par fluorimètres, sont analysés au laboratoire sur spectrofluorimètre SAFAS FLX (projet KarSTEAU, Aix-Marseille Univ). Des mesures à longueur d'onde fixe sont faites en routine, et les valeurs anormalement hautes sont vérifiées par des spectres d'émission et d'excitation. En complément, des mesures de vérification ont été faites sur sur le

spectrofluorimètre SAFAS Xenius du Laboratoire Chimie et Environnement de l'Université Aix-Marseille. Enfin, dans le cas de Port Miou, une analyse de fluorescence sur HPLC (high performance liquid chromatography) a été menée au Laboratoire Chrono-Environnement de l'Université de Besançon pour validation définitive des échantillons positifs du 24 février 2011.

III. RÉSULTATS

Le suivi de fluorescence a été assuré durant 11 mois, de janvier à novembre 2011. Le traceur recherché n'a pas été détecté sur les points d'eau de la baie de La Ciotat. Dans la baie de Cassis, les deux sources de Port Miou et Bestouan ont donné des résultats positifs.

La figure 2 et la figure 3 synthétisent les résultats obtenus par mesures directes in-situ sur le fluorimètre automatique de Port Miou et par mesures sur spectrofluorimètre au laboratoire. Les résultats de fluorescence donnés dans cet article sont des résultats bruts préliminaires exprimés en unité arbitraire (u.a.). La gamme de sensibilité est plus forte sur le spectrofluorimètre de laboratoire FLX KarstEAU (entre 0,5 et 16 u.a.) par rapport au fluorimètre de terrain (entre 1 et 2 u.a.). Les courbes ainsi obtenues se superposent. Les deux méthodes de mesure donnent des résultats similaires. La courbe du fluorimètre in-situ s'écarte toutefois de celle des analyses au laboratoire au fur et à mesure de l'encrassement du tube optique de l'instrument ; ce phénomène est bien identifiable sur la figure 3 le 24 mars 2011 à 20h00, lorsque le signal chute abruptement lors du nettoyage du fluorimètre sur site (la valeur passe 1,49 u.a. à 1,23 u.a.).

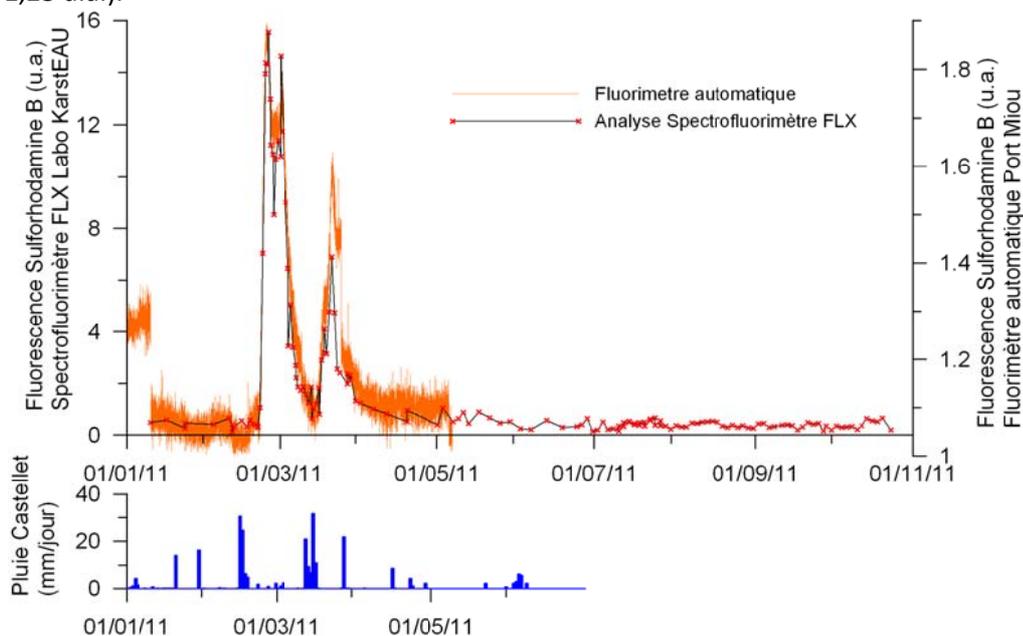


Figure 2 : Evolution de la fluorescence de l'eau de la source sous-marine de Port Miou sur la longueur d'onde caractéristique de la sulforhodamine B, du 01/01/11 au 01/11/11. Mesures au fluorimètre automatique in-situ et sur échantillons au spectrofluorimètre de laboratoire (FLX SAFAS du projet KarstEAU).

Le zoom fait sur la figure 3 montre l'arrivée du traceur à partir du 21 février 2011, dans les heures qui suivent le prélèvement de 8h00 (préleveur ISCO). L'arrivée du front de concentration est très rapide ; le premier pic maximal est observé le 23 février vers midi. La concentration est ainsi maximale en deux jours. Cette période fait suite aux pluies du 14 février 2011, qui ont provoqué de fortes infiltrations d'eau dans les calcaires, et des crues sur les sources. La perte de Mauregard a fonctionné, absorbant une partie du ruisseau temporaire provenant du Grand Caunet. Le traceur injecté le 8 février 2011 dans la perte à sec a alors été poussé vers la profondeur. Le 21 février et les jours suivants, soit 7 jours après les pluies et le fonctionnement de la perte, les sources de Port Miou et de Bestouan ne sont plus en crue lors de l'augmentation de concentration en sulforhodamine B. Ces conditions hydrologiques sont favorables à des mesures de qualité, avec une eau très peu turbide, et un débit peu variable.

La courbe de concentration entre le 21 février et le 30 mars 2011 montrent deux événements distincts (figure 2, figure 3) : le premier événement entre le 21 février et le 14 mars 2011, puis le second événement entre le 14 et le 30 mars. A la fin du premier événement, la fluorescence de l'eau en sulforhodamine B est revenue à une valeur proche du bruit de fond des sources de Port Miou et Bestouan (Arfib et Lamarque, 2012). Le 12 mars, puis le 15 mars, des pluies orageuses s'abattent de nouveau sur la région, entraînant de nouvelles crues sur toutes les sources de l'Unité du Beausset. Un second pic de concentration est enregistré à Port Miou et Bestouan, de concentration maximale et de durée plus faibles.

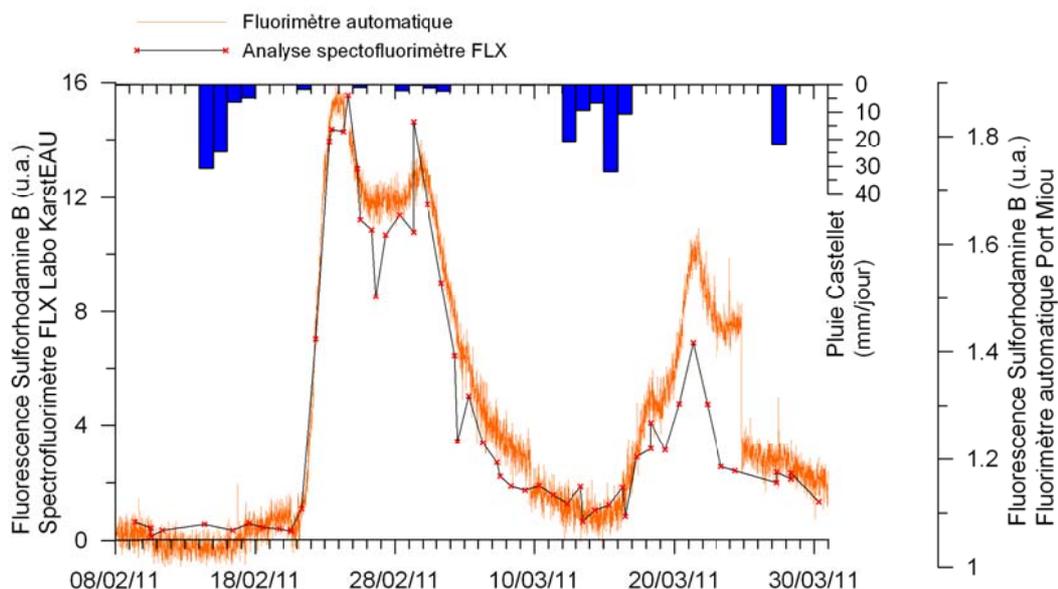


Figure 3 : Détection de sulforhodamine B à la source sous-marine de Port Miou à partir du 21 février 2011 (zoom de la figure 2), par mesures au fluorimètre automatique in-situ et sur échantillons au spectrofluorimètre de laboratoire (FLX SAFAS du projet KarstEAU).

Le traceur est donc arrivé aux sources 13 jours après l'injection. Les pluies ayant joué un rôle important, en poussant le traceur dans la perte initialement à sec, le temps de transit peut être calculé sur la base de la mise en eau de la perte suite aux pluies, ce qui donne un temps de transfert de 7 jours après les pluies.

La distance séparant la perte de Mauregard du barrage souterrain de Port Miou est d'environ 12 km à vol d'oiseau (figure 1). Sans appliquer de facteur correctif sur la distance réelle, la vitesse de circulation minimale est donc approximativement de 1,7 km par jour (ou 71 m/heure) en considérant un temps de transfert de 7 jours.

IV. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

Le traçage de la perte de Mauregard, au nord de Ceyreste, sous le plateau du Camp et du Grand Caunet, met en évidence une relation hydraulique souterraine rapide avec les sources sous-marines de Port Miou et Bestouan dans la baie de Cassis.

Il en résulte quatre implications géologiques et hydrogéologiques majeures :

- 1- une partie de l'eau souterraine émergeant aux sources de Port Miou et Bestouan a la même origine ;
- 2- le bassin d'alimentation des sources de Port Miou et Bestouan s'étend vers l'est de Cassis et le sud de Cuges les Pins dans les formations carbonatées du Crétacé supérieur ;
- 3- l'eau souterraine traverse les terrains réputés peu perméables marneux de l'Aptien (Gargasien) et du Cénomaniens. Ces terrains ne constituent donc pas localement un écran entre le Crétacé supérieur et le Crétacé inférieur (Urgonien);
- 4- le transfert très rapide implique un écoulement de type karstique, dans des vides de grande dimension.

Le rôle du niveau marneux aptien a pu ainsi être investigué par traçage artificiel. Ce niveau marneux peut : a) être localement absent, par exemple à la faveur d'un haut fond paléo-géographique ou d'une zone d'intense érosion à l'Albien lors du Bombement Durancien, ou b) être plus probablement présent en

profondeur (il n'y a pas de lacune sur les zones d'affleurements), mais parcouru de discontinuités qui favorisent la circulation de l'eau souterraine. Pourtant à l'affleurement il n'existe pas de faille traversant toute la série carbonatée de l'Urgonien au Coniacien. Ce sont alors des failles synsédimentaires qui peuvent affecter le Crétacé inférieur et la base du Crétacé supérieur, et être masquées par les terrains sus-jacents du Turonien déposés postérieurement. Ces failles synsédimentaires peuvent avoir une extension plus ou moins profonde, et avoir également subi un déplacement. Une telle faille, d'orientation NO-SE, est bien visible au sud du poljé de la Ferme Blanche à Cassis, traversant l'Urgonien, l'Aptien et le Cénomanién inférieur.

Des processus karstiques s'ajoutent à ces processus d'origine tectonique ou sédimentologique. Les niveaux marneux peu perméables favorisent la formation de grands vides karstiques (Gilli, 2010). L'eau souterraine s'écoulant au contact des marnes va élargir les vides souterrains par deux actions : 1) par dissolution chimique "classique", et 2) par érosion mécanique dans les matériaux marneux tendres. De plus, ces vides peuvent également engendrer une instabilité et l'effondrement des voutes calcaires sus-jacentes, agissant ainsi comme un facteur d'élargissement supplémentaire.

Les marnes ne forment donc pas systématiquement un niveau imperméable dans les aquifères à composante karstique.

Remerciements

Cette étude fait partie 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, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et l'Université de Provence.

L'accès aux sites de mesure de Port Miou et de Bestouan est possible grâce au soutien du Conservatoire du Littoral, de l'ONF, de la Fondation Camargo. Les données de la Station pluviométrique du Castellet (aérodrome) sont fournies par Météo-France. L'entraînement du traceur lors de l'injection a été grandement facilité par les pompiers de La Ciotat-Ceyreste, et M. Aicardi Gilles, Maire de Cuges les Pins.

Ce traçage n'aurait pas pu avoir lieu sans l'aide précieuse de terrain de tous les bénévoles qui nous ont aidé lors de la préparation du traçage, de l'injection du traceur, et lors de la relève des données à Port Miou. Nous remercions tout particulièrement les Spéléo-Club du GAS, LGG, Aragnous, UTAN et Cuges les Pins, le CDS83, Hervé Tainton, l'Association Explo-Canyon-Provence ainsi que les doctorants du Laboratoire de Géologie de l'Université de Provence (aujourd'hui CEREGE Centre Saint Charles). Merci également au Laboratoire Chrono-Environnement de l'Université de Besançon, au Laboratoire Chimie et Environnement de l'Université Aix-Marseille, à Marc Floquet, Professeur à l'Université Aix-Marseille pour ses nombreuses explications pédagogiques sur la sédimentologie de l'Unité du Beausset, et à Arnaud Founillon, doctorant du projet KarstEAU, pour ses avis éclairés sur la géologie et l'hydrogéologie de l'Unité du Beausset.

Références bibliographiques

Arfib B., Lamarque T. (2011) Traçages artificiels KarstEAU 2011 - Rapport de synthèse des injections d'Acide Amino G, Sulforhodamine B et Fluorescéine à Cuges les Pins, Ceyreste et Signes. Université de Provence. 53 pages Disponible sur www.karsteau.fr

Arfib B., Lamarque T. (2012) Résultats préliminaires et premières interprétations du traçage KarstEAU du 08 février 2011 par injection de Sulforhodamine B à la perte de Mauregard (Ceyreste) (version du 09/02/2012). Résultats positifs sur les sources sous-marines de la baie de Cassis : Bestouan et Port Miou. Aix-Marseille Université. 13 pages. Disponible sur www.karsteau.fr

Cavalera Thomas (2007) Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (cassis, bouches-du-rhone). Approche multicritere. Thèse de doctorat de l'Université de Provence. 403 pages

Fleury P., Bakalowicz M., Marsily de G. (2007) Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. Journal of Hydrology 339, 79– 92

Gilli E. (2010) Les grands volumes karstiques souterrains Ouvrage collectif: Karst et grottes de France sous la direction de P. Audra. Karstologia Mémoires 19. 358 p.

Moullade M., Tronchetti G., Kuhnt W., Renard M. & Bellier J.-P. (2004).- Le Gargasien (Aptien moyen) de Cassis-La Bédoule (stratotype historique de l'Aptien inférieur, SE France): localisation géographique et corrélations stratigraphiques.- [Carnets de Géologie - Notebooks on Geology](#), Maintenon, Note brève 2004/02 (CG2004_L02_MM_etal), 4 pages.

Schnegg P.A. (2002) An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer test with three tracers and turbidity measurement. Groundwater and Human Development. pp.1484-1488