



HAL
open science

Approche par traçages artificiels sur l'interfluve Cèze-Ardèche

Joël Jolivet, Jordan Ré-Bahuaud, Hervé Chapuis, Frédéric Paran, Didier
Graillot

► **To cite this version:**

Joël Jolivet, Jordan Ré-Bahuaud, Hervé Chapuis, Frédéric Paran, Didier Graillot. Approche par traçages artificiels sur l'interfluve Cèze-Ardèche. *Karstologia*, 2020, 75, pp.33 à 40. emse-02955189

HAL Id: emse-02955189

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-02955189v1>

Submitted on 8 Oct 2020

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.

Approche par traçages artificiels sur l'interfluve Cèze-Ardèche

Artificial tracing approach on the Cèze-Ardèche interfluvium

J.Jolivet¹, Jordan Ré-Bahuaud², H. Chapuis², F. Paran² et Didier Graillot²

¹UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice, email : joel.jolivet2@wanadoo.fr

²Université de Lyon, UMR EVS 5600, Mines Saint-Étienne, 158 Cours Fauriel – CS 62362, F-42023, Saint-Étienne, France, email: herve.chapuis@rieau.fr, paran@emse.fr, graillot@emse.fr

Mots clés : traçages artificiels, circulations d'eau souterraine, interfluve Cèze-Ardèche

Keywords : artificial tracing, groundwater flows, Cèze-Ardèche interfluvium

Résumé :

Plusieurs campagnes de traçage artificiel effectuées en 2014 et 2015 précisent les circulations souterraines de part et d'autre de la rivière Cèze (France, Gard) et identifient en particulier le rôle de l'interfluve Cèze-Ardèche dans un contexte géologique complexe. Des opérations de traçage antérieures avaient permis de recueillir des données importantes sur les circulations des eaux souterraines au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap et du côté du versant ardéchois sans toutefois préciser les échanges hydrauliques entre les écoulements souterrains du massif karstique et la rivière en rive gauche de la Cèze en prenant en compte les zones de perte de la rivière.

Ces nouveaux traçages à but prospectif nécessitaient un dispositif adapté à partir de l'instrumentation d'un maximum de sources, en rive droite de l'Ardèche et en rive gauche et droite de la Cèze. Le choix final se portait sur trois traceurs la fluorescéine, l'éosine et la rhodamine B. Les résultats des colorations sont essentiellement qualitatifs car obtenus à partir de fluocapteurs à base de charbons actifs avec prélèvements d'échantillons d'eau.

Les 4 campagnes de traçages cernaient les points de restitutions impactés, les temps approximatifs de transfert et ce en fonction des conditions hydrologiques.

Les traçages dans l'endokarst comme ceux de l'aven d'Orgnac et de grotte Flandin situent la limite hydrogéologique entre le bassin de la Cèze et celui de l'Ardèche en fonction des périodes de hautes eaux ou basses eaux. Les colorations des pertes du Roméjac et de la Cèze à Rohegude indiquent que les infiltrations des eaux de surface associées et les directions des écoulements souterrains sont fortement conditionnés par la présence d'un réseau structural cassant et le développement du réseau karstique.

Ces traçages réalisés dans le cadre des travaux de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) au niveau de l'interfluve Cèze-Ardèche, précisent les limites du bassin versant karstique entre ces deux rivières ainsi que les zones d'alimentation des sources situées dans le canyon de la Cèze à partir des pertes de la rivière. Cette approche s'intègre dans une démarche globale d'évaluation des échanges entre les écoulements provenant du karst et ceux de la rivière.

Abstract :

Several artificial tracing campaigns were carried out in 2014 and 2015 to clarify underground circulations on both sides of the Cèze river (France, Gard) and to identify in particular the role of the Cèze-Ardèche interfluvium in a complicated geological context. Previous tracing operations had collected important data on groundwater flows at the Mejannes-le-Clap plateau and on the Ardéchois side, but did not specify the hydraulic exchanges between the underground flows of the karst massif and the river on the left bank of the Ceze, taking into account the areas of river loss.

These new forward-looking tracings required an adapted device from the instrumentation of many sources, on the right bank of the Ardèche and on the left and right bank of the Ceze. The final choice for three tracers was: fluorescein, eosine and rhodamine B. The results of the dyes injections carried out are mainly qualitative because obtained from fluocapteurs and active coals with samples taken which allowed obtaining restitutions. The 4 tracing campaigns made it possible to better identify the points of restitution impacted, the approximate transfer times and this according to the hydrological conditions.

The results of the tracings in the endokarst (Orgnac aven and Flandin Cave) allow to locate the hydrogeological boundary between the Ceze and Ardèche basins according to periods of high or low water. Tracing of Roméjac losses and losses from the Ceze at Rochegude indicate that surface water infiltration and associated groundwater flow directions are strongly conditioned by the presence of normal faults and the development of the karst network.

The tracings carried out as part of the work of the ZABR (Rhône Basin Workshop Zone) at the Cèze-Ardèche interfluvium, allow to specify the limits of the karst watershed between these two rivers as well as the feeding areas of the springs located in the Canyon de la Cèze from the losses of the river. This artificial tracing approach is part of a comprehensive approach to assess the exchanges between karst and river flows.

Introduction : enjeux et justification de nouveaux traçages

Un traçage artificiel en milieu karstique est un des moyens pour étudier les relations hydrauliques entre un point d'injection du traceur comme les pertes en rivière, les dolines ou les avens et un ou plusieurs points de restitution comme les sources ou les piézomètres. Il s'agit de déterminer les propriétés hydrodynamiques du système karstique : réactivité, temps de transfert, échanges hydrauliques entre le massif karstique et la rivière, connexions entre conduits karstiques.

La zone d'étude a déjà fait l'objet de plusieurs essais de traçages artificiels de part et d'autre du lit de la Cèze [BRLi, 1995], sur le plateau de Méjannes-le-Clap [Pouzancré, 1971], [Fabre 1980], [Guyot, 1981], [Jolivet, 2013] et sur l'Ardèche [Cailhol 2011 et 2014]. Trois traçages avaient été déjà effectués au Nord-Ouest du site d'étude :

- 1) au niveau des pertes de la goule du Rieussec,
- 2) à l'entrée de la goule de Foussoubie.
- 3) au puits de Ronze.

Les traceurs sont respectivement ressortis à la source de la Chaire [Slama P. et al, 1974], de l'évent de Foussoubie [Cailhol D., 2014] et de la Dragonnière [FFS-SSF, 2011].

Pour le traçage de la Dragonnière de Gaud (Ardèche), deux injections à la fluorescéine et à la rhodamine B ont été réalisées avec mise en place d'un fluorimètre de terrain. Les courbes de restitution produites indiquaient des vitesses de transit limitées et confirmaient un système karstique à alimentation profonde et complexe et une zone saturée importante [Cailhol et al. 2011]. Les conclusions montrent que ce type d'exploration doit s'intégrer dans une recherche plus large sur les écoulements et les sources karstiques en rive droite de l'Ardèche.

L'ensemble de ces traçages historiques permet de mieux cerner les circulations des eaux souterraines au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap et du versant ardéchois mais n'identifie pas précisément les échanges hydrauliques entre les écoulements souterrains du massif karstique et la rivière en rive gauche de la Cèze et au Sud de la zone d'étude.

Dans la zone l'interfluve Cèze-Ardèche, s'intercale entre les deux entités du Barrémien supérieur-Aptien, le synclinal d'Issirac, orienté Ouest-Est, en partie oblitéré par des terrains paléogènes. Cette structure plissée a vraisemblablement eu un effet sur les écoulements souterrains au sein du réseau karstique qui se développe dans les formations urgoniennes. Cette formation complexifie les directions d'écoulement des eaux souterraines et donc la définition de la limite de partage des eaux entre la Cèze et l'Ardèche. Les traçages qui font l'objet de cet article, ont pour vocation d'apporter des éléments nouveaux pour définir cette limite hydrogéologique.

Concernant les pertes de la Cèze en amont des gorges karstiques, le traçage antérieur [BRLi, 1995] n'a pas fait l'objet d'un suivi sur toutes les sources de la Cèze sises au sein du canyon ainsi que d'un contrôle sur l'état hydrique réel du cours d'eau en ne tenant pas compte des infiltrations totales des écoulements superficiels. De ce fait, il était important de reprendre ce traçage dans un contexte hydrologique idéal qui consistait en une interruption du flux de la rivière d'où l'infiltration totale du cours d'eau et avec un dispositif de suivi le plus complet possible.

Les objectifs de ces nouveaux traçages prospectifs sont donc multiples :

- préciser les relations hydrauliques potentielles entre les zones de pertes de la Cèze et les sources en aval dans les gorges de la Cèze en particulier en rive gauche.
- connaître les propriétés hydrodynamiques du système karstique comme la réactivité, le temps de transfert, la dispersion et la relation entre conduits karstiques.
- mettre en évidence les échanges entre les eaux du karst et celles de la rivière.

1. Bilan des traçages historiques réalisés sur la Cèze avant 2014

Cette section présente une synthèse des principaux traçages réalisés avant 2014. L'ensemble de ces opérations est récapitulé dans la thèse d'H. Chapuis [Chapuis 2017].

Les colorations historiques ont été réalisées pour les principales sources en rive droite de la Cèze (Fées, Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide-froide). Par ordre chronologique, on recense les traçages suivants (Carte 1):

- Traçage des pertes de Rochegude et restitution à la source du Moulin en rive droite et aux sources de Font Canet, de Monteil et des Baumes en rive gauche en 1995 [BRLi, 1995]
- Traçage des pertes de Baumes Salène sur la Cèze [Guyot 1981]

- Coloration de l'aven de l'Agas [Fabre 1980] et de l'aven des Papés [Jolivet 1992] pour l'étude du bassin d'alimentation de la source des Fées.
- Coloration dans l'aven du Solitaire pour l'étude du bassin d'alimentation de la source de Force Mâle [Jolivet 1994].
- Colorations dans les avens du plateau de Méjannes-le-Clap entre 1969 et 1981 pour l'étude du bassin d'alimentation de la source de Marnade [Pouzancré 1971], [Fabre 1980], [Guyot 1981] [Jolivet 2013],
- Injection dans les pertes de l'Aiguillon [Pouzancré 1971] et du Merderis [Jolivet 2013], pour l'étude du bassin d'alimentation des sources de Goudargue et Bastide Froide.

En rive gauche de la Cèze, plusieurs interrogations restaient en suspens car l'extension des formations urgoniennes est plus faible que celle du plateau de Méjannes-le-Clap.

- Se posait alors la question de l'extension des bassins d'alimentation des sources de Font Canet, Monteil et des Baumes. En effet, ces sources ont une part d'alimentation qui ne provient pas de la rivière Cèze. Quelle est la contribution réelle du karst?
- Ensuite, celle des relations entre la Cèze et l'Ardèche pour laquelle plusieurs hypothèses restent possibles:
 - 1) Celle d'une ligne de partage des eaux entre le bassin versant karstique de la Cèze avec ses sources en rive gauche et celui de l'Ardèche avec ses sources en rive droite. Dans ce cas, le synclinal d'Issirac doit jouer un rôle hydraulique encore inconnu.
 - 2) Le principe qu'une partie des débits des pertes de la rivière Cèze alimente les sources de l'Ardèche. Le suivi simultané des écoulements des sources en rive gauche de la Cèze en amont et en aval des pertes lèvera probablement cette incertitude.
 - 3) La supposition d'un fonctionnement mixte qui dépendrait de l'état hydrique du karst. Avec en situation de hautes eaux, la vérification de la première hypothèse et en situation de basses eaux la seconde.

Ces interrogations ont permis d'orienter l'organisation et la planification des nouvelles opérations de traçages.

2. Méthodologie et protocole des traçages réalisés en 2014-2015

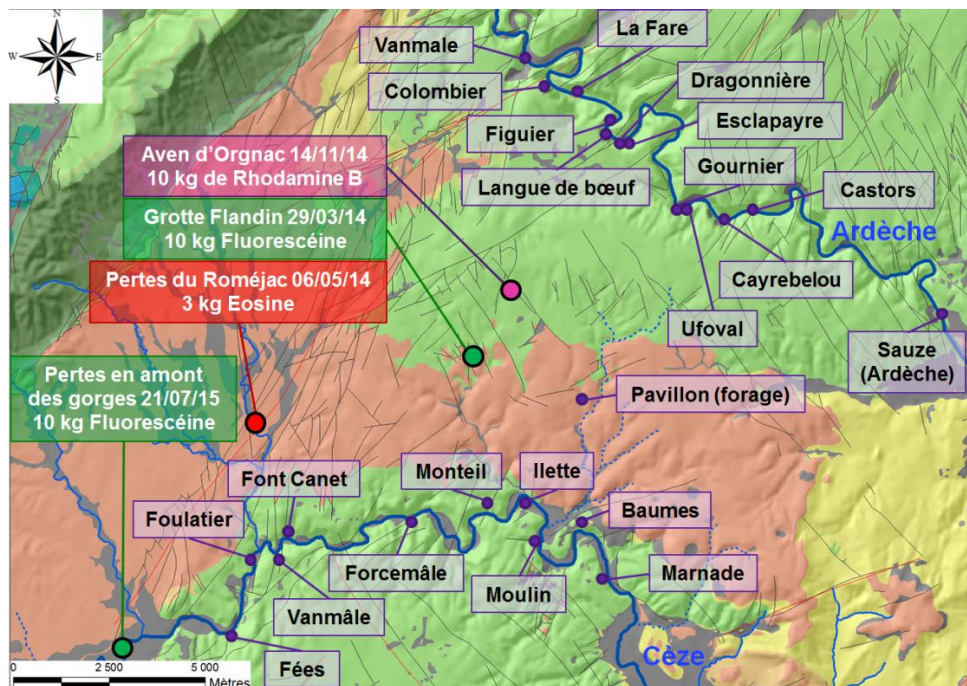
La méconnaissance des circulations souterraines à l'interfluve Cèze–Ardèche nécessitait une recherche sur carte et sur le terrain pour sélectionner des points d'injections favorables. Dans la mesure du possible, le suivi de la restitution des traceurs était assuré de manière quantitative. Cependant, les difficultés liées au terrain étaient multiples et ne permettaient pas toujours un tel suivi. En effet, il s'agissait de composer avec :

- L'accessibilité aux sources :
C'est le cas de la plupart des sources du versant ardéchois, qui ne sont atteignables qu'en canoë lorsque les conditions de débit de l'Ardèche le permettent.
- La nature de l'émergence karstique:
En effet, certaines sources, comme celle des Castors, émergent sous ou au niveau de la cote altimétrique de la rivière Ardèche. Pour cette situation, les plongeurs ont disposé des fluocapteurs en remontant la source sur plusieurs centaines de mètres pour éviter le plus possible l'influence de l'eau de la rivière.
- Le risque de dégradations diverses et/ou vandalisme:

Sur les quatre fluorimètres de terrain installés, trois ont vu leurs câbles sectionnés par les castors.

2.1. Dispositif de suivi

La prospection des écoulements souterrains par traçages artificiels nécessite d'équiper un maximum de sources, en rive droite de l'Ardèche et en rive gauche et droite de la Cèze. Chaque émergence accessible est équipée à minima de plusieurs fluocapteurs. Ce dispositif de suivi comptabilise 12 sources au niveau de l'Ardèche, 1 forage, 14 sources au niveau de la Cèze et quelques points de contrôle le long du lit de la rivière Cèze afin de vérifier d'éventuels apports diffus. Les points de suivi et d'injection sont représentés pour la majeure partie sur la carte 1.



Carte 1: Situation géographique des points de suivi
Location of monitoring points

La configuration de certaines sources en bordure directe de la Cèze et certaines crues rendent difficile un suivi avec des fluorimètres ou des préleveurs automatiques. Plusieurs moyens analytiques ont été mobilisés pour la détection des traceurs dans les eaux et sur les fluocapteurs. : un colorimètre WPA CO 7500 et un Fluorimètre/Turbidimètre Aquafluor® à 2 canaux Fluorescéine/Rhodamine (limite de détection à 0,4 ppb). Pour plus de précision, les échantillons ont également été analysés au laboratoire Sciences Environnement à Besançon qui dispose d'un spectromètre de luminescence (Perkin Elmer-LS 50 B) et des éluants spécifiques pour identifier précisément les différents colorants même en cas de mélange (multitraçage).

Pour ce dernier type de matériel, la limite de détection de la fluorescéine est de 0,02 ppb. La mesure de fluorescence s'effectue par la technique du double balayage synchronisé (synchroscan) qui est considérée actuellement comme la méthode standard la plus adaptée pour l'analyse des composés fluorescents dans le domaine des traces, comparativement au fluorimètre à filtre trop peu sélectif et trop peu sensible [Schudel et al., 2002]. L'identification des colorants peut s'effectuer directement sur échantillons d'eau, ou pour certains composés fluorescents, sur charbon actif.

La visualisation de l'ensemble du spectre permet de mieux apprécier la qualité de l'analyse et notamment de constater si la matière organique adsorbée par les charbons activés n'occulte pas l'identification du traceur. En effet, pour la MO, le maximum d'intensité d'émission après excitation se situe aux alentours de 400 nm (violet/bleu). Le choix des traceurs dont le pic d'émission est éloigné de celui de la matière organique est privilégié.

2.2. Choix des traceurs (qualité et quantité):

Le Tableau 1 présente les caractéristiques détaillées des 4 injections.

Points d'injection	XL93(m)	YL93(m)	ZL93(m)	Objectif de caractérisation	Situation hydrologique	Date d'injection	Contexte d'injection	Contexte géologique	Traceur	Quantité injectée	Eau ajoutée (m ³)
Grotte Flandin	811988	6357335	125	Répartition des eaux entre BV Cèze et Ardèche	Hautes eaux, fin de décrue, début tarissement	29-mars-14	Endokarst (ruisseau souterrain à -100m)	Crétacé (Urgonien)	Fluorescéine (Uranine)	15	0
Roméjac	805906	6355259	119	Où sont redistribuées les eaux de perte du Roméjac	Basses eaux	19-mai-14	pertes du ruisseau	Contact crétacé/tertiaire	Eosine	3	0
Avend'Ornac (Salle Rouge)	812602	6358892	155	Répartition des eaux entre BV Cèze et Ardèche	crues, hautes eaux	11-nov-14	Endokarst (siphon -150m)	Crétacé (Urgonien)	Rhodamine B	10	70
Cèze au pont de Rivières	801708	6349300	111	Restitution des pertes de la Cèze	Basses eaux	21-juil 15	Infiltration totale de la Cèze en entrée des gorges	Alluvions de la Cèze sur Urgonien	Fluorescéine (Uranine)	10	0

Tableau 1: Caractéristiques des injections de traceurs réalisées en 2014-2015
Characteristics of tracer injections performed in 2014-2015

Les traceurs ont été choisis à partir des recommandations formulées dans [Schudel et al.2002]. Les critères qui ont guidé le choix des traceurs sont, par ordre d'importance, les suivants :

- Compatibilité du multitraçage (spectres excitation / émission bien distincts) ;
- Compatibilité avec le matériel d'analyse de terrain disponible (Fluorimètre Aquafluor®) ;
- Spectre de réémission éloigné de celui de la MO ;
- Facilité d'utilisation ;
- Quantification aisée avec limite de détection basse ;
- Absorption avec le milieu la plus faible possible ;
- Stabilité chimique ;
- Innocuité pour les êtres vivants (sauf pour la Rhodamine) ;
- Bonne solubilité ;
- Coûts peu élevés.

Le choix final s'est porté sur trois traceurs la fluorescéine, l'éosine et la rhodamine B. Chacun répond aux critères fixés précédemment, sauf pour la rhodamine B qui peut représenter une toxicité en cas de présence de nitrites dans l'eau. Parmi ces trois traceurs, seule la rhodamine B n'a pas fait l'objet d'étude sur sa génotoxicité et son écotoxicité. Pour l'homme et les écosystèmes, les trois traceurs utilisés ont un niveau de risque faible à modéré [Field et al., 1995].

La quantité de traceur a été définie de manière empirique à partir des retours d'expériences sur les opérations antérieures de coloration. Les quantités utilisées correspondent à 1 kg de traceur pour 1 km de transfert dans le milieu souterrain. Elles sont pondérées suivant les limites de détection du colorant sélectionné et le type d'injection.

2.3. Prise en compte des conditions météorologiques:

La situation hydrologique avant le traçage de la grotte Flandin correspondait à une période de hautes eaux. Cependant, lors de l'injection, la fin de décrue évoluait rapidement vers un tarissement, suivi d'une situation de quasi-étiage pendant la période de restitution. Après l'injection, la quantité d'eau précipitée était particulièrement faible ne facilitant pas le transfert du traceur.

Le manque de pluie entre avril et juin 2014 provoquait l'assèchement du Roméjac, affluent de la Cèze, et permettait ainsi l'injection au niveau des pertes du ruisseau. Le traçage de la Salle Rouge de l'Aven d'Orgnac correspondait à une période où les cumuls de pluie étaient particulièrement abondants (tableau 2).

<i>Point d'injection</i>	<i>Période entre l'injection et la sortie du traceur</i>	<i>Cumul des précipitations</i>
<i>Grotte Flandin</i>	<i>Janvier – février – mars 2014</i>	<i>469 mm</i>
<i>Pertes du Roméjac</i>	<i>Avril – mai – juin 2014</i>	<i>99 mm</i>
<i>Aven d'Orgnac</i>	<i>mi-octobre 2014 à mi-février 2015</i>	<i>570 mm</i>
<i>Pertes de la Cèze à Rochegude</i>	<i>Juillet – août – septembre 2015</i>	<i>76 mm</i>

*Tableau 2 : Quantité d'eau précipitée au cours des traçages
Quantity of water precipitated during tracing*

Les précipitations ont été enregistrées à partir de 2 pluviographes à volume compensé (CNRS - UMR 7300 ESPACE) installés sur le plateau de Méjannes-le-Clap et sur l'interfluve Cèze-Ardèche.

3. Résultats des traçages et interprétation

3.1. Traçage de la grotte Flandin

Le premier traçage colorimétrique avec 10 kg de fluorescéine se déroule le 29/03/14 au niveau du point bas de la grotte Flandin situé à - 120 m, soit une altitude de 125 m NGF. (photo 1). Cette cavité se positionne entre la Cèze à la bordure Nord du synclinal d'Issirac.

L'injection a lieu dans l'actif endokarstique dont le débit a été estimé entre 5 à 10 L/min. Un dispositif de suivi de restitution du traceur est installé au niveau de sources tant du côté Ardèche que du côté Cèze. Le suivi s'effectue avec des fluorimètres de terrain couplés à des fluocapteurs renouvelés régulièrement et aussi avec des prélèvements ponctuels d'eaux.

Le colorant est décelé moins d'un mois après l'injection côté ardéchois à la source des Castors le 28/04/14. Il réapparaît huit mois après injection du côté Cèze à la source de Monteil, les 18, 21, 26/11/14 ainsi que les 05 et 11/12/14 avec des traces au niveau du forage du Pavillon sur un fluocapteur relevé le 18/02/15. (figure 1). Il est fort probable qu'une partie de la fluorescéine ait été stockée au sein de la masse carbonatée puis remobilisée à la faveur d'une remise en charge du karst liée à un fort épisode pluvieux. La relation hydraulique entre la grotte Flandin et le bassin de l'Ardèche a donc été clairement établie.

Le traceur a affecté à la fois le versant ardéchois en situation de moyennes et basses eaux et le versant gardois en situation de hautes eaux. On peut en déduire un fonctionnement hydrogéologique particulier. Pour une même longitude, la cote altimétrique de l'Ardèche est plus faible que celle de la Cèze induisant un delta d'altitude d'environ 20 m. (figure 2). Dans sa dynamique actuelle de creusement, on peut supposer que l'Ardèche est sur le point d'étendre son bassin versant hydrogéologique et de « capturer » peu à peu celui de la Cèze. Les anciens conduits karstiques étant initialement orientés en direction de la Cèze, évoluent actuellement en direction de l'Ardèche.



*Photo 1: Injection de 10kg de fluorescéine dans la grotte Flandin le 29mars 2014 (photo: GASOIL)
Injection of 10 kg of fluoresceine into Flandin Cave on March 29, 2014 (photo: GASOIL)*

Analyse réalisée sur le fluocapteur de « MONTEIL » du :

- 18/09/14 —
- 22/09/14 —
- 18/11/14 —
- 21/11/14 10h00 —
- 26/11/14 —
- 05/12/14 —
- 11/12/14 —

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

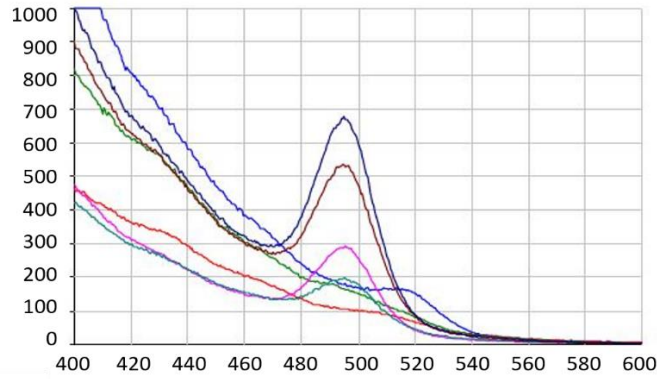


Figure 1: Restitution du traçage de la Grotte Flandin à la source de Monteil
 Analyse des fluocapteurs – résultat du spectre de fluorescence
 (en abscisse nanomètres, en ordonnée: concentration en ppb)
 (laboratoire Sciences et Environnement)

Restitution of Flandin cave tracing at the Monteil spring
 Analysis of fluorescence sensors- result of fluorescence spectrum
 (concentration in ppb versus wavelength in nanometers)

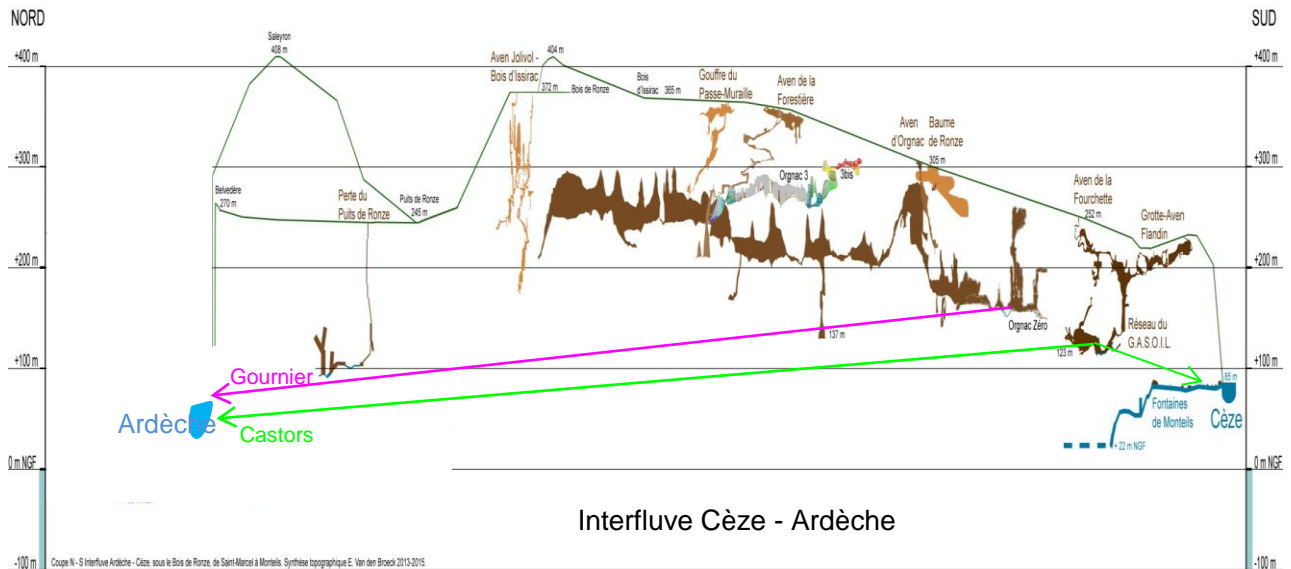


Figure 2: Coupe schématique de l'interfluve Cèze/Ardèche, essai d'interprétation des écoulements souterrains. En fonctionnement hydrologique moyennes eaux et basses eaux, possibilité de circulation vers le bassin versant ardéchois.

En hautes eaux, la mise en charge provoque la recirculation dans des paléo-conduits karstiques.
 (coupe réalisée par Erik Van Den Broeck)

Schematic cut of the Cèze/Ardèche interfluve, test of interpretation of underground flows. In medium and low hydrological flow conditions, possibility of circulation to the Ardèche watershed. In high waters the loading of the karst network causes recirculation in karst paleo-conduits

3.2. Traçage des pertes du Roméjac

Une deuxième coloration avec 3 kg d'éosine s'effectue le 06/05/2014 légèrement en amont des pertes du Roméjac, un affluent de la Cèze, l'eau en aval du ruisseau ne coulant plus jusqu'à sa confluence avec la Cèze (photo 3).

La restitution du traceur est suivie au niveau des sources de Foulatier, de Font Canet, de Monteil et des Baumes. La surveillance se fait à l'aide de fluocapteurs renouvelés régulièrement et de prélèvements ponctuels d'eaux. Le traceur est retrouvé aux sources de Monteil et des Baumes le 10 et le 16/06/2014, soit plus d'un mois après l'injection.

Ce résultat implique que les eaux de ces exutoires ne sont pas seulement alimentées par les eaux de pertes de la Cèze et celles du karst provenant des aires d'alimentations de faibles extensions en rive gauche de la Cèze, mais aussi par les eaux infiltrées au niveau des pertes jalonnant les cours d'eau qui s'écoulent à l'ouest du fossé d'Alès.



*Photo 2 : traçage des pertes du Roméjac (photo: H.Chapuis)
Tracing Roméjac's losses*

3.3. Traçage de la Salle Rouge de l'Aven d'Orgnac

Un troisième traçage à l'interfluve Cèze-Ardèche est effectué le 14/11/2014 à l'Aven d'Orgnac situé à 2 km au NE de la grotte Flandin. Il a lieu à lors d'explorations spéléologiques qui avaient pour but de désamorcer le siphon de Salle Rouge localisé à - 150 m de profondeur par rapport au niveau de l'entrée naturelle de l'aven, soit à une altitude de 155 m NGF. Ces travaux nécessitent la mise en œuvre de pompages pour extraire les eaux du conduit noyé. L'injection de 10 kg de rhodamine B au point bas du déversoir dans la galerie, est accompagnée de 70 m³ d'eau issue du pompage. Le siphon ne collecte qu'un petit actif temporaire qui coule seulement lors de précipitations prolongées (photo 3).

Le suivi consiste à l'installation de fluocapteurs renouvelés régulièrement et des prélèvements ponctuels d'eaux. Le traceur réapparaît moins d'une semaine après l'injection côté ardéchois à la source de Gournier les 20, et 24/11/2014 puis le 01/12/2014. Il semble que le colorant n'ait pas impacté d'autres sources tant sur le versant ardéchois (sources des Castors et de la Dragonnière), que sur le versant Cèze (sources des Baumes et de Monteil) (Figure 2).

Cependant le suivi côté Cèze n'a pas été poursuivi au-delà du 11/12/14 du fait de la disparition des fluocapteurs de la source de Monteil.



Photo 3: Injection de 10kg de rhodamineB dans le déversoir de la Salle Rouge de l'aven d'Orgnac le14 novembre2014 (photo:SoniaLiska)

Injection of 10 kg of rhodamine B in the Salle rouge of the Aven of Orgnac on November 14, 2014

3.4. Traçage des pertes de la Cèze en amont des gorges karstiques

La coloration se réalise le 21/07/2015 à 0h00 par une injection de 10 kg de fluorescéine au niveau du pont de la commune de Rivières à une centaine de mètres en amont des pertes de Rochegude (photo 4). Le débit de la Cèze est mesuré à 512 L/s en amont des pertes et 0 L/s au pont de Tharoux distant de 1.2km en aval.

Les fluocapteurs sont disposés au niveau des sources des Fées, de Vanmâle, de l'Ilette, du Moulin, d'Ussel, de la Fabrique et de Bastide Froide en rive droite de la Cèze et des sources de Foulatier, de Font Canet, du Travers, de Monteil et des Baumes en rive gauche de la rivière. Plusieurs points de contrôle sont répartis sur cette dernière. Le fluorimètre disposé au niveau de la source de Font Canet, a malheureusement dysfonctionné. Des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau complètent le suivi.

La première restitution apparaît le 30/07/2015 à la source de Font Canet, soit 9 jours après. Elle se prolonge durant 26 jours, le pic de concentration étant mesuré 17 jours après l'injection. Le colorant est détecté à la source Monteil à partir du 24/08/2015, soit 34 jours plus tard. Ce résultat est confirmé par une série de prélèvements jusqu'au 02/09/2015.

Le dernier exutoire impacté, mais à l'état de traces, est celui des Baumes le 27/08/2015 soit 37 jours après l'injection. Les charbons présentent des traces à deux autres reprises à la source Baumes, les 31/08/2015 et 02/09/2015. Bien que les résultats soient qualitatifs, il est possible d'observer un fort gradient de dilution des sources de Font Canet, de Monteil et des Baumes. La concentration en traceur passant ainsi de 58% à Font Canet, puis à 31% à Monteil pour finir à 24% aux Baumes, l'eau du karst provenant des terrains du Barrémien supérieur en parti oblitérés par les formations paléogène du synclinal d'Issirac. Comme attendu, les sources de la rive droite ne sont impactées par le traçage.



*Photo 4 : Injection de 10kg de fluoresceïne dans la Cèze, au pont de Rivières soit 500m environ en amont de la coupure des écoulements superficiels, le 21 juillet 2015 à 00h00
(photos: Jordan Ré-Bahuaud)*

Injection of 10 kg of fluoresceine into the Ceze, at the River Bridge or about 500 m upstream of the cut of surface discharge, On July 21, 2015 at 00:01

La localisation des pertes de Rochegude à l'amont des gorges est liée à l'existence de la faille de Barjac d'orientation NE-SO suite à l'ouverture du fossé d'Alès à l'Oligocène à partir de laquelle de nombreuses structures cassantes satellites de même direction recoupent le bedrock de la rivière et permettent aux eaux superficielles de s'infiltrer et de circuler.

4. Discussion : regard sur les traçages réalisés en 2014-2015 :

Les colorations de l'aven d'Orgnac et de la grotte Flandin montrent l'appartenance des eaux de l'aquifère karstique au versant de l'Ardèche. Il y a une cohérence spatiale (groupement de sources aval) et temporelle (quelques semaines après l'injection) du signal enregistré sur le bassin versant de l'Ardèche. Cette observation semble confortée par les traçages de l'aven d'Orgnac et de la grotte Flandin dont les restitutions sur le versant ardéchois sont établies.

La critique des résultats porte essentiellement sur le mode opératoire des traçages dits de reconnaissance, exploratoires ou prospectifs qui ne concluent que de façon binaire sur la présence ou non de colorant. En effet, seuls des fluocapteurs ou charbons actifs ont été utilisés pour assurer le suivi du traceur. Il est impossible de réaliser un bilan de masse pour connaître le taux de restitution du traceur. Il est cependant parfois possible d'apprécier de manière relative une augmentation ou une diminution de la restitution des charbons actifs si ceux-ci sont relevés de manière régulière, s'ils sont disposés de la même manière le long d'une même ligne d'écoulement et que le débit de l'émergence ne varie pas pendant la durée de la restitution. Le temps correspondant au passage du maximum de concentration à l'exutoire n'est pas connu. Les temps des premières arrivées du traceur sont approximatifs et dépendent de la fréquence de renouvellement des fluocapteurs.

La technique utilisée pour ces traçages présente donc certains avantages mais aussi des inconvénients:

+ Avantages :

- Elle est adaptée pour connaître les grandes directions des écoulements souterrains ;
- Les nombreux traceurs permettent de réaliser plusieurs traçages artificiels sans attendre que le réseau karstique soit complètement lavé du dernier traceur utilisé ;
- Elle renseigne sur l'étendue des bassins d'alimentation des sources.

- Inconvénients :

- Difficultés pour estimer la répartition des volumes d'eau qui transitent en souterrain lorsque plusieurs sources sont alimentées par une même zone d'infiltration ;
- Risque de pollution des fluocapteurs et nécessité de multiplier les échantillons ;

Afin d'avoir le meilleur suivi possible, chaque source devrait être équipée d'un fluorimètre de terrain mais une telle instrumentation est difficile à mettre en œuvre pour un terrain d'étude comportant plus d'une quinzaine de sources pas toujours facilement accessibles.

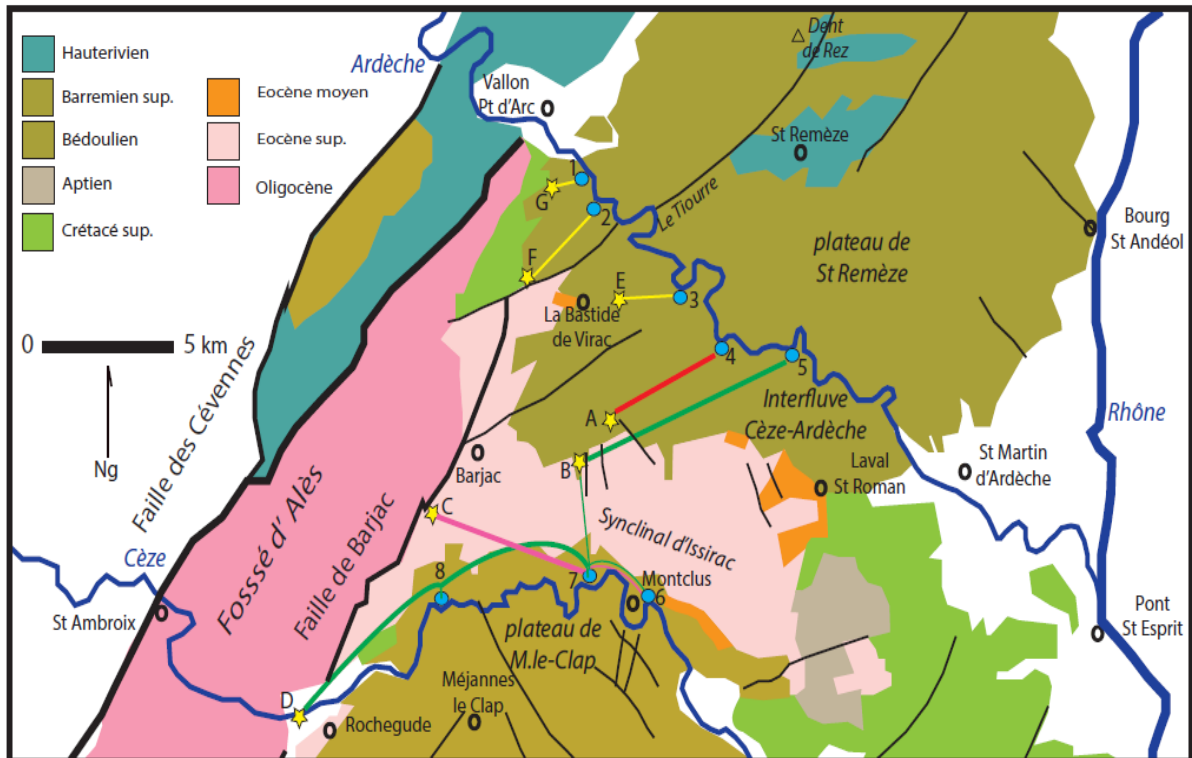
5. Conclusion et perspectives:

Les 4 campagnes de traçages effectuées en 2014 et 2015 ont été conduites dans un but prospectif. Elles ont permis de mieux cerner les points de restitutions impactés, les temps approximatifs de transfert et ce en fonction des conditions hydrologiques.

Les traçages artificiels dans l'endokarst (aven d'Orgnac et grotte de Flandin) permettent de situer la limite hydrogéologique entre le bassin de la Cèze et celui de l'Ardèche. Le traçage de la grotte Flandin met en évidence un écoulement préférentiel souterrain en direction de l'Ardèche en basses eaux. Cette circulation se fait sans doute toujours en hautes eaux mais à la faveur de drains karstiques remis en charge, les écoulements souterrains de la grotte Flandin prenant alors la direction de la source Monteil du côté Cèze. Ce phénomène conduit à faire l'hypothèse d'une variation spatiale et temporelle de la limite hydrogéologique entre le bassin de la Cèze et celui de l'Ardèche en supposant que l'Ardèche accroît son bassin hydrogéologique aux dépens de celui de la Cèze par sa dynamique de surcreusement.

Les traçages des pertes du Roméjac et des pertes de la Cèze à Rohegude impliquent que les infiltrations des eaux de surface et les directions des écoulements souterrains associés sont fortement conditionnées par la présence d'un canevas structural faillé de grande importance et le développement du réseau karstique.

Les traçages de l'aven d'Orgnac et de la grotte Flandin confirment donc les écoulements préférentiels des aquifères karstiques vers l'Ardèche tandis que les colorations des pertes du Roméjac et de Rohegude indiquent une alimentation du côté Cèze bloquée par un seuil hydrologique peut être situé au sud du synclinal d'Issirac.



Légende:

G --- 1	goule du Rieussec - source de la Chaire	F --- 2	goule de Foussoubie - évent de Foussoubie
E --- 3	puits de Ronze - évent de la Dragonnière	A --- 4	aven d'Orgnac - évent de Gournier
B --- 5	grotte Flandin - source des Castors	C --- 6 et 7	perle du Romejac - sources de Monteil et des Baumes
D --- 6,7 et 8	perles de Rochegude - sources de Canet, Monteil et les Baumes		

Carte 2: Synthèse des résultats des traçages réalisés

Les lettres A à G représentent les points d'injection et les chiffres 1 à 8 les points de sortie du traceur

Summary of the results of the tracer tests carried out

The letters A to G represent the injection points and the numbers 1 to 8 the exit points of the tracer

Sur la carte 2, les lettres en capitale représentent la localisation des points d'injection : A : aven d'Orgnac, B : Grotte Flandin, C : pertes du Romejac, D : pertes de Rochegude, E : puits de Ronze, G : Goule du Rieussec et F : Goule de Foussoubie, Les chiffres représentent la localisation des points de sortie du traceur qui sont pour la plupart des sources : 1 : source de la Chaire, 2 : évent de Foussoubie, 3 : évent de la Dragonnière, 4 : évent de Gournier, 5 : source des Castors, 6 : source des Baumes, 7 : source de Monteil. Les traits de couleur différente sont associés aux différentes campagnes de traçage.

La réalisation de traçages, dans le cadre des travaux de la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) [Ré-Bahuaud et al., 2015] au niveau de l'interfluvium Cèze-Ardèche, indique certaines limites du bassin versant karstique entre ces deux rivières.

Suite à ce travail prospectif, il conviendrait d'ajuster le protocole de traçage en envisageant, du côté Ardèche, un suivi quantitatif sur un nombre plus restreint de sources (Dragonnière, Castors et Gournier). Il pourrait être également intéressant de prospecter plus à l'aval de la source des Castors à la recherche d'éventuels points de restitution supplémentaires.

Du côté Cèze, il serait intéressant de compléter la connaissance des circulations souterraines à partir du plateau de Méjannes-le-Clap et d'identifier une éventuelle diffluence des écoulements souterrains en direction des sources de la rive droite. Dans des conditions hydrologiques favorables de moyennes ou hautes eaux, d'autres traçages permettraient aussi d'explorer d'éventuelles directions d'écoulement souterrain vers l'est de la zone d'étude à partir du secteur situé plus au sud au niveau de la commune de Lussan (pertes de l'Avègue), le suivi de ces traçages se faisant à l'aide de fluorimètres de terrain et de prélèvements d'échantillons d'eau régulièrement relevés.

Cette approche par traçages artificiels s'intègre dans une démarche globale d'évaluation des échanges entre les écoulements provenant du karst et ceux de la rivière. Cette démarche fait appel à d'autres métriques hydrologique, hydrogéochimique thermique et biologique qui sont complémentaires des traçages artificiels et qui font l'objet des autres articles dans cette revue.

Bibliographie :

BRLi (1995) - Analyses des soutiens d'étiage de la Cèze. Rapport au syndicat mixte d'aménagement et de développement touristique du Pays de Cèze. BRLi, p. 41.

CAILHOL D., JAILLET, S ARNAUD J (2011). Observations topographiques, géomorphologiques et hydrologiques de la Dragonnière de Gaud (Ardèche). Conference Paper, Conference Rencontre d'Octobre SCP 2011, At Saint-Robert (France), October 2011, 19 p.

CAILHOL D. (2014) Observations hydrologiques du système karstique de Foussoubie, bulletin Tubes n° 28 (CDS 07), p.72.

CHAPUIS H. (2017) Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières - Application à la Cèze (Gard-France), thèse de Doctorat de l'Université de Lyon, 402 p.

FABRE, G., 1980. Les karst du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques (Mémoire + 15 planches et 6 cartes No. n°2). AFK.

FIELD, M.S., WILHELM, R.G., QUINLAN, J.F., ALEY, T.J., 1995. An assessment of the potential adverse properties of fluorescent tracer dyes used for groundwater tracing. *Environmental Monitoring and Assessment* 38, 75–96. doi:10.1007/BF00547128.

FFS-SSF (2011)- L'opération OSEE, Spélunca n°121, 2011, 10 -22.

GUYOT, J.-L., (1981). La coloration du système Baume Salène - Résurgence du Moulin (Montclus, Gard), *Bulletin du Groupe Spéléo Bagnols Marcoule* 30–34.

GUYOT, J.-L., (1986). Etude hydrogéologique des Baumes – *Bulletin du Groupe Spéléo Bagnols Marcoule*, 12, 59-76.

JOLIVET J.; (1992). Aven des Papés, bulletin GSBM n°14, 15-24.

JOLIVET J.; (1994) Aven du Solitaire, bulletin GSBM n°15, 25-30.

JOLIVET, J., (2013) . Nouveaux apports sur les traçages et les débits réalisés sur le bassin d'alimentation karstique de la bordure orientale du massif de Lussan - Spélunca n°129, 27- 34.

POUZANCRE, H., 1971. Contribution à l'étude hydrogéologique des bassins d'alimentation de la Cèze cours moyen et inférieur, Gard. Centre d'études et de recherches géologiques et hydrogéologiques.

RE-BAHUAUD, J., JOLIVET, J., MARMONIER, P., JOHANNET, A., GRAILLOT, D., PARAN, F., CHAPUIS, H., GUY, B., FAROUX, J., CREUZE DES CHATELLIERS, M., OLIVIER, M.-J., JACQUY, M., LAWNICZAK, M., NOVEL, M., SAVARY, M., SALZE, D., VAYSSADE, B., 2015. Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique. Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30). Rapport provisoire année 2 (2014-2015) (Action n°43 du Programme 2014(action 49 en 2015) au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR).

SCHUDEL B., BIAGGI D., DERVEY T., KOZEL R., MULLER I., ROSS J.H.,

SCHINDLER U. (2002). Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Guide pratique. Série Géologie, Rapport n°3, Berne 87 p.

SLAMA P., CHEILLETZ E., LOMBARD J.J., ZMUDA M., OTT D'ESTEVOU P., CHOCHOD D. (1974) Goule du Rieussec - Grotte de la Chaire. Compte rendu d'analyses géologiques. Synthèse Rieussec Chaire, Les Nouvelles du M.A.S.C. n°7, Montélimar Archéo Spéléo Club, 48p.

Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur participation aux traçages : le Groupement Associatif de Spéléologues d'Orgnac-L'Aven, Issirac et Labastide-de-Virac « Gasoil ».