



**HAL**  
open science

**Connection between a surface stream and a karstic spring – Assessing groundwater vulnerability by dye tracing and hydraulic test of the Saint Antoine spring (Toulon – SE France)**

Thierry Lamarque, Philippe Maurel, B. Arfib, T. N'dah, Cécile Baudement

► **To cite this version:**

Thierry Lamarque, Philippe Maurel, B. Arfib, T. N'dah, Cécile Baudement. Connection between a surface stream and a karstic spring – Assessing groundwater vulnerability by dye tracing and hydraulic test of the Saint Antoine spring (Toulon – SE France) . Eurokarst 2016, Sep 2016, Neuchâtel, Switzerland. 2016. hal-01458738

**HAL Id: hal-01458738**

**<https://hal.science/hal-01458738v1>**

Submitted on 10 Feb 2017

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

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

Thierry Lamarque (1), Philippe Maurel (1), Bruno Arfib (2), Thérèse N'Dah (2) & Cécile Baudement (2)

(1) SpéléH2O, 405 Av. Bucarin, 83140 Six-Fours – France, Email : speleh2o@wanadoo.fr

(2) Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, CEREGE UM34, 3 Place V. Hugo, case 67, 13003 Marseille - France, Email : arfib@cerege.fr

## Abstract : Connection between a surface stream and a karstic spring – Assessing groundwater vulnerability by dye tracing and hydraulic test of the Saint Antoine spring (Toulon – SE France)

Hydraulic tests were performed by controlling the discharge in a stream in connection with a karst spring. Three tests were performed with a constant discharge during 2 or 3 days and in-situ CTD measurements at the spring. Electric conductivity is relevant to separate flow origin and provide transfer times between the stream and the spring. Pressure time transfer by piston flow and transport time transfer are calculated. Results are compared with a dye tracing experiment performed in a sinkhole in the stream. The main results are:

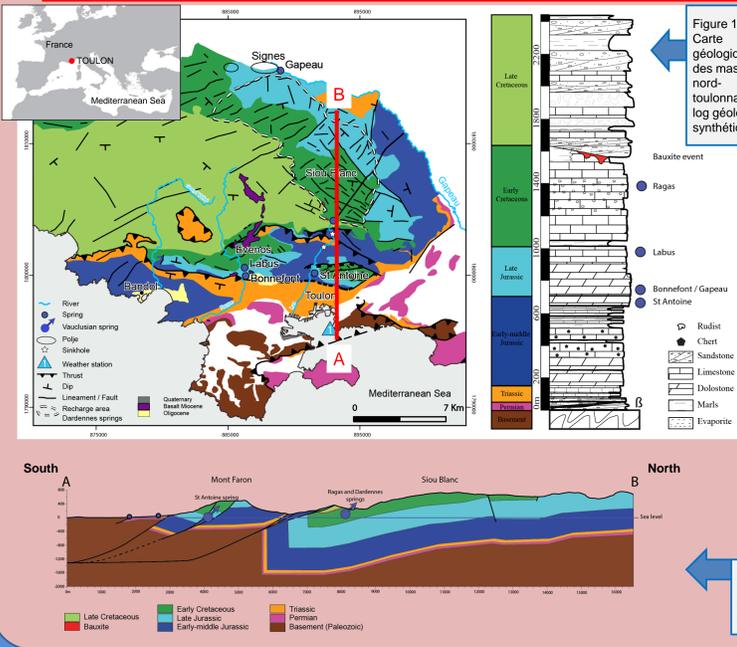
- Hydraulic test:
- It investigates all the stream to spring connections (even the unknown zones of infiltration) and not only one sinkhole.
  - It's a simple and efficient method because in-situ CTD monitoring in spring is accurate and easy to apply.
  - It gives the discharge of the stream supplying the spring by mass water budget of the spring discharge.
  - It can be performed in several hydrological contexts.
- Dye tracing:
- The time transfer between a sinkhole and the spring can be longer than the global stream to spring connections (implication for groundwater vulnerability).
  - The tailing effect in the breakthrough curve shows flow conditions.
  - Dye fluorescence concentration has to be corrected by the background signal (changing natural fluorescence linked to organic matter).
  - With field fluorimeter, always monitor the artificial dye and another signal for organic matter.
  - Study the in-situ CTD and natural fluorescence for weeks without dye tracer to understand the background signal.

## Objectifs

Lorsqu'une relation existe entre une rivière et une source, l'étude par traçage artificiel d'un seul point d'infiltration de l'eau ne suffit pas. L'étude fine des relations entre les variations de débit et de chimie du cours d'eau et de la source karstique constitue une méthode complémentaire efficace. Nous présentons dans cette étude les résultats obtenus sur une source karstique alimentée en partie par les pertes d'un cours d'eau. La conductivité électrique est utilisée comme un traceur naturel de l'origine de l'eau, représentatif des variations de proportion de mélange d'eaux d'origine différente. La régulation artificielle du débit du cours d'eau permet de contrôler les conditions hydrologiques et d'observer les réactions de la source. Le cas d'étude se situe dans le Sud-Est de la France, au nord de Toulon. La source Saint Antoine émerge à l'entrée de Toulon à quelques centaines de mètres d'un cours d'eau, Le Las, qui entaille les calcaires et dolomies susceptibles d'alimenter la source. La technique classique du traçage artificiel a été comparée à une série de tests hydrauliques dans le cours d'eau, consistant à réaliser des lâchers d'eau à l'aide d'une retenue située en amont. L'objectif de l'étude est de :

- (1) montrer les méthodes (traçage artificiel et test hydraulique) mises en œuvre pour déterminer les temps de transfert,
- (2) croiser et comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes,
- (3) quantifier les temps de transfert de l'onde de pression et l'arrivée de l'eau d'infiltration sur le cas d'étude,
- (4) donner un exemple d'études préalables nécessaires pour la caractérisation de la ressource en eau en milieu karstique.

## Contexte hydrogéologique et hydrologique



La zone d'étude appartient à la limite orientale de l'unité géologique du Beausset qui s'étend de Marseille à Toulon. Les terrains du Trias au Crétacé supérieur forment un vaste empiètement de roches carbonatées, fracturées et karstifiées.

Le cours d'eau "Le Las" prend naissance au barrage de Dardennes alimenté par les sources karstiques éponymes. C'est un fleuve de 8 km de long. Il entaille les calcaires et dolomies à travers les grands chevauchements régionaux. Il est également alimenté en aval par la source karstique Saint Antoine, au débit variable de quelques dizaines de litres par secondes à plus de 4 m³/s, et par les eaux de ruissellement urbain. Le Las est un cours d'eau typiquement méditerranéen, avec des assècs sévères et des crues éclairs.

Une partie du cours d'eau se perd sur environ 1 km de long et alimente la source Saint Antoine. Une perte karstique explorable par l'homme sur quelques mètres a été repérée sur le bord du lit du cours d'eau.

La source draine également le Mont Faron (relation prouvée en 6 jours par un traçage artificiel réalisé le 4 mars 2015) et une ressource en eau souterraine profonde rechargée au nord sur l'unité du Beausset (massif de Siou Blanc) qui traverse le chevauchement semi-perméable (température légèrement chaude, de l'ordre de 16°C). L'eau à la source s'écoule dans un conduit karstique noyé exploré jusqu'à 90m de profondeur.

Figure 2 : Coupe régionale utilisant la méthode des coupes équilibrées. Les grandes structures géologiques apparaissent : le chevauchement sud-nord individualise le massif de Siou-Blanc au nord et le Mont Faron au sud. Le Mont Faron est également découpé par des accidents ayant rejoué en faille normale.

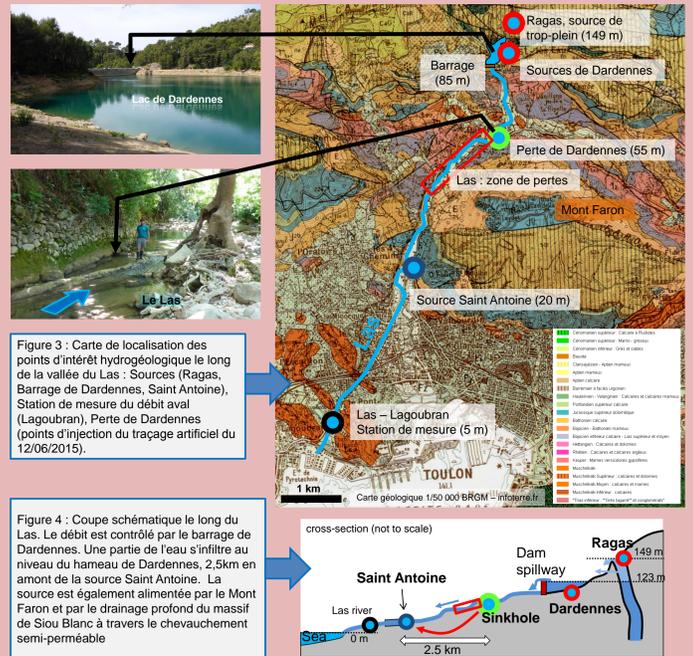


Figure 3 : Carte de localisation des points d'intérêt hydrogéologique le long de la vallée du Las : Sources (Ragas, Barrage de Dardennes, Saint Antoine), Station de mesure du débit aval (Lagoubran), Perte de Dardennes (points d'injection du traçage artificiel du 12/06/2015).

Figure 4 : Coupe schématique le long du Las. Le débit est contrôlé par le barrage de Dardennes. Une partie de l'eau s'infiltrait au niveau du hameau de Dardennes, 2,5km en amont de la source Saint Antoine. La source est également alimentée par le Mont Faron et par le drainage profond du massif de Siou Blanc à travers le chevauchement semi-perméable.

## Test hydraulique : interprétation des données de pression et de conductivité électrique

## Résultats

## Traçage artificiel : mesures en continu et correction des perturbations en crue

### Mise en œuvre sur le terrain

Durant une période sans pluie, le débit du Las est contrôlé par les vannes du barrage, permettant ainsi de maintenir un débit constant durant plusieurs jours. Trois tests à débit constant sont enchaînés. Une sonde CTD (Conductivité électrique, Température, Niveau d'eau) enregistre au pas de temps 15 minutes les mesures à la source Saint Antoine. La conductivité électrique du Las est constante durant tout le test, égale à 524µS/cm. L'écart est suffisamment important avec la valeur initiale de la source Saint Antoine (606µS/cm) pour qu'une variation de 1µS/cm soit caractéristique d'une variation de proportion de mélange d'eau à la source.

### Mise en œuvre sur le terrain

Un traçage artificiel a été réalisé le 12/06/2015 à 10h35 par injection instantanée de 480g d'uranne (fluorescéine en solution) dans la perte du Las reconnue au hameau de Dardennes. Le Las est en partie détourné pour s'infiltrer dans la perte et pousser le traceur. Le suivi du traceur est assuré à la source Saint Antoine (et sur d'autres points) par des prélèvements d'eau réguliers et des mesures en continu par un fluorimètre GGUN. Le suivi CTD à la source est également réalisé. Le suivi en continu (CTD et GGUN) a démarré depuis plusieurs mois pour enregistrer les variations naturelles du bruit de fond avant le traçage.

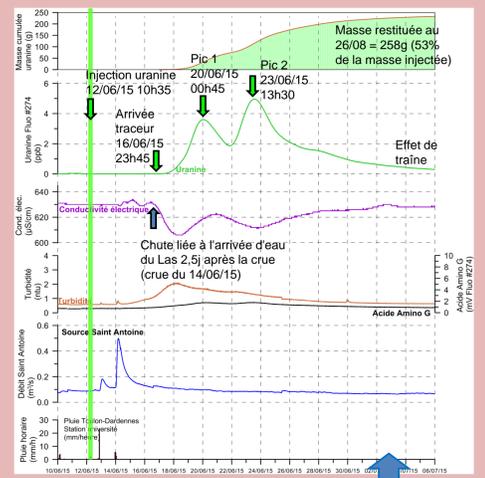


Figure 6 : Evolution au cours du temps des mesures CTD et du fluorimètre GGUN au pas de temps de 15 minutes sur la source Saint Antoine lors du traçage artificiel du 12/06/2015 à la perte du Las au hameau de Dardennes.

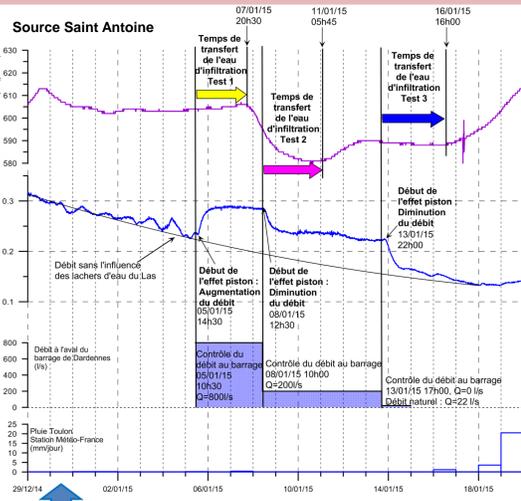


Figure 5 : Evolution de la conductivité électrique et du débit de la source Saint Antoine durant les tests hydrauliques. Les légendes sur le graphique montrent le temps de décalage entre la variation de débit dans le Las et l'arrivée de l'onde de pression (effet piston). Les flèches horizontales montrent le temps de transfert entre l'eau dans le Las et la première arrivée de l'eau d'infiltration jusqu'à la source qui est marquée par la variation de conductivité électrique.

### Résultats et interprétation

Le temps de transfert est calculé entre la variation du débit du Las (prise au barrage) et la variation de la conductivité électrique de la source. Par exemple, sur le test 1, le débit du Las augmente le 5/1/15 à 10h30 et l'eau d'infiltration de la rivière arrive à la source (diminution de la conductivité électrique par dilution de l'eau de la source) le 7/1/15 à partir de 20h30, soit un temps de 58h. L'effet piston lié à la variation de débit de la rivière est détecté à la source 4 heures après le lâcher d'eau au barrage.

L'augmentation du débit du Las engendre : (1) une augmentation du débit des pertes du Las alimentant la source, et (2) une diminution du temps de transfert entre les pertes et la source. Ces résultats montrent que le débit d'infiltration dans le lit du Las dépend de la hauteur d'eau dans le cours d'eau, et de la longueur de la zone de perte où s'infiltrait l'eau.

Le temps de réaction de la source (entre 2h30 et 5h) varie en fonction du débit d'infiltration et des conditions initiales de niveau d'eau dans le karst connecté à la source. Un écoulement karstique en zone non saturée existe sous le lit du Las et influence la propagation de l'onde de pression.

### Résultats et interprétation

L'acquisition des concentrations et l'interprétation du traçage sont perturbées par une pluie le soir de l'injection du traceur (faible crue à la source) puis une seconde pluie 2 jours après engendrant une crue significative. Les données de concentration d'uranne ont été corrigées pour tenir compte de l'arrivée d'eau plus turbide et chargée en matière organique fluorescente qui modifie la valeur du bruit de fond naturel. Cette correction utilise la relation établie entre le signal de l'uranne et de l'acide amino G du fluorimètre GGUN (exc:370nm/ém:440-540nm) sur une période d'enregistrement de plusieurs semaines avant l'expérience de traçage artificiel.

La connexion entre la perte et la source est établie en 4 jours 13 h. La courbe de restitution présente deux pics puis un effet de traîne jusqu'au 26 août 2015 (2 mois). L'eau d'infiltration sur la zone de perte du Las liée à la crue du 14/06/15 met 2,5 jours pour atteindre la source (chute de conductivité électrique), comme préalablement observé sur les tests hydrauliques de janvier 2015. Le temps de transfert du traceur artificiel est plus long, représentatif uniquement du cheminement de l'eau entre le point précis de la perte tracée et la source. L'effet de traîne montre un stockage partiel du traceur, probablement dans la zone non saturée de l'écoulement. Les deux pics sont difficilement interprétables du fait de l'origine triple de l'eau de la source et des crues en début d'expérience ; une nouvelle expérience de traçage artificiel permettrait d'étudier ce phénomène.

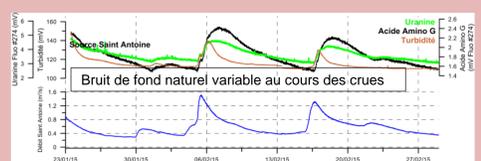


Figure 7 : Concentration en uranne brute (correction sur la turbidité uniquement) et réelle avec une correction supplémentaire utilisant le signal de l'Acide Amino G du fluorimètre (GGUN Cat. 3) représentatif de la fluorescence de la Matière Organique variable en fonction des crues.

Figure 8 : Corrélation entre les variations du signal Uranne et Acide Amino G correspondant au bruit de fond naturel variable au cours des crues.

| # Test hydraulique | Débit de lâcher d'eau du barrage dans le Las | Temps de réaction de la source par effet piston | Temps de transfert de l'eau d'infiltration des pertes du Las | Débit des pertes du Las alimentant la source à la fin du test / Pourcentage par rapport au débit de la source                 |
|--------------------|--|---|--|---|
| 1                  | 800 l/s                                      | 4 heures  | 2 jours 10 h (=58 h)   | 88 l/s / 31%  |
| 2                  | 200 l/s                                      | 2 h 30  | 2 jours 20 h (=68 h)   | 58 l/s / 26%  |
| 3                  | 0 l/s  | 5 h 00  | 2 jours 23 h (=71 h)   | 0 l/s (le débit naturel de 22 l/s s'infiltrait également dans les pertes du Las mais n'est pas comptabilisé dans ces calculs) |

## Test hydraulique

## Apport de chaque méthode

## Traçage artificiel

- Investigation de l'infiltration sur la totalité de la zone de perte du cours d'eau
- Méthode simple car elle repose sur le suivi CTD facile à mettre en œuvre sur la source
- Calcul direct de la proportion du cours d'eau alimentant la source
- Reproduction de l'expérience aisée pour plusieurs conditions hydrologiques

- Relation entre une perte localisée et la source
- Mise en évidence de l'effet de traîne
- Correction nécessaire des valeurs de concentration mesurées en fonction du bruit de fond
- Faire systématiquement des mesures du traceur recherché et d'un signal représentatif de la matière organique (naturellement fluorescente) qui perturbe les résultats
- Enregistrer la fluorescence in-situ (+ CTD) sur une période sans traceur artificiel pour connaître les variations du bruit de fond naturel.

Remerciements : Le suivi hydrogéologique de la source Saint Antoine est réalisé dans le cadre du projet DARDENNES, financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, VEOLIA et la ville de Toulon. Le traçage artificiel de la perte du Las a été conjointement réalisé avec l'étude préalable de la source Saint-Antoine pour la définition des périmètres de protection menée par M. Midoun - 2M Conseil. Cette étude a bénéficié de l'aide technique de J. Jouve (doctorant au laboratoire), C.Maurel, A.Taxil, et les techniciens de Véolia au barrage de Dardennes.