

Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique.

Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30)

Rapport Années 1 et 2 (2013 - 2014)

Juin 2014

Actions n°39 et début 43 du Programme 2013 – début 2014
au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR



UMR 5600 EVS (Environnement, Ville et Société) avec le Département GSE (Géo-Sciences et Environnement) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne) et avec l'ENS (Ecole Normale Supérieure) Lyon ;

UMR 7300 ESPACE avec l'Université Sophia Antipolis et avec l'EMA (Ecole des Mines d'Alès) ;

UMR 5023 LEHNA (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés) avec l'Université Lyon I.



FICHE SIGNALÉTIQUE

Destinataire du document : AE-RMC, ZABR

Coordonnées complètes :

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC) 2-4, Allée de Lodz 69 363 Lyon Cedex 07 ;

- Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) 66, boulevard Niels Bohr - BP 2132 - 69 603 Villeurbanne Cedex.

Interlocuteur : Laurent Cadilhac

Date : Juin 2014

Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique. Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30)

Statut du rapport : **Version provisoire** ☺
 Version intermédiaire ○
 Version de travail ○
 Version finale ○

Auteurs :

- UMR 5600 EVS – EMSE – Département Géo-Sciences et Environnement (Jordan Ré-Bahuaud, Didier Graillot, Frédéric Paran et Hervé Chapuis) ;
- UMR 5023 LEHNA – Université Lyon I – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier) ;
- UMR 7300 ESPACE – Université Sophia Antipolis Nice (Joël Jolivet) ;
- UMR 7300 ESPACE – EMA – LGEI (Anne Johannet et Michaël Savary).

Financements complémentaires : aucun, p.m. allocation de recherche financée par l'EMSE.

Nombres d'exemplaires édités : fichier pdf

Diffusion : Agence de l'eau RMC, ZABR et partenaires du projet

Nombres de volumes : 2 (dont 1 pour les annexes)

Nombres de pages du rapport hors annexes : 113

Nombre d'annexes : 15

Mots clés : écoulements souterrains en milieu karstique, eaux de surface, échanges karst/rivière, hydrologie, métrologie, hydrogéologie, thermie IRT, traçages artificiels, biologie invertébrés souterrains, hydrogéochemie, modélisation réseaux neuronaux.

Ce projet de recherche se déroule sur une durée de 3 années (années 1, 2 et 3) de 2013 à 2015 et est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC). En parallèle du projet, un sujet de thèse a débuté en octobre 2013 et s'étale sur une durée de 3 ans.

Personnes responsables et référentes :

Pierre Marmonier (UMR-CNRS LEHNA, Université de Lyon) ;
Bernard Guy et Didier Graillot (Géo-Sciences et Environnement, Ecole des Mines de Saint-Etienne) ;
Sandra Perez et Joël Jolivet (UMR « Espace ») ;
Anne Johannet, Bernard Vayssade et David Salze (EMA, LGEI) ;
Véronique Lavastre (UJM) ;
Adriano Mayer (EMMAH) et Olivier Radakovitch (CEREGE).

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

Cinq UMR dont sept équipes de recherche sont principalement impliquées dans cette action de recherche :

- l'UMR 5023 LENAHE (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés) avec l'Université Lyon I.
- l'UMR 5600 EVS (Environnement, Ville et Société) avec le Département GSE (Géo-Sciences et Environnement) du Centre SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels) de l'ENSM-SE (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne) et avec l'ENS (Ecole Normale Supérieure) Lyon ;
- l'UMR 7300 ESPACE avec l'Université Sophia Antipolis et avec l'EMA (Ecole des Mines d'Alès) ;
- l'UMR 1114 EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes) avec l'Université d'Avignon.
- l'UMR 6524 (Magmas et Volcans) avec l'Université Jean-Monnet.

Autres partenaires :

- Recherche :
 - Hydrosciences Montpellier, suivi de la thèse associée à l'action ;
 - EcoBio Université Rennes 1, Christophe Piscart ;
 - IRSN Cadarache, Frédérique Eyrolle-Boyer, collaboration potentielle année 2015 (travaille actuellement sur les dosages de Tritium sur le bassin versant de la Cèze).
- Institutionnel :
 - Syndicat ABCèze : F. Cazin Définition des enjeux socio-économiques et territoriaux (fourniture de données et suivi du projet).

Actions de recherche ZABR en lien avec le projet :

Fiche thermie pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piegay).

Thème de rattachement ZABR : Changements climatiques et ressources

Thème de rattachement Agence de l'Eau : Zones d'interface - compréhension des processus

Site ou Observatoire de rattachement ZABR : OHM Vallée du Rhône (axe Rhône)

TABLE DES MATIERES SYNTHETIQUE

FICHE SIGNALETIQUE	I
TABLE DES MATIERES SYNTHETIQUE	III
Résumé	V
INTRODUCTION	7
Contexte et problématiques.....	7
Site étudié : le canyon de la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap	8
Généralités sur les hydrosystèmes karstiques	9
Méthodologie employée et objectifs	10
PARTIE I – Contexte géologique	15
I.1. Diversité des formations géologiques présentes à l'échelle du bassin versant de la Cèze	15
I.2. Focus sur la zone étudiée : Les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap	19
I.3. Regard tectonique pour expliquer l'aspect structural de la zone d'étude	20
I.4. Relations entre géologie et écoulements souterrains	21
(tectonique, karstification, paléomorphologie et paléostratigraphie)	21
PARTIE II – Approche par traçages artificiels	23
II.1. Principe	23
II.2. Historique des travaux réalisés	23
II.3. Protocole de traçages réalisés en 2014	36
II.4. Traçage restant à réaliser en 2014 et perspectives pour 2015.....	38
PARTIE III – Approches métrologique et hydrologique par suivi des débits	41
III.1. Principe et échantillonnage	41
III.2. Premiers résultats et perspectives	44
PARTIE IV – Approche Thermique par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée	55
IV.1. Principe	55
IV.2. Description de l'acquisition et du traitement des données.....	56
IV.3. Résultats de la campagne du 08/07/13	60
IV.4. Discussion et perspectives.....	65
PARTIE V – Approche hydrogéochimique par analyse des ions majeurs et de certains éléments traces	67
V.1. Principe	67
V.2. Description de l'échantillonnage	67
V.3. Résultats et discussion	68
V.4. Perspectives pour l'année 2015.....	77
PARTIE VI – Approche biologique par échantillonnage des invertébrés interstitiels	79
VI.1. Principe	79
VI.2. Description de l'échantillonnage (année 2013).....	80
VI.3. Premiers résultats	81
VI.4. Discussion et perspectives.....	84
PARTIE VII – Approches de modélisation « pluies - débits » par réseaux neuronaux	87
VII.1. Principe	87
VII.2. Analyse corrélatoire	87
VII.3. Analyse corrélatoire appliquée aux signaux de pluie et hauteur d'eau la Cèze	89
VII.4. Perspectives.....	94

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	95
BIBLIOGRAPHIE.....	101
LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET CARTES	107
Liste des figures	107
Liste des tableaux.....	108
Liste des cartes	109
TABLE DES MATIERES DES ANNEXES	111

Résumé

Résumé : La caractérisation des échanges nappes - rivières est indispensable pour la gestion durable des cours d'eau et des aquifères associés. Pour répondre à ces besoins de gestion, plusieurs outils et méthodes de caractérisation des échanges entre eaux superficielles et eaux souterraines ont déjà été développés en milieu alluvial [Paran et Al., 2012] ; [Lalot, 2014]. En milieu karstique, ces outils et méthodes nécessitent d'être adaptés afin de se conformer aux spécificités des aquifères carbonatés. Sur le plan scientifique, il y a un fort enjeu à développer des méthodes pour aider à comprendre le fonctionnement de ce type d'hydrosystème et à quantifier les volumes d'eau échangés entre milieux superficiels et souterrains. Dans ce contexte, un projet de recherche a débuté en 2013 au niveau du canyon de la Cèze et sur le plateau karstique de Mèjannes-Le-Clap. Ce projet de 3 ans correspond à une action de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. La méthodologie pluridisciplinaire s'appuie sur les approches suivantes : thermie, hydrogéochimie, biologie, hydrologie, géologie, traçages artificiels et modélisation pluie - débit.

Ce rapport d'avancement présente les actions réalisées en 2013 (année 1) et celles engagées en 2014 (année 2). Les premiers résultats disponibles issus de ces actions sont présentés dans le présent rapport.

INTRODUCTION

Contexte et problématiques

Une des priorités mise en avant par la directive cadre sur l'eau (DCE) porte sur l'amélioration des connaissances concernant les relations entre eaux superficielles et eaux souterraines et définit un principe de non dégradation entre ces compartiments de l'hydrosystème tant du point de vue qualitatif que quantitatif. Ces connaissances et ce principe sont d'importance quand il s'agit d'exploiter ces eaux pour satisfaire durablement les différents usages. Ainsi, la caractérisation des échanges nappes - rivières est indispensable pour la gestion durable des cours d'eau et des aquifères associés. Pour répondre à ces besoins de gestion, plusieurs outils et méthodes de caractérisation des échanges entre eaux superficielles et eaux souterraines ont déjà été développés en milieu alluvial dans le cadre d'actions ZABR précédentes (en autres le Projet Eau Sout' 2006-2014, [Paran et Al., 2012] ; [Lalot, 2014]). En milieu karstique, ces outils et méthodes nécessitent d'être adaptés afin de se conformer aux spécificités des aquifères carbonatés. Pour les aquifères karstiques, des études montrent que la ressource en eau est souvent sous exploitée du fait notamment de la difficulté à en évaluer la quantité stockée [Bakalowicz, 1999]. Dans les vastes zones karstiques sous climat méditerranéen, par exemple dans le Sud-Est de la France, une telle ressource souterraine mérite d'être mieux connue du fait de son intérêt stratégique en particulier pour l'eau potable [Bakalowicz, 2008]. En concertation avec l'Agence de l'eau, un projet de recherche a débuté en 2013 au niveau du canyon de la Cèze et sur le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap. En parallèle à ce projet, une thèse a commencé en octobre 2013 (Doctorant : H. Chapuis ; sujet de stage de master 2 : Identification de la contribution du karst aux crues éclairées en contexte méditerranéen).

Ce site, étudié dans le cadre du projet, doit faire face à des problèmes de gestion de l'eau qui concernent :

- Le manque d'eau en situation d'étiage entraînant des conflits d'usages ;
- L'inadéquation des politiques territoriales de développement (SCOT/PLU) par rapport au déficit en eau qui conduira probablement à la nécessité d'exploiter de nouvelles ressources ;
- Le manque d'informations pour satisfaire prélèvements (AEP et irrigation), débits réservés pour la baignade et débits minimum biologiques.

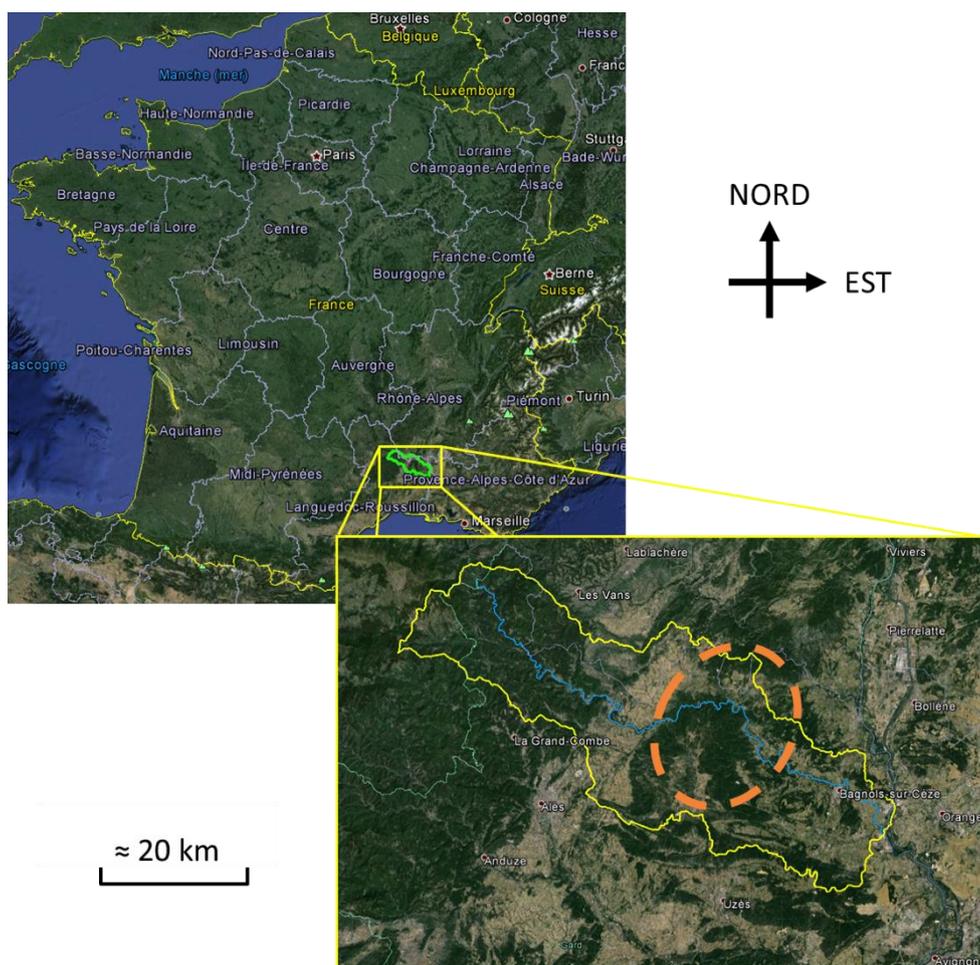
Tous ces problèmes de gestion ont pour socle commun le manque de connaissance. D'un point de vue scientifique, il convient donc de s'intéresser en particulier :

- A la caractérisation des échanges karst/rivière et à l'estimation des volumes d'eau échangés entre ces compartiments ;
- A l'acquisition de données (suivis des débits, des précipitations, de la conductivité, du chimisme, de la thermie, etc.), pour comprendre et modéliser ces échanges aux cours de cycles hydrologiques ;
- Aux moyens de transposition des connaissances acquises en proposant un dispositif de suivi simplifié (sur quelques points clés) aux gestionnaires pour l'aide à la décision (sous forme de valeurs seuils ou de référence) ;
- Aux conditions d'utilisation d'une telle méthodologie à d'autres contextes karstiques.

Afin de répondre à ces problématiques scientifiques, il convient de mettre en œuvre un dispositif de suivi adapté aux spécificités des milieux karstiques et de la zone d'étude. Les paragraphes suivants présentent dans un premier temps, quelques spécificités du site étudié, dans un second temps, quelques généralités sur les milieux karstiques et dans un troisième temps, la méthodologie employée pour caractériser les échanges entre karst et rivière dans cette étude.

Site étudié : le canyon de la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap

La zone étudiée se situe dans le Sud-Est de la France, dans le département du Gard et plus exactement au Nord-Est de celui-ci (Carte 1 ci-après). Le cours d'eau, sujet de cette expérimentation scientifique, est la rivière Cèze. Elle prend sa source dans la commune de Saint-André-Capcèze, en Lozère, à environ 800 m d'altitude dans les massifs cristallins (gneiss, granite, quartzite) entre le mont Lozère culminant à 1699 m et le massif du Mas de l'Ayre à 997 m (Pic « Truc des Cartades »). La longueur totale de la rivière entre sa source et sa confluence avec le Rhône, entre Codolet et Laudun-l'Ardoise, est d'environ 120 km, pour un dénivelé de 773 m. La surface du bassin topographique de la Cèze, compris entre les départements de la Lozère, du Gard et de l'Ardèche, a été estimée à 1365 km². L'étude hydrogéologique est focalisée sur le plateau karstique, en partie aval de la Cèze, incisé par la Cèze elle-même, formant un canyon profond de plus de 200 m [Jolivet & Martin, 2008] (illustration schématique Figure 1). Le terrain d'étude comprend un plateau calcaire en rive droite de la Cèze ainsi qu'une zone carbonatée plissée présentant plusieurs formations géologiques différentes entre rive gauche de la Cèze et rive droite de l'Ardèche. Cette zone expérimentale qui n'est pas encore entièrement délimitée couvre une surface d'environ 500 km². La diversité et le nombre des sources karstiques en bordure de la Cèze au sein des gorges sont intéressantes, et font de ce karst un bon terrain d'études pour caractériser des échanges d'eau entre le karst et la rivière.



Carte 1 : Localisation du bassin versant de la rivière Cèze. La zone expérimentale représente le plateau karstique de Méjannes-le-Clap jusqu'à l'Ardèche au Nord et en comprenant les gorges de la Cèze [Images google earth].

Généralités sur les hydrosystèmes karstiques

L'intérêt de cette étude est de caractériser les interactions hydrauliques qu'il peut y avoir au sein d'un hydrosystème complexe. La particularité du site d'étude, qui est le siège des expérimentations mises en place dans le cadre de cette thèse, est que celui-ci est un hydrosystème karstique pour lequel il est important de mettre en évidence les interactions entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains.

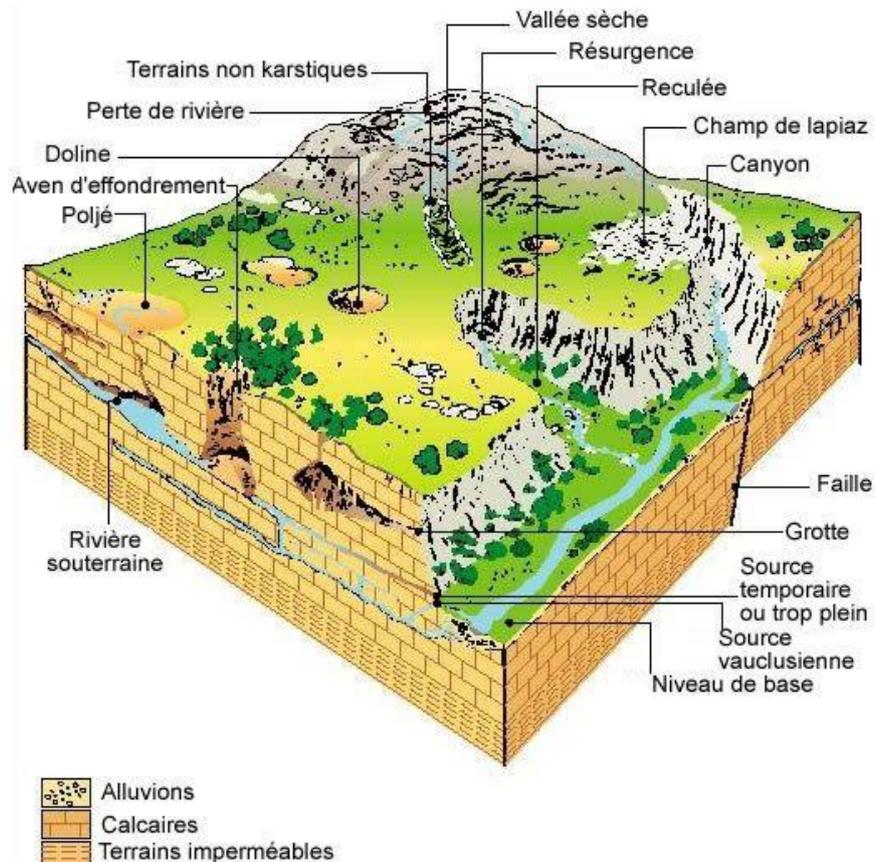


Figure 1: Paysage karstique [Bakalowicz, 1999].

Le « karst », qui doit son nom à une région slovène nommée Kras, représente une formation géologique carbonatée dotée d'une structure caractéristique. En effet, comme présenté en Figure 1, un causse, ou autrement dit un plateau karstique, présente un certain nombre de dolines (dépressions fermées), de lapiez (forme de corrosion du sol) [Nicod, 1972 ; Salomon, 2000], d'aven (dépressions ouvertes), de poljés (bassins endoréiques avec perte complète des eaux superficielles), de canyons (incision au sein du massif rocheux), de grottes (dépressions souterraines avec une ouverture extérieure) et enfin de sources à système jurassien et/ou vauclusien [Bakalowicz, 1999].

Le système karstique type décrit ci-dessus peut être caractérisé en quelques définitions. D'un point de vue morphologique le karst est un modelé superficiel et souterrain issu de la dissolution par l'eau des roches carbonatées (calcaires et dolomies) [Gilli, 2011]. La karstification est l'ensemble des processus de genèse et d'évolution des formes superficielles et souterraines dans une région karstique [Geze, 1973]. Du point de vue de la nappe phréatique, l'aquifère karstique est le seul type d'aquifère où la circulation d'eau dans la formation géologique façonne les vides de l'aquifère et induit des caractéristiques aquifères spécifiques [Bakalowicz, 1999].

La complexité d'un système karstique en fait un point stratégique de travail pour l'analyse et la compréhension des échanges qualitatifs et quantitatifs d'eau entre une roche carbonatée karstique et la Cèze. Dans une démarche de rationalisation du protocole scientifique qu'il est nécessaire de mettre en place pour ce travail, les différentes expérimentations qui vont être présentées dans ce rapport trouvent leur raison d'être et leurs origines dans l'hydrogéologie locale.

Méthodologie employée et objectifs

Afin de répondre aux problématiques scientifiques énoncées précédemment, il convient de mettre en œuvre un dispositif de suivi adapté aux spécificités des milieux karstiques. En effet, dans le cas du karst de la Cèze, la rivière collecte les eaux des sources (une quinzaine identifiée) qui drainent le plateau de Méjannes-Le-Clap. Ce cours d'eau présente aussi le long de son linéaire des zones de pertes importantes. Ces pertes de la rivière alimentent en partie certaines sources (notamment en rive gauche). Ces sources ont des fonctionnements contrastés. Elles se démarquent notamment par leurs chimismes, leurs thermies, leurs hydrodynamismes, leurs débits, leurs natures ponctuelles ou diffuses et le fait qu'elles recyclent ou non les eaux de la rivière.

Ainsi, au vu de ces spécificités, l'ambition du projet de recherche est avant tout méthodologique. Il s'agit de mettre en œuvre différentes approches tout en assurant un suivi temporel adapté des sources et de la rivière. La méthodologie pluridisciplinaire est structurée en plusieurs approches telles que la thermie, l'hydrogéochimie, la biologie, l'hydrologie, la métrologie, la géologie, les traçages artificiels et la modélisation pluie – débit.

Cette méthodologie a été nommée « **EVEREST – K2** » comme **E**valuation des **V**olumes **E**changés entre **R**ivières et **E**aux **S**ou**T**erraines en milieu **K**arstique et pseudo**K**arstique. Chacune des méthodes ou approches constituant cette méthodologie ainsi que les actions réalisées en 2013 et engagées en 2014 sont présentées brièvement ci-après.

- Actions réalisées (2013) :

La vocation initiale des actions menées en 2013 se voulait avant tout prospective. En premier lieu pour s'approprier les spécificités du terrain d'études et en second lieu, afin d'évaluer la pertinence et l'efficacité des différentes approches appliquées aux milieux karstiques. Il a notamment été question de tester les approches telles que la thermie, l'hydrogéochimie, la biologie et le suivi hydrologique. Les différentes actions (échantillonnage et/ou emprise par approche) sont synthétisées sur la Carte 2.

- **Synthèse des données et connaissances** disponibles sur le terrain d'étude. Bibliographie sur la moyenne vallée de la Cèze au niveau du plateau karstique et collecte de données SIG, hydrométéorologiques, hydrologiques, de qualité des eaux,... Cette synthèse a permis de mieux cerner le lien étroit entre les problèmes de gestion de la ressource et les lacunes de compréhension du système karstique. Ces lacunes de connaissances concernent notamment la localisation des pertes et des gains de débits le long du linéaire de la Cèze dans sa traversée du plateau karstique et plus généralement le fonctionnement et les réponses variées du karst d'amont en aval, à travers un cycle hydrologique (crues et étiages). L'identification de ces problèmes a permis de préciser la mise en œuvre d'une méthodologie pluridisciplinaire pour la caractérisation des échanges rivière – karst.

- Approche **thermique** par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée : Localisation des apports souterrains par contraste thermique entre eaux superficielles (Cèze) et eaux souterraines (sources karstiques). Cette approche a été développée en cohérence avec l'action ZABR thermie (*pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piegay)*). La première campagne a été réalisée le 13-04-13 en situation de

hautes eaux, les contrastes de températures entre les eaux souterraines et les eaux superficielles étaient alors assez faibles, de plus, le débit de la rivière était trop fort ce qui a eu pour effet de masquer les apports souterrains. La seconde campagne a eu lieu le 11-07-13 en situation de moyennes eaux avec des contrastes de températures importants (plus de 15°C).

- Approche **hydrogéochimique** par analyse des ions majeurs et certains éléments traces : Réalisation de prélèvements d'eaux pour analyses chimiques en différents points de la Cèze et au niveau des sources karstiques connues afin de déterminer l'origine des eaux et d'estimer des proportions de mélanges ainsi que des phénomènes de recyclage des eaux. L'échantillonnage des sources et de la rivière (voir carte) a été réalisé en période de décrue entre avril et septembre (environ 150 échantillons analysés).

- Approche **hydrologique** par jaugeages des sources et de la rivière Cèze : Des mesures synchrones des débits de la rivière (4 tronçons) et des sources (12 jaugeages) ont été réalisées en juillet (moyennes eaux) et septembre (basses eaux) afin de quantifier les pertes et les gains de débits d'amont en aval des gorges. Par ailleurs, un profil longitudinal de la rivière avec un DGPS embarqué et des sondes de température/conductivité a été réalisé. Il s'agissait de mesurer simultanément la variabilité spatiale de la conductivité et de la température d'amont en aval de la Cèze.

- Approche **biologique** par échantillonnage des invertébrés interstitiels : Les informations acquises dans les approches précédentes (hydrogéochimie, thermie et hydrologie) ont permis de guider le choix des zones d'échantillonnages des invertébrés souterrains. Il s'agissait, d'une part, d'évaluer le pool régional d'espèces par échantillonnage de la faune présente dans les karsts (piégeage et filtration des sources, échantillonnage des grottes accessibles) et d'autre part, d'établir un profil longitudinal de la faune interstitielle présente dans les avals de bancs (-50 cm de profondeur et échantillons triples), complété par la mesure de paramètres chimiques indicateurs des apports (température, conductivité, pH, oxygène dissous, Calcium, Magnésium). Les échantillons ont été prélevés en juillet 2013 entre la source des Fées et la source de Monteil sur 18 bancs de graviers, 4 sources et 4 benthos.

- Approche par analyse du contexte **géologique** : Analyse bibliographique incluant les calcaires urgoniens mais aussi d'autres terrains les encadrant. Mise en relation des singularités géologiques (tectonique, karstification, paléomorphologie et paléostratigraphie) avec les écoulements souterrains.

- Actions actuellement engagées (2014) :

- Approches par **traçages artificiels** : Les objectifs principaux des traçages sont de mettre en évidence les relations entre un point d'injection avec un ou plusieurs points de restitution. Un traçage colorimétrique à la fluorescéine (10 kg injecté) a été réalisé en mars au niveau de la grotte Flandin (injection à - 120 m de profondeur par rapport à la surface du sol) située entre la Cèze (rive gauche) et l'Ardèche (rive droite) à la bordure Nord du synclinal d'Issirac.

Un traçage des pertes du Roméjac, un affluent de la Cèze, a été réalisé en mai 2014. Trois kilogrammes d'éosine ont été injectés dans ces pertes.

Par ailleurs, un dernier traçage pour l'année 2014 est prévu en situation d'étiage (été) au niveau des pertes de la Cèze.

- Approche **thermique** (suite) : La campagne hivernale prévue initialement n'a pas pu avoir lieu du fait de la douceur de l'hiver et des contrastes trop faibles de températures observées de décembre 2013 à février 2014. Une autre campagne est prévue lors de l'étiage estival sur une zone plus large incluant l'intégralité des sources aval (de la source d'Ussel à la source de Bastide Froide).

- Approche **hydrologique** par jaugeages des sources et de la rivière Cèze (suite) : Suivi de la décrue de la Cèze et des sources sur 5 à 6 campagnes de jaugeages prévues entre mars et septembre. Actuellement déjà deux campagnes de jaugeages ont été réalisées en mars et avril (12 sources et 4 sections en rivière).

- Approche **météorologique** par **suivi des débits** et de la **pluviométrie** locale : Les sondes CTD permettent d'enregistrer par pas de temps d'un quart d'heure les variations de hauteur, de température et de conductivité des eaux. Ces sondes ont été disposées en fin d'hiver et début de printemps au niveau des principales sources connues (environ 12 sources) et au niveau de la rivière (sur 4 tronçons). Le suivi en continu est prévu sur au moins deux cycles hydrologiques (2014 et 2015).

Par ailleurs 4 pluviomètres ont été répartis dans des points stratégiques afin d'apprécier les variations spatiales des précipitations sur la zone d'étude.

- Approche mathématique par **modélisation Pluies/Débits** : Modélisation des échanges entre la Cèze et les aquifères karstiques qui l'entourent. Cette étape est destinée à mettre en place un modèle de reconstitution des débits à l'exutoire des arrivées karstiques dans la Cèze en fonction des variables de forçages climatiques (pluie, ETP, températures). Pour cela le travail s'est orienté vers une modélisation stochastique de type réseau neuronal RN. Le travail actuellement engagé par le LGEI (stage de Master 2 de Michaël Savary) a permis de constituer une base des données disponibles à partir de nombreuses sources d'informations (SPC Grand Delta, OHMCV, DREAL, ...).

Communications sur le projet :

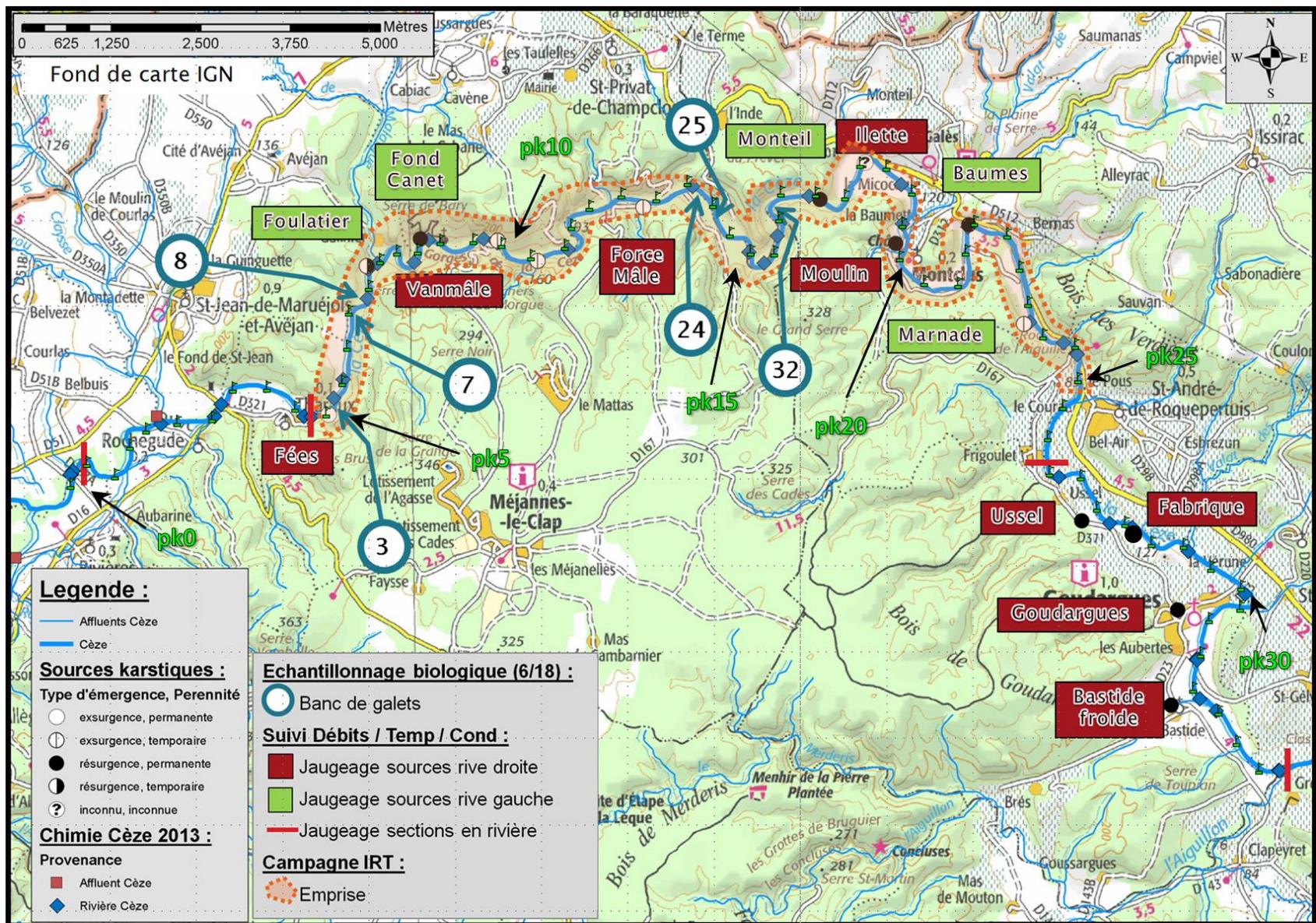
Deux communications, sur la méthodologie mise en œuvre au cours de ce projet, ont été acceptées au colloque international E3D (Eau, Déchets et Développement Durable) ayant donné lieu à deux articles joints aux actes du colloques [Ré-Bahuaud et Al., 2014] ; [Chapuis et Al., 2014].

Un comité de pilotage sur le projet a eu lieu en février (24/02/2014) réunissant des représentants de l'Université d'Avignon (EMMAH), de l'Ecole des Mines d'Alès, du Conseil Général du Gard, de la DREAL Languedoc-Roussillon, de l'Agence de l'eau et deux hydrogéologues agréés du Gard. Cette réunion a permis une discussion constructive sur les actions déjà mises en œuvre et a aussi permis d'identifier de nouvelles approches à mettre en œuvre pour l'année 2015 (isotopes et radioéléments).

Après avoir décrit de manière succincte le principe des approches propres à la méthodologie et les actions réalisées (année 2013), engagées et à venir (année 2014), l'objet de ce rapport d'avancement est de présenter plus dans le détail les premiers résultats disponibles issus de ces actions. Par ailleurs, le contenu de ce rapport est aussi l'occasion de proposer pour chacune des approches des perspectives d'améliorations ainsi que des propositions de mesures complémentaires pour 2015.

La première partie aborde plus précisément le contexte géologique régional et local de la zone étudiée et s'intéresse aux questions découlant des relations entre le contexte géologie et les écoulements souterrains. La seconde partie présente une synthèse critique des traçages historiques et propose une planification de nouveaux traçages complémentaires. La troisième partie évoque les mesures et le suivi en continu des débits des sources et de la rivière et en dévoile les premiers résultats. La quatrième partie traite de l'acquisition de données IRT ainsi que de la caractérisation thermique du cours d'eau et des sources en juillet 2013 sous forme de résultats cartographiques illustrés. La cinquième partie présente les principaux résultats des analyses en ions majeurs des sources et de la Cèze pour l'année 2013 et en propose une interprétation en termes d'origine des eaux. La sixième partie traite de l'utilisation des invertébrés interstitiels pour localiser les zones d'échange rivière-nappe. La septième partie expose le principe de la modélisation pluie – débit par réseaux neuronaux et en présente les premiers résultats des analyses corrélatoires et aborde les résultats attendus pour 2015. Une conclusion générale traite de la pertinence de ces premiers résultats pour caractériser les échanges entre karst et rivière, aborde les perspectives d'améliorations et propose des mesures complémentaires pour l'année 2015.

NB : Les annexes sont présentées dans un document distinct de ce rapport. Un sommaire en fin de rapport référence l'ensemble de ces annexes.



Carte 2 : Synthèse cartographique des actions engagées en 2013 et 2014.

PARTIE I

—

Contexte géologique

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Hervé Chapuis, Bernard Guy et Jordan Ré-Bahuaud
(UMR 5600 EVS, EMSE)

→ Joël Jolivet
(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

I.1. Diversité des formations géologiques présentes à l'échelle du bassin versant de la Cèze

Ce paragraphe décrit les principales formations géologiques rencontrées sur l'ensemble du bassin versant de la Cèze encadrant la zone étudiée. La description est basée sur les cartes et notices géologiques du BRGM au 1/50 000^{ième} de Pont-Saint-Esprit et Bourg-Saint-Andéol. Il est indispensable de décrire les formations géologiques de l'ensemble du bassin versant de la Cèze car la géologie elle-même conditionne fortement les écoulements superficiels et souterrains de la zone étudiée. L'interprétation des résultats de chacune des approches fait référence à cette description.

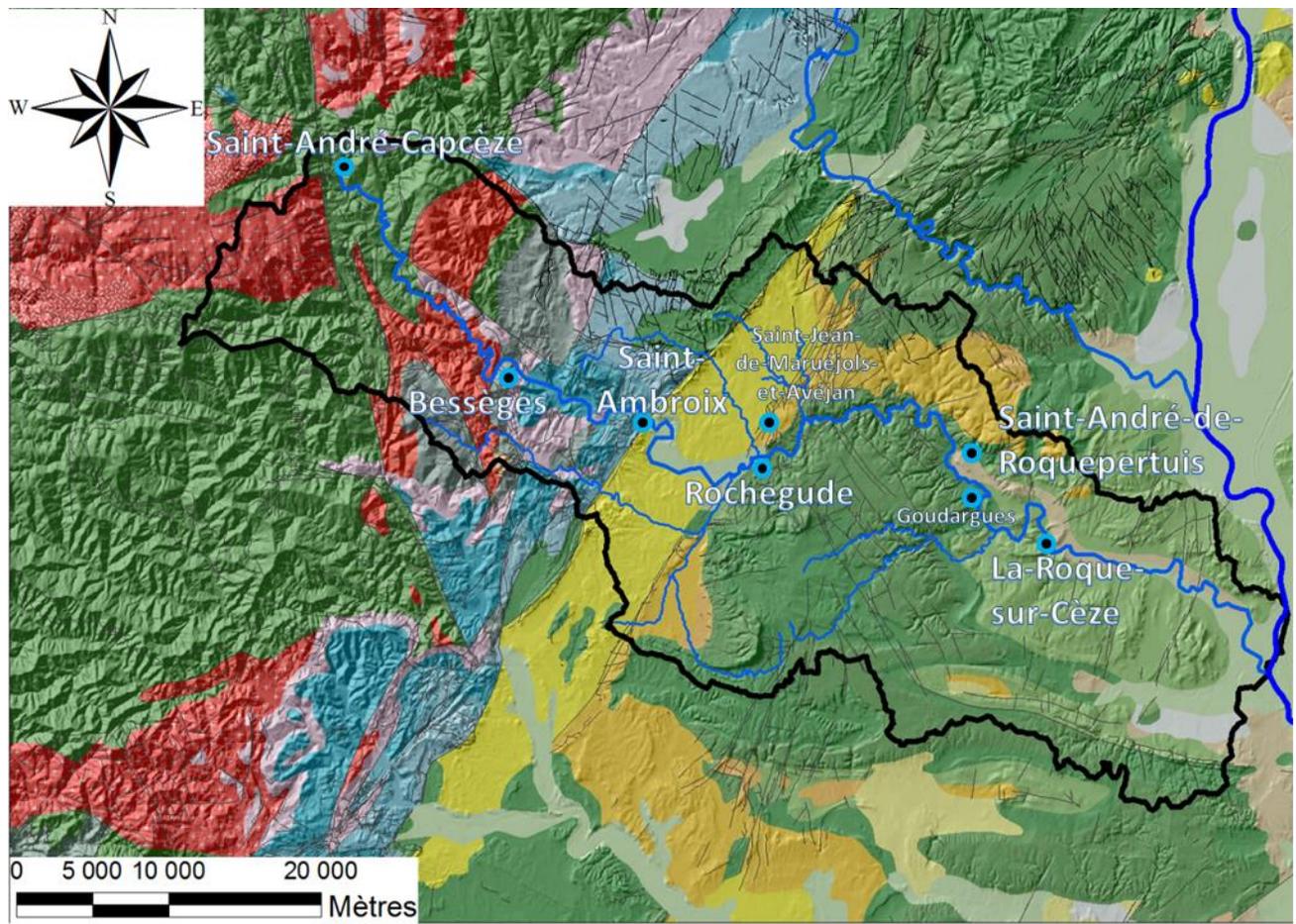
A l'échelle du bassin hydrologique, autrement dit topographique, la rivière Cèze traverse plus d'une dizaine de formations géologiques différenciées. La Carte 3 présente un regroupement des principales formations géologiques. Le socle sur lequel repose le site d'étude date du système Paléozoïque. D'Ouest en Est du bassin de la Cèze, on observe des Micaschistes, des Quartzites micacés, des Orthogneiss et des Granites. Cet ensemble de formations est chevauché d'Est en Ouest, aux alentours de Bessèges, par des schistes, du charbon, des grès et des conglomérats du Stéphanien moyen, eux-mêmes chevauchés par d'autres schistes, charbon, grès et psammites du Stéphanien inférieur. Sur ces anciennes formations géologiques reposent directement des roches sédimentaires telles que des grès, des argiles, des conglomérats et des dolomies datant du Trias moyen et supérieur. Il y a donc toutes les formations géologiques du Permien, soit environ 50 Ma de formations qui n'apparaissent pas. Au-dessus des formations triasiques, on retrouve des formations carbonatées comme des calcaires (parfois argileux ou marneux ou à entroques) ainsi que des dolomies du Jurassique. Le Jurassique apparaît difficilement là où la Cèze le traverse, au niveau de la commune de Saint-Ambroix, car il a été enfoui par un jeu de failles de normales puis recouvert par des formations géologiques plus récentes. Dans cette couverture, toujours au niveau de Saint-Ambroix, apparaissent quelques marnes et une faible épaisseur de calcaires à faciès Urgonien ($\approx 100\text{m}$) (Barrémien-Bédoulien) qui plongent dans le fossé d'Alès. Dans ce fossé d'Alès sont répertoriées plusieurs formations sédimentaires et sédimentaires détritiques. A l'Ouest de Saint-Ambroix reposent des conglomérats de l'Oligocène, qui reposent eux-mêmes sur des formations marneuses (parfois à gypses), gréseuses, calcaires, de lignites et aussi conglomératiques datant du Priabonien à l'Oligocène. Certains calcaires sont bitumeux/asphaltiques et ont fait l'objet d'exploitation (Exemple : Mines de la S.F.A. à Saint-Jean-de-Maruejols-et-Avejan jusqu'en 2008), on les retrouve avec les calcaires lacustres. A l'Est de ce fossé, au niveau de Rohegude, on retrouve les formations carbonatées du Crétacé de Saint-

Ambroix. Celles-ci apparaissent sous une géomorphologie de canyon. Les premières formations traversées par la rivière Cèze dans son sens d'écoulement grossièrement Ouest-Est sont inversé puisque cette fois ce sont des calcaires gréseux et grès du Cénomaniens (Cénomaniens/Turonien) qui précèdent les calcaires massifs de l'Urgonien (plus anciens) qui sont rencontrés en premier. Le fossé d'effondrement d'Alès se comporte sans doute comme un rift plissant les formations du Crétacé comme un synclinal. C'est ainsi qu'apparaît une partie des formations du Cénomaniens au contact de l'Urgonien. A l'exutoire de ce canyon à calcaire Urgonien, la Cèze s'écoule progressivement sur des calcaires gréseux à Discoïdes au niveau de Saint-André-de-Roquepertuis. La série stratigraphique est respectée quand la Cèze traverse ensuite les sables rutilants ainsi que des marnes et des grès datant de l'Albien inférieur et moyen ; les grès quartzites et sables à Orbitolines du Cénomaniens ; les lignites et calcaires argileux du Cénomaniens également ; les calcaires, grès et sables siliceux du Turonien, tous cela au Sud de Goudargues. Ensuite au niveau de La Roque-sur-Cèze, on retrouve des calcaires et calcaires gréseux à Rudistes du Coniacien. Toutes ces formations géologiques du Crétacé supérieur présentées précédemment sont recoupées par la Cèze plusieurs fois jusqu'à traverser des argiles et des marnes marines datant du Pliocène au niveau de sa confluence avec le Rhône.

La Carte 4 présente la zone étudiée qui comprend majoritairement les formations carbonatées à faciès Urgonien du plateau de Méjannes-le-Clap. Les calcaires du plateau sont inclinés différemment selon le lieu d'observation. Un axe anticlinal NOO-SEE important fait affleurer au Sud du plateau des marnes du Valanginiens et de l'Hauteriviens. Ce pli coïncide avec des pendages faibles orientés généralement en direction du Nord pour la moitié Est du plateau. Dans cette autre moitié, celle de l'Ouest du plateau de Méjannes-le-Clap, des pendages orientés d'une part à l'Ouest et d'autre part à l'Est font percevoir un axe anticlinal NNE-SSO. Cet axe anticlinal peut être mis en relation par rapport à la formation du rift que constitue le fossé d'Alès, car il suit la même direction que les grandes failles qui délimitent ce fossé.

Entre la rivière Ardèche et la rivière Cèze au niveau des formations carbonatées à faciès Urgonien, affleurent des calcaires, calcaires blancs à Cyrènes localement asphaltiques, des calcaires crayeux à accidents siliceux, des calcaires marneux à Brotia et argileux ainsi que des marnes gréseuses et à lignite datant de l'Eocène supérieur (Priabonien). Par-dessus, on retrouve dans certaines zones des formations géologiques de types calcaire, calcaire lacustre à mammifères ou crayeux asphaltiques, des limons et aussi des marnes à gypses ou sableuse datant de l'Oligocène basale (Rupéliens). Ces formations Paléogène forment un synclinal orienté Ouest-Est d'une épaisseur encore inconnue. A l'Est de ce synclinal des marnes rouges et brunes sont intercalées entre les formations Eocène terminal- Oligocène et les calcaires Urgonien. Celles-ci disparaissent au Sud du synclinal au contact de failles orientées NEE-SOO et au Nord du synclinal par des failles orientées NNO-SSE.

Plus au Nord du synclinal d'Issirac, les calcaires Urgonien dans lesquels la rivière Ardèche est encaissée forment un anticlinal en rive droite de celle-ci. La connexion souterraine entre les calcaires côté Ardèche et ceux côté Cèze n'est pour le moment pas vérifiée puisque aucun forage permettant peut-être de déceler cette hypothèse n'a pour le moment été réalisé. De plus, outre le fait qu'il n'y est plus de jonction à cause des jeux de failles, l'hypothèse que l'épaisseur diminue fortement est probable. Ce massif calcaire Urgonien compris dans les âges du Barrémiens et du Bédoulien, comme il a été signalé auparavant, voit certaines couches de cette formation avoir une épaisseur différente de part et d'autre du plateau karstique. Pour une puissance calcaire pouvant atteindre environ 400 mètres d'épaisseur, des diminutions de plus de 100 mètres d'épaisseur peuvent apparaître côté Ouest du plateau. C'est un critère qui reste à déterminer sur tout l'horizon du plateau afin d'en reconstituer si possible son volume et sa répartition spatiale.



Légende:

- Éocène terminal – Oligocène (calcaire ; marnes ; conglomérat ; grès ; lignite)
- Crétacé supérieur (calcaire ; grès ; sable)
- Crétacé inférieur (**calcaire à faciès Urgonien** ; grès ; sable ; marnes)
- Jurassique (calcaire ; dolomies)
- Trias (grès ; argiles ; conglomérats ; dolomies)
- P Stéphanien (conglomérat ; grès ; psammites ; schistes ; charbon)
- A
- L Orthogneiss
- O
- Z Schistes ; micaschistes ; quartzites
- O
- I Schistes ; micaschistes ; quartzites
- C
- Rhône
- Cèze
- Villes

Carte 3 : Géologie régionale simplifiée du bassin versant de la Cèze.

I.3. Regard tectonique pour expliquer l'aspect structural de la zone d'étude

Une réflexion sur le nombre de failles et/ou linéaments recensés sur le terrain ainsi que la détermination de leurs orientations constitue un bon moyen de comprendre et peut être d'expliquer la mise en place des différentes structures telles que les anticlinaux, synclinaux ainsi que les discordances géologiques de la zone d'étude. Que ce soit à l'échelle du bassin versant (Figure 2) ou encore du plateau karstique de Méjannes-le-Clap (Figure 3), 4 directions principales sont mises en évidence ; NE-SO ; NO-SE ; E-O et N-S.

Toutes ces failles ne sont pas apparues en une même période, mais certaines d'entre elles ont très bien pu être réactivées au cours de phases tectoniques, d'où les hypothèses d'apparition des différentes familles de failles :

- La phase de distension durant la période d'ouverture du rift de la mer Thetys-Ligure (160-200 Ma) est sans doute à l'origine de la création de la faille des Cévennes et des autres failles orientées NE-SO.
- La phase tectonique Pyrénéenne (34-72 Ma) est sans doute la conséquence de l'apparition de plis anticlinaux et synclinaux dotés d'un axe E-O.
- L'extension Oligocène durant la phase d'ouverture de la mer Liguro-provençale (23-34 Ma) est l'évènement responsable de la formation du rift d'Alès (fossé d'Alès) durant la rotation du bloc Corso-Sarde vers le Sud-Est. De grandes failles normales orientées NO-SE et peut-être le début de formation de plis d'axes plus ou moins NNE-SSO en sont la conséquence. De plus, les failles NE-SO vues précédemment ont été réactivées durant cette extension.
- La phase tectonique Alpine (11-20 Ma) résulte de failles verticales cassantes et de plis N-S, elle peut avoir amplifié le pli orienté NNE-SSO déjà présent sur le plateau karstique et favoriser l'apparition de vides au sein du karst du fait de la caractéristique cassante de cet évènement.

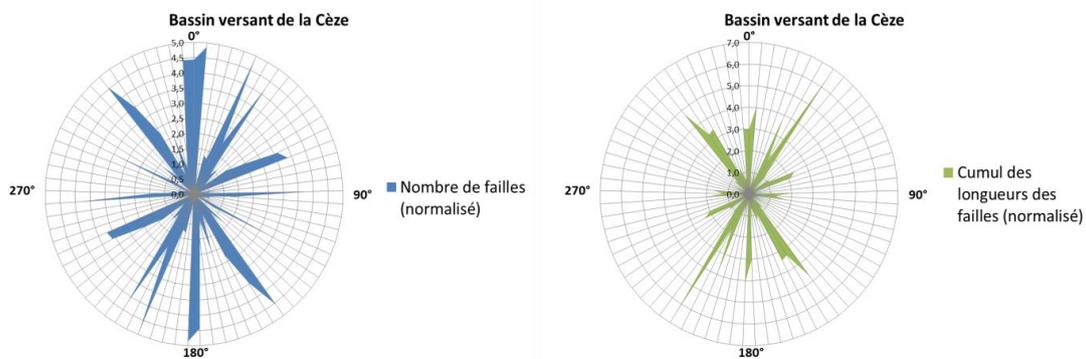


Figure 2 : Rosace tectonique de l'ensemble du bassin versant de la Cèze

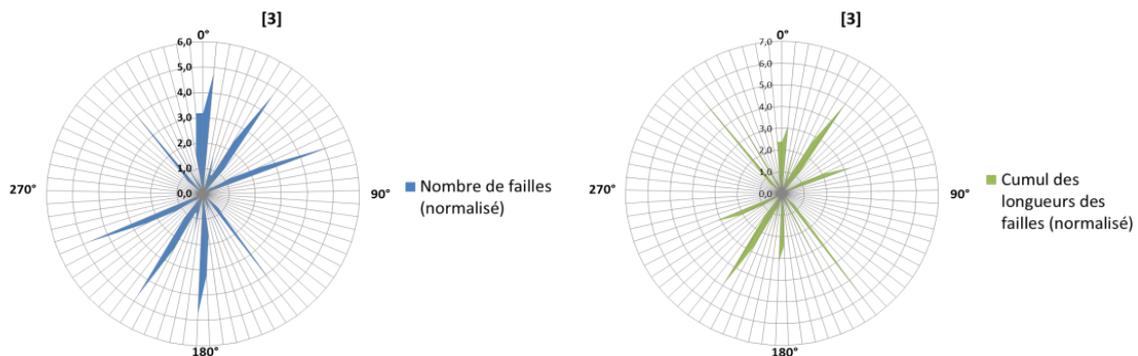


Figure 3 : Rosace tectonique de la zone étudiée (plateau karstique de Méjannes-le-Clap).

I.4. Relations entre géologie et écoulements souterrains (tectonique, karstification, paléomorphologie et paléostratigraphie)

L'analyse du contexte géologique local inclut les calcaires urgoniens mais aussi les autres terrains qui les encadrent. Elle a aussi pour ambition d'intégrer les informations géométriques issues des explorations spéléologiques. Cette analyse locale est également mise en perspective avec le contexte géologique régional. Elle a pour vocation principale de reconstituer l'histoire de la mise en place des réseaux karstiques afin de mieux préciser les liens existants entre les processus géologiques (tectonique, processus de karstification, paléomorphologie, paléostratigraphie) et la distribution des écoulements souterrains (limites de partage des eaux, extension des bassins versant, estimation des réserves souterraines disponibles, etc.). Il est ainsi possible de prendre en compte le contexte tectonique régional pouvant influencer la structure et la disposition des formations géologiques locales. Cette influence se traduit par la présence de failles, de plissements et par la variation des environnements et des épaisseurs de dépôt ou encore par l'abrasion liée à l'eustatisme. De plus, l'infiltration des eaux en souterrain les amène naturellement à rejoindre le niveau de base (niveau de la Cèze), ce phénomène n'est pas interprété comme le seul facteur de l'évolution du paysage karstique. Il faut aussi prendre en compte la mise en place de drains karstiques du fait de transgressions et régressions marines passées et/ou de la karstification par diagenèse.

L'essentiel de cette analyse se base sur une synthèse bibliographique, il est à noter que quelques reconnaissances terrain ont été initiées en complément de cette synthèse. La bibliographie (en cours d'actualisation) s'intéresse à la géologie locale et régionale mais aussi à des généralités sur les karsts et les processus de karstification, quelques publications ont été sélectionnées :

- Le contexte géologique et hydrogéologique local et régional :

[Besson, 2005] ; [Besson et Al., 2005] ; Cartes et notices géologiques du BRGM ; [Clauzon, 1978] ; [Delannoy et Al., 2007] ; [Ford et Williams, 1989] ; [DDE du Gard, 2003] ; [Jolivet, 2011 et 2013] ; [Jolivet & Martin, 2008] ; [Mocochain et al, 2006 et 2009] ; [Pouzancré, 1971] ; [Fabre, 1980] ; [Belleville, 1985] ; [Bastide, 2014].

- Les généralités sur la géologie et l'hydrogéologie karstique :

[Bakalowicz, 1999, 2000, 2005 et 2008] ; [Boulvain, 2014] ; [Bourrouilh-LeJan, 1998] ; [Gèze, 1973] ; [Gilli, 2011] ; [Nicod, 1972] ; [Salomon, 2006] ; [Bailly-Comte et Al., 210] ; [Cavalera, 2007] ; [Johannet et Vayssade, 2007] ; [Vail et Al., 1987] ; [Mangin, 1975].

Pour résumer, les liens entre géologie et hydrogéologie soulèvent des questions d'intérêt pour la gestion des eaux et l'estimation des réserves disponibles et exploitables. Certaines questions méritent d'être traitées, quelques exemples sont référencés ci-après :

- Quels sont les phénomènes prépondérants qui conditionnent la karstification ? Plusieurs facteurs sont mis en avant dont la tectonique avec la présence de failles [Cartes géologiques du BRGM], l'eustatisme qui conditionne le niveau de base du cours d'eau et le creusement du karst [Mocochain et al, 2006 et 2009] ; [Jolivet & Martin, 2008] ou encore la diagenèse qui peut initier cette karstification [Bourrouilh-LeJan, 1998].

- Quel est le développement de la karstification plus en profondeur du massif urgonien et son incidence sur les potentialités de réserves exploitables profondes ? Cette question est liée à la précédente

concernant les indices géologiques renseignant sur l'intensité du creusement du karst lié à l'eustatisme. Ces indices seront confrontés aux explorations spéléologiques déjà réalisées par les plongeurs.

- Quel est l'extension spatiale, la géométrie, les épaisseurs de dépôt et l'évolution paléostratigraphique des formations urgoniennes (affleurentes et non affleurentes) qui permettraient de mieux comprendre la distribution des écoulements souterrains ? De telles informations à l'échelle du Sud-Est de la France sont désormais disponibles par le biais de données inédites de forages profonds recoupant l'intégralité des calcaires urgoniens (notamment les forages de Barjac et de Verfeuil) et un modèle géologique (sédimentaire et tectonique) [Bastide, 2014]. Il est question d'intégrer les singularités géologiques locales au contexte régionale du Sud-Est de la France mais aussi d'y confronter les résultats de traçages déjà réalisés [Pouzancré, 1971] ; [Fabre, 1980] ; [Jolivet, 2013] et en cours.

- Quel est le rôle des failles sur les écoulements ? En lien avec la question précédente, certaines failles peuvent jouer le rôle de drain et conditionner l'orientation des réseaux karstiques (failles apparentes sur le terrain). D'autres failles syn-sédimentaires (failles masquées) peuvent jouer le rôle de barrière hydraulique et peuvent être considérées comme des lignes de partages des eaux [Bastide, 2014].

- Quelle est l'influence des structures anticlinales et synclinales sur le partage des eaux ? Au Nord, le synclinal d'Issirac pose la question du partage des eaux et/ou de la continuité des écoulements entre Cèze et Ardèche [Delannoy et al, 2007] ; [Jolivet & Martin, 2008]. Au Sud, la structure anticlinale pose la question de la connexion de l'aquifère karstique de la Cèze vers celui du Gardon [DDE du Gard, 2003].

Toutes ces questions constituent une base de réflexion pour les travaux de thèse d'Hervé Chapuis. Plusieurs coupes géologiques synthétiques sont en cours d'élaboration et serviront de supports à la réflexion pour apporter un éclairage nouveau sur ces questions d'intérêt hydrogéologique.

PARTIE II

–

Approche par traçages artificiels

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Joël Jolivet

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

→ Spéléo-Club de l'Ardèche

→ Jordan Ré-Bahuaud, Chapuis Hervé et Didier Graillet

(UMR 5600 EVS, EMSE)

II.1. Principe

Un traçage artificiel consiste à prouver (ou dans une certaine mesure peut réfuter) des relations hydrauliques entre un point d'injection du traceur (pertes, gouffres, dolines, avens, etc.) et un ou plusieurs points de restitution (source(s), piézomètre(s), etc.). Appliqué au site d'étude, les objectifs des traçages sont multiples, il s'agit :

- Tout d'abord, de mettre en évidence les relations entre certaines pertes de la Cèze et certaines sources en aval. C'est le cas des relations hydrauliques entre les pertes de Rochegude et les sources de la rive gauche (Foulatier, Fond Canet, Monteil et les Baumes) ;
- Ensuite, de définir les bassins d'alimentation des sources (extension, limite de partage des eaux, etc.). C'est l'objet de nombreux traçages historiques réalisés pour les principales sources de la rive droite (Fées, Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide). Les lacunes de connaissance concernent essentiellement la discrimination des écoulements entre Cèze et Gardon au Sud et Cèze et Ardèche au Nord ;
- Enfin, de mieux connaître les propriétés hydrodynamiques du système karstique (réactivité, dispersion et relation des conduits karstiques, taux de restitution, etc.).

Le prochain paragraphe présente l'historique des traçages réalisés et dresse un bilan de ces traçages. Le paragraphe suivant aborde les traçages déjà réalisés en 2014. Le dernier paragraphe traite des prochains traçages prévus pour 2014 et 2015.

II.2. Historique des travaux réalisés

Ce paragraphe propose un historique des traçages réalisés au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap en relation avec les données de débit et de pluviométrie disponibles. Une critique des résultats historique est proposée. Cette critique permet, entre autre, d'orienter et de définir les actions de traçages actuelles et à venir. La Carte 5 présente une synthèse cartographique des résultats des traçages déjà réalisés.

II.2.1. Les pertes de la Cèze

II.2.1.i. Pertes de Rochegude

A l'entrée des gorges de la Cèze, une série de pertes diffuses, dites pertes de Rochegude, s'étend sur un linéaire d'environ 4300 m depuis l'aval du pont de Rivières de Theyrargues jusqu'à la source des Fées. Elles sont de loin les plus importantes du point de vue des débits. Le bed-roc sur lequel circule la rivière se compose d'amont en aval, de calcaires Eocène parcourus par un ensemble de diaclases N 60 à 10°N pour finir sur des calcaires du Barrémien supérieur (Urgonien) fortement fracturés N40° moyen. Lors des assècs sévères, le flux de l'eau s'interrompt et passe en souterrain progressivement d'aval en amont du secteur. Ces assècs provoqués par les pertes de Rochegude sont connus depuis longtemps mais leurs mises en évidence par un traçage et la quantification des volumes infiltrés ont été déterminées depuis 1995 [BRLi, 1995]. Cependant, les analyses physico-chimiques [Fabre 1980, BRLi 1995] donnaient une bonne indication de la réapparition des eaux du secteur de Rochegude au niveau des sources rive gauche de la Cèze.

Une coloration a eu lieu en amont du seuil de mesure de la station de pompage agricole, le 20 juin 1995, avec 12 kg de fluorescéine [BRLi, 1995] et ce alors qu'un débit de surface existait et qui a duré pendant tout le temps de l'expérience. Le débit de la Cèze était de 702 l/s à l'injection du colorant pour atteindre 272 l/s le 02 juillet 1995. Le lendemain, le débit passait 905 puis 1140 l/s les jours suivants après soit de fortes précipitations, soit un lâcher de soutien d'étiage du barrage de Sénéchas.

Pendant toute la période des 4 mois, des variations de débits conséquentes se sont produites. [BRLi 1995]. Au niveau pluviométrie, les mois de juin, juillet, août et septembre 1995 ont donné un cumul de 319 mm de pluie pour un total annuel de 1025 mm (Audoyer F., inédit, pluviométrie de Potelières).

II.2.1.i.a. Résultats de la coloration : synthèse faite d'après les observations de BRLi

Injection de 12 kg de fluorescéine le 20/06/1995 à 16H30.

Restitution pour les sources de la rive droite d'amont en aval :

- Fées : positif au bout de 26 jours sur la période de suivi du 06 au 23/07/1995
Observations : Réponse très faible, pollution vraisemblable suite à l'augmentation du débit rivière.
- Vanmâle : positif au bout de 26 jours sur la période de suivi du 06 au 23/07/1995
Observations : Réponse très faible, pollution vraisemblable suite à l'augmentation du débit rivière.
- Force mâle : négatif
Observations : néant
- Moulin : positif au bout de 34 jours sur la période de suivi du 14 au 23/07/1995
Observations : Réponse faible, résurgence de la perte de Baume Salène
- Marnade : négatif
Observations : néant

Restitution pour les sources de la rive gauche d'amont en aval :

- Foulatier : négatif
Observations : Arrêt de l'écoulement le 25/06/1995 et reprise de l'écoulement en septembre
- Saint-Ferreol : négatif
Observations : source perchée par rapport au niveau de la Cèze (drain l'épikarst)
- Tranchée : négatif
Observations : source perchée par rapport au niveau de la Cèze (drain l'épikarst)
- Fond Canet : positif au bout de 9 jours sur la période de suivi du 29/06 au 06/07/1995
Observations : concentration maxi : 250 ng/g
- Monteil : positif au bout de 30 jours sur la période de suivi du 10 au 23/07/1995
Observations : néant
- Baumes : positif au bout de 34 jours sur la période de suivi du 14 au 23/07/1995
Observations : néant

II.2.1.i.b. Les débits au niveau des pertes de Rochegude

Une série de mesures de débits ont été réalisés à partir de l'année 2006 puis une en 2007.

En 2008 et 2009, à la demande du syndicat de bassin ABCèze, des mesures ont été effectuées par l'UMR Espace 6012 – CNRS afin de déterminer l'évolution des volumes de pertes entre le pont de Rivières et la source des Fées et d'établir un bilan amont – aval canyon de la Cèze, Pont de St André de Roquepertuis. [Martin C., Jolivet J., Martin P., 2007 & 2008].

II.2.1.i.c. Les apports d'eau

- **Les pluies :**

Pluviographe de Tharoux (UMR ESPACE 6012)

Total pluie 2006 = 937 mm -- janvier à fin mai 2006 = 223 mm -- juin à fin septembre 2006 = 334 mm
Arrêt flux Cèze du 13/06 au 17/08/2006, puis du 04/09 au 14/09/2006

Total pluie 2007 = 512 mm -- janvier à fin mai 2007 = 274 mm -- juin à fin septembre 2007 = 157 mm
Tarisement de la rivière à partir du début juin jusqu'au 15 août 2007

Total pluie 2008 = 1281 mm -- janvier à fin mai 2008 = 513 mm -- juin à fin septembre 2008 = 232 mm
Pas de rupture de flux

Total pluie 2009 = 751 mm -- janvier à fin mai 2009 = 352 mm -- juin à fin septembre 2008 = 91 mm
Tarisement de la rivière à partir du 07/09/2009 jusqu'à fin septembre.

- **Les lâchers du barrage de Sénéchas :**

En 2006, le débit de soutien d'étiage a été de 500 L/s sur les 3 mois d'été.

En 2007, le débit de soutien d'étiage a été de l'ordre de 700 L/s.

En 2008, le débit de soutien d'étiage a été de 1000 L/s sur les 3 mois d'été.

En 2009, le débit de soutien d'étiage a été de 600 L/s sur les 3 mois d'été.

II.2.1.i.d. Tableau des mesures de débit du bilan entrée/sortie du canyon de la Cèze

Date	Q (l/s)						
	St Denis	Auzonnet	Pont de Rivières	Roche gude	Tharoux	perles	St André de Roquepertuis
<u>2006</u>							
15/06			823				649
29/06			671				604
10/07			655				617
20/07			730				450
31/07			667				406
<u>2007</u>							
20/08			1009	707	440	569	881
<u>2008</u>							
21/07	2315	202	2758	2158	1979	779	3042
31/07	1897	135	1813	1619	1041	772	1934
04/08			1837	1259	876	961	
11/08	1424	64	1244	1089	721	523	
27/08	1160	71	1300	1119	635	665	1154
<u>2009</u>							
03/06	1634	266	1905		1397	508	
02/07		104	902		112	790	
15/07		63	1341		456	885	
23/07		62	1279		133	1146	
31/08	716	67	805		121	684	
07/09	570	63	643		17	626	397
14/09	523	52	589		0	589	388

II.2.1.ii. Pertes de Baume Salène

Les pertes de Baume Salène (Salem ou Paillère) se situent dans le canyon de la Cèze.

L'eau capturée de la rivière se mélange à celle provenant de l'aquifère karstique et parcourt un trajet souterrain de 1950 m, en partie pénétrable, jusqu'à la résurgence du Moulin.

Comme le pensait déjà les précurseurs de la spéléologie gardoise [Mazauric, 1903], la liaison entre la perte de baume Salène avec la résurgence du Moulin est prouvée par une coloration effectuée par le Groupe Spéléo Bagnols/Marcoule [Guyot, 1981].

L'interprétation des résultats a mis en évidence que 70% du colorant est apparu à la source du Moulin, les 30 % restants se répartissant sur les petites sources des Travès (non mentionnées) et des rétentions au niveau du karst.

Les débits mesurés dans baume Salène représentaient environ $\frac{3}{4}$ du débit mesuré à la source du Moulin. Des apports, soit par des pertes aval de la Cèze ou des drainages d'eau infiltrée au niveau du plateau peuvent expliquer cette différence.

D'après les données GSBM [Guyot, 1981] :

Injection	intérieur de la perte de baume Salène
Date	dimanche 5 avril 1981 à 10h40
Colorant	250 g de fluorescéine
Débit de la perte	180 L/s - mesure au micromoulinet -
Conditions générales	décrue de la Cèze et de la résurgence du Moulin
Débit de la Cèze à Montclus à 07h00	70,7 m ³ /h station limni DDE
Réapparition	résurgence du Moulin dimanche 5 avril 1981 à 15h10 sources du Travès : après 18h00
Temps de passage	4h30
débit de la résurgence	260 s à 17h00 -mesure au micromoulinet -

II.2.2. Bassins d'alimentation karstiques du plateau de Méjannes-le Clap et traçages

II.2.2.i. Colorations bassin de la source des Fées :

injection	aven de l'Agas - siphon à -175 m
date	26/01/1969 à 05h00
colorant	fluorescéine 3kg
débit	2 L/s
réapparition	Source des Fées
date 1ière	
réapparition	01/02/1969
temps de passage	moins de 148 h
distance théorique	2300 m
débit à la source	60 L/s
détection	œil - charbon actif
auteur	G.Fabre (ASN) - LGIGM Laboratoire de Géomorphologie, Institut de Géographie, Montpellier

injection	Aven des Papes - siphonnage d'un gour à -70 m
date	26/03/1991 à 21h00
colorant	fluorescéine 2kg
débit	0,1 L/s
réapparition	Source des Fées
date 1ière	
réapparition	30/03/1991
temps de passage	entre 70 et 90 heures
distance théorique	2050 m
débit à la source	55 L/s
détection	œil - charbon actif - spectrophotomètre
auteur	J. Jolivet – J-C Veyrunes (GSBM) Groupe Spéléo Bagnols / Marcoule

II.2.2.ii. Colorations bassin de la source de Force-Mâle :

injection	aven du Solitaire - rivière aval à -104 m
date	02/04/1994 à 17h00
colorant	rhodamine 1,5 kg
débit	environ 6 L/s
réapparition	source de Force-Mâle
date 1ère réapparition	09/04/1994 avant 20h00
temps de passage	171 heures
distance théorique	875 m
Débit à la source	1,5 L/s
détection	œil - charbon actif -spectrophotomètre
auteur	J-F. Perret - B. Le Falher – P. Bevengut - A. Coutureau GSBM
analyse	J. Jolivet - J.C. Veyrunes

injection	Aven du lac de Carquignau ou de l'Hopital
date	23/10/1977
colorant	fluorescéine 1kg
débit	1 L/s
réapparition	source de Force-Mâle
date 1ère réapparition	avant le 03/11/1977
temps de passage	environ 235 heures
distance théorique	1850 m
débit à la source	?
détection	charbon actif
réapparition	source du Moulin (n°10)
date 1ère réapparition	avant le 03/11/1977
temps de passage	environ 235 heures
distance théorique	2875 m
débit à la source	?
détection	charbon actif
auteur	G. Fabre ERA 282, CNRS
<u>observation</u>	<i>Il est fort probable que le colorant sortant à la source de Force-Mâle est pollué la Cèze dont une partie a transité par la perte de baume Salène puis la source du Moulin - résultat à prendre avec précaution.</i>

II.2.2.iii. Colorations du bassin de Marnade :

injection	aven Jeanine - salle à -22m
date	13/03/1969 à 20h00
colorant	fluorescéine 5kg
débit	0,250 L/s
réapparition	Source de Marnade
date 1ère réapparition	avant le 25/03/1969
Temps de passage	moins de 278 heures
distance théorique	6700 m
Débit à la source	100 L/s
détection	œil - charbon actif
auteur	G. Fabre (ASN) - LGIGM Laboratoire de Géomorphologie, Institut de Géographie, Montpellier

injection	Aven de Geneviève
date	30/01/1971
colorant	? Fluorescéine provenant de gilets "May West"
débit	0,1 L/s
réapparition	Source de Marnade
date 1ère réapparition	12/02/1971
Temps de passage	?
distance théorique	7400 m
Débit à la source	?
détection	charbon actif
auteur	des spéléologues
analyse	M. Wienin GSUM -Groupe Spéléologique Universitaire de Montpellier
<u>observation</u>	<i>fort scepticisme sur la valeur de cette expérience</i>

injection	Aven des Pères
date	31/03/1981 à 20h00
colorant	fluorescéine 1kg
débit	1 L/s par apport d'eau
réapparition	Source de Marnade
date 1ière réapparition	05/04/1981
temps de passage	120 heures
distance théorique	4750 m
débit à la source	> à 100 L/s
détection	charbon actif - spectrophotomètre
auteur	J. Jolivet - J.C. Veyrunes - J. Domergue - G. Kulh Equipe 30- INRA

injection	Aven de Camélié à -40 m
date	19/05/1968 à 17h00
colorant	fluorescéine 3 kg
débit	?
réapparition	Source de Marnade
date 1ière réapparition	avant le 02/06/1968
temps de passage	> 325 heures
distance théorique	8200 m
débit à la source	50 L/s
détection	charbon actif
auteur	H. Pouzancre - A. Suavet CERH Centre d'Etudes et de Recherches Hydrogéologique Institut de Géologie de Montpellier

injection	Aven de Camélié à - 125m
date	22/08/1981
colorant	fluorescéine 4kg
débit	?
réapparition	Source de Marnade
date 1ière réapparition	11/10/1981
temps de passage	1200 heures
distance théorique	8200 m
débit à la source	45 L/s
détection	charbon actif
auteur	JL. Guyot GSBM

injection	Font d'Higuet
date	24/03/1976
colorant	fluorescéine 6kg
débit	1,5 L/s
réapparition	Source de Marnade
date 1ière réapparition	< 21/04/1976
temps de passage	< 684 heures
distance théorique	11100 m
débit à la source	80 L/s
détection	charbon actif
auteur	G. Fabre ERA 282, CNRS

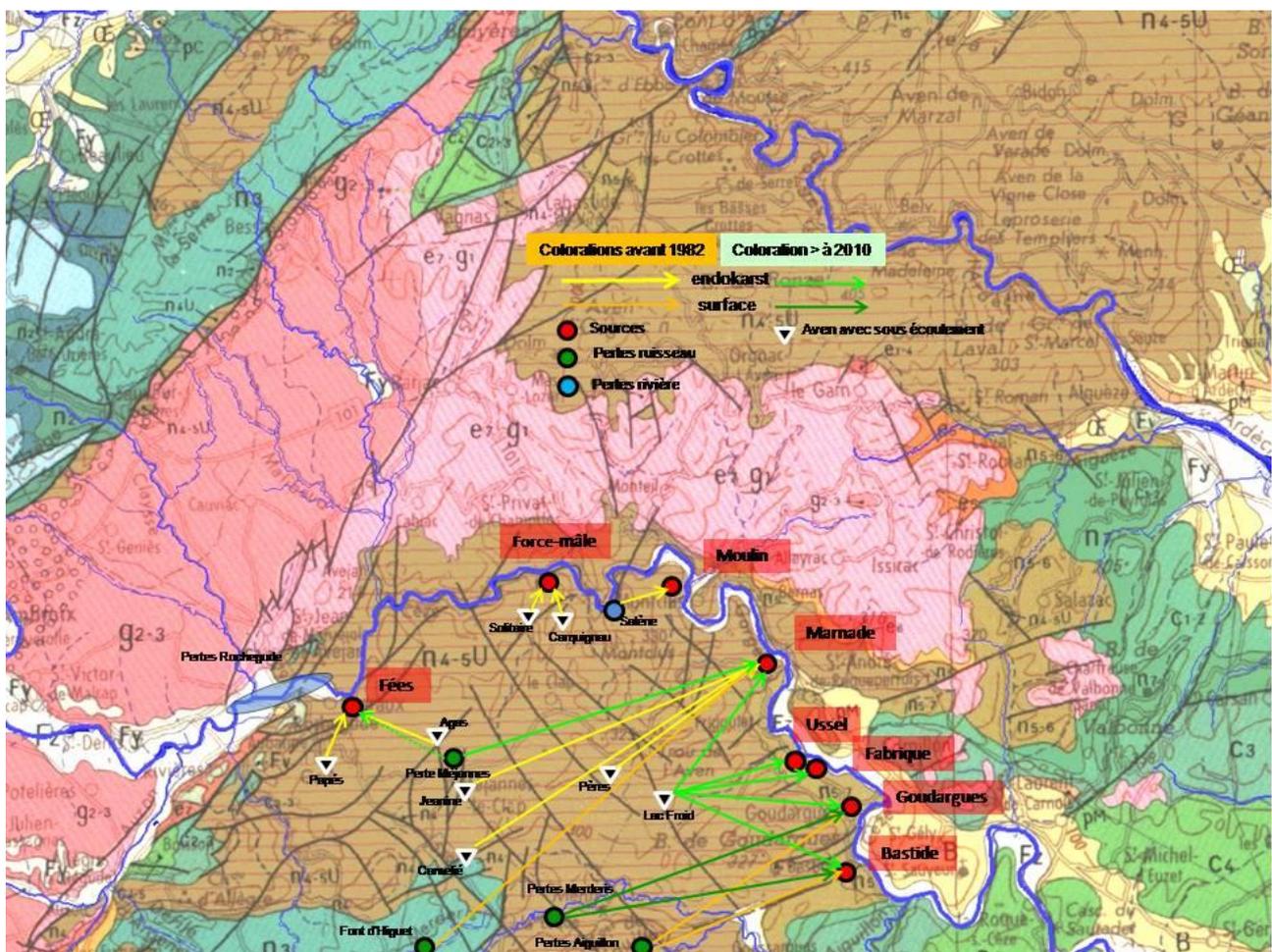
II.2.2.iv. Colorations du bassin de Goudargues - la Bastide :

injection	Perte de l'Aiguillon
date	17/02/1968
colorant	fluorescéine 1kg
débit	?
réapparition	Sources de Goudargues et de Bastide Froide
date 1ière réapparition	<24/02/1968
temps de passage	< 168 heures
distance théorique	Goudargues: 7360 m.- Bastide : 6560 m
débit à la source	Goudargues = 360 L/s - Bastide = 350 L/s
détection	charbon actif
auteur	H. Pouzancre CERH Centre d'Etudes et de Recherches Hydrogéologique Institut de Géologie de Montpellier

injection	Perte du Merderis
date	01/11/2010
colorant	fluorescéine 1,5kg
débit	< à 2 l/s
réapparition	Sources de Goudargues et de Bastide Froide
date 1ière réapparition	Bastide : 07/11/2010 - Goudargues : 09/11/2014
temps de passage	Bastide : 140 heures - Goudargues : 210 heures
distance théorique	Bastide : 7280 m. - Goudargues : 7390 m.
débit à la source	Bastide = 1340 L/s - Goudargues = 530 L/s
détection	charbon actif
auteur	J. Jolivet UMR Espace 7300- CNRS

Suite aux traçages réalisés courant les années 2010 et 2011, il apparaît que les quantités de colorant utilisées dans les réalisations antérieures, ont été sous estimées. La coloration de 2011 démontre cet état de fait.

injection	Aven du Lac Froid
date	13/03/2011
colorant	fluorescéine 5kg
débit	2 l/s
réapparition	Sources de Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et de Bastide Froide
temps de passage	Marnade : 230h - Ussel : 130 h - Fabrique : 178h - Bastide : 177 h - Goudargues : 178 h
distance théorique	Marnade : 5850m - Ussel : 3420m - Fabrique : 3850m - Bastide : 4385m - Goudargues : 4370m
débit à la source (L/s)	Marnade : 3800 - Ussel : 480 - Fabrique : 170 - Bastide : 513 - Goudargues : 610
détection	charbon actif
auteur	J. Jolivet UMR Espace 7300- CNRS



Carte 5 : Synthèse cartographique des résultats des traçages historiques.

II.2.3. Bilan des traçages historiques

II.2.3.i. Inconvénients des suivis qualitatifs

Le point commun de tous les traçages réalisés jusqu'à présent sur la zone d'étude est l'aspect qualitatif du suivi de la restitution. En effet, seuls des fluocapteurs (ou charbons actifs) ont été utilisés pour assurer le suivi du traceur. Les inconvénients principaux de ce type de suivi sont les suivants :

- La réponse est binaire (positif ou négatif), il est impossible de réaliser un bilan de masse pour connaître le taux de restitution du traceur ;
- Corollaire de l'affirmation précédente, le temps correspondant au passage du maximum de concentration à l'exutoire n'est pas connu ;
- Les temps de premières arrivées du traceur sont approximatifs et dépendent de la fréquence de renouvellement des fluocapteurs.

Les traçages réalisés au cours du projet tâcherons dans la mesure du possible d'assurer un suivi quantitatif de la restitution.

II.2.3.ii. Doutes sur les résultats de certains traçages

Plusieurs résultats sont assez inattendus, c'est par exemple le cas des traçages réalisés au niveau du lac Froid, des pertes de Merderis et des pertes de l'Aiguillon. Plusieurs chemins d'écoulements se recoupent. Sans que ces résultats fussent impossibles, ils impliquent une forte dispersion du colorant en karst profond et suggèrent que les conduits karstiques ne soient pas compartimentés. Ces résultats de traçages mériteraient d'être confirmés compte tenu du fait que les problèmes analytiques ou d'éventuelles pollutions d'échantillons (charbons ou prélèvements d'eaux) ne soient pas rares.

Par ailleurs, le traçage des pertes de Rochevide a été réalisé alors que le flux de la rivière n'était pas interrompu. Ceci implique qu'une grande partie du colorant a continué son trajet en rivière et a pu potentiellement contaminer certaines sources. De plus, ce traçage, du fait qu'il soit de nature qualitative, ne répond à la question de la part d'alimentation (recyclage) des eaux de la Cèze aux sources de la rive gauche.

II.2.3.iii. Lacunes de connaissances en rive gauche et au Sud de la zone d'étude

L'idée la plus importante à retenir de ces traçages historiques est le manque de connaissance en rive gauche et au Sud du plateau karstique.

Pour la rive gauche, plusieurs questions restent en suspens. Et ces questions sont directement liées au fait que l'extension des formations urgoniennes affleurantes est très faible en rive gauche.

- Premièrement, se pose la question de l'extension des bassins d'alimentation des sources de Foulatier, Fond Canet, Monteil et les 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 ?
- Deuxièmement, se pose la question des relations entre la Cèze et l'Ardèche pour laquelle plusieurs hypothèses sont possibles.
 - Dans le premier cas, on suppose une ligne de partage des eaux entre le bassin versant de la Cèze avec ses sources en rive gauche et le bassin versant de l'Ardèche avec ses

sources en rive droite. Dans ce cas de figure, le synclinal d'Issirac doit jouer un rôle hydraulique encore inconnu.

- Dans le second cas, on suppose qu'une partie des débits de perte de la rivière Cèze alimente les sources de l'Ardèche. Le suivi simultané des débits des sources en rive gauche et de la Cèze en amont et en aval des pertes permettra probablement de lever cette incertitude.
- Dans le troisième cas, on suppose un fonctionnement mixte qui dépend de l'état de saturation du karst. Avec en situation de hautes eaux l'expression de la première hypothèse et en situation de basses eaux l'expression de la seconde hypothèse.

Pour le Sud du plateau de Méjannes-le-Clap, les traçages réalisés sont moins nombreux et aucun suivi de restitution n'a été assuré au niveau des sources temporaires situées les plus au Sud (par exemple la source de Soudans ou Issoudans). Il pourrait être intéressant de réaliser un traçage sur la partie Sud en prenant en compte ces sources pour le suivi.

Le bilan dressé dans ce paragraphe a permis d'orienter l'organisation et la planification des opérations de traçages actuelles et futures. Ainsi, dans la mesure du possible, les traçages seront assurés de manière quantitative. Ils auront pour but de lever les doutes sur certains résultats de traçages tout en palliant les lacunes de connaissance.

L'organisation des campagnes de traçages a été aiguillée par le guide pratique de référence pour l'utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie [Schudel et Al., 2002]. Le choix du dispositif de suivi a été orienté par la comparaison des méthodes décrite en Annexe 1.

II.3. Protocole de traçages réalisés en 2014

Deux injections ont été réalisées entre mars et mai 2014. Le Tableau 1 expose les caractéristiques détaillées des deux injections. La Carte 6 ci-dessous présente les deux points d'injection de colorants, les directions d'écoulements supposées ainsi que les sources contrôlées.

II.3.1. Traçage de la grotte Flandin

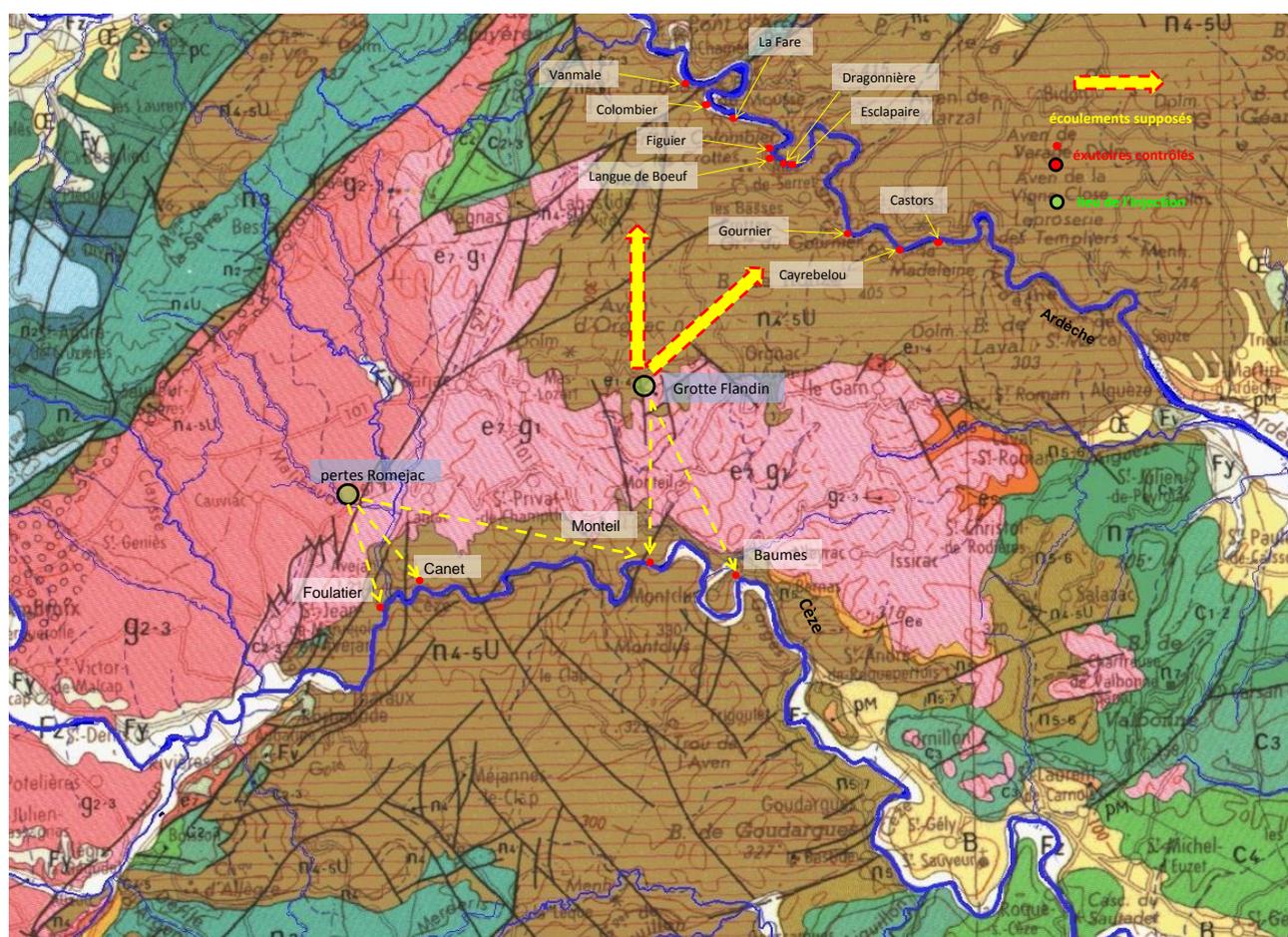
Un traçage colorimétrique à la fluorescéine (10 kg injecté) a été réalisé en mars 2014 au niveau de la grotte Flandin (injection à – 120 m de profondeur par rapport à la surface du sol) située entre la Cèze (rive gauche) et l'Ardèche (rive droite) à la bordure Nord du synclinal d'Issirac. Un dispositif de suivi de restitution du traceur a été mis en œuvre au niveau de sources tant côté Ardèche que côté Cèze. Ce suivi comprend l'installation de fluorimètres de terrain couplés à des fluocapteurs renouvelés régulièrement. Côté Cèze, les sources de Monteil et les Baumes font l'objet d'un suivi. Le traceur n'est, à l'heure actuelle (04/06/14), pas encore ressorti de manière probante. Seulement quelques traces ont été décelées (mais non confirmées) côté Ardéchois. Compte tenu de la quantité de traceur injectée et du temps déjà écoulé, il est très fort probable que le traceur soit stocké au sein du karst (siphons désamorçés) et qu'il ne ressorte pas avant un fort épisode pluvieux. De fortes précipitations permettraient de remettre en charge le karst en jouant un rôle de piston pour éjecter le traceur.

II.3.2. Traçage des pertes du Roméjac (Malaygüe)

Un traçage des pertes du Roméjac, un affluent de la Cèze, a été réalisé en mai 2014. Le Roméjac est un affluent la Malaygüe qui se jette dans la Cèze en rive gauche. En aval de ses pertes, le Roméjac est à sec. Trois kilogrammes d'éosine ont été injectés dans cette zone. Le suivi est assuré à l'aide de fluorimètres au niveau des sources de Foulatier et de Fond Canet. Une veille (fluocapteurs) est aussi assurée au niveau des sources de Monteil et des Baumes. Le traceur n'est, à l'heure actuelle (04/06/14), pas encore ressorti.

Tableau 1 : Caractéristiques des injections de traceurs réalisées entre mars et mai 2014

Campagne mars-mai 2014												Bassin versant de la Cèze		Bassin versant de l'Ardèche	
Points d'injection	XL93 (m)	YL93 (m)	ZL93 (m)	Objectif de caractérisation	Situation hydrologique	Date d'injection	Contexte d'injection	Contexte géologique	Traceur envisagé	Quantité injectée (kg)	Eau ajoutée (m ³)	Distance min (km)	Distance max (km)	Distance min (km)	Distance max (km)
Grotte Flandin	811988	6357335	125	Répartition des eaux entre BV Cèze et Ardèche	hautes eaux	29-mars-14	Endokarst (ruisseau souterrain à -100 m)	Crétacé inf (Urgonien)	Fluorescéine (Uranine)	15	0	4	5	6.4	11
Roméjac	805906	6355259	119	Où sont redistribués les eaux de perte du Roméjac (Malaygüe)	basses eaux	19-mai-14	pertes du ruisseau	Contact crétacé/tertiaire	Eosine	3	0	3	6		



Carte 6 : Traçages réalisés entre mars et mai 2014.

II.4. Traçage restant à réaliser en 2014 et perspectives pour 2015

La Carte 7 présente le traçage des pertes de la Cèze à l'étiage 2014 et les autres traçages envisagés pour 2015.

II.4.1. Traçage des pertes de la Cèze à l'étiage 2014

Un dernier traçage est prévu pour l'année 2014 en situation d'étiage (été) au niveau des pertes de la Cèze, si les conditions de débit de la rivière le permettent, c'est-à-dire si un assec est observé en aval des pertes de Rochegude. Ce traçage pourra être reporté en 2015 si les conditions ne sont pas réunies en 2014. D'après les résultats antérieurs, les sources de rive gauche seront équipées, ainsi que certains exutoires de rive droite (Fées, Moulin, Marnade), pour corroborer les résultats précédents, et ceux de la partie orientale du plateau de Méjannes le Clap pour vérifier les éventuelles venues d'eau de la Cèze.

Il a pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de quantifier dans quelles proportions et au bout de combien de temps ces sources sont impactées (bilan de masse).

II.4.2. Perspectives de traçages pour 2015

Pour 2015, les objectifs des traçages envisagés sont doubles. D'une part, mieux préciser les relations entre l'aquifère de la Cèze et celui des Gardons au Sud et d'autre part, de refaire certains anciens traçages afin de confirmer ou réfuter certains résultats « inattendus » et suivre de manière quantitative la restitution.

- Coloration de l'aven des Cartouses :

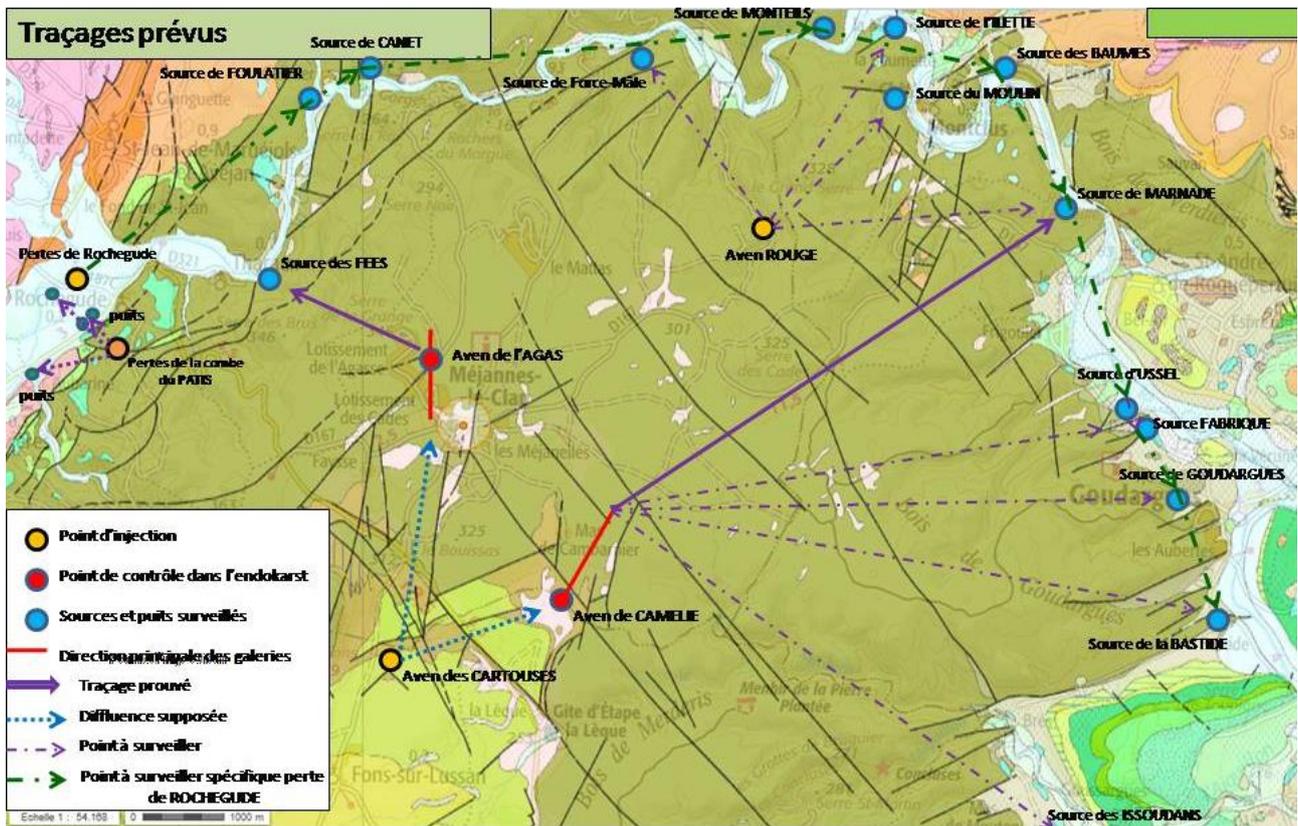
Situé à l'Ouest de l'aven de Camélié, cette cavité joue le rôle de perte du ruisseau qui le borde. Sa position peut supposer qu'une diffluecence endokarstique existe entre les circulations souterraines de la rivière de Camélié (moins 125 mètres) et de l'aven de l'Agas (moins 160 mètres). Ces deux entités feront l'objet de surveillance (charbons activés) ainsi que les résurgences mentionnées sur la carte (charbons, fluorimètre).

- Coloration des pertes du ruisseau du Pâtis :

Aucune connaissance hydrogéologique sur cette partie bordant le fossé d'Alès. Si aucun exutoire est présent sur cette zone, des puits artificiels de profondeur conséquente, en particulier celui du pompage AEP de la Sissé bas de 50 mètres et ayant mis à jour une circulation d'eau importante dans du calcaire ludien karstifié, permettront de voir la relation entre les roches carbonatées de la bordure du plateau urgonien et les terrains priaboniens du fossé.

- Coloration de l'aven Rouge :

Cet aven délimite deux bassins d'alimentation de surface, l'un orienté vers le N-O, l'autre vers le N-E. Ce traçage préciserait le point d'un des bassins karstiques, ou bien deux. La cavité étant fossile, il serait alors demandé une injection d'eau par camion-citerne, juste après de fortes pluies.



Carte 7 : Traçages envisagés pour l'été de l'été 2014 et pour l'année 2015.

PARTIE III

—

Approches métrologique et hydrologique par suivi des débits

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Joël Jolivet et Ingrid Canovas

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

→ Jordan Ré-Bahuaud, Chapuis Hervé et Didier Graillot

(UMR 5600 EVS, EMSE)

III.1. Principe et échantillonnage

III.1.1. Profils longitudinaux de la rivière

Le profil longitudinal de la rivière a été réalisé avec un canoë doté d'un DGPS embarqué et équipé de sondes de température/conductivité comme illustré en Figure 4 ci-après. Au cours de la descente de la Cèze en canoë, le DGPS enregistre la localisation spatiale (X, Y et Z) toutes les secondes avec une précision pluricentimétrique à centimétrique. A partir de cet enregistrement, il est possible de tracer le profil (géométrique) en long de la Cèze. En parallèle, du relevé au DGPS, des sondes trainées derrière le canoë, enregistrent les variations de température et de conductivité au fil de la descente. Les données enregistrées par les sondes sont synchronisées à celles du DGPS afin de connaître les variations longitudinales de température et de conductivité des eaux de la Cèze. La descente de la Cèze le long de la zone d'étude représente environ 34 kilomètres. Pour des raisons pratiques, la descente a été réalisée en trois fois, respectivement les 14/05, 05/07 et 10/07/13.

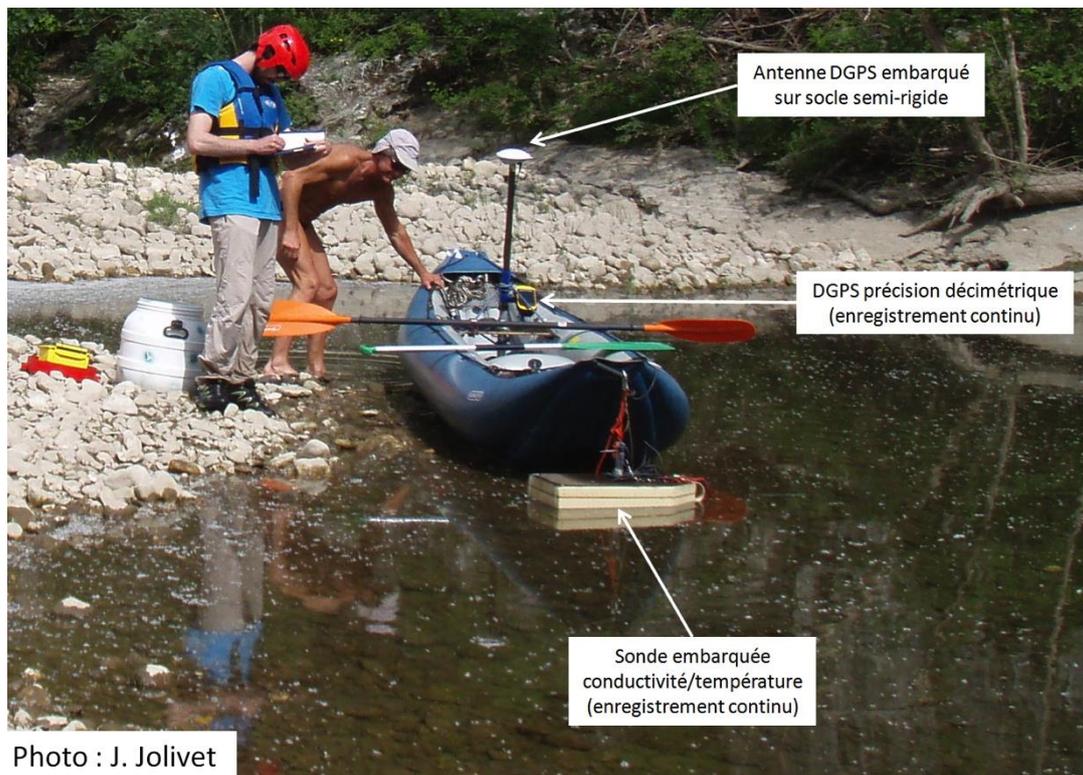


Figure 4 - Dispositif embarqué de mesures du profil longitudinal de la Cèze incluant la géolocalisation ainsi que la température et la conductivité de l'eau de la rivière (Juillet 2013).

III.1.2. Approche hydrologique : Jaugeages des débits des sources et de la rivière

Pour connaître les gains (provenant des sources) ou pertes de débits de la rivière, il convient de mesurer de manière synchrone les flux entrants et sortants le long de tronçons de rivières répartis de manière stratégique. La Figure 5, ci-après, illustre le principe de ces jaugeages différentiels. Pour un tronçon de rivière donné, les flux entrants correspondent à la somme des débits des sources le long de ce tronçon tandis que les débits sortants correspondent à la somme des débits de pertes sur ce même tronçon. Les débits des sources et des tronçons de rivière sont mesurés avec un micromoulinet alors que les débits de pertes sont estimés par différences. La méthode de mesure au micromoulinet est adaptée aux gammes des débits rencontrés pour la rivière et les sources (de quelques L/s à plusieurs milliers). Cette mesure consiste à estimer la répartition des champs de vitesses le long dans profil transversal de rivière. Ces vitesses sont reportées sur un quadrillage géométrique du tronçon de rivière (profil géométrique transversal). Le calcul de débit s'obtient en combinant la somme des vitesses réparties le long de ce profil transversal géométrique. D'autres méthodes seront envisagées pour estimer les débits en période de crue.

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 durant la période d'une décrue (grossièrement de mars à septembre). Un effort particulier est concédé pour caractériser les faibles débits de la rivière et des sources en période 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 (banque hydro, SPC grand delta et OHM-CV) ne sont pas suffisamment précises.

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

Pour l'année 2014, un suivi plus complet de la décrue de la Cèze et des sources est en cours de réalisation. Ce suivi comprend 5 à 6 campagnes de jaugeages prévues entre mars et septembre. Actuellement déjà 2 campagnes de jaugeages ont été réalisées en rivière (4 sections) et environ 4 campagnes ont été réalisées pour les sources (12 sources) entre mars et juin.

La Carte 2 localise les sections actuellement jaugeées en rivière. Soit une première section à l'amont des pertes de Rohegude (pk0), une seconde à l'aval des pertes de Rohegude (pk4,5), une troisième (pk27) qui sépare les sources de l'amont (Fées, Foulatier, Fond Canet, Vanmâle, Force Mâle, Monteil, Moulin, les Baumes et Marnade) des sources de l'aval (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide) et une quatrième à l'aval des sources et de la zone d'étude (pk34). Pour l'été 2014, deux sections de mesures supplémentaires (respectivement pk15 et pk16,5) vont être ajoutées pour encadrer les pertes de Baume Salène. Toutes les sources citées précédemment font l'objet de jaugeages.

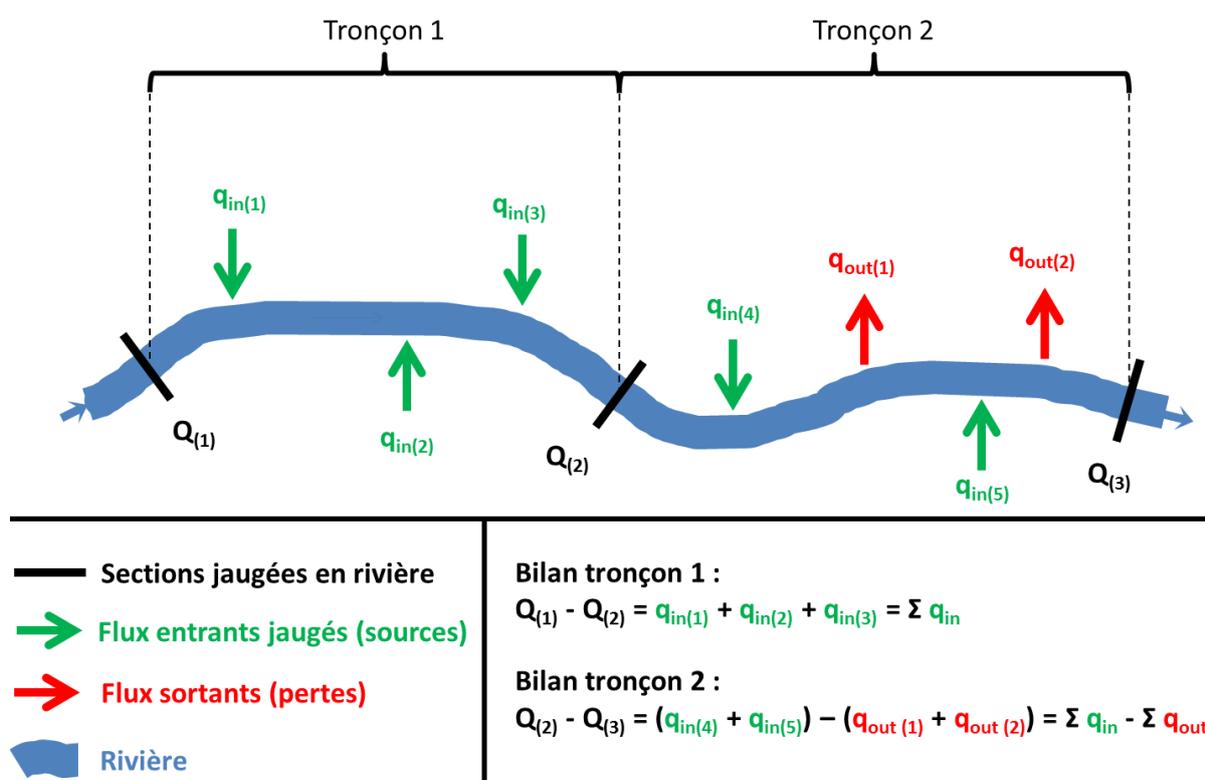


Figure 5 : Schéma de principe des jaugeages différentiels pour l'estimation des échanges entre karst et rivière.

Les approches métrologique et hydrologique sont intimement liées. Le prochain paragraphe traite du principe de l'approche métrologique et aborde le lien entre métrologie et hydrologie.

III.1.3. Approche métrologique : Suivi des sources et de la rivière

Les sondes CTD, de la marque « Solinst », permettent d'enregistrer par pas de temps d'un quart d'heure les variations de hauteur, de température et de conductivité des eaux. Ces sondes ont été disposées en fin d'hiver et début de printemps au niveau des principales sources connues (environ 12 sources) et au niveau de la rivière (sur 4 tronçons). Ce suivi correspond à celui des tronçons de rivière et des sources jaugeés.

Le suivi en continu est prévu sur au moins deux cycles hydrologiques (2014 et 2015). Il a pour objectif de compléter la vision générale des écoulements pour mieux appréhender les transferts d'eau et l'inversion des échanges entre les 2 milieux (souterrain et superficiel) mais aussi de définir une typologie hydrodynamique des différentes sources. Les résultats des campagnes de jaugeages ponctuelles (approche hydrologique) pourront être positionnés par rapport à l'évolution générale des chroniques de hauteurs et serviront pour les courbes de tarage.

Par ailleurs, 4 pluviomètres ont été répartis dans des points stratégiques afin d'apprécier les variations spatiales des précipitations sur la zone d'étude.

Des relations hauteur/débit seront estimées pour les différentes sources et pour la rivière. Les chroniques de débits et de précipitations permettront d'alimenter l'approche par modélisation (réseaux neuronaux) des relations pluies/débits pour l'année 2015.

Par ailleurs, le suivi des débits en cours d'acquisition est complémentaire des autres sources de données publiques (par exemple le Service de Prévention des Crues). En effet, l'accent a été mis sur la précision des débits en situation de basses eaux pour pallier les faiblesses des données publiques n'ayant pas pour vocation la gestion des débits d'étiages.

III.2. Premiers résultats et perspectives

III.2.1. Profils longitudinaux de la rivière

III.2.1.i. Profil géométrique de la Cèze

La Figure 6, ci-après, expose le profil longitudinal géométrique de la Cèze. Ce profil est obtenu en affichant sur l'axe des abscisses la distance euclidienne dans le plan (X, Y) qui a été calculée entre chaque point GPS en fonction de l'altitude (Z) affichée en ordonnées. Le trait de couleur noire représente le profil interprété des points GPS brutes. Les traits pointillés verticaux localisent les sources karstiques et lieux remarquables. Les zones de pertes connues sont localisées le long du profil. Le détail de ce profil, découpé en trois tronçons, ainsi que les précisions des données du DGPS sont présentées en Annexe 2. Ce profil permet de déterminer le niveau de base des écoulements karstiques et de localiser l'altitude des zones de pertes. Il constitue un support de base indispensable pour toutes comparaisons ultérieures avec des résultats issus d'autres approches.

III.2.1.ii. Profil de conductivité et de température de la Cèze

La Figure 7, ci-après, présente le profil longitudinal de conductivité et de température de la rivière Cèze. L'axe des abscisses correspond à la distance amont/aval en mètres. L'axe des ordonnées, situé à gauche, correspond à la température des eaux de la Cèze. L'axe des ordonnées situé à droite, correspond à la conductivité des eaux de la Cèze. Les traits pointillés verticaux localisent les sources karstiques et les affluents. Le profil, réalisé en trois temps, n'est pas synchrone. Des différences importantes existent entre la date du 14/05/13 et les dates du 05/07/13 et du 10/07/13. Pour la température de la rivière, elle est de 6 degrés plus chaude en juillet par rapport à mai, de plus, l'amplitude des variations semble plus importante le long de la Cèze en juillet. Pour la conductivité de la rivière, la différence est d'environ 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre mai et juillet. La conductivité des sources karstiques peut varier d'une source à l'autre mais elle est

généralement sensiblement plus importante que celle de la rivière. De la même manière, pour la période de juillet, la température des sources apparaîtra systématiquement plus froide que celle de la rivière (explication détaillée dans la partie suivante intitulée « Approche Thermique par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée »).

D'une manière générale, il est intéressant de noter que la plupart des sources occasionne une baisse des températures et un gain de conductivité (pour cette période). L'homogénéisation des eaux entre la rivière et les sources n'étant pas immédiate, le passage du canoë proche des sources engendre un impact local parfois important (pic positif pour la conductivité et négatif pour la température). Cet impact s'atténue avec l'éloignement de la source comme c'est le cas pour les Fées, Monteil ou Bastide Froide. Le gain de conductivité ou la baisse de température réelle engendrée par l'alimentation d'une source est obtenue après une certaine distance d'homogénéisation plus à l'aval. Cette distance est plus ou moins importante suivant les sources, elle est par exemple très progressive pour la source de la Marnade et beaucoup plus brusque pour les sources d'Ussel et de la Fabrique. Cette distance d'homogénéisation dépend essentiellement de la configuration de la rivière et dans une moindre mesure du caractère ponctuel ou diffus de la source. Plus précisément, si la lame d'eau en rivière est faible et l'écoulement turbulent, le mélange sera rapide et la distance d'homogénéisation sera courte. En revanche, dans le cas où un seuil (naturel ou anthropique) est présent plus à l'aval de la source, la lame d'eau en rivière aura tendance à être importante, le courant sera plus faible, le mélange sera moins rapide et la distance d'homogénéisation sera plus longue.

Une estimation des débits des sources a été réalisée à partir des gains de conductivité le long du profil. Cependant, ces débits, présentés en Annexe 3, sont soumis à de très fortes incertitudes du fait notamment de la grande sensibilité des paramètres. Ainsi, la lecture de ce profil est avant tout qualitative puisque les gains de conductivité ne sont pas uniquement proportionnels aux débits des sources. En effet, il faut connaître le débit de la Cèze en amont de chaque source et il est aussi nécessaire de considérer la conductivité des sources qui peut être très variable. Par exemple, la conductivité de la source de la Marnade était d'environ 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tandis qu'elle était de seulement 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la source des Baumes alors que les débits étaient du même ordre de grandeur pour la période, soit environ 200 L/s. Enfin, le contraste de conductivité est moins marqué en aval qu'en amont ayant pour effet de masquer l'influence des sources.

III.2.1.iii. Bilan et perspectives des profils longitudinaux

- Avantages :

La réalisation de profils longitudinaux (géométrie, température et conductivité) de la rivière est une bonne méthode prospective pour s'approprier un nouveau site d'étude. En effet, les profils se révèlent intéressants pour mieux identifier les principales aires d'émergence du karst (identification spatiale des principales sources). Ces profils renseignent également sur les distances d'homogénéisation des eaux et est donc indispensable à prendre en compte dans l'échantillonnage chimique des eaux de la rivière.

- Inconvénients :

Les profils de conductivité et de température ne permettent pas d'en déduire directement le débit des sources. Plusieurs informations importantes sont à prendre en compte pour réaliser de tels calculs et malgré cela, l'incertitude des débits calculés demeure forte.

Par ailleurs, les mesures en canoë peuvent être difficiles à réaliser et sont parfois périlleuses (forts courants, ressauts, embâcles). De plus, le matériel est particulièrement onéreux et ne tolère pas l'immersion.

Dans ces conditions, il est difficile d'assurer des mesures saisonnières. Ainsi, bien qu'elles eurent été intéressantes, les mesures en condition de hautes eaux sont imprudentes. Il est également difficile de réaliser des mesures en situation d'étiage compte tenu de la faible lame d'eau qui entrave la navigation.

- Perspectives d'amélioration :

Au vu des résultats, il paraît opportun de réaliser les profils durant une plus courte période afin de limiter les discontinuités au niveau des températures et des conductivités. Selon le même principe, il est prévu pour l'année 2015 de suivre un plus grand nombre de paramètres (pH, turbidité, Oxygène dissout, signal radon, etc.) en rivière et de les comparer avec des mesures au niveau des sources. La mesure en continu du signal radioactif du radon est révélateur des apports souterrains. Le principe et les modalités de la mesure du radon sont détaillés dans la partie « conclusions et perspectives » de ce rapport.

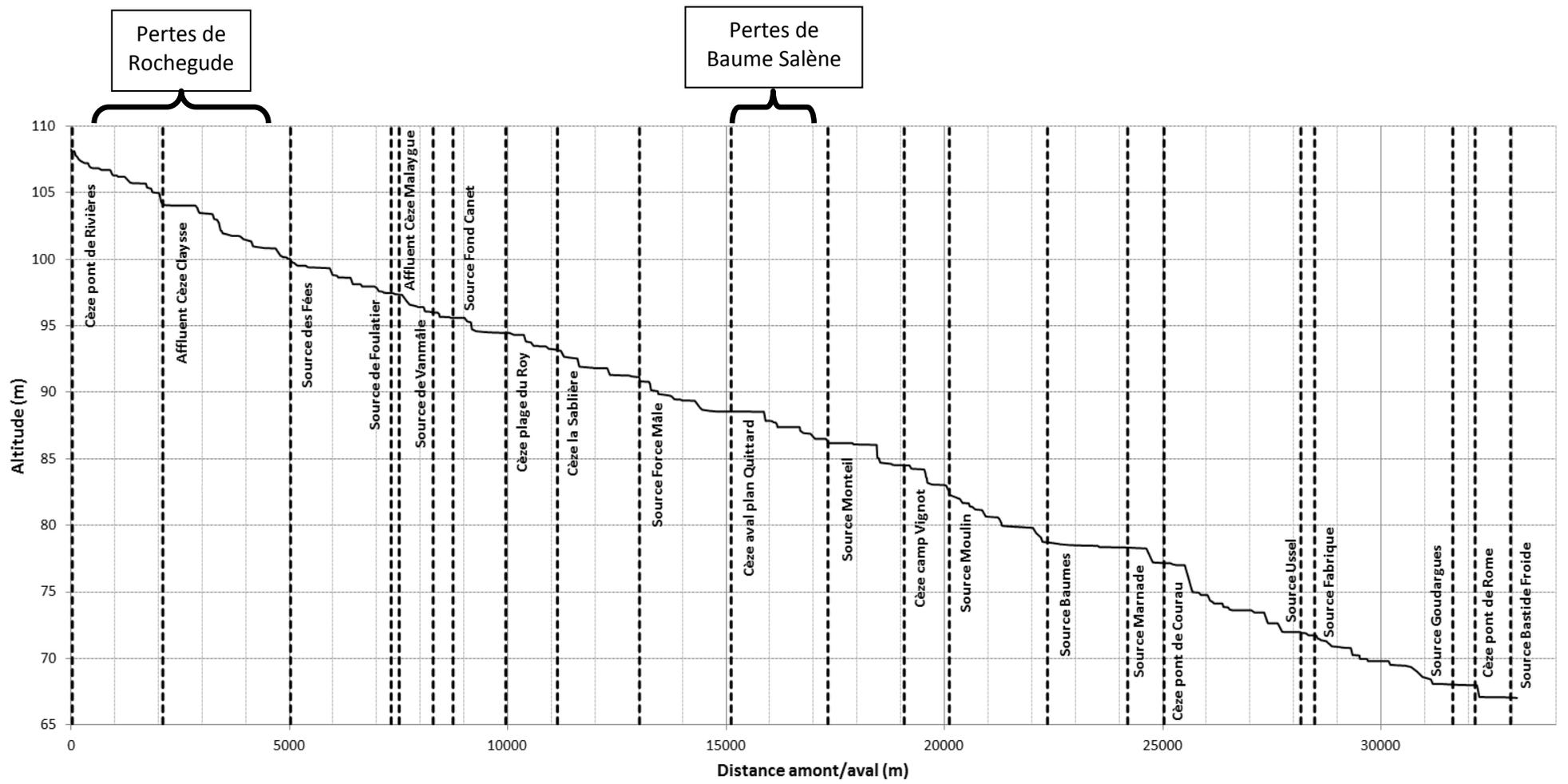


Figure 6 : Profil longitudinal géométrique de la rivière Cèze.

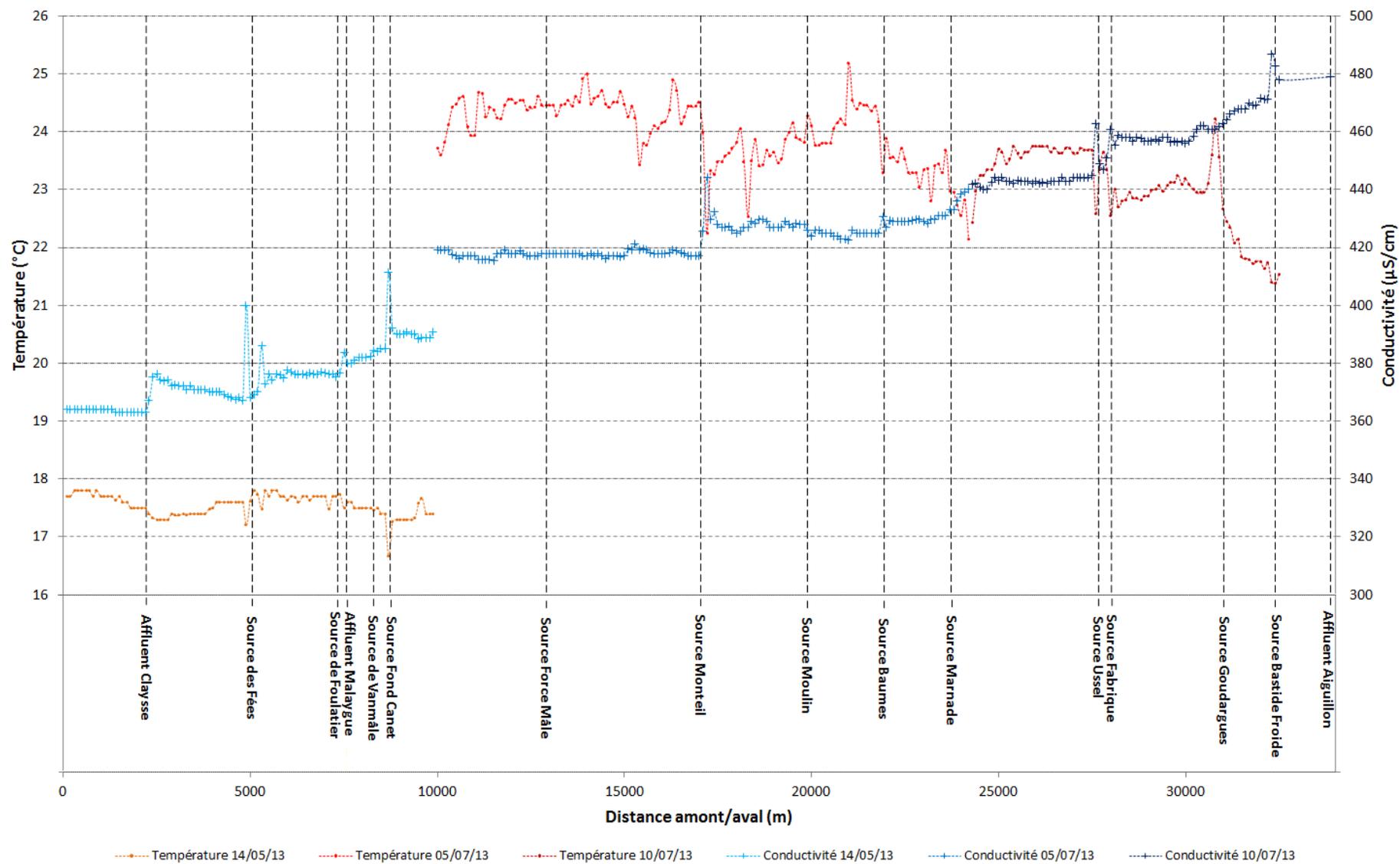


Figure 7 : Profil longitudinal (amont/aval) de conductivité et de température de la rivière Cèze.

III.2.2. Jaugeages et suivi de débits des sources et de la rivière

III.2.2.i. Premiers résultats des jaugeages des sources et des tronçons de rivière

Avant l'année 2013, un historique des mesures de débits existe sur la Cèze et les sources, il est présenté en Annexe 4. Pour l'année 2013 du projet, des mesures de débits ont été réalisées sur la Cèze (2 campagnes sur 3 sections) et les sources (1 campagne) et sont présentées en Annexe 5.

La Figure 8 montre les premiers résultats des jaugeages des principales sources durant la première partie de la décrue de 2014. Les tableaux de valeurs de débits des sources sont présentés en Annexe 6.

Pour la période considérée, certaines sources dévoilent une faible variabilité des débits (Par exemple, les sources des Baumes et du Moulin), d'autres ont une variabilité plus forte (par exemple, les sources de Monteil, de Marnade et de Bastide Froide). Cette variabilité entre sources est notamment liée à la taille du bassin versant drainé, à la configuration géologique souterraine (mobilisation des eaux de l'épikarst et/ou du karst profond), au type de fonctionnements hydrodynamiques souterrains (libre, de trop plein, fortement ou faiblement dispersif) et aux relations avec les niveaux de la rivière.

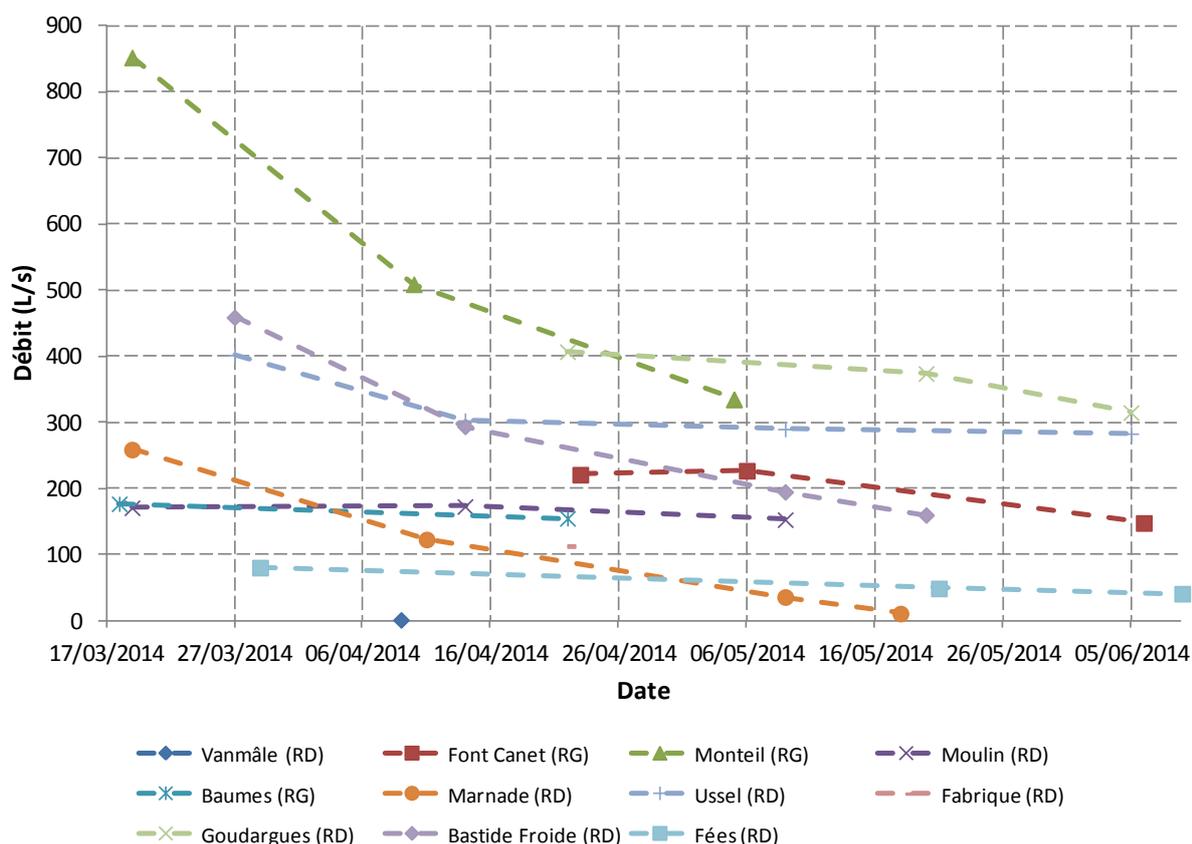


Figure 8 : Résultats de jaugeages des principales sources durant la décrue de 2014.

La Figure 9 montre les premiers résultats des jaugeages des quatre tronçons de la Cèze durant la première partie de la décrue de 2014. Les tableaux de valeurs de débits de la Cèze sont présentés en Annexe 7. Sur les quatre tronçons, les débits ont fortement diminués sur la période du 23/04 au 16/05, soit en moyenne une diminution d'environ 1800 L/s. Les débits de pertes de Rochegude évoluent en fonction du débit amont de la Cèze, ils passent de 519 L/s le 23/04 à 406 L/s le 16/05.

L'évolution des débits de pertes est à mettre en relation avec l'évolution des débits des sources de la rive gauche.

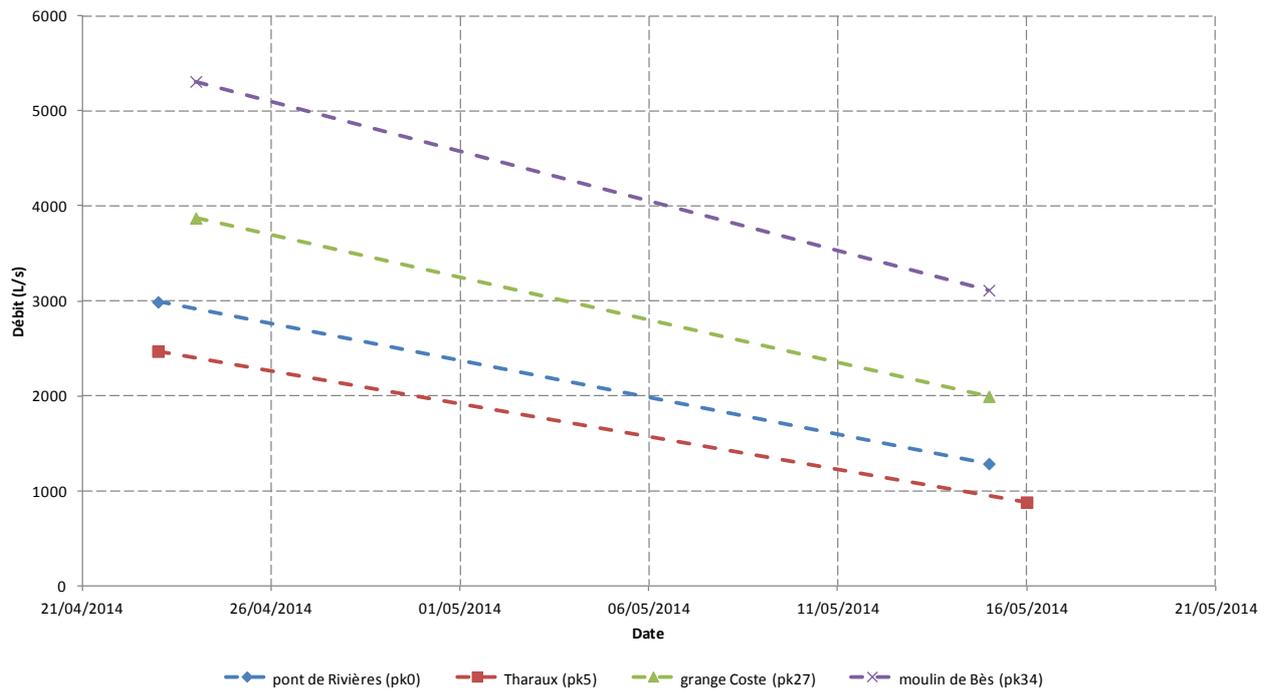


Figure 9 : Résultats de jaugeages de 4 tronçons de la Cèze durant la décrue de 2014.

III.2.2.ii. Exemple de suivi des hauteurs / conductivités et températures des eaux

La Figure 10 illustre un exemple de suivi des hauteurs / conductivités et températures pour deux sections de la Cèze. L'une est située à l'amont au niveau du pont de Rivières (pk0), l'autre est située à l'aval, au niveau du pont de Rome (pk32).

Il est intéressant de remarquer que les enregistrements des toutes premières sondes placées en rivière révèlent une oscillation journalière de la conductivité de la Cèze à $\pm 40 \mu\text{S}/\text{cm}$ pour une conductivité de la Cèze d'environ $400 \mu\text{S}/\text{cm}$. Pour isoler l'origine de ce phénomène, des tests en laboratoire ont été réalisés. Il s'avère que pour des variations de températures, la correction des conductivités des eaux réalisées automatiquement par les sondes est défectueuse. Un ajustement complémentaire est nécessaire pour pallier ce problème.

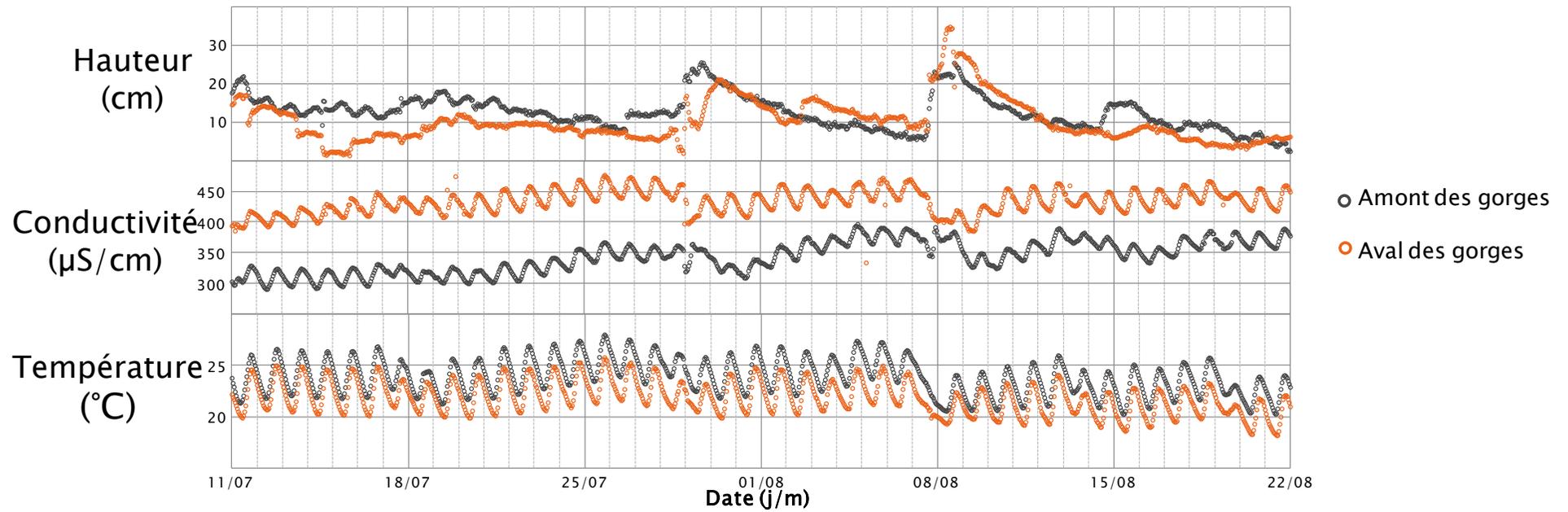


Figure 10 : Exemple de suivi des hauteurs / conductivités et températures pour deux sections de la Cèze (amont et aval).

III.2.2.iii. Bilan et perspectives pour les mesures et le suivi des débits des sources et de la rivière

Pour résumer, cette approche métrologique, couplée aux mesures de débits (approche hydrologique), permet un suivi continu dans le temps des débits des sources et de plusieurs tronçons de rivière. Le suivi des débits constitue la partie centrale du projet. En effet, ce suivi quantitatif permet une comparaison avec les résultats des autres approches (biologie, thermie et hydrogéochimie) et en révèle les complémentarités ou les divergences. De plus, ce suivi des débits, débuté en mars 2014 et se prolongeant jusqu'en fin 2015, permettra d'alimenter en données l'approche par modélisation (réseaux neuronaux).

A l'heure actuelle, les données acquises ne sont pas suffisamment nombreuses pour statuer de manière définitive sur le fonctionnement de chacune des sources. Il est nécessaire de constituer ainsi des courbes de tarages et de replacer les mesures de débits effectuées au sein des chroniques de hauteurs acquises par les sondes CTD pour obtenir les variations de débits. Il est par ailleurs indispensable de faire des comparaisons (corrélations) entre ces chroniques de débits, la taille des bassins d'alimentation, les quantités d'eaux précipitées et les niveaux en rivière.

Pour les mesures de débits, il sera aussi question de réaliser une critique des jaugeages pour en évaluer les incertitudes et la représentativité. Pour les années 2014 et 2015, d'avantages de tronçons jaugés en rivière seront réalisés. Il s'agira notamment d'encadrer des pertes de Baume Salène.

PARTIE IV

—

Approche Thermique par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Vincent Wawrzyniak et Hervé Piégay

(UMR 5600 EVS, ENS Lyon)

→ Jordan Ré-Bahuaud, Didier Graillet

(UMR 5600 EVS, EMSE)

→ Joël Jolivet

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

IV.1. Principe

Le principe de l'approche thermique repose sur le contraste de température qu'il peut exister entre les eaux superficielles (Cèze) et les eaux souterraines (sources karstiques). Ce contraste permet d'identifier distinctement les eaux souterraines lorsqu'elles émergent au niveau de la rivière.

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 (eaux superficielles pouvant être inférieure à 5°C) et la saison estivale (eaux superficielles pouvant dépasser les 28°C) est très importante.

En revanche, la variabilité de 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.

Ainsi, il est nécessaire de respecter certaines contraintes lors de l'acquisition des images thermiques. Il est nécessaire que les contrastes thermiques entre eaux souterraines et eaux superficielles soient maximisés tandis que les contrastes de débits doivent être minimisés (débit de la Cèze devant être idéalement inférieur à 5 m³/s en entrée des gorges). Les périodes propices pour visualiser de manière optimisée les contrastes thermiques sont donc :

- La saison hivernale, pendant une décrue, lorsque la température de la rivière est suffisamment basse (environ 5°C). La température des eaux souterraines (entre 13,5 et 14,5°C) apparaît comme chaude.
- La saison estivale, durant une décrue, lorsque la température de la rivière est suffisamment importante (> 27°C). La température des eaux souterraines (entre 13,5 et 14,5°C) apparaît comme froide.

IV.2. Description de l'acquisition et du traitement des données

IV.2.1. Acquisition des IRT

L'acquisition d'images thermiques aéroportées est directement liée à l'action ZABR thermie pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piegay). La description de l'acquisition et du traitement des images infrarouges thermiques est amplement détaillée dans la thèse de Wawrzyniak [2012]. Compendieusement, il s'agissait de survoler la zone d'étude en hélicoptère (environ 30 minutes d'acquisition pour la Cèze) et collecter des clichés pour couvrir tout le linéaire de la rivière. L'emprise des campagnes IRT (13/04/13 et 08/07/13) est illustrée en Carte 2. Pour ces campagnes, chaque cliché collecté correspond à un couple de deux images : Soit une image dans le spectre du visible (RVB) et une image dans le spectre infrarouge thermique (IRT). Ce couple d'images (IRT et RVB) permet une mise en relation des objets géographiques (rivières, ponts, arbres, bâtiments, etc.) avec leurs signatures thermiques. Une fois collectée, ces images aéroportées sont géoréférencées sur support SIG. Elles sont ensuite liées entre elles au sein d'une seule et même mosaïque. Cette mosaïque d'images, représentant la distribution des températures le long de la rivière Cèze, est recalée à partir de thermomètres enregistrant les variations de température in-situ. Ces thermomètres de suivi sont disposés régulièrement le long de la rivière, ceci permet de mieux contrôler et corriger la dérive possible des valeurs de température acquises le long du vol par les images IRT. Il est important de noter que la température extraite du traitement des images IRT correspond à la température de surface et n'intègre pas les variations qui peuvent exister au sein de la lame d'eau.

La mosaïque d'images thermiques (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 aussi à l'interface entre eaux souterraines (karstiques) et eaux superficielles (Cèze et affluents).

En plus d'une visualisation en carte des températures des eaux, un profil thermique amont/aval a été extrait de la mosaïque d'images thermiques. Ce profil longitudinal de température de la rivière permet d'apprécier l'influence des apports karstiques sur la température des eaux de la rivière.

Par ailleurs, afin de s'émanciper en partie des problèmes liés au réchauffement des eaux par le rayonnement solaire, l'acquisition des images a eu lieu soit en début de matinée, soit en début de soirée, au moment où l'évolution des températures est faible au cours de la durée d'acquisition (contrôlée par les thermomètres de suivi in-situ).

Deux campagnes d'acquisition ont été réalisées, l'une le 13 avril 2013 entre 8H00 et 9H00 du matin 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.

La vocation de la première campagne d'acquisition IRT a été essentiellement prospective. En effet, elle a notamment permis d'identifier les problèmes et contraintes liés à cette approche dans la perspective d'optimiser les prochaines campagnes d'acquisition.

IV.2.2. Problèmes et contraintes de l'acquisition (cas de la campagne du 13/04/13) :

Les problèmes soulevés lors du traitement de la campagne d'avril 2013 concernent en premier lieu, les difficultés liées aux effets du rayonnement solaire et en second lieu, les difficultés liées aux contrastes de température et de débit entre eaux souterraines et eaux superficielles.

IV.2.2.i. Problèmes liés au rayonnement solaire

Lorsque les rayons rasants du soleil levant irradient une partie du paysage (cas de la campagne du 13/04/13), la température de surface des zones affectées par ce rayonnement direct augmente. Ainsi, il n'est pas rare que la température d'une partie de la végétation et des aménagements anthropiques (routes, bâtiments, etc.) soit confondue avec la gamme de température interprétée comme compatible avec des apports souterrains (entre 13 et 15°C). Dans ce cas précis, la végétation surplombant la Cèze peut poser des problèmes d'interprétation localisés (Figure 11). En effet, ces zones plus chaudes que la rivière de quelques degrés peuvent être interprétées, à tort, comme des apports karstiques localisés. Dans ce cas, la mise en relation de l'image IRT avec l'image RVB permet de lever en partie cette confusion.

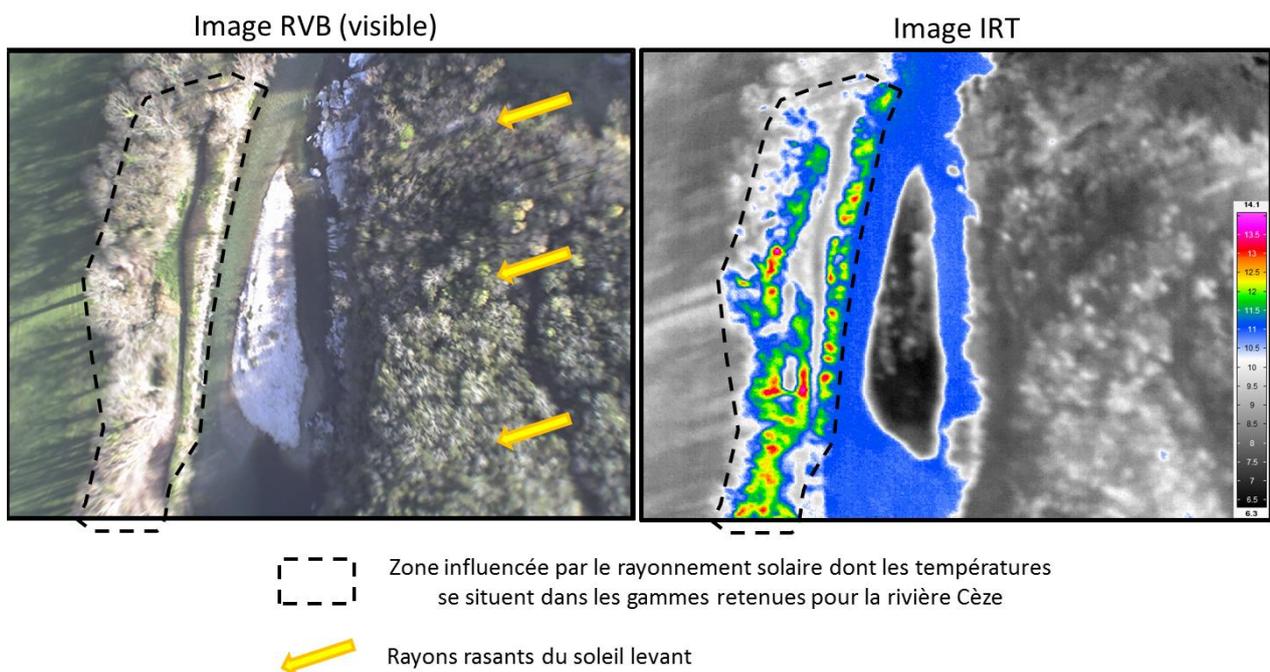


Figure 11 – Exemple de problème lié au rayonnement solaire pour la campagne du 13/04/13.

Le rayonnement solaire joue aussi un rôle important dans le réchauffement de portions de rivière et particulièrement dans les conditions de la campagne d'avril 2013. En effet, comme le montre la Figure 13, le réchauffement de la rivière de plus d'un degré entre 5000 et 7500 m, n'est pas directement lié aux apports souterrains (ou de manière secondaire). Cette zone de réchauffement coïncide avec une portion de rivière qui est orientée dans la direction Est-Ouest et qui n'est pas affectée par les ombres portées de la végétation ni par les ombres portées du relief des gorges. De telles augmentations se retrouvent également plus à l'aval de la rivière (au-delà de 10 000 m). L'analyse des images (RVB) corrobore cette augmentation de température sur plusieurs portions de rivière.

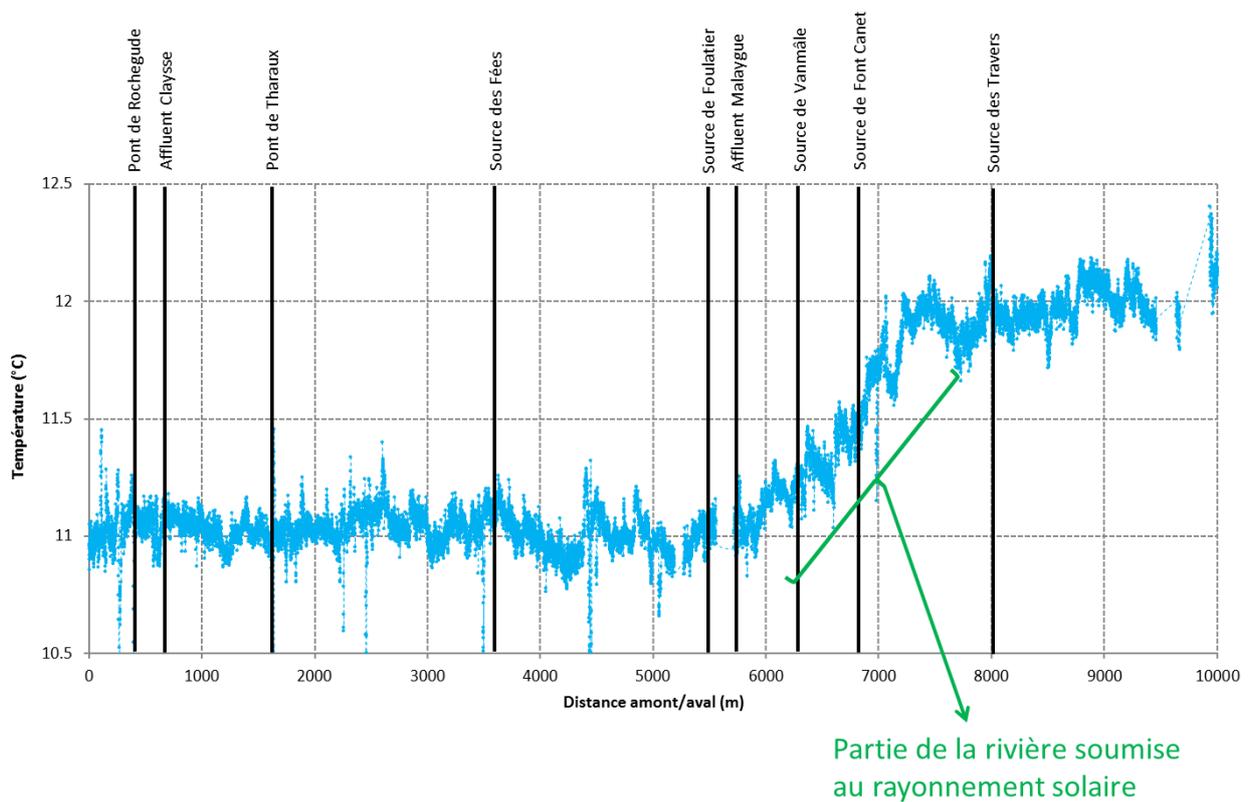


Figure 12 – Profil thermique de la rivière issu de la mosaïque IRT de la campagne du 13/04/13.

IV.2.2.ii. Problèmes liés aux contrastes de température et de débits entre eaux souterraines et eaux superficielles

Comme le montre la Figure 13, la situation de hautes eaux du 13 avril 2013 n'a pas été particulièrement favorable pour visualiser la propagation du panache d'eaux souterraines chaudes dans la rivière. En effet, à l'entrée des gorges, en aval immédiat des pertes de Rochevide, le débit de la Cèze était d'environ $5 \text{ m}^3/\text{s}$, la source des Fées, quant à elle, avait un débit aux alentours de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit environ 25 fois moins). De plus, les contrastes de température à cette période étaient assez faibles et avoisinaient les 2°C (Figure 13).

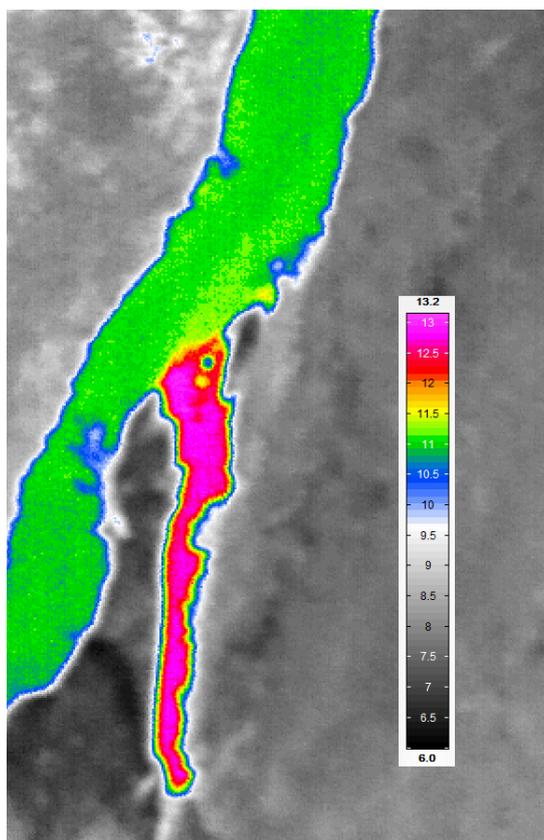


Figure 13 – Exemple de contraste de température faible (moins de 2°C) et de contraste de débit fort (débit de la Cèze environ 25 fois supérieur à celui de la source des Fées) entre les eaux de la Cèze et les eaux de la source des Fées.

Ce faible contraste de température tend à diminuer plus à l'aval des gorges et la température de la rivière se confond avec la température des eaux souterraines peu avant le village de Montclus. Le manque de contraste ne permet plus d'identifier les apports souterrains.

Pour résumer, il est nécessaire de planifier les campagnes photographiques aéroportées lorsque les conditions sont optimales afin de faciliter l'interprétation des clichés et de maximiser la qualité des résultats. Ainsi, il faut s'assurer d'avoir des contrastes de débit et de température suffisants entre eaux superficielles et eaux souterraines. Il est également nécessaire d'éviter, dans la mesure du possible, le rayonnement direct du soleil sur le cours d'eau lors de l'acquisition des images ou, à minima, de bien identifier les parties de la rivière soumises à un tel rayonnement.

IV.3. Résultats de la campagne du 08/07/13

Fort du retour d'expérience issu de la première campagne d'acquisition IRT (avril 2013), la seconde campagne, réalisée le 08 juillet 2013 entre 19H00 et 20H00, présente les avantages suivants :

- A 19H00, la température des eaux de la rivière est maximale (comme en témoigne le suivi des thermomètres in-situ présenté en Annexe 8), ce qui a 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 est beaucoup plus faible (environ 2,44 m³/s) et correspond à une situation de moyennes eaux ;
- Les artefacts liés à la végétation sont supprimés du fait de la température des feuilles supérieure à 28°C, ainsi il n'y a pas de confusion possible avec des apports souterrains.

Cette campagne de juillet livre des résultats plus probants et sont présentés ci-après sous forme d'exemples localisés des apports souterrains. L'ensemble des images IRT est présenté en Annexe 9.

IV.3.1. Exemple de la source des Fées en entrée des gorges

IV.3.1.i. Exemple de l'influence thermique d'une émergence karstique

La Figure 14 ci-après constitue 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 Rochegude), est d'environ 2440 L/s, le débit apparent de la source des Fées a été mesuré à environ 80 L/s.

Les gammes de température sélectionnées pour cette campagne se situent entre 25°C et 27,5°C pour les eaux superficielles et entre 16 et 20°C pour les eaux souterraines. Les eaux souterraines apparaissent systématiquement plus chaudes qu'elles ne le sont réellement car il s'agit d'une mesure en surface. En effet, le réchauffement des eaux souterraines au contact avec l'atmosphère est très rapide.

Sur la Figure 14, le panache des eaux souterraines « froides », est assez ponctuel (spatialement) et il correspond à l'émergence des Fées. Ces eaux froides se propagent et se mélangent peu à peu avec les eaux de la rivière Cèze. La distance d'homogénéisation des températures, correspondant au mélange des eaux, est d'environ 250 m. Cette information est intéressante pour optimiser l'échantillonnage des eaux pour les analyses hydrogéochimiques. Ainsi, il est possible d'éviter d'exprimer des singularités locales non représentatives des échanges entre karst et rivières qui ont réellement lieu.

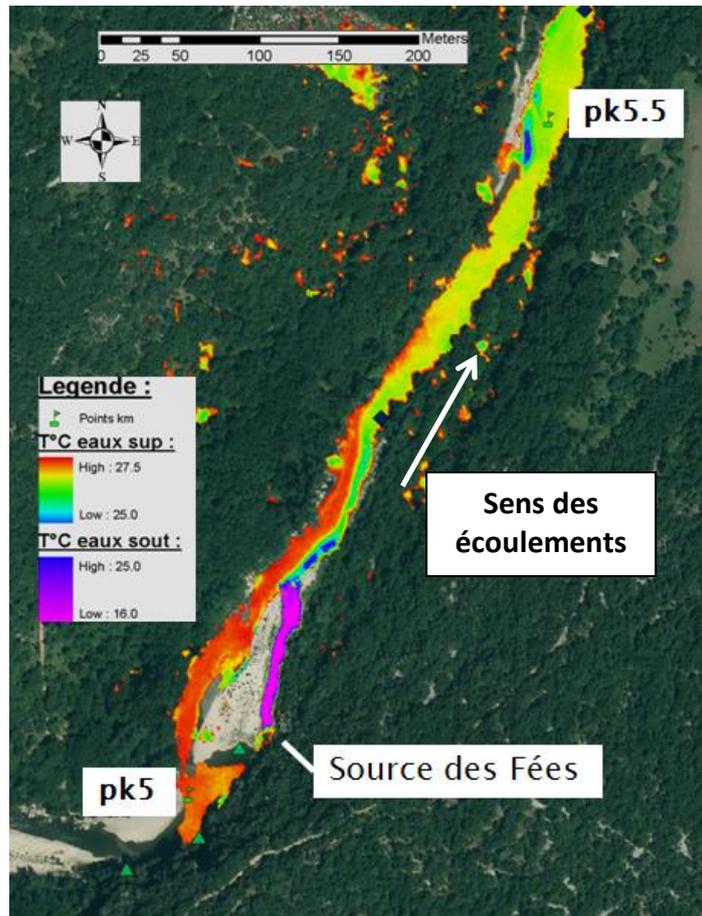


Figure 14 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source des Fées en entrée des gorges (entre les points kilométriques 5 et 5,5). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).

IV.3.1.ii. Estimation des débits des sources par calcul de proportion de mélange

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 s'apparente à un traceur des eaux, il est possible d'écrire le système d'équations décrivant ce mélange entre l'eau issue de la rivière Cèze et l'eau issue du Karst.

Soit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} Q_1 * T_1 + Q_2 * T_2 = Q_3 * T_3 & \text{conservation de la quantité de chaleur (1)} \\ Q_1 + Q_2 = Q_3 & \text{conservation de la masse (2)} \end{array} \right. \quad Q_1 = Q_3 - Q_2$$

D'après les relations qui existent entre les équations (1) et (2), on peut écrire l'équation permettant de d'estimer le débit de l'apport souterrain :

$$Q_1 * T_1 + Q_2 * T_2 = (Q_1 + Q_2) * T_3$$

On obtient les équations (3) et (4) :

$$Q_2 = Q_1 * \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_3} \quad (3) \text{ ou encore } Q_2 = Q_3 * \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Avec :

T_1 : Température mesurée de la Cèze à l'amont de l'émergence karstique (au niveau de Rohegude) ;

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 (estimé par lecture de l'échelle limnimétrique à environ 80 L/s) ;

Q_3 : Correspond calculé au débit Q_1 incrémenté des apports souterrains.

Le Tableau 2 ci-dessous présente le paramétrage pour la source des Fées.

Tableau 2 - Valeurs mesurées, estimées et inconnues à la date du 08/07/13.

Débits (L ³ /s)			Températures (°C)		
Q_1	Q_2	Q_3	T_1	T_2	T_3
2440	?	?	27,3	13,6	26,8

En appliquant l'équation (3), on trouve un débit de source d'environ $Q_2 = 92$ L/s, le débit de la Cèze plus à l'aval est donc de $Q_3 = 2532$ L/s. Il va de soi que cette estimation grossière des apports souterrains est entachée de nombreuses incertitudes et est très sensible aux variations des paramètres de l'équation de mélange. Une analyse de sensibilité des paramètres est présentée en Annexe 10.

Toutefois, le débit estimé pour cette source est compatible avec la valeur estimée grâce à l'échelle limnimétrique. 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 il a été mesuré que pour la source des Fées. Par ailleurs, certaines configurations ne permettent pas ce genre de calcul, c'est notamment le cas lorsque le niveau de la rivière est influencée par un seuil (naturel ou anthropique) plus à l'aval. En effet, dans cette configuration, le mélange des eaux est beaucoup plus lent et une stratification des températures est observée (cas des sources de Marnade et de Font Canet). Cette stratification de la température des eaux ne peut pas être perçue par les images IRT du fait que la mesure se situe en surface. Les eaux froides issues du karst sont plus denses et ont tendance à plonger dans les zones de hauts fonds (lame d'eau de plus d'un mètre d'épaisseur).

IV.3.2. Exemple des sources de Monteil et de l'lette situées au milieu des gorges

La Figure 15, ci-dessous, présente le cas de la résurgence de Monteil dont le panache d'eaux plus froides s'étend sur plusieurs centaines de mètres plus à l'aval. Cette source est particulièrement intéressante car elle dévoile deux sorties froides distinctes :

- La sortie principale, située plus à l'amont, a fait l'objet de nombreuses mesures de débits au micromoulinet. Les débits sont très variables au cours de l'année, ils peuvent facilement dépasser les 1000 L/s en hautes eaux et descendre en dessous de 100 L/s en basses eaux.
- La sortie secondaire, située plus à l'aval semble correspondre à une exfiltration d'une partie du débit de la source à travers le banc de galet. La signature thermique froide est particulièrement marquée mais elle ne laisse rien transparaître des débits réellement mobilisés. En effet, après vérification sur le terrain, il s'agit de débits assez faibles (quelques L/s) et la signature thermique est marquée du fait que le courant est très faible à cet endroit.

Ainsi, les débits de jaugeage mesurés jusqu'alors représentent en réalité des débits minimum apparents. 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 (qualitativement) plus précisément sur le caractère plus ou moins diffus d'une source. En effet, 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 (Source de Marnade, des Baumes, de la Fabrique).

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'au niveau de la queue du banc de galets situé en rive droite, en face de la zone de confluence Cèze – source de Monteil, un petit panache d'eau plus fraîche semble s'écouler. Ce panache correspond probablement à une exfiltration des eaux de la Cèze à travers le banc. De la même manière que pour l'échantillonnage hydrogéochimique, les images IRT permettent dans ce cas de mieux guider l'échantillonnage biologique en ayant un meilleur contrôle sur la représentativité des résultats.

Comme il a été vu précédemment, pour la source de Monteil, le calcul de débit n'est pas possible 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%, à titre de comparaison, la proportion calculée pour la source des Fées est d'environ 3,6%.

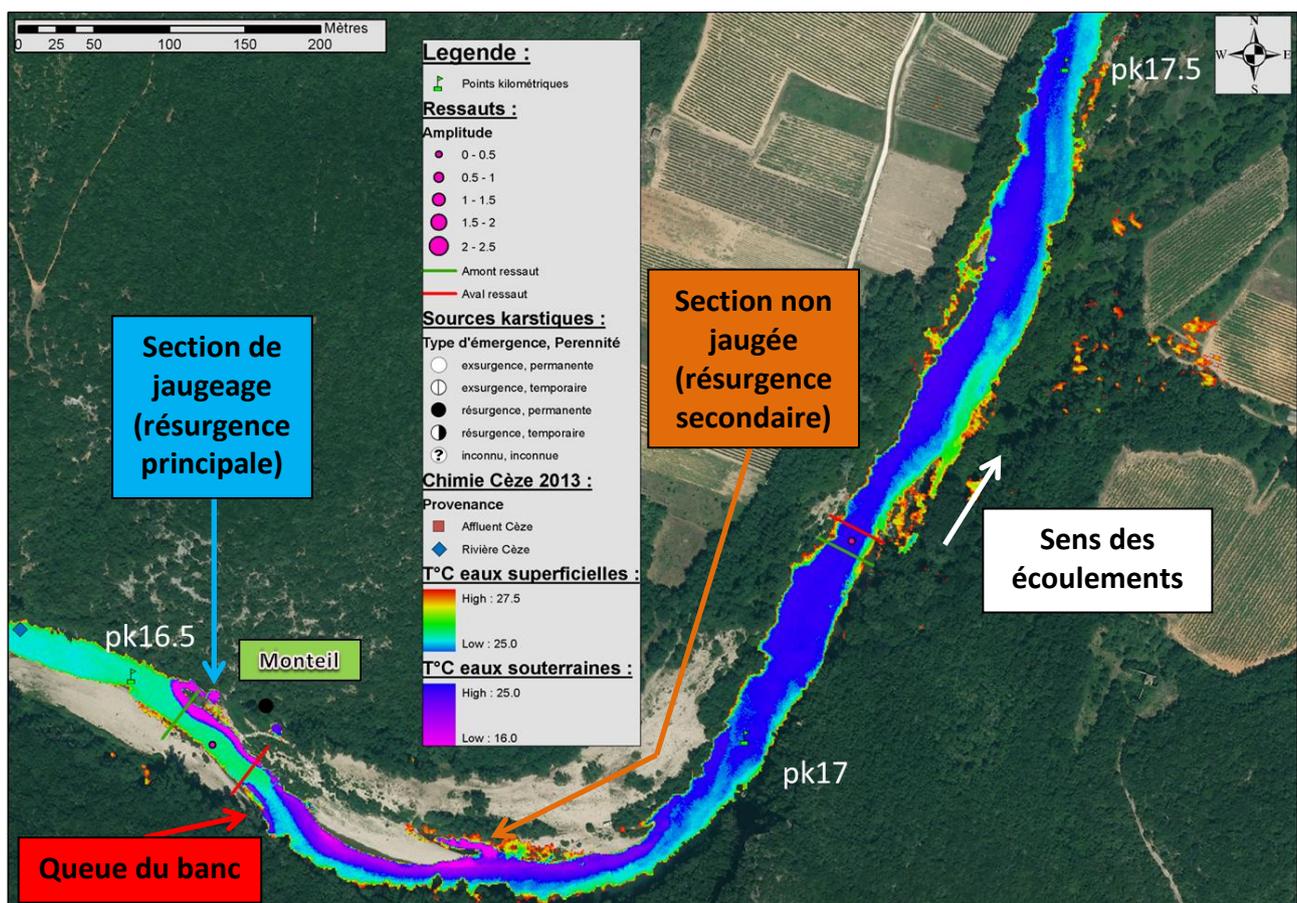


Figure 15 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de Monteil (entre les points kilométriques 16,5 et 17). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).

La source de l'Ilette, présentée en Figure 16, 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est sensiblement supérieure à celle de la Cèze plus à l'amont (435 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cet écart de 57 $\mu\text{S}/\text{cm}$ semble indiquer qu'au moins une partie des eaux est d'origine karstique. Il est très probable, compte tenu de la configuration, 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 Monteil et les Fées et correspond à environ 1% du débit de la Cèze.

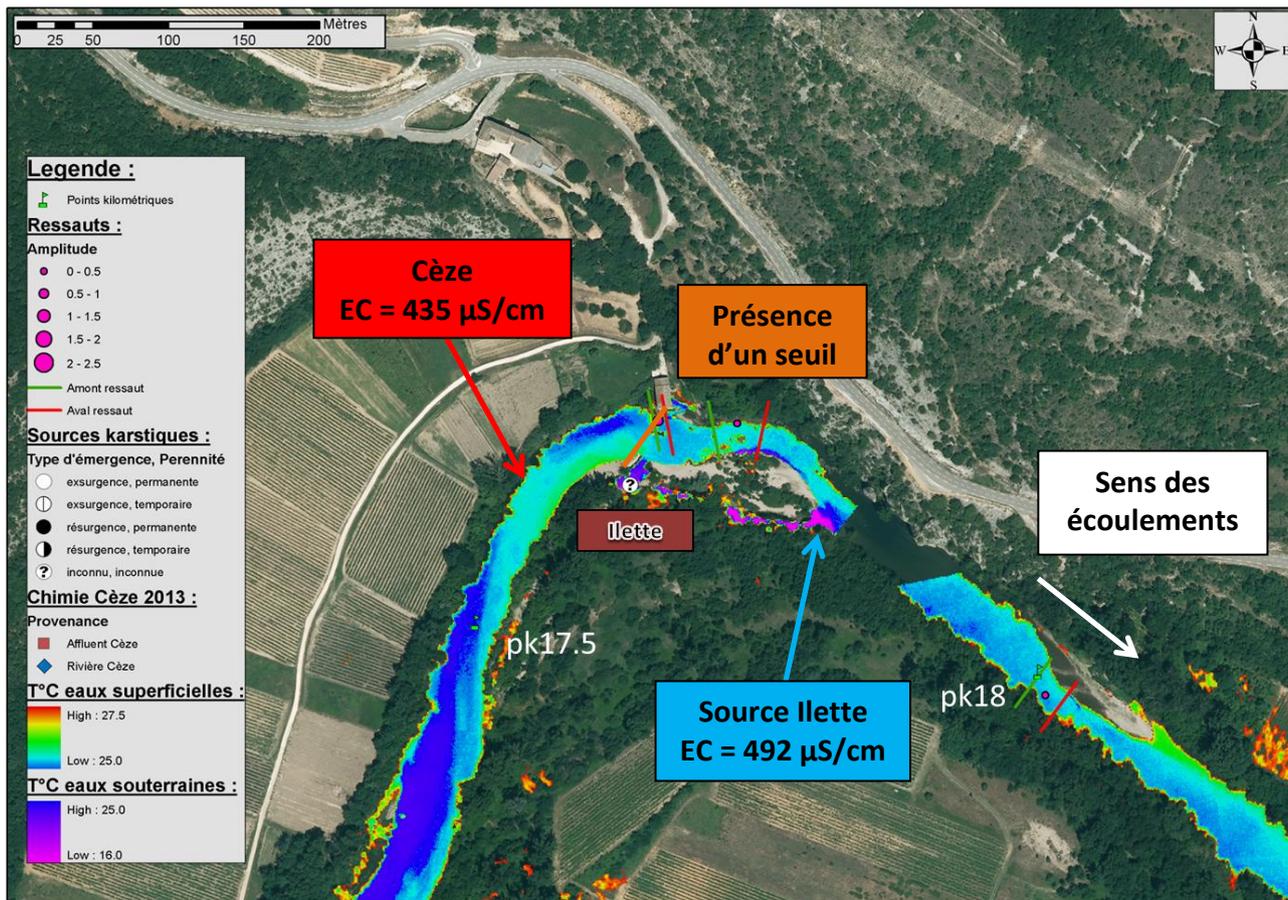


Figure 16 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de l'Ilette (entre les points kilométriques 17,5 et 18). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).

Le profil longitudinal de température, présenté en Annexe 11, illustre le rôle des gorges et des apports souterrains dans la régulation de la température des eaux de la rivière.

D'une manière plus générale, l'analyse de l'intégralité des images IRT a permis de mettre en évidence plusieurs anomalies thermiques qui laissent supposer quelques échanges du karst vers la rivière. Cependant, il semble difficile d'apprécier nettement la proportion de ces échanges. En effet, ces anomalies thermiques sont assez faibles et relativement localisées et peuvent correspondre, dans certains cas, à des recyclages locaux des eaux de la rivière à travers ses alluvions.

IV.4. Discussion et perspectives

IV.4.1. Résumé et points forts de l'approche thermique

D'une manière générale, l'analyse de l'ensemble de ces images thermiques a permis de mettre en évidence :

- Le caractère ponctuel ou diffus des apports souterrains ;
- Les exfiltrations au niveau des bancs ayant des conséquences sur la localisation de la faune des invertébrés interstitiels (pris en compte dans l'approche biologique du projet) ;
- L'évolution de la température des eaux de la rivière le long du profil amont/aval et la régulation des températures de la rivière par les eaux du karst ;
- L'identification de nouvelles sources inédites (par exemple : la source nouvellement nommée « Illette » dont la présence a pu être confirmée par une reconnaissance sur le terrain) ;
- L'identification de griffons secondaires pour des sources déjà connues tempérant les mesures de débits (micromoulinet) réalisées jusqu'alors ;
- La distance d'homogénéisation des eaux en vue d'un échantillonnage optimisé en rivière pour les campagnes hydrogéochimiques.

L'approche thermique par images IRT permet de travailler sur de grandes étendues spatiales et de manière synchrone. Elle se révèle très intéressante comme reconnaissance initiale du terrain d'étude en vue de mieux caractériser les apports souterrains. Elle est par ailleurs indispensable afin de préparer au mieux les campagnes d'échantillonnage hydrogéochimique et biologique mais aussi pour améliorer les mesures de débit des sources. Par ailleurs, elle renseigne sur la distance nécessaire à l'homogénéisation des eaux à l'aval des apports souterrains.

IV.4.2. Limites et contraintes

L'approche thermique, compte tenu de sa sensibilité importante aux forçages extérieurs (par exemple le rayonnement solaire) doit être utilisée avec précaution. Il est nécessaire de planifier les campagnes photographiques quand les conditions sont 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 rendent difficile un suivi saisonnier régulier. Ensuite, la thermie ne permet pas de caractériser les échanges dans le sens eaux superficielles vers eaux souterraines ce qui constitue une limite importante quand les échanges ne sont pas unilatéraux comme c'est le cas du karst de la Cèze. A l'heure actuelle, il subsiste également des difficultés dans l'identification des apports diffus et de leurs origines. La quantification des apports souterrains est sujette à de fortes incertitudes et mérite d'être approfondie. Par ailleurs, le coût en temps est important pour le traitement des images.

IV.4.3. Perspectives pour l'été 2014

La campagne hivernale prévue initialement n'a pas pu avoir lieu du fait de la douceur de l'hiver et des contrastes trop faibles de températures observés de décembre 2013 à février 2014. Une autre campagne est prévue lors de l'étiage estival, sur une zone plus large, incluant l'intégralité des sources aval (de la source d'Ussel à la source de Bastide Froide).

Pour la prochaine campagne de mesure estivale, il sera question de coupler la thermie avec des prélèvements pour analyses géochimiques (l'intégralité des sources et une dizaine d'échantillons en rivière) et de réaliser des jaugeages de débits (l'intégralité des sources et six sections de rivière). L'objectif de cette campagne sera de pouvoir comparer de manière synchrone les résultats de plusieurs approches.

PARTIE V

—

Approche hydrogéochimique par analyse des ions majeurs et de certains éléments traces

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Jordan Ré-Bahuaud, Hervé Chapuis, Jean-Pierre Poyet
(UMR 5600 EVS, EMSE)

→ Joël Jolivet

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

→ Jean-Pierre Faillat

V.1. Principe

Tout comme pour la thermie, l'approche hydrogéochimique est abordée sur l'angle des contrastes, cette fois-ci au niveau de la signature chimique des eaux (ou faciès chimique). Il est supposé que les eaux de la Cèze sont chimiquement très différentes des eaux des sources karstiques. En effet, la Cèze, avant son entrée en domaine karstique, draine un bassin versant de plusieurs centaines de km² au niveau des Cévennes (formations essentiellement cristallines). Les sources, quant à elles, drainent essentiellement les formations carbonatées que constitue le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap. Par ailleurs, pour ces sources, on peut s'attendre à au moins trois typologies chimiques des eaux. Par exemple, on suspecte d'une part que certaines sources soient, en partie, alimentées par des eaux de perte de la Cèze (Foulatier, Fond Canet, Monteil, Moulin et les Baumes), d'autre part que certaines sources soient affectées par des eaux de pertes ayant ruisselées sur les formations marneuses du Sud du bassin versant (Goudargues, Bastide Froide, Ussel et Fabrique) et enfin que certaines sources drainent seulement le plateau karstique et les formations carbonatées qui le composent (Fées, Vanmâle, Force Mâle et Marnade). En réalité, l'origine des eaux alimentant les sources peut varier au cours du temps et de la situation hydrologique (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux) ajoutant à la complexité du fonctionnement de l'hydrosystème.

V.2. Description de l'échantillonnage

La localisation des prélèvements des eaux de sources et de rivière est présentée en Carte 2. L'échantillonnage des eaux des sources karstiques s'appuie essentiellement sur l'inventaire qui avait été initié par Pouzancré [1972]. L'échantillonnage des eaux de la rivière Cèze, d'amont en aval du domaine karstique, a été défini à partir des résultats de l'approche thermique sur les distances de mélange et d'homogénéisation des eaux. Le prélèvement d'eau est systématiquement accompagné d'une mesure in situ du pH, de la conductivité et de la température des eaux.

Les analyses chimiques (anions et cations majeurs) ont été réalisées par chromatographie ionique. Par ailleurs, les analyses des cations (majeurs et certains éléments traces) ont également été réalisées par spectrométrie ICP.

De fortes incertitudes pèsent sur l'analyse des ions hydrogénocarbonates. Pour des raisons pratiques, ils ont été calculés en équilibrant la balance ionique à partir des autres ions majeurs. Une perspective d'amélioration pour la suite du projet sera de les analyser par titrage (kit terrain d'alcalinité).

Selon ce protocole, plusieurs campagnes ont déjà été réalisées pour suivre la décrue de la Cèze et des sources d'avril à septembre 2013. L'ensemble des résultats d'analyses est présenté en Annexe 12. Une sélection de résultats est présentée ci-après, elle se focalise sur les deux campagnes de juillet et septembre 2013 dont l'échantillonnage est le plus exhaustif. Ces deux campagnes correspondent au passage d'une situation de moyennes eaux (juillet) à une situation de basses eaux (septembre). Seulement trop peu d'analyses concernent la situation de hautes eaux d'avril et de mai.

V.3. Résultats et discussion

Les résultats des analyses chimiques ont été mis en œuvre dans des diagrammes de Piper afin de discriminer le faciès chimique des eaux ainsi que l'évolution chimique des eaux de la Cèze d'amont en aval des sources. Le faciès des eaux, qu'elles proviennent des sources ou de la rivière, est bicarbonaté calcique. Il va de soi que ces représentations ne sont pas les plus pertinentes pour illustrer clairement et précisément la diversité des comportements que l'on observe au niveau des sources et de la Cèze. Les diagrammes de Schoeller sont plus adaptés, cependant, compte tenu de la quantité importante d'échantillons, la lisibilité des graphiques est médiocre.

C'est pourquoi les analyses chimiques ont été traitées par Analyse en Composantes Principales (ACP) [Caetano Bicalho et al., 2012]. Cette analyse présente de manière plus distincte les contrastes observés pour les différentes eaux. L'ACP consiste à regrouper des variables liées entre elles et à les transformer en nouvelles variables, ou "axes", décorréliées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales", ou axes principaux. Ces axes sont notés « F1 », « F2 », « Fn » et permettent ainsi de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

Ainsi, plusieurs ACP ont été réalisées, la première pour les échantillons synchrones de juillet 2013, la seconde pour les échantillons synchrones de septembre 2013 et la troisième regroupant tous les échantillons disponibles d'avril à septembre.

V.3.1. ACP « synchrone » pour les échantillons de juillet 2013

La Figure 17, la Figure 19 et la Figure 21 présentent les statistiques descriptives des différents jeux de données, ainsi que les principales caractéristiques des ACP. Pour ces trois ACP, seul l'axe F1 a été analysé car il explique l'essentiel de la variance et il a été possible de relier les coordonnées des observations sur l'axe F1 à une interprétation en termes d'origine des eaux et de mélanges de ces eaux.

Il est intéressant de noter que l'axe F2 est relié au comportement des chlorures et des nitrates. Les concentrations en nitrates sont souvent plus délicates à interpréter du fait des apports anthropiques venant perturber le signal d'origine naturel. Les chlorures, quant à eux, seront commentés séparément car ils peuvent potentiellement permettre une discrimination intéressante concernant l'intensité de l'évapotranspiration et de l'interception sur les différents sous bassins versants du terrain d'étude. Les résultats pour les Chlorures sont présentés en Annexe 13 et seront interprétés ultérieurement.

Pour les trois graphiques (Figure 17, Figure 19 et Figure 21) de corrélations entre les variables (SO_4 , Na, Mg, Ca, HCO_3 , etc.) et les facteurs ou axes (F1, F2, ..., Fn), deux pôles se distinguent :

- Le pôle dit « Sulfaté » (SO_4 , Na, Mg) correspond aux échantillons les plus enrichis en Sulfates, Sodium et Magnésium et dans une moindre mesure du Potassium. Ce pôle est représentatif des éléments en solution transportés par la Cèze avant son entrée dans les gorges. Ainsi, il s'agit essentiellement du lessivage des formations cristallines du Primaire avec les micaschistes, les quartzites micacés, les orthogneiss et les granites, quelques formations sédimentaires du

Secondaire avec les grès, les argiles, les conglomérats et les dolomies mais aussi les formations sédimentaires détritiques du Tertiaires (fossé d'Alès) avec les conglomérats, les marnes (parfois à gypses) plus ou moins gréseuses.

- Le pôle dit « Carbonaté » (Ca et HCO₃) correspondant aux échantillons des sources ayant collectées des eaux issues des formations carbonatées calciques de l'Urgonien. La dissolution de ces calcaires massifs récifaux (rudistes et orbitolines) est à l'origine des fortes concentrations en Calcium et Hydrogénocarbonates.

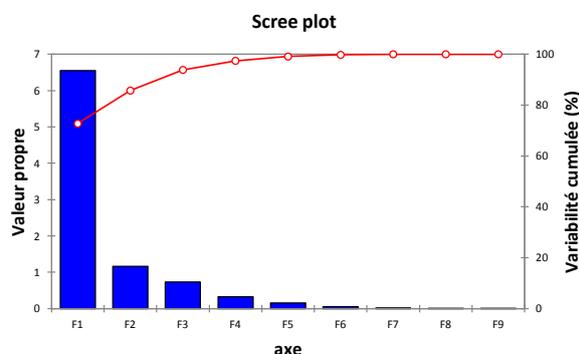
Les statistiques du jeu de données présentées en Figure 17 montrent que l'axe « F1 », séparant le pôle « sulfatés » du pôle « carbonaté », explique 73% de la variance totale.

ACP Ions Majeurs (Juillet 2013)

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
TDS	40	309.000	579.000	391.825	73.204
SO4	40	7.010	59.185	39.028	14.864
NO3	40	1.078	10.561	4.114	2.556
Cl	40	4.208	11.350	7.034	1.199
HCO3	40	163.000	422.000	243.450	66.829
Na	40	2.392	15.199	9.486	3.888
K	40	0.251	1.987	1.339	0.411
Mg	40	2.024	14.226	7.956	2.983
Ca	40	48.504	137.995	79.465	24.113

Valeurs propres et variabilité :



Corrélations variables/facteurs :

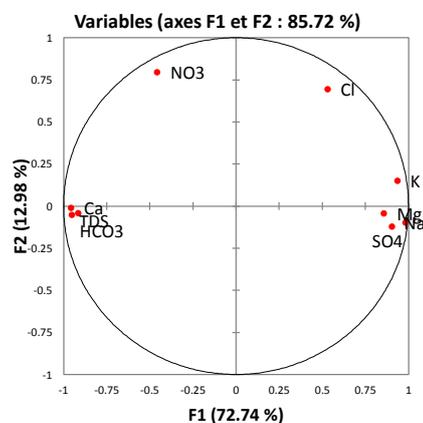


Figure 17 : Caractéristiques de l'ACP en ions majeurs de juillet 2013.

La Figure 18, ci-après, présente les résultats de l'ACP pour les échantillons collectés lors de la campagne de juillet. On trouve le pôle dit « Sulfaté » (SO₄, Na, Mg) en rouge et positif sur l'axe des ordonnées et le pôle dit « Carbonaté » (Ca et HCO₃) en bleu et négatif sur l'axe des ordonnées. L'axe des abscisses représente la distance amont/aval le long du canyon de la Cèze. Les losanges bleus correspondent aux points échantillonnés en rivière. Les triangles verts correspondent aux différentes sources karstiques inventoriées.

Le chimisme des eaux de la Cèze évolue d'un faciès plus sulfaté à l'amont vers un faciès plus carbonaté calcique à l'aval. Ceci est directement lié aux apports d'eaux de sources karstiques qui vont avoir tendance à diluer les Sulfates, le Sodium, le Magnésium et le Potassium et en même temps que d'enrichir les eaux de la Cèze en Calcium et Hydrogénocarbonates.

Concernant les sources, on remarque de nombreuses subtilités qui permettent de distinguer trois typologies chimiques. Ces typologies chimiques de sources ont été identifiées suivant leurs affinités avec le pôle « Sulfaté » et suivant leurs localisations, soit en rive droite (RD), soit en rive gauche (RG) de la Cèze. Ainsi, en confrontant ces résultats d'analyses en ions majeurs aux connaissances de l'hydrogéologie du terrain d'étude, on distingue :

- Les sources dites « exurgences purement carbonatées » (entourées en vert), sont représentatives de systèmes karstiques unaires. C'est-à-dire qu'elles drainent seulement le plateau karstique et les formations carbonatées qui le compose. Ces sources sont les Fées, Vanmâle ? (non échantillonnée), Force Mâle et Marnade.

Pour ces sources en système unaire, l'essentiel de la minéralisation s'acquière au niveau de l'épikarst sur les quelques premiers mètres, lors de l'infiltration des eaux [Peyraube et Al., 2012]. A l'équilibre, avant l'infiltration en souterrain, la pression partielle en CO_2 de l'eau de précipitation est environ égale à celle de l'atmosphère. Dès lors que l'eau s'infiltré dans le sol, la production de CO_2 liée à l'activité biologique (dégradation de la matière organique) va augmenter la pression partielle de CO_2 . Ce CO_2 va se dissoudre dans les eaux de percolation et jouer le rôle d'acide et tendre à diminuer le pH. Cette diminution de pH modifie les équilibres calco-carboniques et favorise la dissolution des minéraux de l'encaissant (carbonates de Calcium). Les diverses réactions d'altération des minéraux de l'encaissant vont par la suite avoir tendance à augmenter le pH. Ainsi le potentiel de dissolution de la calcite est directement lié à la pression partielle de CO_2 [Huneau, 2000]. Après avoir traversé l'épikarst et acquises l'essentiel de leurs minéralisations, les eaux vont circuler dans les conduits karstiques dont la pression partielle de CO_2 est alors beaucoup plus faible qu'au niveau des sols (proche de celle de l'atmosphère). L'équilibre calco-carbonique est encore bouleversé, on peut alors assister à deux phénomènes, soit un dégazage du CO_2 , soit une précipitation de carbonate de calcium. Le premier phénomène affecte seulement la quantité d'ions Hydrogénocarbonates, le second phénomène affecte conjointement la quantité d'ions Hydrogénocarbonates et d'ions Calcium dans les mêmes proportions. Pour connaître quel est le mécanisme prépondérant, il faut disposer d'analyses suffisamment précises en ions Hydrogénocarbonates, ce qui n'est actuellement pas le cas.

- Les sources dites « résurgences fortement sulfatées » (entourées en rouge), sont en partie alimentées par des eaux de perte de la Cèze. Pour les pertes de Rohegude (entre pk2 et pk5), les sources en rive gauche affectées sont : Foulatier, Fond Canet, Monteil et les Baumes. Pour les pertes de Baume Salène (entre pk15 et pk16), la source en rive droite affectée : Moulin. Suivant leurs affinités avec le pôle sulfaté (rivière amont), il est possible d'en déduire une proportion de recyclage (c'est l'objet du paragraphe intitulé « Estimation des proportions de recyclage des eaux de la Cèze »). Comparativement aux sources dites « exurgences purement carbonatées », les ions en solutions ne proviennent pas seulement de la dissolution du carbonate de calcium sur les formations Urgoniennes, ils proviennent aussi de la Cèze (Cèze avant l'entrée dans les gorges pour les sources en rive gauche et Cèze du milieu de gorges pour la source de rive droite).
- Les sources dites « résurgences peu sulfatées » (entourées en violet) qui sont représentatives de systèmes karstiques binaires et ont été en partie alimentées par des eaux de pertes ayant ruisselées sur les marnes hauteriviennes au Sud du plateau. Ces sources situées plus à l'aval du canyon sont Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide. Comparativement aux sources précédentes, la minéralisation n'est pas seulement liée à la dissolution du carbonate de calcium sur le plateau, elle est aussi liée à la dissolution des minéraux contenue dans les marnes du Sud du plateau (origine des Sulfates, Sodium et Magnésium). Ainsi, il semblerait qu'il y ait un mélange entre des eaux ayant transitées au niveau des formations marneuses et les eaux ayant percolé directement dans les formations Urgoniennes.

La limitation importante de cette distinction en trois typologies réside dans le problème de discrimination de l'origine exacte des Sulfates. En effet, la distinction a été réalisée à priori à partir des connaissances géologiques et hydrogéologiques disponibles mais ne permet pas de trancher sur l'origine réelle des Sulfates. D'autres méthodes comme les traçages artificiels ou les isotopes pourraient permettre d'identifier l'origine de ces Sulfates.

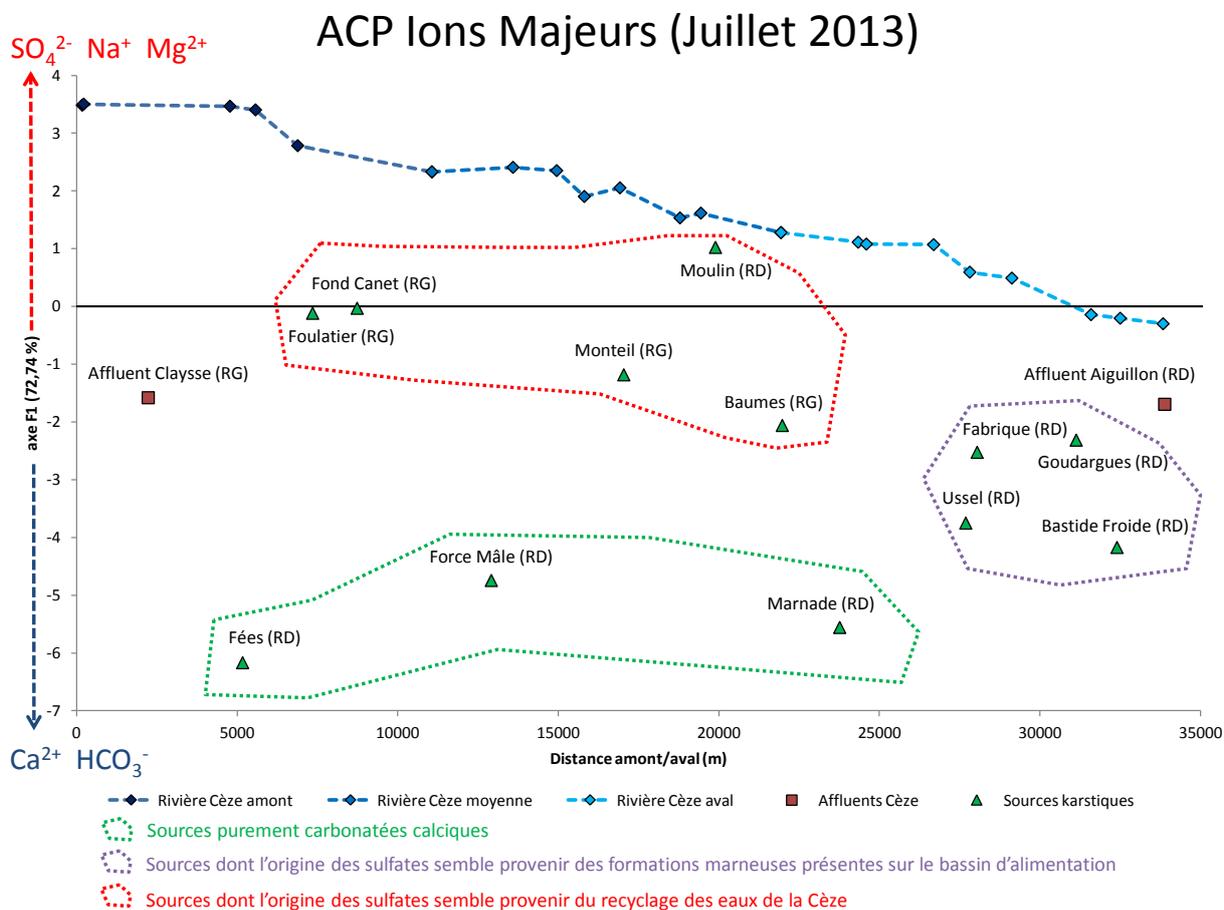


Figure 18 : ACP réalisée sur les analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la campagne de juillet 2013.

Il est intéressant de noter que les éléments traces que sont le Strontium (issu des calcaires Urgoniens) et le Baryum (issu de l'amont du bassin versant) confortent les discriminations déjà illustrées par les ions majeurs. Les concentrations en Silice donnent des résultats contraires à ceux attendus et ne sont, pour le moment, ni confirmés, ni compris. En effet, les concentrations en Silice sont, en moyenne, plus fortes pour les sources karstiques que pour les échantillons en rivière. Ces résultats complémentaires sont présentés en Annexe 14.

V.3.2. ACP « synchrone » pour les échantillons de septembre 2013

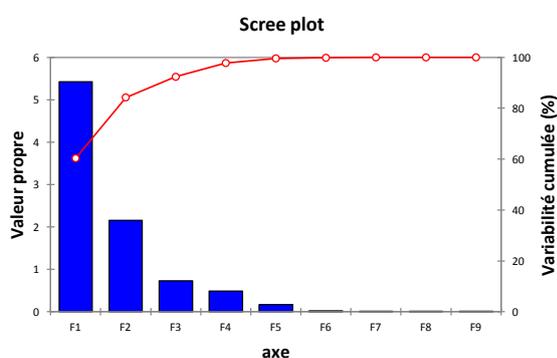
Les statistiques du jeu de données présentées en Figure 19 montrent que l'axe « F1 » explique 60% de la variance totale.

ACP Ions Majeurs (Septembre 2013)

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
TDS	25	361.000	619.000	459.960	79.009
SO4	25	5.503	82.275	32.288	22.416
NO3	25	0.247	5.974	2.589	1.607
Cl	25	3.746	10.735	7.099	2.072
HCO3	25	183.000	439.000	299.320	72.991
Na	25	2.570	21.858	9.282	5.431
K	25	0.426	6.236	1.546	1.120
Mg	25	0.931	14.864	6.391	3.667
Ca	25	55.041	142.559	97.144	25.238

Valeurs propres et variabilité :



Corrélations variables/facteurs :

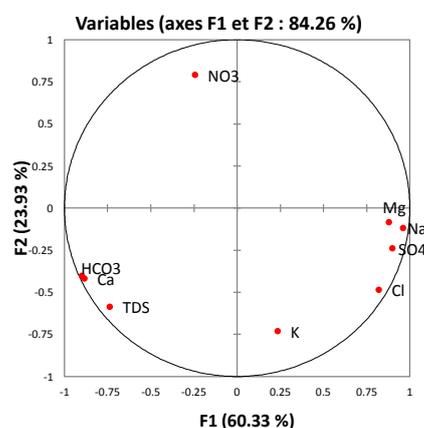


Figure 19 : Caractéristiques de l'ACP en ions majeurs de septembre 2013.

La Figure 20 ci-après, présente les résultats de l'ACP pour les échantillons collectés lors de la campagne de septembre 2013.

Pour la Cèze, les débits en entrée des gorges étaient beaucoup plus faibles, ils sont passés de 2440 L/s en juillet à 160 L/s en septembre. Ainsi, les eaux drainées en septembre par la Cèze en amont des gorges ne sont plus affectées par les eaux de ruissellement. Elles ont transité plus longtemps en souterrain et sont donc plus minéralisées qu'en juillet. Ainsi, les premières sources karstiques alimentant la Cèze ont un impact plus prononcé sur la chimie des eaux de la rivière (sur le débit résultant également).

Pour les sources, les débits ont diminué et la minéralisation a également augmentée mais dans des proportions moindres (sauf pour les sources qui souffrent de tarissement). Ceci est lié au fait que les réserves aquifères sur l'amont du bassin versant sont faibles tandis que le plateau karstique constitue quant à lui une véritable réserve aquifère dont la vidange est plus lente.

L'évolution temporelle de la minéralisation et/ou de la typologie chimique des sources sera discutée dans le détail dans le prochain paragraphe. Un point notable cependant est la source de Bastide Froide qui était sensiblement affectée par les sulfates en juillet évolue drastiquement vers le pôle sources dites « purement carbonatées calciques ». Cette évolution reste à discuter, s'agit-il d'une erreur analytique, de mélanges avec les eaux de la Cèze au moment de l'échantillonnage ou encore de tarissement de la composante sulfatée au profit de la composante carbonatée ?

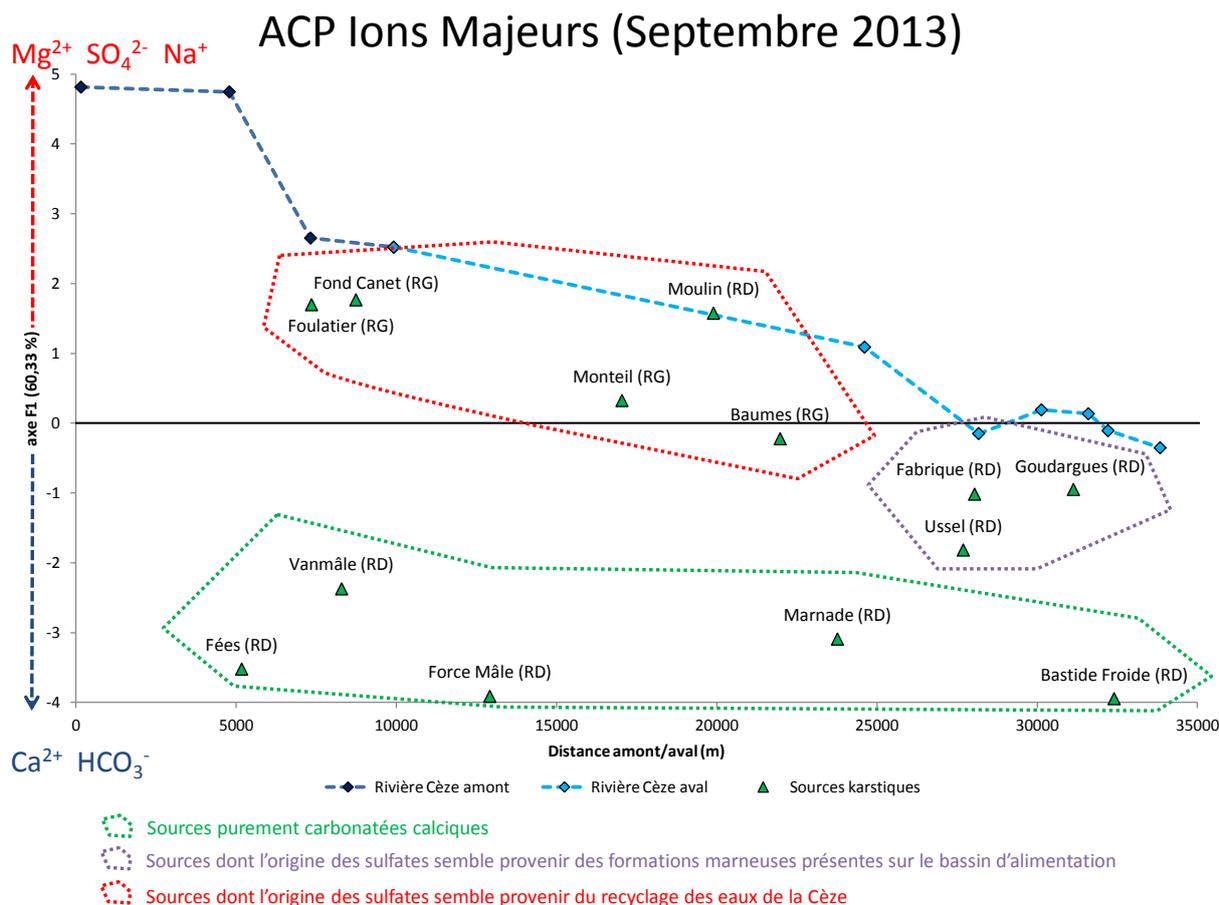


Figure 20 : ACP réalisée sur les analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques lors de la campagne de septembre 2013.

V.3.3. ACP « temporelle » pour les échantillons disponibles entre avril et septembre

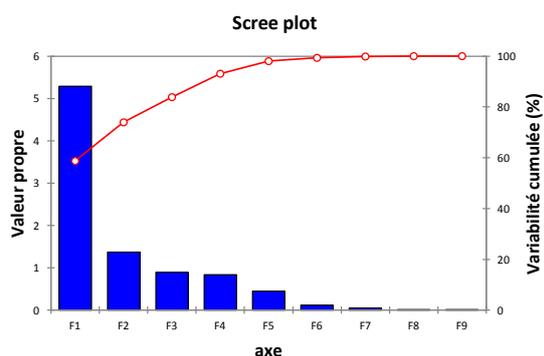
Les statistiques du jeu de données présentées en Figure 21 montrent que l'axe « F1 » explique 76% de la variance totale. Les pôles « sulfatés » et « carbonatés » sont inchangés, ils se lisent simplement à l'inverse des Figure 17 et Figure 19.

ACP Ions Majeurs (Avril, Mai, Juillet et Septembre 2013)

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
TDS	54	243.000	605.000	408.519	93.829
SO4	54	5.503	72.023	31.419	18.471
NO3	54	0.247	10.561	3.553	2.491
Cl	54	3.746	13.900	7.469	2.258
HCO3	54	117.000	439.000	263.611	85.203
Na	54	1.630	21.858	8.351	4.807
K	54	0.251	6.236	1.332	0.837
Mg	54	0.931	13.407	6.358	3.319
Ca	54	41.630	142.559	85.960	28.080

Valeurs propres et variabilité :



Corrélations variables/facteurs :

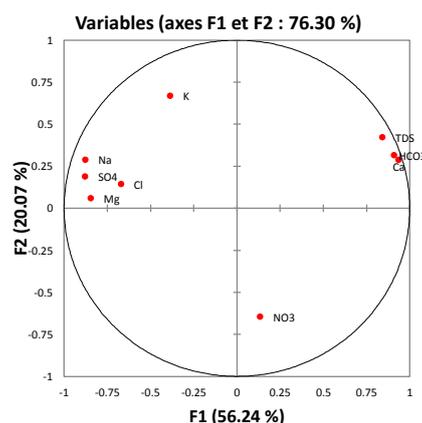


Figure 21 : Caractéristiques de l'ACP sur l'ensemble des analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la période d'avril à septembre 2013 (jeu de données incomplet).

La Figure 22 ci-dessous présente les résultats de l'ACP pour l'ensemble des analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la période d'avril à septembre 2013. L'étiquette de donnée indique le nom du point échantillonné (source ou rivière) et le chiffre entre parenthèse correspond au mois d'échantillonnage. La pointe de la flèche indique le sens d'évolution chimique du point échantillonné au sein de l'ACP « temporelle ».

Le jeu de données est cependant incomplet puisque la source des Fées compte quatre échantillons sur la période d'avril à septembre tandis que la plupart des autres sources en compte seulement deux.

Pour les échantillons prélevés en rivière, seulement les points de juillet et septembre ont été représentés. Avant la source des Fées, la Cèze évolue vers une minéralisation plus importante donc une affinité plus forte avec le pôle « sulfaté » tandis qu'on observe un basculement à l'aval de la source des Fées. Ce basculement est somme toute relatif et il est fortement dépendant dans débits de la Cèze. En effet, pour septembre l'impact chimique de la source des Fées (et des autres sources) est beaucoup plus marqué car la différence de débit entre sources et rivière est beaucoup plus faible. L'évolution chimique plus rapide à l'aval de la Cèze en septembre est du au fait que les sources de l'aval (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide) ont des débits sensiblement plus importants et la décroissance de ces débits est beaucoup plus lente que pour les sources de l'amont (Fées, Foulatier, Fond Canet, Vanmâle et Force Mâle).

Pour les sources, deux résultats sont particulièrement intéressants :

- Le premier résultat important concerne le sens d'évolution temporelle chimique des sources qui conforte la typologie établie précédemment. En effet, pour les sources dites « peu sulfatées », l'évolution chimique au cours de la décrue tend vers une légère stagnation, voir une légère augmentation de la minéralisation à la faveur du pôle « carbonaté ». En revanche pour les sources dites « fortement sulfatées » l'évolution chimique au cours de la décrue est plus marquée et la minéralisation se fait systématiquement à la faveur du pôle « sulfaté ». Ainsi, bien que les Sulfates ne permettent pas directement de discriminer l'origine des eaux, l'évolution chimique des eaux au cours du temps montrent deux comportements distincts pour les typologies « peu sulfatées » et « fortement sulfatées ». Par ailleurs, pour les sources dites « peu sulfatées », cette stabilité chimique temporelle (en juillet et septembre) tend à faire penser que le temps de séjour des eaux est potentiellement plus important par rapport aux autres types de sources. La dispersion et la diffusion au sein de l'aquifère sont-elles plus importantes ? Les réserves mises en jeu sont-elles plus importantes également ? Des éléments de réponses à ces questions pourront être avancés dès lors que la typologie hydrodynamique de ces sources sera définie (suivi sur 2014 et 2015). C'est toute l'ambition des approches métrologique et hydrologique qui sont expliquées dans une partie dédiée à cet effet (partie intitulée « approches métrologique et hydrologique par suivi des débits et de la pluviométrie locale »).
- Le second résultat important concerne la très forte évolution chimique de certaines sources comme les Fées, Vanmâle ou encore la Marnade. Ce résultat mérite d'être confirmé par un échantillonnage plus poussé lors des périodes de hautes eaux (voir en crue) pour toutes les sources. En effet, pour exemple, la source des Fées et la source de Vanmâle passent d'une typologie « fortement sulfatée » en avril à une typologie « purement carbonatée » en juillet et septembre. Ce changement très important de chimie peut-il provenir d'alimentations temporaires de la Cèze ? Est-ce une erreur analytique ou d'échantillonnage ? Le suivi de l'évolution temporelle des conductivités par les sondes CTD permettra probablement de mieux comprendre ce phénomène et peut-être de lever les incertitudes sur les relations entre la rivière et les eaux souterraines (dépendance du niveau de la Cèze sur le sens des échanges).

ACP Ions Majeurs (Avril, Mai, Juillet et Septembre 2013)

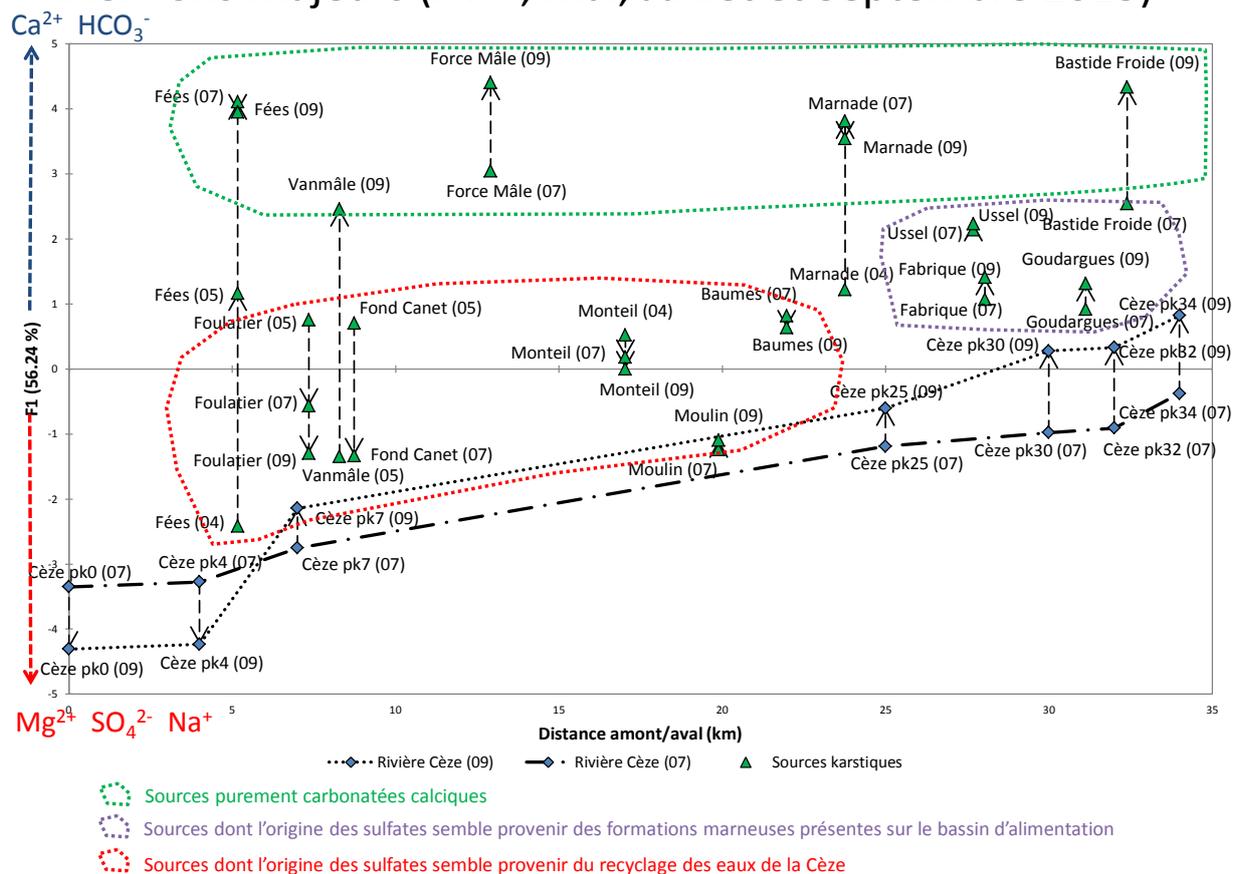


Figure 22 : ACP réalisée sur l'ensemble des analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la période d'avril à septembre 2013 (jeu de données incomplet).

V.3.4. Estimation des proportions de recyclage des eaux de la Cèze

Comme il a été vu précédemment, les principales sources de la rive gauche (Foulatier, Fond Canet, Monteil et les Baumes) recyclent une partie des eaux de la Cèze. A partir des résultats des l'ACP, il a été possible d'estimer les proportions (en pourcentage) d'alimentation de la en se basant sur une hypothèse de mélange entre les deux pôles identifiés. Le principe de ce mélange est illustré en Figure 23 ci-après. Le pôle « Cèze amont » correspond aux eaux de la Cèze à l'amont des gorges au niveau des pertes de Rochegude et concernent toutes les sources principales de la rive gauche. Le pôle « Cèze moyenne » correspond aux eaux de la Cèze au niveau des pertes de Baume Salène et concernent la source du Moulin. Le pôle « karstique » correspond à une moyenne des eaux de sources dites « purement carbonatées calciques ».

Principe du calcul basé sur l'ACP :



Définition des pôles :

Pôles de mélanges	Axe F1 ACP	
	Juillet	Septembre
Pôle Cèze amont	4.781	3.484
Pôle karstique	-3.369	-5.491
Pôle Cèze moyenne	1.806	2.103

Pourcentages de recyclage :

Sources	Axe F1 ACP		% recyclage eau Cèze	
	Juillet	Septembre	Juillet	Septembre
Foulatier	1.698	-0.119	60	62
Fond Canet	1.767	-0.033	61	63
Monteil	0.325	-1.185	48	45
Moulin	1.576	1.022	86	96
Baumes	-0.222	-2.062	38	39

Figure 23 : Sources affectées en permanence par le recyclage eaux de la Cèze (Juillet et Septembre 2013).

Il est intéressant de noter que les pourcentages de mélange estimés évoluent assez peu entre juillet et septembre. La source du Moulin a une chimie qui s'apparente le plus aux eaux de la Cèze, d'où une proportion très importante. Les sources de Monteil et des Baumes possèdent les pourcentages de recyclage les plus faibles.

V.4. Perspectives pour l'année 2015

V.4.1. Résumé et avantages de l'approche hydrogéochimique

D'une manière générale, l'analyse de l'ensemble des données hydrogéochimiques a permis de mettre en évidence :

- Trois typologies chimiques des eaux des sources ;
- Les proportions de mélange pour certaines sources dont les pôles ont été identifiés ;
- L'évolution chimique temporelle des eaux des sources et de la rivière posant la question du sens des échanges karst/rivière ;
- L'évolution chimique spatiale et temporelle de la rivière d'amont en aval des gorges.

Bien qu'il ait présenté des résultats très intéressants, l'échantillonnage hydrogéochimique de l'année 2013 se voulait en partie prospectif. En effet, il a également permis d'identifier les problèmes et limites des analyses en ions majeurs des eaux, et de ce fait, il va aussi permettre de compléter l'échantillonnage pour les prochaines campagnes de 2015.

V.4.2. Problèmes, limites et perspectives :

Ces problèmes et limites, ainsi que les perspectives d'améliorations, concernent :

- La discrimination de l'origine des Sulfates :

Pour discriminer l'origine des Sulfates (formations du Trias, de l'Oligocène, du socle cristallin, des formations marneuses ?), les outils isotopiques sont envisageables. Pour ce faire, il semble possible d'utiliser les isotopes du soufre (^{34}S et ^{32}S). Des prélèvements pourront être effectués, tout d'abord au sein des formations géologiques susceptibles d'alimenter les eaux en sulfates, aussi bien dans le bassin d'Alès que sur le plateau calcaire surplombant les gorges (formations marneuses), ensuite, dans le cours d'eau à l'entrée des gorges et en sortie, et enfin, au niveau des sources de rive droite et de rive gauche. Pour un suivi temporel, il sera possible de réaliser ces prélèvements à trois reprises au cours de l'année, en hautes, moyennes et basses eaux. En parallèle de cela, un suivi de l'alimentation de la Cèze à l'aide des isotopes de l'eau ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et D/H) pourra être réalisé. Cet outil est susceptible de fournir des informations sur les masses d'eau sollicitées à différentes périodes de l'année en différents points d'alimentation. Le but étant ici d'identifier des approvisionnements plus ou moins profonds et de définir des mélanges d'eaux souterraines. Toutes ces analyses isotopiques seront accompagnées d'analyses en ions majeurs et de mesures in situ du pH, de la conductivité et de la température des eaux.

- L'interprétation des concentrations en Silice et en Chlorures :

Pour la Silice les concentrations observées semblent contradictoires avec l'idée que l'on se fait de la dissolution de cet élément. En effet, la Silice peut notamment provenir de la dissolution de microorganismes siliceux (diatomées), des basaltes et autres formations cristallines, ou encore de certains produits de traitement des vignes. Cette question mérite d'être creusée au regard du contexte géologique du terrain d'étude.

Pour pouvoir analyser de manière appropriée les Chlorures, il convient d'échantillonner les eaux de pluie locale et de quantifier la variabilité annuelle (précipitations orageuses, influences cévenoles ou océaniques). Cet échantillonnage pourra être réalisé au cours de l'année 2015.

- Le manque de connaissance de la chimie des sources et de la rivière en hautes eaux :

L'ACP temporelle a révélée des résultats particulièrement intéressants notamment sur la variabilité chimique des sources qui peut être très importante entre deux situations hydrologiques (hautes eaux à basses eaux). Cependant, les données disponibles en hautes eaux sont incomplètes, de nouvelles campagnes d'échantillonnage pourront être réalisées en 2015. Il s'agira de réaliser, en parallèle des campagnes isotopiques, un échantillonnage en ions majeurs en hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux selon ce même protocole. Il conviendra de mettre en relation ces nouvelles données hydrogéochimiques (isotopiques et ions majeurs) avec les débits et conductivités collectées en parallèles au cours de l'année 2015. Ces informations complémentaires permettront de mieux préciser les connaissances sur le sens des échanges entre karst et rivière.

PARTIE VI

—

Approche biologique par échantillonnage des invertébrés interstitiels

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Pierre Marmonier, Margot Jacquy, Martin Lawniczak et Mathilde Novel

(UMR 5023 LEHNA, CNRS-Université Lyon 1, Equipe Ecologie, Evolution, Ecosystèmes Souterrains).

VI.1. Principe

Les cours d'eau sont des écosystèmes qui ne se limitent pas aux seules eaux de surface, ils se prolongent à l'intérieur des sédiments de leur lit dans un habitat appelé « milieu interstitiel » ou « zone hyporhéique ». Cette zone est définie par la présence d'un pourcentage plus ou moins grand d'eau de surface dans les interstices. Cette définition n'est pas seulement hydrologique, mais aussi écologique. En effet, les échanges d'eau entre la rivière et la nappe ont des conséquences importantes sur les caractéristiques environnementales régnant dans les sédiments, sur les communautés interstitielles et sur le fonctionnement même de la zone hyporhéique.

Dans les zones d'infiltration d'eau de surface, appelées downwellings, il existe des apports importants d'oxygène et de matière organique fraîche provenant de la surface. On trouvera dans ces downwellings une majorité d'invertébrés de surface (épigés ou benthiques) exigeant d'importantes ressources trophiques et une minorité d'organismes souterrains (hypogés ou stygobies) beaucoup plus résistants aux contraintes environnementales. Ces stygobies présents dans les downwellings sont généralement des animaux vivants à de faibles profondeurs et résistants aux perturbations hydrologiques et thermiques (e.g. *Niphargopsis casparyi* dans le Rhône).

Dans les zones de remontées d'eaux souterraines vers la surface, appelées upwellings, les eaux des interstices sont souvent moins bien oxygénées et la quantité de matière organique plus faible. Là, on trouvera un peu moins d'organismes benthiques qui sont désavantagés par ces contraintes, mais une proportion plus forte de stygobies, qui ne craignent pas ces limitations des ressources et apprécient la stabilité thermique et hydrologique des milieux alimentés en eaux souterraines. Les stygobies fréquentant les upwellings sont souvent des animaux vivants en profondeur dans la nappe, très sensibles aux perturbations (e.g. *Niphargus kochianus* dans le Rhône).

Le principe de la méthode appliquée sur la Cèze pour localiser les zones d'apports d'eaux souterraines est d'échantillonner de l'eau interstitielle et de la faune hyporhéique dans des zones de upwelling (le long de bancs de graviers latéraux) et d'utiliser leurs caractéristiques pour diagnostiquer le sens des échanges hydrologiques entre la rivière et sa nappe.

VI.2. Description de l'échantillonnage (année 2013)

L'étude des eaux et de la faune interstitielle de la Cèze a été réalisée au début du mois de juillet 2013. La méthode adoptée est le pompage avec piézomètre mobile de type Bou-Rouch (Bou & Rouch, 1967). L'échantillon d'eau a été fixé à 10 litres et la profondeur de pompage à 50 cm sous la surface des sédiments. Les pompages ont tous été réalisés en bordure de bancs de galets, à l'apex du banc ou quelques mètres en aval de l'apex (généralement des zones de remontée d'eaux souterraines), le plus loin possible des seuils (généralement des zones d'infiltration d'eau de surface).

- Un total de 18 bancs de galets a été échantillonné, sur les 34 bancs présents entre Tharoux et la Source de Monteil (Figure 24), le banc 1 étant situé juste en amont de l'entrée des gorges, le 34 au niveau de la Source de Monteil elle-même.
- Chaque station a été échantillonnée en trois points (réplicas de mesure) distant d'une dizaine de mètres, sur un secteur d'apparence homogène (même granulométrie de surface, même pente...).
- Des échantillons d'eau supplémentaires ont été réalisés dans la Cèze en surface (à chaque station) et dans 4 sources (Source des Fées, source près du banc 6 (source de Foulatier), Source des Travers, Source de Monteil), dans l'eau de surface de la source et dans l'eau interstitielle.
- Des échantillons supplémentaires de faune ont été réalisés dans ces mêmes sources (filet Surber pour le benthos et pompages Bou-Rouch pour l'interstitiel), ainsi qu'en 4 stations pour le benthos de la Cèze (filet Surber 200 μm de vide de maille, 8 micro-habitats cumulés).
- Un total de 66 échantillons de faune et de 80 échantillons d'eau a donc été réalisé.



Figure 24 : Localisation des 18 bancs de galets échantillonnés en juillet 2013 pour l'étude des eaux et de la faune interstitielle de la Cèze. Les numéros correspondent au code des stations.

La température, la conductivité électrique, le pH et les teneurs en Oxygène dissous ont été mesurés sur le terrain, sur les eaux de surface et les eaux interstitielles (Thermo-Conducti-Oxymètre HACH-Lange). La différence de hauteur entre l'eau interstitielle dans le piézomètre et l'eau de la rivière (ou Gradient Hydraulique Vertical, Lee & Cherry, 1978) a été mesurée en chaque point. Un échantillon de 40ml d'eau a été filtré sur le terrain à 0,7 μm (filtre Whatmann GF-F) et ramené au laboratoire pour la mesure des

teneurs en Nitrates et en Sulfates (analyses colorimétriques standard) ainsi qu'en Calcium, en Magnésium, en Sodium et en Potassium (par chromatographie ionique).

Pour l'année 2013, seuls 18 échantillons de faune interstitielle ont été triés et identifiés : les bancs 3, 7 et 8 dans le secteur en amont des gorges et les bancs 25, 25 et 32 en aval des gorges. Les identifications de la faune ont été menées à l'espèce (Cladocères, Ostracodes), au genre (Amphipodes, Isopodes, Epheméroptères, Plécoptères, Trichoptères, Coléoptères) ou à la famille (autres groupes).

VI.3. Premiers résultats

VI.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles

La mesure des gradients hydrauliques verticaux entre les eaux interstitielles et les eaux de surface (Figure 25) mettent clairement en évidence que l'ensemble des échantillons a été réalisé en zone de upwelling (tous les VHG sont positifs), mais avec deux types de variations :

- Deux valeurs très fortes ont été mesurées au droit de la Source des Fées (banc 3, valeur de 6,7%) et de la Source de Monteil (banc 34, valeur de 7,5%), traduisant des apports ponctuels d'eau souterraine importants dans les bancs situés au pied de ces deux sources.
- Les valeurs de VHG décroissent progressivement d'amont en aval des gorges, passant de valeurs situées entre 1,5 et 2% en amont de la station 20, à des valeurs généralement plus faibles autour de 0,8% en aval de cette station.

Tout semble indiquer qu'il existe dans le secteur d'étude (i) des apports très importants et très ponctuels situés au niveau des sources, combinés à (ii) des apports plus faibles et plus diffus décroissants d'amont en aval des gorges. En aval du banc 20, les échanges verticaux semblent réduits.

Les mesures réalisées sur les autres paramètres physico-chimiques traduisent eux aussi une forte hétérogénéité spatiale des eaux interstitielles de la Cèze (Figure 25) :

- Les teneurs en Oxygène dissous diminuent progressivement d'amont en aval, traduisant bien la diminution progressive des échanges d'eau entre la rivière, sa nappe et les interstices des sédiments. Ces teneurs en O₂ restent toujours supérieures à 3 mg/L (minimum au banc 32, avec 3,3 mg/L) et ne semblent donc pas limitants pour la faune souterraine adaptée à des hypoxies sévères, mais pourraient limiter l'accès aux sédiments à de nombreuses espèces benthiques résistant mal à l'hypoxie (Epheméroptères ou Plécoptères exigeants).
- La Conductivité des eaux interstitielles en amont des gorges (banc 1) est la plus faible (autour de 330 µS/cm), elle augmente fortement à partir de la Source des Fées (banc 3, valeur moyenne de 540 µS/cm) et reste élevée jusqu'au milieu des gorges (banc 20), puis elle diminue en aval (à partir du banc 24) pour se stabiliser à des valeurs proches de celles mesurées dans les eaux de surface de la rivière (autour de 360 µS/cm). Les valeurs mesurées au droit de la Source de Monteil (banc 34, valeur moyenne de 405 µS/cm) sont à peine supérieures à celles mesurées juste en amont (dans les bancs 24 à 33).
- Les teneurs en Mg, Na, SO₄ et K montrent une tendance exactement opposée. Nous commenterons ici le Mg qui est représentatif de ce groupe de paramètres : les teneurs en Mg sont fortes avant de pénétrer dans les gorges (au banc 1, valeur de 9,2 mgMg/L) et en aval des gorges (des bancs 24 à 34, plus de 8 mgMg/L), elles sont proches de celles mesurées dans les eaux de surface de la rivière (8,7 mgMg/L en moyenne). Inversement, ces teneurs sont plus faibles dans la partie amont des gorges (des bancs 3 à 11, valeurs moyennes variant de 1,6 à 7 mgMg/L) et proches de celles mesurées dans les eaux souterraines du secteur, comme dans la Source des Fées (1,5 mgMg/L), la source du banc 6 (4,4 mgMg/L) ou la Source des Travers (1,0 mgMg/L). Comme pour la conductivité, les valeurs de Mg, Na,

SO₄ ou de K mesurées au droit de la Source de Monteil (banc 34, valeur moyenne de 7,2 mgMg/L) sont à peine inférieures à celles mesurées juste en amont (des bancs 24 à 33).

- Enfin, les teneurs en Ca (non présentées ici) montrent une variabilité forte non interprétable pour le moment.

Cet ensemble d'analyses physico-chimiques des eaux interstitielles met bien en évidence les possibles échanges entre le milieu interstitiel des bancs de graviers, les eaux de surface de la Cèze et les eaux de nappe des aquifères qui la bordent.

- En amont des gorges, les interstices des sédiments sont alimentés par de l'eau de surface de la rivière.

- A partir de la Source des Fées et jusqu'au banc 20, les interstices sont alimentés par une part plus ou moins forte d'eau souterraine. Cette contribution souterraine est forte dans les bancs 3, 4, 7, 8, 11, 13 et 16, plus faible dans les bancs 12, 14, 19 et 20.

- En aval des gorges, les interstices des sédiments sont alimentés par des eaux de la Cèze (bancs 24 à 33) avec parfois une tendance au colmatage, bien visible sur les teneurs en oxygène dissous parfois très faibles (banc 32).

- Au droit de la Source de Monteil (banc 34), les apports d'eau souterraine se font de nouveau fortement sentir.

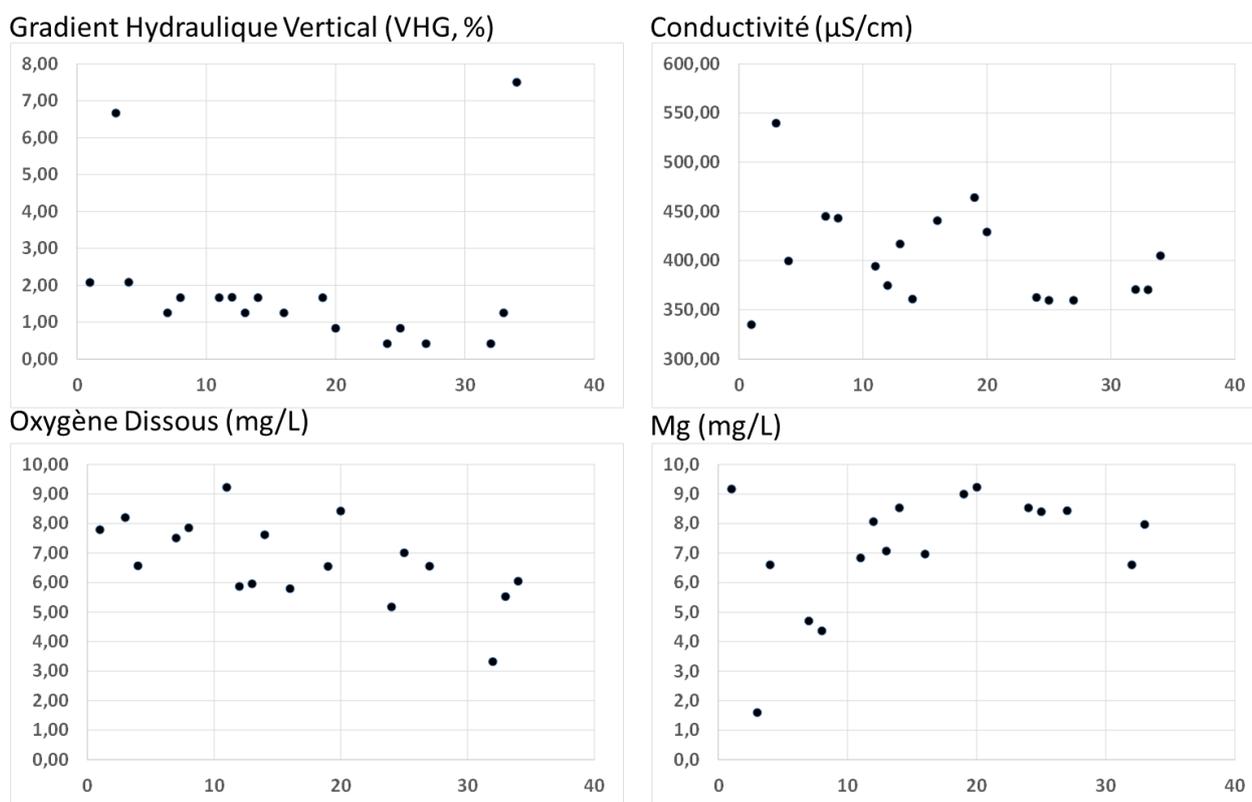


Figure 25 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles de la Cèze mesurées dans les 18 bancs de galets étudiés en 2013 (en abscisse : n° des bancs).

VI.3.2. Caractéristiques des communautés interstitielles

Un total de 55 taxons a été récolté dans les 18 échantillons traités au cours de l'année 2013 (Tableau 3), dont près de la moitié sont des Crustacés. Cette forte diversité taxonomique (qui va encore augmenter avec les tris des échantillons suivants) démontre la qualité de la communauté d'invertébrés de la Cèze. Certains organismes benthiques sont des animaux exigeants (comme les Plécoptères du genre *Leuctra*, ou les Epheméroptères Habrophlebiidae du genre *Choroterpes*)

Pour cette première année, seuls 7 taxons stygobies ont été identifiés, mais ce nombre augmentera avec les identifications spécifiques de certains groupes (les Amphipodes par exemple) et l'augmentation du nombre d'échantillons triés.

Tableau 3 : Liste taxonomique des invertébrés interstitiels collectés dans 6 stations de la rivière Cèze en juillet 2013. * taxon stygobie.

Nématode	<i>Acroperus harpae</i>	<i>Leuctra major</i>
Oligochète	<i>Alonella nana</i>	<i>Leuctra gr nigra</i>
Achète	<i>Chidorus sphaericus</i>	Nemouridae juvéniles
<i>Islamia</i> sp. *	Cladocères juvéniles	Baetidae
<i>Physa acuta</i>	<i>Pseudocandona albicans</i>	<i>Caenis</i> sp.
<i>Radix</i> sp.	<i>Cryptocandona</i> indet. *	<i>Choroterpes picteti</i>
Bivalve	Candoninae épigée juvénile	<i>Esolus</i> sp.
Hydracariens	<i>Psychrodromus</i> sp	<i>Elmis</i> sp.
Cyclopidés	<i>Prionocypris zenkeri</i>	<i>Hydraena</i> sp.
Harpacticoïdes	<i>Herpetocypris reptans</i>	<i>Hydroscapha</i> sp.
dont <i>Parastenocaris</i> sp. *	<i>Cypridopsis vidua</i>	<i>Yola</i> sp.
<i>Alona guttata</i>	<i>Potamocypris variegata</i>	<i>Micronecta</i> sp.
<i>Alona weltneri</i>	<i>Limnocythere inopinata</i>	Chironomidae Tanypodinae
<i>Alona quadrangularis</i>	Darwinulidae	Chironomidae Orthocladiinae
<i>Phreatalona phreatica</i> *	Ostracodes juvéniles	Chironomidae Tanytarsini
<i>Gammarus cf orinos</i>	Limoniidae Eriopterini	Tardigrades
<i>Niphargus</i> sp. *	Limoniidae Haxatomini	
<i>Niphargopsis casparyi</i> *	Simulidae	
<i>Asellus aquaticus</i>	Ceratopoginidae	
<i>Proasellus walteri</i> *	Empididae	

Lorsque l'on considère la distribution spatiale de cette faune dans les 6 stations étudiées pour cette première année (Tableau 4), on peut constater que :

- Les bancs situés en amont des gorges (3, 7 et 8) sont caractérisés par des abondances totales moyennes et assez similaires (de 1000 à 1247 individus/10L), une richesse taxonomique variant de 17 à 21 taxons, mais surtout des abondances très fortes des organismes stygobies.

Ces abondances exceptionnelles en stygobies sont surtout marquées dans le banc 3 (jusqu'à 330 individus pour 10L), au droit de la Source des Fées, où sont collectés un grand nombre d'Amphipodes stygobies (*Niphargopsis casparyi*, *Niphargus* sp.) et des Isopodes (*Proasellus walteri*).

Des abondances plus faibles sont mesurées plus en aval, aux bancs 7 et 8, avec des organismes assez similaires dans l'état actuel des identifications.

- Les bancs situés en aval des gorges (24, 25 et 32) montrent une très forte variabilité des abondances (allant de 263 à 5700 individus/10L) et des richesses (de 12 à 18 taxons) ainsi qu'une très faible représentation des organismes stygobies (toujours moins de 20 individus pour 10L).

Les abondances et richesses totales les plus fortes sont mesurées aux bancs 24 et 25 dont les assemblages sont dominés par des organismes benthiques d'eau calme (Cyclopidés, Darwinulidae,

Hydroscapha sp., *Yola sp.*, Ceratopogonidae, Chironomes Orthoclaadiinae), traduisant une forte connectivité avec les eaux de surface de la Cèze.

Les abondances et richesses totales les plus faibles sont mesurées dans le banc 32, où les assemblages sont très pauvres et semblent soumis à des conditions très difficiles.

Ces premiers résultats laissent penser que les bancs 3, 7 et 8 sont alimentés, de manière significative, par des eaux de nappe, que les bancs 24 et 25 sont plus particulièrement alimentés par des eaux de surface de la Cèze, alors que le banc 32 semble peu ou mal connecté, que ce soit avec la rivière ou avec la nappe.

Tableau 4 : Caractéristiques des communautés d'invertébrés interstitiels de la Cèze collectés en 6 stations au mois de juillet 2013. Toutes les valeurs sont des moyennes de 3 répliques de mesure et sont exprimées pour 10L d'eau interstitielle.

	3	7	8	24	25	32
Abondances totales	1067	1247	1222	5763	1484	263
Richesses taxonomiques totales	21,0	17,7	18,7	17,7	18,3	12,3
Abondances en stygobies	163	40	24	4	14	4
Richesses en stygobies	2,3	2,3	3,0	1,0	2,0	0,7

VI.4. Discussion et perspectives

Les travaux menés au cours de cette première année ont permis un échantillonnage extensif (18 stations en triplicatas) de la Cèze dans la zone des gorges karstiques en aval de Tharoux. Les informations apportées par les analyses physico-chimiques des eaux interstitielles et par les organismes hyporhéiques semblent très cohérentes (Figure 26) :

- Avant l'entrée de la Cèze dans les gorges (au niveau du banc 1), les sédiments semblent alimentés par des flux d'eau allant de la surface vers les interstices, la Cèze serait donc en situation de perte d'eau superficielle. Les communautés d'invertébrés confirmeront ou infirmeront ce diagnostic.
- Dans la partie en amont des gorges, du banc 3 aux bancs 16 ou 20 (selon les paramètres considérés), les sédiments de la rivière semblent alimentés par des apports d'eau souterraine. Ces apports sont particulièrement sensibles au droit de la Source des Fées et dans les bancs 4, 7, 8, 11, 13 et 16. L'analyse des quelques communautés d'invertébrés actuellement disponibles confirment cette interprétation.
- Dans la partie en aval des gorges, du banc 24 au banc 33, les sédiments sont alimentés par des eaux superficielle de la rivière, avec par endroit, des points de faible connectivité (voir de colmatage des sédiments comme au banc 32). Les quelques communautés d'invertébrés actuellement triées et identifiées confirment ces deux points.
- Tout en aval, au banc 34, les sédiments sont alimentés en eau souterraine, sans doute liée à la nappe alimentant la Source de Monteil. Les communautés d'invertébrés confirmeront ou infirmeront ce diagnostic.

Les années 2014 et 2015 du programme d'étude des échanges rivière-nappe dans la Cèze permettront de progresser sur 4 principaux points :

- Les caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles seront analysées au regard des valeurs obtenues dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines, grâce à des échanges avec les autres partenaires du programme (Ecole Nationale des Mines de Saint-Etienne et Mines d'Alès).
- Les échantillons de faune interstitielle non encore triés et identifiés seront analysés et leur composition devrait nous permettre de confirmer ou de rejeter certaines interprétations basées sur la chimie des eaux. Douze stations doivent encore être triées.
- La faune du compartiment benthique de la rivière sera triée et identifiée de manière à savoir si elle est modifiée d'amont en aval des gorges (effet du tourisme entre les bancs 19 à 24 par exemple), ce qui permettra de mieux analyser les informations apportées par la fraction épigée des organismes dans les communautés interstitielles en aval des gorges.
- De même, la faune karstique des sources et de certaines grottes sera échantillonnée, triée et identifiée, de manière à mieux connaître la composition spécifique de cette faune profonde. Ces connaissances devraient permettre de différencier les secteurs où les fortes abondances en faune stygobie sont liées à des échanges avec une nappe peu profonde accompagnant la rivière (recyclage hyporhéique sur de faibles distances) ou à des échanges avec les aquifères karstiques (apports d'eau profonde).

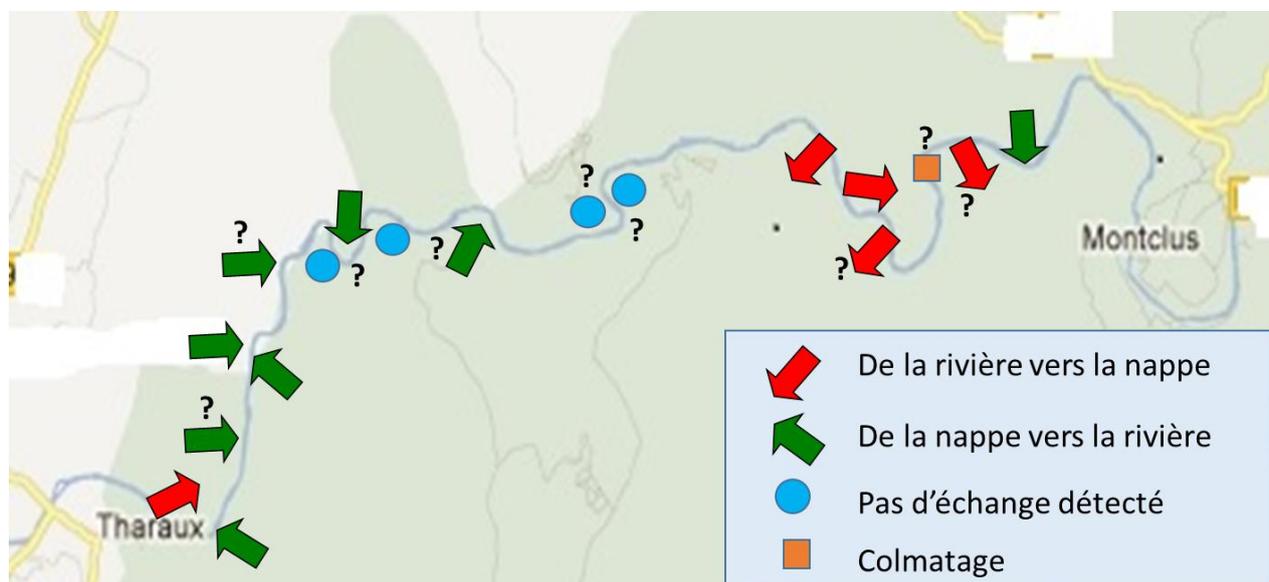


Figure 26 : Cartographie des zones d'échange rivière-nappe dans les gorges de la Cèze. Hypothèses de circulation des eaux obtenues à partir des mesures de juillet 2013 (les ? indiquent les stations où toutes les données ne sont pas encore analysées).

PARTIE VII

—

Approches de modélisation « pluies - débits » par réseaux neuronaux

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Anne Johannet, Michaël Savary, David Salze, Bernard Vayssade et Shishir Gaur

(UMR 7300 ESPACE, EMA)

→ Joël Jolivet

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

→ Jordan Ré-Bahuaud et Didier Graillot

(UMR 5600 EVS, EMSE)

Précision nécessaire : le travail concernant la modélisation n'a commencé qu'en 2014. Il est donc actuellement en cours. Cette partie va donc présenter les outils et méthodes ainsi que les premiers résultats mais n'a pas encore l'envergure d'une étude finalisée.

VII.1. Principe

Le karst peut être vu comme plusieurs fonctions différentes (infiltration rapide, lente, stockage, ...) formant un système [Mangin, 1975]. Dans l'approche systémique, les mesures d'entrée et de sortie sont considérées comme les sources d'information nécessaires à la compréhension globale du système. Ce dernier est interprété comme étant un opérateur transformant un signal d'entrée à un signal de sortie. Ainsi, une meilleure caractérisation fonctionnelle du système peut être obtenue par des méthodes d'analyse des signaux d'entrée et de sorties ou des modèles permettant la simulation du débit à partir de la pluie sans pour autant connaître *a priori* la structure de ce dernier. Cette partie vise donc à présenter les méthodes d'analyse systémique utilisées dans un premier temps (autocorrélations et corrélations croisées) puis les résultats qu'elles permettent d'obtenir.

VII.2. Analyse corrélatoire

Les calculs de corrélation sont des calculs statistiques qui estiment la coïncidence de l'apparition d'événements entre deux variables. L'utilisation des calculs de corrélation a été proposée par Mangin [Mangin, 1975] dans le domaine de l'hydrologie en considérant que les variables sont des signaux temporels.

Ainsi, pour deux signaux temporels \mathbf{x} ($x_i; i=1, n$) et \mathbf{y} ($y_i; i=1, n$) de moyennes respectives \bar{x} et \bar{y} , et d'écart type respectifs σ_x, σ_y le corrélogramme est défini par :

$$C_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_i^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

Avec k le décalage temporel (en nombre de pas de temps), C_k le coefficient de corrélation pour le décalage k , et n le nombre de jours que comporte la chronique considérée. Deux limites peuvent être soulignées par rapport à cette utilisation : d'une part les corrélations sont utilisées pour identifier des

causalités alors que le simple calcul de coïncidence n'est pas une preuve de causalité ; d'autre part l'approche utilisée est celle de la corrélation linéaire, qui ne peut donc prendre en compte le fonctionnement non linéaire des processus considérés. Néanmoins ces approches s'étant révélées très utiles nous les présentons dans ce qui suit. La fonction de corrélation peut être calculée sur une seule série temporelle, on parle alors de corrélogramme simple ou d'autocorrélation, ou entre deux séries différentes ; on parle alors de corrélation croisée.

VII.2.1. Autocorrélation

Lorsque l'on s'intéresse à trouver des structures au sein d'un signal, on peut utiliser la fonction d'autocorrélation qui est définie telle que par l'Eq.5, en remplaçant y par x . On peut tracer cette fonction graphiquement en fonction du décalage k (Figure 27). Comme la fonction est par construction symétrique par rapport à l'axe des ordonnées, seules les valeurs pour les décalages positifs sont représentées.

Lorsque l'on effectue cette analyse sur des hauteurs d'eau ou les débits d'un système hydrologique, le corrélogramme simple nous permet de déterminer l'effet mémoire du système étudié. Mangin [Mangin, 1975], l'a défini comme étant la durée nécessaire pour atteindre la valeur d'autocorrélation au-delà de laquelle on considère par un test statistique que la série temporelle n'est plus corrélée à elle-même. L'effet mémoire représente l'inertie du système. C'est en se basant sur les travaux de Jenkins et Watts [1968] que Mangin [1975] a déterminé le seuil de corrélation définissant l'effet mémoire en calculant l'erreur sur l'estimation du coefficient de corrélation C_k . On note que certaines hypothèses statistiques émises pour le calcul du seuil définissant l'effet mémoire ne sont pas toujours vérifiées pour les séries temporelles réelles en hydrologie ; néanmoins, dans les différentes études que nous mènerons sur l'autocorrélation, la définition standard de l'effet mémoire sera utilisée. Ce dernier est défini comme étant la durée nécessaire pour que l'autocorrélation atteigne une valeur de 0,2. C'est donc cette valeur seuil de 0,2 qui sera utilisée pour les interprétations.

Un effet mémoire court signifie que la réponse du système à une pluie est rapide. Dans le cas d'hydrosystèmes karstiques, A. Mangin a alors émis l'hypothèse que la karstification du système est importante et que le stockage de l'eau est faible. On observe ce phénomène par exemple au niveau du karst d'Aliou, dans les Pyrénées ariégeoises dont l'effet mémoire est de seulement 4 jours. A l'opposé, le karst de Fontestorbes, dans les Pyrénées ariégeoises encore, présente un effet mémoire long (60 jours) et peut indiquer la présence de réserves importantes [Mangin, 1984]. Sur le graphique présenté en Figure 1, nous avons reporté le seuil de 0,2 et déduit un effet mémoire de 18 jours dans ce cas particulier où le pas de temps est de 1 jour.

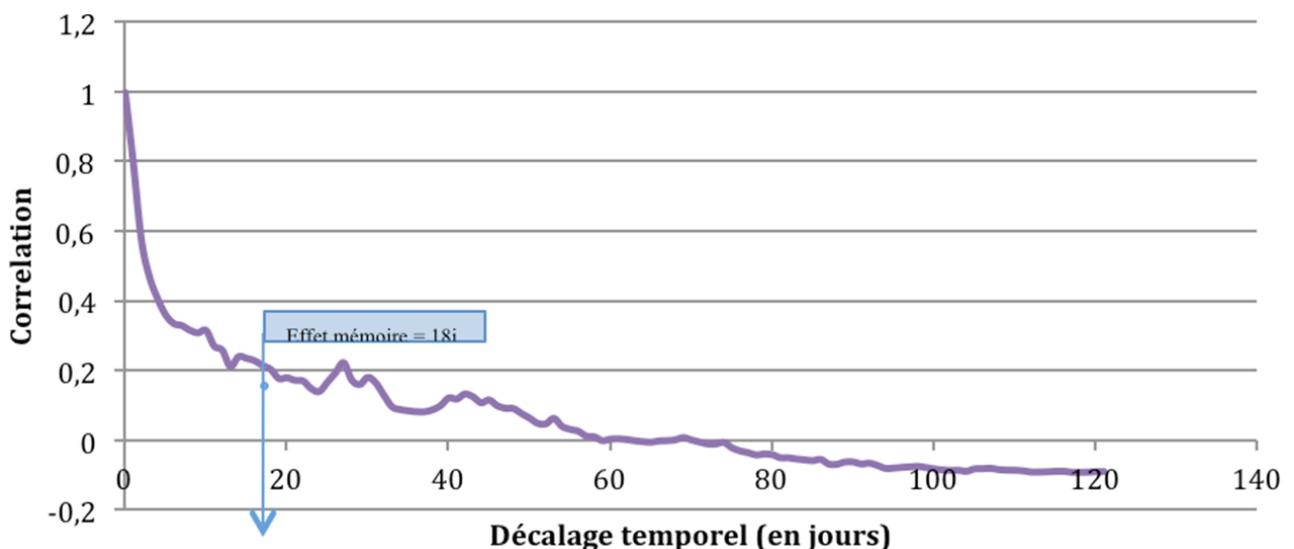


Figure 27 : Fonction d'autocorrélation de la hauteur d'eau mesurée à Bagnols-sur-Cèze.

VII.2.2. Corrélogramme croisé

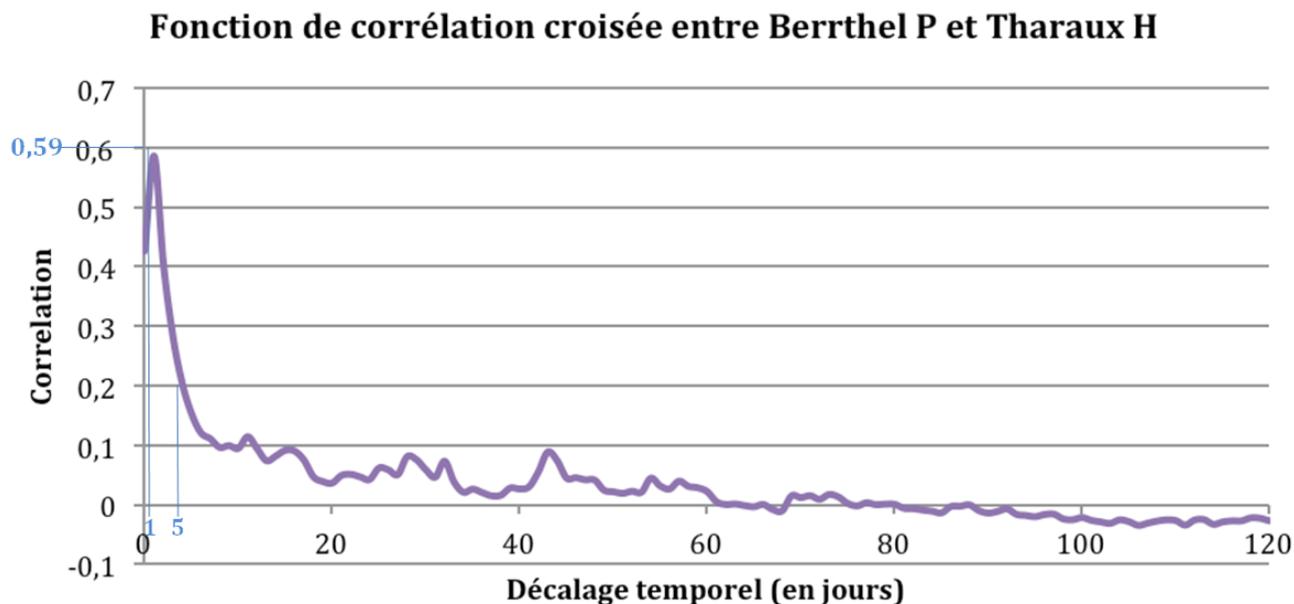


Figure 28 : Fonction de corrélation croisée entre la pluviométrie relevée à la Croix-de-Berthel et la hauteur d'eau mesurée à Tharaux.

La corrélation croisée est utilisée sur deux séries chronologiques différentes (ici, la pluie et la hauteur d'eau) comme présenté en Eq. 5. Ainsi, en utilisant l'équation 5, on calcule le corrélogramme croisé représentant la corrélation entre les deux signaux x et y en fonction du décalage temporel entre les deux séries. Un exemple de représentation graphique du corrélogramme entre des pluies et une hauteur d'eau est donné en Figure 28. Comme nous nous intéressons à la partie causale des relations entre la pluie et la hauteur d'eau, nous n'avons tracé que la partie droite, pour les k positifs, du diagramme (c'est la pluie qui crée la hauteur d'eau et non l'inverse). Ainsi, en observant l'effet mémoire dans le cas d'un corrélogramme croisé, il est possible de déterminer la durée pour laquelle les deux séries sont dépendantes, c'est-à-dire l'historique de pluie influençant la hauteur d'eau. Le seuil de corrélation défini précédemment (0,2) est également applicable pour les corrélogrammes croisés (Figure 28). Dans le cas présenté sur la Figure 28 on trouve un effet mémoire de 5 jours. Une autre information peut être extraite de cette représentation : il s'agit de la durée associée au maximum de réponse du pic observé. Nous appellerons ce temps « temps de réponse », car il traduit le temps que met l'eau associée au maximum de précipitations, à produire le maximum de hauteur d'eau. Sur la Figure 28, le temps de réponse est de 1 jour.

VII.3. Analyse corrélatoire appliquée aux signaux de pluie et hauteur d'eau la Cèze

VII.3.1. Protocole

Les analyses corrélatoires sont appliquées pour chaque série chronologique que nous avons constituée dans la base de données pour les différentes années disponibles (Tableau 5).

Tableau 5: Récapitulatif des données disponibles par stations et par années (1 : données disponibles ; 0 : données indisponibles).

Années		1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Pluviométries	La Croix de Berthel	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
	Malons	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
	Sénéchas	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Bessèges	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
	Tharoux	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Montclus	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Bagnols sur Cèze	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Hauteurs d'eau	Sénéchas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Banne	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Les Mages	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bessèges	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
	Tharoux	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Montclus	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	La Roque sur Cèze	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bagnols sur Cèze	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	Chusclan	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

On observe sur le Tableau 5 que certaines stations ne peuvent pas être corrélées entre elles car ces dernières ne possèdent pas d'années de mesures en commun. Par exemple, les mesures de pluviométrie de la station de Bessèges, ne peuvent pas être corrélées avec les mesures de hauteurs d'eau effectuées à la Roque sur Cèze. Dans les données présentées dans cette partie, cette impossibilité de traitement sera représentée par une croix.

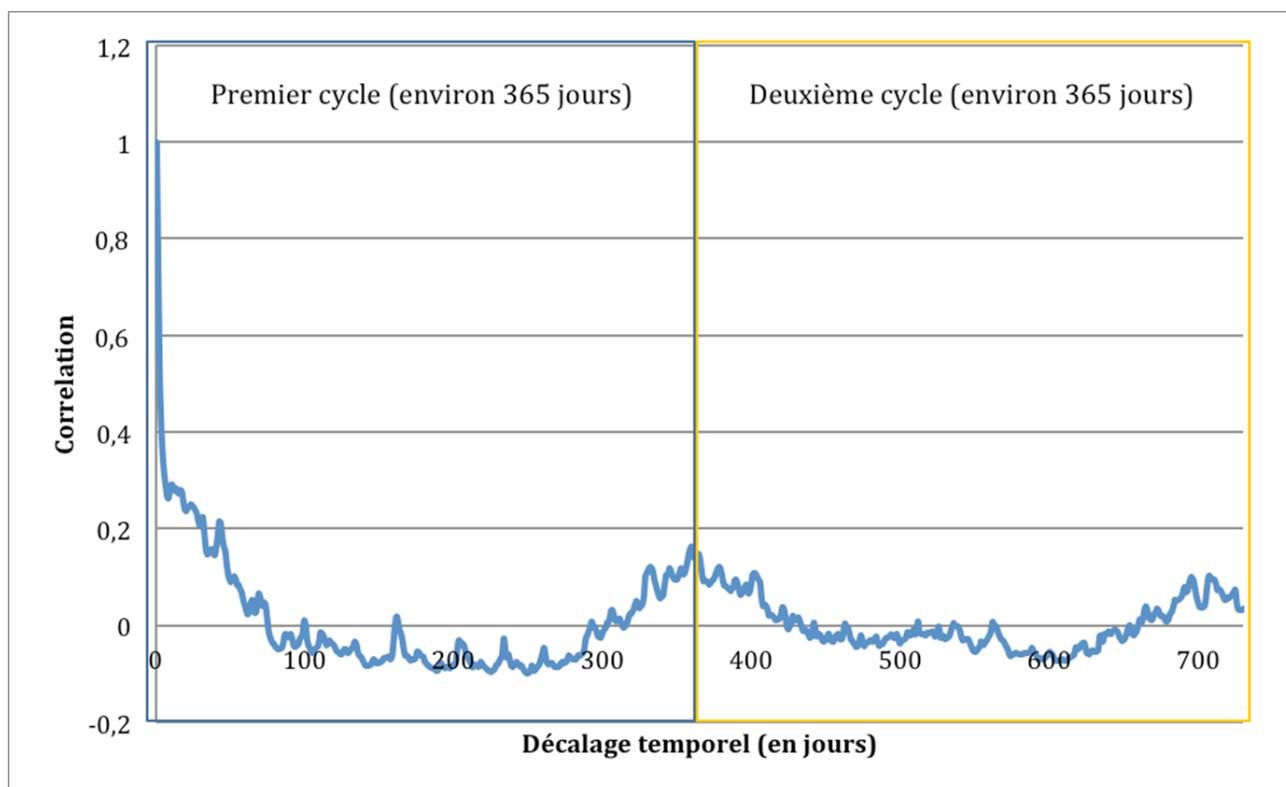


Figure 29 : Fonction d'autocorrélation des hauteurs d'eau mesurées par la station de Bagnols de 1995 à 2000 ($k = 370$, $n = 1292$).

Si l'on effectue le calcul des corrélations pour l'ensemble de la chronique considérée, on met en évidence la périodicité du cycle annuel (Figure 29). Il est donc recommandé [Kong-A-Siou, 2011] de réaliser les calculs de corrélation sur une durée qui dépend de l'information qui est recherchée. Comme ce travail porte sur l'évolution de la hauteur d'eau au cours de l'année nous avons donc réalisé les calculs de corrélation sur une année complète, pour chaque année de la base de données. Classiquement, l'effet mémoire est obtenu en utilisant la moyenne des effets mémoires obtenus pour chaque année. Cependant, pour les signaux hydrologiques qui ne correspondent pas du tout à une répartition gaussienne [Johannet, 2011], il est connu que la moyenne ne constitue pas un bon estimateur de l'espérance mathématique. Nous avons donc proposé d'adapter cette méthode en utilisant un autre estimateur de l'espérance mathématique plus robuste que la moyenne : la médiane.

VII.3.2. Autocorrélations

Tableau 6 : Tableaux récapitulatif des informations obtenues par autocorrélation.

	Pluviométries	Hauteurs d'eau
	Moyenne / Médiane	Moyenne / Médiane
La croix Berthel	1 / 1	X
Malons	1 / 1	X
Sénéchas	1 / 1	44 / 44
Bessèges	1 / 1	26 / 28
Banne	X	7 / 6
Les Mages	X	28 / 20
Tharoux	1 / 1	18 / 16
Montclus	1 / 1	22 / 19
La Roque sur Cèze	X	33 / 32
Bagnols sur Cèze	1 / 1	19 / 18
Chusclan	X	10 / 5

En utilisant la méthode précédemment décrite, les autocorrélations des hauteurs d'eau de toutes les stations disponibles sur le bassin (Tableau 6) sont effectuées et les résultats obtenus par l'interprétation des courbes sont regroupés dans le Tableau 6.

On peut noter que dans le cas de l'autocorrélation des pluviométries, le fait d'utiliser la médiane ou la moyenne n'entraîne pas de différence notable de l'effet mémoire. En revanche, pour l'autocorrélation de la hauteur d'eau, la valeur de l'effet mémoire estimée par la médiane ou la moyenne peut atteindre une différence maximale de 8 jours pour la station de Les Mages. Nous choisirons d'utiliser les médianes pour l'analyse des effets mémoire présentée ci-dessous.

Les effets mémoire relatifs à la pluie sont tous égaux à 1 jour qui est la durée d'échantillonnage. Ceci confirme que la pluie se comporte presque comme un bruit blanc : elle est très peu corrélée à elle-même dans le temps.

Pour les hauteurs d'eau, excepté la station de Sénéchas dont nous discuterons ci-après (impact du barrage), on note que les effets mémoire sont globalement plus commandés par les caractéristiques locales du bassin que par un comportement général bien connu selon lequel les effets mémoire augmentent depuis l'amont vers l'aval.

Tout d'abord, la station de Bessèges possède un effet mémoire de 28 jours. Ce dernier est vraisemblablement dû à un couplage entre l'importante superficie en amont de cette station et sa géologie d'aquifère fissuré. L'eau doit parcourir une grande distance, suivant sa position, avant de

pouvoir atteindre cette station et ainsi, les terrains en amont de Bessèges jouent un rôle de stockage en ralentissant la progression de l'eau apportée par les précipitations.

La station de Banne elle, présente un effet mémoire beaucoup moins important (6 jours), due à une forte densité de drainage. Ainsi, l'eau précipitée atteint rapidement un cours d'eau et n'est pas stockée pendant une longue période. La station de Banne est relative à un affluent de la Cèze. On ne peut donc directement comparer son effet mémoire à ceux des stations de la Cèze. La station de Les Mages est également située sur un affluent ; elle présente un fort effet mémoire (20 jours).

Pour Tharoux, on observe un effet mémoire plus faible que la station de Bessèges (16 jours). Nous pensons que cette diminution est due à la présence des pertes en amont de Tharoux. Une partie de l'eau s'infiltrerait directement dans l'aquifère.

On observe ensuite une augmentation de l'effet mémoire lorsque l'on se dirige vers la station de Montclus (19 jours), puis de la-Roque-sur-Cèze (32 jours). Cette forte augmentation transcrit autant l'augmentation du bassin d'alimentation que le ralentissement des écoulements dû au parcours important des eaux souterraines dans le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap (exurgences situées entre Montclus et la-Roque-sur-Cèze).

Par la suite, la rivière s'écoule sur une zone alluvionnaire où la présence de l'agriculture est plus importante. On assiste alors au niveau de la station de Bagnols-sur-Cèze à une diminution de l'effet mémoire (18 jours) causé par l'influence de l'activité humaine puisant dans la nappe pour les besoins importants en eau de l'agriculture. Cet effet est amplifié pour la station de Chusclan dont l'effet mémoire diminue également (5 jours).

Pour finir, il est intéressant d'observer l'effet mémoire obtenu au niveau de la station de Sénéchas pour laquelle on retrouve l'effet mémoire le plus important de tout le bassin versant de la Cèze (44 jours). Ce dernier retranscrit donc bien la fonction de stockage du barrage.

VII.3.3. Corrélations croisées

Après avoir effectué les corrélations croisées en utilisant la méthode décrite dans le paragraphe VII.2.2, les informations obtenues (corrélation maximale, temps de réponse et effet mémoire) sont répertoriées dans les Tableaux 7, 8 et 9.

Tableau 7 : Maximums de corrélation obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.

	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharoux P	Montclus P	Bagnols P
Sénéchas H	0,04	0,04	0,06				
Bessèges H	0,54	0,55	0,51	0,49			
Banne H	0,55	0,62	0,66				
Les Mages H	0,53	0,53	0,63	X			
Tharoux H	0,59	0,62	0,54	0,58	0,51		
Montclus H	0,54	0,53	0,56	0,57	0,52	0,48	
Roque H	0,50	0,53	0,48		0,49	0,43	
Bagnols H	0,54	0,62	0,59	0,59	0,54	0,48	0,29
Chusclan H	0,55	0,67	0,67		0,59	0,47	0,41

Dans l'ensemble, la valeur maximale des corrélations croisées varie entre 0,5 et 0,6 ce qui est assez faible ; le bassin a donc une relation hydrologique assez complexe. Si l'on met en relation ces corrélations avec l'effet mémoire obtenu par autocorrélation pour chaque station de hauteur d'eau, on note que les variations sont opposées. Lorsque l'effet mémoire augmente, la corrélation diminue et inversement. Notre interprétation est la suivante : plus le stockage est important, plus les hauteurs d'eau sont influencées de manière complexe par les pluies. Par conséquent, un pic de pluie ne correspond pas

forcément à un pic de hauteur et induit donc une corrélation plus faible que lorsque cette relation est simple et directe.

Comme précédemment, le barrage de Sénéchas a présenté des résultats atypiques. La corrélation n'atteint jamais une valeur de 0,2. Nous l'expliquons par le fait que le barrage possède une plus forte influence que le système hydrogéologique à son amont. Ainsi, c'est le fonctionnement du barrage qui est représenté dans ce corrélogramme. Il n'est donc pas possible d'obtenir des informations sur le système hydrogéologique avec les corrélogrammes des hauteurs d'eau relevées à Sénéchas.

Si l'on considère les temps de réponse présentés dans le Tableau 8. Les données issues de la corrélation des hauteurs d'eau mesurées à Sénéchas ne sont pas répertoriées car le coefficient de corrélation est trop faible pour que l'on puisse tenir compte des observations effectuées.

Tableau 8 : Résumé des décalages temporels obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.

Hauteur/pluies	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharoux P	Montclus P	Bagnols P
Bessèges H	1	0	0	0			
Banne H	0	0	0	X			
Les Mages H	0	0	0				
Tharoux H	1	1	1	1	1		
Montclus H	1	1	1	1	1	1	
Roque H	1	1	1	X	1	1	
Bagnols H	1	1	1	1	1	1	1
Chusclan H	1	1	1	X	1	1	1

On voit que les temps de réponse se divisent en deux parties. Les stations se trouvant dans les parties amont et médiane du bassin versant (entre La Croix-de-Berthel et Tharoux) présentent un décalage temporel de 0 jour. Pour la partie aval (de Tharoux jusqu'à la confluence avec le Rhône), le décalage temporel atteint 1 jour. Il existe une exception au niveau de la corrélation entre les pluviométries relevées à La Croix-de-Berthel et les hauteurs d'eau mesurées à Bessèges (où le temps de réponse atteint 1 jour). Cette différence s'explique par l'éloignement important entre ces deux stations.

Pour finir, les temps de corrélation (ou effet mémoire) sont résumés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Résumé des temps de corrélations obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.

	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharoux P	Montclus P	Bagnols P
Bessèges H	5	4	5	4			
Banne H	3	4	4	X			
Les Mages H	3	3	4				
Tharoux H	4	4	4	4	3		
Montclus H	5	4	4	4	4	3	
Roque H	6	5	5	X	5	4	
Bagnols H	5	4	4	4	4	3	3
Chusclan H	4	4	4	X	3	3	2

On observe ici, un fonctionnement identique au fonctionnement décrit précédemment. L'effet mémoire diminue lorsque l'on passe de Bessèges à Tharoux à cause de l'influence des pertes. Ensuite on observe une ré-augmentation de ce dernier en arrivant à la station de La Roque sur Cèze dû à l'apport d'eau en provenance du karst de Méjannes-le-Clap via les résurgences et exurgences. Puis, on observe une diminution pour les deux stations situées sur la partie finale de la Cèze causée vraisemblablement par les prélèvements pour l'activité agricole de la zone.

VII.3.4. Conclusion sur les corrélations.

Cette première analyse des corrélations a permis de mettre en évidence la complexité du fonctionnement du bassin versant de la Cèze. Tout d'abord, les corrélations n'augmentent pas comme cela est généralement attendu, de l'amont vers l'aval, mais suivent des variations non monotones résultant des contributions variables entre les eaux souterraines, les eaux de surfaces et les prélèvements anthropiques.

Ces éléments questionnent donc le fonctionnement du bassin de surface autant que souterrain et il est nécessaire de rechercher maintenant des liens avec la géologie, la topographie et les pratiques anthropiques afin de valider nos hypothèses d'explications.

VII.4. Perspectives

Les perspectives de ce premier travail sont multiples ; comme indiqué précédemment il est nécessaire de collecter des éléments physiques sur le bassin pour valider ou invalider les hypothèses de fonctionnement établies pour expliquer les évolutions atypiques des corrélations le long de la rivière. Egalement les valeurs des temps de réponse et des effets mémoire seront utiles pour dimensionner le modèle pluie-débit destiné à simuler et prévoir les évolutions de la hauteur d'eau à la station de Tharoux. Ces travaux ont d'ores et déjà débutés mais ne sont pas encore finalisés ; ils seront donc présentés dans une prochaine version de ce rapport.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Bilan général

L'année 2013 de par sa nature prospective a permis de poser les bases de la méthodologie en réalisant des tests de plusieurs méthodes (ou approches). Les retours d'expériences de ces tests ont permis d'améliorer les protocoles pour une acquisition de données optimisée (thermie, géochimie, jaugeages différentiels et biologie) et ont permis d'identifier de nouvelles actions à mener pour 2014 (suivi en continu des débits des sources et de la rivière) et 2015 (isotopes et radioéléments). Comme les résultats sont actuellement en cours d'acquisition, il est, à ce stade, difficile de statuer de manière définitive sur les relations karst – rivière. Comme il a été vu précédemment, les différentes approches développées au cours de ce projet, permettent d'obtenir des résultats qui ne sont pas forcément tous en lien direct avec la compréhension des échanges karst – rivière.

Ainsi, cette conclusion provisoire se concentre d'avantage sur l'aspect méthodologique que sur les résultats et l'amélioration de connaissances propres au terrain d'étude. Ainsi, elle a pour objectif d'illustrer comment les résultats combinés de chacune des approches (traçages artificiels, thermie, biologie, géochimie, hydrologie et métrologie) permettent de tendre vers une meilleure compréhension des relations karst – rivière, préalable indispensable à une modélisation adaptée des relations pluies – débits.

En effet, pour alimenter les modèles pluies – débits, que ça soit pour la rivière ou les sources, il est nécessaire de disposer de données de débits mesurés en quantité et en qualité suffisante (approche hydrologique) et de suivre l'évolution de ces débits dans le temps (approche métrologique). Il est par ailleurs indispensable de connaître l'extension des bassins versant en relations avec les exutoires (approche par traçages artificiels et prédétermination à partir de l'étude du contexte géologique) ainsi que d'estimer la quantité d'eau précipitée sur ces derniers (suivi des précipitations sur 4 pluviomètres).

Cependant, pour être pleinement efficaces, ces types de modèles pluies – débits requièrent une connaissance et une compréhension spatiale et temporelle des relations karst – rivière. Cette caractérisation des échanges karst – rivière constitue l'objectif principal des différentes approches. L'articulation de ces approches les unes par rapport aux autres, forme la base de la méthodologie.

Le Tableau 10 ci-dessous, présente succinctement les principaux résultats des différentes approches, en termes de caractérisation des relations karst - rivière. De plus, ce tableau illustre les relations (comparaison et/ou complémentarité) qui peuvent exister entre ces différentes approches.

Le paragraphe suivant, propose une explication détaillée du Tableau 10 et traite, sous forme d'exemples, des liens qui peuvent exister entre les différentes approches pour tendre vers une meilleure compréhension des hydrosystèmes karstiques complexes.

Tableau 10 : Ebauche du principe de la méthodologie **EVEREST – K2** (Evaluation des Volumes Echangés entre Rivières et Eaux SouTerraines en milieu **Karstique** et pseudo**Karstique**).

Approches	Utilité pour la caractérisation des échanges entre karst et rivière	Exemples de recoupements et complémentarités de résultats entre différentes approches
Thermie et profil longitudinal de conductivité	Identification (voir quantification) des échanges dans le sens karst vers rivière	Comparaison avec biologie et jaugeages différentiels pour les échanges dans le sens karst vers rivière ; aide à l'échantillonnage géochimique et biologique ; représentativité des jaugeages ?
Biologie	Identification des échanges karst – rivière dans les deux sens et estimation qualitative (ou semi-quantitative) de l'intensité des échanges.	Permet de recouper les informations avec jaugeages en rivière pour identifier les zones de gains ou de pertes de débit
Géochimie (ions majeurs)	Origines, mélanges des eaux, proportion de recyclage et évolution temporelle	Relations avec la géologie pour l'origine des eaux et les traçages pour corroborer les aires d'alimentation et le recyclage
Traçages artificiels	Relations entre aires d'alimentations/sources et relations entre pertes/sources	Compatibilité avec l'agencement des formations géologiques
Géologie	Prédétermination des limites de partage des eaux, des potentielles relations entre aquifères et du développement de la karstification profonde	Relation avec les résultats de l'approche par traçages artificiels et les explorations spéléologiques
Hydrologie et métrologie	Quantifier les pertes et les gains (sources) de débits de la rivière et leur évolution dans le temps	Recouper les informations avec les zones d'alimentations Alimente en données l'approche par modélisation pluies-débits
Modélisation	Relations Pluies - Débits et prédiction des impacts selon des scénarios de prélèvements	Cohérence entre débits simulés et surfaces des aires d'alimentation obtenues par traçages ; Utilisation des débits et des précipitations mesurées (approches hydrologique et métrologique)

Vers une caractérisation des hydrosystèmes karstiques complexes :

Pour la période de juillet 2013, l'analyse du profil longitudinal de conductivité et de température couplée à celle des images thermiques aéroportées a permis, d'une part, la mise en évidence des aires de drainages karstiques (sources ponctuelles et diffuses), d'autre part, d'optimiser l'échantillonnage géochimique et biologique des eaux de la rivière et des sources mais aussi d'identifier les tronçons stratégiques de rivière à jauger (bilans entrées/sorties par tronçon). Par ailleurs, grâce à ces informations nouvellement acquises, il a été possible de corroborer et compléter l'inventaire des sources existantes (nouvelle source identifiée de l'Ilette). Toutefois, le profil longitudinal et la thermie ne permettent qu'une vision unilatérale des écoulements dans le sens karst vers rivière.

La biologie, sur la base des informations apportées par les analyses physico-chimiques des eaux interstitielles et par les organismes hyporhéiques, a permis de mettre en évidence les échanges réciproques entre karst et rivière sur un secteur comprenant l'amont des gorges (Tharaux) à la source de Monteil pour la période de juillet 2013. Ces échanges, déduits par l'approche biologique, sont

corroborés par la thermie et le profil de conductivité dans le sens karst vers rivière (gain de débit par les sources) et confirmés par la bibliographie (notamment [Guyot, 1981] et [BRLi, 1995]) dans le sens rivière vers karst (pertes de Rochegude et Baume Salène). Cependant, cette vision est statique dans le temps et n'est représentative que de la période de moyennes eaux de juillet 2013.

La géochimie, par l'analyse en ions majeurs des eaux de sources, rivière et affluents, a permis, d'une part, d'identifier l'origine géologique des eaux (aires d'alimentation des sources et aires de drainages de la rivière), d'autre part, de confirmer la localisation et la proportion des apports karstiques par effet de mélange. La géochimie a aussi et surtout permis d'apporter d'avantages de précision sur les phénomènes de recyclage des eaux de pertes de la rivière vers les sources (Foulatier, Fond Canet, Monteil, les Baumes et Moulin) en estimant la proportion d'alimentation de certaines sources par la rivière. Le traçage des pertes de la rivière, prévu cet été 2014, devrait permettre de préciser de manière plus quantitative (temps de transfert et bilan de masse) les résultats obtenus par la géochimie sur le recyclage des eaux de la Cèze par les sources.

Par ailleurs, l'échantillonnage géochimique ayant été réalisé au cours de la décrue entre avril et septembre, il a été possible de suivre l'évolution chimique des eaux des sources et de la rivière et indirectement de caractériser le basculement du sens des échanges entre karst et rivière (par exemple, la source des Fées qui est temporairement alimentée par la Cèze).

La mise en commun des résultats des traçages (historiques et actuels) ainsi que l'analyse du contexte géologique permettra de mieux définir les relations entre les aires d'alimentation et les sources mais aussi de mieux contraindre les limites des écoulements souterrains au Sud comme au Nord du terrain d'étude (limite de partage des eaux souterraines).

En tenant compte des approches biologiques et géochimiques, des jaugeages différentiels en rivière ont permis de quantifier les pertes et les gains de débits d'amont en aval des gorges et permettront, au cours de la décrue de l'année 2014 jusqu'à l'étiage, de comprendre comment évoluent les gains et les pertes tout au long du linéaire de la Cèze. De la même façon, des jaugeages des sources sont assurés sur la même période.

En parallèle de ces jaugeages un suivi en continu des hauteurs/conductivités et températures est assuré par des sondes CTD qui ont été disposées au niveau des sources et de la rivière. Ainsi, les débits mesurés lors des campagnes de jaugeages ponctuelles (approche hydrologique) pourront être positionnés par rapport à l'évolution générale des chroniques de hauteurs et serviront à l'élaboration des courbes de tarage. Ces suivis en continu de débits, de températures et de conductivités, permettront de mieux appréhender les transferts d'eau et le basculement des échanges entre les deux milieux (souterrain et superficiel). Par ailleurs, les chroniques de débits ainsi que les données des pluviomètres permettront d'alimenter (apprentissage et calage) l'approche par modélisation (réseaux neuronaux) pour constituer des relations pluies/débits.

Une réflexion plus générale sur la quantité et la pérennité des réserves souterraines, pourra être échafaudée en combinant les informations sur les typologies géochimiques et hydrodynamiques des sources mais aussi en confrontant l'analyse de la karstification profonde et les explorations spéléologiques dans les sources (Marnade, Monteil, Vanmâle, Fées, Fond Canet, etc.). Cette réflexion pourra permettre de définir les potentialités d'exploitation par forages dans le karst en minimisant les impacts sur les écoulements superficiels. Des fiches synthétiques sur les grandes caractéristiques des différentes sources sont actuellement en cours d'élaboration. Un exemple de ces fiches est présenté en Annexe 15.

Perspectives pour l'année 2015

Le paragraphe proposé précédemment n'est qu'une ébauche de réflexion sur les relations entre les résultats existants et les résultats en devenir. Il sera nécessaire d'engager un travail avec les différents partenaires, sur une manière plus structurée d'envisager les liens entre les approches constituant la méthodologie. En effet, l'intérêt de la démarche ne se fonde pas uniquement sur les résultats issus des différentes approches utilisées séparément mais réside aussi dans la prise en compte de la complémentarité et de l'analyse croisée de ces approches (thermique, hydrogéochimique, biologique,

métrologique, géologique, hydrologique, traçages artificiels, radioéléments, isotopes et modélisation mathématique). Il conviendra par ailleurs, d'analyser les points de convergence et de divergence des résultats issus des différentes approches. Du point de vue méthodologique, il faudra formaliser l'ordonnement des approches pour optimiser l'effort de terrain vis-à-vis de la compréhension de l'hydrosystème. Cette dernière étape permettra de mieux cerner le fonctionnement du système karstique et les relations karst-rivière. Cette meilleure connaissance de l'hydrosystème permettra de tendre vers une gestion durable et équilibrée de la ressource en eau. Enfin, une réflexion sera engagée sur la manière de généraliser la méthodologie de caractérisation des échanges karst-rivière à d'autres bassins versants en domaine karstique.

Pour l'année 2015, un effort particulier sera alloué aux modélisations pluies - débits. Il sera notamment question de finaliser l'étude des débits de la Cèze à ses différentes stations :

- travailler sur les chroniques de débits acquises au cours de ce projet,
- réfléchir à la manière de concaténer les données de débits du projet et les données publiques,
- effectuer l'analyse multirésolution sur les données issues de la modélisation RN lorsque cela est possible,
- appliquer la méthode des débits classés afin de vérifier s'il est possible de mettre en évidence les non linéarités dues aux échanges karst - rivière.

Par ailleurs, profitant de l'expérience acquise en 2014, il est envisageable :

- de démarrer l'application de la méthode neuronale afin d'extraire du modèle des proxies permettant d'identifier le type de comportement en présence,
- d'étudier les conditions d'acquisition des images radar afin de disposer de pluies spatialisées sur le plateau de Méjannes-le-Clap (Calamar ou Panthere).

En complément des approches mises en œuvre en 2013 et 2014, d'autres méthodes ont par ailleurs été identifiées pour préciser certaines hypothèses sur l'origine des eaux (isotopes du Soufre) et appuyer certains résultats sur les échanges dans le sens karst vers rivière (radon - radioéléments).

L'approche hydrogéochimique, par analyses en ions majeurs et éléments traces, réalisée en 2013, a permis de définir une typologie chimique des sources. Cependant, pour les sources dites « sulfatées », il n'a pas été possible de discriminer l'origine de ce sulfate (formations du Trias ? de l'Oligocène ? du socle cristallin ? des formations marneuses ?). A fortiori, il subsiste des incertitudes sur l'origine des eaux. Pour pallier les limitations liées à l'analyse en ions majeurs seule, les outils isotopiques sont envisageables pour lever certaines incertitudes. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser les isotopes du soufre (^{34}S et ^{32}S). Des prélèvements seront effectués :

- au sein des formations géologiques susceptibles d'alimenter les eaux en sulfates aussi bien dans le bassin d'Alès que sur le plateau calcaire surplombant les gorges (formations marneuses),
- dans le cours d'eau à l'entrée des gorges et en sortie,
- au niveau des sources de rive droite et de rive gauche.

Nous prévoyons de réaliser ces prélèvements à trois reprises au cours de l'année 2015, à hautes, moyennes et basses eaux. Cela représente un total de 150 échantillons.

En parallèle de cela, nous réaliserons un suivi de l'alimentation de la Cèze à l'aide des isotopes de l'eau ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et D/H). Cet outil est susceptible de fournir des informations sur les masses d'eau sollicitées à différentes périodes de l'année en différents points d'alimentation. Le but étant ici d'identifier des approvisionnements plus ou moins profonds et de définir des mélanges d'eau souterrains. Le nombre d'échantillons visé est de 50.

Les paramètres physico-chimiques (pH, T, EC, alcalinité) des échantillons d'eau prélevés seront mesurés sur le terrain et les teneurs en éléments majeurs seront déterminées en laboratoire par chromatographie ionique afin d'obtenir un jeu de données complet et exploitable.

Ce travail de caractérisation isotopique sera assuré par l'Université Jean-Monet (UJM).

En complément, l'EMMAH et le CEREGE propose de tester une approche par radioéléments. Le radon-222 est un radio-isotope naturel gazeux de courte période (3,8 jours). Il est produit dans les eaux de surface par la désintégration de son père radioactif (^{226}Ra) et il montre des valeurs généralement faibles (quelques centaines de Bq/m^3) car il s'échappe relativement vite dans l'atmosphère. Dans les eaux souterraines par contre, les activités sont nettement plus élevées car le radon est contenu et produit à partir de l'ensemble des minéraux qui constitue la roche encaissante : les activités atteignent généralement plusieurs milliers de Bq/m^3 .

Lorsque des eaux souterraines émergent en surface, quel que soit le type d'émergence (ponctuel ou diffus), l'analyse du ^{222}Rn permet de mettre en évidence ces apports, qui se traduisent par une augmentation des activités au niveau et en aval d'émergence. Grâce à sa forme chimique gazeuse et sa courte période, la diminution en aval peut être assez rapide. Le signal radon n'est pas conservatif, il n'y a pas d'augmentation des teneurs longitudinalement et chaque apport doit pouvoir être quantifié sans effet mémoire.

L'établissement d'un bilan à l'état stationnaire du ^{222}Rn dans la Cèze sur une portion délimitée permettra de définir les flux entrants (apports d'affluents, diffusion du sédiment, ...) et sortants (décroissance du signal et départ vers l'atmosphère). La détermination de tous ces flux permettra d'évaluer le flux issu des eaux souterraines. Il est nécessaire de mesurer les activités de ^{222}Rn dans les eaux souterraines en parallèle, pour convertir le flux de ^{222}Rn en flux d'eau (m^3/s).

Une telle approche a été largement utilisée pour travailler sur les échanges d'eaux en zone côtière, mais commence tout juste à être adaptée pour les études en rivières. Si la quantification des apports peut se révéler encore difficile, leur mise en évidence à partir d'augmentation des activités dans la rivière est actée et a déjà été réalisée à grande échelle.

Une phase de tests est prévue en 2014 pour démontrer la faisabilité des deux méthodes (isotopique et radioéléments) appliquées au contexte karstique. Si les résultats des phases de tests sont concluants, les campagnes d'échantillonnage complètes seront lancées en 2015.

BIBLIOGRAPHIE

Bailly-Comte V., Martin J.B., Jourde H., Scream E.J., Pistre S., Langston A., 2010 - Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams. *Journal of Hydrology* 386, 55–66. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.005

Bakalowicz M., 1999 - Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Guide technique n°3., Guide technique num. 3. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Bakalowicz M., 2000 - Protection des ressources en eau karstique et aménagement et gestion du territoire. *La Houille Blanche* 122–126. doi:10.1051/lhb/2000086

Bakalowicz M., 2005 - Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeol J* 13, 148–160. doi:10.1007/s10040-004-0402-9

Bakalowicz M., 2008 - Le milieu karstique : études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource. CFH - Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller, 17p.

Bastide F., 2014 - Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne (Barrémien tardif à Aptien précoce) du Sud-Est de la France : Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries, paléotectonique et géomodélisation. Thèse de doctorat soutenue à l'université de Lausanne et à l'université de Grenoble, 456p.

Belleville L., 1985 - Hydrogéologie karstique: géométrie, fonctionnement et karstogénèse des systèmes karstiques des gorges de l'Ardèche (Ardèche, Gard). Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

Besson D., 2005 - Architecture du bassin rhodano-provençal miocène (Alpes, SE France). Relations entre déformation, physiographie et sédimentation dans un bassin molassique d'avant-pays. Paris, ENMP.

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 fluvial 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

Bou C., Rouch R., 1967 - Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine. *Compte Rendus de l'Académie des Sciences*, 265: 369-370.

Boulvain F., 2014 - Dynamique des bassins sédimentaires. Université de Liège.

Bourrouilh-Le Jan, F., 1998 - The role of high-energy events (hurricanes and/or tsunamis) in the sedimentation, diagenesis and karst initiation of tropical shallow water carbonate platforms and atolls. *Sedimentary Geology* 118, 3–36. doi:10.1016/S0037-0738(98)00003-7

BRGM, Carte géologique de la France 1/50^{ième} - Bourg-Saint-Andéol.

BRGM, Carte géologique de la France 1/50^{ième} - Pont-Saint-Esprit.

BRLi, 1995 - Ministère de l'agriculture, Conseil Général du Gard, SADTPC, 1995. Etude préalable aux équipements hydrauliques.

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.

Bunis H., 1972 – Pompage à l'exurgence des Buissières , Bulletin CDS 30 n°17, p 1 à 3

Caetano Bicalho C., Batiot-Guilhe C., Seidel J.L., Van Exter S., Jourde H, 2012 - Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer. *Journal of Hydrology* 450-451 (2012) pp 206-218.

Cavalera T., 2007 - Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port-Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère. Université de Provence-Aix-Marseille I.

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.

Clauzon G., 1978 - The Messinian Var canyon (Provence, Southern France)—paleogeographic implications. *Marine Geology* 27, 231–246.

Clauzon G., 1996 – Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie*, n°1, p. 3-22.

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

Delannoy J.-J., Gauchon C., Jaillet S., 2007 - L'Aven d'Ornac, valorisation touristique, apports scientifiques.

Fabre G., 1972 - Les Garrigues Septentrionales du Gard. Étude de géomorphologie karstique. Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Montpellier, 198 p.

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

Floquet M., 2006 - Cours de Géologie "Géologie de la France" ou les bassins sédimentaires, les chaînes de montagnes et le volcanisme de France. Université de Provence, Cours de Licence 3 et de Master 1, Biologie générale - Environnement - Sciences de la Terre (B.G.E.T.), 64 p.

- Ford D.C., Williams P.W., 1989 - Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman London.
- Gèze B., 1973 - Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. Centre National de la Recherche Scientifique.
- Gilli É., 2011 - Karstologie-Karsts, grottes et sources: Karsts, grottes et sources. Dunod.
- GSBM, 1994 - L'aven du Solitaire. Bulletin GSBM (Groupe Spéléo Bagnols - Marcoule), 15, p. 25-31.
- Guyot J.L., 1981 - La coloration du système Baume Salène - Résurgence du Moulin (Montclus, Gard). Bulletin du Groupe Spéléo Bagnols Marcoule, 9: 30-34.
- Guyot J.L., 1986 - Etude hydrogéologique des BAUMES - Bulletin (Groupe Spéléo Bagnols - Marcoule), 12, p 59 - 76
- Huneau F., 2000 - Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (Sud-Est de la France). Thèse de doctorat soutenue à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 206p.
- Jenkins G., Watts Don., 1968 - Spectral Analysis and Its Applications, Holden-Day.
- Johannet A., Ayral P.A., Vayssade B., 2007 - Modelling non Measurable Processes by Neural Networks: Forecasting Underground Flow Case Study of the Céze Basin (Gard - France), in: Elleithy, K. (Ed.), Advances and Innovations in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. Springer Netherlands, pp. 53-58.
- Johannet A., 2011. Modélisation par apprentissage statistique des systèmes naturels, ou en interaction avec un environnement naturel. Applications aux karsts, crues éclair et en robotique. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Université Pierre et Marie Curie.
- Jolivet J., 1984 - Baume Salène. Bulletin du Comité Départemental de Spéléologie du Gard, 25, p. 47
- Jolivet J., Martin C., 2008 - La morphologie karstique dans le canyon de la Cèze et sur le plateau de Méjannes-le-Clap (Garrigues nord, Gard, France) - Rapports avec l'évolution paléogéographique miopliocène. Physio-Géo 2, 53-75.
- Jolivet J., 2011 - Comparaison de l'évolution endokarstique du réseau de Camélié avec le creusement des canyons de l'Aiguillon et du Merderis (Bassin de la moyenne vallée de la Cèze, Gard, France). Etudes de Géographie Physique 43-54.
- 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, Canyon de la Cèze, Gard, France. Spelunca 27-34.
- Kong A Siou L., Johannet A., Borrell V., Pistre S., 2011 - Complexity selection of a neural network model for karst flood forecasting: The case of the Lez Basin (southern France). Journal of Hydrology 403: 367-380.

Lalot, E., 2014 - Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières - Application au Rhône. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 367p.

Lee D. R., Cherry J. A., 1978 - A field exercise on groundwater seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education*, 27: 6-10.

Mangin, A., 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique.

Mangin, A., 1984 - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of Hydrology* n°67, pp 25 - 43.

MARNADE, 2009 - Source de Marnade.

Site internet : www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm

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.

Mocochain L., Audra P., Clauzon G., Bellier O., Bigot J.-Y., Parize O., Monteil P., 2009 - The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: Example of the Lower Ardèche river (mid Rhône valley). *Geomorphology* 106, 46–61.

Mocochain L., Clauzon G., Bigot J.-Y., Brunet P., 2006 - Geodynamic evolution of the peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: evidence from the Ardèche and Rhône Valley systems canyons, Southern France. *Sedimentary Geology* 188–189, 219–233. doi:10.1016/j.sedgeo.2006.03.006

Nicod J., 1972 - Pays et paysages du calcaire. Presses universitaires de France.

Paran F., Arthaud F., Bornette G., Graillet D., Lalot E., Marmonier P., Novel M., Piscart C., 2012 - Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau. plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport final phases 4 Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Peyraube N., Lastennet R., Denis A., 2012 – Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of karstic massif, using the PCO₂ – Sic relationship. *Journal of Hydrology* 430 – 431 (2012) p13 – 24.

Pouzancré 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.

Ré-Bahuaud J., Jolivet J., Paran F., Chapuis H., Guy B., Graillet D., 2014 - Caractérisation hydrogéochimique et thermique des échanges entre karst et rivières : cas d'un affluent du Rhône, la Cèze au niveau du plateau karstique de Mejanne-le-clap. Colloque E3D, Ecole des Mines d'Alès.

Salomon J.-N., 2006 - Précis de karstologie. Presses universitaires de Bordeaux, Pessac (Gironde).

Schudel B., Biaggi D., Dervey T., Kozel R., Müller 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 87p.

SCSP, 1982 - Les cavités majeures de Méjannes-le-Clap. Édité. Société Cévenole de Spéléologie et de Préhistoire d'Alès (SCSP), 2 tomes, 96 et 144 p.

Vail P.R., Colin J.-P., Chene R.J.D., Kuchly J., Mediavilla F., Trifilieff V., 1987 - La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du bassin de Paris. Bull. Soc. géol. France 1301–1321.

Vasseur F., 2007 – Système Fées - Grégoire.

Site internet : www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm

Vignoles D., L.Chalvet., 2009 - Source de Monteil.

Site internet : www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm

Wawrzyniak V., 2012 - Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône. Thèse de doctorat soutenue à l'Université Jean Moulin Lyon III, 171p.

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET CARTES

Liste des figures

Figure 1: Paysage karstique [Bakalowicz, 1999].	9
Figure 2 : Rosace tectonique de l'ensemble du bassin versant de la Cèze	20
Figure 3 : Rosace tectonique de la zone étudiée (plateau karstique de Méjannes-le-Clap).	20
Figure 4 - Dispositif embarqué de mesures du profil longitudinal de la Cèze incluant la géolocalisation ainsi que la température et la conductivité de l'eau de la rivière (Juillet 2013).	42
Figure 5 : Schéma de principe des jaugeages différentiels pour l'estimation des échanges entre karst et rivière.	43
Figure 6 : Profil longitudinal géométrique de la rivière Cèze.	47
Figure 7 : Profil longitudinal (amont/aval) de conductivité et de température de la rivière Cèze.	48
Figure 8 : Résultats de jaugeages des principales sources durant la décrue de 2014.	49
Figure 9 : Résultats de jaugeages de 4 tronçons de la Cèze durant la décrue de 2014.	50
Figure 10 : Exemple de suivi des hauteurs / conductivités et températures pour deux sections de la Cèze (amont et aval).	51
Figure 11 – Exemple de problème lié au rayonnement solaire pour la campagne du 13/04/13.	57
Figure 12 – Profil thermique de la rivière issu de la mosaïque IRT de la campagne du 13/04/13.	58
Figure 13 – Exemple de contraste de température faible (moins de 2°C) et de contraste de débit fort (débit de la Cèze environ 25 fois supérieur à celui de la source des Fées) entre les eaux de la Cèze et les eaux de la source des Fées.	59
Figure 14 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source des Fées en entrée des gorges (entre les points kilométriques 5 et 5,5). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).	61
Figure 15 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de Monteil (entre les points kilométriques 16,5 et 17). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).	63
Figure 16 : Image IRT du 08/07/13 au niveau de la source de l'Ilette (entre les points kilométriques 17,5 et 18). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 27,5°C ont été supprimées (correspond à la végétation et aux bancs de galets).	64
Figure 17 : Caractéristiques de l'ACP en ions majeurs de juillet 2013.	69
Figure 18 : ACP réalisée sur les analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la campagne de juillet 2013.	71
Figure 19 : Caractéristiques de l'ACP en ions majeurs de septembre 2013.	72
Figure 20 : ACP réalisée sur les analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques lors de la campagne de septembre 2013.	73
Figure 21 : Caractéristiques de l'ACP sur l'ensemble des analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la période d'avril à septembre 2013 (jeu de données incomplet).	74

Figure 22 : ACP réalisée sur l'ensemble des analyses en ions majeurs des échantillons de la Cèze et des sources karstiques pour la période d'avril à septembre 2013 (jeu de données incomplet).	76
Figure 23 : Sources affectées en permanence par le recyclage eaux de la Cèze (Juillet et Septembre 2013).77	77
Figure 24 : Localisation des 18 bancs de galets échantillonnés en juillet 2013 pour l'étude des eaux et de la faune interstitielle de la Cèze. Les numéros correspondent au code des stations.	80
Figure 25 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles de la Cèze mesurées dans les 18 bancs de galets étudiés en 2013 (en abscisse : n° des bancs).	82
Figure 26 : Cartographie des zones d'échange rivière-nappe dans les gorges de la Cèze. Hypothèses de circulation des eaux obtenues à partir des mesures de juillet 2013 (les ? indiquent les stations où toutes les données ne sont pas encore analysées).	85
Figure 27 : Fonction d'autocorrélation de la hauteur d'eau mesurée à Bagnols-sur-Cèze.....	88
Figure 28 : Fonction de corrélation croisée entre la pluviométrie relevée à la Croix-de-Berthel et la hauteur d'eau mesurée à Tharoux.	89
Figure 29 : Fonction d'autocorrélation des hauteurs d'eau mesurées par la station de Bagnols de 1995 à 2000 (k = 370, n = 1292).	90

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des injections de traceurs réalisées entre mars et mai 2014.....	37
Tableau 2 - Valeurs mesurées, estimées et inconnues à la date du 08/07/13.	62
Tableau 3 : Liste taxonomique des invertébrés interstitiels collectés dans 6 stations de la rivière Cèze en juillet 2013. * taxon stygobie.....	83
Tableau 4 : Caractéristiques des communautés d'invertébrés interstitiels de la Cèze collectés en 6 stations au mois de juillet 2013. Toutes les valeurs sont des moyennes de 3 réplicas de mesure et sont exprimées pour 10L d'eau interstitielle.....	84
Tableau 5: Récapitulatif des données disponibles par stations et par années (1 : données disponibles ; 0 : données indisponibles).....	90
Tableau 6 : Tableaux récapitulatif des informations obtenues par autocorrélation.	91
Tableau 7 : Maximums de corrélation obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.	92
Tableau 8 : Résumé des décalages temporels obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.....	93
Tableau 9 : Résumé des temps de corrélations obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.....	93

Liste des cartes

Carte 1 : Localisation du bassin versant de la rivière Cèze. La zone expérimentale représente le plateau karstique de Méjannes-le-Clap jusqu'à l'Ardèche au Nord et en comprenant les gorges de la Cèze [Images google earth].....	8
Carte 2 : Synthèse cartographique des actions engagées en 2013 et 2014.....	14
Carte 3 : Géologie régionale du bassin versant de la Cèze.....	17
Carte 4 : Contexte géologique de la zone d'étude, les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap.....	19
Carte 5 : Synthèse cartographique des résultats des traçages historiques	34
Carte 6 : Traçages réalisés entre mars et mai 2014	37
Carte 7 : Traçages envisagés pour l'étiage de l'été 2014 et pour l'année 2015	39

TABLE DES MATIERES DES ANNEXES

FICHE SIGNALÉTIQUE	Erreur ! Signet non défini.
Sommaire des annexes	Erreur ! Signet non défini.
Approches par traçages artificiels (1 annexe)	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 1 : Dispositifs permettant d'assurer le suivi de la restitution du traceur ou des traceurs.	Erreur ! Signet non défini.
Approches métrologique et hydrologique par suivi des débits (5 annexes)	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 2 : Profil longitudinal géométrique brute et interprété découpé en trois tronçons.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 3 : Essai d'estimation des débits des sources à partir des gains de conductivité issus du profil longitudinal.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 4 : Historique commenté des débits des sources disponibles avec 2013.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 5 : Tableau de mesure des débits des sources et de la Cèze pour l'année 2013.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 6 : Tableau de mesure de débits des sources engagée en 2014.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 7 : Tableau de mesure de débits de la Cèze engagée en 2014.	Erreur ! Signet non défini.
Approche Thermique par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée (4 annexes)	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 8 : Suivi de la température in-situ lors de l'acquisition des images IRT.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 9 : Images IRT issues de la campagne d'acquisition du 08/07/13.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 10 : Analyse de sensibilité de la température sur l'estimation du débit de la source des Fées.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 11 : Profil de température de la rivière Cèze issu de la mosaïque d'images IRT pour la campagne du 08/07/13.	Erreur ! Signet non défini.
Approche hydrogéochimique par analyse des ions majeurs et de certains éléments traces (3 annexes)	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 12 : Tableaux de résultats d'analyses en ions majeurs et certains éléments traces	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 13 : Graphiques illustrant les concentrations en Chlorures en fonction du ratio Magnésium sur Calcium pour les échantillons des sources karstiques et de la rivière pour les campagnes de juillet et septembre 2013.	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 14 : Graphiques illustrant les ratios Baryum sur Strontium en fonction de la concentration en Silice pour les échantillons des sources karstiques et de la rivière pour les campagnes de juillet et septembre 2013.	Erreur ! Signet non défini.
Conclusions et perspectives (1 annexe)	Erreur ! Signet non défini.
Annexe 15 : Exemple des indications figurant sur les fiches caractéristiques des sources.	Erreur ! Signet non défini.