



HAL
open science

Identification des apports du karst par thermographie infra-rouge aéroportée : campagnes de mesures de 2013 sur la Cèze

Baptiste Marteau, Jordan Ré-Bahuaud, Vincent Wawrzyniak

► **To cite this version:**

Baptiste Marteau, Jordan Ré-Bahuaud, Vincent Wawrzyniak. Identification des apports du karst par thermographie infra-rouge aéroportée : campagnes de mesures de 2013 sur la Cèze. *Karstologia*, 2020, 75, pp.25 à 32. emse-02964811

HAL Id: emse-02964811

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-02964811>

Submitted on 27 May 2021

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.

Identification des apports du karst par thermographie infra-rouge aéroportée : campagnes de mesures de 2013 sur la Cèze

Location of karstic inputs from airborne thermal infra-red imaging: 2013 field survey on the Cèze River

B. Marteau², J.Ré-Bahuaud¹, V. Wawrzyniak²,

¹ Université de Lyon, UMR EVS 5600, Mines Saint-Étienne, 158 Cours Fauriel – CS 62362, F-42023, Saint-Étienne, France, email : graillot@emse.fr

² Université de Lyon, UMR EVS 5600, ENS Lyon, Biogéophile, 15 Parvis R.Descartes 69342 Lyon

Mots clés : thermographie infra-rouge, IRT, échanges eaux souterraines/eaux de surface, Système d'Information Géographique, karst

Keywords: infra-red thermography, TIR, exchanges between groundwater and surface water, Geographical Information System, karst

Résumé

Une représentation appropriée et efficace des flux d'échange entre rivière et aquifère est nécessaire pour une gestion optimisée de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques sur les plans quantitatifs et qualitatifs. Parmi les outils existants, l'imagerie InfraRouge Thermique (IRT) permet de cartographier finement les températures à la surface afin de caractériser les apports d'eau souterraine. Cet article vise à démontrer la pertinence de l'imagerie IRT pour caractériser les échanges hydrauliques entre les eaux de surface et les eaux souterraines de la basse vallée de la Cèze (Gard – France). L'objectif principal est (1) de repérer les endroits des gorges karstiques où l'eau souterraine émerge et (2) de contribuer à la quantification des débits de la rivière incluant ces apports. Un maximum d'informations issues des images thermiques peut être obtenu si (1) le contraste de température entre l'eau de la rivière et l'eau souterraine est significatif, et (2) si le débit de la rivière n'est pas trop élevé par rapport à celui des apports karstiques. Les résultats des campagnes aéroportées d'avril et de juillet 2013 montrent que l'utilisation des images thermiques infra-rouge permet d'identifier et de quantifier les écoulements souterrains le long de la rivière.

Abstract

A proper and adequate representation of River-Aquifer (R-A) exchanges is important for an effective management of water resource and aquatic ecosystems as it influences both quantitative and qualitative aspects of groundwater and river water. Among the different tools at hand, InfraRed Thermal imaging (TIR) allows a fine mapping of surface temperature in order to characterise groundwater inputs. The purpose of this article is to demonstrate the relevance of using TIR imaging to characterise hydraulic exchanges between groundwater and surface water in karst areas. In the present work, a study is carried out to analyse the R-A exchanges over the lower part of the Cèze River lower valley (Gard – France). The main objectives of this study are (1) to identify the locations where groundwater discharges into the Cèze River and (2) to quantify the total discharge of the Cèze River including inputs from these springs. Maximum output from the TIR images can be possible (1) if the temperature contrast between surface and groundwater is significant, and (2) if river discharge is not too high in comparison to groundwater inputs from karstic springs. Results from airborne measurements achieved in April and August 2013 show the potential of using TIR images to quantify and identify the location of groundwater inputs along the river.

1. Introduction

Une représentation appropriée et efficace des flux d'échange entre rivière et aquifère est nécessaire pour une gestion optimisée de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques, tant sur les plans quantitatif que qualitatif (European Union, 2000). Les rivières karstiques sont des systèmes où les échanges entre la rivière et les aquifères sont complexes et peuvent être difficiles à identifier et à quantifier (Bakalowicz, 2005). Ces interactions peuvent être explorées par traçage artificiel (e.g. Jolivet et al., art. 4 de ce numéro) ou par une approche géochimique (Lavastre et al., art. 6 de ce numéro), mais elles peuvent également être caractérisées par leur différences de température (Burkholder et al., 2008). Parmi les outils existants pour échantillonner rapidement et à large échelle la température des rivières, l'InfraRouge Thermique (IRT) aéroporté apparaît particulièrement adapté (Loheide and Gorelick, 2006) et notamment pour l'étude des systèmes karstiques (Pascoletti et al., 2020).

L'IRT par télédétection est utilisé depuis de nombreuses années pour l'étude des hydrosystèmes, que ce soit les océans (e.g. Anding and Kauth, 1970; Bejannin et al., 2017), les lacs (e.g. Anderson et al., 1995) ou les rivières (e.g. Atwell et al., 1971; Torgersen et al., 2001). Lorsqu'il est utilisé sur des hydrosystèmes fluviaux, cet outil permet notamment d'identifier les sources d'eau froide et de quantifier les interactions avec les nappes (Dugdale et al., 2015; Wawrzyniak et al., 2016; Dole-Olivier et al., 2019). Ces images thermiques permettent de quantifier ou modéliser les apports phréatiques vers la rivière, et ce à différentes échelles (Handcock et al., 2006; Cristea and Burges, 2009; Lalot et al., 2015). En revanche, les exemples de l'utilisation de l'IRT pour identifier et quantifier les échanges karstiques sont rares dans la littérature à ce jour. Les développements technologiques et méthodologiques en font pourtant aujourd'hui un outil capable de cartographier les températures de surface sur plusieurs kilomètres linéaires et à haute résolution (Handcock et al., 2012; Dugdale, 2016).

2. Principe

Le principe de l'approche thermique repose sur le contraste de température qui peut exister entre les eaux superficielles (de la rivière) et les eaux souterraines (sources karstiques) (Faux et al., 2001). Ce contraste permet d'identifier distinctement les eaux souterraines lorsqu'elles émergent au niveau de la rivière et atteignent la surface (Ré-Bahuaud et al., 2014).

La température des eaux superficielles est très sensible aux conditions météorologiques (température de l'air, ensoleillement, etc.) et l'amplitude thermique entre la saison hivernale (i.e. sur la Cèze, eaux superficielles pouvant être inférieure à 5°C) et la saison estivale (eaux superficielles pouvant dépasser 28°C) est très importante.

En revanche, la variabilité de la température des eaux souterraines est beaucoup plus faible et progressive. Les amplitudes thermiques enregistrées entre la saison hivernale et estivale sont également très faibles (moins de 2°C pour les sources karstiques de la Cèze). La température des eaux souterraines correspond approximativement à la moyenne des températures annuelles locales, c'est-à-dire entre 13,5 et 14,5°C pour les sources recensées sur cette rivière.

Il est donc nécessaire de respecter certaines contraintes lors de l'acquisition d'images thermiques visant à repérer ses apports d'eau souterraine. Ces apports seront d'autant plus visibles que la différence de température entre les eaux de surfaces et souterraines sera important (i.e. fort contraste thermique) et que la différence de débit entre ces deux sources sera faible (pour cette étude, il est estimé que débit de la Cèze doit être idéalement inférieur à 5 m³/s en entrée des gorges). Les périodes optimales pour

observer des contrastes thermiques sont donc (Handcock et al., 2012) :

- La saison hivernale, à la fin d'une décrue, lorsque la température de la rivière est suffisamment basse. La température des eaux souterraines apparaît comme chaude ;
- La saison estivale, durant une décrue, lorsque la température de la rivière est suffisamment importante. La température des eaux souterraines apparaît comme froide.

3. Acquisition et traitement des données

3.1. Acquisition des images IRT

L'acquisition d'images thermiques aéroportées pour ce projet est directement liée à l'action ZABR thermie pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piégay). La description de l'acquisition et du traitement des images infrarouges thermiques est amplement détaillée dans la thèse de Wawrzyniak (2012). Il s'agit de survoler la zone d'étude en hélicoptère (environ 30 minutes d'acquisition pour la Cèze) et de collecter des clichés sur tout le linéaire de la rivière. Pour les campagnes IRT (13/04/13 et 08/07/13), chaque cliché collecté correspond à un couple de deux images : une image visible (composée de 3 bandes : Rouge, Vert et Bleu) et une image dans le spectre infrarouge thermique (situé entre 7,5 et 14 μm ; Vollmer and Möllmann, 2018). Ce couple d'images (IRT et RVB) permet de mettre en relation des objets géographiques (rivières, ponts, arbres, bâtiments, etc.) avec leurs signatures thermiques. Une fois collectées, ces images sont géoréférencées à l'aide d'un SIG avant d'être mosaïquées (séparément). Cette mosaïque d'images (ou orthothermogramme), représentant une cartographie des températures de surface de la rivière Cèze, est corrigée à l'aide de valeurs de température mesurée *in-situ*. Pour cela, des thermomètres ont été disposés régulièrement le long de la rivière pour enregistrer la température pendant le vol. La relation existante entre la température *enregistrée* et la température *imagée* permet de valider ou, le cas échéant, de corriger les valeurs de température de l'orthothermogramme. A noter que la température des images IRT correspond à une température de surface et n'intègre pas les variations qui peuvent exister au sein de la lame d'eau (Handcock et al., 2012).

3.2. Traitement des images

La mosaïque d'images IRT a été traitée sous SIG afin de représenter et de visualiser le mieux possible les contrastes de température qui existent au sein de la rivière, mais également à l'interface entre eaux souterraines (karstiques) et eaux superficielles (Cèze et affluents).

En plus d'une visualisation en carte des températures de surface, un profil thermique amont/aval a été extrait de la mosaïque d'images thermiques. Ce profil longitudinal de température permet d'apprécier l'influence des apports karstiques sur la température de la rivière. Les taches d'eau froide à la surface de la rivière (pour la campagne estivale) ont été détectées grâce à des outils statistiques sous SIG (voir Marteau and Piégay, 2018). Elles permettent d'identifier rapidement les apports d'eau froide et de différencier les différentes sources en fonction de leur différence de température (i.e. les apports karstiques étant plus froids que les recyclages locaux de l'eau de la rivière par les bancs alluviaux).

En plus des variations saisonnières, la température de l'eau varie au cours de la journée et atteint son minimum au moment du levé du soleil et son maximum en fin d'après midi. Une campagne hivernale offrira donc des contrastes thermiques plus importants le matin (ex. Eschbach et al., 2017) tandis qu'une campagne estivale visera à acquérir des données en fin d'après-midi (ex. Wawrzyniak et al., 2013). Ainsi, deux campagnes d'acquisition ont été réalisées pour cette étude, l'une le 13 avril 2013 entre 8H00 et 9H00 correspondant à une situation hydrologique de hautes eaux, et l'autre le 08 juillet 2013 entre 19H00 et 20H00 correspondant à une situation hydrologique de moyennes eaux.

3.3. Estimation des débits des sources

Définir le débit des sources karstiques est relativement difficile (Bakalowicz, 2005). Le différentiel de température entre l'amont et l'aval des resurgences peut être utilisé pour aborder cette problématique (ex. Anderson, 2005; Burkholder et al., 2008) bien que l'utilisation de données IRT pour appliquer ce genre d'approche reste rare. D'après le principe de conservation de la masse et de la quantité de chaleur, et en supposant que pour un mélange rapide des eaux, la température peut s'apparenter à un traceur des flux en rivière (Becker et al., 2004; Anderson, 2005). Il est possible d'écrire le système d'équations décrivant ce mélange entre l'eau issue de la rivière et l'eau issue du Karst de la manière suivante :

$$Q_1 * T_1 + Q_2 * T_2 = Q_3 * T_3 \quad (1)$$

d'après la loi de conservation de la quantité de chaleur, et

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \text{ soit } Q_1 = Q_3 - Q_2 \quad (2)$$

d'après la loi de conservation de la masse.

Au regard des relations qui existent entre les équations (1) et (2), estimer le débit de l'apport souterrain à partir de l'équation suivante :

$$Q_1 * T_1 + Q_2 * T_2 = (Q_1 + Q_2) * T_3 \quad (3)$$

On obtient alors les équations (4) et (5) :

$$Q_2 = Q_1 * \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_3} \quad (4)$$

$$\text{soit } Q_2 = Q_3 * \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

avec les variables suivantes :

T_1 : Température mesurée de la Cèze à l'amont l'émergence karstique ;

T_2 : Température mesurée de l'eau émergente ;

T_3 : Température mesurée de la Cèze à l'aval de l'émergence karstique et au-delà de la distance d'homogénéisation des eaux ;

Q_1 : Débit mesuré de la Cèze en amont de l'émergence karstique ;

Q_2 : Débit calculé de l'émergence qui est l'inconnu ;

Q_3 : Débit calculé de la rivière à l'aval de l'émergence.

4. Résultats

4.1. Campagne de mesure d'avril 2013

La première campagne d'acquisition IRT avait un but essentiellement prospectif. Elle a notamment permis d'identifier les problèmes et contraintes liés à la méthode dans la perspective d'optimiser les campagnes d'acquisition suivantes (Figure 1).

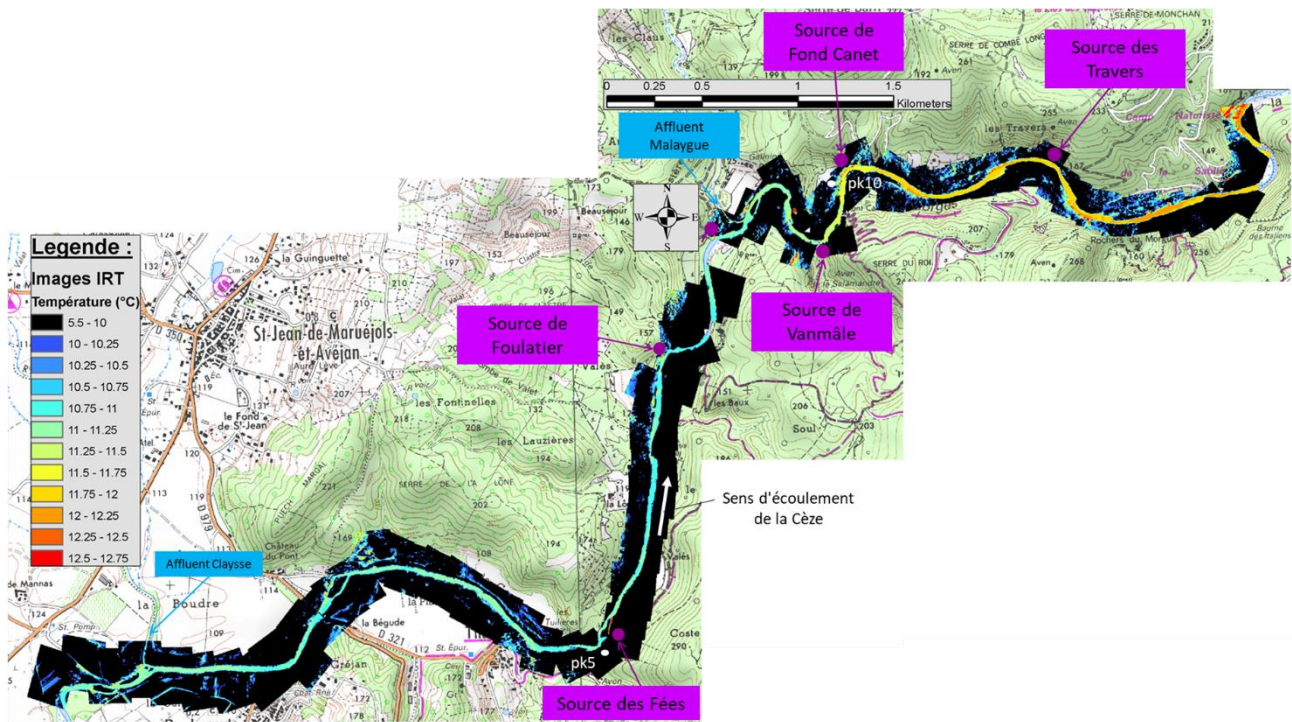


Figure 1 : Emprise des campagnes aéroportées juillet 2013 : images IRT entre le pont de Rochegude et la source karstique des Travers
 Airborne campaign area in July 2013: TIR images from Pont de Rochegude to Travers spring

Néanmoins, les résultats obtenus apportent des éléments intéressants dans la perspective d'une comparaison entre campagne hivernale et campagne estivale. Puisque la température de l'eau de la Cèze est, en moyenne, plus faible que la température des sources karstiques, l'influence des karsts sur le profil de température résulte en une augmentation de la température moyenne (Figure 2). En revanche, les niveaux d'eau élevés n'ont pas permis de mesurer les débits de la rivière. Les températures issues des images n'ont donc pas pu être utilisées pour tenter de déterminer le débit de ces sources. Dans le cas où les débits de la rivière sont assez faibles, il est possible de chercher à identifier les taches d'eau « chaude » à la surface de l'eau pour localiser les apports karstiques ou phréatiques (ex. Eschbach et al., 2017).

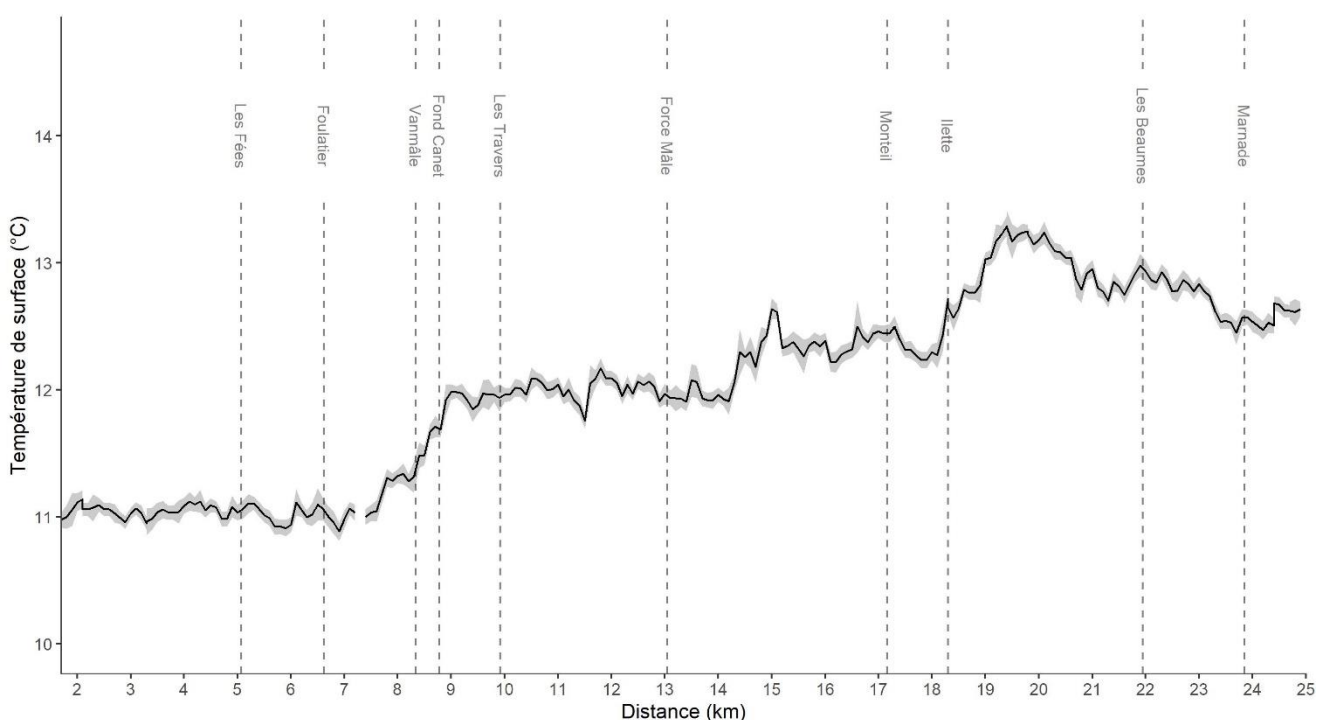


Figure 2 : Profil longitudinal de température de surface de la Cèze pour la campagne d'avril 2013.
Longitudinal temperature profile of the Cèze River from the April 2013 campaign.

4.2. Campagne de juillet 2013

La seconde campagne a été réalisée le 08 juillet 2013 entre 19H00 et 20H00, au moment où la température des eaux de la rivière était maximale avec pour effet de maximiser le contraste de température entre la rivière (entre 27,5 et 26°C) et les sources (entre 13 et 15°C). Le débit de la rivière à l'entrée des gorges était plus faible (environ 2,44 m³/s, situation de moyennes eaux) que lors de la première campagne. Enfin, les artefacts liés à la végétation étaient plus facilement identifiables puisque la température des feuilles était supérieure à 28°C. Le risque de confusion possible avec des apports souterrains est diminué par rapport à la campagne précédente. Les résultats de cette campagne sont présentés ci-après sous forme d'exemples localisés des apports souterrains.

4.2.1. Exemple de la source des Fées en entrée des gorges

Exemple de l'influence thermique d'une émergence karstique

La Figure 3 est un exemple dont l'image thermique est située à l'entrée des gorges, au niveau de la confluence entre la source des Fées et la rivière Cèze. Lors de la campagne du 08/07/13, le débit de la Cèze, mesuré à l'entrée des gorges (après les pertes de Rohegude), était d'environ 2,44 m³/s. Le débit de la source des fées a été évalué à 0,08 m³/s en effectuant une conversion hauteur/débit. La hauteur d'eau est lue sur une échelle limnimétrique disposée en cavité à l'exutoire de la source qui se trouve à la sortie de la grotte des Fées. La conversion hauteur-débit a été effectuée à partir d'une courbe de tarage établie à partir de mesures au micromoulinet.

Sur le secteur amont, situé entre l'entrée des gorges, au niveau de la confluence entre la source des Fées, et la rivière Cèze, la température de surface de la rivière a été mesurée entre 25°C et 27,5°C, contre 16 à 20°C pour les eaux souterraines (Figure 3). Dans les faits, les eaux souterraines apparaissent plus chaudes qu'elles ne le sont à leur sortie car elles sont mesurées ici lorsqu'elles atteignent la surface. Le réchauffement des eaux souterraines au contact avec l'atmosphère et le substrat (voire quelques échanges possibles avec les eaux superficielles par endroit) est très rapide.

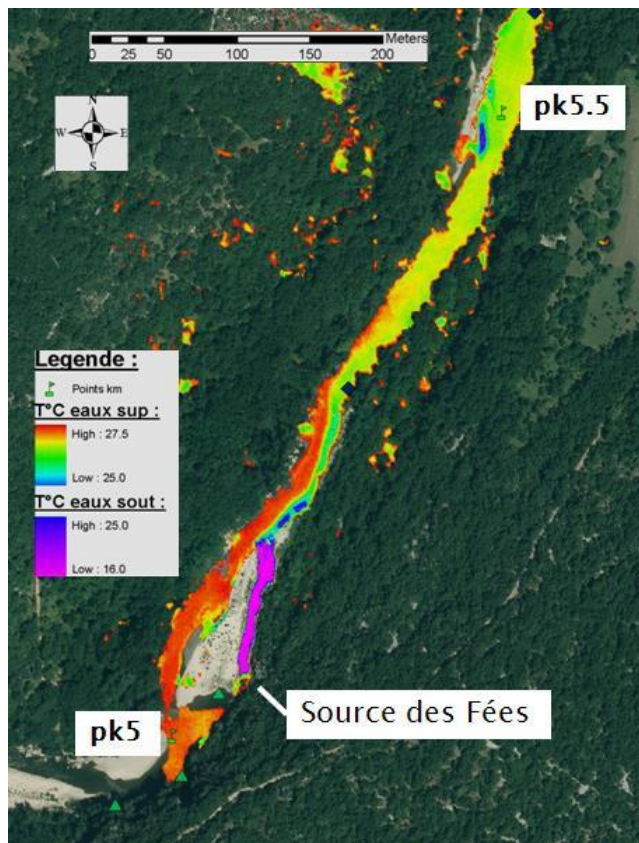


Figure 3 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source des Fées (entrée des gorges, entre pk 5 et 5,5). Fond de carte issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C (correspondant à la végétation et aux bancs de galets) ont été supprimées.

TIR image from 08/07/13 at "Les Fées" spring (gorge entrance, between km 5 and 5.5). Base map from BD-ORTHO database. Temperatures above 27.5°C (corresponding to vegetation and pebble banks) have been removed.

L'émergence des Fées est observable sur la Figure 3 par ce « panache » d'eau froide. Celui-ci s'écoule sur quelques mètres puis se mélange peu à peu avec les eaux de la Cèze. La distance d'homogénéisation des températures, correspondant au mélange des eaux, est d'environ 250 m. Cette information est utile pour optimiser l'échantillonnage des eaux pour des analyses hydrogéochimiques puisqu'elle permet d'éviter d'échantillonner des singularités locales, qui ne représenteraient pas les échanges entre karst et rivière qui ont réellement lieux.

Estimation des débits des sources par calcul de proportion de mélange

Les différents paramètres utilisés pour estimer les débits de la source des Fées sont issus des mesures de terrain (pour les débits) et extraits des images thermiques (pour la température) (Tableau 3).

Débits (m ³ /s)			Températures (°C)		
Q ₁	Q ₂	Q ₃	T ₁	T ₂	T ₃
2,44	0,08 / 0,092	2,532	27,3	13,6	26,8

Tableau 3 - Valeurs *mesurées*, *estimées* et calculées à la date du 08/07/13 pour la source des Fées.

Measured, estimated and calculated values on 08/07/13 at the source des Fées.

En appliquant l'équation (3) présentée dans la section 3.3., on obtient un débit Q_2 de source d'environ $0,092 \text{ m}^3/\text{s}$; le débit de la Cèze plus à l'aval est donc de $Q_3 = 2,532 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette estimation grossière des apports souterrains est entachée de nombreuses incertitudes et est très sensible aux variations des paramètres de l'équation de mélange (Becker et al., 2004). Toutefois, le débit calculé pour cette source ($0,092 \text{ m}^3/\text{s}$) est similaire à la valeur estimée grâce à l'échelle limnimétrique ($0,080 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour les autres sources plus à l'aval, les débits sont impossibles à estimer par cette méthode de calcul car il est nécessaire de connaître le débit de la Cèze à l'amont des émergences ; or celui-ci n'a été mesuré que pour la source des Fées. Par ailleurs, certaines configurations ne permettent pas l'application de ce genre de calcul, notamment lorsque le niveau de la rivière est influencé par un seuil (naturel ou anthropique). Le mélange des eaux se fait alors plus lentement et une stratification thermique verticale peut être observée (cas par exemple des sources de Marnade et de Font Canet). Cette stratification ne peut pas être perçue par les images IRT, qui ne mesurent que la température de surface. Les eaux froides (ex. issues du karst) sont plus denses et ont tendance à rester au fond dans les zones de hauts-fonds (i.e. lame d'eau de plus d'un mètre d'épaisseur).

4.2.2. Exemple des sources de Monteil et de l'Ilette (milieu des gorges)

La résurgence de Monteil génère un panache d'eau froide visible sur plusieurs centaines de mètres (Figure 4). Cette source est particulièrement intéressante car elle dévoile deux sorties froides distinctes :

- une sortie principale, située à l'amont, qui a fait l'objet de nombreuses mesures de débits au micromoulinet. Les débits y sont très variables au cours de l'année et peuvent facilement dépasser $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en période de hautes eaux, et descendre en dessous de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en basses eaux ;
- une sortie secondaire, située plus à l'aval, qui semble correspondre à l'exfiltration d'une partie du débit de cette même source à travers le banc de galet. La signature thermique froide est particulièrement marquée mais elle ne permet pas d'estimer le débit en question. Après vérification sur le terrain, ces débits apparaissent assez faibles ($< 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$) et la signature thermique apparaît marquée du fait que le courant est très faible à cet endroit.

Ces résultats illustrent le fait que les débits de jaugeage mesurés jusqu'alors ne représentent en réalité que des débits minimum apparents. En effet, une partie du débit de fuite, bien que modeste, n'est pas pris en compte dans la mesure. En ce sens, l'approche thermique renseigne plus précisément (d'un point de vue qualitatif) sur le caractère plus ou moins diffus des apports d'une source. Elle permet de localiser différents griffons d'une même source mais elle peut aussi, dans certains cas, permettre d'identifier des débits de fuite des sources (ex. source de Marnade, des Baumes, de la Fabrique).

Une tache d'eau froide de petite taille est observable au niveau de la queue du banc de galets situé en rive droite, au droit de la résurgence de la source de Monteil (pk 16,6 environ). Ce panache correspond probablement à une exfiltration des eaux de la Cèze à travers le banc. En effet, les structures sédimentaires sur les rivières à galets ont la propriété de tamponner la température des eaux de surface qui s'infiltre à l'amont et ressort à l'aval des bancs (ex. Dole-Olivier et al., 2019). De la même manière que pour l'échantillonnage hydrogéochimique, les images IRT peuvent servir à guider l'échantillonnage biologique et ainsi s'assurer de la représentativité des résultats.

Le calcul de débit n'est pas possible pour cette source de Monteil car le débit de la Cèze à l'amont de la source n'est pas connu. Il est cependant possible d'estimer la proportion (pourcentage) d'eaux souterraines (source) vis-à-vis de l'eau superficielle (Cèze). En appliquant l'équation (4) pour un débit

Q_3 de 100%, on obtient une proportion d'eaux souterraines « froides » d'environ 6,5%. A titre de comparaison, la proportion calculée pour la source des Fées était d'environ 3,6%.

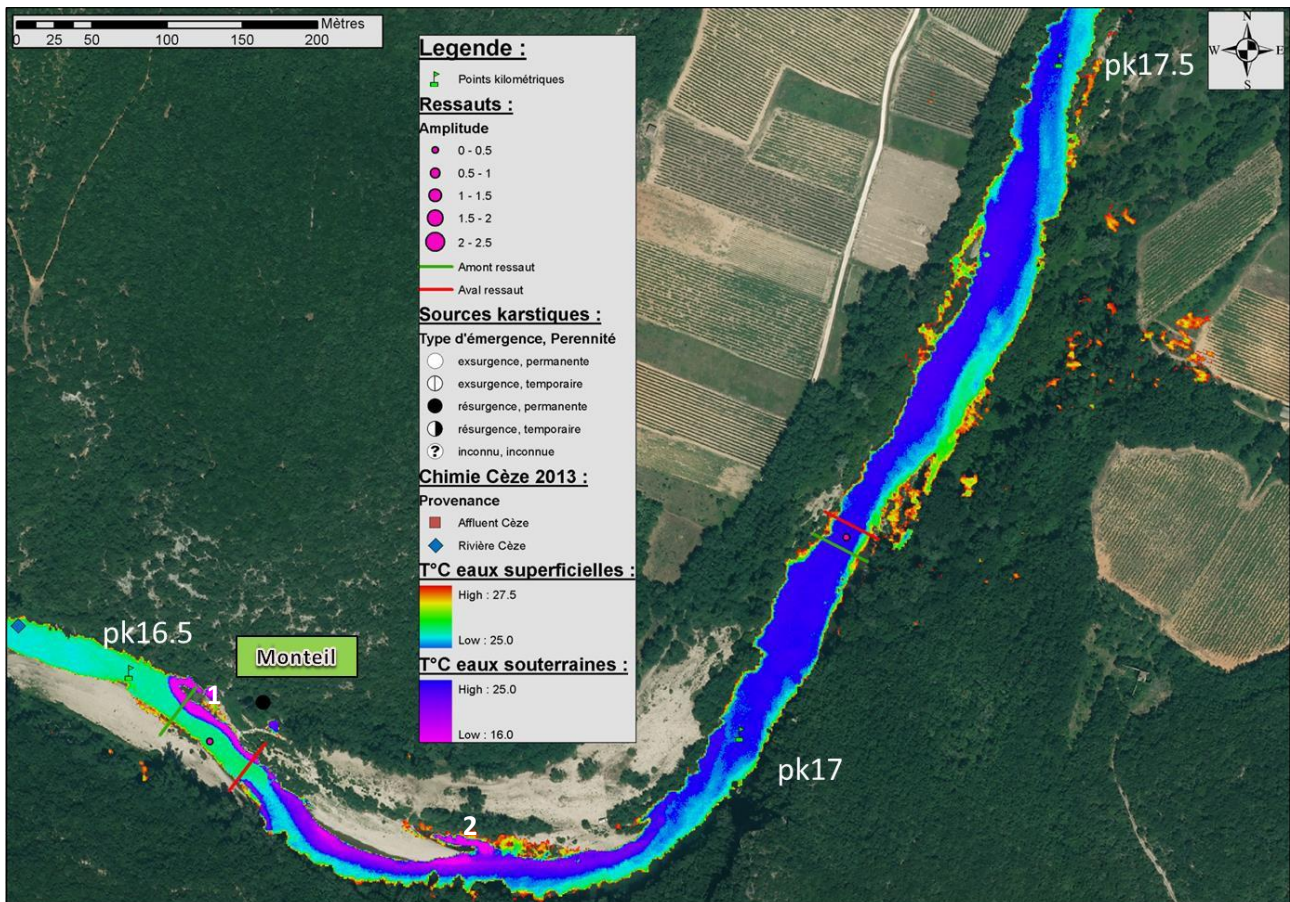


Figure 4 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de Monteil (entre les pk 16,5 et 17). Fond de carte issu de la BD-ORTHO (IGN). Les températures supérieures à 27,5°C (correspondant à la végétation et aux bancs de galets) ont été supprimées ; 1. Section de jaugeage (résurgence) ; 2. Section non jaugeée (résurgence secondaire).

TIR image from 13/07/08 at Monteil spring (between km 16.5 and 17). Base map from BD-ORTHO database (IGN). Temperatures above 27,5°C (corresponding to vegetation and pebble banks) have been removed; 1. Gauging section (resurgence); 2. Ungauged section (secondary resurgence).

La source de l'Ilette (Figure 5) n'avait jamais été identifiée jusqu'alors. La température particulièrement fraîche des eaux est typique d'apports souterrains. Cependant, étant donné sa localisation en aval d'un seuil, il est légitime de s'interroger sur l'origine de cette eau souterraine. Est-elle issue d'un recyclage localisé des eaux de la rivière ou draine-t-elle une partie du plateau karstique ?

La conductivité mesurée pour cette source ($EC = 492 \mu S/cm$) est sensiblement supérieure à celle de la Cèze plus à l'amont ($435 \mu S/cm$). Cet écart de $57 \mu S/cm$ semble indiquer qu'au moins une partie des eaux est d'origine karstique. Il est très probable, compte tenu de la configuration locale, que les eaux qui constituent la source de l'Ilette soient un mélange entre les eaux de la Cèze et des eaux du karst.

La proportion de mélange calculée pour l'Ilette est beaucoup plus modeste que pour les sources de Monteil et des Fées, et correspond à environ 1% du débit de la Cèze.

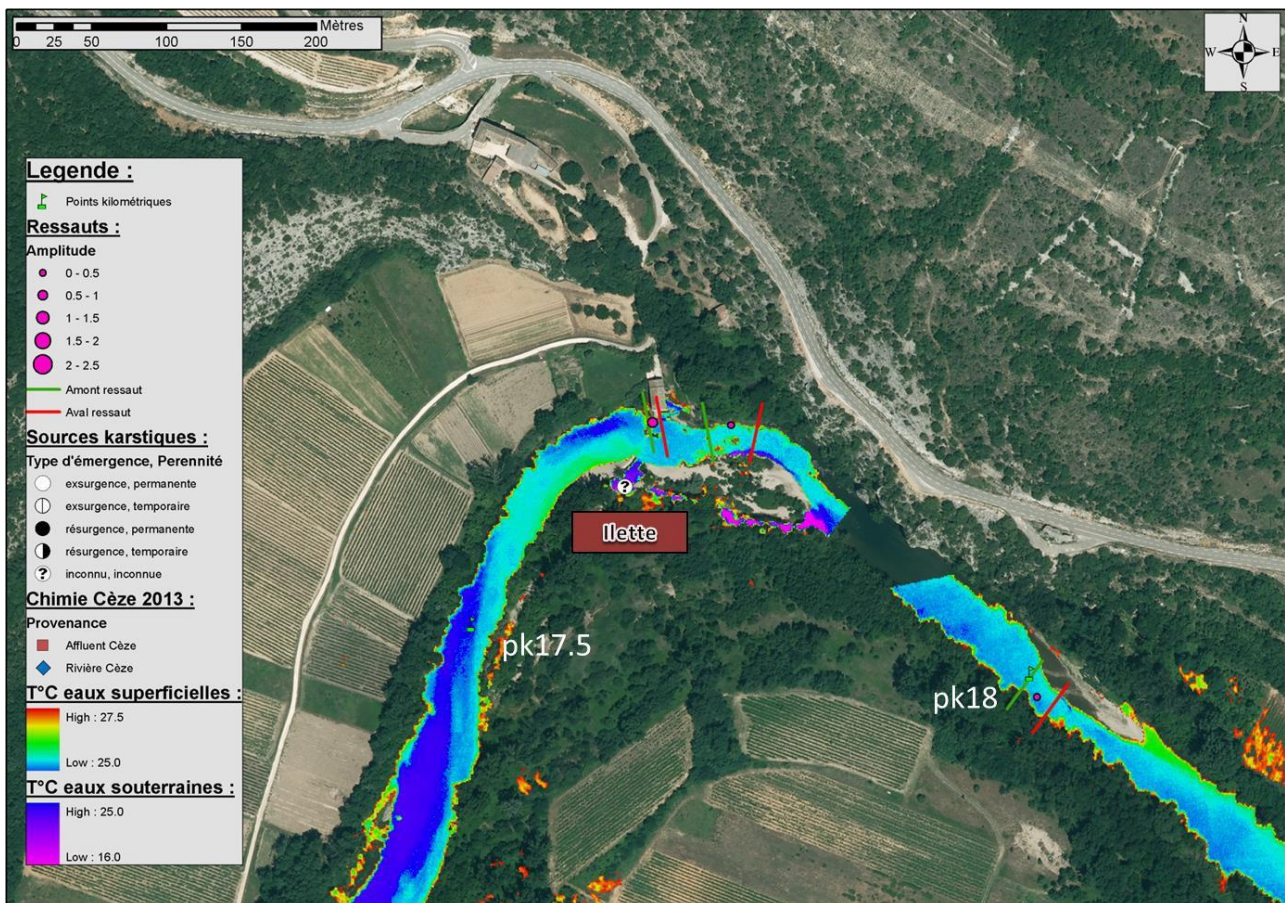


Figure 5 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de l'Ilette (entre les pk 17,5 et 18). Fond de carte issu de la BD-ORTHO (IGN). Les températures supérieures à 27,5°C (correspondant à la végétation et aux bancs de galets) ont été supprimées. Conductivité électrique de la Cèze à l'amont de la source Ilette : 435 μ S/cm ; à l'aval : 492 μ S/cm.

TIR image from 08/07/13 at Ilette spring (between km 17.5 and 18). Base map from the BD-ORTHO (IGN). Temperatures above 27.5 ° C (corresponding to vegetation and pebble banks) have been removed. Electrical conductivity in the Cèze upstream of the Ilette spring: 435 μ S / cm; downstream: 492 μ S / cm.

4.2.3. Etude du profil longitudinal de température de la Cèze

Le profil longitudinal de température (Figure 6) représente la température médiane du chenal principal de la Cèze issue de l'orthothermogramme. Les cercles représentent les taches d'eau froides telles qu'elles ont été recensées à la surface. Ce profil illustre le rôle des gorges et des apports souterrains dans la régulation de la température des eaux de la Cèze.

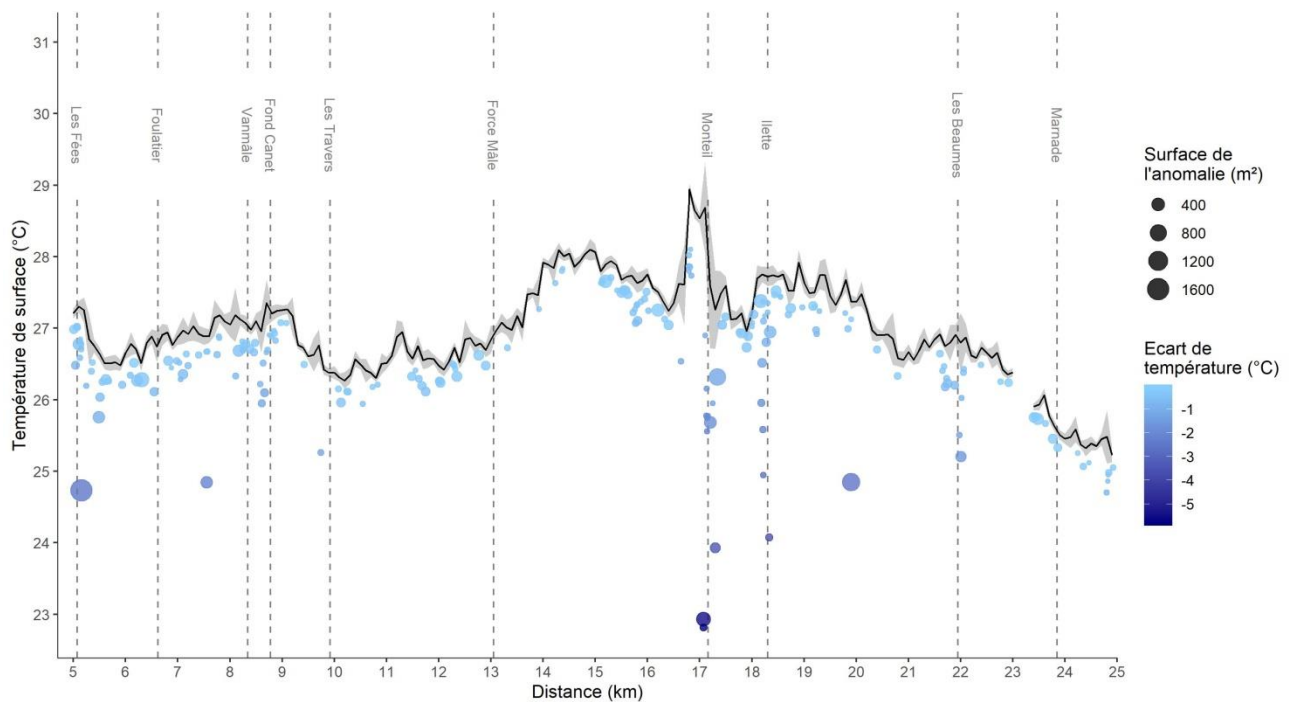


Figure 6 : Profil longitudinal de température de la Cèze, issu de l'extraction de l'orthothermogramme, entre les pk 5 et 25. Les lignes verticales indiquent la présence des sources karstiques.

Longitudinal temperature profile of the Cèze River, extracted from the orthothermograph, between km 5 and 25. Vertical lines indicate position of karstic springs.

D'une manière plus générale, l'analyse de l'intégralité des images IRT a permis de mettre en évidence plusieurs anomalies thermiques qui laissent apparaître quelques apports du karst vers la rivière. Cependant, il est difficile de quantifier systématiquement la proportion de ces échanges. Certaines de ces anomalies thermiques sont assez faibles et relativement localisées et peuvent correspondre, par endroits, à des recyclages locaux des eaux de la rivière à travers ses alluvions (ex. faible écart de température, Figure 6). Les taches les plus importantes sont généralement liées à la présence d'une source karstique, tandis que les exfiltrations en aval de bancs sont de plus petite taille. Enfin, la longueur des taches (non représentées ici) informent sur la qualité du mixage et la distance d'homogénéisation en aval des resurgences.

Pour finir, l'un des avantages de la cartographie des températures de surface est la possibilité d'intégrer les éléments obtenus dans un contexte spatial (Figure 7). Ainsi, il est possible d'observer la distribution de ces apports et de l'étudier dans un contexte plus large ; alternance de méandres, présence d'affluents, largeur du fond de vallée, présence de seuils ou d'ouvrages d'art, etc.

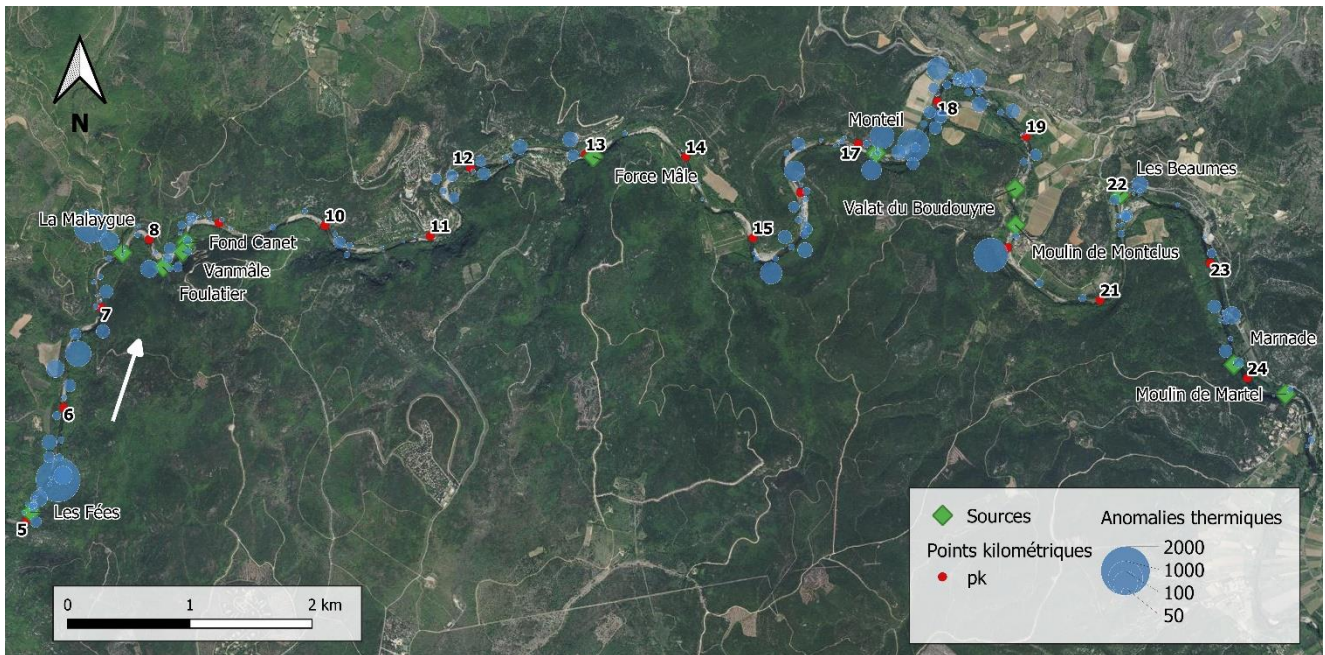


Figure 7 : Distribution des taches d'eau froide (ou anomalies thermiques) le long du secteur de la Cèze imagée pour cette étude.

Distribution of cold water patches (or thermal anomalies) along the Cèze River section surveyed for this study.

5. Discussion

5.1. Limites et contraintes de l'approche IRT

L'approche IRT aéroporté présente cependant quelques limites d'application. Elle est assez sensible aux forçages extérieurs, comme le rayonnement solaire par exemple (ou les conditions météorologiques plus généralement). Les campagnes de mesure doivent être planifiées dans des conditions optimales afin de faciliter l'interprétation des clichés et de maximiser la qualité des résultats. Ainsi, il faut s'assurer d'avoir un contraste de débit et de température suffisant entre eaux superficielles et souterraines. Ces contraintes, en plus du caractère onéreux que peut représenter l'investissement matériel lorsque celui-ci n'est pas déjà acquis, rendent difficile un suivi saisonnier régulier. En mesurant la température de surface, l'IRT ne permet pas de caractériser les échanges dans le sens eaux superficielles vers eaux souterraines, alors que ces échanges ne sont pas unilatéraux (en particuliers dans un contexte karstique). L'identification des apports diffus et de leurs origines est également une tâche difficile sans connaissances du terrain. La quantification des apports souterrains est sujette à de nombreuses sources d'incertitudes qui nécessitent d'être appréhendées correctement. De plus, l'IRT apporte une cartographie thermique à un instant donné et ne fournit pas d'informations temporelles sur les échanges observés. Enfin, l'IRT est un outil qui nécessite du matériel onéreux et une certaine maîtrise d'outils et de logiciels, limitant son applicabilité à des suivis très fréquents.

5.2. Avantages de l'approche thermique pour l'étude des systèmes karstiques

Les avantages et les inconvénients de l'IRT pour caractériser la température de surface des rivières sont déjà recensés dans la littérature (voir notamment Handcock et al., 2012; Dugdale, 2016). En revanche, peu de cas existent illustrant l'utilisation de cet outil pour l'étude de systèmes karstiques (voir Pascoletti et al., 2020). Les relevés thermiques aéroportés sur la Cèze ont permis de mettre en évidence un certains nombres de bénéfices que cet outil peut apporter à l'étude des rivières karstiques.

5.2.1. Identifier les différents types d'apports d'eau froide

Grâce à la résolution et la précision des images thermiques obtenues, il a été possible de déterminer le caractère ponctuel ou diffus des apports souterrains issus du karst, et de les localiser de manière précise. Cette approche offre donc la possibilité de cartographier la diversité d'habitats thermiques recensés à l'échelle de la rivière. De plus, des anomalies thermiques pourtant moins marquées et de tailles différentes ont pu être observées, notamment au niveau des bancs. Ces exfiltrations, généralement issues d'un recyclage des eaux de surface infiltrées en amont, représentent des habitats intéressants pour la faune et la flore et sont généralement recherchés lors de campagnes d'échantillonnage (voir §5.1.4.). Bien qu'elles soient moins froides et que leur influence sur le profil de température soit moins grande, leur fréquence et distribution en font des habitats potentiellement importants à l'échelle de la rivière. Leur identification par des techniques plus traditionnelles est parfois difficile et peut engendrer des erreurs d'interprétation ou d'estimation des débits de sources (Kalbus et al., 2006).

5.2.2. Caractériser ces apports karstiques de manière plus fine

De nouvelles sources jusqu'ici non identifiées ont été observées sur les images thermiques (par exemple, la source nouvellement nommée « Ilette » dont la présence a pu être confirmée par une reconnaissance sur le terrain). D'autres sources déjà répertoriées ont pu être caractérisées plus précisément, en identifiant des griffons secondaires par exemple. Ces observations incitent par ailleurs à relativiser les mesures de débits (micromoulinet) qui ont pu être réalisées jusqu'alors. Enfin, la comparaison de campagnes de mesure à des saisons différentes (avril et juillet) a permis de démontrer l'applicabilité de l'outil IRT, aussi bien en période hivernale qu'en période estivale, pour la caractérisation des rivières karstiques.

5.2.3. Améliorer la compréhension du fonctionnement thermique général

L'étude du profil longitudinal de température de la Cèze a permis de mieux appréhender le fonctionnement thermique de la rivière, en période estivale notamment. Il a souligné le rôle joué par ces apports du karst sur la régulation des températures de la rivière, et ce à une échelle plus large que des approches plus classiques n'auraient pas permises. De plus, la dimension 2D de cette méthode a permis de déterminer la distance d'homogénéisation des eaux en aval des résurgences. Cette information est particulièrement importante pour planifier des campagnes d'échantillonnages hydrogéochimiques. Enfin, représenter la distribution des apports dans leur contexte spatial permet de mieux appréhender les facteurs géographiques, topologiques voire géologiques qui peuvent également influencer le comportement thermique de la rivière.

5.2.4. Une aide pour une meilleure caractérisation de la biodiversité

Au-delà de la compréhension du fonctionnement de ces rivières, repérer et identifier les apports d'eau froide permet de refléter la diversité potentielle de ces hydrosystèmes particuliers (Dole-Olivier et al., 2019). Sur la Cèze, la biodiversité des macroinvertébrés est fortement enrichie par la faune vivant dans ces zones contacts entre l'aquifère et la rivière (Marmonier et al., 2019). Or, les études cherchant à la caractériser sont peu fréquentes dans la littérature du fait des difficultés liées au repérage, à l'échantillonnage et à l'identification de ces organismes (Ward and Tockner, 2001; Marmonier et al., 2019). Identifier ces « habitats thermiques » à l'échelle de plusieurs kilomètres peut ainsi faciliter la planification de campagnes d'échantillonnage.

6. Conclusion

Malgré les difficultés liées aux contraintes de la méthode, l'utilisation de l'IRT sur la Cèze a permis d'améliorer les connaissances sur les apports d'eau froide issue des karsts. L'aspect spatialement étendu

de la méthode a permis d'affiner l'estimation des débits de ces sources et d'identifier quelques particularités locales (exfiltrations de bancs, distance d'homogénéisation, etc.) ainsi que de nouveaux phénomènes jusqu'ici inconnus (ex. source de l'Ilette). L'IRT permet également d'améliorer les mesures de débit des sources en quantifiant l'importance relative de ces différents apports. Il se révèle particulièrement intéressant comme outil de diagnostic initial d'un site d'étude en vue d'optimiser les campagnes de mesures associées, qui peuvent viser à caractériser les apports souterrains, que ce soit hydrogéochimique ou biologique.

Bibliographie

- Anderson JM, Duck RW, McManus J. 1995. Thermal radiometry: a rapid means of determining surface water temperature variations in lakes and reservoirs. *Journal of Hydrology* **173** : 131–144. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02714-Z
- Anderson MP. 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* **43** : 951–968. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Anding D, Kauth R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment* **1** : 217–220. DOI: 10.1016/S0034-4257(70)80002-5
- Atwell BH, MacDonald RB, Bartolucci LA. 1971. Thermal Mapping of Streams From Airborne Radiometric Scanning. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **7** : 228–243. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1971.tb05904.x
- Bakalowicz M. 2005. Karst groundwater: A challenge for new resources. *Hydrogeology Journal* **13** : 148–160. DOI: 10.1007/s10040-004-0402-9
- Becker MW, Georgian T, Ambrose H, Siniscalchi J, Fredrick K. 2004. Estimating flow and flux of ground water discharge using water temperature and velocity. *Journal of Hydrology* **296** : 221–233. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.025
- Bejannin S, van Beek P, Stieglitz T, Souhaut M, Tamborski J. 2017. Combining airborne thermal infrared images and radium isotopes to study submarine groundwater discharge along the French Mediterranean coastline. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **13** : 72–90. DOI: 10.1016/j.ejrh.2017.08.001
- Burkholder BK, Grant GE, Haggerty R, Khangaonkar T, Wampler PJ. 2008. Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA. *Hydrological Processes* **22** : 941–953.
- Cristea NC, Burges SJ. 2009. Use of Thermal Infrared Imagery to Complement Monitoring and Modeling of Spatial Stream Temperatures. *Journal of Hydrologic Engineering* **14** : 1080–1090. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000072 [online] Available from: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000072>
- Dole-Olivier MJ, Wawrzyniak V, Creuzé des Châtelliers M, Marmonier P. 2019. Do thermal infrared (TIR) remote sensing and direct hyporheic measurements (DHM) similarly detect river-groundwater exchanges? Study along a 40 km-section of the Ain River (France). *Science of the Total Environment* **646** : 1097–1110. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.294 [online] Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.294>
- Dugdale SJ. 2016. A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **3** : 251–268. DOI: 10.1002/wat2.1135 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/wat2.1135>
- Dugdale SJ, Bergeron NE, St-Hilaire A. 2015. Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment* **160** : 43–55. DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.021
- Eschbach D, Piasny G, Schmitt L, Pfister L, Grussenmeyer P, Koehl M, Skupinski G, Serradj A. 2017. Thermal-infrared remote sensing of surface water-groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). *Hydrological Processes* **31** : 1113–1124. DOI: 10.1002/hyp.11100
- European Union. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities* **L237** : 1–73.
- Faux RN, Lachowski H, Maus P, Torgersen CE, Boyd MS. 2001. New approaches for monitoring stream temperature: Airborne thermal infrared remote sensing. *Project Report: Integration of Remote Sensing* : 29.
- Handcock RN, Gillespie AR, Cherkauer KA, Kay JE, Burges SJ, Kampf SK. 2006. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment* **100** : 427–440. DOI: 10.1016/j.rse.2005.07.007

- Handcock RN, Torgersen CE, Cherkauer KA, Gillespie AR, Tockner K, Faux RN, Tan J. 2012. Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* : 85–113. DOI: 10.1002/9781119940791.ch5
- Kalbus E, Reinstorf F, Schirmer M. 2006. Measuring methods for groundwater – surface water interactions : a review. *Hydrology and Earth System Sciences* **10** : 873–887.
- Lalot E, Curie F, Wawrzyniak V, Baratelli F, Schomburgk S, Flipo N, Piégay H, Moatar F. 2015. Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging. *Hydrology and Earth System Sciences* **19** : 4479–4492. DOI: 10.5194/hess-19-4479-2015
- Loheide SP, Gorelick SM. 2006. Quantifying stream-aquifer interactions through the analysis of remotely sensed thermographic profiles and in situ temperature histories. *Environmental Science and Technology* **40** : 3336–3341. DOI: 10.1021/es0522074
- Marmonier P, Dole-Olivier M-J, Châtelliers MC des, Chapuis H, Re-Bahuaud J, Johannet A, Cadilhac L. 2019. Contribution des zones d'échanges entre eau de surface et eau souterraine à la biodiversité des hydrosystèmes : exemple d'une rivière méditerranéenne, la Cèze Contribution of the surface water - groundwater interfaces to river biodiversity: example of a Me. *Physio-Géo* **13** : 75–90. DOI: 10.4000/physio-geo.7718
- Marteau B, Piégay H. 2018. Relevés thermiques aéroportés sur les rivières Buëch et Drac - Rapport de synthèse pour le département des Hautes-Alpes
- Pascoletti Y, Paran F, Graillot D, Cadilhac L. 2020. Interactions Karst/Rivière - Guide méthodologique. : 128.
- Ré-Bahuaud J, Graillot D, Paran F, Chapuis H. 2014. Identification des échanges entre karst et rivière – Analyse comparée d'images Infra Rouge Thermiques (IRT) et de profil de conductivité sous SIG. 1–9 pp.
- Torgersen CE, Faux RN, McIntosh BA, Poage NJ, Norton DJ. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* **76** : 386–398. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00186-9
- Vollmer M, Möllmann K-P. 2018. Infrared Thermal Imaging - Fundamentals, Research and Applications . 2nd Editio. Wiley-VCH: Weinheim, Germany
- Ward J V., Tockner K. 2001. Biodiversity: towards a unifying theme for river ecology. *Freshwater Biology* **46** : 807–819. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2001.00713.x [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2427.2001.00713.x>
- Wawrzyniak V. 2012. Etude mutli-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône, Université Jean Moulin, Lyon 3
- Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Goma R, Grandjean P. 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. *Remote Sensing of Environment* **175** : 337–348. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.050
- Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Grandjean P. 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing* **34** : 4812–4831. DOI: 10.1080/01431161.2013.782113

Remerciements

Nous tenons à remercier les collègues de l'ENS Lyon de biogéophyle de l'UMR 5600 EVS (Environnement, Ville et Société) qui ont pris en charge les campagnes aéroportées.