

Gouffre de la Trione : un ancien site de pollution industrielle

Quel impact sur les eaux souterraines ?

Alexandre ZAPPELLI (1, 2), Frédéric DAMASKO (2)

Introduction

Le gouffre de la Trione est situé sur la commune de Roquefort-la-Bédoule à quelques kilomètres du littoral méditerranéen dans les Bouches-du-Rhône. C'est une commune limitrophe de Cassis, station balnéaire bien connue pour ses deux sources karstiques majeures (Port-Miou [1] et le Bestouan) qui émergent quelques mètres sous le niveau de la mer. Le gouffre s'ouvre sur le front de taille d'une carrière abandonnée (photographie 1). C'est un ensemble de deux puits parallèles atteignant respectivement les cotes -152 et -128 m. Les deux puits se terminent sur des plans d'eau. Environ dix mètres au-dessus du gouffre, sur le sommet du front de taille, subsistent les restes d'une usine abandonnée.

Le gouffre est connu des spéléologues depuis une trentaine d'années [2]. Sa réputation de gouffre pollué n'est plus à faire ! À plusieurs reprises, les explorateurs se sont plaints de difficultés respiratoires, d'irritations cutanées et d'odeurs suspectes de solvants à l'approche des plans d'eau terminaux. Pour compliquer un peu plus la visite de la cavité, de forts taux de CO₂ sont régulièrement ressentis. Il vient immédiatement à l'esprit la dangerosité d'un tel site pour les spéléologues. Nous n'apporterons sur ce point aucun élément quantitatif. Cependant, au vu de nos observations souterraines et



Photographie 1 : Site de l'ancienne carrière, les cavités s'ouvrent sur la falaise/front de taille au second plan.

du ressenti physique de nombreux spéléologues, le CDSC 13 conseille la plus grande prudence lors d'éventuelles visites, surtout à l'approche du fond qui concentre à la fois de fortes teneurs en CO₂ et une pollution industrielle avérée. Nous nous concentrerons ici sur l'impact de cette pollution sur l'environnement et plus particulièrement sur l'eau souterraine à travers deux questions : Quelle est la nature de cette pollution ? Quel est son potentiel de diffusion à travers l'aquifère karstique local ? Ces questions nous semblent importantes car la zone d'étude est située à l'amont d'un ensemble urbanisé avec de nombreux captages individuels d'eau souterraine.

Contexte géographique et géologique

Le gouffre de la Trione 1 est situé à quatre kilomètres du port de Cassis à 230m d'altitude.

À une dizaine de mètres s'ouvre le gouffre de la Trione 2. Cassis est une station balnéaire du littoral méditerranéen à vingt kilomètres environ à l'est de Marseille. Elle compte près de 7 500 habitants, beaucoup plus en période estivale.

D'un point de vue géologique, la zone est intégrée à l'unité du Beausset, vaste ensemble synclinal qui se développe entre les Calanques de Marseille et Toulon. Le cœur du synclinal est constitué d'une série de calcaires et de grès du Crétacé supérieur. Sa bordure externe est ceinturée par une puissante série de calcaires d'âge barrémien à faciès urgonien, ce sont les fameux calcaires blancs qui forment les paysages si pittoresques des calanques entre Marseille

1. Commission scientifique CDSC des Bouches-du-Rhône - 2. Spéléo Canyon du Pays d'Aubagne (Bouches-du-Rhône) - www.cdsc13.fr

et Cassis. La cavité étudiée s'ouvre sur la bordure ouest du synclinal dans les calcaires urgoniens généralement propices au développement de la karstification. D'après la carte géologique, il n'existe pas d'accidents tectoniques importants sur la zone étudiée. On observe toutefois aux abords des cavités deux familles de fractures approximativement orientées nord-sud et est-ouest.

Une coupe géologique simplifiée (figure 1) montre que la cavité se développe entièrement dans les calcaires urgoniens. La couche inférieure est constituée de marnes et de calcaires de l'Hauterivien. Elle pourrait être un horizon hydrogéologique local. Le forage du Mussuguet, réalisé deux kilomètres à l'ouest (référence BRGM 10446X0217/S4) nous permet de positionner approximativement cette couche qui est plus profonde que le réseau spéléologique étudié.

Un premier regard sur la topographie (figure 2), nous interroge sur l'existence de deux plans d'eau très proches avec des niveaux très différents : -152 et -128 m. Ces réservoirs seraient colmatés par des matériaux imperméables. Ce n'est pas surprenant sachant que les karsts de la basse Provence calcaire abritent souvent des remplissages argileux.

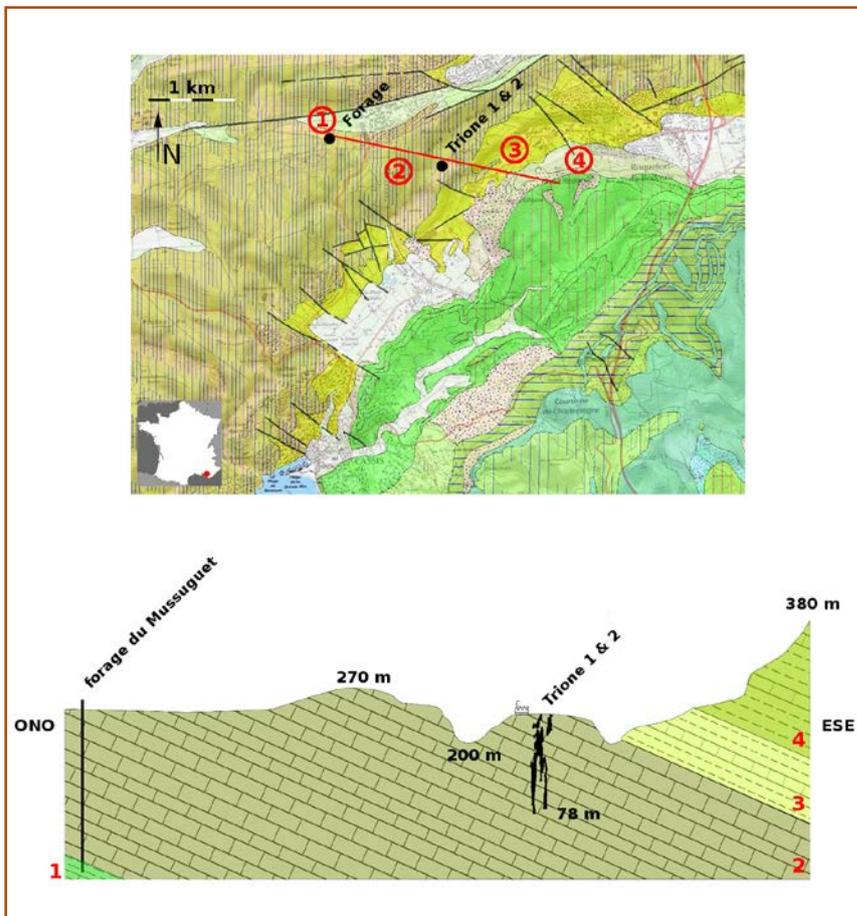


Figure 1: Carte géologique locale et coupe simplifiée.
Légende: 1 - marnes et calcaires argileux (Hauterivien), 2 - calcaires à faciès urgonien (Barrémien), 3 - calcaires et calcaires marneux (Aptien inférieur), 4 - marnes grises et calcaires (Aptien supérieur).

Présentation spéléologique du site et localisation des traces de pollutions

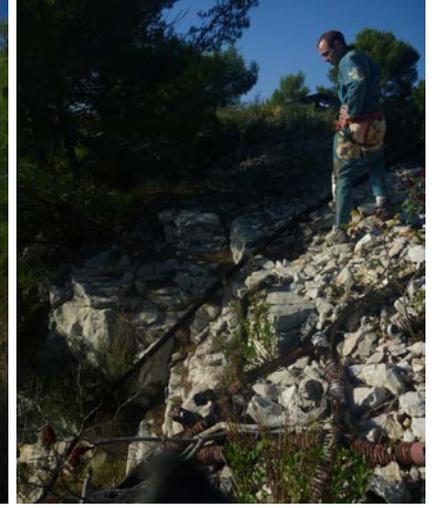
Les gouffres de la Trione 1 et 2 s'ouvrent au pied du front de taille d'une ancienne carrière formant une falaise d'une dizaine de mètres (photographie 1). Ils ont été découverts et explorés par le Spéléo-club de Cassis et le Club alpin français de Marseille dans les années 1980 [2]. À son sommet, quasiment à la verticale des gouffres, demeurent les vestiges d'une petite usine abandonnée (voir figure 2). Cette ancienne activité industrielle est inventoriée dans les registres du BRGM. Il s'agit de la société Gemaco déclarée le 1^{er} janvier 1966. La fiche précise l'activité de production : fabrication de produits chimiques de base, de produits azotés et d'engrais, de matières plastiques de base et de caoutchouc synthétique. La date de la cessation d'activité n'est pas précisée, mais selon les registres de la commune, elle remonterait au début des années 70. À quelques mètres de l'usine, un vieux tuyau descend le long de la falaise dans un surcreusement karstique pour

aller se perdre non loin de l'entrée du gouffre de la Trione 2.

Le site de la carrière abrite de nombreuses cavités de dimensions modestes. Le gouffre principal est la Trione 1 (voir figure 2). C'est une cavité verticale qui se développe préférentiellement sur les failles orientées est-ouest. Elle s'ouvre sur deux petits puits de 8 et 11 m. Passé un rétrécissement, on arrive au sommet d'un puits de 40 m dont la base est un palier confortable. Le plus évident amène sur la tête d'un beau puits de 80 m et par un dernier petit puits au plan d'eau de -152 m. À la base du P40, à l'opposé du P80, une étroiture conduit à deux séries de puits parallèles : les « puits Blancs » et les « puits Bleus ». La première série bute sur un puits borgne à -105 m, la seconde se termine sur le plan d'eau de -128 m. Le gouffre de la Trione 2 est composé essentiellement d'un puits de 23 m qui se prolonge par un éboulis jusqu'à -33 m.

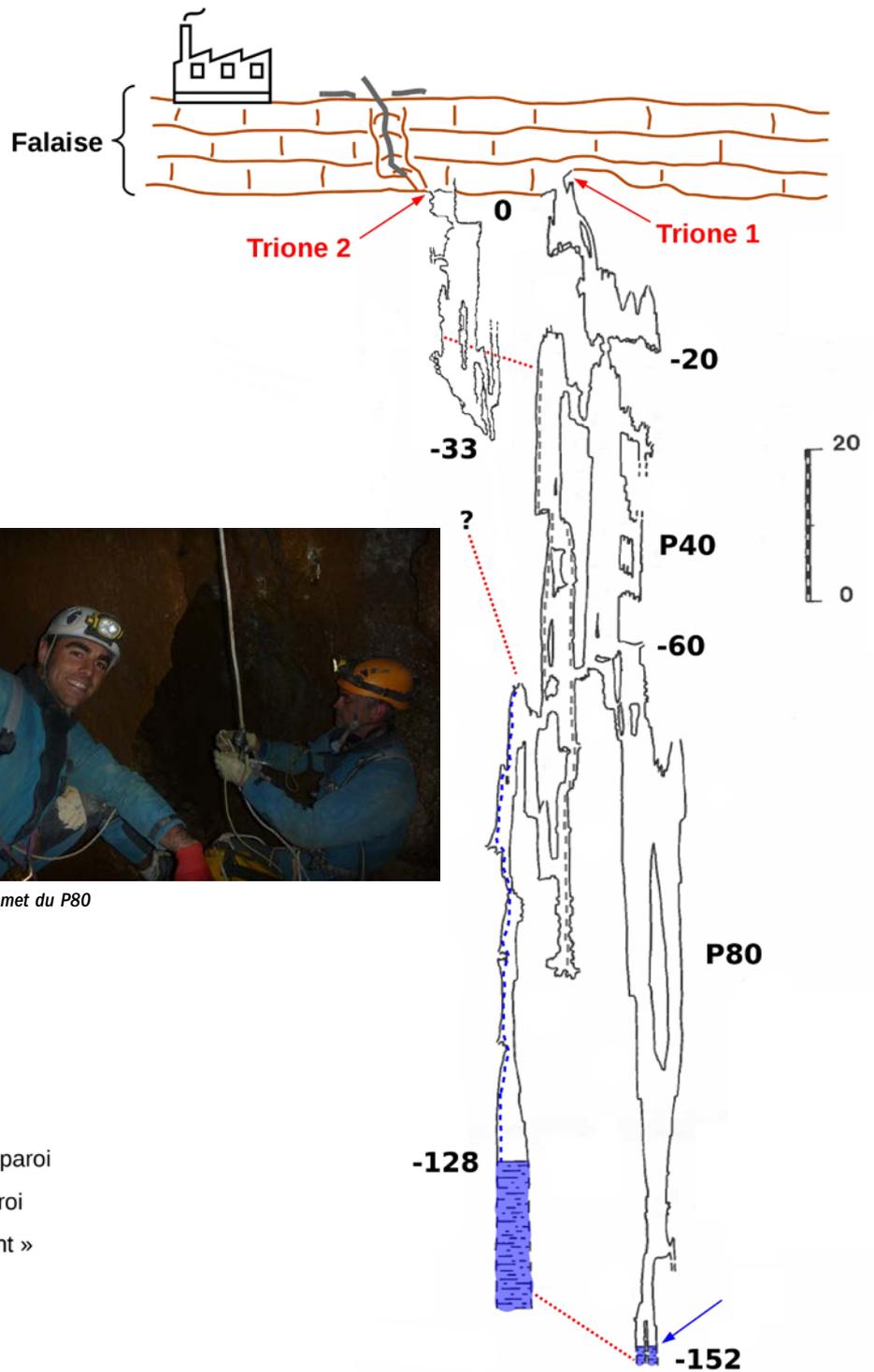
Depuis l'usine à la surface et via les tuyaux dans les cavités, on peut suivre le trajet emprunté par la pollution. Elle a marqué les parois de dépôts blancs, d'abord dans la Trione 2 et dans la Trione 1 où elle souille la série des « puits Blancs ». Les « puits Bleus » sont caractérisés par un dépôt de paroi bleuâtre jusqu'au plan d'eau de -128 m. D'où provient cette « pollution bleue » ? Est-elle de nature différente de la « pollution blanche » ? Dans ces zones relativement étroites, le passage du spéléologue produit une poussière irritante rendant la progression particulièrement pénible. La pollution met ainsi en évidence des connexions entre la Trione 2 et la Trione 1, mais aussi entre les deux plans d'eau. En effet, comme nous le verrons plus loin, nos prélèvements montrent clairement une propagation au plan d'eau de -152 m.

Usine désaffectée



Anciens tuyaux de rejet

Figure 2: Topographies annotées des gouffres de la Trione 1 et 2.



Entrée Trione 1



Sommet du P80

Légende

- anciens tuyaux
- - - - - dépôts bleuâtres en paroi
- - - - - dépôts blancs en paroi
- . - . - . jonction « au polluant »
- entrée de cavité
- prélèvement d'eau

Topographie Frédéric Hay

Relevés de dioxyde de carbone et de dioxygène

En complément de cette étude, nous digressons sur ce sujet qui occupe depuis quelques années les spéléologues. En effet, ceux-ci témoignent fréquemment d'une gêne due à des concentrations élevées de CO₂. Les plus expérimentés mettent en avant une augmentation ces dernières années. Même si les mesures et les études sur le sujet se multiplient dans le monde, il est bien difficile de se faire une idée vu le manque de mesures de références anciennes.

À notre modeste échelle, nous avons fait des mesures de concentration de CO₂ et de O₂ lors de deux sorties au gouffre de la Trione 1, le 23 août 2014 et le 16 octobre 2015. Nous avons utilisé des capteurs portables de marque RAE et effectué diverses mesures pendant la descente de la surface jusqu'au fond de la cavité en totalisant une vingtaine de mesures. Les résultats sont visibles sur la figure 3 qui représente les mesures de O₂ en abscisse et celles de CO₂ en ordonnée. Les unités sont en pourcentage de volume. On note immédiatement qu'une augmentation de CO₂ est systématiquement liée à une baisse de O₂. Pour aller plus loin, nous avons porté une droite de pente unité (en vert sur la figure 3), elle suit assez fidèlement les données. Cela signifie que les processus qui produisent le CO₂ doivent aussi consommer de l'O₂ dans les mêmes proportions. Il s'agit de divers processus d'oxydation : respiration due à l'activité biologique des sols, oxydations de matière organique...

On note aussi que le taux de CO₂ augmente (et que le taux d'O₂ diminue) avec la profondeur pour atteindre respectivement

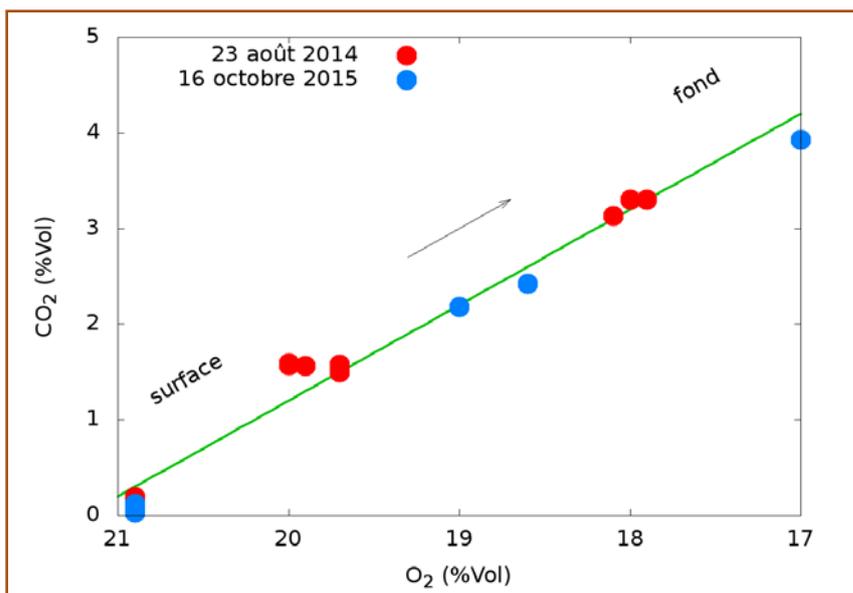


Figure 3 : Concentration en gaz de l'atmosphère souterraine (en % Vol). La droite verte est de pente unité.

4 % Vol et 17 % Vol le 16 octobre 2015 au fond de la cavité. La modification de la composition chimique de l'atmosphère se déroule dans le sol sans doute dans les premiers mètres de l'épikarst. Comment alors expliquer une migration de ce gaz depuis la zone de surface jusqu'au fond de la cavité ? Une réponse « naturelle » liée à la densité plus élevée du CO₂ dans l'air est à écarter car non pertinente physiquement [3]. Plusieurs facteurs d'influence sont sans doute à l'œuvre comme le transfert des gaz et de l'eau dans l'épikarst, les conditions météorologiques extérieures, la morphologie de la cavité, son aérologie...

Enfin reste la question de l'augmentation des quantités de CO₂ ces dernières années. Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'origine la plus répandue du

CO₂ souterrain est liée à l'activité biologique des sols (respiration racinaire, microorganismes, oxydations de matières organiques...) et donc à la végétation. Or nous savons qu'en France (et partout en Europe) la forêt a fortement progressé au cours du dernier siècle. De plus, l'effet conjugué des hausses de CO₂ et des températures atmosphériques dopent l'activité biologique des végétaux. Ces facteurs induiraient une augmentation de la production de CO₂ dans les sols... et dans l'atmosphère des cavités [4].

Les explications données sont celles le plus souvent avancées dans les publications scientifiques. Elles ne sauraient satisfaire le spéléologue rigoureux qui devant la complexité du sujet devra mener une étude spécifique pour chaque site.

Quelle est la nature de la pollution de l'eau souterraine ?

Les prélèvements ont été effectués au plan d'eau de -152 m le 16 octobre 2015. L'eau destinée à la recherche des métaux a été acidifiée dans l'heure afin de limiter les précipités, celle destinée à la recherche des solvants a été conditionnée dans une fiole en prenant soin de chasser toutes

bulles d'air. Les analyses chimiques ont été effectuées par le laboratoire « Chimie Environnement » d'Aix-Marseille Université. Malgré les odeurs caractéristiques ressenties dans la cavité, il n'a pas été possible de mesurer la présence de solvants dans l'échantillon prélevé. Ces composés très

volatils doivent être prélevés dans des conditions très particulières qui sont difficiles à mettre en œuvre sous terre.

Le tableau ci-dessous énumère les métaux détectés, leur concentration ainsi que la limite autorisée dans les eaux brutes destinées à la consommation humaine avant traitement (arrêté du *Journal officiel* du 6 février 2007). La teneur en plomb par exemple excède de beaucoup cette limite, ce métal est de plus reconnu comme toxique. En conséquence cette eau ne pourrait pas être proposée à la consommation humaine même après traitement.

Espèce chimique	Concentration mesurée µg/l	Limite qualité eaux brutes µg/l
Bore	362	1 000 (indésirable)
Strontium	332	- (indésirable)
Plomb	204	5 (toxique)
Zinc	41 330	5 000 (indésirable)
Solvants	Non détectés	

Outre le plomb, on note une énorme concentration de zinc et des concentrations notables de strontium et de bore. Ces éléments chimiques sont assez représentatifs d'une industrie ancienne liée à la fabrication de peintures. Pendant longtemps, le plomb a été très utilisé dans la majorité des peintures. L'oxyde de zinc est encore très utilisé

comme pigment blanc et a d'autres propriétés très intéressantes. Le strontium a été utilisé comme pigment jaune et anti-corrosif sous forme de chromate de strontium. Le bore sous forme de sels est un additif classique aux propriétés biocides.

Il n'a pas été détecté d'autres métaux avec des concentrations significatives.

Quel est le potentiel de diffusion de la pollution à travers l'aquifère karstique local ?

Pour répondre à cette question, nous avons placé une sonde enregistreuse de pression et de température de type Reefnet au niveau du plan d'eau de -152 m. Elle a été fixée au bout d'une corde à environ un mètre sous le niveau d'eau. Les mesures ont été acquises du 1^{er} janvier au 16 octobre 2015 avec un pas de temps de quinze minutes.

En fonction de l'amplitude de variation dans le temps du niveau d'eau, nous pouvons avancer différentes hypothèses sur la diffusion de la pollution :

- Si les variations sont fortes (typiquement plusieurs mètres), cela voudrait dire que les précipitations alimentent efficacement la nappe qui retrouverait un niveau de base en période sèche. Le potentiel de diffusion de la pollution serait alors important.
- Si les variations sont faibles (moins d'un mètre), nous pourrions penser que l'alimentation de la nappe est modérée et que la diffusion de l'eau polluée est limitée.
- Dans ce dernier cas, l'existence d'un seuil de déversement pourrait aussi expliquer un niveau d'eau constant.

La figure 4 montre les variations avec le temps de la hauteur d'eau au gouffre de la Trione 1 corrigée de la pression atmosphérique

à Cassis (courbe rouge), de la température de l'eau (courbe verte) ainsi que de la pluie journalière cumulée au Plan-du-Castellet à dix-huit kilomètres (courbe bleue). On note que sur la période de mesure il y a eu de fortes précipitations (par exemple 70 millimètres de pluie cumulée entre le 19 et le 21 janvier). La hauteur d'eau est quasiment constante et marque la profondeur d'immersion de la sonde à 0,8 m. Les variations ne sont pas significatives (quelques centimètres), celles de septembre/octobre sont dues à des artéfacts de mesure de la pression atmosphérique. La température de l'eau varie très peu entre 14,3 et 14,5 degrés entre janvier et octobre, elle serait due au réchauffement saisonnier. Il est marquant de constater que les pluies, même fortes, n'ont pas d'impact sur le niveau et la température du plan d'eau instrumenté.

Compte tenu des très faibles variations de hauteur d'eau (trois centimètres) et de température (0,2 degrés), on peut avancer que les eaux de pluie pénètrent difficilement jusqu'à la nappe de -152 m. L'eau souterraine est ainsi très peu renouvelée ce qui explique des concentrations en polluants encore très fortes cinquante ans après l'arrêt des rejets. Le volume d'eau est probablement aussi limité tout comme l'impact sur les eaux souterraines.

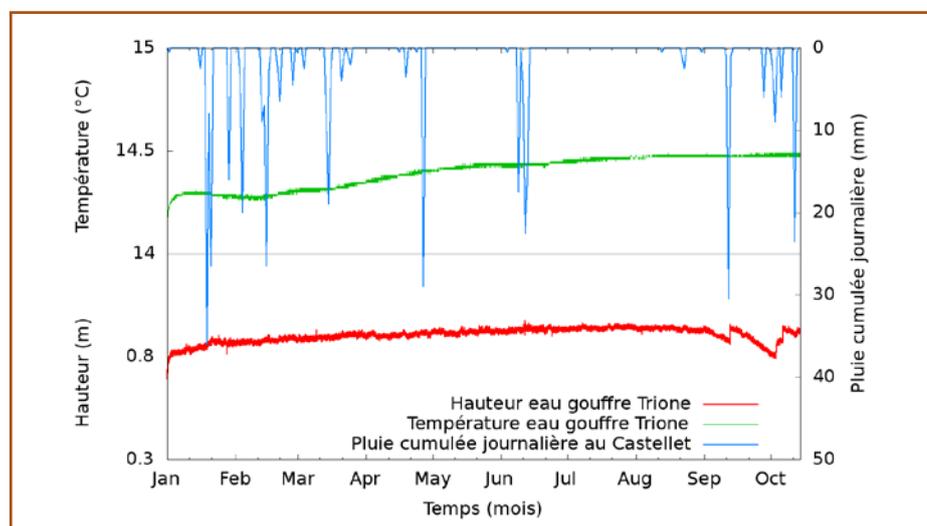


Figure 4: Variation des paramètres hydrologiques de janvier à octobre 2015.

Conclusions

Les gouffres de la Trione sont connus depuis longtemps dans le milieu spéléologique pour être pollués. Nous avons précisé la nature de cette pollution constituée de métaux lourds plus ou moins toxiques et probablement de solvants non identifiés.

Cette eau est totalement impropre à toute consommation humaine même après traitement. Elle semble interdite à toute utilisation domestique (agriculture, élevage, feux de forêt...). Sa diffusion à travers le karst est certainement très limitée. Mais si nous voulons répondre complètement à notre interrogation initiale, il nous faudra mener des études complémentaires.

En effet, il faudrait d'abord travailler sur le plan d'eau de -128 m, vérifier s'il est effectivement pollué et confirmer une liaison avec celui de -152 m. Une coloration pourrait apporter la réponse. Des essais de pompage sur les plans d'eau pourraient nous aider à déterminer les volumes d'eau contaminée. Dans la mesure du possible, ils pourraient être extraits de la cavité.

Remerciements

Ils vont bien sûr à tous les spéléologues qui ont participé aux sorties dans le gouffre de la Trione dans une atmosphère très particulière : Sébastien Burdel, Christophe Chapuis, Pascal Dagand, Jacques Morel, Cindy Pinault, Robin Revest, Jonathan Sauvêtre. Merci à Bruno Arfib pour nous avoir fourni les données de pression atmosphérique à Cassis. Enfin un grand merci au laboratoire « Chimie-Environnement » d'Aix-Marseille Université et en particulier à Bruno Coulomb pour les analyses chimiques.

Crédits photographiques : A. Zappelli.

Références

- [1] MÉNISCUS, Xavier (2013) : Résurgence de Port-Miou -223 m le 7 mai 201.- *Spelunca* n°132, (2013).
- [2] CLUB ALPIN FRANÇAIS / SPÉLÉO-CLUB DE MARSEILLE (1991) : *Spéléopérations* n°79 (1991).
- [3] BADINO, Giuseppe (2009) : The legend of carbon dioxide heaviness.- *Journal of Caves and Karst Studies*, n°71, p.100-107 (2009).
- [4] Ek, Camille & GODISSART, J. (2013) : Carbon dioxide in cave air and soil air in some karstic areas of Belgium. A prospective view.- *Geologia Belgica* (2013).