



HAL
open science

Suivi hydrologique des sources karstiques et de la rivière Cèze

Hervé Chapuis, Jordan Ré-Bahuaud, Joël Jolivet, Frédéric Paran, Yvan
Pascoletti

► **To cite this version:**

Hervé Chapuis, Jordan Ré-Bahuaud, Joël Jolivet, Frédéric Paran, Yvan Pascoletti. Suivi hydrologique des sources karstiques et de la rivière Cèze. *Karstologia*, 2020, 75, pp.17 à 24. emse-02961860

HAL Id: emse-02961860

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-02961860v1>

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.

Suivi hydrologique des sources karstiques et de la rivière Cèze

Hydrological monitoring of karst springs and the Cèze river

¹H. Chapuis, ¹J. Ré-Bahaud, ²J. Jolivet, ¹F. Paran, ¹Y. Pascoletti

¹Université 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, yvan.pascoletti@emse.fr

²Université de Nice, UMR Espace, email : joel.jolivet2@wanadoo.fr:

Mots clés : monitoring hydrologique, mesure de débits de sources, karst, rivière Cèze

Keywords : Hydrological Monitoring, Springs Discharge Measurement, Karst, Cèze river

Résumé

Cet article a pour but de présenter les résultats du suivi hydrologique du bassin de la rivière Cèze dans sa zone calcaire à partir d'un protocole fondé sur la synchronisation des mesures de débit dans la rivière avec celles des sources. Il s'agit de comprendre le fonctionnement de la rivière et des sources karstiques et de déterminer leur part contributive au débit de la Cèze. Quatorze stations ont été équipées de sondes LTC (Hauteur, Température et Conductivité) : 11 sondes à chacune des 11 sources et 3 sondes en rivière.

Préalablement, un profil en long de la rivière a permis de géolocaliser les sources et les zones anthropisées ainsi que les sections de la rivière propices pour y effectuer des jaugeages. Pour localiser précisément les zones de pertes de la Cèze et déterminer les valeurs de débits correspondantes 11 campagnes de jaugeages ont été réalisées en rivière pendant trois cycles hydrologiques de 2013 à 2015. Les débits des sources ont eux aussi été mesurés afin de calculer des bilans hydrologiques entre les pertes et les apports le long du tronçon étudié.

Les résultats montrent la variabilité du débit des sources liées à la taille du bassin versant drainé et à sa configuration géologique. Plusieurs sources ont un débit relativement constant sur l'année et contribuent ainsi au soutien d'étiage en compensant les pertes de la rivière. Cinq tronçons ont été identifiés alternant zones de pertes et d'apports karstiques par les sources. L'analyse des débits mesurés au cours des campagnes de jaugeage réalisées sur la totalité du secteur étudié a permis de quantifier ces pertes et les apports karstiques. La comparaison entre les pertes et les apports du karst en fonction de la période de mesure montre qu'en période de basses eaux le karst contribue jusqu'à 68% du débit de la Cèze alors qu'en moyennes eaux, les eaux d'origine karstique ne participent qu'à environ 50% du débit de la rivière.

L'analyse critique des résultats obtenus porte essentiellement sur la qualité des jaugeages différentiels en rivière et ceux effectués aux sources, la précision du matériel de mesure utilisé et la difficulté de prendre en compte les sous-écoulements et les recyclages d'eau de la rivière à travers les formations alluvionnaires.

Sur la totalité du secteur étudié de la rivière, en intégrant toutes les sources karstiques, le différentiel entre le débit de la Cèze à l'amont des gorges et celui de l'aval est positif. Les apports karstiques compensent les pertes de la Cèze.

Abstract

The purpose of this article is to present the results of hydrological monitoring of the Cèze river basin in its limestone zone with a protocol based on synchronizing flow measurements in the river with those of the springs. The aim is to understand the functioning of the river and karst springs and to determine their contribution to the flow of the Ceze. Fourteen stations were equipped with LTC probes (Height, Temperature and Conductivity): 11 probes at each source and 3 in the river.

Previously, an altimetric profile made it possible to geolocate the sources and anthropogenic areas as well as the suitable sections of the river for gauging. To precisely locate the loss zones of the Ceze and determine the corresponding flow values, 11 gauge campaigns were carried out in rivers during three hydrological cycles from 2013 to 2015. Source flows were also measured to calculate hydraulic balance between losses and inflows along the study section.

The results show variability in sources flows related to the size of the drained watershed and the underground geological configuration. Several sources have a relatively constant flow over the year and thus contribute to compensate the losses of the river. Five sections have been identified alternating areas of losses and karst input from the springs. Analysis of the flows measured during the gauge campaigns carried out over the entire sector studied made it possible to quantify these losses and karst inputs. Comparison of karst inputs according to the measurement period shows that during low water periods the karst contributes more strongly up to 68% of the Ceze river flow, whereas on average water period, karst contributes about 50% of the river flow.

The critical analysis of the results obtained focuses on the quality of the differential gauges in the river and those carried out at the sources, the accuracy of the measuring equipment used and the difficulty of taking into account the underflows and recycling of water from the river through alluvial formations.

Over the entire river area studied, incorporating all karst springs, the differential between the flow of the Ceze upstream of the gorges and that downstream of the karst springs is positive. For the moment the karst inputs compensate for the losses of the Ceze.

Introduction

Le secteur d'étude du bassin versant de la Cèze est contraint par une climatologie locale de type méditerranéen incluant des épisodes de fortes précipitations surtout en période automnale appelés épisodes cévenols. Dans sa partie étudiée, la Cèze passe d'une rivière de plaine à un canyon encaissé modifiant sa section et donc son hydrodynamisme. Durant l'année, le débit de la rivière varie fortement car elle subit des périodes de sécheresses intenses pouvant la tarir en amont des gorges à cause de zone de pertes par infiltration. La question est de savoir dans quelle mesure le débit de la Cèze peut être soutenu par les sources karstiques qui se trouvent de part et d'autre de son lit en période de sécheresse. Pendant les fortes précipitations, le système karstique peut avoir un rôle d'écrêteur de crue ou de contributeur suivant sa saturation [DDE du Gard, 2003].

Les explorations hydrologiques très anciennes dans le secteur aval de la Cèze [Mazauric,

1904], l'étude hydrogéologique des bassins d'alimentation de la Cèze dans son cours moyen et inférieur [Pouzancré, 1971], [Fabre, 1980] et d'autres travaux plus récents [Martin et al. 2007 et 2008] ont montré la nécessité de renforcer le suivi hydrologique de la rivière en complément des campagnes hydrologiques antérieures [BRLi 1995, 2008, 2011]

Les données enregistrées à la station hydrométrique de Tharoux depuis 2007 (ref : V5454010 La Cèze à Tharoux) sont nombreuses mais les sondes ne sont pas prévues pour mesurer des niveaux bas à l'étiage car davantage adaptés à la surveillance des crues et donc des niveaux hauts. De 2008 à 2018, le débit moyen de la Cèze à Tharoux du début de l'hiver à la fin du printemps était de 10,5 m³/s. Mais il peut y avoir des variations importantes d'une année à l'autre (3,12 m³/s du début de l'hiver 2018 à la fin du printemps 2019). Pour une crue de référence, comme celle de 2002, le débit mesuré à la station de Tharoux était de 2210 m³/s. Une crue décennale à Tharoux est comprise entre 810 et 1400 m³/s soit 970 m³/s en moyenne.

Dans le cadre de l'étude des transferts entre le karst et la rivière, en particulier dans des conditions d'étiage, un suivi hydrologique de la rivière Cèze et de ses sources s'avérait nécessaire. Pour cela, des enregistrements ponctuels réguliers synchrones de débits ont été effectués pour mieux comprendre le fonctionnement de la rivière et de ses sources, sur le tronçon étudié. Il s'agissait de quantifier les contributions de l'aquifère karstique à la rivière par les sources ainsi que les pertes de la rivière et de savoir si les apports des exutoires karstiques représentent des gains nets ou bien des recyclage d'eau de rivière.

Les objectifs d'un suivi hydrologique à savoir la caractérisation et la quantification des échanges hydrauliques entre la rivière et son environnement karstique doivent répondre aux besoins de la gestion quantitative des ressources en eau dans cette région du Sud de la France.

1. Méthodologie: Mesures synchrones de débits aux sources et en rivière

L'enjeu majeur de ce suivi hydrologique est de déterminer la part contributive des sources karstiques au débit de la Cèze en basses eaux. Pour cela, il s'agit de mettre en place un protocole de mesures ponctuelles synchrones de débits des sources et de la rivière.

1.1. Contexte des sites suivis et mise en œuvre des mesures

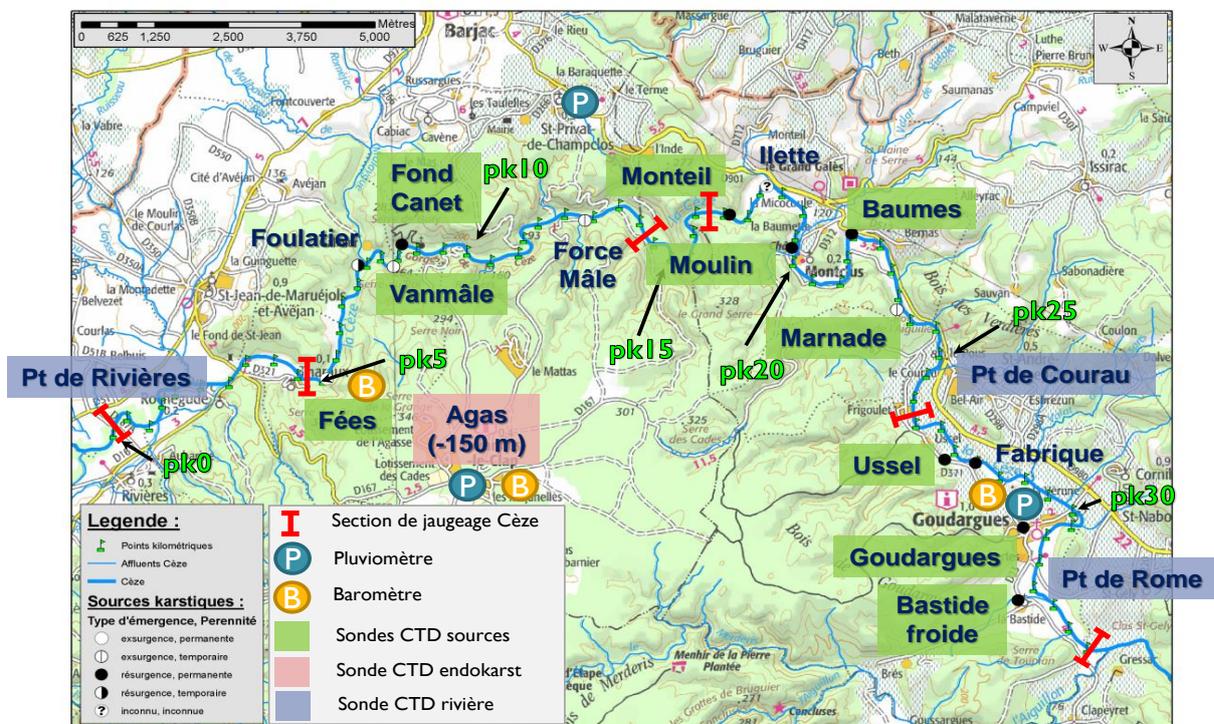
1.1.1. Contexte des stations de jaugeage

Un profil longitudinal de la Cèze a tout d'abord été réalisé avec un canoë doté d'un DGPS Trimble GeoExplorer XH 6000 (figure 1) afin de déterminer les sections les plus propices à des mesures de débit dans la rivière. Au cours de la descente, le DGPS a enregistré les coordonnées spatiales (X, Y et Z ; WGS 84) toutes les secondes avec une précision centimétrique. À partir de cet enregistrement, il est possible de tracer le profil en long de la Cèze (figure 2). Simultanément au relevé DGPS, des sondes trainées à l'arrière canoë ont enregistré les variations de température et de conductivité des eaux de la Cèze. Les données enregistrées par les sondes étaient synchronisées à celle du DGPS. La descente de la Cèze le long de la zone d'étude représente environ 34 km.



Figure 1: Dispositif embarqué sur canoë pour la réalisation d'un profil longitudinal de la Cèze avec mesure de la température et la conductivité de l'eau de la rivière (photo: J. Jolivet)
 Canoe-mounted device for the realization of a longitudinal profile of the Cèze with temperature measurement and water conductivity of the river.

Dans la zone d'étude (carte 1), les affluents de la Cèze se situent à l'amont des gorges karstiques (Auzon, Claysse) qui se tarissent rarement mais dont les débits sont très faibles (dizaines de L/s) et à l'aval (Aiguillon). Dans les gorges, il n'y a que les sources en rive droite et gauche de la Cèze, excepté un affluent, la Malaygüe, en rive gauche, qui est la plupart du temps en assec. Jusqu'au pk34 la Cèze n'a pas d'affluent pérenne.



Carte 1 : Localisation par pk (point kilométrique) des points de suivi hydrologique (Fond IGN au 1/50 000^{ème})
 Location by pk (kilometric point) of the hydrological monitoring (IGN map at 1/50 000th)

Quatorze stations ont été équipées de sondes LTC (Hauteur, Température et Conductivité) : 11

stations karstiques : source des Fées, aven de l'Agas (station endokarstique du bassin versant de la source des Fées), source de Font Canet, source Vanmâle, source de Monteil, source des Baumes, source du Moulin, source de Marnade, source d'Ussel, puits à Goudargues, source de la Bastide Froide et 3 stations en rivière: pont de Rivières, pont de Courau et pont de Rome.

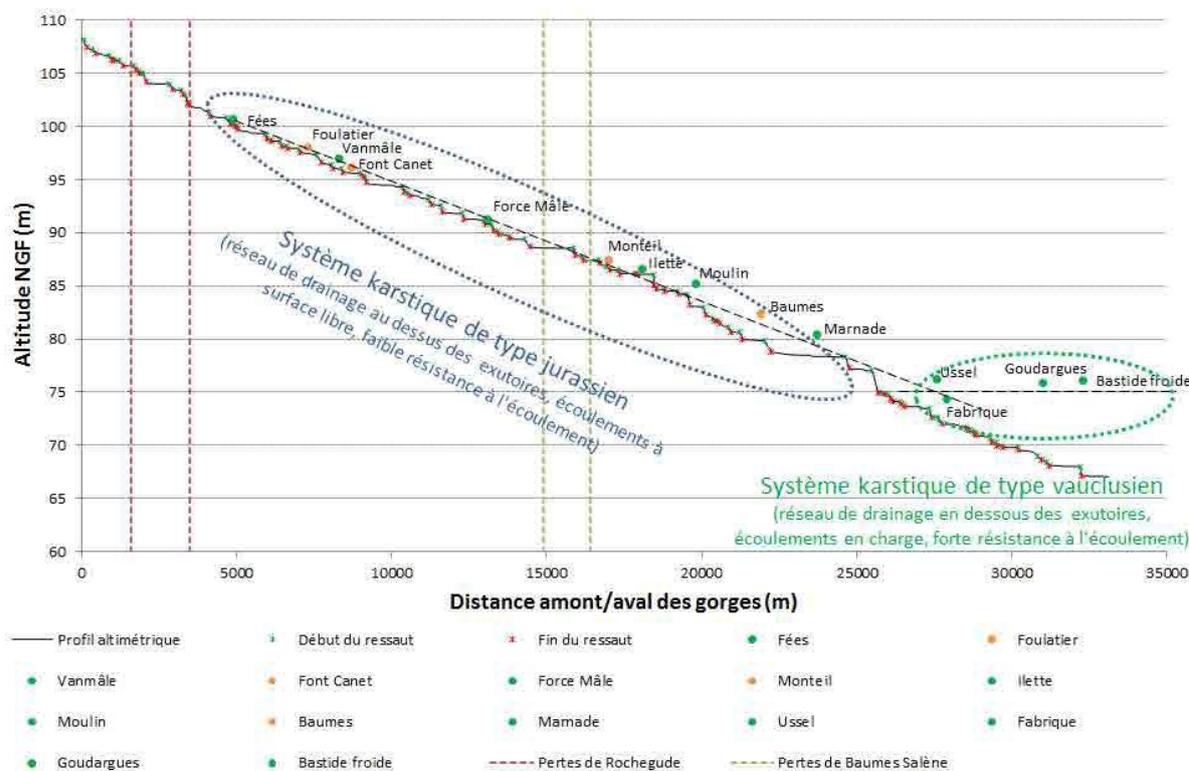


Figure 2 – Profil longitudinal altimétrique du canyon la Cèze: mesures réalisées du 08/06/2015 au 10/06/2015 ; les points en vert représentent les sources en rive droite de la Cèze et ceux en orange représentent les sources en rive gauche.

Altimeter longitudinal profile of the Cèze canyon: measurements taken from 08/06/2015 to 10/06/2015; the green dots represent the springs on the right bank of the Cèze and those in orange represent the springs on the left bank.

Sur le profil en long, on constate que la pente moyenne de la rivière sur le tronçon étudié est de l'ordre de 0,11%. Les ressauts les plus importants correspondent à des seuils anthropisés ou naturels. Les sources situées le long de la Cèze se distinguent de par leur altimétrie. De l'amont jusqu'à la sortie des gorges karstiques, les sources sont en bordure de rivière, ce qui n'est pas le cas des sources en aval. Les sources situées en amont, de la source des Fées jusqu'à celle de Marnade, sont plutôt de type Jurassien avec un écoulement à surface libre. À partir du pont de Courau (en amont de la source Ussel), la Cèze longe la limite entre les calcaires urgoniens et les formations imperméables du Crétacé supérieur. Les sources d'Ussel à Bastide froide fonctionnent comme des sources de type Vauclusien.

La température et la conductivité des eaux la Cèze sont réactives aux apports des sources karstiques car elles sont bien différentes de celles de la rivière à l'amont de la zone d'étude. Ce constat montre que la température de la Cèze diminue d'environ 7 °C (de 28,1 °C à 21,1 °C) et que la conductivité augmente de 101 µS/cm (de 374 µS/cm à 475 µS/cm). Ces valeurs sont significatives des apports du karst à la rivière. La réalisation de ce profil en long permet

ainsi de géolocaliser les sources et les zones de seuils-et d'identifier les sections de la rivière propices aux mesures et réalisations des jaugeages.

1.1.2. Principe de mesure de débits

Les débits des sources et des sections de rivière sont déterminés par mesures de vitesses d'écoulement à l'aide d'un micromoulinet (SEBA M1) et/ou d'un courantomètre à induction magnétique (OTT MF Pro). Le courantomètre permet de réaliser des mesures avec une précision de $\pm 2\%$ de la valeur mesurée de 0 à 3 m/s et $\pm 4\%$ de la valeur mesurée de 3 à 5 m/s. Ces mesures sont adaptées aux gammes de vitesses des écoulements dans la rivière et aux sources qui sont comprises entre 0 et 6 m/s environ. Elles consistent à estimer la répartition des champs de vitesse le long d'un profil transversal de la rivière ou d'une source. La section de jaugeage doit avoir un écoulement uniforme et non turbulent. Les débits ponctuels ont été mesurés directement lorsque les sections de jaugeages s'y prêtaient et que les apports des sources n'étaient pas trop diffus. Ils ont été ensuite comparés aux différences de débits amont et aval mesurés par jaugeages différentiels.

Les données de hauteur ont été enregistrées par les sondes LTC au pas de temps de 15 minutes puis 30 minutes (à partir du 21/09/2015). Au total, 75 jaugeages ont été réalisés sur les sources et 42 jaugeages sur les différentes sections en rivière. Les précipitations ont été enregistrées à la station de mesures hydrométriques de Météo-France située sur la commune de Méjannes-le-Clap (référence de la station : 30164001).

1.1.3. Bilans par jaugeages différentiels

Pour quantifier les gains (provenant des sources) ou les pertes de débits de la rivière, il convient de mesurer de manière synchrone les flux entrants et sortants le long de tronçons prédéfinis. La figure 3 illustre le principe de ces jaugeages différentiels. Pour un tronçon de rivière donné, les flux entrants correspondent à la somme des débits des sources tandis que les débits sortants correspondent à la somme des débits de pertes sur ce même parcours.

Ces campagnes de mesures synchrones de débits sont répétées durant plusieurs périodes de l'année. Le but étant de quantifier l'évolution des flux entrants et sortants pendant la durée de tarissement de mars à septembre et plus particulièrement les faibles débits de la rivière et des sources en saison d'étiage. En effet, cette période est la plus critique concernant la gestion de la ressource en eau et les données publiques disponibles pour les basses eaux (BanqueHydro, SPC Grand Delta et OHM-CV) ne sont pas suffisamment précises.

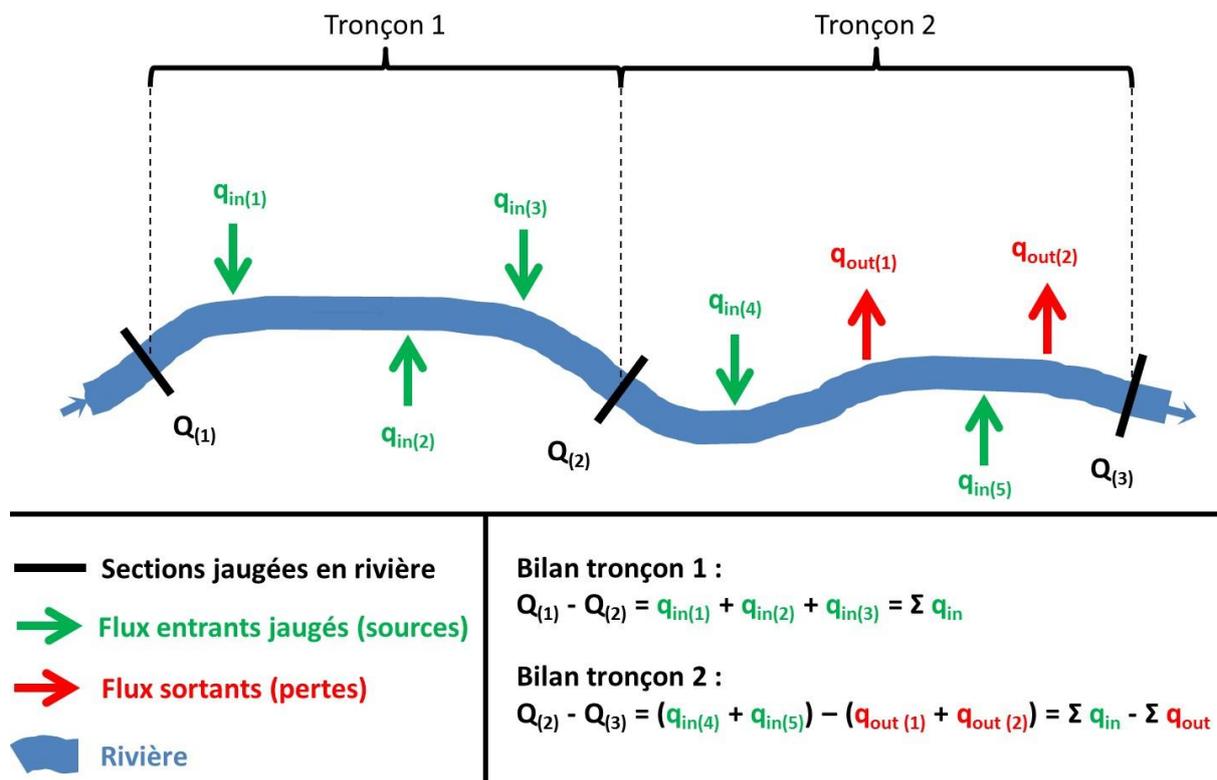


Figure 3: Schéma de principe des jaugeages différentiels pour l'estimation des échanges entre karst et rivière.

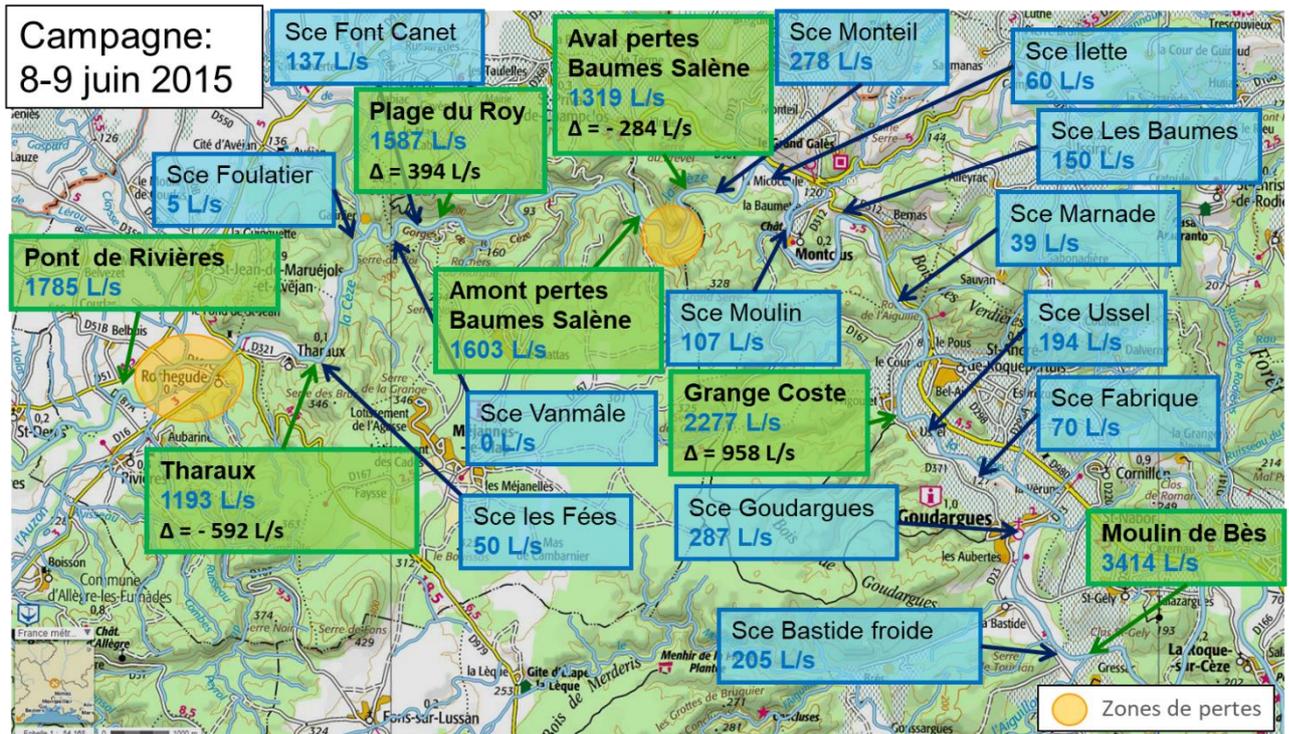
Differential gauging to assess flow exnages between the karst and the Cèze river

La carte 2 localise les sections jaugées en rivière : la première section à l'amont des pertes de Rochegude (pk0), la seconde à l'aval des pertes de Rochegude (pk4,5), et la troisième (pk27) qui sépare les sources de l'amont (Fées, Foulatier, Font Canet, Vanmâle, Force Mâle, Monteil, Moulin, les Baumes et Marnade) des sources de l'aval (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide) et enfin une quatrième à l'aval des sources et de la zone d'étude (pk34). Toutes les sources citées précédemment ont fait également l'objet de jaugeage [Jolivet, 2013] Le tableau 1 récapitule l'ensemble des mesures de débits réalisées.

Pour l'année 2013, des mesures synchrones des débits de la rivière (3 tronçons pk0, pk5 et pk33) et des sources (12 jaugeages) ont été réalisées en juillet en moyennes eaux et septembre en basses eaux afin de quantifier les pertes et les gains de débits d'amont en aval des gorges [Chapuis et al. 2014].

Pour l'année 2014, un complément du suivi de tarissement de la Cèze a été mis en place Il comprend 5 à 6 campagnes de jaugeages effectuées entre mars et septembre. Deux sections de mesures supplémentaires (respectivement pk15 et pk 16,5) ont été ajoutées pour encadrer les pertes de Baume Salène.

Pour 2015, deux autres sections de mesures ont été mises en place, l'une au premier tiers des gorges au niveau de la plage du Roy (pk10) et l'autre au deuxième tiers du canyon au niveau du pont de Jules (pk19) près de Monclus, en amont de la source du Moulin. Ces deux nouvelles portions ont permis de mieux comprendre la restitution des pertes de la rivière, ponctuelles ou diffuses et de déterminer si la compensation est totale ou partielle.



Carte 2 : Localisation des zones de pertes et des zones d'apports karstiques par jaugeages différentiels
 Location of downwelling zones and of karstic contributions with differential gauges

Périodes	Nombre de mesures	
	Sources	Rivière
juil-13	0	3
sept-13	7	3
mars-14	12	0
avr-14	9	4
mai-14	10	4
juin-14	11	10
juil-14	7	0
sept-14	5	5
avr-15	6	6
Juin-15	8	7
total	75	42

Tableau 1 : Mesures de débits réalisées entre juillet 2013 et juin 2015.
 Flow measurements between July 2013 and June 2015

2. Résultats et interprétation : quantification des apports et des pertes

Pour localiser précisément les zones de pertes de la Cèze et les valeurs de débits, correspondantes 11 campagnes de jaugeages ont été réalisées en rivière. Les débits des sources ont eux aussi été mesurés afin de calculer des bilans entre les pertes et les apports le long du tronçon étudié. Les jaugeages des sources ont permis d'obtenir des courbes de tarage et d'avoir ainsi des valeurs de débit en continu à partir des hauteurs d'eau mesurées par les sondes

autonomes LTC. Pour la période considérée, les sources montrent différentes variabilités de débit, faibles par exemple pour celles des Baumes et du Moulin, plus fortes pour les sources de Monteil, de Marnade et de Bastide froide. Elles sont notamment liées à la taille du bassin versant karstique drainé, et à sa configuration géologique (mobilisation des eaux de l'épikarst et/ ou de l'endokarst), au type de fonctionnements hydrodynamiques souterrains (libre, de trop plein, fortement ou faiblement capacitif, et/ou dispersif) et aux relations avec les niveaux de la rivière. Ces configurations sont relativement typiques des rivières karstiques du sud de la France [Besson et al. 2005].

2.1. Mesures de débit en rivière.

L'interprétation des résultats a été effectuée à partir des 4 dernières campagnes de jaugeage des mois d'avril, juin, juillet et août 2015 [Chapuis 2017].

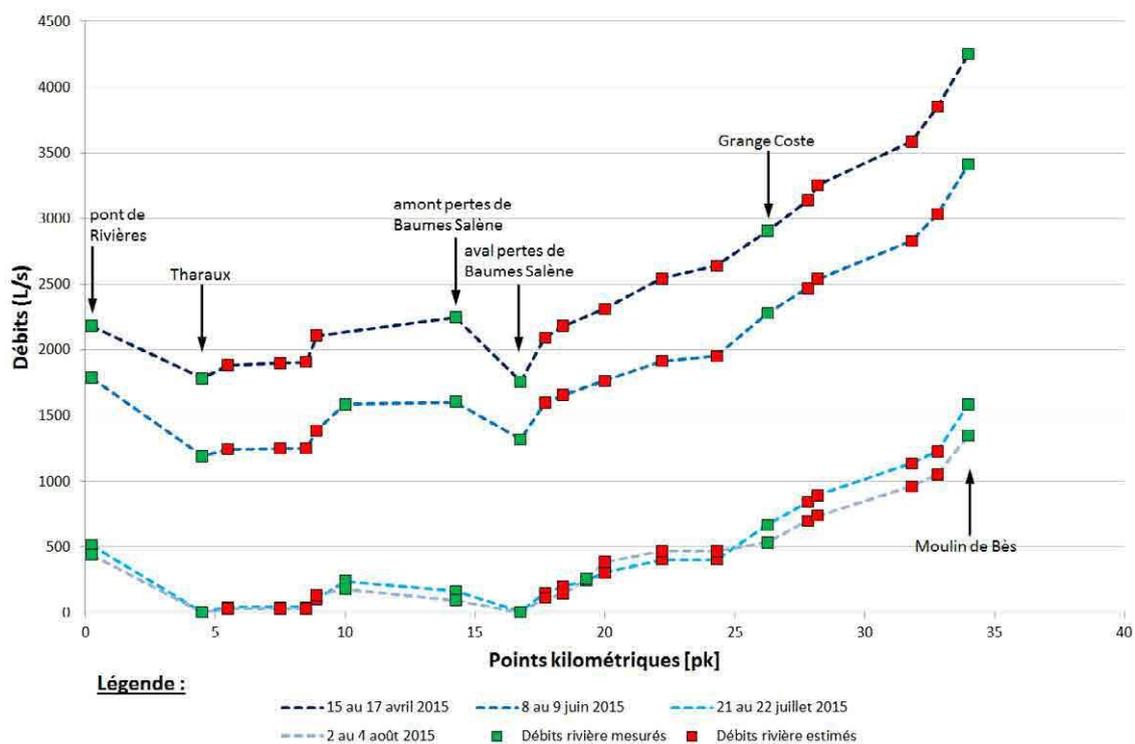


Figure 4: jaugeages réalisés avec un courantomètre électromagnétique et débits estimés le long du tronçon de la Cèze - Campagnes de jaugeages d'avril, juin, juillet et août 2015, d'après Chapuis 2017
Gauges made with an electromagnetic currentmeter and estimated flows along the section of the Cèze - Gauge campaigns in April, June, July and August 2015

Sur la figure 4, les carrés verts représentent les sections mesurées en rivière à l'aide du courantomètre électromagnétique et les carrés rouges les débits estimés le long du tronçon de la Cèze. Les débits de la Cèze ont été estimés en additionnant le débit de la source au pk correspondant (figure 4) mesuré par courantomètre durant la même campagne de jaugeages.

La figure 5 montre l'évolution de la contribution des eaux du karst à la Cèze, à partir des données de jaugeage précédentes. Pour cela, les conditions initiales ont été ajustées au débit à pont de Rivières. On constate que les apports karstiques varient conséquemment en fonction de la période de l'année et que la Cèze peut être déficitaire sur plusieurs kilomètres. En effet, sur le tronçon de pk 5 à pk 15 les eaux du karst réapprovisionnent la Cèze seulement pour la période d'avril. Pour les trois autres campagnes de jaugeage, les apports du karst ne suffisent

pas à combler les pertes par infiltration. Dans les quatre cas de figure les sources plus en aval (à partir de pk 16) contribuent à une augmentation nette du débit de la Cèze. La comparaison de ces apports en fonction des cycles de mesure montre qu'en période de basses eaux, le karst contribue plus fortement au débit de la Cèze.

En période de moyennes eaux, le karst échange peut-être des volumes d'eau plus importants avec la rivière, par rapport à ceux en basses eaux, mais au vu du débit de la Cèze, sa contribution est moins élevée. En avril et juin 2015, le karst contribuait à 49 % du débit de la rivière. En période de basses eaux en juillet-août 2015, la Cèze étant tarie à Rohegude, les eaux du karst participaient à 68 % du débit de la Cèze.

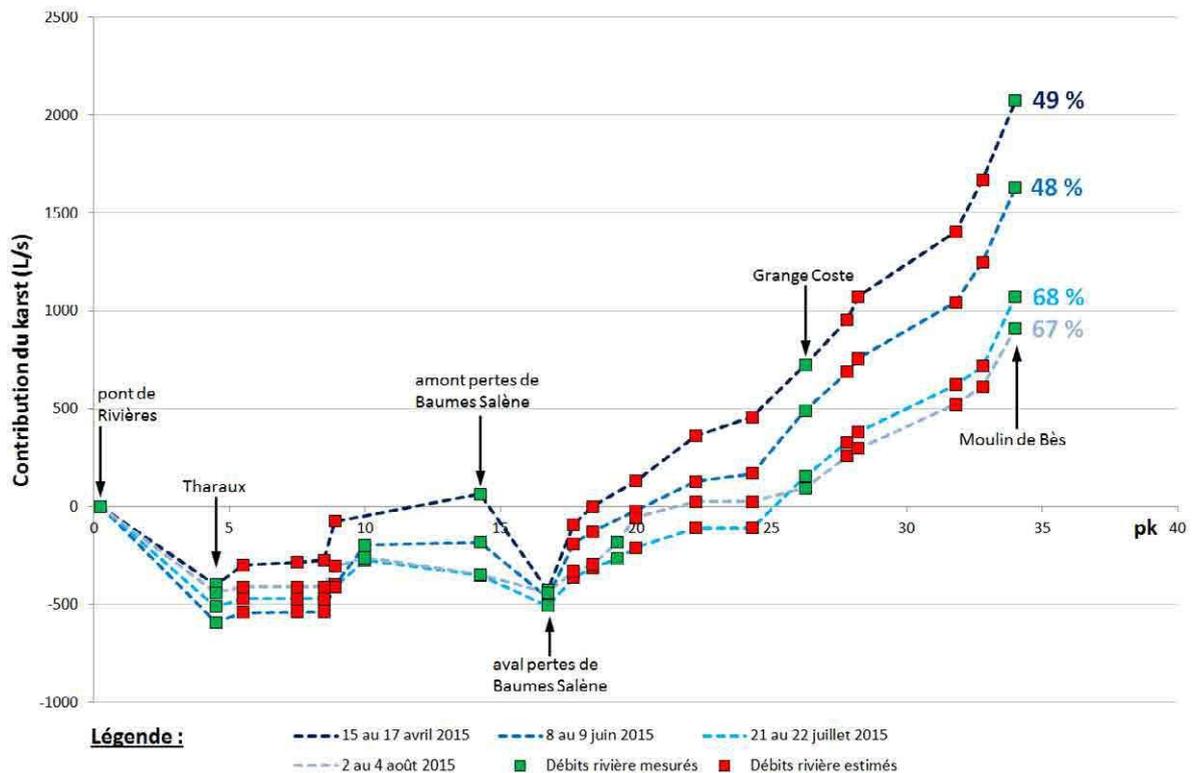


Figure 5: Campagnes de jaugeages d'avril, juin, juillet et août 2015

Débits initialisés sur une valeur commune (débit au pont de Rivières) pour faire apparaître la contribution des eaux du karst à la Cèze (en %) d'après Chapuis 2017

April, June, July and August 2015 gauge campaigns

Initial flows on a common value (flow at Pont de Rivières) to show the contribution of karst to the Cèze river (%)

2.2. Bilans pertes/apports par tronçons de rivière

Le tableau 2 présente les bilans par tronçons et compare les gains ou pertes par rapport au débit de la rivière.

Situation hydrologique	Période	Q _{in} (L/s)	Q _{out} (L/s)	Pertes Rochevide		Pertes Baumes Salène		Gains Sources Amont		Gains Sources Aval		Gains Totaux Sources	
				Q (L/s)	%Q _{in}	Q (L/s)	%Q _{in}	Q (L/s)	%Q _{out}	Q (L/s)	%Q _{out}	Q (L/s)	%Q _{out}
ME	mi juillet 2013	2944	4643	-627	-21%							1699	37%
BE	début sept 2013	668	1619	-559	-84%							951	59%
HE	fin avril 2014	2858	4980	-546	-19%			867	17%	1254	25%	2121	43%
ME	mi mai 2014	1270	2838	-437	-34%			645	23%	924	33%	1568	55%
BE	mi juin 2014	881	1963	-590	-67%			233	12%	849	43%	1082	55%
BE	fin juin 2014	1038	1949	-491	-47%			156	8%	754	39%	910	47%
BE	début sept 2014	1080	1860	-613	-57%			-2	0%	782	42%	780	42%
HE-ME	mi avril 2015	2182	4254	-400	-18%	-491	-22%	723	17%	1349	32%	2072	49%
ME	Mi juin 2015	1785	3414	-592	-33%	-284	-18%	492	14%	1137	33%	2095	48%

Tableau 2 : Bilan (pertes et gains) des jaugeages différentiels entre 2013 et 2015.

NB : Les sources amont incluent les Fées, Foulatier, Font Canet, Vanmâle, Force Mâle, Monteil, Moulin, les Baumes et Marnade. Les sources aval incluent Fabrique, Ussel, Goudargues et Bastide Froide

Results (loss and gains) of differential gauges between 2013 and 2015.

NB: Upstream sources include Les Fées, Foulatier, Font Canet, Vanmâle, Force Mâle, Monteil, Moulin, les Baumes and Marnade. Downstream sources include Fabrique, Ussel, Goudargues and Bastide Froide

Par exemple, pour la dernière ligne du tableau, mi-juin 2015, le débit à l'entrée des gorges était de 1785 L/s pour un débit tout à l'aval du site d'étude de 3414 L/s. Les pertes de Rochevide représentaient un débit de 592 L/s, c'est-à-dire une baisse de 33 % du débit initial. Les pertes de Baumes Salène ont été mesurées à 284 L/s, soit une baisse de 18 % par rapport au débit de la Cèze juste avant leur disparition.

La somme des débits mesurés aux sources de l'amont (jusqu'à Marnade) est de 492L/s, soit 14% du débit total de la Cèze. Le débit des sources à l'aval est de 1137L/s, soit une contribution de 33 % au débit total de la rivière. Ainsi l'ensemble des gains de débits d'eau souterraine issus des sources provenant des massifs calcaires est de 2095 L/s et représente environ 50% du débit total de la Cèze à cette période.

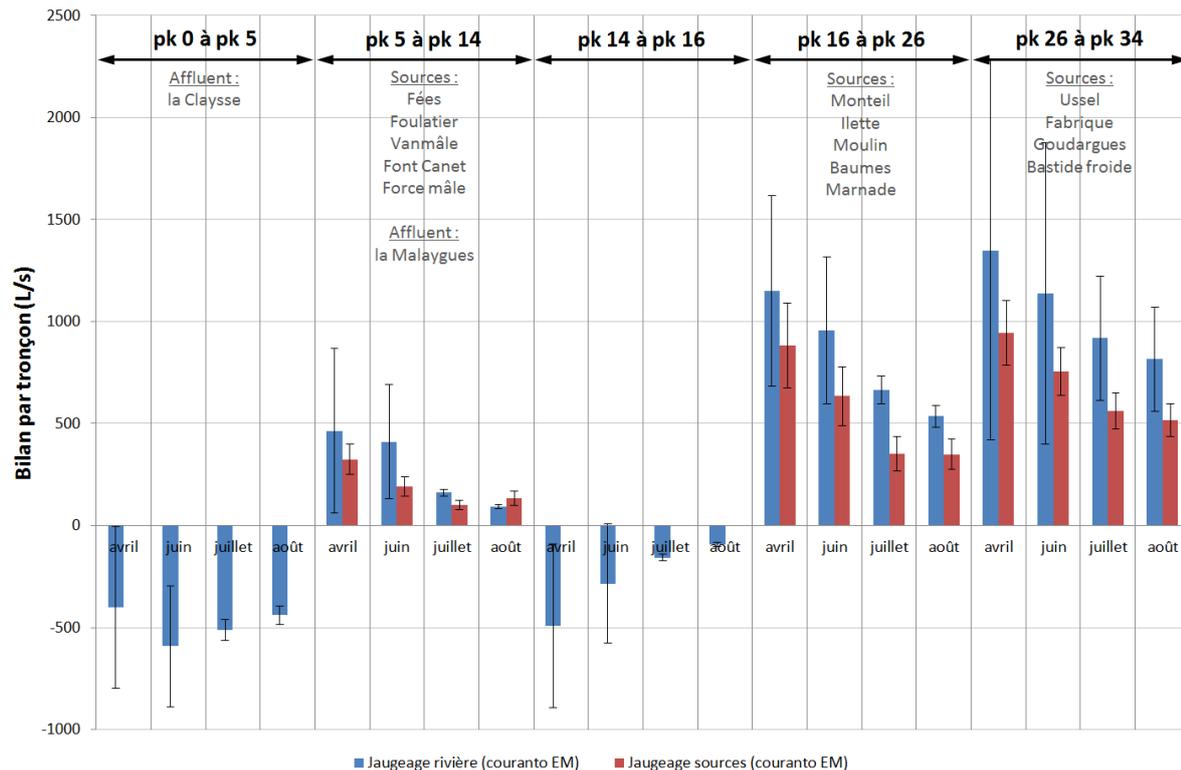


Figure 6: Bilan des débits par tronçons
 suite aux campagnes de jaugeages d'avril, juin, juillet et août 2015,
 Flow balance by sections
 following the gauging campaigns in April, June, July and August 2015,

Cinq tronçons sont identifiables et représentent : (i) la zone de pertes à Rochemade (pk 0 à pk 5) qui était déjà connue et mesurée (BRLi, 1995), (Martin et al, 2007 et 2008), (ii) la zone d'apports par la Malaygues et les sources (pk 5 à pk 14), (iii) la zone de pertes à Baumes Salène (pk 14 à pk 16), (iv) la zone d'apports karstiques par les sources (pk 16 à pk 26) et (v) la zone d'apports (pk 26 à pk 34) en sortie des gorges par des sources au contact des formations du Crétacé supérieur.

Sur le premier tronçon (pk0 à 5), le bilan des débits est négatif pour la Cèze (pertes de Rochemade). Dans cette zone, le seul apport est celui de la Claysse qui se tarit rarement mais dont les débits sont très faibles

Le second tronçon, entre (pk 5 à pk 14) qui comprend 3 sources en rive droite et 2 sources en rive gauche (dont une non pérenne) contribuent nettement au débit de la rivière. Durant la période estivale, le débit de la Cèze et les débits cumulés des sources sont équivalents.

Les pertes de Baumes Salène sur le troisième tronçon (pk14 à 16), conduisent de nouveau à un bilan négatif en raison de l'absence de sources ou d'affluent. Du secteur pk 16 à pk 26, le débit de la Cèze augmente fortement grâce au soutien important des sources. Néanmoins, le débit de la rivière est supérieur au le cumul des débits des sources. Il peut donc y avoir des apports d'eau souterraine diffus à travers le lit de la rivière.

Sur le dernier tronçon du pk26 au pk34. Les valeurs de débit des sources restent élevées au fil des mois malgré une période de sécheresse. Ces sources qui se situent en rive droite ont un

réservoir en eau souterraine plus important que les sources en amont. Elles semblent fonctionner comme des sources de trop plein au contact des formations du Crétacé supérieur. Elles alimentent donc la Cèze de manière plus importante et leur contribution est constante dans le temps par rapport aux sources en amont qui se tarissent plus rapidement.

L'analyse des débits grâce aux campagnes de jaugeages réalisées sur la totalité du tronçon permet ainsi de quantifier les pertes et les apports de la Cèze au cours du cycle hydrologique. Toutefois, ceci ne permet pas de comprendre la totalité du fonctionnement du système karstique.

Les résultats d'estimation des apports karstiques par jaugeages et par hydrochimie (voir l'article de V. Lavastre sur l'hydrochimie) dans la Cèze et ses sources sont cohérents entre eux (tableau3) et avec les bilans par tronçons présentés à la figure 5 pour la période de juin 2015. Ils confirment le mélange d'eau de la rivière Cèze avec l'eau karstique et d'éventuels apports d'eau souterraine à travers les bancs de galets.

Sources Cèze amont et aval	Débits mesurés (L/s ±2%) (juin 2015)	% Origine karstique	Contribution karstique
Cèze amont (Tharoux)	1193	0%	
Fées	50	100%	50 L/s
Vanmâle	0	100%	
Font Canet	137	37%	50,7 L/s
<i>Cèze en amont des pertes de Baumes Salène</i>	<i>1603</i>		
<i>Cèze en aval des pertes</i>	<i>1319</i>		
Monteil	278	61%	169,6 L/s
Illette	60	60%	36 L/s
Moulin	107	38%	40,7 L/s
Baumes	150	69%	103,5 L/s
Marnade	39	95%	37,1 L/s
Ussel	194	84%	163 L/s
Fabrique	70	68%	47,6 L/s
Goudargues	287	69%	198 L/s
Bastide Froide	205	92%	188,6 L/s
Total sources	1577		1085 L/s
Cèze aval	3414		49 % du débit total de la Cèze

*Tableau 3 – Apports karstiques à la Cèze le long des gorges karstiques
Karst contributions to the Cèze river along the karst gorges*

La part contributive des écoulements karstiques au débit de la Cèze est synthétisée dans le tableau 3. Ces résultats sont seulement représentatifs des apports karstiques. Ils ne prennent pas en compte les écoulements issus de griffons ni les apports diffus.

3 Analyse critique des résultats et discussion

L'analyse critique des résultats obtenus porte essentiellement sur la qualité des jaugeages différentiels en rivière et ceux effectués aux sources. En effet, de nombreuses incertitudes liées aux conditions du terrain peuvent nuire aux mesures dont l'erreur est d'environ 5%.

D'autres sources d'incertitude sont liées aux sous-écoulements. Les valeurs mesurées correspondent à des débits apparents. Les clichés thermiques (présentés dans l'article de

B. Marteau sur la thermographie infrarouge) illustrent clairement ce phénomène, notamment au niveau de la source de Monteil [Vignoles, 2009]. D'autres sources présentent ces caractéristiques, notamment au niveau des sources de Vanmâle, Marnade et Fabrique. Le sous-écoulement est parfois décelable grâce aux variations de hauteurs d'eau des sondes autonomes LTC. En effet, pour les sources de Marnade et Vanmâle, alors que le débit apparent de ces sources est nul, les sondes continuent à enregistrer une décroissance progressive des niveaux. Comme dans le cas des émergences diffuses, les jaugeages différentiels en rivière ne sont pas adaptés pour estimer ces sous-écoulements.

D'autres difficultés sont liées à la qualité des mesures de débit aux sources. Pour les sources qui émergent à proximité immédiate de la rivière, le choix de la section est souvent très restreint. Il est souvent nécessaire d'avoir recours à des sections de moindre qualité (écoulement non laminaire, contre-courants, etc.). C'est le cas pour les sources de Font Canet, Baumes, Fabrique et Monteil.

Par ailleurs, les sections de jaugeage en rivière peuvent évoluer en fonction des crues importantes et régulières de la Cèze comme celle de 2015. La modification des sections de jaugeage nécessite alors un réajustement des courbes de tarage.

Enfin, d'autres incertitudes sont liées au type de matériel utilisé : courantomètre ou micromoulinet. L'acquisition du courantomètre à induction magnétique durant l'année 2014 a permis de réaliser, de manière synchrone, davantage de jaugeages. Cependant, les écarts entre les débits mesurés avec les deux appareils peuvent atteindre 30%. Pour corriger les mesures du micromoulinet, il a été nécessaire d'établir, pour chacune des 6 hélices, de nouvelles corrélations pour ajuster les vitesses.

D'une manière générale, les plus fortes incertitudes de mesure des débits concernent les sources. Les jaugeages réalisés en rivière sont moins entachés d'incertitude et donnent des résultats cohérents.

L'analyse des débits grâce aux campagnes de jaugeage réalisées sur la totalité des tronçons permet de vérifier et de quantifier les pertes et les apports de la Cèze au cours du cycle hydrologique. Cependant le fonctionnement du système karstique ne peut se comprendre qu'à travers la sectorisation de chaque tronçon défini et non dans sa globalité.

Sur la totalité du secteur de rivière étudié, en intégrant toutes les sources karstiques, le différentiel entre le débit de la Cèze à Rivières (amont des pertes de Rochegude) et celui à Moulin-de-Bès (aval des sources karstiques) est positif. Pour le moment les apports karstiques compensent les pertes de la Cèze, mais qu'en est-il de ce bilan quantitatif pour le futur ?

Conclusion

L'instrumentation et le suivi hydrologique de la Cèze et de ses émergences karstiques permettent ainsi de réaliser de nombreuses analyses des données hydrologiques de terrain, pour localiser les lieux stratégiques et comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système karstique. En effet, les profils longitudinaux et altimétriques liés aux données de température, conductivité-mesurés dans la rivière positionnent les émergences et évaluent leur impact sur la Cèze. Les jaugeages différentiels localisent des zones de pertes et d'apports, ils permettent de quantifier les échanges entre le karst et la rivière. Le débit de l'eau qui s'infiltré au niveau des pertes recensées peut être jaugé ainsi que le débit apparent des émergences

karstiques qui alimentent la Cèze.

La zone de pertes en amont des gorges est révélatrice des échanges entre le système karstique et la rivière Cèze. Ces derniers ne sont pas seulement caractérisés par une contribution des eaux du karst à la rivière, mais aussi par une partie du débit de la rivière alimentant le réservoir karstique. Les dépôts alluvionnaires (bancs de galets) très perméables et très présents dans les gorges de la Cèze jouent un rôle important pour assurer la transmission des flux karstiques depuis l'encaissant calcaire jusqu'au cours d'eau

Finalement, l'ensemble des contributions karstiques issues des sources karstiques provenant du massif calcaire représente environ 44 à 49 % du débit total de la Cèze en période de moyennes eaux et 67 à 68% en période de basses eaux.

Remerciements

Nous tenons à remercier Hugues Brentegani du Syndicat de la Vallée de la Cèze pour son aide lors du relevé des sondes de mesure ainsi que Pierre-Alain Ayrat pour ses conseils concernant l'instrumentation en matière de jaugeage des débits en rivière.

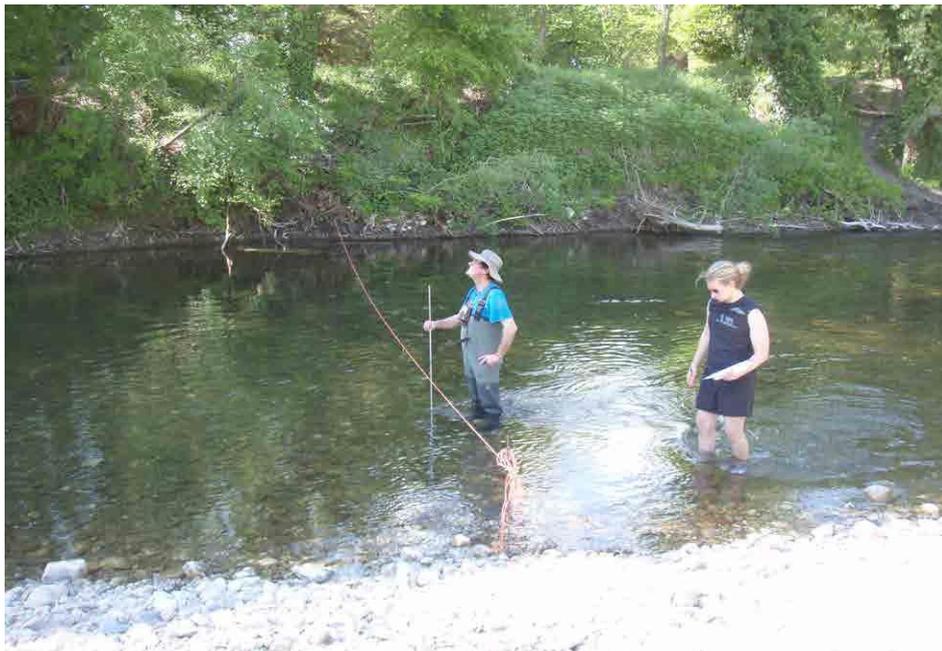


Figure 7 : Mesure des vitesses d'écoulement sur une section transversale de la Cèze au niveau du pont de Rivières (photo J. Ré-Bahuaud)

Measuring flow speeds on a cross section of the Ceze at the River Bridge (photo J. Re-Bahuaud)

Bibliographie

Besson D., Parize O., Rubino J.-L., Aguilar J.-P., Aubry M.-P., Beaudoin B., Berggren W.A., Clauzon G., Crumeyrolle P., Dexcoté Y., Fiet N., Iaccarino S., Jiménez-Moreno G., Laporte-Galaa C., Michaux J., von Salis K., Suc J.-P., Reynaud J.-Y., Wernli R., 2005 - Un réseau

fluviale d'âge Burdigalien terminal dans le Sud-Est de la France : remplissage, extension, âge, implications. *Comptes Rendus Geoscience* 337, 1045–1054. DOI:10.1016/j.crte.2005.05.009.

BRLi, 1995 - Analyses des soutiens d'étiage de la Cèze. Rapport au Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement Touristique du Pays de Cèze, 41 p.

BRLi, 2008 - Protocole de gestion concertée de la ressource en eau sur le bassin versant de la Cèze (No. phase II ; version II).

BRLi, 2011 - Détermination des volumes prélevables maximum sur le bassin versant de la Cèze. Rapport phase 2 : Analyse de la ressource en eau. Rapport Final.

Chapuis H., 2017. Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières : application à la Cèze (Gard, France), Université de Lyon, UMR EVS 5600, École des Mines de Saint-Étienne, 2017LYSEM026, 424 p.

Chapuis H., Jolivet J., Paran F., Ré-Bahuaud J., Guy B., Graillot D., 2014 - Méthodologie pluridisciplinaire pour l'étude des interactions karst/rivière - Cas de la Cèze. Colloque E3D, Ecole des Mines d'Alès, p. 8.

DDE du Gard, 2003 - Atlas des zones inondables du département du Gard par la méthode d'hydrogéomorphologie : Bassin de la Cèze.

Fabre G. (1980) - *Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques.* Mémoires AFK, n° 2, 446 p + 15 planches et 6 cartes HT.

Jolivet J. (2013) - Nouveaux apports sur les traçages et les débits réalisés au niveau du bassin d'alimentation karstique de la bordure orientale du massif de Lussan – canyon de la Cèze – Gard – France., *Spélunca* n°129, p.27-34.

Martin C., Jolivet J. et Martin Ph., 2007 - Résultats des jaugeages réalisés sur la Cèze au cours de l'étiage estival 2006. Rapport au Syndicat mixte d'aménagement de la Cèze, 3 p.

Martin C., Jolivet J. et Martin Ph., 2008 - Rapport de rendu sur la mise en place d'une étude des débits d'étiage sur le cours moyen de la Cèze. UMR 6012 "ESPACE", Rapport au Syndicat mixte d'aménagement de la Cèze, 7 p. + annexes.

Mazauric F., 1904 - Explorations hydrologiques dans les régions de Cèze et du Bouquet (Gard, 1902 – 1903). *Bulletin et Mémoires de la Société de Spéléologie*, *Spélunca*, tome V - n° 36, 54 p.

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.