



Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon des Bouches-du-Rhône



Traçages hydrogéologiques sur le massif de la Sainte-Baume occidentale

Rapport final
Convention Agence de l'eau RMC 2020 5544

Porteur

Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon du 13
415 avenue des Templiers – ZA de Napollon
13400 Aubagne
Contact : Alexandre Zappelli
alexandre.zappelli@free.fr
06 20 45 92 54

Partenaires scientifiques et techniques

Aix-Marseille Université
Laboratoire CEREGE
3 place Victor Hugo
13331 Marseille
Contact : Bruno Arfib
arfib@cerege.fr



Spélé-H2O
405 avenue Bucarin
83140 Six-Fours-les-Plages
Contact : Thierry Lamarque
speleh2o@wanadoo.fr



Ce projet visait à réaliser trois traçages hydrogéologiques sur le secteur de la Sainte-Baume occidentale. Ces traçages ont été réalisés aux hivers/printemps 2021, 2022 et 2024. Ce document regroupe les trois rapports décrivant ces trois opérations. Ils s'organisent classiquement en une présentation du contexte, la description des opérations de terrain, une présentation des résultats, une interprétation et une conclusion.

Il est porté par le Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon des Bouches-du-Rhône qui est la représentation locale de la Fédération française de spéléologie. C'est une structure associative qui compte une salariée et 450 membres bénévoles. La réalisation de ce projet doit beaucoup aux nombreux bénévoles qui ont donné de leur temps en particulier sur les opérations de terrain comme les injections de traceurs. De plus de nombreuses personnes issues de structures diverses ont apporté leur contribution. Ils sont cités et remerciés dans la suite du document.



Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon des Bouches-du-Rhône



Traçages hydrogéologiques sur le massif de la Sainte-Baume occidentale

Rapport année 2021: traçage Sainte-Baume sud

Alexandre Zappelli

Porteur

Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon du 13
415 avenue des Templiers – ZA de Napollon
13400 Aubagne
Contact : Alexandre Zappelli
alexandre.zappelli@free.fr
06 20 45 92 54

Partenaires

Spélé-H2O
405 avenue Bucarin
83140 Six-Fours-les-Plages
Contact : Thierry Lamarque
speleh2o@wanadoo.fr



Fédération française de spéléologie
Commission scientifique
28 rue Delandine
69002 Lyon



1-Introduction

1.1-Rappel du contexte

Cette opération de traçage est la première d'un projet qui en compte trois étalées sur trois ans. Le projet global est porté par le Comité départemental de spéléologie et de canyonisme des Bouches-du-Rhône (CDSC13) en collaboration avec l'association Spélé-H2O et la commission scientifique de la Fédération française de spéléologie. Il a été financé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône et la région Sud.

La zone d'étude située sur l'ouest du massif de la Sainte-Baume présente un intérêt majeur concernant la ressource en eau potable. Elle est classée parmi les territoires stratégiques par l'Agence de l'eau [1] et plusieurs communes dépendent tout ou partie de l'eau souterraine pour leur alimentation en eau potable. La connaissance des bassins versants liés à ces exploitations d'eaux souterraines est donc un enjeu local fort.

Ce rapport décrit la réalisation et les résultats obtenus lors de la première opération de traçage sur la Sainte-Baume sud. Elle vient en complément d'une étude visant à définir les zones de sauvegardes des ressources en eaux souterraines initiée par le Parc naturel régional de la Sainte-Baume, ainsi que des nombreuses recherches menées par le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences et Environnement (CEREGE).

1.2-Objectif

Notre objectif ici est de reprendre les anciens traçages réalisés dans les années 70 et 80 sur le même système hydrogéologique avec injection dans la même cavité (le gouffre de l'Escandaou). À l'époque, seule la zone de Saint-Pons a été surveillée. Une restitution a pu être détectée à la source et à la Galerie drainante avec des taux très faibles [2]. La question d'autres points de sortie restait en suspend. Pour lever cette question, nous reprenons le traçage au gouffre de l'Escandaou en étendant le réseau de surveillance à tous les points de sortie d'eau significatifs : sources pérennes, sources temporaires et forages.

1.3-Méthodes utilisées

Le traçage artificiel est un outil commun de l'hydrogéologie karstique [3]. Il permet de préciser des relations sur le trajet de l'eau souterraine. Une des applications importantes est la détermination de bassin versant hydrogéologique de sources ou forages. En cas d'utilisation pour l'eau potable, cette connaissance est centrale pour la détermination du périmètre de protection éloigné. Pour tirer l'information maximale d'un essai de traçage, il est nécessaire de pouvoir calculer la masse de traceur restituée aux principaux points de suivi. La connaissance des débits des exutoires est alors nécessaire.

Le traceur utilisé, la fluorescéine, est une molécule fluorescente dans le domaine de la lumière

visible. C'est le traceur le plus commun dans ce genre d'expérience. Il est reconnu comme sans effets indésirables sur l'environnement aux concentrations utilisées [4]. La détection et la mesure de la concentration de fluorescéine dans l'eau peut être réalisée par différentes techniques :

- Détection visuelle. Elle implique d'utiliser de fortes doses, ce qui peut avoir un impact visuel très négatif pour les usagers. Seule l'information positive ou négative de la restitution est alors connue.
- Charbons actifs. Ce type de détecteur est intéressant car très peu onéreux. Il accumule certaines molécules naturelles et artificielles présentes dans l'eau. Il doit être utilisé avec prudence car des faux-positifs sont courant par accumulation de molécules naturelles [5]. Avec cette méthode, il n'est pas possible de construire une courbe de restitution ni d'accéder à la masse restituée à l'exutoire.
- Fluorescence. Cette technique optique permet de mesurer la fluorescence d'une molécule induite par une excitation lumineuse d'une plage de fréquence précise. Des appareils de terrain permettant un suivi en continu de la concentration sont disponibles dans le commerce. Une courbe de restitution précise peut ainsi être obtenue. La fluorescence mesurée intègre celle d'origine naturelle et artificielle.
- Spectro-fluorescence. C'est la technique la plus précise car elle permet d'identifier la molécule artificielle de fluorescence qui a une signature spectrale propre différente des molécules naturelles produisant de la fluorescence dans la même gamme spectrale. À ce jour, il n'existe pas de spectro-fluorimètres de terrain pour un suivi in-situ en continu. Les mesures se font en laboratoire. Ce type de mesure peut-être utilisé pour confirmer une détection douteuse par charbon actif ou fluorescence.

Dans notre expérience, nous avons utilisé des techniques de mesure par fluorescence. Cette technique peut directement être déployée in-situ avec des appareils de terrain. Pour les cas de détections litigieux, nous avons consolidé nos résultats par des analyses ponctuelles au spectro-fluorimètre.

2-Moyens mis en œuvre

2.1-Injection

Le gouffre de l'Escandaou est le seul gouffre présentant une circulation d'eau souterraine pérenne connue. De fait, il a déjà été utilisé dans les précédentes opérations de traçages. Le traceur utilisé est de la fluorescéine en poudre fourni par la société ArteColor (numéro de lot 201601749M). En vue de faciliter les opérations d'injection sous terre, 10 kg de poudre ont été préalablement dilués à l'eau dans 10 bidons de 5 litres.

Le samedi 13 février 2021, une équipe de dix spéléologues est mobilisée pour l'opération d'injection au gouffre de l'Escandaou. Elle a été effectuée à -90 m de profondeur, à la base du puits

d'entrée (figure 1). La cavité se développe sur une faille importante orientée N/S. À son extrémité nord, un écoulement pérenne vient abonder une petite vasque estimée à un volume 10 m³. Le traceur pré-dilué est injecté directement dans cette vasque. L'opération se déroule entre 11h30 et 12h30. Le débit d'eau est faible, il est estimé à moins de 0,1 l/s.

Deux semaines plus tard, une équipe de reconnaissance a vérifié la bonne infiltration du traceur. La présence d'une vasque a un effet tampon limitant l'infiltration concentrée de traceur dans l'épikarst.

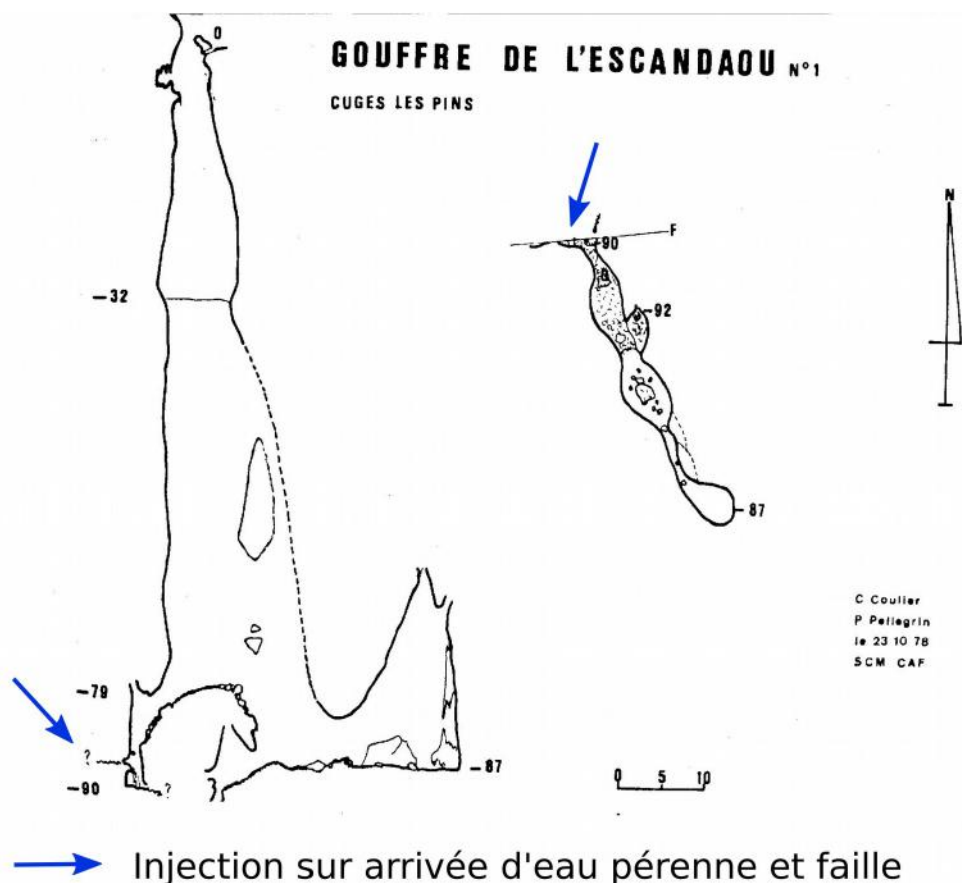


Figure 1 : Topographie du gouffre de l'Escandaou en coupe (à gauche) et plan (à droite). La flèche bleue précise le lieu d'injection.

2.2-Le réseau de suivi

Le réseau de suivi a été mis en place le 4 février 2021, soit 10 jours avant l'injection afin de mesurer les variations naturelles de fluorescence. Le tableau en annexe renseigne les différents points de suivi, la période ainsi que la fréquence et le mode d'échantillonnage. Ces points sont portés sur une carte du secteur Sainte-Baume ouest (figure 2).

Matériel déployé

Les principaux points de sortie des eaux ont été équipés de fluorimètres automatiques de deux types. Les sites non accessibles au grand public ont été équipés avec des fluorimètres GGUN de

marque Albillia (<http://www.albillia.com/FL30f.html>). Les sites aisément accessibles ont été équipés avec des fluorimètres compacts facilement dissimulables fournis en location par la société Traqua (<https://traqua.be/technologie>). Les limites de détection annoncées par les constructeurs sont respectivement de 0,02 µg/l et 0,06 µg/l pour la fluorescéine.

Les points secondaires et les forages ont été échantillonnés manuellement. Par la suite, ces prélèvements manuels ont été analysés au laboratoire avec un fluorimètre de type GGUN Albillia.

Mesures des débits

Parmi les points suivis, seule la source de Saint-Pons est équipée par la DREAL-PACA pour mesurer les débits en continu. Les débits sont disponibles sur la banque de données www.hydro.eaufrance.fr. Pour les autres points jugés prioritaires (Galerie drainante de Saint-Pons, sources supérieure et inférieure des Encanaux), des jaugeages réguliers ont été effectués deux fois par semaine. Vu les débits modestes (inférieurs à 100 l/s dans la majorité des cas) et les écoulements turbulents, nous avons utilisé la méthode par dilution de sel [6].

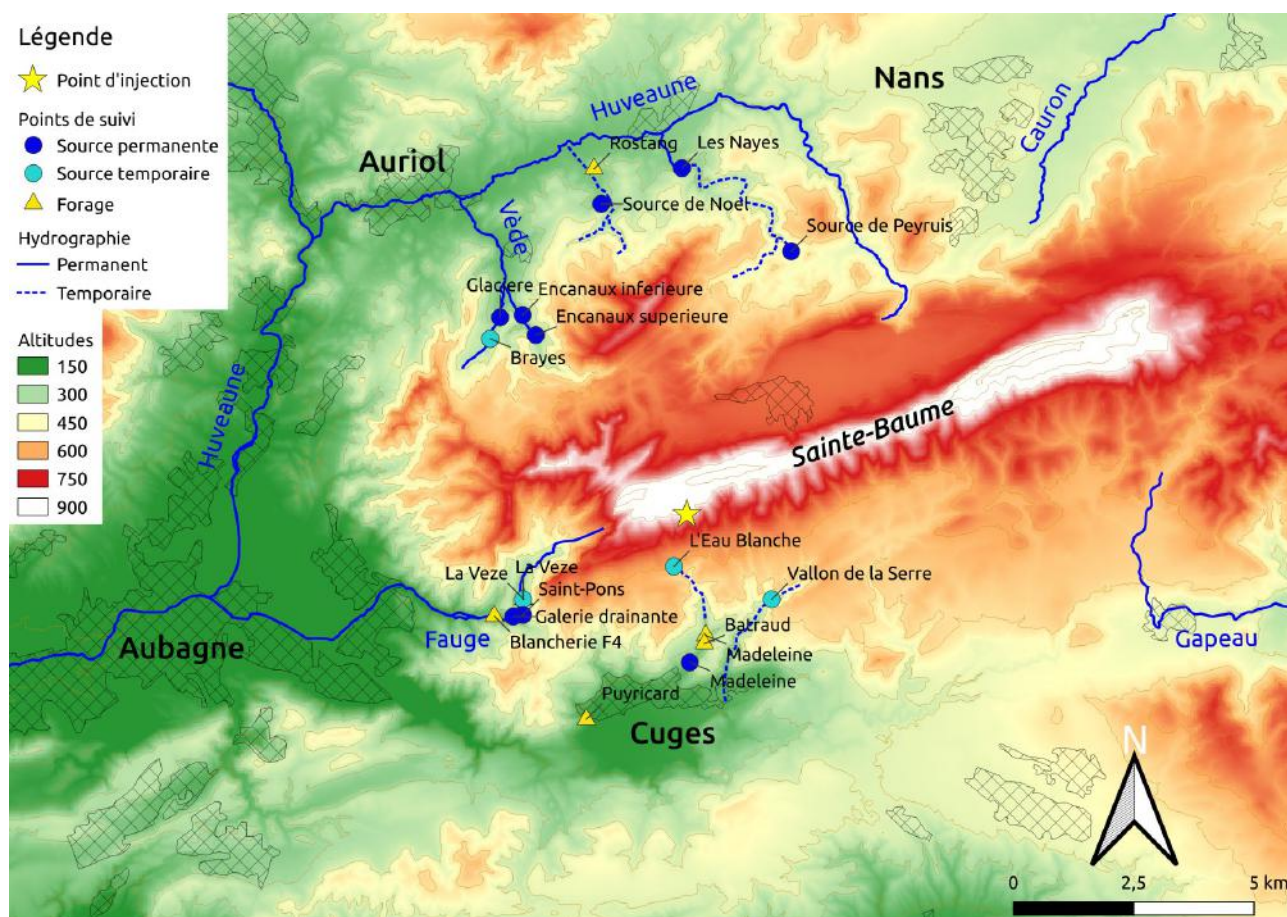


Figure 2 : Carte de localisation du réseau de surveillance. MNT 25m IGN. Réalisation : Alexandre Zappelli (2021).

3-Résultats

Lors de ce traçage, la source de Saint-Pons et la galerie drainante de Saint-Pons ont présenté un résultat positif avec détection de fluorescéine artificielle. Les faibles concentrations détectées avec nos fluorimètres de terrain, à peine supérieures au bruit de fond, laissaient un doute quant à leur validité (figure 3). Pour confirmation, nous avons transmis 6 prélèvements manuels de la source de Saint-Pons au laboratoire CETRAHE (<https://www.univ-orleans.fr/fr/cetrahe>) pour des analyses au spectro-fluorimètre. Les résultats complémentaires confirment une faible restitution débutant le 15 mars et très étalée dans le temps. En effet, à la mi-mai, des prélèvements manuels étaient encore

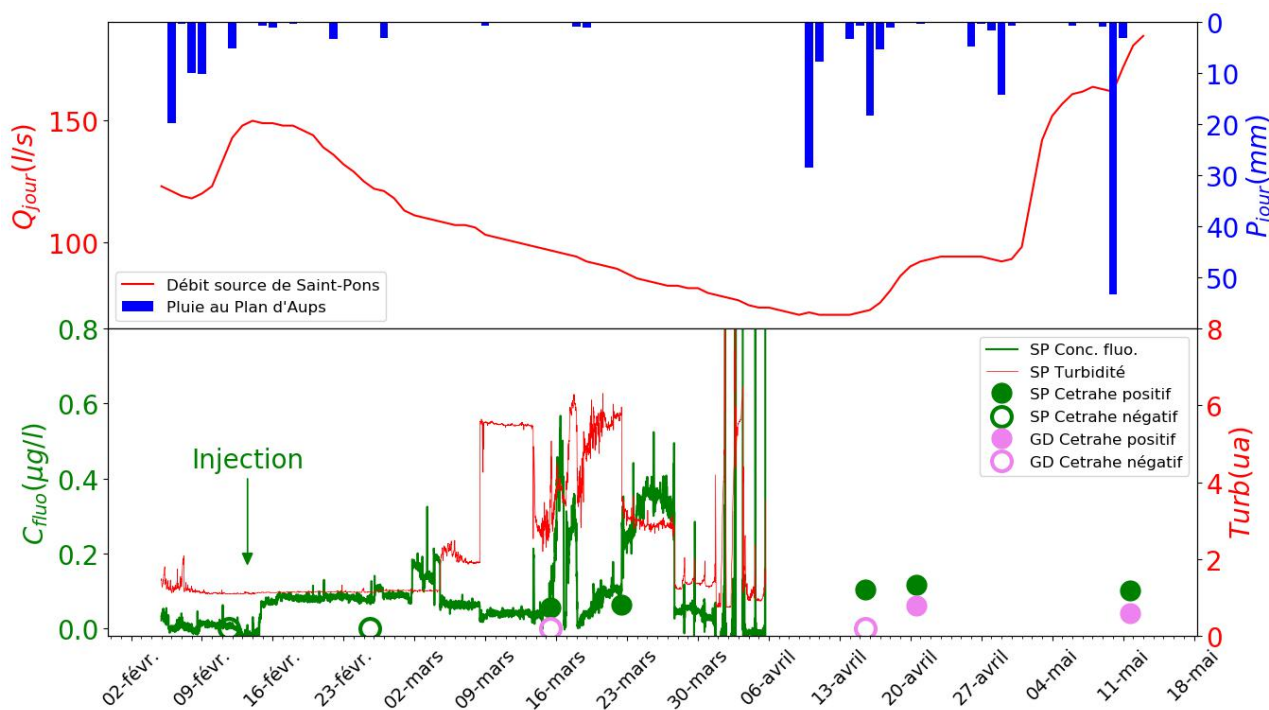


Figure 3 : En haut, conditions hydrologiques durant le traçage. La courbe rouge est le débit à la source de Saint-Pons en l/s, les bâtonnets bleus représentent la pluie cumulée journalière au Plan d'Aups en mm. En bas, la courbe verte montre la restitution de la concentration en fluorescéine en µg/l, la courbe rouge la variation de turbidité en unités arbitraires. Les points montrent les résultats des mesures au spectrofluorimètre réalisées au Cetrahe. Les points verts pour la source de Saint-Pons (SP), les points violets pour la Galerie drainante (GD). Les points pleins représentent un résultat positif, les vides un négatif.

positifs à la fluoresceine. Nous avons de même transmis au CETRAHE 4 échantillons de la Galerie drainante dont 2 montrent un résultat positif à partir du 20 avril, bien que non détectés avec le fluorimètre de terrain. En effet, les méthodes de utilisées par le CETRAHE permettent d'attendre une limite de détection bien inférieure à ces derniers.

Le traceur a été détecté le 15 mars 2021 à la source de Saint-Pons 31 jours après l'injection. Soit une vitesse apparente du traceur de 5 mètres/heure. Une quantité inférieure à 1 % du traceur a été

restituée à la source de Saint-Pons entre le 15 mars et la mi-mai.

Concernant tous les autres points de suivi, avec échantillonnage par un fluorimètre de terrain ou échantillonnage manuel, puis mesure au fluorimètre de terrain, aucune autre détection n'est à signaler.

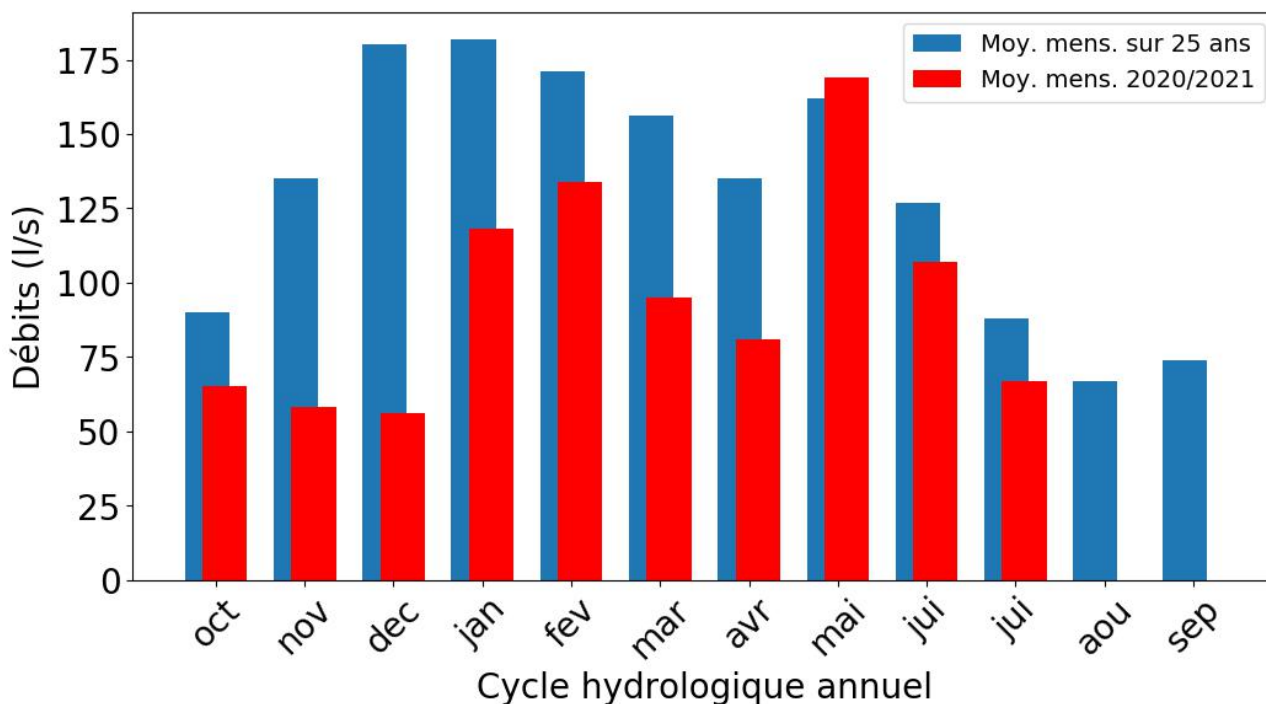


Figure 4 : Débits moyens mensuels à la source de Saint-Pons. Les bâtons bleus montrent la moyenne mensuelle sur les 25 dernières années. Les bâtons rouges, la moyenne mensuelle sur le cycle hydrologique en cours (2020/2021). Le traçage a été réalisé sur la période février-mai. Source : www.hydro-eaufrance.fr.

4-Interprétations

Nous avons observé des conditions hydrologiques très déficitaires par rapport à la normale sur l'année 2020/2021. En effet, si nous prenons comme indicateur la moyenne mensuelle des débits à la source de Saint-Pons, entre octobre 2020 et avril 2021, tous les mois sont très déficitaires par rapport à la moyenne sur les 25 dernières années (figure 4). Cette sécheresse exceptionnelle est défavorable pour le transport d'un traceur à travers les différents horizons géologiques et influe fortement sur les résultats.

Pour illustrer ce fait, nous pouvons comparer les traçages précédents (février 1979 et janvier 1984) à celui réalisé en 2021. Ces trois expériences ont eu le gouffre de l'Escandaou comme site d'injection et une restitution à la source de Saint-Pons sur le même trajet hydrogéologique. Par contre, les conditions hydrologiques furent très différentes : hautes-eaux en 1979, débits normaux pour l'hiver 1984, étiage d'hiver très marqué en 2021. Les paramètres de la restitution sont en

conséquence très différents (tableau 2). Les temps de restitution (première apparition du traceur) sont d'autant plus rapides que le régime hydrologique est élevé. Ils varient de 9 jours en 1979, 20 jours en 1984 et 31 jours en 2021. Ces résultats, très classiques, montrent la difficulté d'interprétation des traçages.

Concernant l'aquifère lié à la source de Saint-Pons, les mêmes conclusions que C. Coulier peuvent être reprises [3]. Le système de la source de Saint-Pons montre un fonctionnement atypique pour une source karstique. L'hydrodynamique très tamponnée et les paramètres physico-chimiques très stables (température, conductivité, ions majeurs) indiquent un réservoir de taille importante avec un fonctionnement plus proche d'un aquifère de type fissuré que karstifié. Vu les faibles taux de restitutions du traceur, la question d'autres sorties au sud ou au nord de la Sainte-Baume reste en suspend. Cependant, C. Coulier note dans sa thèse [2] que les débits observés à Saint-Pons sont compatibles avec le bassin versant supposé associé. La géologie très complexe de la Sainte-Baume rend malgré tout difficile la détermination précise de la zone d'alimentation de la source de Saint-Pons.

Date injection	Février 1979	14 janvier 1984	13 février 2021
Traceur	Fluorescéine	Fluorescéine	Fluorescéine
Masse (kg)	?	0,8	10
Débit moyen à Saint-Pons (l/s)	?	180	90
Nombre de points de restitution suivis	1	2	19
Méthode de détection	Fluocapteurs	Spectrofluorimètre	Fluorimètre de terrain et spectrofluorimètre
Détection	positive	positive	positive
Temps de première restitution (heures)	9	14	31
Vitesse de restitution (m/heures)	13	8,5	5,4
Concentration maximale détectée (µg/l)	?	0,38	0,15
Pourcentage de masse restituée	?	3,5	<1
Positif à la Galerie drainante ?	?	oui	oui

Tableau 2 : Comparatif des résultats des différentes expériences de traçage avec injection au gouffre de l'Escandaou et surveillance à la source de Saint-Pons.

L'apport important de cette opération de traçage par rapport aux expériences passées est l'étendue du réseau de surveillance avec 19 points suivis sur le pourtour ouest de la Sainte-Baume. Dans les conditions de l'hiver 2021 et dans la limite de détection de nos fluorimètres de terrain (0,2 µg/l), aucun autre résultat positif n'est apparu. Ces résultats penchent pour une sortie unique du système de Saint-Pons. Il faut toutefois ne pas exclure un résultat différent avec des débits plus importants : une autre sortie pourrait être activée avec des régimes de circulation d'eau plus importants.

5-Actions de communication

Cette action a servi de support pédagogique à la classe de cinquième option « spéléologie » du collègue *Lou Garlaban* d'Aubagne. Julie Allen et Sébastien Ventura, enseignants responsables de cette option, ont organisé une intervention en classe pour aborder le métier d'hydrogéologue et les notions d'eau souterraine et de ressource associée. De plus, les élèves ont pu m'accompagner sur le terrain à l'occasion d'une tournée de prélèvement sur le site de Saint-Pons à Gémenos.

D'autre part, un film de 13 minutes relatant le déroulement de ce traçage a été réalisé à titre bénévole par Julien Aulagnier (<https://www.les-queens.tv>). [Lien vers le film](#).

6-Conclusion

L'expérience de traçage réalisée entre février et mai 2021 avec injection au gouffre de l'Escandaou et suivie sur 19 points du pourtour occidental de la Sainte-Baume a montré deux restitutions positives à la source de Saint-Pons et à la Galerie drainante de Saint-Pons (alimentée en partie par un sous écoulement de la source de Saint-Pons). Le temps de transit mesuré (31 jours) est significativement plus long que pour les deux précédentes expériences. Cela s'explique par les conditions exceptionnellement sèches de l'hiver 2021.

De plus, sur les autres points de suivi, aucun autre résultat positif n'est à mettre en avant. Ainsi la source de Saint-Pons serait l'exutoire principal d'un bassin versant sud-ouest Sainte-Baume dont les limites précises restent difficiles à définir.

Remerciements

Je tenais à remercier en premier lieu Sidonie Chevrier (CDSC13) et Thierry Lamarque (Spélé-H2O) pour leur implication dans ce projet qui a souvent dépassé leurs obligations professionnelles, de même que Bruno Arfib pour son accompagnement scientifique.

Merci à la commission scientifique de la Fédération française de spéléologie pour le prêt de trois fluorimètres de terrain.

Merci également à Sébastien Gillet (Eaux des Collines) et Gaétan Colloc (SIBAM), responsables des exploitations d'eau potable, pour nous avoir permis d'accéder à leurs installations.

Enfin, ce projet ne saurait exister sans une forte implication bénévole. À ce titre, beaucoup de spéléologues ont apporté leur contribution à divers moments clés du projet :

Julie Allen, Bruno Arfib, Julien Aulagnier, Julien Batraud, Charles Coulier, Roger Garonne, Marie Genevier, Jacquie Laverdure, Pascal Péri, Alexandra Rolland, Éric Rostang, Alexis Stepanian, Sébastien Ventura.

Références

- [1] Agence de l'eau RMC, Fiche de synthèse « Massifs calcaires de Ste-Baume, Agnis, Ste Victoire, Mont Aurélien, Calanques et Bassin du Beausset » FRDG137, 2015
- [2] Charles Coulier, Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale, Bouches du Rhône - Var, France. Thèse de doctorat de l'Université de Provence, 1985
- [3] Dörfliger N. (2010) : Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes ; BRGM RP- 58237-FR
- [4] Jozja N., Zocatelli R., Défarge C., CETRAHE, note technique n° 1 : capacité des détecteurs au charbon actif (fluocapteurs) à fixer les traceurs fluorescents, 2016
- [5] Gombert P., Carré J., Toxicité et écotoxicité des principaux traceurs fluorescents employés en hydrogéologie et de leurs produits de dégradation, Karstologia, pp. 41-53, 2011
- [6] Le Coz J., et al., Contrôle des débits réglementaires. Guide technique de la police de l'eau, ONEMA-CEMAGREF, 2011

ANNEXE : tableau récapitulatif des points de suivi

Nom	Altitude (m)	Mode de prélèvement	Fréquence	Période de suivi	Remarques
Suivi zone Cuges					
Captage des Jardins de la Ville	216	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 22 mar	Fluorimètre dans bassin de captage
Forage de la Madeleine	266	Manuel	3 jours	4 fév - 22 mar	Forage en exploitation
Forage Batraud	250	Manuel	3 jours	4 fév - 1 ^{er} avr	Forage particulier
Source du Vallon de la Serre	300	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 1 ^{er} avr	Source tarie sur toute la période
Source de l'Eau Blanche	555	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 1 ^{er} avr	Source tarie sur toute la période
Forage de Puyricard	180	Manuel	3 jours	4 fév - 22 mar	Forage en exploitation
Suivi zone Gémenos					
Source de Saint-Pons	265	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 11 mai	Source permanente. Station limnimétrique.
Galerie drainante de Saint-Pons	255	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 11 mai	Source permanente. Mesures de débits.
Forage du Vèze	270	Manuel	3 jours	4 fév - 22 mar	Forage en exploitation
Puits du Vèze	270	Manuel	3 jours	4 fév - 22 mar	Puits artificiel
Forage de la Blancherie F4	230	Manuel	3 jours	4 fév - 22 mar	Forage en exploitation
Suivi zone Auriol-Saint-Zacharie					
Source des Encanaux supérieure	290	Fluorimètre automatique	15 minutes	4 fév - 15 avr	Source permanente. Mesures de débits.
Source de Encanaux inférieure	270	Manuel	3 jours	4 fév - 15 avr	Source permanente. Mesures de débits.
Source de la Glacière	270	Manuel	3 jours	4 fév - 15 avr	Source permanente
Source des Brailles	310	Manuel	3 jours	4 fév - 15 avr	Source intermittente
Source des Naves	275	Manuel	7 jours	4 fév - 1 ^{er} avr	Source permanente
Source de Noël	270	Manuel	7 jours	4 fév - 1 ^{er} avr	Source intermittente
Forage Rostang	258	Manuel	7 jours	4 fév - 1 ^{er} avr	Forage particulier
Source de Peyruis	425	Manuel	7j	4 fév - 1 ^{er} avr	Source intermittente



Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon des Bouches-du-Rhône



Traçages hydrogéologiques sur le massif de la Sainte-Baume occidentale

Rapport année 2022 : traçage Sainte-Baume nord

Porteur

Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon du 13
415 avenue des Templiers – ZA de Napollon
13400 Aubagne
Contact : Alexandre Zappelli
alexandre.zappelli@free.fr
06 20 45 92 54

Partenaires scientifiques et techniques

Aix-Marseille Université
Laboratoire CEREGE
3 place Victor Hugo
13331 Marseille
Contact : Bruno Arfib
arfib@cerege.fr



Spélé-H2O
405 avenue Bucarin
83140 Six-Fours-les-Plages
Contact : Thierry Lamarque
speleh2o@wanadoo.fr



1 Rappel du contexte

Cette opération de traçage est la deuxième d'un projet qui en compte trois étalés sur trois ans. Le projet global est porté par le Comité départemental de spéléologie et de canyonisme des Bouches-du-Rhône (CDSC13) en collaboration avec l'association Spélé-H2O et Aix-Marseille Université. Il a été financé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône et la région Sud.

La zone d'étude située sur l'ouest du massif de la Sainte-Baume présente un intérêt majeur concernant la ressource en eau potable. Elle est classée parmi les territoires stratégiques par l'Agence de l'eau [1] et plusieurs communes dépendent tout ou partie de l'eau souterraine pour leur alimentation en eau potable.

Ce rapport décrit la réalisation et les résultats obtenus lors de la deuxième opération de traçage sur la Sainte-Baume nord. Elle vient en complément d'une étude visant à définir les zones de sauvegardes des ressources en eaux souterraines initiée par le Parc naturel régional de la Sainte-Baume, ainsi que des nombreuses recherches menées par le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences et Environnement (CEREGE).

Les pertes de la Grande et Petite Tourne situées sur la plateau du Plan d'Aups sont les principaux points d'absorption du poljé. Lors de pluies importantes, des ruisseau parcourant la dépression se forment et viennent alimenter les pertes. La Grande Tourne, située à un point bas est la perte la plus alimentée. En cas de pluies très soutenues, les pertes ne peuvent absorber tout le flux et un lac temporaire se forme (photo 1).

Deux traçages ont déjà été expérimentés auparavant. Le premier à la Grande Tourne mené en 1967 par Jean Mazet. Seule la rivière souterraine de la grotte de la Castelette, sortie très probable vu la proximité et la géologie, a été surveillée. Le résultat négatif de cette expérience est sujet à caution.

La deuxième expérience réalisée en 1986 par Philippe Martin est décrite dans sa thèse de doctorat [2]. 3,6 kg de fluorescéine ont été injectée dans la perte de la Petite Tourne en conditions de hautes eaux. Le traceur a été détecté à la source de Saint-Pons avec une concentration assez importante et dans une moindre concentration à la source supérieure des Encanaux. Des fluocapteurs à charbons actifs ont été utilisés avec analyses au spectrofluorimètre. L'auteur lui même recommande de refaire un traçage qualitatif avec suivi des débits et utilisation de fluorimètres de terrain.

Même s'il est admis que la perte de la Grande Tourne en connexion avec la rivière souterraine de la Castelette, cela n'a jamais été formellement prouvé. L'enjeu de ce résultat est important car il apporterait des informations utiles sur un éventuel aménagement urbain du poljé. D'autre part, en suivant les prescriptions de Philippe Martin, nous pensons reprendre le traçage à la Petite Tourne.

Notre objectif pour ce deuxième traçage est donc de réaliser une double injection aux Grande et Petite Tourne avec un suivi étendu aux principales sources du nord-ouest du massif.

2 Moyens mis en œuvre

2.1 Injection

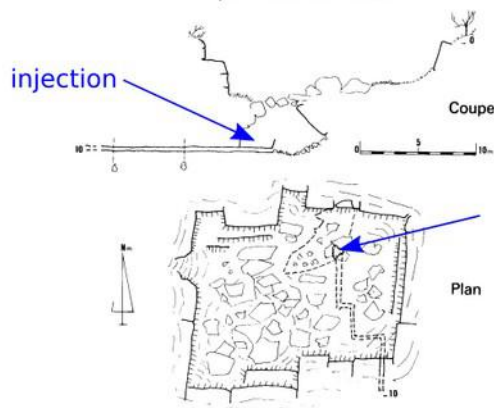
Le samedi 5 février 2022, une équipe de spéléologues du Var et des Bouches-du-Rhône. Le SDIS 83 participe à l'opération et met à disposition deux camions citerne de 12 et 2 m³ de capacité.



photo Frédéric Portalier



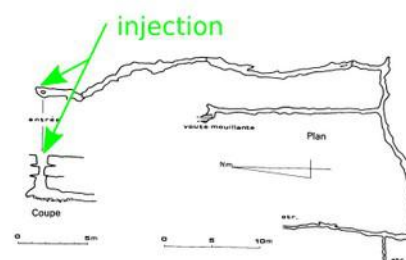
photo Alexandra Rolland



Grande
Tourne



photo Frédéric Portalier



Petite
Tourne

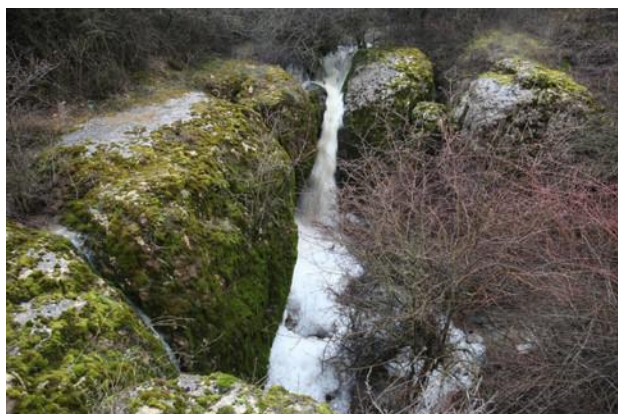
Figure 1 : Illustration des conditions d'injection à la perte de la Grande Tourne (haut) et à la perte de la Petite Tourne (bas).

L'injection à la Grande Tourne se déroule entre 10h et 11h30. Un tuyau acheminée depuis les camions citerne amène l'eau jusqu'au fond de la perte où trois spéléologues se chargent de la

dilution. Le traceur est constitué de 2 lots d'acide amino G, un lot récent de 26,7 kg fourni par la société Arte-Color et un lot ancien de 23,5 kg fourni par Bruno Arfib, soit 50,2kg de poudre au total. La dilution est réalisée dans deux grands bidon de 60 litres. Suite à la dilution, le traceur est injecté dans le petit méandre partant du fond de la perte. Il est poussé par deux rotations de camions citerne soit 28 m³ d'eau au total.

L'injection à la Petite Tourne se déroule entre 12h et 12h30. Là encore, nous pouvons compter sur les deux camions citerne du SDIS 83. L'injection est effectuée dans la perte depuis la surface. 16 kg de fluorescéine fournis par Arte-Color sont dilués dans les bidons de 60 litres avant injection. Le traceur est poussé par deux rotations de camion citerne soit 28 m³ d'eau [.

Le 14 février, soit 9 jours après l'injection, un important cumul de pluie s'est abattu sur la Sainte-Baume. Entre 1h00 du matin et 15h de l'après midi 44 mm de pluie ont été mesurée à la station Plan d'Aups SAPC. Ceci a entraîné la mise en écoulement des divers ruisseaux parcourant le poljé du plan d'Aups et l'alimentation de la Grande Tourne et dans une moindre mesure de la Petite Tourne (photos 1).



photos : Frédéric Portallier



Photos 1 : Conditions d'alimentation des pertes de la Grande Tourne (à gauche) et de la Petite Tourne (à droite) le 14 février suite à l'épisode pluvieux.

2.2 Le réseau de suivi

Le réseau de suivi a été mis en place du 28 janvier au 15 mai. Le tableau 1 renseigne les différents points de suivi, la période ainsi que la fréquence et le mode d'échantillonnage. Ces points sont portés sur une carte du secteur Sainte-Baume ouest (figure 2).

Les principaux points de sortie des eaux ont été équipés de fluorimètres automatiques de deux types (voir tableau 1). Les sites facilement accessibles ont été équipés avec des fluorimètres GGUN de marque Albillia (<http://www.albillia.com/FL30f.html>). Les sites difficiles ou exposés au grand public ont été équipés avec des fluorimètres légers et compacts facilement dissimulables fournis en location par la société Traqua (<https://traqua.be/technologie>). Les limites de détection annoncées par les constructeurs sont respectivement de 0,02 µg/l et 0,06 µg/l pour la fluorescéine. Un

fluorimètre Traqua a été positionné dans la grotte de la Castelette au niveau de la Méduse dans une vasque alimentée par la rivière souterraine au même niveau que la sonde CTD déployée par le BRGM (figure 5).

Les points secondaires ont été échantillonnés manuellement. Par la suite, ces prélèvements manuels ont été analysés au laboratoire avec un fluorimètre de type GGUN Albilia.

Nom	Alt.	Prél.	Freq.	Période de suivi	Remarques
Injection					
Grande Tourne	667				Injection à -5m
Petite Tourne	674				Injection depuis la surface
Suivi zone Gémenos					
Saint-Pons	265	Traqua 110	15m	28 jan - 15 mai	Source permanente
Galerie drainante	255	manu	15m	28 jan - 15 mai	Source permanente
Suivi zone Auriol-Saint-Zacharie					
Encanaux sup.	290	Traqua 118	15m	28 jan - 15 mai	Source permanente
Encanaux inf.	270	manu		28 jan - 11 mar	Source permanente
Glacière	270	manu	3j	28 jan - 11 mar	Source permanente
Brailles	310	manu	3j	28 jan - 11 mar	Source intermittente
Lazare	310	manu	7j	1 ^{er} fév - 11 mar	Source permanente
Nayes	275	manu		6 fév - 3 mar	Source permanente
Peyruis	425	Traqua 115	7j	1 ^{er} fév - 11 mar	Source intermittente
La Taurelle	418	Ggun 369	15m	1 ^{er} fév - 11 mar	Ruisseau de surface
Noël	270	manu	7j	4 fév - 1 ^{er} avr	Source intermittente
Suivi zone Plan d'Aups-Nans					
La Castelette	592	Traqua 117	15m	3 fév - 9 mai	Rivière souterraine, Méduse
La Castellette	592	Manu		1 ^{er} fév - 1 ^{er} avr	Siphon de sortie
La Charbonnière	558	manu		1 ^{er} fév - 18 fév	Source intermittente
Huveaune	480	Traqua 116	15m	1 ^{er} fév - 11 mar	Source permanente
Le Vedi	590	Ggun 226	15m	6 fév - 29 mar	Source intermittente
Foux de Nans	378	manu			Source intermittente

Tableau 1 : Liste des points de surveillance par secteur géographique.

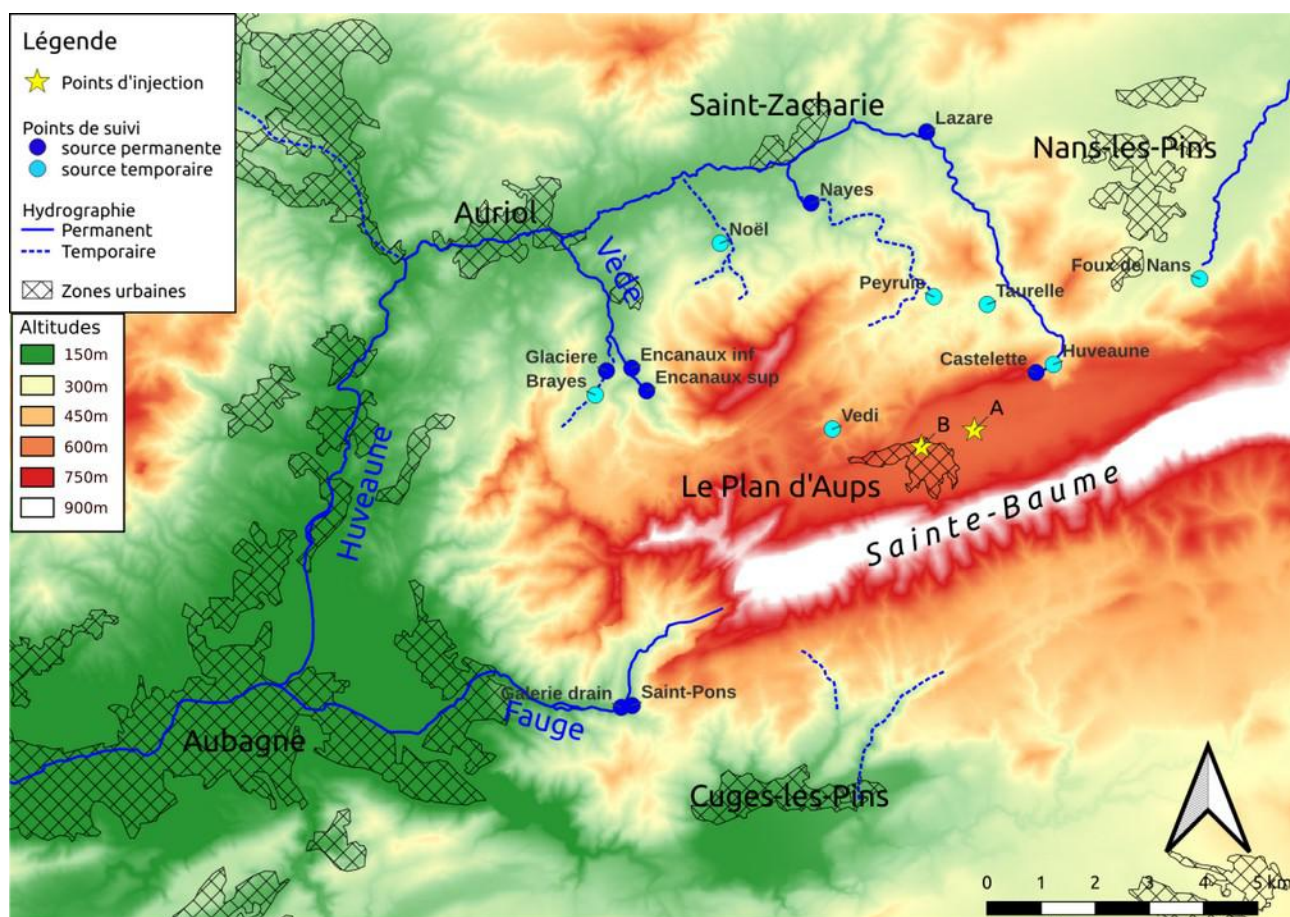


Figure 2 : Carte de localisation du réseau de surveillance. MNT 25m IGN.

3 Résultats

Lors de ce traçage, l'acide amino G injecté à la perte de la Grande Tourne a été nettement détecté à la rivière souterraine de la Castelette et à la source supérieure des Encanaux. En plus des analyses effectuées avec nos équipements, 20 échantillons d'eau ont été envoyés au laboratoire CETRAHE (<https://www.univ-orleans.fr/fr/cetrahe>) pour des mesures de concentration au spectro-fluorimètre. Les résultats confirment les restitutions à la Castelette et aux Encanaux Supérieur et montrent une détection de fluorescéine à la source de Saint-Pons le 21 février avec une concentration de 0,69 µg/l. Des traces étaient encore détectées le 24 février (0,03 µg/l).

Tous les autres points de surveillance se sont avérés négatifs.

3.1 Restitution à la rivière souterraine de la Castelette

La figure 3 haut montre la hauteur d'eau de la rivière souterraine au droit du fluorimètre (courbe rouge) et la pluie horaire à la station du Plan d'Aups SAPC (courbe bleue). En bas, est montré la courbe de restitution pour le traceur amino G à la grotte de la Castelette (courbe bleue). Ces deux

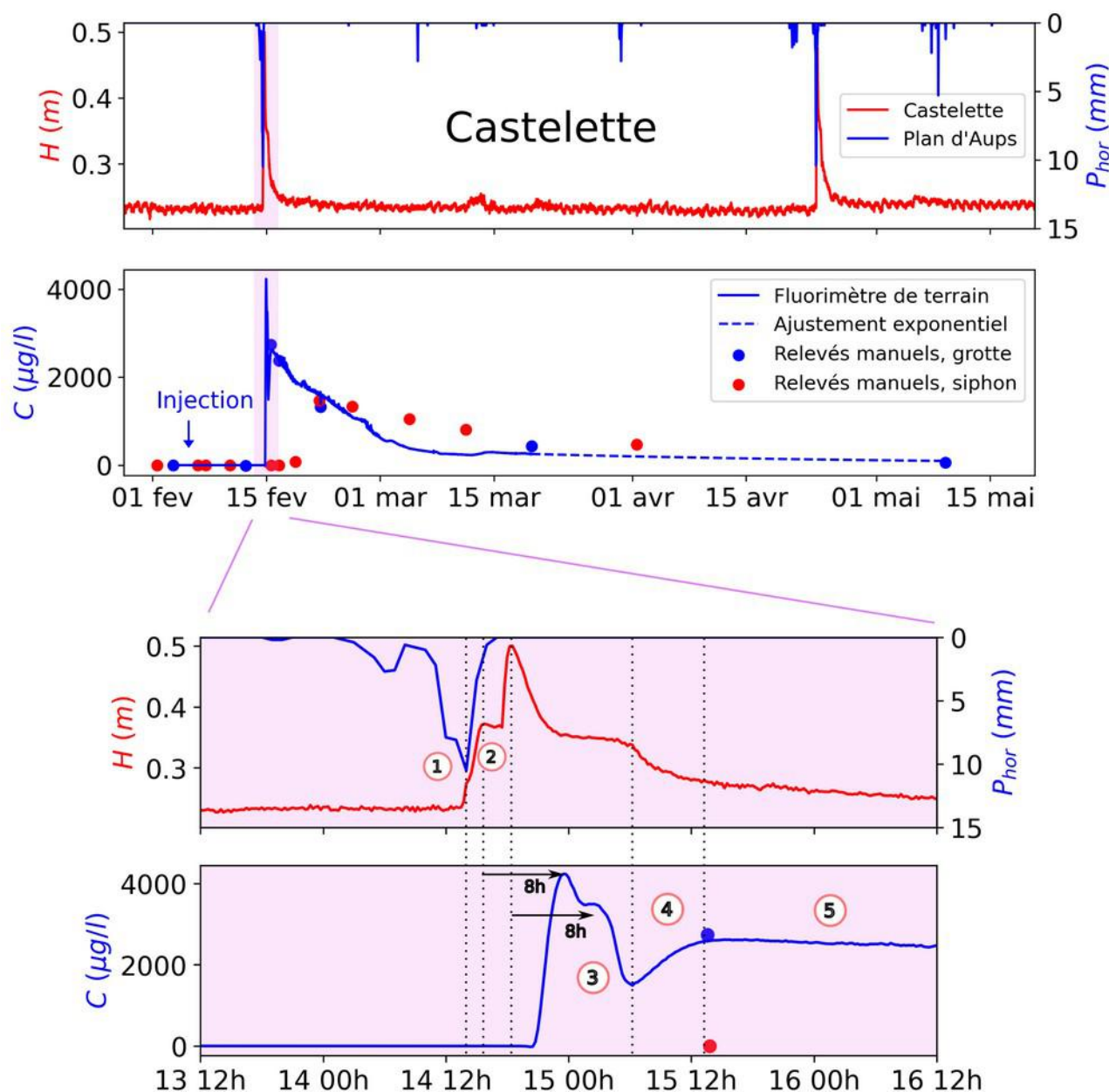


Figure 3 : La figure du haut montre l'évolution temporelle de la hauteur d'eau au niveau de la rivière souterraine à la Méduse (courbe rouge) et la pluie horaire à la station du Plan d'Aups SAPC (courbe bleue). La figure du milieu montre la courbe de restitution pour l'acide amino G à la rivière souterraine à la Méduse (courbe bleue) ainsi que les mesures manuelles effectuées à la Méduse (points bleus) et au siphon de sortie (points rouges). La figure du bas est un agrandissement sur le pic de restitution.

chroniques sont entre le 1^{er} février et le 15 mai 2022. Les points bleus et rouges sont les mesures de concentration effectuées sur les prélèvements manuels respectivement à la rivière souterraine de la Castelette (au niveau du fluorimètre) et au siphon de sortie. La courbe en tirets bleus est une extrapolation exponentielle de la courbe de restitution contrainte par les points bleus. La figure du bas sur fond violet est un agrandissement des deux précédentes au voisinage du pic de restitution.

On décompose la restitution en 5 étapes :

1. L'évènement de pluie se termine le 14 février à 14h.
2. Cet évènement pluvieux produit un double pic de pression hydraulique qui est mesuré avec un décalage d'une heure pour le premier et de 4 heures pour le second.
3. Cette double onde de pression a probablement généré un double pic de restitution (4230 et 3500 µg/l). Les deux pics de concentration de traceur sont décalés de 8 heures par rapport aux maxima de hauteur d'eau. Ensuite le niveau d'eau se stabilise jusqu'au 15 février à 6h. La concentration décroît jusqu'à 1500 µg/l.
4. Le 15 février à 6h, le niveau d'eau baisse de 5 cm en deux heures. Cela correspond à une remontée de la concentration de 1500 à 2600 µg/l entre 6h et 13h.
5. À partir du 15 février 13h, la concentration baisse régulièrement pour atteindre une valeur de 260 µg/l le 10 mars. Ensuite, la décroissance se poursuit très lentement.

On remarque que les points bleus (prélèvements au droit du fluorimètre) sont bien alignés avec la courbe de restitution. Par contre, les points rouges (prélèvements au siphon de sortie) montrent un maximum moins concentré (1460 µg/l) et sont décalés de 6 jours dans le temps.

Le fluorimètre a été retiré le 19 mars à 14h30. Après cette date, deux autres prélèvements manuels ont été effectués au siphon de sortie le 1^{er} avril et au niveau du fluorimètre le 9 mai. Ceci permet de proposer un prolongement exponentiel de la courbe de restitution (tirets bleus).

De plus, après la pluie du 14 février, plusieurs sorties d'eau temporaires se sont activées, en particulier dans le vallon de la Castelette. De nombreux prélèvements manuels ont été effectués les jours suivants. Deux informations sont à mettre en avant :

1. Une forte restitution à la source de la Charbonnière (située environ à 200 m à l'est de la grotte de la Castelette, plus bas en altitude, figure 5) entre le 15 et le 18 février. Cette source devenant à sec ensuite.
2. L'absence de traceur détecté sur les sources basses du vallon de la Castelette et en particulier à la source de l'Huveaune. La source des Moulins n'a pas été active sur la période de suivi.

3.2 Restitution à la source supérieure des Encanaux

La figure 4 haut montre le débit mesuré à la station aval de la Vède (courbe rouge), soit environ 2 km à l'aval de la source supérieure des Encanaux. Sur le même graphique, la pluie horaire mesurée au plan d'Aups SAPC est montrée (courbe bleue). Le graphique du milieu montre la courbe de restitution pour l'acide amino G (courbe bleue). Les données sont affichées entre le 28 janvier et le 15 mai 2022. Les points bleus et rouges montrent les résultats des analyses effectuées sur les prélèvements manuels. Avec le fluorimètre de terrain pour les points bleus et au CETRAHE (spectrofluorimètre) pour les points rouges.

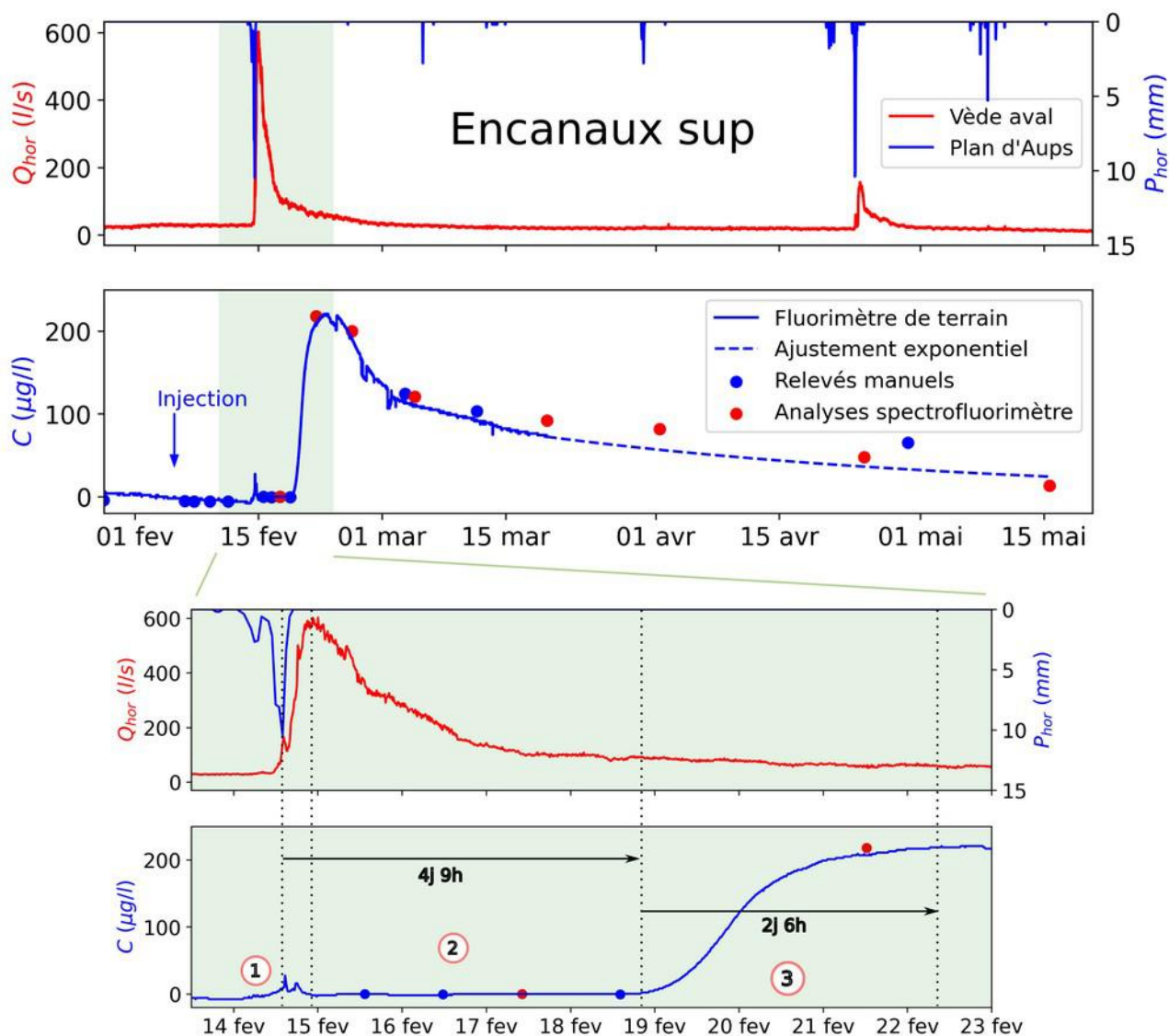


Figure 4 : La figure du haut montre l'évolution temporelle du débit à la station de la Vède aval (courbe rouge) et la pluie horaire à la station du Plan d'Aups SAPC (courbe bleue). La figure du milieu montre la courbe de restitution pour l'acide amino G à la source supérieure des Encanaux (courbe bleue) ainsi que les mesures manuelles effectuées avec un fluorimètre de terrain (points bleus) et au spectrofluorimètre (points rouges). La figure du bas est un agrandissement sur le pic de restitution.

Le fluorimètre a été retiré le 19 mars à 12h30. Après cette date, quatre autres prélèvements manuels ont été effectués à la source supérieure et analysés. Ceci permet de proposer un prolongement exponentiel de la courbe de restitution (tirets bleus) afin de calculer la masse restituée.

La restitution est très bien marquée avec un pic unique. On peut décomposer la restitution en quatre temps (figure 4 bas) :

1. La pluie du 14 février déclenche dans le même temps un ruissellement de surface. Cet écoulement de surface provoque un excès de matière organique dissoute qui est mesuré par

le fluorimètre dans la gamme bleue (identique à la plage de mesure de l'acide amino G). Un petit pic autour de 30 µg/l est visible le 14 février sur la courbe de restitution.

2. Le 18 février vers 22h soit 4 jours et 9h après le maximum de pluie du 14 février, la restitution débute.
3. Elle atteint son maximum le 22 février vers 12h avec une concentration de 220 µg/l.
4. Par la suite, en l'absence de pluie significative jusqu'à la mi-avril, on assiste à une décroissance régulière jusqu'à l'arrêt du suivi le 15 mai.

3.3 Estimation des taux de restitution

L'estimation de la masse restituée (équation 1) nécessite la connaissance des débits aux points de sortie.

$$M = \int_{t_1}^{t_2} C(t) Q(t) dt \quad (1)$$

3.3.1 Source supérieure des Encanaux

Nous disposons des débits mesurés à la source supérieure des Encanaux seulement à partir de novembre 2022. Nous disposons de plus des débits mesurés à la Vède aval (au niveau du pont de la D45a, soit à 1800 mètres à l'aval) à partir d'octobre 2021. Par comparaison de ces deux débits sur une plage de temps commune, nous pouvons montrer les points suivants :

- les deux débits sont approximativement identiques pour des étiages ;
- le débit de la Vède aval est légèrement supérieur concernant les petites crues et leur récessions ;
- le débit de la Vède aval nettement supérieur pour les pics des crues importantes.

Concernant le calcul de la masse restituée à la source supérieure des Encanaux, vu le contexte de petite crue, cela nous amène à considérer le débit à la Vède aval corrigé d'un facteur variant entre 0,8 et 1,0. Par application de la formule (1), entre le 18 février et le 15 mai, nous déduisons une masse restituée de 9 ± 1 kg d'acide amino G à la source supérieure des Encanaux. Soit 18 % de la masse injectée. L'erreur considérée est largement dominée par les incertitudes sur les débits.

3.3.2 Grotte de la Castelette

Nous ne disposons pas des débits circulant dans la grotte de la Castelette. En effet, seule une mesure de hauteur d'eau est disponible au droit du fluorimètre. Par un raisonnement inverse, si nous faisons l'hypothèse forte que la totalité du traceur injecté dans la Grande Tourne est restitué (41 kg d'acide amino G si on retire les 9 kg des Encanaux), par utilisation de la formule (1), nous pouvons calculer le débit moyen correspondant entre le 14 février et le 15 mai. Le résultat est de 17 l/s. Ce débit moyen maximal (correspondant au maximum de traceur restitué) semble réaliste. Malgré tout,

l'estimation précise de la masse restituée est impossible.

4 Interprétations

4.1 Restitution à la grotte de la Castelette

Dans un premier temps, nous considérons la restitution à la grotte de la Castelette. L'examen des résultats la courbe (figure 3) nous permet d'avancer deux points évidents :

1. La distance entre le point d'injection et de restitution étant de 1600 mètres, nous observons une vitesse maximale de restitution de 180 m/h. Le début de la restitution intervient très rapidement soit 9h après l'événement de pluie. Le premier pic montre une très forte de la concentration : +4200 µg/l en 3 heures. Cela indique une jonction par des conduits karstiques bien développés.
2. La résurgence temporaire de la Charbonnière située à moins de 100 mètres de la sortie naturelle de la grotte de la Castelette a montré des résultats positifs pendant l'épisode de crue. L'interprétation la plus simple est une jonction directe entre la perte située à 120 m en amont du siphon de sortie de la grotte de la Castelette et cette résurgence (figure 5). Cette perte située environ 50 cm au dessus du lit de la rivière souterraine s'active lors des crues. C'est un autre résultat original montré par cette étude.

Sur la forme de la courbe de restitution en détail nous pouvons ajouter les éléments suivant :

1. Comme mentionné précédemment, le double pic paraît cohérent (mêmes décalages temporels observés de 8h) avec le double pic de mise en charge (figure 3).
2. La remontée de concentration (événement 4 de la figure 3) est difficile à expliquer. Son début correspond à une baisse marquée du niveau d'eau. Il est à noter que le fluorimètre a été installé à l'aval d'un lac siphonnant de volume important (10 m³ ?). Des effets complexes de dilution dans le bassin amont pourraient-ils expliquer cette baisse de concentration ?
3. Le décalage de 6 jours observé entre le pic de restitution au droit du fluorimètre et celui observé au siphon de sortie s'explique probablement de même par un effet de dilution. Ce siphon est situé à 250 mètres en aval et a un volume estimé de 100 m³. Soulignons qu'en 2 jours, le niveau d'eau était quasiment revenu au niveau d'avant crue avec un débit inférieur à 1 l/s circulant dans la cavité (0,2 l/s mesuré le 19 mars un mois après l'injection). Ce faible débit est très inefficace pour renouveler l'eau du siphon de sortie, avec un volume plus grand que le lac amont. Cela pourrait expliquer le décalage dans le temps entre les deux restitutions.
4. La très lente décroissance de la concentration est consécutive aux très faibles débits circulant dans la cavité quelques jours après le pic de crue. Les deux lacs/siphons avec une forte concentration de traceurs se renouvellent en eau « fraîche » très lentement.

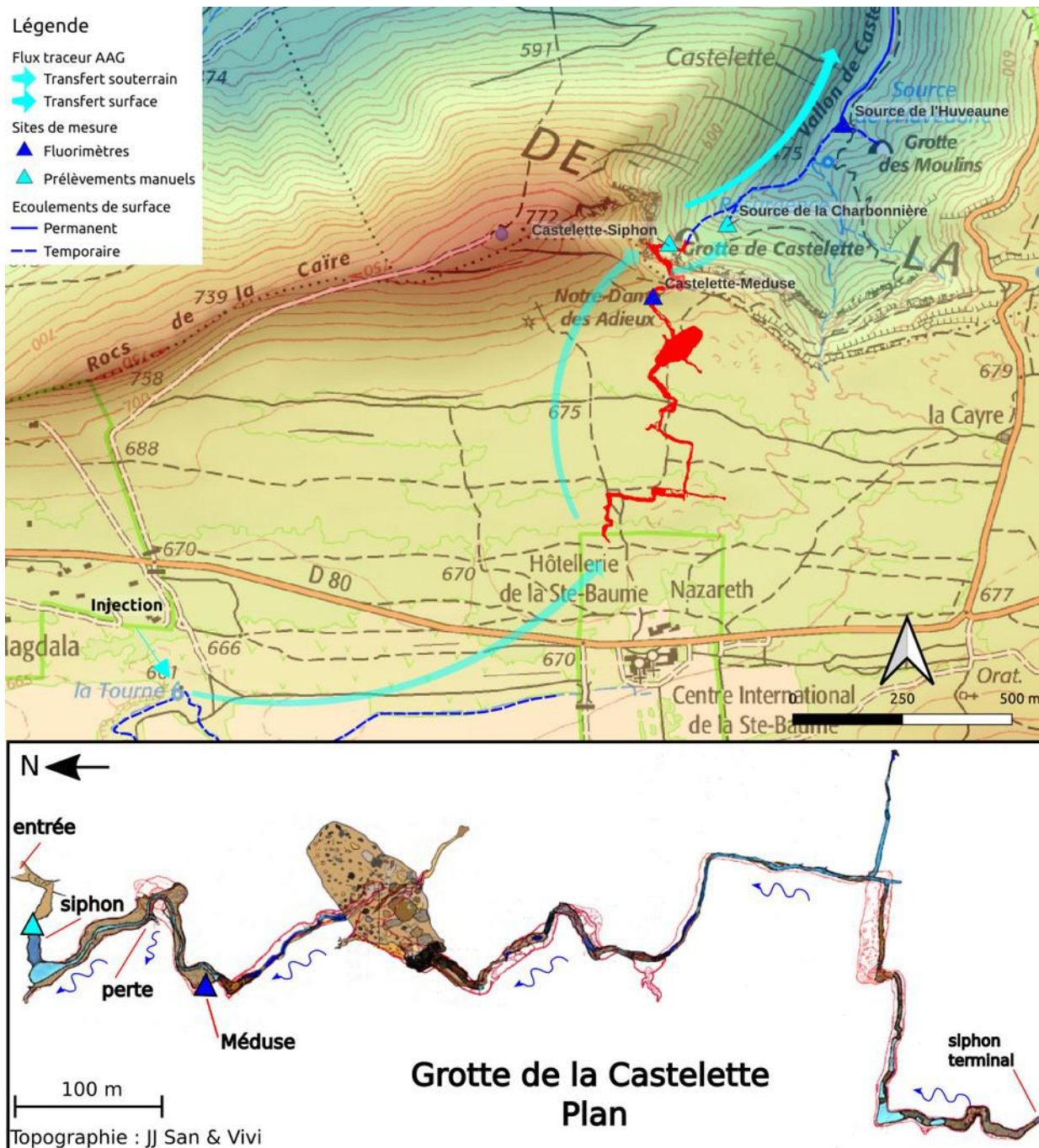


Figure 5 : Le réseau de la grotte de la Castelette dans son contexte géographique (haut) et la topographie spéléologique (bas). Les flèches bleues montrent les restitutions depuis la perte de la Grande Tourne. Le triangle bleu foncé est la position du fluorimètre dans la grotte. Le triangle bleu clair est le site des prélèvements manuels (siphons de sortie).

4.2 Restitution à la source supérieure des Encanaux

La courbe de restitution (figure 4) montre un pic unique nettement visible à une concentration maximale de 220 $\mu\text{g/l}$ le 22 février. Le début de la restitution s'est produite 4 jour et 9 heures après

la pluie du 14 février. La distance en ligne droite entre le point d'injection et la source est de 6000 mètres, soit une vitesse maximale de restitution de 57 m/h.

Ce résultat inattendu montre une diffifluence hydrogéologique se produisant sur la plateau du Plan d'Aups entre le vallon de la Castellette à l'est (80 % du flux) et le vallon des Encanaux à l'ouest (20 % du flux). La géologie locale pourrait expliquer cette diffifluence qui serait favorisée par le synclinal du Plan d'Aups. Ce dernier d'âge santorien est dominé par des formations de type plateforme carbonatée [4]. Cette unité est karstifiable et s'étend vers l'ouest. Elle pourrait présenter des drains karstiques favorables aux écoulements depuis le plateau du Plan d'Aups jusqu'au vallon des Encanaux.

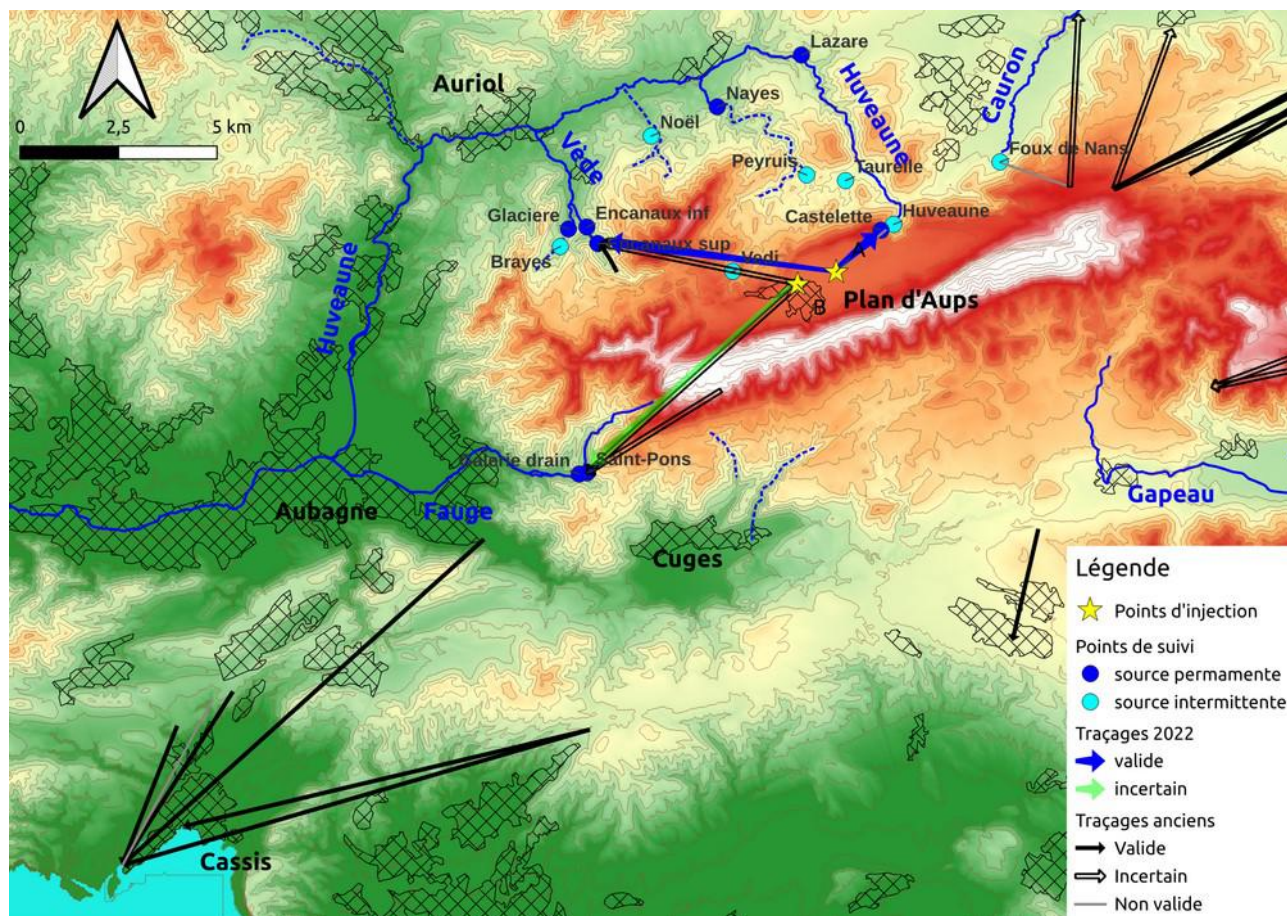


Figure 6 : Carte de synthèse des différents traçages passés (flèches noires) et réalisés dans ce projets (flèches de couleur).

4.3 Résultats dans le contexte hydrogéologique local

Grâce à ce traçage, les circulations d'eau souterraine sur le versant nord de la Sainte-Baume se précisent (figure 6). D'est en ouest, nous pouvons dessiner le schéma suivant :

- Les écoulements souterrains permanents observés dans le réseau karstique connecté aux

anciennes mines de bauxite de Mazaugues sont drainés dans le bassin versant de l'Argens via son affluent le Caramy.

- La rivière souterraine du complexe karstique du Petit Saint-Cassien est drainée, en hautes eaux, dans le bassin versant de l'Argens via son affluent le Cauron. Les sorties ont été mises en évidence aux griffons inférieurs de la Foux de Nans [5].
- Le poljé du Plan d'Aups est principalement drainé par la Grande Tourne. En cas de fortes pluies, elle alimente le bassin versant de l'Huveaune en empruntant deux chemins distinct : le vallon des Encanaux à l'ouest, le réseau karstique de la Castelette à l'est.
- La perte secondaire du poljé du Plan d'Aups, la Petite Tourne est significativement alimentée lors de gros épisodes pluvieux. Elle serait connectée à la source de Saint-Pons (deux résultats positifs en 1986 et ce travail) et secondairement à la source supérieure des Encanaux.

5 Conclusion

L'expérience de traçage réalisée entre février et mai 2022 avec injection aux Grande et Petite Tourne du Plan d'Aups a pu mettre en avant trois résultats originaux :

1. La relation par des conduits bien karstifiés entre la Grande Tourne et la grotte de la Castelette. Bien que suspecté, cette liaison est pour la première fois clairement établie.
2. La relation entre la Grande Tourne et la source supérieure des Encanaux. Cette difffluence prenant place sur le plateau du Plan d'Aups est plus surprenante bien qu'elle s'explique par la géologie locale
3. La relation entre la perte de la rivière de la Castelette et la grotte de la Charbonnière.

De plus, des traces de fluorescéine ont été mesurées à la source de Saint-Pons. Ceci confirme les travaux précédents [2] avec une relation entre cette dernière et la Petite Tourne.

Enfin, les résultats négatifs bien que difficilement interprétables peuvent aussi apporter des renseignements intéressants. Ainsi, bien qu'une restitution très claire ait été observée à la source supérieure des Encanaux (liée à la rivière du gouffre des Encanaux) aucun traceur n'a été détecté à la résurgence temporaire des Brailles (liée au réseau karstique éponyme). Ces deux systèmes karstiques sont jumeaux : mêmes directions principales de karstification, même altitudes des conduits, mêmes morphologies, même régime hydrologique de zone épinoyée. Bien que situés à quelques centaines de mètres, cette absence de détection à la résurgence des Brailles montrerait un bassin versant hydrogéologique différent de celui des Encanaux.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Sidonie Chevrier (CDSC13) et Thierry Lamarque (Spélé-H2O) pour leur implication dans ce projet qui a souvent dépassé leurs obligations professionnelles, de

même que Bruno Arfib pour son accompagnement scientifique.

Ce projet ne saurait exister sans une forte implication bénévole. À ce titre, beaucoup de spéléologues ont apporté leur contribution à divers moments clés du projet notamment sur l'opération d'injection (photo 2).

Merci à Mélissande Ibba et Marie Genevier de l'unité régionale BRGM à Marseille pour le partage de données.

Merci à Frédéric Portalier, élu à la mairie du Plan d'Aups pour son aide organisationnelle et ses apports comme fin connaisseur de la Sainte-Baume.

Enfin, je remercie le SDIS 83 pour leur aide précieuse sur l'opération d'injection.



Photo 2 : Équipe d'injection au grand complet devant le camion du SDIS 83. Sont présent de gauche à droite : SDIS83, Marion Stepanian ; Jérémie Prieur-Drevon, Marie Genevier, Mélissande Ibba, stagiaire BRGM, stagiaire BRGM, Sidonie Chevrier (haut) Pascal Péri (haut), Olivier Lushevici (haut), Christophe Duval, Claude-Pascale Duval, Sylvie Gibert, SIDS83, Alexandre Zappelli, Alexandra Rolland, Damien Stepanian, Frédérique Canuet, Sébastien Burdel, SDIS83, SDIS83, Marc (accroupi), Jean-Mary Maurice (accroupi), le Berger des Abeilles (accroupi).

Références

- [1] Agence de l'eau RMC, Fiche de synthèse « Massifs calcaires de Ste-Baume, Agnis, Ste Victoire, Mont Aurélien, Calanques et Bassin du Beausset » FRDG137, 2015
- [2] Martin P. : Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants Nord et Ouest de la Sainte Baume (Bouches-du-Rhône, Var ; France) : étude hydrologique, hydrochimique et de vulnérabilité à la pollution. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille II, 1991
- [3] Blog du club Speleo-Canyon du Pays d'Aubagne: <https://scpa-escandaou.com/2022/02/tracage-a-la-sainte-baume-2eme-samedi-05-fevrier-2022.html>
- [4] M. Villeneuve (coord.) et al. (2018) – Mémoire explicatif. Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille, 3ème édition (1044). Orléans : BRGM, 333 p. Carte géologique par Laville P., Monteau R., Villeneuve M. et al.
- [5] Durand R., Margaria Y., La liaison Saint-Cassien / Foux de Nans-les-Pins est maintenant une réalité. Spelunca 139, p. 47-50, 2015



Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon des Bouches-du-Rhône



Traçages hydrogéologiques sur le massif de la Sainte-Baume occidentale

Rapport année 2024 : traçage poljé de Cuges-les-Pins

Porteur

Comité départemental de spéléologie et de descente de canyon du 13
415 avenue des Templiers – ZA de Napollon
13400 Aubagne
Contact : Alexandre Zappelli
alexandre.zappelli@free.fr
06 20 45 92 54

Partenaires scientifiques et techniques

Aix-Marseille Université
Laboratoire CEREGE
3 place Victor Hugo
13331 Marseille
Contact : Bruno Arfib
arfib@cerege.fr



Spélé-H2O
405 avenue Bucarin
83140 Six-Fours-les-Plages
Contact : Thierry Lamarque
speleh2o@wanadoo.fr



1 Rappel du contexte

Cette opération de traçage est la troisième d'un projet qui en compte trois étalés sur trois ans. Le projet global est porté par le Comité départemental de spéléologie et de canyonisme des Bouches-du-Rhône (CDSC13) en collaboration avec l'association Spélé-H2O et Aix-Marseille Université. Il a été financé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône et la région Sud.

La zone d'étude située sur l'ouest du massif de la Sainte-Baume présente un intérêt majeur concernant la ressource en eau potable. Elle est classée parmi les territoires stratégiques par l'Agence de l'eau [1] et plusieurs communes dépendent tout ou partie de l'eau souterraine pour leur alimentation en eau potable.

Ce rapport décrit la réalisation et les résultats obtenus lors de la troisième opération de traçage sur la Sainte-Baume sud. Elle vient en complément d'une étude visant à définir les zones de sauvegardes des ressources en eaux souterraines initiée par le Parc naturel régional de la Sainte-Baume, ainsi que des nombreuses recherches menées par le Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences et Environnement (CEREGE).

Le poljé de Cuges-les-Pins est le réceptacle de nombreux écoulements de surface qui drainent une surface importante de la Sainte-Baume sud. Par forts épisodes pluvieux, les pertes et les zones d'absorption ne sont pas assez efficaces et un lac temporaire plus ou moins grand se forme. La question de la liaison hydrogéologique entre le poljé de Cuges et la rivière souterraine de Port-Miou se pose depuis longtemps. Un essai de traçage à déjà été entrepris en 2011 par B. Arfib dans l'embut ouest du poljé sans détections positives [2]. Trois kilomètres à l'ouest du poljé, dans la plaine de Coulin, le BRGM a réalisé un essai de traçage à la perte de Fontmagne avec un résultat positif à Port-Miou (figure 1).

Cependant la liaison entre le poljé et les rivières souterraines de Cassis (Port-Miou et Bestouan) n'a pas encore été démontrée. C'est la motivation de ce travail.

2 Moyens mis en œuvre

2.1 Injection

Suite au premier essai de traçage dans le poljé de Cuges réalisé en 2011 [ref x] dans la perte ouest, nous avons opté pour un autre point d'injection situé à l'est (figure 1). Cette zone ne présente pas de perte bien identifiée, mais est une vaste zone d'infiltration. Elle est utilisée pour réguler l'arrivée d'eau issue du vallon de la Serre par un système de dérivation. Afin d'améliorer l'infiltration, nous avons demandé à la mairie de Cuges-les-Pins de creuser une tranchée. Nous espérions ainsi atteindre la roche très proche en distance à quelques dizaines de mètres au sud. Ce fut un échec malgré une tranchée de belles dimensions (15 m de long, 2 m de large, 3 m de profondeur). Ce sera toutefois notre point d'injection. Cette opération est conditionné à la mise en eau du ruisseau

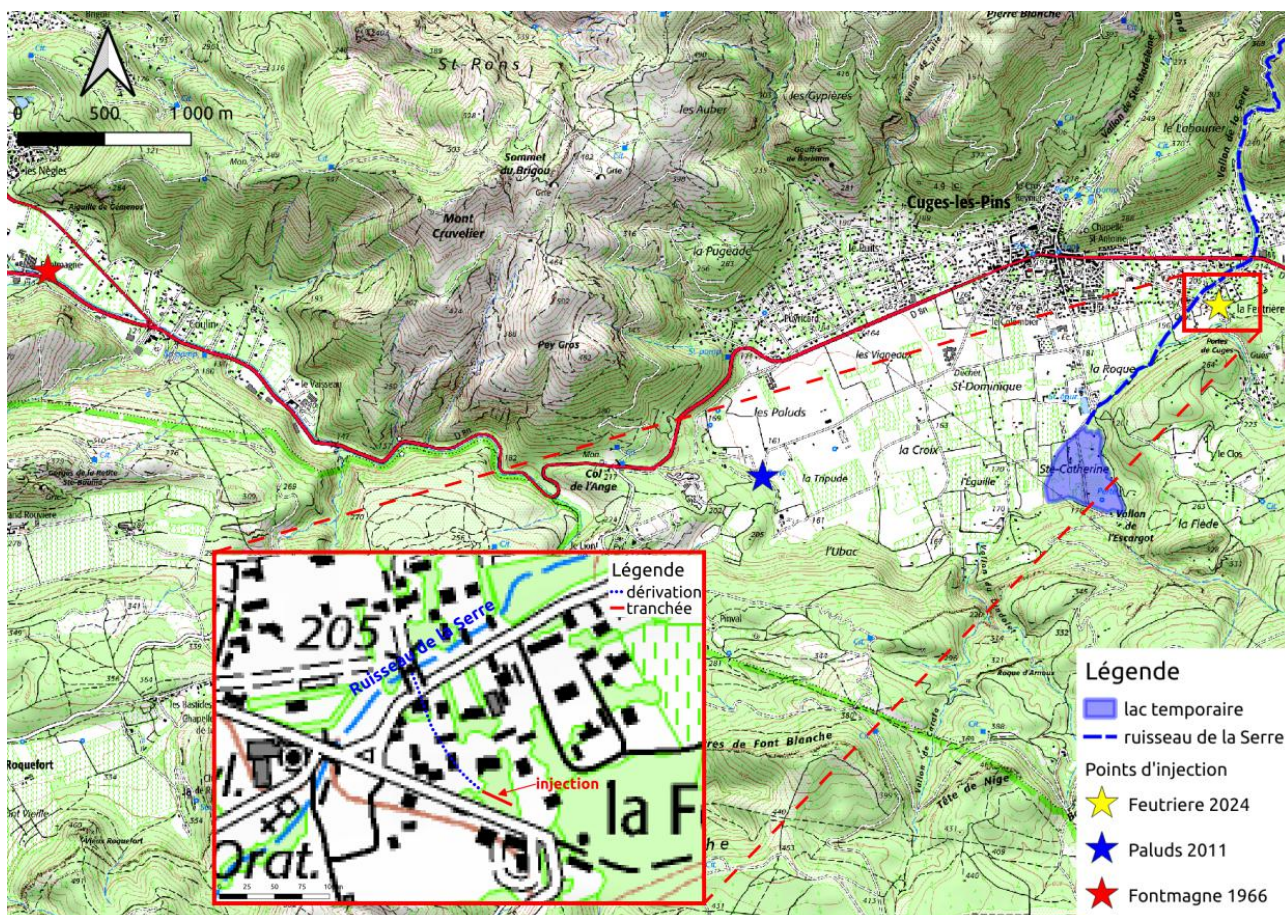


Figure 1 : Carte de situation de l'opération d'injection.

temporaire de la Serre (figure 1). Cet apport est déterminant pour diluer et injecter les 50 kg de fluorescéine en poudre. Après d'importantes pluies en février, le vallon se met en eau début mars. Après plusieurs années de sécheresse, c'est le moment idéal pour entreprendre le traçage.

Début mars, suite aux fortes pluies, François Souret observe une dynamique d'absorption correcte de la tranchée (environ un mètre de baisse de niveau en 24 heures).

Le 18 mars 2024 en fin d'après-midi, une équipe d'une dizaine de spéléologues des Bouches-du-Rhône et du Var se retrouvent à Cuges-les-Pins pour effectuer l'injection. Les conditions sont optimales : la tranchée est vide et le ruisseau coule à profusion (figure 2). Dans un premier temps, le canal de dérivation bouché par des embâcles végétaux est désobstrué. Un système de régulation de l'apport d'eau par une planche est testé. En parallèle, trois équipiers profitent de l'arrivée d'eau à proximité de la tranchée pour commencer à diluer les 50 kg de fluorescéine en poudre dans deux bidons de 80 litres. À 17h30, la totalité du traceur est versé dans la tranchée. Le débit d'arrivée d'eau est réglé afin de ne pas faire déborder la tranchée. L'opération est délicate et une petite partie de la solution se répand alentours. La tranchée mettra trois jours à se vidanger totalement. L'absorption est ainsi moins efficace qu'espéré.



Figure 2 : a) Ruisseau du vallon de la Serre en amont de la dérivation le 18 mars. b) Départ de la dérivation vers la tranchée encombrée d'embâcles. c) Début de l'injection dans la tranchée. d) Fin de l'injection. Photos a), b), d) : Thierry Lamarque. Photo c) : Alexandre Zappelli.

2.2 Le réseau de suivi

Le réseau de suivi a été mis en place de mi-mars à mi-juillet. Le tableau 1 renseigne les différents points de suivi, la période ainsi que la fréquence et le mode d'échantillonnage. Ces points sont portés sur une carte du secteur Sainte-Baume sud (figure 3).

Vu la situation du point d'injection à 200 m d'altitude, les points de suivi potentiels excluent les principales sources de la région et se limitent aux nappes souterraines et aux exutoires régionaux, les rivières souterraines de Cassis. Ainsi, nous avons déployé quatre points de suivi :

1. La rivière souterraine de Port-Miou. Un fluorimètre de type GGUN a été installé au barrage à 500 mètres de la côte sur une période du 10 mars au 18 juillet.
2. La rivière souterraine du Bestouan. Un fluorimètre de type GGUN a été installé dans le forage de la fondation Camargo du 12 mars au 18 juillet. Ce forage situé dans un jardin

privé à 50 mètres du littoral permet d'atteindre la rivière.

3. Le forage de la carrière Bronzo situé entre Aubagne et Carnoux à 165 m d'altitude. Ce forage profond (140 m) permet d'atteindre une nappe pressentie comme un carrefour des eaux souterraines régionales. Ce forage est pompé en permanence pour les besoins de la carrière. L'appareil de type GGUN a été installé dans un bassin de rétention en surface du 13 mars au 16 juillet.
4. Les sources de la calanque de Port-Miou. Situées à l'entrée de la calanque en rive droite, il a été montré que c'est la même eau saumâtre que la rivière souterraine. Des prélèvements manuels, journaliers pendant un mois puis plus espacés ont été effectués du 10 mars au 4 juin. Soit environ une quarantaine d'échantillons.

Les fluorimètres GGUN de marque Albillia (<http://www.albillia.com/FL30f.html>), sont les appareils de référence pour le suivi in-situ. La limite de détection annoncées par le constructeur est de 0,02 µg/l pour la fluorescéine.



Figure 3 : Carte de localisation du réseau de surveillance. MNT 25m IGN.

3 Résultats

Aucun résultat positif n'a pu être mis en avant avec nos trois fluorimètres de terrain. La figure 4 montre les résultats bruts (données non calibrées). Les variations sont très faibles : quelques mV. On pourrait attribuer l'augmentation de la fluorescence à Port-Miou et Bestouan suite aux fortes pluies de mars/avril.

4 Interprétations

Il est délicat d'interpréter un résultat négatif de traçage. Nous savions auparavant que cet essai de traçage était délicat à réaliser. En effet, vu la distance entre le point d'injection et la zone de restitution supposée (17 km), la faible pente altitudinale (environ 1%) et le volume certainement important à tracer, le colorant injecté a sûrement subi une forte dilution empêchant la détection.

D'autre part, vu la quantité de traceur à diluer et à injecter, une quantité d'eau importante est nécessaire. Il est donc impératif de se coordonner avec un épisode de hautes-eaux qui active le ruisseau du vallon de la Serre. Or cela faisait plusieurs années qu'il était resté à sec. Cette condition complique l'organisation de l'opération de traçage.

Enfin, notons que en l'absence de perte montrant une absorption rapide, l'injection reste délicate à réaliser. Ainsi, l'effet dilution est renforcé limitant la probabilité de détection du traceur aux points de sortie.

5 Conclusion

L'expérience de traçage réalisée entre février et mai 2024 avec injection à l'est du poljé de Cuges-les-Pins n'a pas permis de démontrer une relation hydrogéologique avec les sources de Cassis (Port-Miou et Bestouan). En dernier espoir, nous attendons des résultats complémentaires d'analyses au spectrofluorimètre d'une dizaine d'échantillons prélevés à Port-Miou. En cas de résultats positifs, un avenant à ce rapport sera fourni. Cette expérience complexe, déjà tentée en 2011 [2], pourrait être repensée avec un protocole d'injection différent. Par exemple en injectant le traceur dans l'embut sud avant la formation du lac. Toutefois, l'expérience serait difficile et demanderait une parfaite synchronisation avec les conditions météorologiques avec des résultats très aléatoires.

Remerciements

Je tenais à remercier en premier lieu Sidonie Chevrier (CDSC13), de même que Bruno Arfib pour son accompagnement scientifique.

Je remercie tout particulièrement les Cugeois François Souret, pour son relais auprès de la mairie de Cuges-les-Pins, et Johan Jouve pour leur aide sur l'opération d'injection.

Enfin, merci aux spéléologues pour leur assistance : Viviane Testa-Della-Penna, Christophe Duval, Claude Pascale Duval, Olivier Hélène, Nicolas Lemoine, Thierry Lamarque, Roger Garonne, Jean-

Références

- [1] Agence de l'eau RMC, Fiche de synthèse « Massifs calcaires de Ste-Baume, Agnis, Ste Victoire, Mont Aurélien, Calanques et Bassin du Beausset » FRDG137, 2015
- [2] Bruno Arfib, Thierry Lamarque, Traçage artificiel KarstEAU : Injection d'Acide Amino G à l'embut sud-ouest de Cuges les Pins réalisée le 18 janvier 2011. Compte-rendu de l'injection. Université de Provence et Spéléo-Club de Cuges. 12 pages, 2011