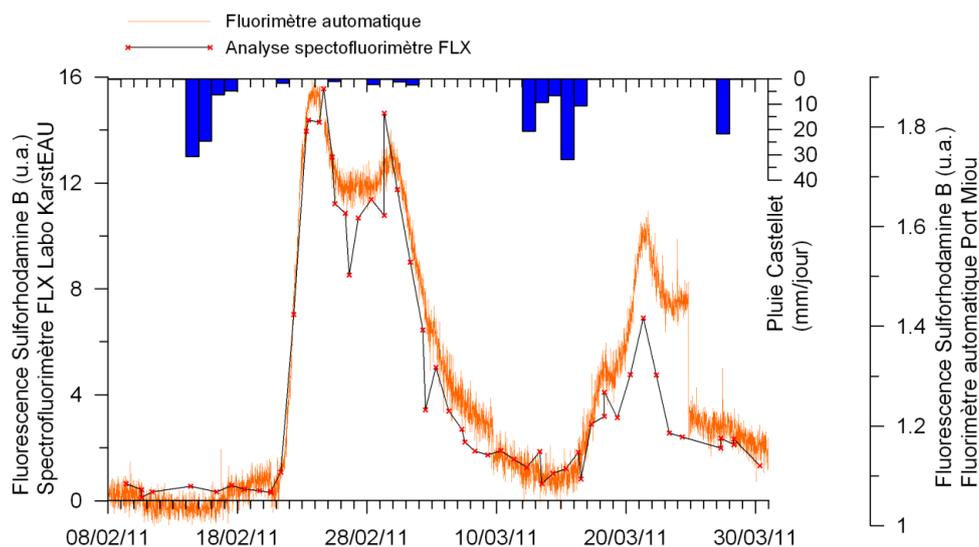


Résultats préliminaires et premières interprétations du traçage KARSTEAU du 08 février 2011 par injection de Sulforhodamine B à la perte de Mauregard (Ceyreste) (version du 09/02/2012)

Résultats positifs sur les sources sous-marines de la baie de Cassis : Bestouan et Port Miou

par

Bruno Arfib, Thierry Lamarque



Marseille, le 09/02/2012

Résultats positifs sur les sources sous-marines de la baie de Cassis : Bestouan et Port Miou

Par Bruno ARFIB¹ et Thierry LAMARQUE², le 09/02/2012

Résumé

Le traceur artificiel injecté à la perte du Mauregard (Ceyreste) le 8 février 2011 est ressorti une dizaine de jours après aux sources sous-marines de Port Miou et de Bestouan. Ce résultat a pu être validé par le suivi en continu des deux sources par des fluorimètres de terrain, ainsi que par des analyses au spectrofluorimètre de laboratoire sur des échantillons d'eau prélevés quotidiennement. Ces résultats, bien qu'inattendus, mettent en évidence localement un transfert rapide à travers les formations marno-calcaires de l'Aptien et du Cénomaniens.

1. Préambule : les traçages KarstEAU 2011

Entre le 18 janvier 2011 et le 13 février 2011, trois traçages artificiels ont été réalisés sur l'Unité du Beausset dans le cadre du projet KarstEAU. Trois molécules fluorescentes ont été injectées : 50 kg d'acide amino G à Cuges les Pins, 35 kg de sulforhodamine B à Ceyreste (Mauregard) et 60 kg d'uranine (fluorescéine) sur le plateau du Camp à Signes. Le détail des injections est présenté dans le rapport de Arfib et Lamarque 2011, et par des films visibles sur internet sur www.karsteau.fr. Durant toute l'année 2011, des échantillons d'eau ont été prélevés sur le terrain au niveau de sources et forages drainant potentiellement ce territoire, afin de détecter ensuite les molécules par analyse sur spectrofluorimètre de laboratoire. Ce suivi était complété par des mesures en continu (toutes les 15 minutes) sur 7 sites équipés de fluorimètres de terrain.

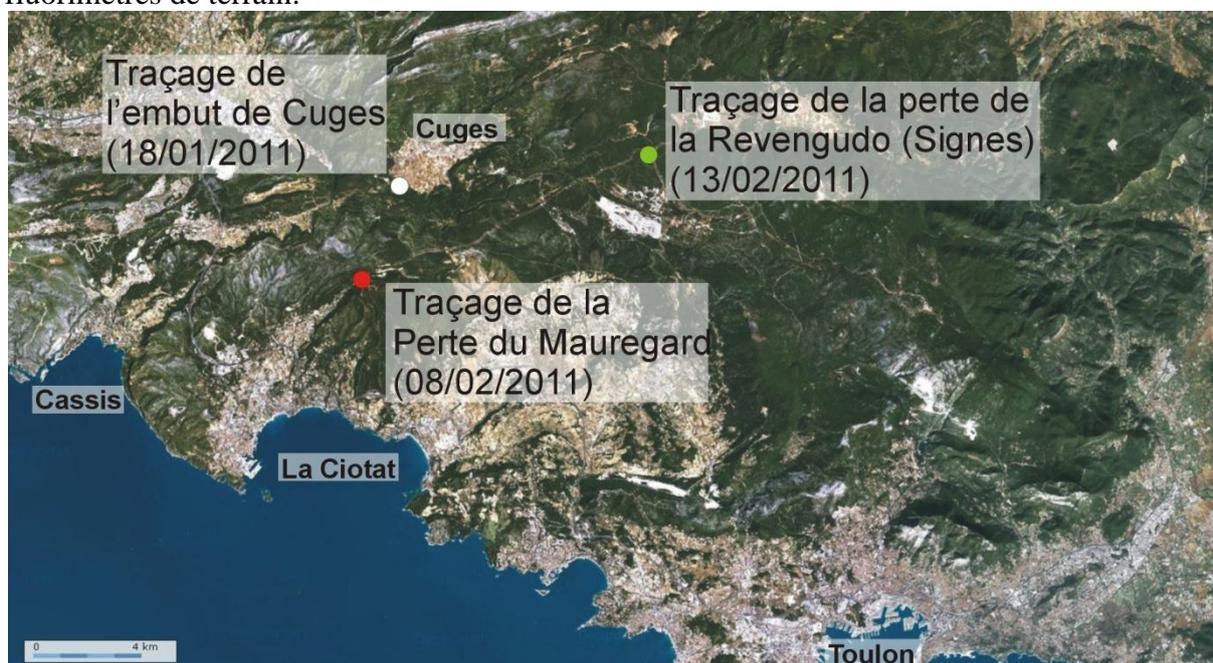


Figure 1 : Photo aérienne de l'unité du Beausset et localisation des 3 injections du multitraçage KarstEAU 2011 (extrait de Arfib et Lamarque, 2011)

¹ Aix-Marseille Université, CEREGE Centre Saint Charles – Voir contacts à la fin du rapport

² SpéléH2O, Six-Fours

2. Objectif de ce rapport

Ce rapport présente les résultats partiels du traçage de la perte de Mauregard (Ceyreste). Ce traçage avait pour objectif de vérifier le devenir des eaux d'infiltration dans le Crétacé supérieur, à partir de l'extrémité ouest du plateau du Camp : 1) vers la baie de La Ciotat, ou 2) vers la baie de Cassis. Géologiquement (Figure 8), la baie de La Ciotat (formations du Crétacé supérieur) est séparée de la baie de Cassis (calcaires du Crétacé inférieur – Urgonien) par les terrains marneux de l'Aptien (Gargasien), réputés peu perméables. Ce rapport présente les résultats des mesures de fluorescence faites sur les sources sous-marines de Port Miou et de Bestouan durant toute l'année 2011. Le traceur a été détecté aux deux sources sous-marines, par les fluorimètres en continu et par les échantillons d'eau analysés au laboratoire. Trois appareils de mesure ont été utilisés au laboratoire pour valider les résultats. Les implications hydrogéologiques découlant de ces résultats sont discutées.

3. Méthodes d'analyses

Les sources sous-marines de Port Miou et de Bestouan (Photo 1, Photo 2, Photo 3) sont équipées en permanence de fluorimètres de terrain (Schneegg, 2002) qui mesurent toutes les 15 minutes la fluorescence de l'eau pour 3 catégories de fluorophores (Fluorescéine, les Rhodamines dont la sulforhodamine B, l'Acide Amino G), ainsi que la turbidité de l'eau.



Photo 1 : Fluorimètre dans le tube de forage de Bestouan



Photo 2 : Datalogger de Fluorimètre de Port Miou



Photo 3 : Le barrage souterrain de Port Miou



Photo 4 : Préleveur automatique type ISCO au barrage souterrain de Port Miou



Photo 5 : Spectrofluorimètre SAFAS FLX du projet KarstEAU, et échantillons d'eau prélevés sur le terrain

Les échantillons d'eau sont prélevés sur le site de Port Miou, directement dans la rivière souterraine par l'intermédiaire d'un préleveur automatique ISCO (Photo 4). Le pas de temps est variable suivant les périodes, généralement fixé à un échantillon toutes les 24 heures ou 48 h. A Bestouan, l'eau est prélevée dans le forage de la Fondation Carmargo manuellement à l'aide d'un préleveur inox, de manière épisodique. Les échantillons sont stockés dans un flacon de verre ambré 30 ml (Photo 5) à l'abri de la lumière afin de les protéger de l'influence du rayonnement lumineux.

Les échantillons sont ensuite analysés au spectrofluorimètre de laboratoire à l'Université Aix-Marseille, sur l'instrument du projet KarstEAU : SAFAS FLX (Photo 5). 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. Le protocole de détermination des couples de longueur d'onde est donné dans la note du 30/01/12 de Arfib, 2012. En complément, lorsqu'un doute subsiste, les échantillons sont également passés 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 par C. Loup du Laboratoire Chrono-Environnement de l'Université de Besançon.

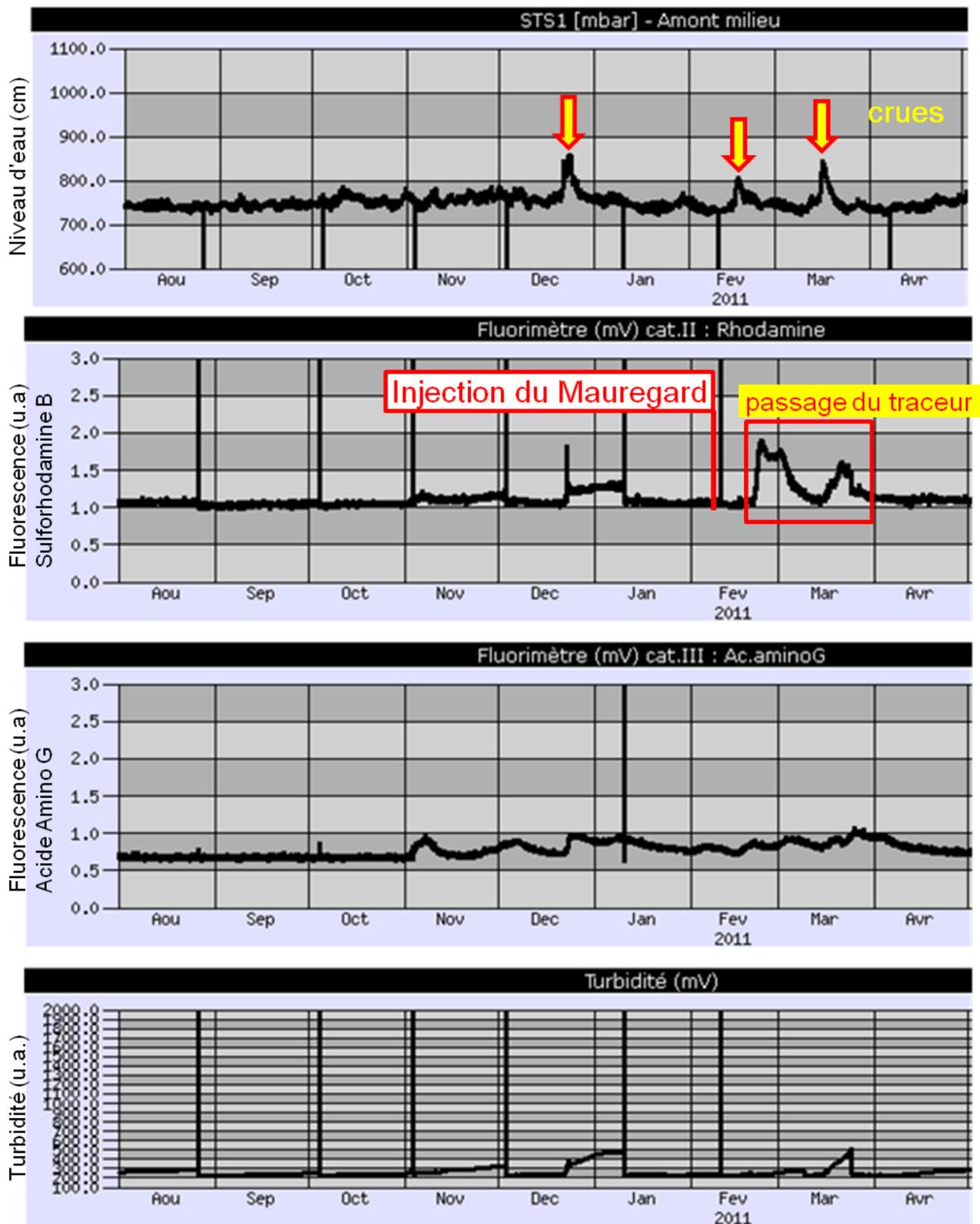
4. Résultats

Plus d'une dizaine de sources, puits et forages ont été suivis durant plusieurs mois depuis janvier 2011, entre La Ciotat et Cassis, pour permettre de détecter les traceurs artificiels injectés. Dans cette "note préliminaire" seuls les résultats des sources sous-marines de Port Miou et Bestouan sont présentés. Les autres points de suivi n'ont pas donné de résultats

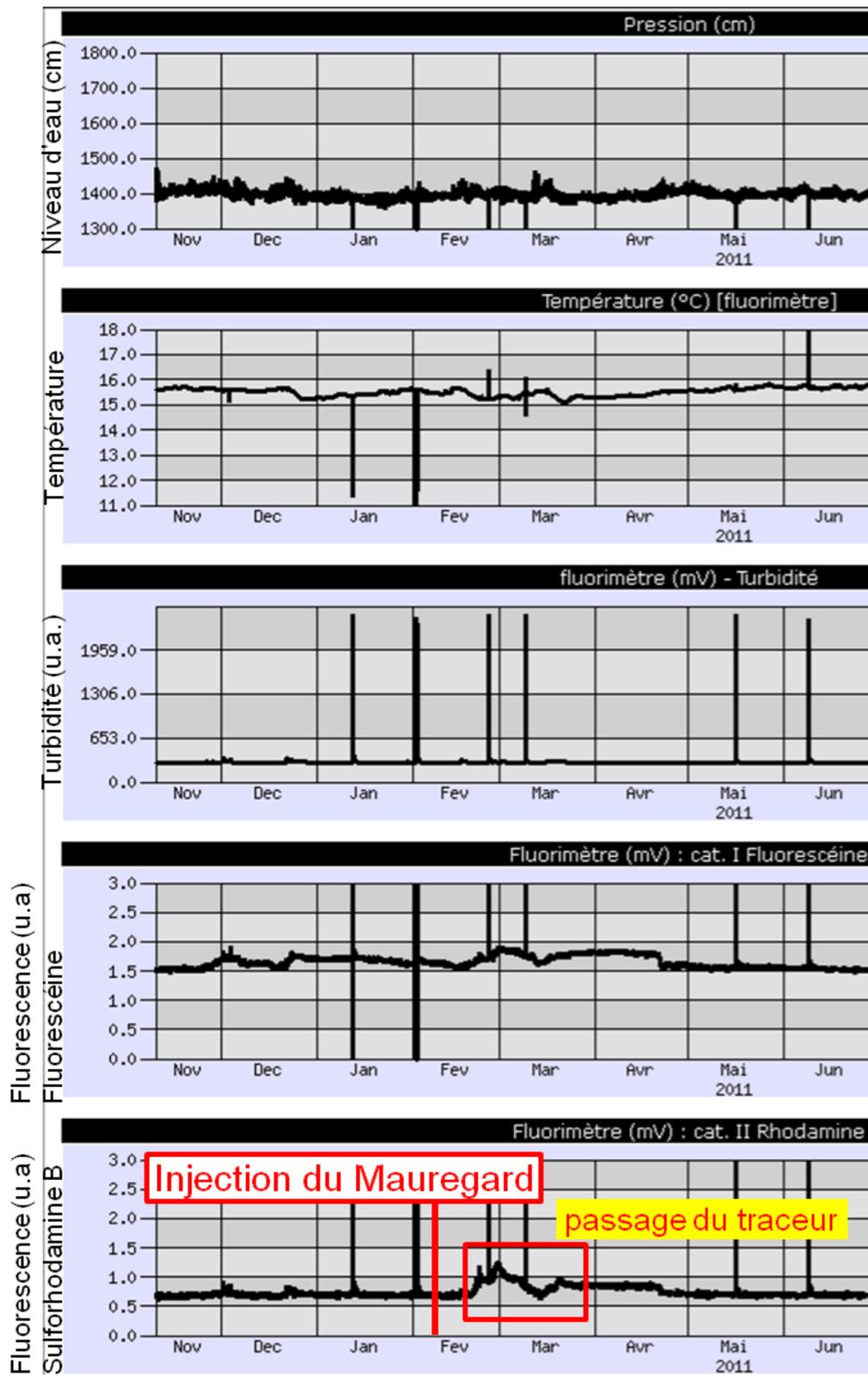
positifs ; certains échantillons restent à analyser, mais les résultats devraient être sans surprise négatifs.

4.1. Fluorimètres automatiques

Fluorimètre automatique à la source sous-marine de Port Miou (Cassis)



Fluorimètre automatique à la source sous-marine de Bestouan (Cassis)



4.2. Analyses au laboratoire

La chronique de valeur acquise automatiquement sur le fluorimètre de Port Miou est confirmée par les mesures faites au spectrofluorimètre de laboratoire présentées en Figure 2. La fluorescence est donnée en unité arbitraire (u.a.) avec une gamme de sensibilité 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 valeurs seront exprimées en concentration dans le rapport final de présentation des résultats à venir en 2012.

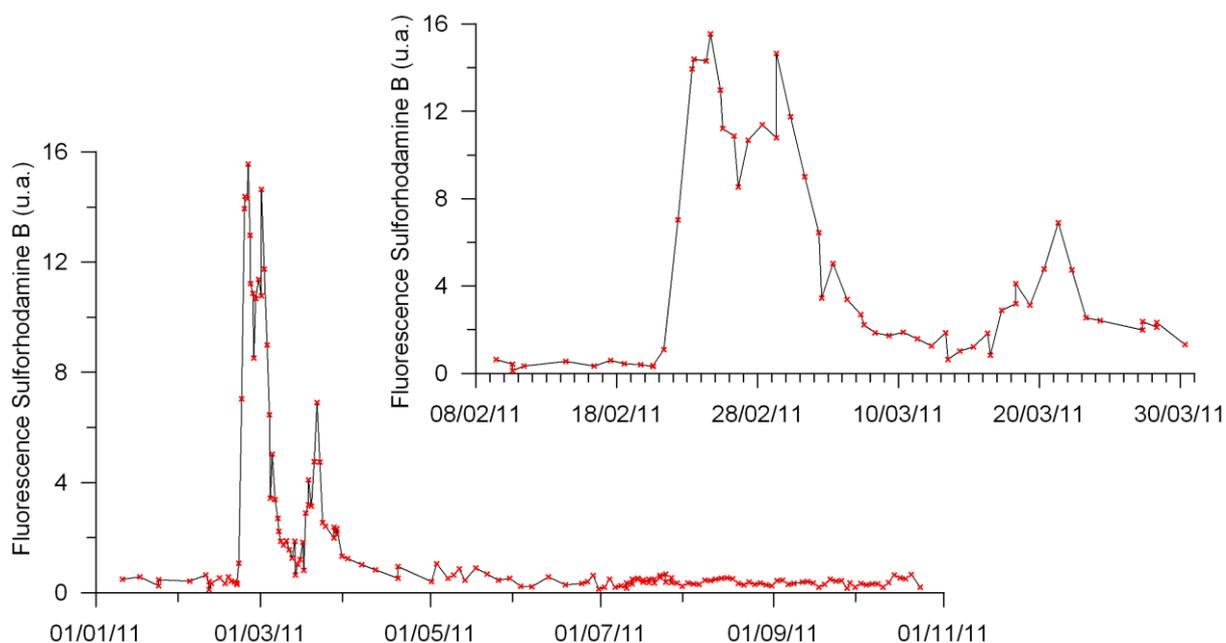


Figure 2 : Mesure de fluorescence de l'eau de Port Miou suivant le couple de longueur d'onde de la sulforhodamine B sur spectrofluorimètre FLX du projet KarstEAU

Les spectres d'excitation et d'émission réalisés sur le spectrofluorimètre Xénius sont donnés en Figure 3. L'échantillon du 21/02/11 est pris dans le bruit de fond de fluorescence de la source, et celui du 24/02/11 lors du pic de fluorescence. Ces résultats valident la présence de sulforhodamine B le 24/02/11, responsable de l'augmentation de fluorescence à la source.

Chaque échantillon prélevé aux sources a fait l'objet d'un spectre d'excitation et d'émission sur le spectrofluorimètre FLX KarstEAU. Les spectres, donnés sur la Figure 4 (entre le 20 et le 27 février 2011), montrent le passage de la sulforhodamine B après l'échantillon du 21 février 2011 8h00.

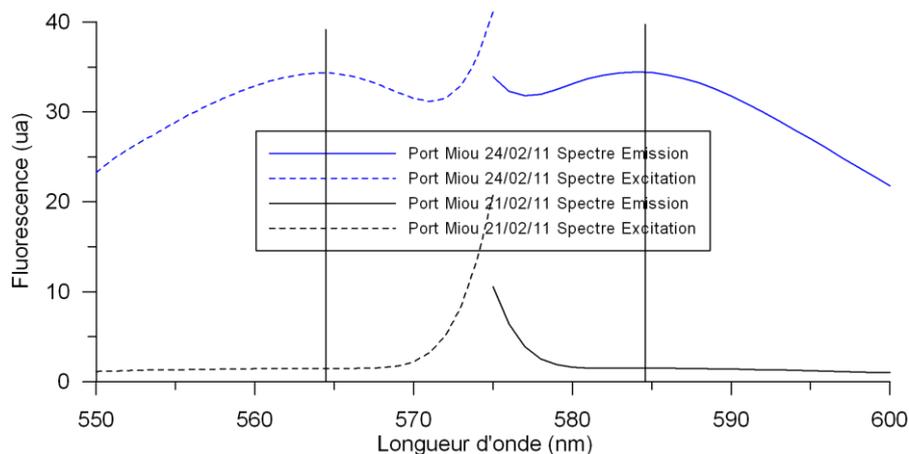


Figure 3 : Spectres d'excitation et d'émission de la sulforhodamine B réalisés sur spectrofluorimètre Xénius, sur 2 échantillons de Port Miou : le 21/02/11 avant l'arrivée du traceur, le 24/02/11 pendant le pic de concentration en traceur

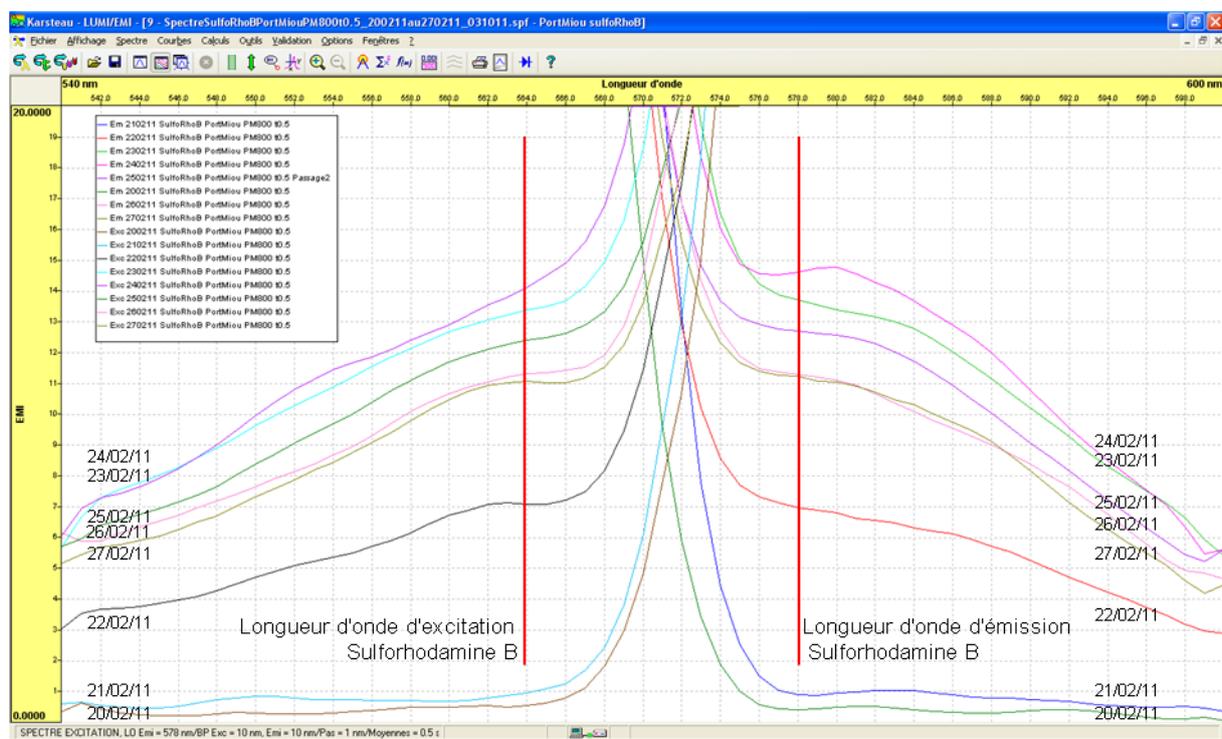


Figure 4 : Spectres d'émission et d'excitation pour la recherche de sulforhodamine B sur les échantillons d'eau prélevés à Port Miou (barrage) entre le 20 et le 27 février 2011 à 8h00. Analyses sur spectrofluorimètre SAFAX FLX projet KarstEAU.

Les concentrations étant faibles, la détection de la sulforhodamine B a été définitivement validée par une analyse par HPLC au Laboratoire de Besançon : l'échantillon du 21 février sert de "blanc" sans traceur, et celui du 24 février 2011 montre bien un pic au même temps d'arrivée que l'étalon de sulforhodamine B.

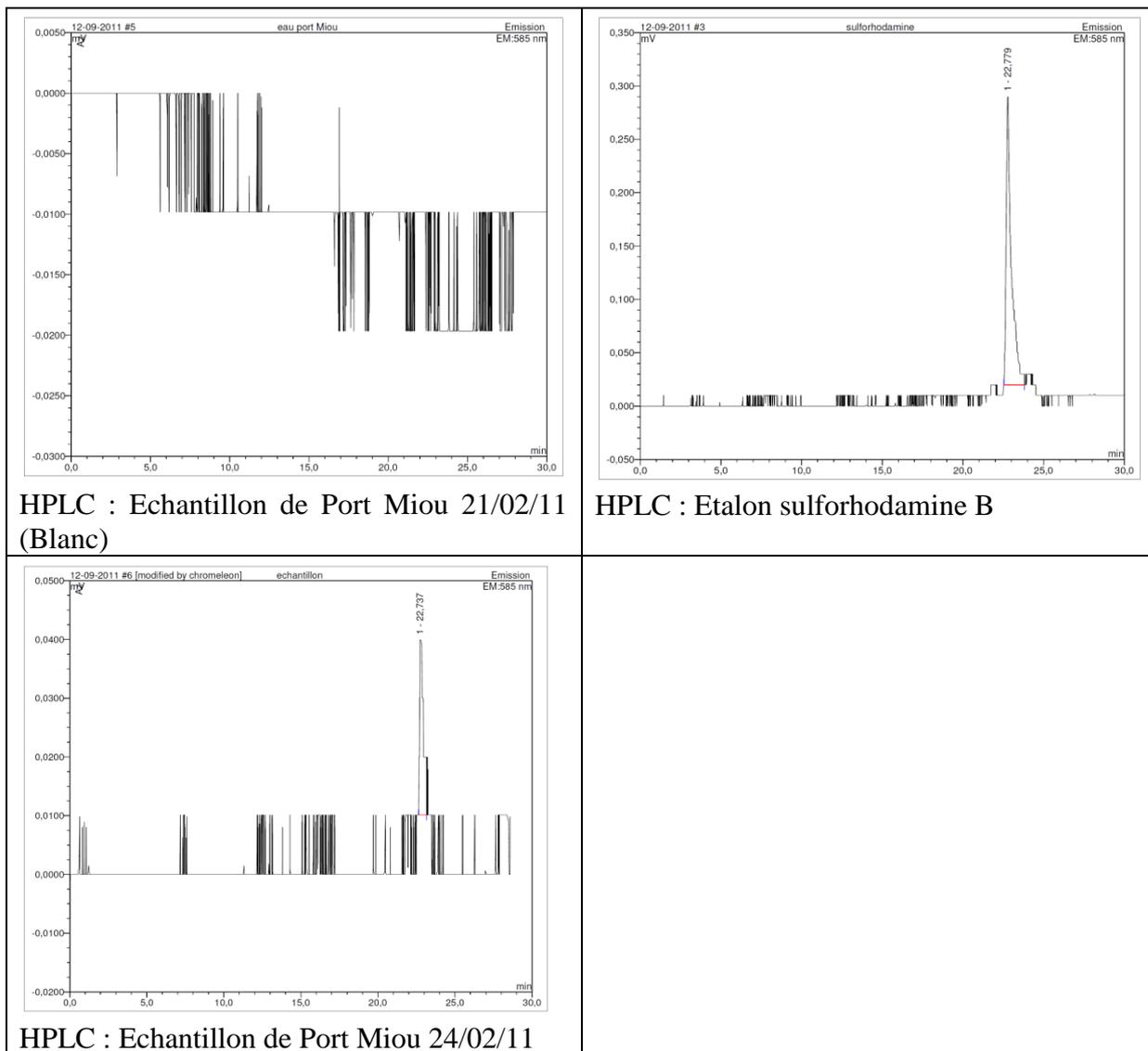


Figure 5 : Détection de sulforhodamine B par HPLC (Univ. Besançon) sur l'échantillon prélevé à Port Miou le 24 février 2011

4.3. Les résultats du suivi de Port Miou et de Bestouan

La Figure 6 et la Figure 7 synthétisent les résultats obtenus par mesures directes in-situ sur le fluorimètre automatique de Port Miou et par mesures sur spectrofluorimètre au laboratoire. 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 7 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.).

Le zoom fait sur la Figure 7 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 6, Figure 7) : 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. 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.

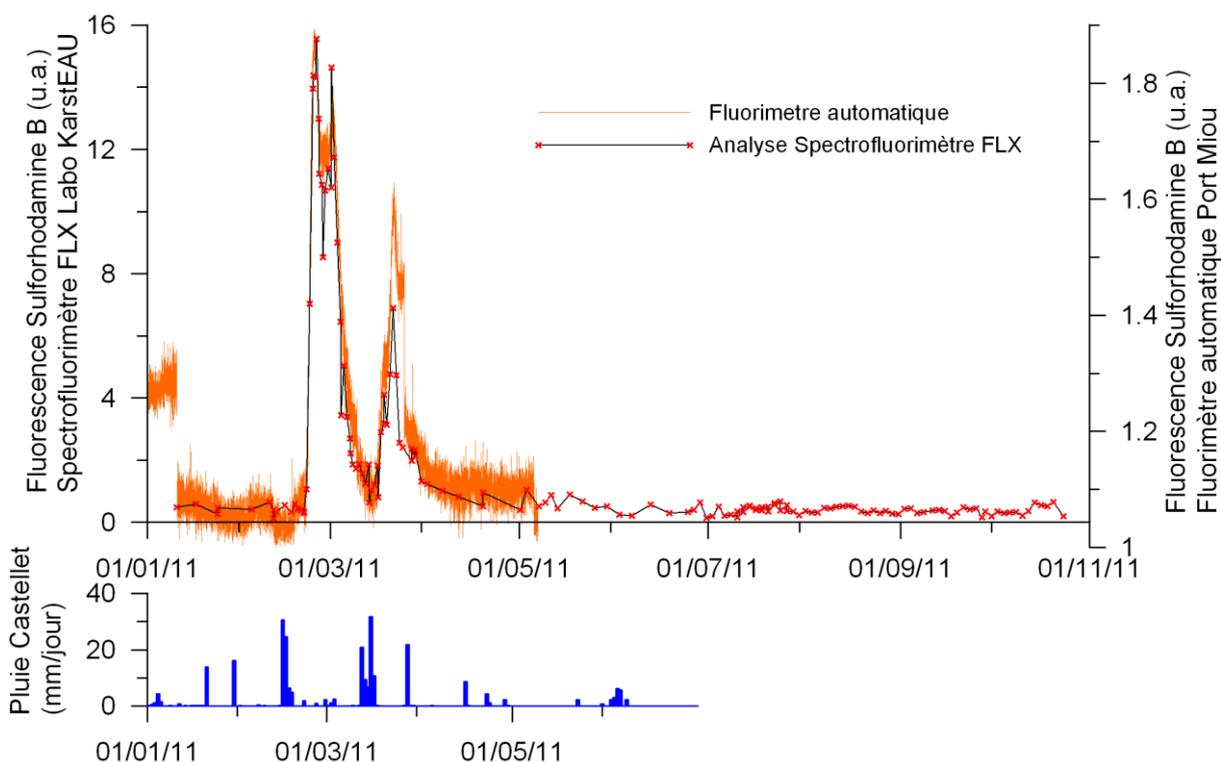


Figure 6 : Evolution de la fluorescence de l'eau de la source sous-marine de Port Miou sur la longueur d'onde caractéristique de la sulforhodamine B, du 01/01/11 au 01/11/11. Mesures au fluorimètre automatique in-situ et sur échantillons au spectrofluorimètre de laboratoire (FLX KarstEAU).

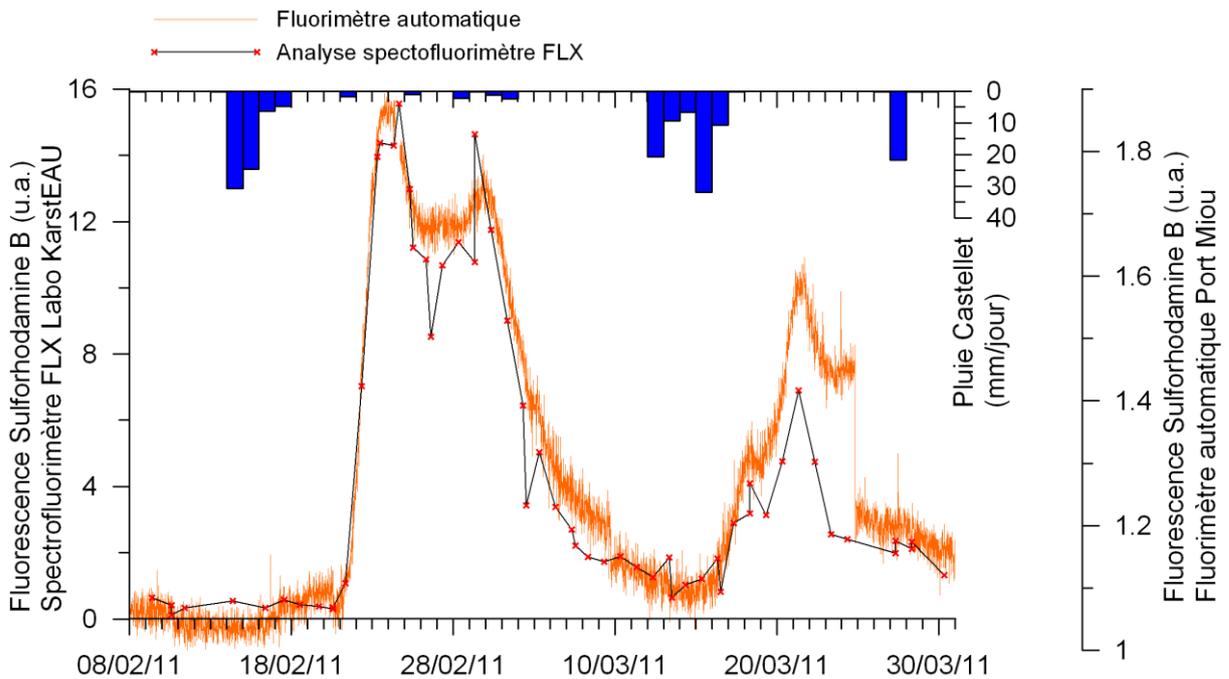


Figure 7 : Détection de sulforhodamine B à la source sous-marine de Port Miou à partir du 21 février 2011 (zoom de la figure précédente), par mesures au fluorimètre automatique in-situ et sur échantillons au spectrofluorimètre de laboratoire (FLX KarstEAU).

5. Interprétation/Discussion/Conclusion sur les résultats

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. Le traceur est arrivé aux sources 13 jours après l'injection. De fortes pluies ont eu lieu le 14 et 15 février 2011 (7 jours après l'injection), mettant en crue toutes les sources de l'unité du Beausset, et provoquant un fort ruissellement s'infiltrant rapidement dans les pertes. Le traceur a alors été poussé vers la profondeur dans la perte de Mauregard. C'est donc 7 jours après les pluies que le traceur est arrivé aux sources sous-marines.

La distance séparant la perte de Mauregard du barrage souterrain de Port Miou est d'environ 12 km à vol d'oiseau (Figure 1, Figure 8). 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.

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.**

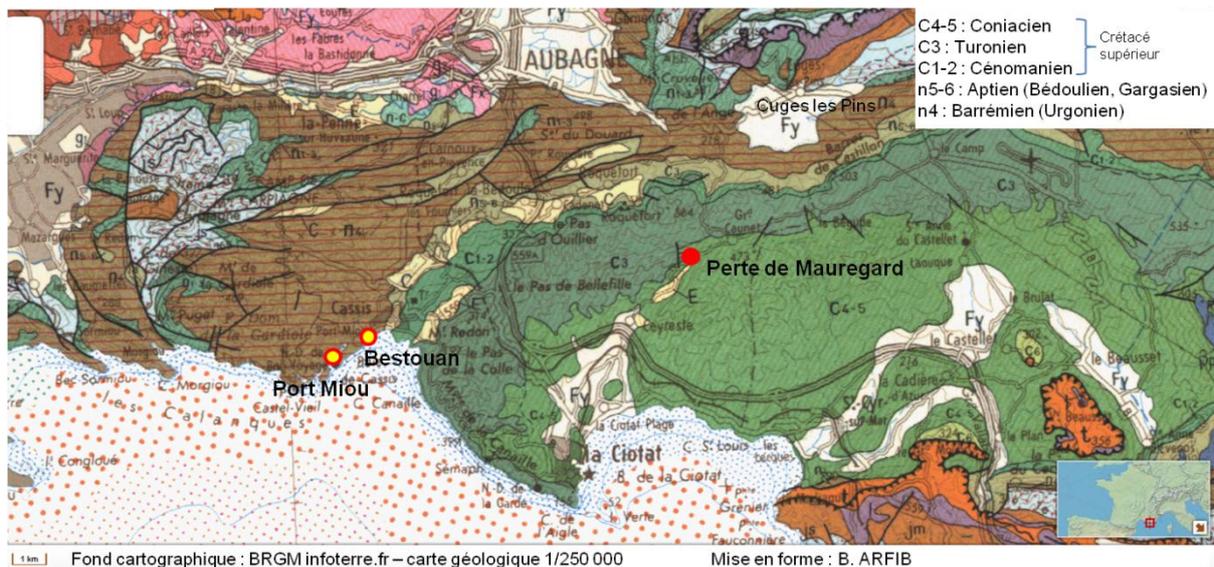


Figure 8 : Localisation de la perte de Mauregard et des sources de la baie de Cassis sur un fond de carte géologique 1/250 000.

Explications géologique et hydrogéologique :

Cet écoulement souterrain rapide emprunte donc des vides karstiques et traverse toute la série carbonatée du Crétacé supérieur (entrée à la perte de Mauregard dans les calcarénites du Coniacien) jusqu'au Crétacé inférieur (calcaires massifs urgoniens des calanques).

Se pose donc la question du rôle des formations marneuses de l'Aptien (Gargasien) et des calcaires gréseux du Cénomaniens inférieur (apparentés généralement à des marnes mais ayant une composante argileuse négligeable)? A l'affleurement, ce niveau marneux s'observe de la mer jusqu'au nord de la perte de Mauregard. Le niveau marneux de l'Aptien (Gargasien) est bien visible dans la carrière Comte à l'est de la gare de Cassis sur plus de 80 mètres d'épaisseur. Il s'observe également à la base de la falaise du Château de Cassis, sous la surface des Lombards (Cénomaniens – l'Albien manque ici). Il affleure aussi au nord de la perte de Mauregard sur la route allant du Grand Caunet vers Roquefort-la-Bédoule.

Ce niveau marneux peut donc, soit 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. Ce niveau marneux peut également être 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 (Figure 9), traversant l'urgonien, l'aptien et le cénomaniens inférieur.

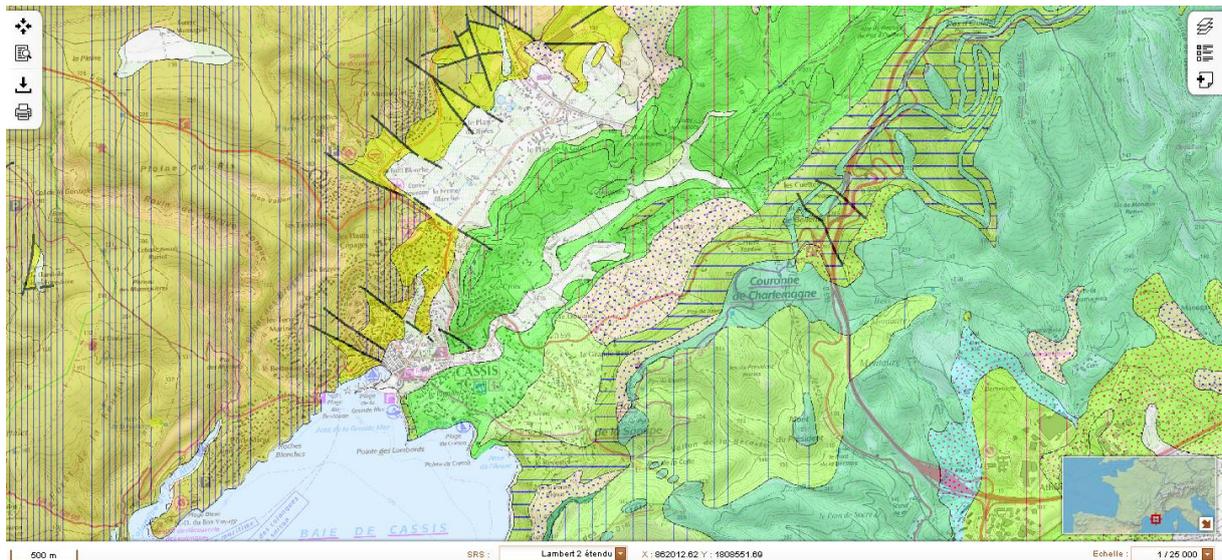


Figure 9 : Carte géologique 1/50 000 centrée sur Cassis. La faille NO-SE découpant le sud du poljé de la Ferme Blanche est bien visible, affectant l'Urgonien jusqu'à la base du Cénomaniens (la légende de la carte est donnée en dernière page de ce rapport)

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 (Figure 10). 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.

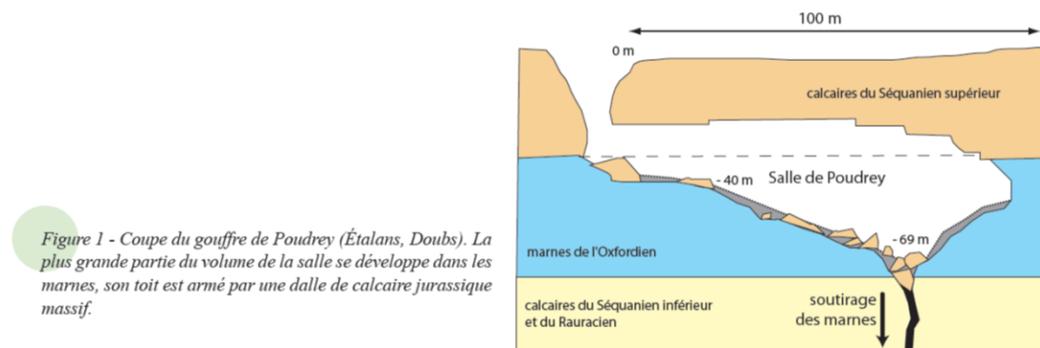


Figure 1 - Coupe du gouffre de Poudrey (Étalans, Doubs). La plus grande partie du volume de la salle se développe dans les marnes, son toit est armé par une dalle de calcaire jurassique massif.

Figure 10 : Illustration schématique de l'impact des marnes sur les volumes souterrains. Exemple pris dans le Doubs, extrait de Gilli 2010 (in Karsts et Grottes de France, Audra ed.).

Le contexte géologique permet donc d'avoir une circulation souterraine profonde jusqu'au Crétacé inférieur. De plus, d'autres indices karstiques existent dans le secteur, avec des vides de grandes dimensions dans le Crétacé supérieur, comme : 1) l'aven-perte du Columbarium sur le plateau du Grand Caunet, et 2) les deux plus grands réseaux spéléologiques (plusieurs kilomètres de développement) dans les formations du Turonien plus à l'est sous la surface du Camp (Réseau Tête de Cade, Abîme de Maramoye (Bigot, 2003)). La perte de Mauregard pourrait être l'entrée vers un nouveau réseau spéléologique de grand développement, qui permettrait ainsi de faire de nouvelles observations souterraines afin de mieux caractériser d'un point de vue géologique et hydrogéologique ce secteur, et qui ouvre aussi de nouveaux espaces d'exploration inconnus...

6. Remerciements

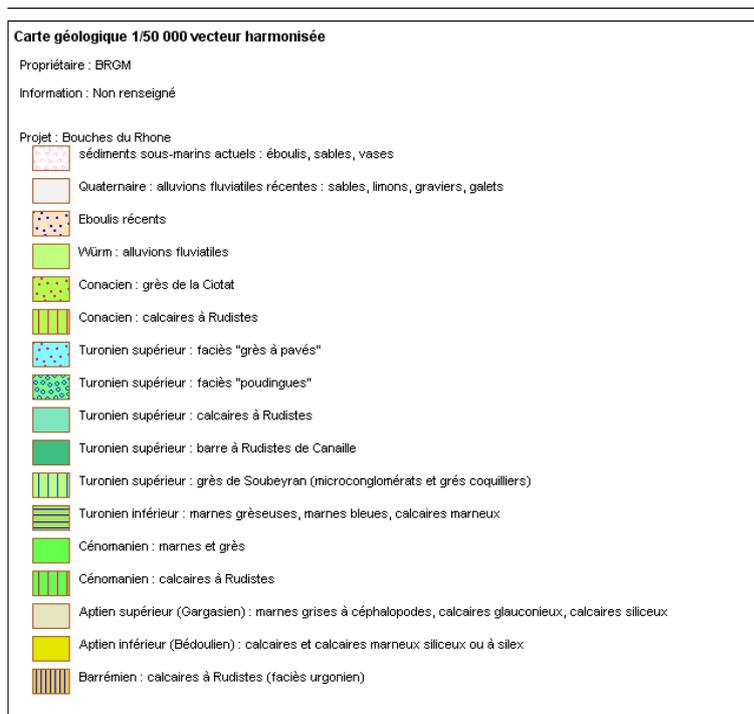
Cette étude fait partie du projet KarstEAU financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil Général du Var, le Conseil Général des Bouches-du-Rhône, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et l'Université de Provence.

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.

7. Bibliographie

- 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. (2012) Note brève sur la caractérisation des couples de longueur d'onde des fluorophores (traceurs artificiels) utilisés lors des traçages artificiels KarstEAU 2011 (Cuges, Ceyreste, Signes). Aix-Marseille Université, CEREGE. 30/01/2012. 7 pages
- Bigot J.Y. (2003) Observations morphologiques dans l'abîme de Maramoye (Le Beausset, Var). *Karstologia* N° 41 - 1/2003, pp.27-38
- 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



Légende de la carte géologique 1/50 000 Marseille-Aubagne. BRGM.
www.infoterre.fr – consulté le 09/02/12

Contacts :

Bruno ARFIB

Aix-Marseille Université, CEREGE - Centre Saint Charles,
 Case 67 - 3 place V. Hugo, 13331 Marseille cedex 3
 Tél : 04 13 55 07 48 / 06 73 68 13 05

Thierry LAMARQUE

SpéléH2O, 405 av. Bucarin, 83140 Six-Fours-University
 Tél : 06 15 19 61 03

Pour citer ce rapport :

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. 14 pages