

**Rapport phase 3 du projet :**

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

Rapport phase 3  
Années 2015-2016

Action n°46  
au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR

UMR 5600 EVS (Environnement, Ville et Société) avec le Département PEG (Procédés pour l'Environnement et les Géoressources) de Mines-Saint-Etienne (Ecole des Mines de Saint-Etienne) avec les contributions de :

- l'ENS (Ecole Normale Supérieure) Lyon, laboratoire Biogéophile ;

- l'UMR 7300 ESPACE (Université Sophia Antipolis) ;

- l'PEMA (Ecole des Mines d'Alès), (Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel et des Risques Industriels et Naturels LGEI) ;

- l'UMR 5023 Université Lyon I (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés LENA)

- l'Université Jean Monnet, Faculté des sciences (Laboratoire Magma et Volcans LMV)

Octobre 2018



## 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* : Octobre 2018

---

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 PEG (Jordan Ré-Bahuaud, Hervé Chapuis, Frédéric Paran et Didier Graillet) ;
- UMR 5023 LEHNA – Université Lyon I – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier, Michel Creuzé des Châtelliers, Marie-José Olivier, Margot Jacquy, Martin Lawniczak et Mathilde Novel) ;
- UMR 7300 ESPACE – Université Sophia Antipolis Nice (Joël Jolivet) ;
- EMA – LGEI (Jordan Ré-Bahuaud et Anne Johannet)
- UJM laboratoire LMV (Véronique Lavastre)

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

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

*Nombres de volumes* : 1

*Nombres de pages* : 235

*Nombres de pages du rapport hors annexes* : 191

*Nombres de pages d'annexes* : 44

*Nombre d'annexes* : 5

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

Ce projet de recherche se déroule en 4 phases sur une durée de 6 années de 2013 à 2019 et est 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 a été soutenu le 12 octobre 2017.

Personnes responsables et référentes :

Pierre Marmonier (UMR-CNRS LEHNA, Université de Lyon) ;  
Bernard Guy et Didier Graillot (PEG, Ecole des Mines de Saint-Etienne) ;  
Sandra Perez et Joël Jolivet (UMR « Espace ») ;  
Anne Johannet (EMA, LGEI) ;  
Véronique Lavastre (UJM).

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 PEG (Procédés pour l'Environnement et Géoressources) 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
- 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 :
  - Hydrosociences Montpellier (S. Pistre), suivi de la thèse associée à l'action ;
- Institutionnel :
  - Syndicat ABCèze (H. Brentegani) : 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).  
Fiche Radon pilotée par l'Univ. Avignon (A. Mayer) et le CEREGE Aix-en-Pce (O. Radakovitch).

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 matières synthétique

---

<b>Introduction</b> .....	<b>6</b>
Site étudié : le canyon de la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap .....	6
Contexte et problématiques.....	8
Méthodologie employée et objectifs .....	9
Récapitulatif des actions réalisées (2013 – 2014) et engagées (2015 – 2016).....	10
<b>PARTIE I – Suivi hydrologique des sources et de la rivière</b> .....	<b>21</b>
I.1. Jaugeages rivière et sources .....	21
I.1.1. <i>Rappel des objectifs</i> .....	21
I.1.2. <i>Résultats de la campagne de 2015</i> .....	22
I.2. Détermination d'une typologie des sources par analyse fréquentielle .....	34
I.2.1. <i>Analyse fréquentielle de la conductivité électrique des sources</i> .....	34
I.2.2. <i>Analyse fréquentielle de la température des sources</i> .....	35
I.3. Analyse du fonctionnement hydrodynamique du karst par la méthode des débits classés.....	37
I.4. Corrélation entre la pluie et le débit de la source d'Ussel .....	38
I.4.1 <i>Analyse corrélatoire simple pour les pluies de Méjannes-le-Clap</i> .....	38
I.4.2. <i>Analyse corrélatoire simple du débit de la source d'Ussel</i> .....	39
I.4.3. <i>Analyse corrélatoire simple du débit de la source Monteil</i> .....	40
I.4.4. <i>Analyse corrélatoire croisée entre les débits des sources Ussel et Monteil avec les pluies de Méjannes-le-Clap</i> .....	40
I.5. Conception et mise en œuvre du modèle par Réseaux neuronaux pour une approche du karst en tant que réservoir de remplissage et/ou de vidange .....	42
I.5.1. <i>Hypothèse initiale de modélisation : reproduire le débit des sources en commençant par celle d'Ussel (source aval déjà équipée)</i> .....	42
I.5.2. <i>Seconde hypothèse : modéliser le comportement de la rivière avec l'apport des débits de la source d'Ussel</i> .....	42
I.5.3. <i>Troisième hypothèse : modélisation du débit de la Cèze à l'aval des gorges à l'aide d'un indice de l'état hydrique du karst</i> .....	43
I.5.4. <i>Quatrième hypothèse : modélisation du comportement karstique vis-à-vis de la rivière</i> .....	44
I.6. Synthèse 48	
I.6.1. <i>Fonctionnements hydrodynamiques</i> .....	48
I.6.2. <i>Perspectives pour l'analyse des suivis hydrologiques</i> .....	51
I.6.3. <i>Lien entre fonctionnement hydrodynamique des sources aval, contexte géologique et géomorphologique (spéléogénèse)</i> .....	52
<b>PARTIE II – Approche par traçages artificiels</b> .....	<b>57</b>
II.1. Objectifs des traçages de 2015 et 2016.....	57
II.2. Synthèse des traçages réalisés en 2015 et 2016 .....	57
II.2.1. <i>Traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rochegude</i> .....	57
II.2.2. <i>Traçage des pertes la source du Garn (commune du Garn, Ardèche)</i> .....	60
II.2.3. <i>Synthèse des résultats de traçages effectués en rive gauche de la Cèze</i> .....	61
II.3. Quid des écoulements au sud du plateau de Méjannes-le-Clap ? .....	63
<b>PARTIE III – Traceurs géochimiques</b> .....	<b>65</b>
III.1. Contexte de l'étude.....	65
III.1.1. <i>Contexte géologique</i> .....	65
III.1.2. <i>Contexte hydrologique et hydrogéologique</i> .....	68
III.2. Les campagnes d'échantillonnage .....	71
III.3. Les traceurs géochimiques utilisés .....	72
III.3.1. <i>Éléments majeurs</i> .....	72

III.3.2. Les isotopes de l'eau .....	73
III.3.3. Les isotopes du soufre des sulfates .....	73
III.3.4. Les isotopes du strontium .....	73
III.4. Les méthodes analytiques .....	74
III.4.1. Les mesures de terrains .....	74
III.4.2. Les ions majeurs .....	74
III.4.3. Les isotopes de l'eau .....	74
III.4.4. Les isotopes du soufre sur les ions sulfates .....	75
III.5. Discussion autour des résultats .....	75
III.5.1. Les éléments majeurs .....	75
III.6. Synthèse générale.....	106
III.6.1. Complémentarité des traceurs géochimiques.....	106
III.6.2. Implications hydrogéologiques .....	107
<b>PARTIE IV – Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée .....</b>	<b>111</b>
IV.1. Campagne d'acquisition 03/09/14.....	111
IV.1.1. Acquisition des clichés IRT .....	111
IV.1.2. Rappel sur le traitement des clichés IRT .....	113
IV.2. Résultats de la campagne du 03/09/14 .....	114
IV.2.1. Exemple des sources d'Ussel et de la Fabrique.....	114
IV.2.2. Profil de température de la rivière.....	115
IV.2.3. Essai d'estimation des débits des émergences à partir du profil de température de la rivière.....	116
<b>PARTIE V – Analyses statistiques pour étudier les potentialités de pertes du système karstique de la Cèze.....</b>	<b>119</b>
V.1. Introduction et objectifs .....	119
V.2. Eléments importants concernant le site .....	120
V.2.1. Base de données .....	120
V.2.2. Courbe de tarage pour la station de La Roque-sur-Cèze.....	122
V.2.3. Réalisation du bilan hydrologique.....	122
V.2.4. Analyse de l'évolution des débits de la Cèze le long de son linéaire. ....	124
V.3. Vers une méthode de mise en évidence des pertes par analyse spectrale .....	126
V.3.1. Périodes de simulation.....	126
V.3.2. Outils et Méthodes .....	127
V.3.3. Caractérisation par les méthodes issues de l'analyse des systèmes en automatique.....	127
V.3.4. Application des analyses corrélatoire et spectrale à des données issues de modèles conceptuels .....	129
<b>PARTIE VI – Croisement des méthodes .....</b>	<b>159</b>
VI.1. Synthèse des complémentarités entre les différentes méthodes .....	159
VI.2. Conclusion et perspectives .....	163
VI.2.1. Conclusion .....	163
VI.2.2. Perspectives.....	173
<b>Annexes .....</b>	<b>198</b>
Annexe 1 : Photos du traçage de la Cèze .....	198
Annexe 2 : Traçages colorimétriques - Résultats brutes du laboratoire .....	203
Annexe 3 : Courbes de tarage des sources .....	232
Annexe 4 : Campagne d'acquisition d'images IRT du 3 septembre 2014 .....	233
Annexe 5 : Courbes de tarages fictives stations A, B, C, D, E.....	238

## Résumé du projet

---

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. 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 7 ans (2013 à 2019) correspond à plusieurs actions de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. La méthodologie de caractérisation des échanges karst - rivières s'appuie sur les approches suivantes : thermie, hydrogéochimie, biologie, hydrologie, géologie, traçages artificiels et modélisation pluie - débit.

## Avant-propos

---

Ce présent document constitue le troisième rapport d'avancement du projet (phase 3). Il s'appuie sur la thèse d'Hervé Chapuis [Chapuis, 2017] soutenue en octobre 2017. Il rend compte pour l'essentiel des actions réalisées en 2015 et 2016 (année 3 et 4). Ce rapport présente en introduction un bref rappel des actions menées en 2013 et 2014 (cf. rapport d'avancement 2013 année 1 et 2014 année 2) et aborde les actions effectuées en phase 3 du projet de 2015 à 2016.

L'introduction du rapport est divisée en quatre parties qui sont des rappels du précédent rapport. Ces parties concernent, (i) la localisation et la description sommaire du site d'étude, (ii) un rappel du contexte et des problématiques de gestion, (iii) un rappel des objectifs du projet et de la méthodologie envisagée et (iv) un récapitulatif synthétique des actions réalisées (2013 – 2014) et engagées (2015 – 2016).

# Introduction

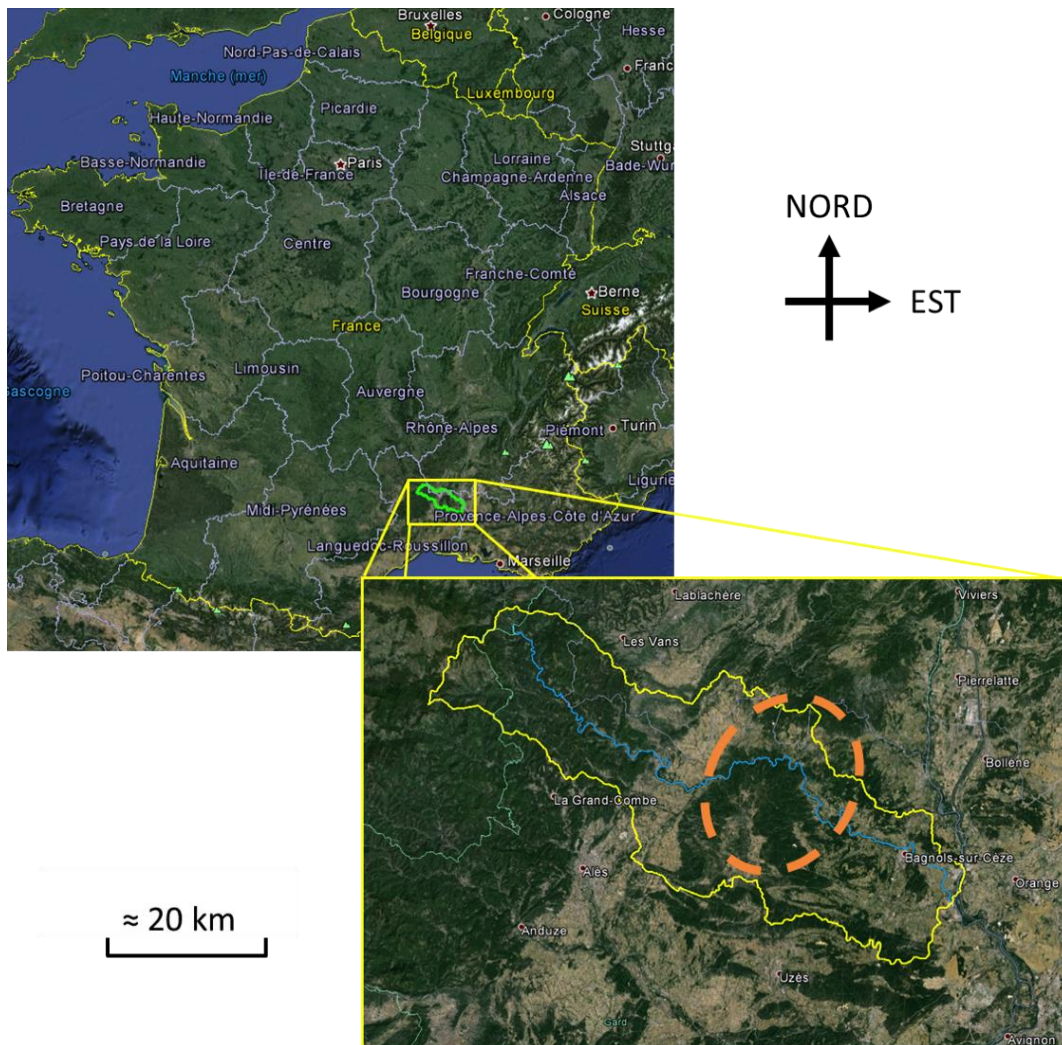
---

## 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). 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 des massifs cristallins issus de l'orogénèse Hercynienne. Ces massifs cristallins sont composés principalement de roches métamorphiques (gneiss et quartzite) et dans une moindre proportion de roches magmatiques (granitiques). La source de la rivière Cèze se situe géographiquement entre le mont Lozère culminant à 1699 m et le massif du Mas de l'Ayre à 997 m (Pic « Turc 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 135 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 mesurée à environ 1365 km<sup>2</sup>. 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] (Carte 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, du fait que les limites hydrogéologiques ne sont pas encore précisément connues, couvre une surface d'environ 500 km<sup>2</sup>. La particularité de ce site d'étude réside dans sa diversité hydrogéologique. Cette diversité se traduit au niveau des sens d'écoulements (karst vers rivière et rivière vers karst), par la nature des échanges (ponctuels ou diffus) mais aussi par la variété chimique, thermique et hydrodynamique des émergences karstiques. Cette diversité et cette complexité hydrogéologique font de ce karst un terrain d'études intéressant pour caractériser les échanges d'eaux entre le massif carbonaté 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].*

## Contexte et problématiques

---

*Le contexte et les problématiques de gestion avaient été abordés dans les précédents rapports d'avancement, ils sont brièvement rappelés ci-après :*

Une des priorités de la directive cadre sur l'eau (DCE) porte sur l'amélioration des connaissances sur les relations entre eaux superficielles et eaux souterraines et définit un principe de non dégradation qualitative et quantitative de ces composantes de l'hydrosystème. Ces considérations 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. Des outils et méthodes de caractérisation des échanges entre eaux superficielles et eaux souterraines existent déjà mais ne sont adaptés qu'en milieu alluvial (Projet Eau Sout', [Paran et Al., 2012] ; [Lalot, 2014]). En milieu karstique, ces outils et méthodes ne sont pas transposables, il s'agit par conséquent de prendre en compte les spécificités de ces aquifères discontinus pour proposer d'autres méthodes et outils adaptés. Dans ce projet, il s'agissait d'établir une méthodologie permettant de localiser et de quantifier les échanges karst – rivière. Une des particularités des circulations karstiques est d'être très souvent fortement interconnectées et de manière directe avec les écoulements de surface (pertes à l'amont, résurgences ou sources à l'aval).

Si les aquifères karstiques présentent fréquemment des potentialités importantes en terme de ressources en eau, cette ressource est souvent sous exploitée du fait de la difficulté à la mobiliser sans connaissance de la géométrie des drains, de la localisation des réservoirs et des volumes stockés ainsi que des impacts potentiels sur les débits aux exutoires. Présent sur de vastes territoires du bassin du Rhône et de la Méditerranée, ces aquifères présentent un double intérêt : d'une part, comme contributeurs important au débit des cours d'eau et d'autre part, comme ressource principale complémentaire ou alternative pour la satisfaction des différents usages.

Le site étudié dans le cadre du projet est situé au niveau du canyon de la Cèze et sur le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap. Le site d'étude de la Cèze est assez représentatif des problèmes de gestion de l'eau que l'on retrouve à l'échelle d'un certain nombre de bassins de cours d'eau du pourtour méditerranéen en Languedoc-Roussillon et PACA, à savoir : (i) un manque d'eau en situation d'étiage entraînant des conflits d'usages, (ii) un manque de cohérence entre les politiques territoriales de développement (SCOT/PLU) avec un déficit en eau qui conduira probablement à la nécessité de se tourner vers des ressources alternatives et (iii) un manque d'informations pour satisfaire à la fois les usages (prélèvements AEP et irrigation) et respecter les débits réservés dans le cours d'eau : débits minimum biologiques et loisirs.

Tous ces problèmes de gestion ont pour socle commun un manque de connaissance important. 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 à l'échelle des cycles hydrologiques ;
- Aux moyens de transfert 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.

## 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 de systèmes karstiques complexes – comme c'est le cas pour la Cèze – il est difficile de connaître l'origine, le cheminement et le devenir des eaux superficielles et souterraines. Cette connaissance est primordiale pour une meilleure gestion de la ressource (localisation de prélèvements, forages, périmètres de protection, transfère de polluants).

La contribution des écoulements karstiques à la rivière ou les écoulements de la rivière dans le karst implique une délimitation précise des aires de drainage et des zones de pertes de la rivière.

En ce qui concerne la Cèze, la rivière collecte les eaux des sources (une quinzaine identifiées) qui drainent en rive droite le plateau de Méjannes-Le-Clap et en rive gauche une bande relativement étroite de garrigues. 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) qui ont des fonctionnements contrastés. Elles se démarquent notamment par leur chimisme, leur thermie, leur hydrodynamisme, leurs débits, leur nature ponctuelle ou diffuse et le fait qu'elles restituent ou non les eaux de la rivière perdues en amont.

Ainsi, au vu de ces spécificités, l'ambition du projet de recherche est avant tout méthodologique. Il s'agit d'identifier et mettre en œuvre de manière appropriée les outils pertinents permettant d'évaluer les contributions du karst à la rivière et réciproquement pendant les cycles hydrologiques. Le rassemblement d'outils issus de plusieurs disciplines constitue la méthodologie pluridisciplinaire qui 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.

## Récapitulatif des actions réalisées (2013 – 2014) et engagées (2015 – 2016).

---

- Rappel des actions réalisées en 2013 :

- **Synthèse** des **données** et **connaissances** disponibles sur le terrain d'étude. Une recherche bibliographique sur la moyenne vallée de la Cèze au niveau du plateau karstique a été réalisée et une collecte de données SIG, hydrométéorologiques, hydrologiques et sur la qualité des eaux a été effectuée. Cette synthèse était nécessaire afin de mieux cerner le lien étroit entre les problèmes de gestion de la ressource et les manques de compréhension du système karstique. Ces lacunes de connaissances concernent 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 comportant des crues avec un voire plusieurs étiages.

- **Campagne de jaugeages** des sources et de la rivière Cèze. 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. 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. La variation amont/aval de la conductivité et de la température a permis d'une part, d'obtenir des renseignements sur les aires de drainages karstiques et d'autre part, d'améliorer l'échantillonnage chimique des eaux en rivière.

- **Campagne 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 lien 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 température 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 température importants (plus de 15°C). L'analyse des images thermiques (plus de 300 clichés) 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 interstitielles (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 « Ilette » dont la présence a pu être confirmée par une reconnaissance sur le terrain) ;
- L'identification de griffons secondaires pour des sources déjà connues remettant en cause les mesures de débits par micro-moulinet réalisées jusqu'alors ;
- La distance d'homogénéisation des eaux en vue d'un échantillonnage optimisé en rivière pour les campagnes hydrogéochimiques.

L'approche thermique se révèle très intéressante comme reconnaissance initiale du terrain d'étude en vue de mieux caractériser les apports souterrains. Elle est par ailleurs indispensable pour mieux préparer les campagnes d'échantillonnage hydrogéochimique et biologique mais aussi pour améliorer les mesures de débit des sources.

- **Campagne hydrogéochimique** par analyse des ions majeurs et certains éléments traces. Des prélèvements d'eaux pour analyses chimiques ont été effectués 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 a été réalisé en période de décrue entre avril et septembre (environ 150 échantillons analysés). L'analyse de l'ensemble des données hydrogéochimiques a permis de mettre en évidence :

- L'évolution chimique temporelle des eaux des sources et de la rivière ;
- D'identifier trois typologies chimiques des eaux des sources (« exurgences purement carbonatées », « résurgences peu sulfatées » et « résurgences fortement sulfatée ») donnant des indications sur l'origine des eaux d'infiltration ;
- L'évolution chimique de la rivière d'amont en aval des gorges.

- **Prélèvements biologiques** 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'échantillonnage 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 à l'aval de bancs de galets et graviers (-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.

- **Analyse du contexte géologique local et régional.** L'analyse inclut les calcaires urgoniens mais aussi d'autres terrains les encadrant. Une étude bibliographique à échelle plus régionale (paléomorphologie, paléostratigraphie et tectonique) et des reconnaissances terrain des formations ont été initiées afin de mieux préciser les caractéristiques et le rôle hydrogéologique de chacune d'elles et notamment celles des formations de couverture du Crétacé et du Tertiaire à l'Est en prenant en compte les formations oligocènes du synclinal de Barjac-Issirac. Cette étape avait pour objectif d'analyser les potentialités de développement des karsts profonds, de mieux appréhender le devenir des eaux non reprises par la Cèze et de définir les potentialités d'exploitation par forages en minimisant les impacts sur les écoulements superficiels.

Les actions engagées en 2013 ont démontré leurs pertinences et leurs complémentarités. Les difficultés rencontrées lors de cette phase de test ont été prises en compte et ont permis d'améliorer le protocole de mesure pour les années 2014, 2015 et 2016 (notamment pour la géochimie et la thermie).

- **Rappel des actions réalisées en 2014 :**

- **Prospections par traçages artificiels.** Les objectifs principaux des traçages étaient de mettre en évidence les relations entre certaines pertes de la Cèze et certaines sources situées en aval, de définir les bassins d'alimentation des sources et de discriminer les écoulements entre Cèze et Ardèche au nord.

- *Interfluve Cèze – Ardèche :* Un premier traçage colorimétrique à la fluorescéine (10 kg injecté) a été réalisé en mars (29/03/14) 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 a été réalisé à l'aide de fluorimètres de terrain couplés à des fluocapteurs renouvelés régulièrement avec des prélèvements ponctuels d'eaux. Le traceur a été décelé à l'état de traces moins d'un mois après l'injection côté Ardéchois à la source de Gournier le 24/04/14. Puis le traceur a été identifié près de huit mois après injection côté Cèze à la source de Monteil, les 18/11/14, 21/11, 26/11/14, 05/12/14 et 11/12/14. Cette

restitution de traceur faisait suite à une période particulièrement pluvieuse. Des doutes subsistent sur l'un des deux fluocapteurs disposés par les plongeurs dans la source des Castors (versant ardéchois). En effet, l'un des fluocapteurs a donné des résultats positifs tandis que l'autre s'est révélé négatif.

Un second traçage à l'interfluve Cèze – Ardèche a été réalisé le 14/11/14 à l'Aven d'Orgnac (Salle Rouge) à 2 km au NNE de la grotte Flandin. Ce traçage a eu lieu à l'occasion d'explorations spéléologiques effectuées dans un siphon noyé de la salle rouge (- 150 m de profondeur par rapport au niveau du terrain naturel). Ces explorations ont nécessité la mise en œuvre de pompes pour extraire les eaux du siphon noyé. L'injection de 10 kg de rhodamine a été accompagnée de 60 m<sup>3</sup> d'eau issue du pompage du siphon. Le traceur a été repéré moins d'une semaine après l'injection côté ardéchois à la source de Gournier (fluocapteurs et échantillons d'eaux, les 20/11/14, 24/11/14 et 01/12/14). Il semblerait que le traceur n'ait pas impacté d'autres sources tant sur le versant ardéchois (Castors et Dragonnière) que sur le versant Cèze (Baumes et Monteil).

- *Pertes des affluents du Nord du fossé d'Alès* : Un traçage des pertes du Roméjac, un affluent de la Cèze, a été réalisé en mai 2014 (06/05/14). En aval de ces pertes le Roméjac ne coulait plus, 3 kilogrammes d'éosine ont été injectés et la restitution du traceur a été suivie au niveau des sources de Foulatier, de Font Canet de Monteil et des Baumes. Le traceur a été retrouvé au niveau des sources de Monteil et des Baumes plus de 3 semaines après l'injection. Ce résultat implique que ces sources ne sont pas seulement alimentées par les eaux de pertes de la Cèze et par des aires d'alimentations de faibles extensions en rive gauche de la Cèze ; elles sont aussi alimentées par les pertes des cours d'eau du Nord du fossé d'Alès (le Roméjac, la Malaygue, le Malibaud et la Chantabre).

A propos des pertes de la Cèze, un dernier traçage pour l'année 2014 avait été envisagé en situation d'interruption du flux au niveau des pertes amont de la Cèze (pertes de Rochegude). Cependant, la situation hydrologique de l'année 2014 (juillet et août pluvieux) n'a pas permis de le faire. Il a donc été reporté en 2015, sous réserve de conditions hydrométéorologiques favorables.

- **Suite de la campagne thermique** : 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 température observées de décembre 2013 à février 2014. Une autre campagne a été réalisée le 2 septembre sur une zone plus large incluant l'intégralité des sources aval (de la source d'Ussel à la source de Bastide Froide). Des mesures de débits (10 sources et 6 sections rivière) ont été réalisées de manière synchrone afin de les comparer aux clichés thermiques. Il était prévu que ces données soient analysées au cours de l'été 2015.

- **Identification des prélèvements biologiques** (suite) : Les prélèvements réalisés en 2013 ont été suivis du tri et du dénombrement des individus en 2014. Les résultats ont été analysés et l'ébauche d'un diagnostic des échanges karst – rivière a pu être établit le long du linéaire de la Cèze entre Tharoux à l'entrée des gorges et Montclus à la sortie des gorges. Ces analyses ont donné lieu au calcul d'un indice d'échange entre karst et rivière en se basant notamment sur le type (traits biologiques) et l'abondance d'espèces triées et dénombrées dans les eaux échantillonnées.

- **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 2013 et début de printemps suivant au niveau des principales sources connues (environ 12 sources) et au niveau de la rivière (sur 4 tronçons). Le suivi en continu était prévu sur au moins deux cycles hydrologiques (2014 et 2015). Il avait pour objectif de compléter la vision générale des écoulements afin de 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) ont pu ainsi être positionnés par rapport à l'évolution générale des chroniques de hauteurs et ont servi pour les courbes de tarage en 2015.

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

- **Suite des jaugeages** pour les sources et la rivière Cèze : Suivi de la décrue de la Cèze et des sources sur 5 à 6 campagnes de jaugeages réalisées entre mars et septembre. En rivière, les jaugeages différentiels sur plus de 6 sections transversales d'amont en aval des gorges ont permis de quantifier les gains et pertes de débits sur plusieurs tronçons de la Cèze et l'évolution de ces débits au cours d'une période de tarissement.

Pour les sources, ces mesures de débits au cours de la période de tarissement (de mars à juillet) ont servi à calibrer les relations hauteurs/débits à partir des relevés des sondes CTD.

- **Géochimie** (suite) : L'interprétation des analyses réalisées en 2013 a montré que certaines sources pouvaient changer de typologie chimique suivant la situation hydrologique. Un manque d'échantillons en période de hautes eaux avait été constaté. Une vingtaine de prélèvements en décembre 2014 en période de hautes eaux ont été réalisés.

Par ailleurs, des prélèvements d'échantillons dans l'endokarst ont été réalisés. Ces prélèvements devaient permettre d'isoler la typologie chimique correspondant au pôle des eaux dites « purement carbonatées » et de mieux contraindre les équations de mélanges des eaux mobilisant plusieurs « pôles » identifiés.

- Poursuite de l'**analyse** du contexte **géologique local et régional**. Des reconnaissances géologiques ont été menées sur le terrain en vue d'une comparaison avec la carte géologique. Ces reconnaissances comportaient des observations macroscopiques fines des différents faciès carbonatés, la localisation des failles et zones broyées, des mesures de pendages le long de transects N/S, du prélèvement d'échantillons pour l'observation des faciès en lame mince.

Les objectifs de ces reconnaissances étaient multiples :

- Discussion de la concordance entre les directions structurales de la carte géologique et les directions des conduits karstiques relevés par les spéléologues ;
- Comparaison des surfaces géomorphologiques Cèze/Ardèche et intégration des niveaux de conduits karstiques horizontaux ;
- Concordance entre traçages colorimétriques et structures géologiques ;
- Discussion sur les différentes interprétations de l'histoire géologique à travers la littérature ;
- Comparaison avec étude géologique régionale → thèse Bastide [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* ;
- Etablissement d'une coupe géologique permettant d'apprécier la géométrie du réservoir en profondeur et voir l'influence éventuelle des changements latéraux de faciès.

Pour alimenter la réflexion sur le sujet, une réunion a été organisée en décembre 2014 afin de réunir les équipes travaillant sur le projet Cèze (EMSE et EMA, UMR Espace, Univ. Lyon 1) et sur l'aven d'Ornac (Edytem, F Bourges). Ceci a été l'occasion d'effectuer une visite de terrain et d'échanger sur les projets concernant le bassin versant de la Cèze.

- **Modélisation Pluies/Débits par réseaux neuronaux (RN)** : L'objectif était de modéliser les échanges entre la Cèze et les aquifères karstiques qui l'entourent. Cette étape était 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 statistique de type réseau neuronal (RN). L'étape préalable à ce travail de modélisation a

donné lieu à la constitution d'une base de données qui a été réalisée par le LGEI (stage de Master 2 de Michaël Savary). Cette base de données a été reconstituée à partir de nombreuses sources d'informations (SPC Grand Delta, OHMCV, DREAL, ...). Toutefois, les données pluviométriques des années 2001 et 2002 étant manquantes, il a été impossible de mener à bien l'analyse multirésolution et donc d'estimer les tendances. Pour l'année 2014, des essais de mise en œuvre de modélisations avec les réseaux de neurones ont été conduits et devaient se poursuivre en 2015.

#### **- Actions liées à l'organisation du projet**

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'École des Mines d'Alès, du Conseil Général du Gard, de l'ARS 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).

#### **- Communications sur le projet**

- Un rapport d'avancement du projet, axé sur les activités de l'année 2013, décrit plus précisément les résultats de chacune des méthodes [(b) Ré-Bahuaud et al., 2014].
- Un comité de pilotage a eu lieu le 24/02/14 réunissant des représentants de l'Université d'Avignon (EMMAH), de l'Université de Nice (ESPACE), de l'École des Mines d'Alès, de l'ARS, du Conseil Général du Gard, de la DREAL Languedoc-Roussillon, de l'Agence de l'eau et deux hydrogéologues agréés du Gard.
- Deux communications sur la méthodologie mise en œuvre au cours de ce projet, ont été présentées au colloque international E3D (Eau, Déchets et Développement Durable) en juillet 2014 avec deux articles joints aux actes du colloque [Chapuis et al., 2014] ; [(a) Ré-Bahuaud et al., 2014].
- Une communication orale et un article ont été acceptés à la conférence francophone ESRI en octobre 2014 [(c) Ré-Bahuaud et al., 2014].
- Un poster sur l'approche générale du projet a été présenté le 08/10/14 à la conférence FRIEND-WATER à Montpellier en octobre [(d) Ré-Bahuaud et al., 2014].
- Une soutenance de stage de master 2 de M. Savary [2014] encadré par A. Johannet sur « *Inventaire, critique, analyse et traitement de la base de données pluie-hauteur en vue d'une instrumentation du Bassin versant de la Cèze (Gard)* ».



- **Actions réalisées en 2015 - 2016 :**

- **Actions 2015-2016 en continuité avec celles engagées en 2013 – 2014 :**

- **Prospections par traçages artificiels :** Un traçage des pertes de la rivière Cèze en amont des gorges a été effectué. Ce traçage n'avait jamais été réalisé en condition de rupture de continuité du flux d'eau. Il avait pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de savoir en combien de temps ces sources étaient « impactées ». En rive gauche de la Cèze, un nouveau traçage a été réalisé au niveau des pertes du Garn. L'objectif de ce traçage était de préciser les limites des aires d'alimentation en rive gauche.

- Approche **biologique :** Pour l'année 2015, deux tâches principales ont été réalisées. Tout d'abord, le tri et d'identification de la faune du compartiment benthique de la rivière pour connaître son évolution d'amont en aval des gorges. Ensuite, afin de mieux connaître la composition spécifique de la faune karstique, des échantillons de l'endokarst ont été prélevés, triés et identifiés.

- **Thermie :** Traitement des clichés acquis en septembre 2014 sur l'ensemble du linéaire de la Cèze et essais de corrélations par comparaison des anomalies de température par rapports aux débits mesurés (sources et rivière).

- **Suivi des débits** (sources et rivière) :

- Pour les sources : La constitution de relations hauteurs/débits s'est révélée plus délicate que prévue en raison des différences de débits notables mesurés par les deux appareils de mesure (courantomètre et micromoulinet), de la modification des profils en travers par les crues de la Cèze et de la difficulté à jauger certaines sources. Davantage de mesures de débits de sources ont été réalisées afin de compléter et d'améliorer la robustesse des relations hauteurs/débits.
      - Pour la rivière : Les jaugeages différentiels (entre 6 et 8 tronçons jaugés) qui ont été réalisés en rivière sont beaucoup moins soumis aux incertitudes et donnent des résultats bien plus satisfaisants. Ils permettent, sous la forme de bilan par tronçons, de mieux cerner et quantifier les pertes et la contribution des eaux souterraines aux débits de la Cèze et réciproquement. Ces bilans par tronçons sont comparés aux mesures réalisées au niveau des sources et dévoilent des différences notables.

- **Suivi hydrologique** (hydrologie et métrologie) : La maintenance des sondes CTD (nettoyage, calibration) est assurée régulièrement (tous les 3 mois) afin de s'assurer de la fiabilité des données enregistrées et pour parer à tout problème de dysfonctionnement et aux nombreuses dérives communément constatées pour ces sondes. Les données collectées (pression, température et conductivité) sont ensuite compensées de la pression atmosphérique et corrigées (dérives, décalages lors du repositionnement de la sonde, pollution par les crues de la Cèze). Si besoins, ces données sont rééchantillonnées afin de constituer, sur au moins un cycle hydrologique, une base de données fiable, lisible, intègre et homogène. Cette base de donnée est structurée afin qu'elle soit facilement exploitable pour la description, l'analyse et les traitements statistiques des données (par exemple : statistiques descriptives, ACP, analyses corrélatoire et spectrale). L'objectif de cette analyse est : (i) d'identifier les différents comportements des sources karstiques et ainsi définir une typologie hydrodynamique, thermique et typologie chimique ; (ii) d'établir des d'éventuelles corrélations entre les données (pluie, hauteur de la rivière, état de saturation du karst, etc.) ; (iii) d'exploiter ces données afin de quantifier l'évolution des échanges entre karst et rivière au cours d'un cycle hydrologique.

- **Modélisation Pluies/Débits par réseaux neuronaux (RN) :** Le modèle par réseau de neurones initialement mis en œuvre n'a pas permis d'effectuer des simulations de suffisamment bonne qualité pour

permettre de combler les lacunes de la base de données. Un travail plus approfondi est conduit afin d'améliorer la simulation des crues grâce à un modèle spécifique « hautes eaux » ; de même un modèle « basses eaux » pourrait être envisagé, ainsi qu'une mise à profit des méthodes de décomposition multi résolution pour analyser le signal à différentes échelles de temps.

○ Nouvelles actions 2015-2016 décrites précisément dans le présent rapport :

- **Caractérisation isotopique** : 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 remédier aux limitations liées à l'analyse en ions majeurs seule, les outils isotopiques ont été employés pour lever certaines incertitudes.

Pour ce faire, les isotopes du soufre ( $^{34}\text{S}$  et  $^{32}\text{S}$ ) contenu dans les ions sulfates sont analysés. 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) a été réalisé. Les isotopes de la molécule d'eau sont susceptibles de fournir des informations sur les parts respectives des masses d'eau contributives sur les différentes périodes de l'année. Le but étant ici d'identifier l'origine des alimentations notamment souterraines et de définir les proportions de mélanges entre eaux de surface et eau souterraine.

Un test avait été réalisé en juillet 2014 comprenant une quinzaine d'échantillons d'eaux de sources et de la rivière mais aussi des roches susceptibles d'être à l'origine des sulfates (notamment des marnes du Crétacé supérieur et des argiles de l'endokarst).

Ainsi, il est question de réaliser ces prélèvements à trois reprises au cours de l'année, à hautes, moyennes et basses eaux. Une campagne exhaustive des eaux (sources et rivière) a été réalisée en juin 2015. Les échantillons sont en cours d'analyse.

Le Strontium a également été utilisé comme traceur de l'origine géologique des eaux. Il est supposé qu'il existe un fort contraste du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre le socle silicaté du bassin versant amont et la couverture carbonatée [Verdoux et al., 1995] ; [Faillat et al., 2003].

Les analyses du strontium (réalisées à Nîmes) ont donc été réalisées en période de basses eaux de l'été 2015.

- **Caractérisation par des échanges karst/rivière par radioéléments** : Cette action n°49 est directement liée à ce projet mais fait l'objet d'une fiche ZABR et d'un rapport à part entière (*action pilotée par l'Univ. D'Avignon (A. Mayer) et le CEREGE d'Aix (O. Radakovitch)*).

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 ( $^{226}\text{Ra}$ ) et il montre des valeurs généralement faibles (quelques centaines de  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) 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  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Lorsque des eaux souterraines sont injectées en surface, quel que soit le type d'injection (ponctuel ou diffus), l'analyse du  $^{222}\text{Rn}$  permet de mettre en évidence ces apports qui se traduisent par une augmentation des activités au niveau et en aval de la zone d'injection. Grâce à sa forme chimique gazeuse et sa courte période, la diminution en aval peut être assez rapide. Le signal ne s'accumule donc pas longitudinalement et chaque apport doit pouvoir être quantifié sans effet mémoire. L'établissement d'un bilan à l'état stationnaire du  $^{222}\text{Rn}$  dans la Cèze sur une portion délimitée permettra de définir les flux entrants (apports d'autres affluents, par diffusion du sédiment, par décroissance du  $^{226}\text{Ra}$  dans l'eau et par les eaux souterraines) et sortants (décroissance et départ vers l'atmosphère). La détermination de tous ces flux permettra d'évaluer un inconnu, ici le flux issu des eaux souterraines. Si les activités de  $^{222}\text{Rn}$  dans les eaux souterraines sont mesurées en parallèle, ce flux de  $^{222}\text{Rn}$  peut alors

être converti en flux d'eau. Une telle approche a été largement utilisée pour travailler sur les échanges d'eaux en zone côtière, mais elle 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.

Les analyses du Radon ont été réalisées dans la Cèze ainsi que sur les prélèvements d'eaux souterraines effectués à proximité. Les appareils permettent deux types de mesure : soit en prélèvement ponctuel, soit en mesure en continu en réalisant un pompage à partir d'un bateau (au fil de l'eau). Cette deuxième possibilité permet de mesurer des activités plus basses et offre donc plus de précision, mais elle est limitée par la nécessité de pouvoir faire naviguer un bateau sur le site. Les premiers tests réalisés sur quelques échantillons ponctuels ont montré qu'il existait des contrastes entre les différentes sources. Cependant, l'activité Radon des eaux de la rivière s'est avérée beaucoup plus importante que ce qui avait été pressenti, rendant les contrastes avec les sources moins marqués que prévu.

L'activité Radon de l'ensemble des sources a été analysée fin mai 2015. Le profil continu de l'activité Radon de la Cèze a été réalisé la semaine du 8 au 12 juin avec un profil de conductivité, température, pH, potentiel redox et turbidité. En parallèle de ces mesures de Radon, 7 tronçons de la Cèze ont été jaugés, ainsi que l'ensemble des sources. De plus, en vue d'une analyse en ions majeurs et isotopes ( $^{34}\text{S}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ), un échantillonnage exhaustif des sources, de la rivière et des affluents a été réalisé.

Le traitement de toutes les données collectées au cours de cette campagne a fait l'objet d'une présentation au comité de pilotage de décembre 2017 à Montpellier et d'un rapport dont la version finale a été remise à l'Agence de l'eau en janvier 2018.

Dans la partie V.B. de ce rapport, on peut remarquer une certaine cohérence avec l'approche biologique (invertébrés souterrains) qui mettait en évidence la structuration longitudinale des apports souterrains :

- (1) en amont des gorges et de la source des fées : infiltration d'eau de surface vers les sédiments
- (2) de la Source des fées au PK 9 : apports souterrains karstiques
- (3) du PK 9 au PK 16 : peu d'échanges verticaux (colmatage au PK16) ou bien infiltration d'eau de surface vers les sédiments (plus marqué vers PK 13-15)
- (4) du PK16 au PK18 : retour des apports d'eau souterraine karstique.

**- Synthèse, interprétation et valorisation des résultats issus des différentes approches :** En plus d'être analysés séparément, les résultats de chacune des approches ont été confrontés les uns aux autres et mis en perspective du point de vue de la caractérisation des échanges karst - rivière. Il s'agissait d'identifier les points de convergence et de divergence mais aussi les complémentarités et les limites de chacune des approches. L'ensemble de ces résultats sont présentés dans ce rapport, ces éléments seront destinés à venir enrichir dans un dernier temps le guide méthodologique sur les échanges nappes/rivière (phase 4 du projet).

#### **- Communications sur le projet**

- Soutenance de thèse Hervé Chapuis intitulée « Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières – Application à la Cèze (Gard, France) » le 12/10/17 aux Mines de Saint-Etienne [Chapuis, 2017].
- Poster présentant le projet et plus particulièrement les analyses corrélatoires et spectrales, la méthode des débits classés et la démarche de modélisation RN, a été présenté au colloque KG@B à Birmingham en juin 2015 [Coutouis et al., 2015].
- Comité de pilotage :
  - Comité de pilotage sur le projet a eu lieu en mai 2015 (05/05/2015) réunissant des représentants de l'Université d'Avignon (EMMAH), de l'Université de Nice (ESPACE),

de l'Ecole des Mines d'Alès, du Conseil Général du Gard, de la DREAL Languedoc-Roussillon, de l'Agence de l'eau et des 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).

- Comité de pilotage qui du 16/01/17 pour présenter les principaux résultats de la thèse d'Hervé Chapuis (soutenue en octobre 2017) ainsi que les résultats des actions menées les années 2015 et 2016. Ce comité de pilotage sera surtout l'occasion d'introduire la phase 4 du projet Cèze.
- 4 communications à la conférence Eurokarst 2016 à Neuchâtel :
  - Méthodologie du projet [(e) Ré-Bahuaud et al., 2016] ;
  - Géochimie [(f) Ré-Bahuaud et al., 2016] ;
  - Thermie [(g) Ré-Bahuaud et al., 2016] ;
  - Traçages [Chapuis et al., 2016].
- Article à paraître dans Physio-Géo sur l'apport des zones d'échanges entre eau de surface et eau souterraine à la biodiversité des cours d'eau en contexte karstique sous climat méditerranéen [Marmonier et al., 2017].
- Article paru sur HAL sur l'évolution paléogéographique et karstogenèse du bassin d'Issirac (Gard, France) du Crétacé supérieur au Miocène inférieur [Jolivet et al., 2017].
- Stages de master 2 :
  - Stage de Jocelyn Faroux effectué aux Mines d'Alès (LGEI) et soutenu à l'Université de Poitiers encadré par David Salze (Mines Alès) et Jordan Ré-Bahuaud (Mines Alès) sur l'analyse et traitement du signal appliqué aux séries chronologiques (hauteurs/débits, conductivités et températures) en vue de quantifier les échanges karst-rivière [Faroux, 2015].
  - Stage d'Adrien Coutouis effectué aux Mines d'Alès (LGEI) et soutenu à l'Université de Poitiers encadré par Anne Johannet (Mines Alès) sur l'analyse et le traitement de la base de données pluie-hauteur en vue de simulation des hauteurs par réseaux de neurones [Coutouis, 2015].
- Animation scientifique :
  - Journées du karst de l'association française de karstologie (AFK). Octobre 2016. Co-animation et co-auteur du livret guide. Méjannes-le-Clap (France, 30).
  - Field trip n°10 of the international association of hydrogeologists (IAH). Octobre 2016. Co-author and co-organizer. Méjannes-le-Clap (France, 30).
- Annonce du plan du présent rapport :

La première partie présente les mesures de débits réalisées (sources et rivière), aborde les traitements effectués sur la base de données de suivi en continu des sources et de la rivière. La deuxième partie présente une synthèse des deux opérations de traçage réalisées en 2015. La troisième partie présente les résultats issus des analyses géochimiques (isotopes de la molécule d'eau, du Soufre et du Strontium). La quatrième partie expose l'exploitation des résultats de la campagne d'acquisition d'image IRT de septembre 2014. La cinquième partie traite de la définition d'une méthode, basée sur des analyses statistiques, afin d'étudier les potentialités de pertes du système karstique de la Cèze. La sixième partie traite du croisement des différentes méthodes pour la caractérisation des échanges karst-rivière. Il n'y a pas d'apport nouveau concernant l'approche biologique hormis la comparaison avec les résultats de la campagne radon.

Une conclusion générale revient sur les résultats permettant de caractériser les échanges entre karst et rivière à l'aide des différentes approches et aborde les perspectives d'améliorations.

NB : Les annexes sont présentées à la fin de ce rapport. Le sommaire référence l'ensemble de ces annexes (Annexes 1 à 5).



# PARTIE I

—

## Suivi hydrologique des sources et de la rivière

---

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Jordan Ré-Bahuaud, Chapuis Hervé et Didier Graillot  
(UMR 5600 EVS, EMSE)

### I.1. Jaugeages rivière et sources

---

#### I.1.1. Rappel des objectifs

L'objectif général des jaugeages au niveau des sources et de la rivière a été de suivre l'évolution des débits jusqu'à une situation d'étiage (voire de tarissement pour certaines stations jaugées). Plus spécifiquement, pour les sources, le but a été de préciser leur fonctionnement hydrodynamique (coefficient de tarissement, gamme de débits, etc.). Pour la rivière, le but a été de localiser et de quantifier les zones d'apports et de pertes ainsi que de suivre la manière dont évoluent les débits des pertes et des apports dans le temps.

Le principe de la mesure des débits (courantomètre EM) et les incertitudes associées à cette méthode ont été précisément décrits dans les précédents rapports. Concernant les incertitudes liées à cette mesure, elles concernent essentiellement la difficulté pour estimer le débit des émergences diffuses et la difficulté pour estimer le sous-écoulement à l'interface émergence/rivière. Ces difficultés sont en grande partie levées par la réalisation de jaugeages différentiels en rivière, permettant de réaliser un bilan entrées/sorties sur un tronçon qui encadre la ou les émergence(s) suspectée(s) d'être diffuse(s) ou de présenter des sous-écoulements.

Pour l'année 2015, quatre campagnes de mesures de débits ont été assurées entre avril et août (du 15 au 17 avril, du 8 au 9 juin, du 21 au 22 juillet, du 2 au 4 août), les stations jaugées sont présentés en Carte 2. La Figure 1 ci-dessous présente la situation hydrologique de la Cèze durant la période de mesure. On note deux événements pluvieux ayant une influence sur le débit de la Cèze, le premier d'une intensité de 80 mm (Méjannes-le-Clap) a eu lieu le 27/04/15 et le second d'une intensité de 42 mm (Méjannes-le-Clap) a eu lieu le 12/06/15. Ces événements pluvieux perturbent les phases de tarissement et doivent être pris en compte pour les conditions initiales du calcul des coefficients de tarissement.

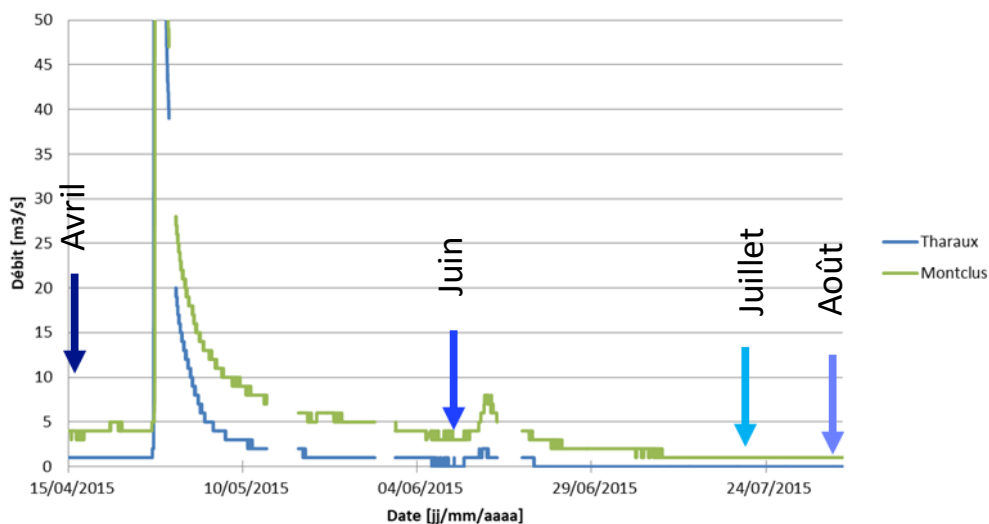
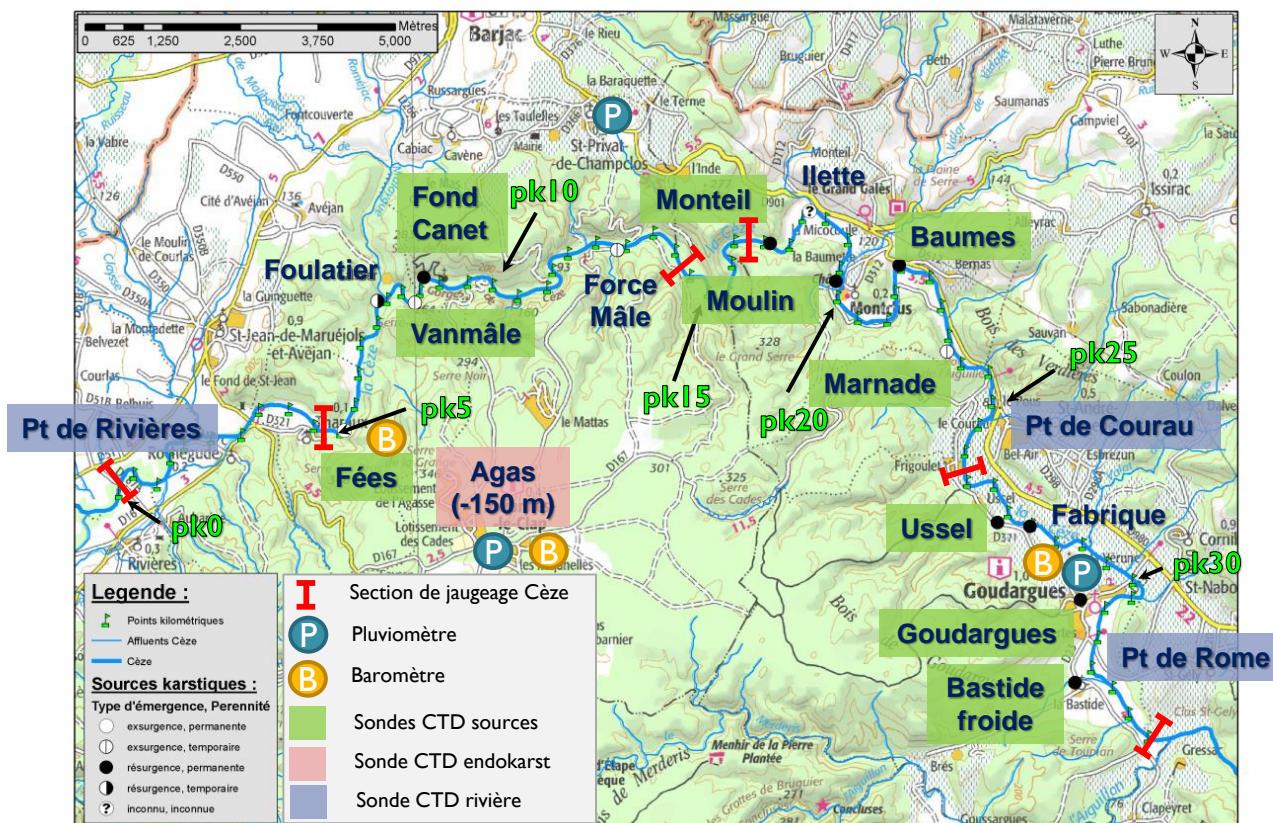


Figure 1 : Situation hydrologique de la rivière Cèze lors des campagnes de jaugeages de 2015 (données SPC/vigicrue)

La Carte 2 ci-dessous présente la localisation des sections jaugeées en rivière ainsi que celle des sources.



Carte 2 : Localisation des points de suivi (Fond IGN au 1/50 000<sup>ème</sup>).

## I.1.2. Résultats de la campagne de 2015

### I.1.2.i. Sources

- Chroniques de débits :



La Figure 2 présente simultanément l'évolution du débit des sources entre avril et août 2015 et la chronique de précipitations à Méjannes-le-Clap. Comme présentées dans le précédent rapport (campagne 2014), les mesures réalisées en 2015 montrent une grande diversité de fonctionnement des sources les unes par rapport aux autres.

Certaines sources présentent une grande variabilité des débits comme c'est le cas par exemple pour la source de la Bastide Froide ont les débits diminuent de 66 % entre avril et août, ceux de Monteil de 67 % et ceux de Marnade de 100 %. D'autres sources au contraire présentent une plus faible variabilité comme par exemple la source d'Ussel avec une diminution de 29 % ou encore Goudargues avec 32 % de diminution.

Les sources de Moulin et de Font Canet voient leurs débits augmenter à nouveau en août alors qu'il n'y a pas eu de pluie notable à Méjannes-le-Clap. Ceci est lié à des précipitations localisées sur les Cévennes qui ont augmentées la hauteur d'eau dans la Cèze. Les sources de Font Canet et de Moulin sont soutenues par les eaux de la rivière Cèze (confirmé par les traceurs géochimiques et artificiels). Les transferts entre la Cèze et les sources de Moulin et Font Canet sont très rapides (respectivement quelques heures et entre 9 et 11 jours) tandis qu'ils sont plus lents et progressifs pour les sources de Monteil et des Baumes (respectivement 35 et 38 jours environ).

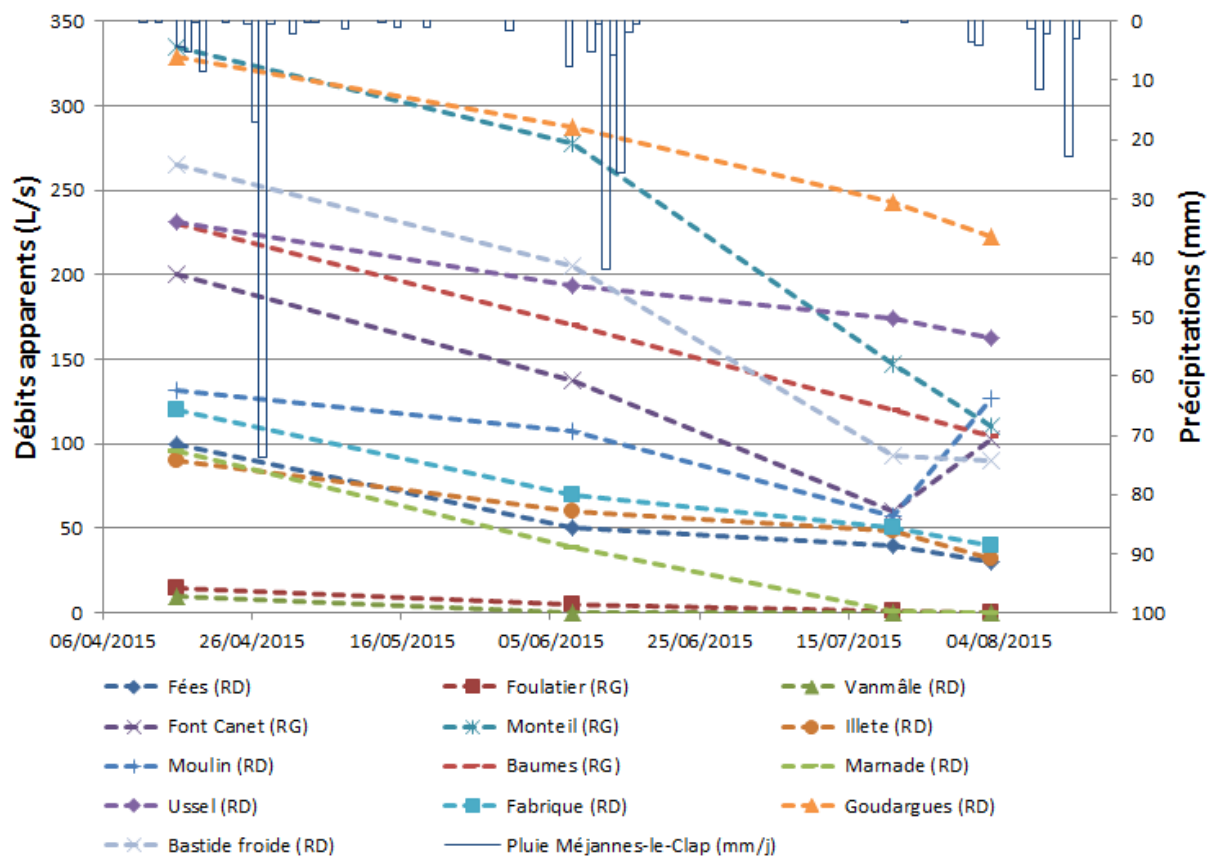


Figure 2 : Résultats de jaugeages des principales sources d'avril à août 2015

- Coefficients de tarissement ( $\alpha$ ) :

Une formulation conceptuelle souvent employée pour décrire le tarissement d'un aquifère, en l'absence de perturbations par les précipitations, est celle de Maillet [1905]. Elle considère la vidange d'un réservoir au travers d'un bouchon poreux situé à sa base.

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha t}$$

Le débit ( $Q_t$ ) décroît au cours du temps sous la forme d'une fonction exponentielle décroissante dont le coefficient de tarissement ( $\alpha$ ) règle les modalités de vidange et qui dépend des paramètres physiques de l'aquifère (perméabilité). Les conditions initiales ( $t_0$ ) sont définies par un débit initial ( $Q_0$ ) dont le choix est parfois assez arbitraire, il correspond à l'état du système au début de la phase de tarissement. Des courbes de régression (type exponentielle décroissante) ont été ajustées aux mesures de débits lors des périodes de tarissement pour 2014 et 2015. La Figure 3 présente les coefficients de tarissement ( $\alpha$ ) calculés pour les différentes sources. Pour être le plus représentatif possible, le calcul de coefficients de tarissement doit être réalisé sur des périodes sans influences des précipitations pour ne pas fausser les résultats [Lang, 2007]. Or, en 2015, deux événements pluvieux importants ont été enregistrés (Figure 1 et Figure 2). Le calcul n'a pu se faire que sur des durées très courtes pour certaines sources (avec peu de mesures). Néanmoins, les coefficients calculés avec une année d'intervalle (2014 – 2015) restent dans des gammes assez comparables (sauf pour Moulin).

D'une manière générale, le coefficient de tarissement  $\alpha$  donne des informations sur le caractère plus ou moins capacitif ou plus ou moins transmissif du réservoir (aquifère) en relation avec l'évolution temporelle des débits de la source investiguée. Les plus faibles coefficients traduisent une plus grande régulation des écoulements souterrains, c'est-à-dire une plus forte résistance à l'écoulement et une capacité de stockage importante. Les coefficients les plus forts traduisent une faible régulation des écoulements (fortes variations de débits) soit une plus faible résistance à l'écoulement (caractère plus transmissif lié à un réseau de drainage plus développé et mûre).

Les coefficients les plus faibles sont enregistrés pour le groupe de sources Ussel, Fabrique et Goudargues (coefficient  $\alpha$  non calculé pour la Fabrique du fait d'une trop grande incertitude sur les débits). Ce groupe de sources redistribue très progressivement les réserves d'eau emmagasinées lors des périodes de recharge du karst. Ce regroupement basé sur des critères hydrodynamiques est également corroboré par les résultats géochimiques. D'une certaine manière, ces trois sources semblent appartenir à un seul et même bassin d'alimentation, en effet, le réseau de drainage et la porosité matricielle de l'aquifère alimentant ces sources ne sont probablement pas compartimentés. Ces sources se distinguent (d'un point de vue chimique et hydrodynamique) clairement de Marnade plus au Nord et de Bastide Froide plus au Sud. Une limite de partage des eaux doit probablement exister entre l'air d'alimentation du groupe de source Ussel, Fabrique et Goudargues et l'air d'alimentation de Marnade au Nord et Bastide Froide au Sud.

Il faut toutefois moduler les interprétations du coefficient de tarissement de la source de Marnade, en effet, les débits mesurés indiquent que cette source n'est pas pérenne avec un assèchement rapide. Or, comme il a été vu dans les précédents rapports, les débits mesurés pour cette source sont apparents (mesure réalisée au niveau de la zone de débordement de la vasque), un sous-écoulement a été mis en évidence par le suivi de l'évolution des hauteurs d'eau dans la vasque et par imagerie aéroportée IRT (partie IV). Les débits non mesurés du fait des sous-écoulements ont tendances à augmenter artificiellement les valeurs du coefficient  $\alpha$ . Pour les sources en partie alimentées par les eaux de perte de la rivière, c'est-à-dire Font Canet, Moulin, Ilette, Monteil et les Baumes, les débits de soutien de la rivière ne sont pas constants dans le temps. Or, les coefficients  $\alpha$  sont largement influencés par la Cèze rendant leurs interprétations délicates. C'est le cas de la source de Moulin qui présente des coefficients très variables d'une année sur l'autre. Pour Monteil et les Baumes, l'alimentation principale est l'aquifère urgonien (karst sous couverture) situé sous les formations priaboniennes (démonstré par traçages artificiels et naturels), le rôle de la rivière est très secondaire au début de la phase de tarissement. En fin de phase de tarissement, le rôle de la Cèze devient de plus en plus important à mesure que les stocks d'eau d'origine karstique sont drainés.

On peut remarquer que les coefficients  $\alpha$  ne renseignent que sur la phase de tarissement de l'hydrogramme qui constitue la composante lente de l'écoulement. On ne dispose pas d'information sur la décrue qui renseigne sur la composante rapide de l'écoulement notamment sur les transferts en zone

non saturée en dans la zone épinoyée du karst. Pour cela, il faudrait disposer de mesures de débits lors des phases de décrues consécutivement à des précipitations intenses sur le plateau de Méjannes-le-Clap.

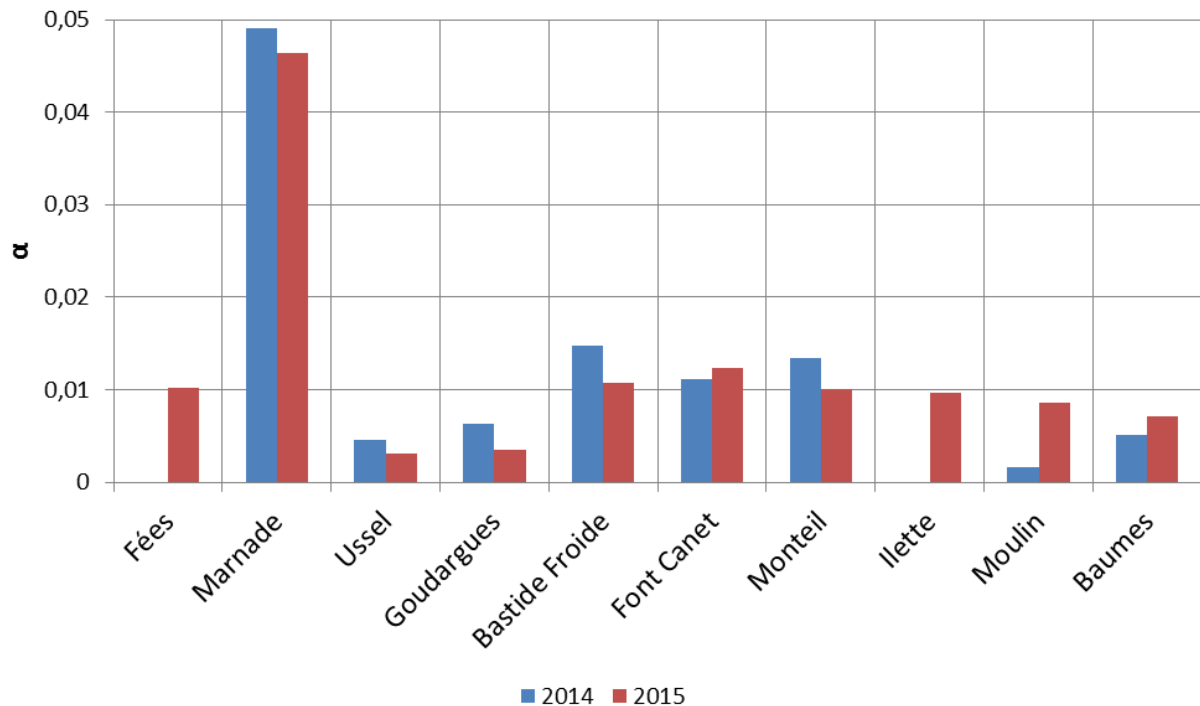


Figure 3 : Coefficients de tarissement calculés pour la période de tarissement de 2014 et de 2015 pour les sources.

- Volumes dynamiques :

En intégrant la formule de Maillet [1905] qui décrit le tarissement entre le début et la fin du tarissement, il est possible de calculer un volume dynamique ( $V_d$ ) drainé (exprimé en  $m^3$ ).

$$V_d = \frac{Q_0}{\alpha} * 86400$$

Ce volume dynamique représente une vidange complète du réservoir drainé de manière gravitaire. Cette vidange complète ne s'observe pas nécessairement à l'échelle d'un cycle hydrologique, c'est ce qui différencie les sources pérennes des sources temporaires. Par ailleurs, ce volume de vidange des eaux gravitaires ne considère pas les réserves d'eau situées au-dessous de la cote d'exutoire, ces dernières sont accessibles par pompage. Enfin, on peut formuler la même remarque que pour le coefficient  $\alpha$ , ce volume dynamique ne renseigne que sur les volumes d'eau mobilisés lors de la phase de tarissement (composante lente) et pas sur la phase de décrue (composante rapide).

La Figure 4 présente le volume dynamique calculé pour chacune des sources lors le tarissement de l'année 2015. Les résultats s'interprètent comme ceux issus du coefficient de tarissement à ceci près qu'ils rendent compte des réserves mobilisables pour chacune des sources. Le groupe de sources d'Ussel, Fabrique et Goudargues (volume non calculé pour la Fabrique) présente les volumes potentiels mobilisables les plus importants supérieurs à 6 000 000  $m^3$ . Pour les sources soutenues par la Cèze (Font Canet, Moulin, Ilette, Monteil et les Baumes), la part des eaux issue de la rivière est difficile à différencier de la part issue d'une aire d'alimentation karstique. Monteil et les Baumes présentent des volumes potentiellement mobilisables autour de 3 000 000  $m^3$  soulignant le rôle important du karst sous couverture priabonienne dans l'alimentation de ces sources.

Les volumes calculés pour Moulin, Font-Canet et Ilette sont très tributaires de l'état de la rivière et peuvent être très variables d'une année sur l'autre.

Pour les mêmes raisons évoquées précédemment, le volume dynamique estimé pour la source de Marnade est largement sous-estimé (sous-écoulement).

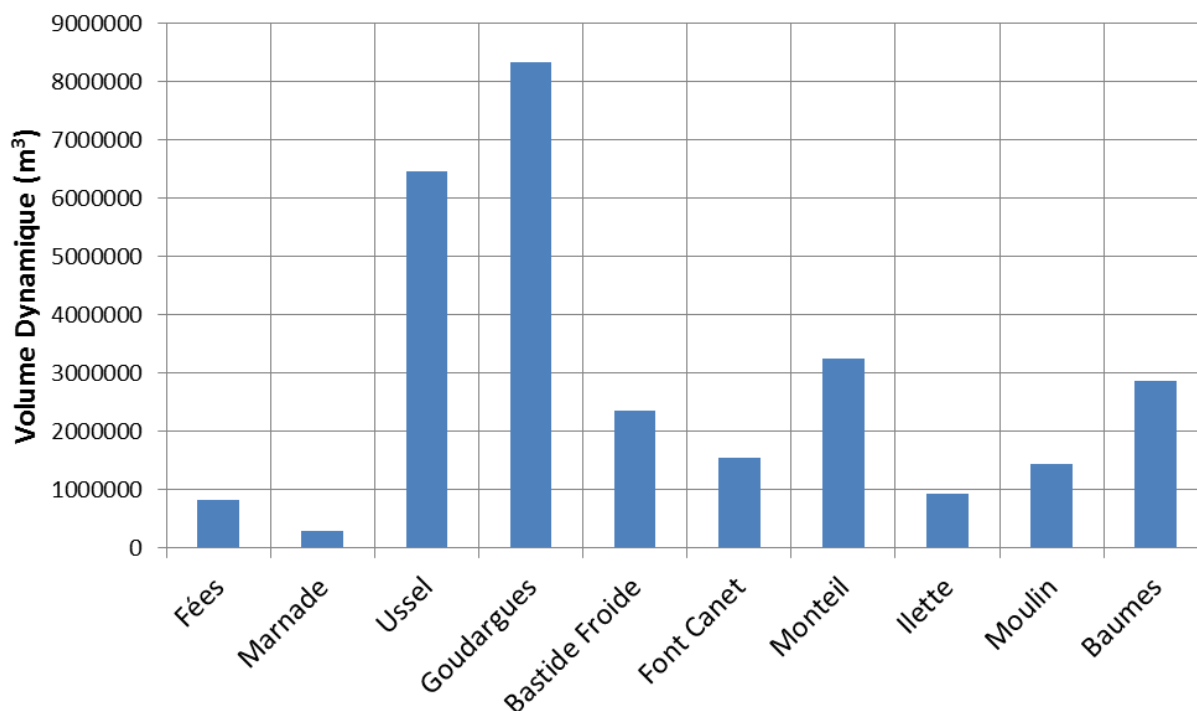


Figure 4 : Volume dynamique des sources en phase de tarissement calculé pour l'année 2015.

Pour les sources non influencées par la rivière il pourrait être intéressant de ramener ces volumes à une surface de bassin versant d'alimentation. Par exemple, si on considère une surface d'aire d'alimentation de 20 km<sup>2</sup> pour la source de Goudargues, la lame d'eau représentant les volumes d'eau potentiellement mobilisables en phase de tarissement serait d'environ 400 mm, ce qui constitue un ordre de grandeur cohérent pour la recharge. L'incertitude sur l'estimation des surfaces des aires d'alimentations est cependant trop importante pour prendre ce résultat pour acquis.

### 1.1.2.ii. Rivière

- Jaugeages différentiels : bilan par tronçons

Les différentes stations de jaugeage en rivière sont présentées en Carte 2, elles permettent de circonscrire cinq tronçons. Le premier tronçon entre les pk 0 et 5 encadre les pertes de Rohegude ; le second tronçon entre les pk 5 et 14 encadre les sources des Féés, Foulatier, Vanmâle, Font Canet et Force Mâle ; le troisième tronçon encadre les pertes de Baume Salène ; le quatrième tronçon encadre les sources de Monteil, Ilette, Moulin, Baumes et Marnade ; le cinquième tronçon encadre les sources d'Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide. La Figure 5 représente pour chacun des tronçons et pour les 4 campagnes de mesures (avril, juin, juillet et août), en histogramme de couleur bleu le bilan des jaugeages en rivière (positif en cas d'apport et négatif en cas de pertes) et en histogramme de couleur rouge la somme des débits apparents des sources du tronçon considéré.

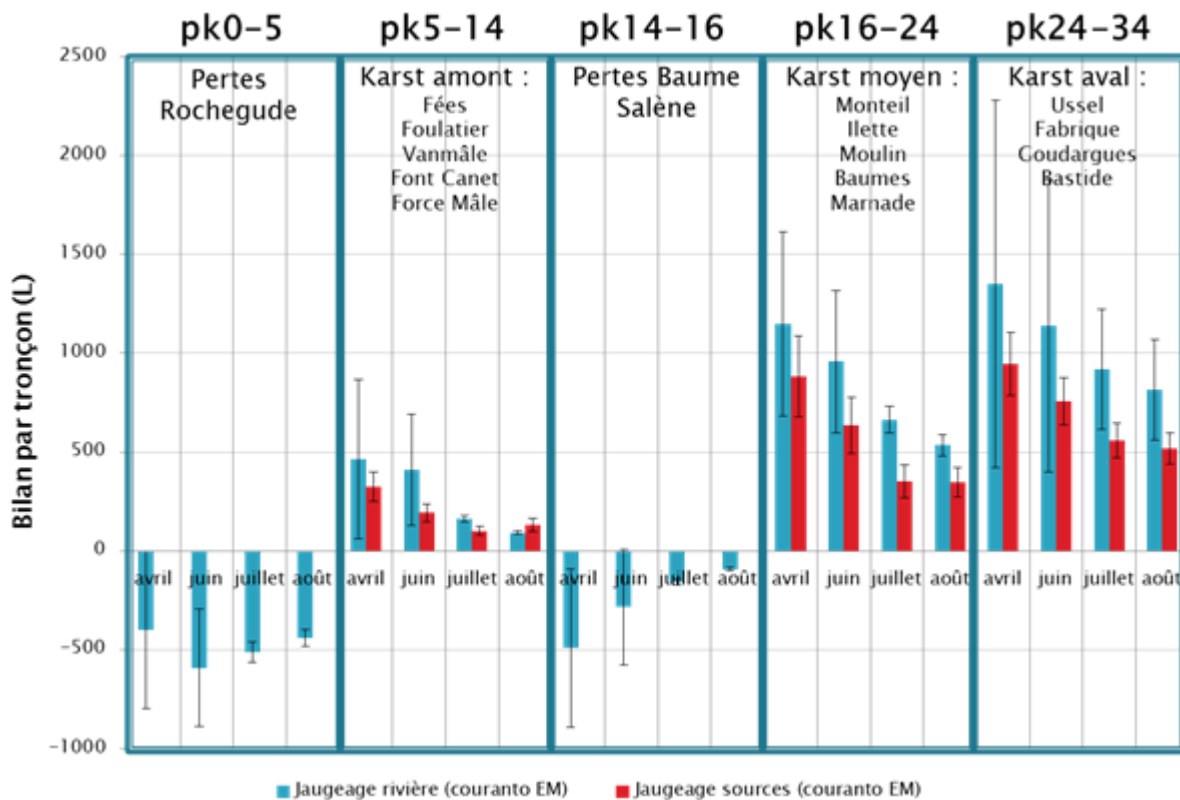


Figure 5 : Bilan par tronçon des gains et pertes de la Cèze pour les situations hydrologiques d'avril, juin, juillet et août 2015.

Pour les tronçons de rivière alimentés par des sources (pk5-14, pk16-24 et pk24-34), les bilans réalisés en rivière (histogramme de couleur bleu) sont systématiquement supérieurs à la somme des débits apparents des sources (sauf pour le mois d'août du tronçon « karst amont »). Ce résultat peut s'expliquer de plusieurs manières :

- Existence de sous-écoulements et d'écoulements diffus à proximité des sources déjà connues. C'est notamment le cas pour les sources de Marnade, des Baumes et de la Fabrique ;
- Existence d'apports diffus ou de sous-écoulements entre les sources déjà connues. C'est probablement le cas entre les pk 5 et 7 où des anomalies thermiques avaient été repérées en imagerie IRT aéroportée (voir rapports précédents) ;
- Existence de sources ponctuelles non connues. C'est notamment le cas de la source de l'Illette qui n'avait pas été décrite avant les prospections par imagerie IRT aéroportée.

Ces différences sont significatives et peuvent représenter des débits importants (par exemple plus de 400 L/s pour le tronçon « karst aval »). Le jaugeage au niveau des sources apparaît alors comme insuffisant pour quantifier les apports d'origine karstique. Les jaugeages différentiels en rivière sont alors beaucoup plus fiables pour estimer de tels apports.

Pour les pertes de Rochegude (pk0 – 5) bien que les incertitudes de calculs soient fortes pour les mois d'avril et juin, on remarque que les pertes augmentent entre ces deux mois, elles passent de 400 L/s à 592 L/s soit une augmentation de 48 %. Sans sur-interpréter ces résultats, on peut imaginer qu'en avril, le karst est pratiquement saturé, les débits de pertes seraient alors limités par une relation de charge hydraulique constituée par la hauteur d'eau de la rivière et l'état hydrique du karst. En juin, le karst ayant déjà partiellement drainé ses eaux pour se trouver en situation sous-saturée, les débits de pertes en rivière pourraient alors augmenter (dans la limite imposée par les capacités d'infiltration des pertes). De juin à août, les débits de pertes ont tendance à diminuer, ils passent de 592 L/s à 440 L/s, ceci est directement lié au fait que le débit amont de la rivière ne suffit plus à satisfaire la capacité d'infiltration du karst. En effet, dès mi-juillet 2015, on observe un assec complet de la rivière en aval des pertes. L'intégralité du flux s'écoule en souterrain et le débit de la rivière à l'amont des pertes continue de diminuer jusqu'à mi-

août. Il va de soi que lorsque les débits de pertes de la rivière diminuent, l'influence est ressentie au niveau des sources sous dépendance de la rivière (Font Canet, Moulin, Ilette, Monteil et Baumes).

Pour le tronçon « karst amont » (pk5-14) les apports sont modestes et déclinent très vite entre avril et août, ils passent de 465 L/s à 93 L/s soit une diminution de 80 %. Des apports diffus sont suspectés entre les pk5 et 7 en aval de la source des Fées. Il faut également noter qu'une partie des apports sur ce tronçon n'est pas d'origine karstique. En effet, les eaux de la source de Font Canet sont majoritairement issues des eaux de perte de la rivière Cèze (démonstré par traçage naturel et artificiel).

Pour les pertes de Baumes Salène (pk14-16), elles diminuent progressivement d'avril à août passant de 491 L/s à 93 L/s et semblent essentiellement conditionnées par le débit de la rivière en amont ce ces pertes. Pour juillet et août le flux en rivière en aval des pertes est presque nul voir nul (moins de 4 L/s en juillet et 0 L/s en août).

Pour le tronçon « karst moyen » (pk16-24) les apports sont beaucoup plus important que pour le tronçon « karst amont » mais demeurent toujours inférieurs à ceux du « karst aval ». Le débit d'apport passe de 1149 L/s en avril à 535 L/s en août soit une diminution de 53 %. Comme pour le tronçon « karst amont », une part non négligeable des débits provient des pertes de la rivière en avril, cette part devient largement majoritaire en juillet et août. Ce tronçon (« karst moyen ») collecte à la fois les eaux de pertes de Rochegude (Monteil et Baumes) et à la fois les eaux de pertes de Baumes Salène (Moulin et Ilette ?). Ainsi, l'intensité des apports est à moduler pour ce tronçon.

Pour le tronçon « karst aval » (pk24-34) les apports sont les plus importants et ils ne sont pas influencés par les pertes de la Cèze (démonstré par la géochimie). Ils passent de 1349 L/s à 815 L/s soit une diminution de seulement 40 % entre avril et août. La Figure 6 illustre le rôle du tronçon « karst aval » par rapport aux apports karstiques totaux. Ce tronçon représente 65 % des apports totaux en avril et jusqu'à 90 % des apports en août.

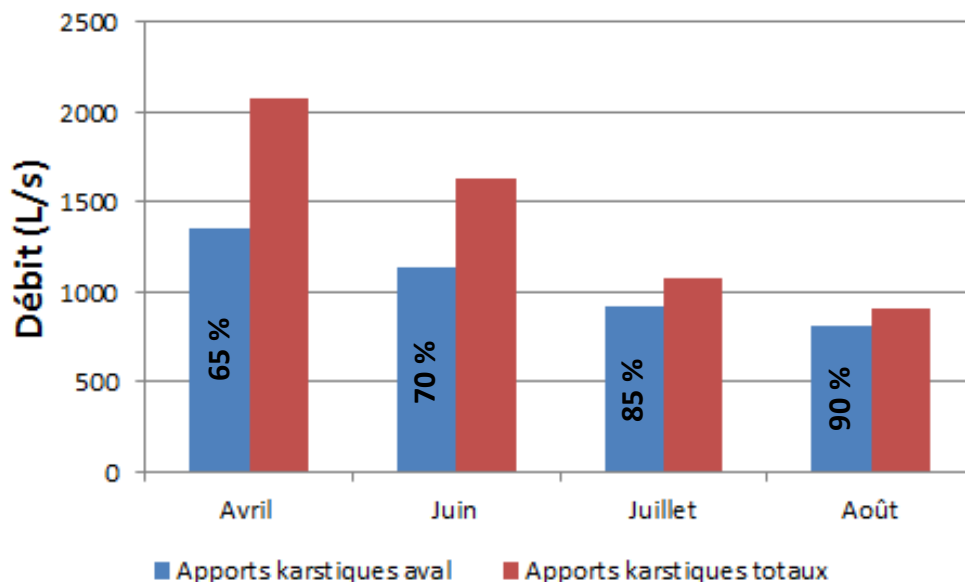


Figure 6 : Apports d'origine karstique à la rivière Cèze : comparaison entre apports totaux et apports « karst aval ».

- Profil de débit de la rivière et rôle du karst

La Figure 7-A illustre le profil de débit de la Cèze depuis l'amont des pertes jusqu'à la partie aval du karst tandis que pour la Figure 7-B, la valeur initiale de débit à l'amont des pertes de Rochegude est soustraite à l'ensemble des stations de mesure le long du profil. Cette soustraction permet de représenter directement le rôle du karst sur le débit de la rivière (Figure 7-B). Les carrés de couleur verte représentent les stations jaugées, les carrés de couleur rouge représentent le débit de la rivière incrémenté du débit de la source correspondante. La partie amont du karst est déficitaire une grande partie de l'année (au moins entre avril et août). Il redevient excédentaire dans la partie aval entre les pk 17 et 26 suivant la période de l'année. A l'aval du domaine karstique, la part d'eau d'origine karstique (sans l'influence des pertes) représente 49 % du débit en avril et monte jusqu'à 67-68 % en juillet et août.

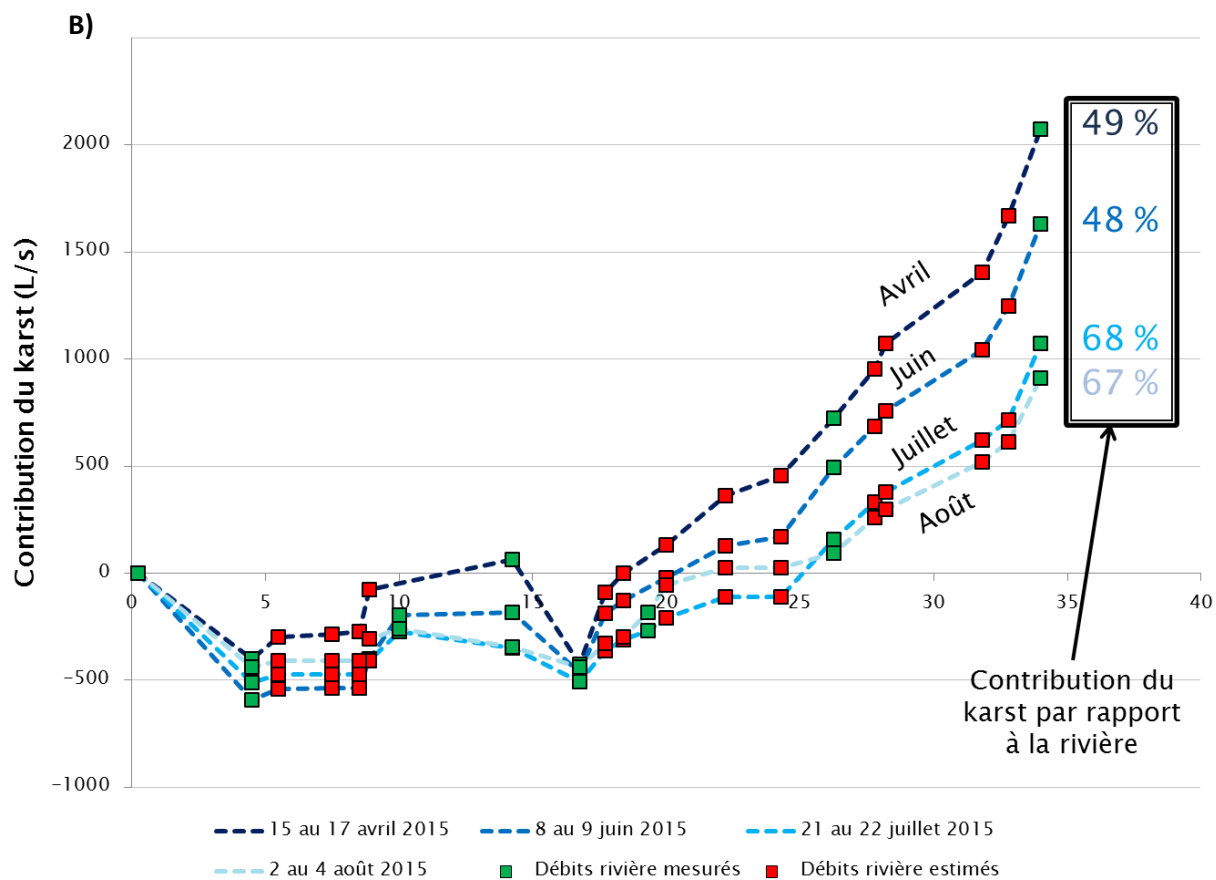
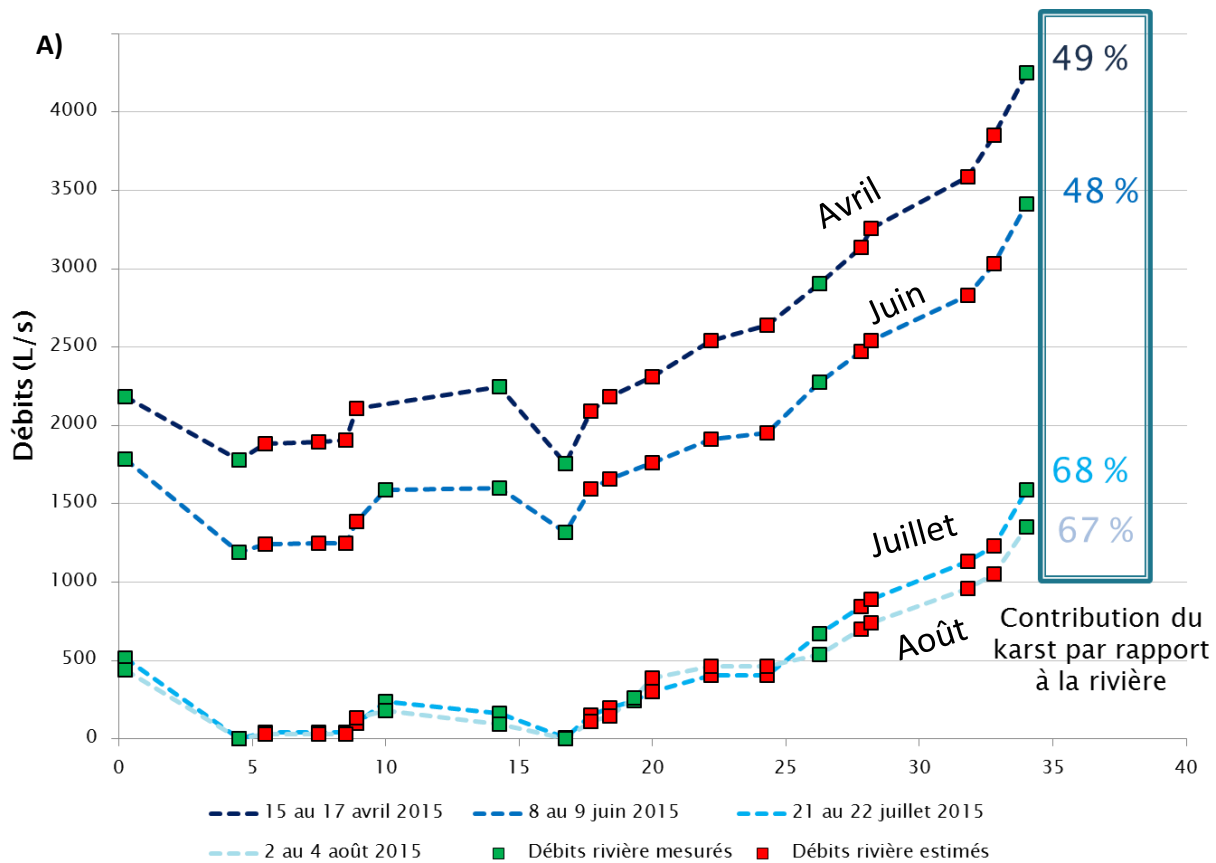


Figure 7 : A) Profil de débit de la rivière Cèze ; B) Rôle du karst sur la rivière (débit initial soustrait).  
Les campagnes de jaugeages représentées correspondent aux périodes du 15 au 17 avril 2015, du 8 au 9 juin 2015, du 21 au 22 juillet 2015 et du 2 au 4 août 2015.



- Tarissement du karst

De la même manière que pour les sources, des fonctions exponentielles décroissantes ont été ajustées pour obtenir les coefficients de tarissement du karst (Figure 8) et des différents tronçons (Figure 9) contenant les sources (pk5-14 ; pk16-26 ; pk26-34).

Les Figure 8 et Figure 9 présentent les détails de l'ajustement de fonction en considérant deux scénarios de conditions initiales correspondant à deux événements de recharge distincts. Suivant les conditions initiales considérées, les coefficients  $\alpha$  ainsi que l'allure des courbes de tarissement (Figure 8 et Figure 9) varient. Bien que présentant d'importantes incertitudes, ces ajustements permettent d'encadrer le comportement global du karst au cours du tarissement (Figure 8) en l'absence de précipitation.

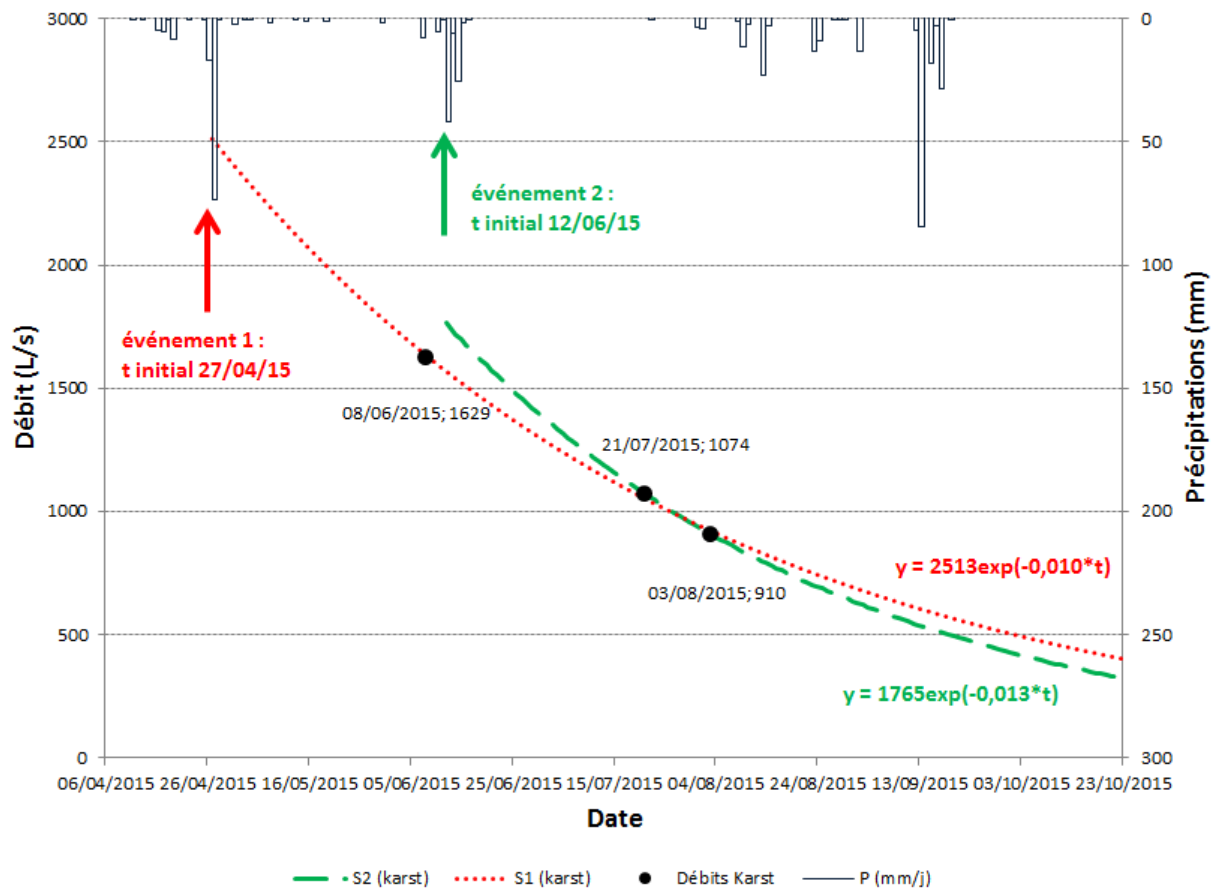


Figure 8 : Ajustement de fonctions exponentielles décroissantes pour modéliser le tarissement du karst en prenant pour scénarios de conditions initiales deux événements de recharge par les précipitations.

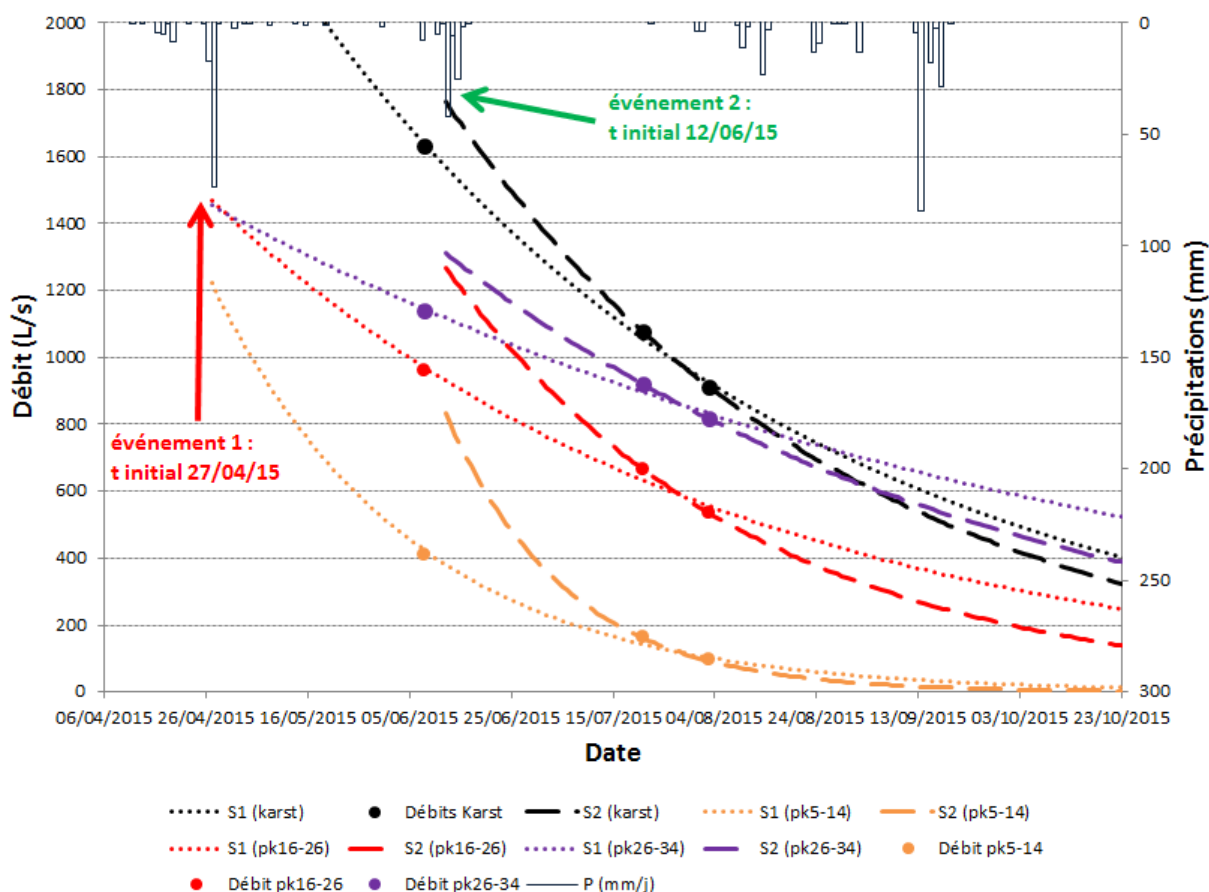


Figure 9 : Ajustement de fonctions exponentielles décroissantes pour modéliser le tarissement du karst et des tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34 en prenant pour scénarios de conditions initiales deux événements de recharge par les précipitations

La Figure 10 présente les coefficients de tarissement du karst et des différents tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34 en considérant le deuxième événement pluvieux (12/06/15). Cette figure, permet de comparer de manière relative les tronçons les uns vis-à-vis des autres. Comme il a été vu précédemment, le tronçon pk5-14, contenant les sources des Fées, de Foulatier, de Vanmâle, de Font Canet et de Force Mâle, possède le coefficient  $\alpha$  le plus élevé. Ce qui signifie que la capacité de régulation des débits par ce tronçon du karst est assez limitée, la gamme de variation de débit est très importante et les valeurs d'étiage sont très faibles (Figure 9). Pour le tronçon pk16-26, contenant les sources de Monteil, de l'Ilette, de Moulin, des Baumes et de la Marnade, le coefficient  $\alpha$  est beaucoup plus faible que pour le tronçon pk5-14 mais demeure plus élevé que pour le tronçon pk26-34. Ce coefficient intermédiaire est lié à l'influence de la rivière qui régule le débit des sources de Moulin, de l'Ilette, de Monteil et des Baumes mais aussi par un apport important du karst sous couverture priabonnaise en rive gauche par l'intermédiaire des sources de Monteil et des Baumes. Pour le tronçon pk26-34, le coefficient  $\alpha$  est le plus bas, il reflète la grande capacité de régulation des écoulements avec des gammes de variation de débits assez faibles et un débit d'étiage qui reste assez élevé (Figure 9).

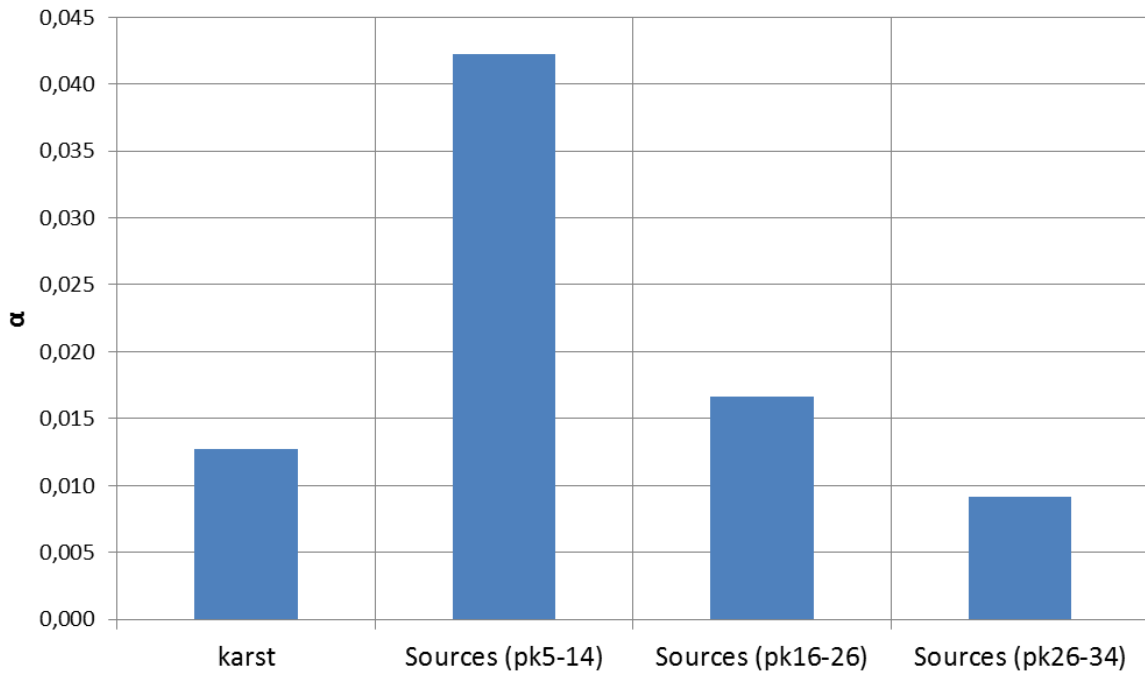


Figure 10 : Coefficients de tarissement  $\alpha$  déduits des ajustements de fonctions exponentielles après le 2<sup>ème</sup> évènement pluvieux (Figure 8 et Figure 9) pour le karst et les tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34.

- Volumes dynamiques :

La Figure 11 présente les volumes dynamiques calculés pour les tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34. Cette figure illustre le fait que les volumes potentiellement mobilisables lors de la phase de tarissement croissent à mesure qu'on se déplace vers l'aval de la Cèze. Il est intéressant de noter que pour les tronçons pk5-14 et pk16-26 les volumes dynamiques calculés prennent en compte l'apport issu de la rivière.

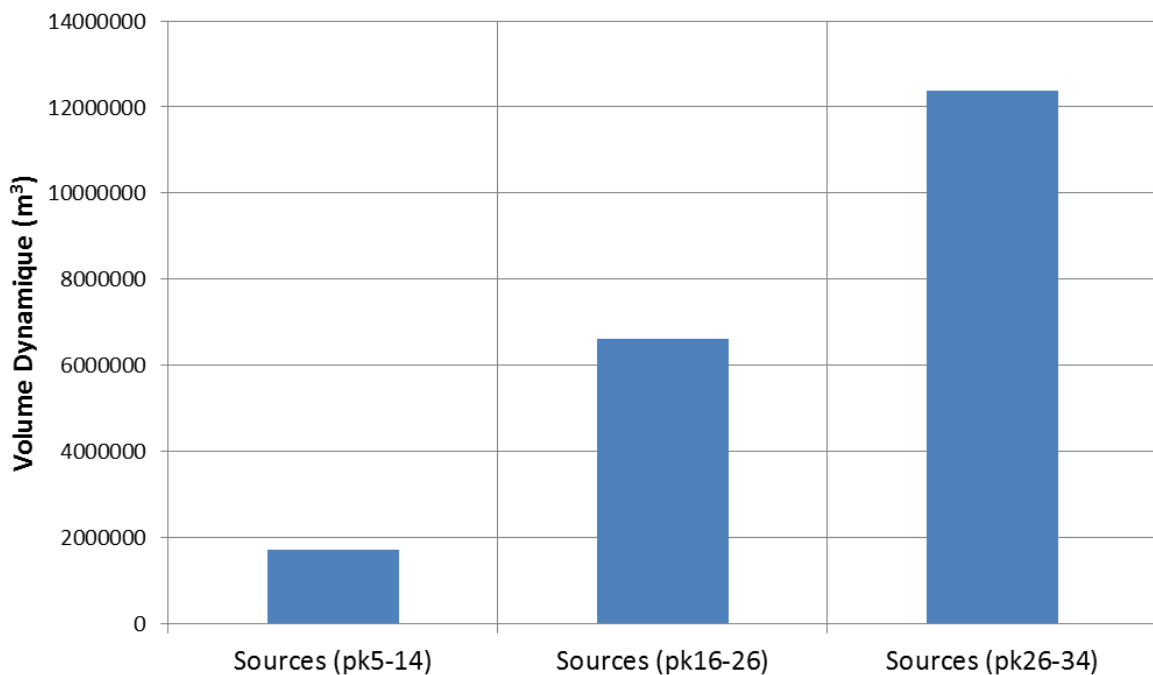


Figure 11 : Volumes dynamiques calculés pour les tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34.

## I.2. Détermination d'une typologie des sources par analyse fréquentielle

Dans les précédents rapports d'avancement, les principes des différentes méthodes de traitement de la base de données des sondes LTC avaient été décrits. Il s'agit notamment des analyses fréquentielles, des autocorrélations, des corrélogrammes croisés ainsi que de la méthode des débits classés.

### I.2.1. Analyse fréquentielle de la conductivité électrique des sources

La méthode d'analyse de la fréquence en tant que probabilité de distribution permet de classer les hydrosystèmes en fonction de leurs écoulements à partir des courbes de distribution des paramètres physico-chimiques. La Figure 12 présente une distribution fréquentielle de la conductivité électrique des sources étudiées à partir des données obtenues par les sondes LTC F30M10 sur la période de septembre 2013 à avril 2016. Par rapport aux mesures de conductivité réalisées sur le terrain, sur la totalité des sources, les eaux qui ont une conductivité supérieure à 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sont des eaux d'origine karstique.

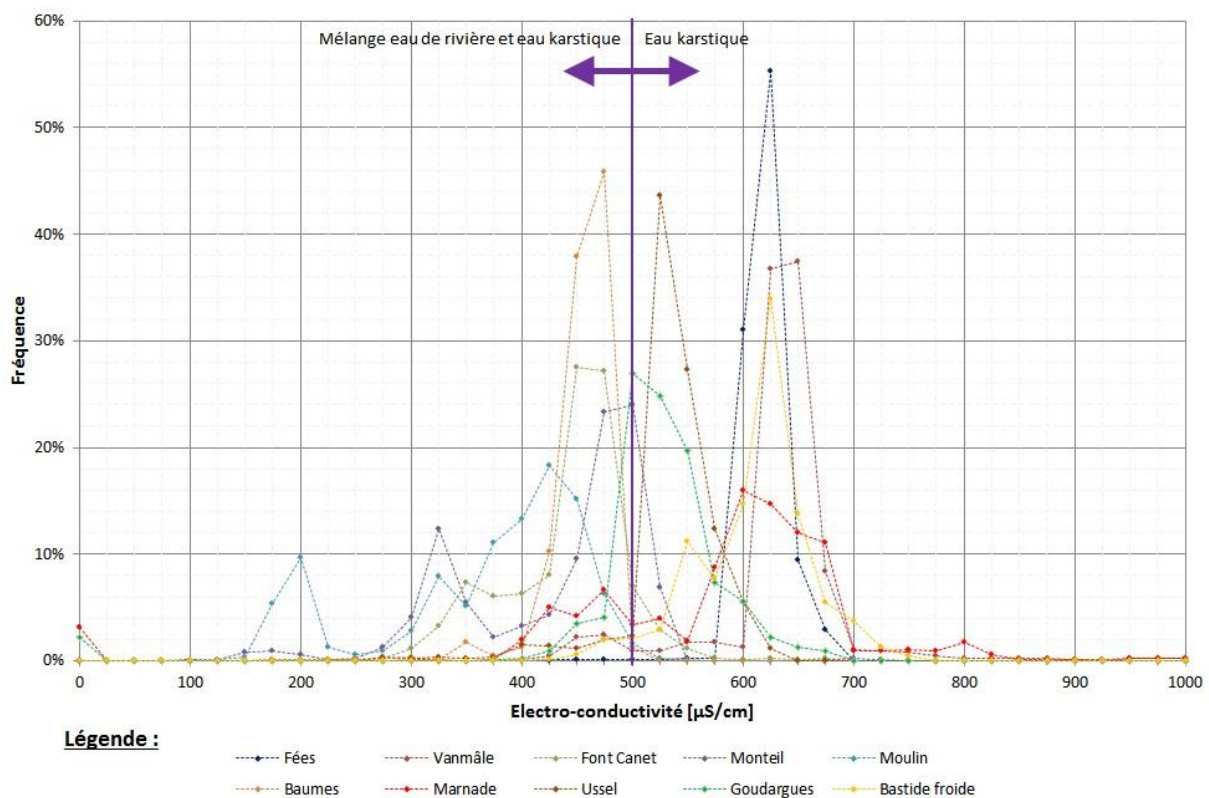


Figure 12 : Analyse fréquentielle des sources à partir des données de conductivité électrique enregistrées par les sondes LTC F30M10 sur la période du 09/2013 au 04/2016.

La courbe bleu foncé qui représente la source Fées est un très bon exemple d'une source karstique. Cette source présente un pic qui se traduit par une conductivité électrique très stable en fréquence. En effet, 90 % des conductivités mesurées à la source Fées sont comprises entre 600 et 625  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Il n'y a donc aucun effet de mélange avec une eau autre que karstique. La source Ussel présente le même profil que celui de la source Fées, cependant sa conductivité est généralement inférieure à celle des Fées. Comme sa valeur est toujours celle d'une eau d'origine karstique (entre 525  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) cela signifie que le réservoir et/ou l'aire d'alimentation qui alimente chacune de ces sources est différent. La forte valeur de conductivité peut témoigner d'un important réservoir karstique dans lequel les eaux infiltrées ont le

temps de se minéraliser au contact du calcaire. Les sources Font Canet, Monteil, Baumes et Moulin se distinguent par une fréquence qui présente deux pics. Les pics les plus importants sont proches de celui d'une eau d'origine karstique puisque leurs pics se trouvent dans une gamme de valeurs de 425  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette gamme de conductivités peut être associée au fait que dans ces sources s'écoule un mélange entre de l'eau karstique et une eau moins conductrice d'une autre provenance. Ces sources présentent toutes un second pic qui se rapproche de la valeur de conductivité électrique de la Cèze, entre 325  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ce résultat confirme ceux obtenus par les traçages artificiels. Les sources Font Canet, Monteil et Baumes drainent des eaux de la Cèze infiltrées en amont au niveau des pertes de Rochegude. La source Moulin est un cas particulier car elle présente un troisième pic avec une conductivité d'eau de surface, de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette source qui se situe en rive droite de la Cèze à la sortie d'un méandre doit assurément drainer les eaux de la Cèze qui s'infiltrent au niveau des pertes de Baumes Salène, en amont du méandre. Dans ces pertes, la quantité d'eau infiltrée dépend du débit la Cèze. En fonction du débit d'eau qui s'infiltré, le mélange entre eau karstique et eau de la Cèze à l'exutoire de Moulin est plus ou moins important et donc la conductivité électrique est également plus ou moins importante. De la plus petite conductivité à la plus forte, les pics de fréquences sont respectivement représentatifs d'une période de sécheresse, de hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux.

## **I.2.2. Analyse fréquentielle de la température des sources**

Les eaux souterraines possèdent une température stable comprise entre 13 °C et 14 °C. Dans l'analyse fréquentielle des températures (Figure 13), une grande majorité des sources ont des températures comprises dans cette gamme de valeurs : Fées, Vanmâle, Font Canet, Monteil, Baumes, Marnade, Ussel et Bastide Froide. Néanmoins, certaines sources présentent des températures qui sont en dehors de la gamme des eaux d'origine karstique. C'est le cas pour les sources Font Canet et Monteil pour lesquelles la fréquence d'avoir une eau qui s'écoule à une température de 15 °C, anormalement chaude pour une eau karstique, est de 28 %. Ce marqueur thermique corrobore les résultats de l'analyse fréquentielle de l'électro-conductivité et l'interprétation qui en a été faite. Cette variation de la température est due au mélange des eaux d'origine karstique avec les eaux de surfaces qui s'infiltrent en amont.

Encore une fois, la source Moulin présente une particularité, il est presque autant probable de mesurer une eau à 10 °C, qu'une eau à 19 °C. Du fait que beaucoup d'eau infiltrée dans les pertes de Baumes Salène transite par la source Moulin, il est possible que ces eaux influent grandement sur la température du mélange eau karstique/eau de rivière. Au fil des saisons, l'eau de la Cèze varie dans une gamme de valeur de 8 °C à 24 °C. L'analyse fréquentielle de la température de la source Moulin fait hypothétiquement apparaître des variations saisonnières de température.

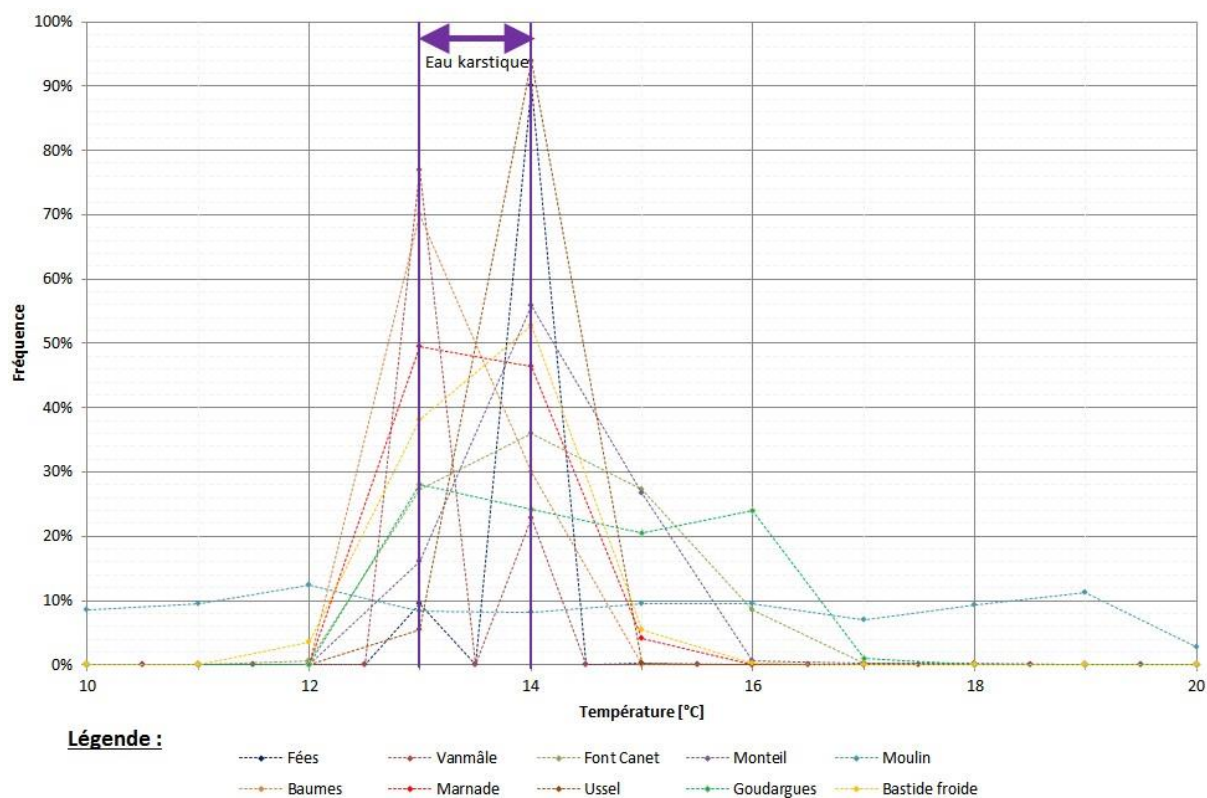


Figure 13 : Analyse fréquentielle des sources à partir des données de température enregistrées par les sondes LTC F30M10 sur la période du 09/2013 au 04/2016.

Ces analyses fréquentielles ont permis de déterminer l'hydrodynamisme de certaines sources mais certains résultats demeurent hypothétiques :

+ Avantages :

- Mise en évidence d'une diversité de fonctionnement des sources et définition d'une typologie (hydrodynamique, thermique, chimique) ;
- Identification des relations des sources avec la rivière ;
- Estimation des capacités de régulation du karst ;
- Mise en évidence de l'évolution hydrodynamique des sources en fonction des conditions hydriques de la rivière et du karst.

- Inconvénients :

- Difficultés pour quantifier les proportions de mélange des eaux du karst avec l'eau de la Cèze ;
- Problèmes d'interprétation de certaines particularités thermiques ou chimiques des sources.

### I.3. Fonctionnement hydrodynamique du karst analysé par la méthode des débits classés

Le choix de l'analyse s'est porté sur la source d'Ussel du fait de la fiabilité des mesures de débits, de la longueur des chroniques de suivi hydrologique mais aussi de sa position particulière dans le bassin versant. En effet, elle représente assez bien le comportement du karst aval qui a une forte capacité de régulation des débits. La courbe de tarage est présentée en annexe 3, les valeurs de débits extrapolées ont été classées par tranche de 50 L/s. Les valeurs couvrent un cycle hydrologique du 01/10/2015 au 31/09/2016. Pour la source d'Ussel l'ensemble des valeurs de débits se répartissent selon trois droites de pentes différentes, pour les débits compris entre 160 L/s et 230 L/s ( $\alpha 1$ ), 230 L/s et 290 L/s ( $\alpha 2$ ) et supérieurs à 300 L/s ( $\alpha 3$ ) (Figure 14).

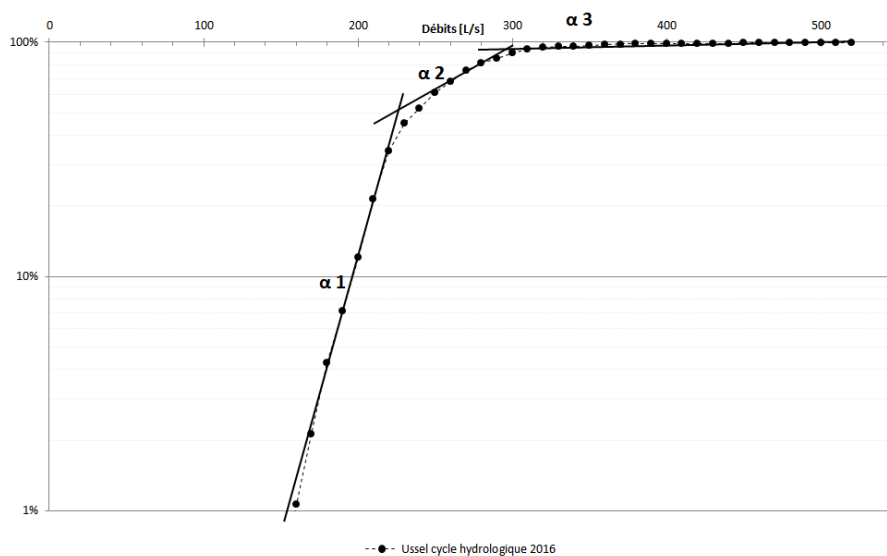


Figure 14 : Méthode des débits cumulés classés sur la source d'Ussel pour une période couvrant le cycle hydrologique de 2015 (du 10/2015 au 09/2016).

La première rupture de pente à 230 L/s, où la pente  $\alpha 1 > \alpha 2$ , signifie que les propriétés hydrauliques changent, le système karstique évacue plus facilement les eaux. Cette modification du comportement du système peut être traduite par :

- les conditions en entrée du système qui sont modifiées (mise en charge par les eaux qui transitent par l'épikarst en période de fortes précipitations) ;
- le comportement du système karstique qui change en fonction de son état hydrique. Pour les débits inférieurs à 230 L/s, l'aquifère karstique écrête l'effet de la pluie. Les débits qui dépassent ce seuil de 230 L/s correspondent à un effet piston et de vidange de ces réserves.

La seconde rupture de pente à 300 L/s, où  $\alpha 2 > \alpha 3$ , située dans les forts pourcentages de débits doit sans doute correspondre à un apport provenant d'un autre système étant donné que dans ce contexte le karst est saturé et ne peut pas restituer plus d'eau que lors de la première rupture de pente.

Les avantages et inconvénients de cette méthode sont les suivants :

+ Avantages :

- Donne une interprétation sur le fonctionnement du système karstique ;
- Mise en évidence de l'évolution du fonctionnement du système karstique en fonction de son état hydrique ;
- Ne nécessite pas de mesures très fines.

- Inconvénients :

- Nécessite au moins une année hydrologique de données ;
- Réaliser une courbe de tarage.

## **I.4. Corrélation entre la pluie et le débit de la source d'Ussel**

---

L'étude par analyse corrélatoire consiste à déterminer la dépendance d'évènements entre eux. En reprenant pour référence la source d'Ussel, on observe que ses données de débits sont assez bien corrélées avec celles des pluies du plateau de Méjannes-le-Clap (données MétéoFrance). Afin de comparer le fonctionnement hydrodynamique d'Ussel à celui des sources en rive gauche de la Cèze qui se distinguent par leur chimisme, le débit de la source de Monteil est aussi analysé. La source Monteil a été choisie car elle possède un bassin d'alimentation très grand au vu des traçages artificiels (source connectée à la grotte Flandin, les pertes du Roméjac et de la Cèze) et que sa courbe de tarage est satisfaisante (annexe 3).

Dans un premier temps, les données pluies de Méjannes-le-Clap et les débits de la source d'Ussel sont autocorrélés. La base de données utilisée s'étend du 18 mars 2013 au 21 septembre 2015.

### **I.4.1 Analyse corrélatoire simple pour les pluies de Méjannes-le-Clap**

L'analyse d'autocorrélation des précipitations sur le plateau de Méjannes-le-Clap présente un bruit blanc puisque le pic de corrélation est très fin (ne concerne qu'1 h sur l'axe des abscisses) et que le reste du signal ne présente aucune corrélation (Figure 15). Ce résultat signifie qu'aucune pluie n'est corrélée à une autre.



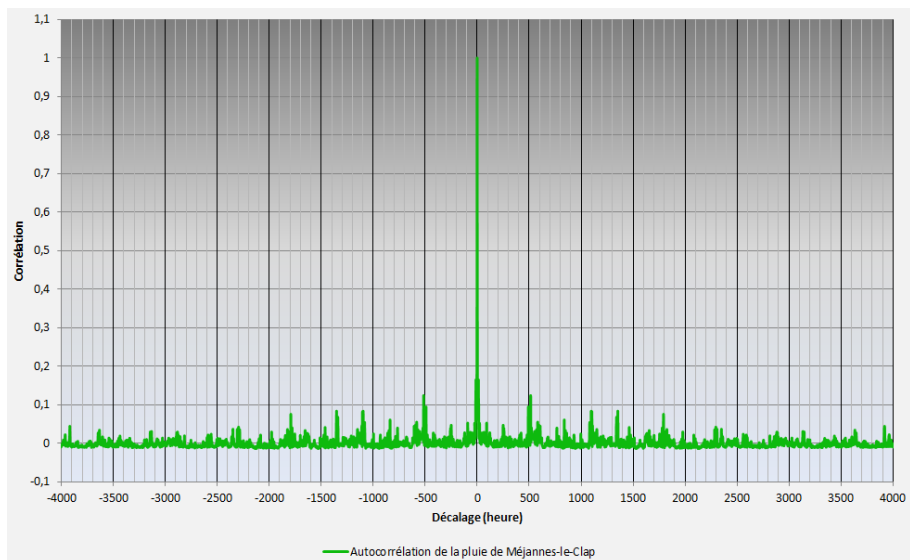


Figure 15 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de pluies de Méjannes-le-Clap obtenues par MétéoFrance.

#### I.4.2. Analyse corrélatoire simple du débit de la source d'Ussel

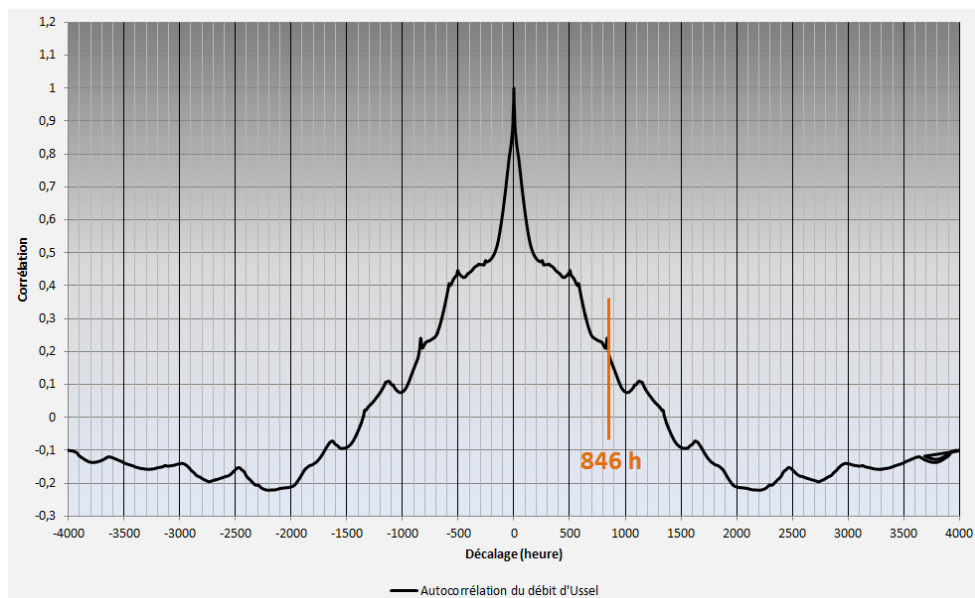


Figure 16 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de débits mesurées in situ de la source Ussel.

L'analyse autocorrélatrice du débit de la source Ussel indique que son débit est corrélé à lui-même durant un laps de temps de 846 h (soit environ 25 j). Cette limite est représentée par un trait orange (Figure 16). Le diagramme de l'analyse corrélatoire ne décroît pas rapidement et fait apparaître une pente plus douce avant de décroître. Cette caractéristique peut être significative du réservoir de l'aquifère. La source d'Ussel est hypothétiquement reliée à un système karstique très capacitif.

### I.4.3. Analyse corrélatoire simple du débit de la source Monteil

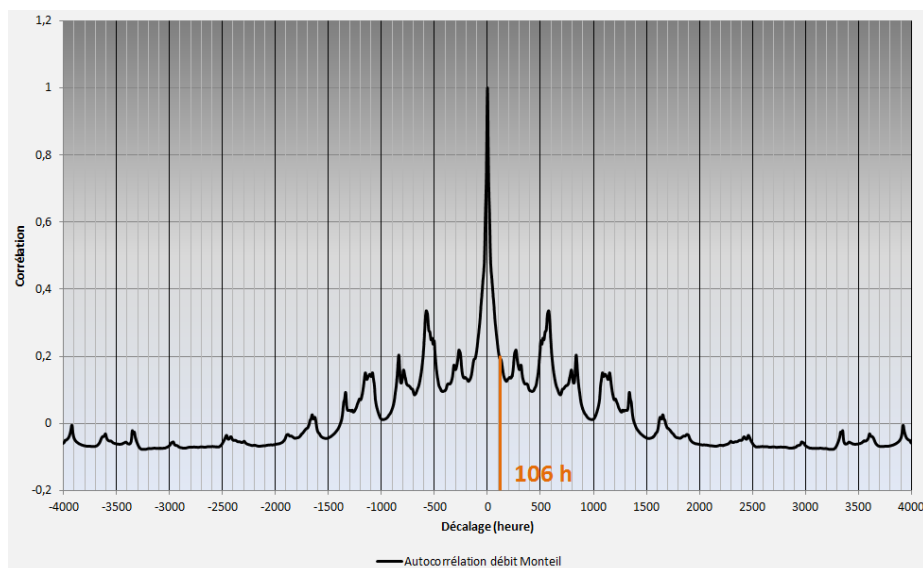


Figure 17 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de débits mesurées in situ de la source Monteil.

La source Monteil présente une particularité dans son fonctionnement hydrologique, puisqu'elle est approvisionnée par les eaux du karst et les eaux d'infiltration de la Cèze et du Roméjac, donne une réponse à l'analyse corrélatoire simple bien différente de celle d'Ussel (Figure 17). Elle décroît fortement ce qui laisse supposer que son système hydrologique est peu capacitif. Son débit est corrélé à lui-même durant une période de 106 h (soit un peu plus que 4 j) ce qui est 8 fois moins long que pour Ussel. Le système de la source Monteil draine rapidement les eaux infiltrées, il est assez transmissif. Son signal présente des oscillations correspondant probablement à la régularité d'épisodes pluvieux cévenols qui précipitent souvent à la même période.

### I.4.4. Analyse corrélatoire croisée entre les débits des sources Ussel et Monteil avec les pluies de Méjannes-le-Clap

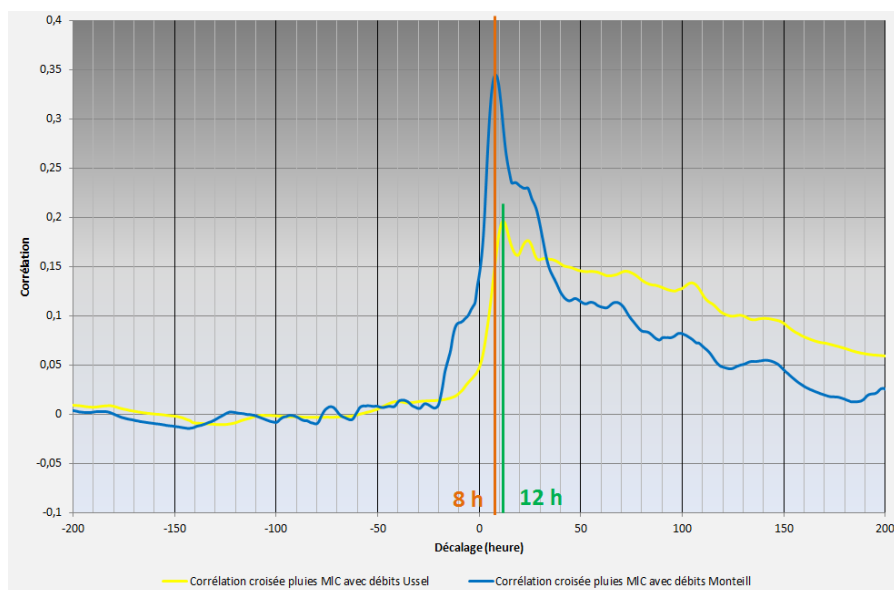


Figure 18 : Analyse corrélatoire croisée entre les débits des sources Ussel et Monteil et les pluies de Méjannes-le-Clap.

Dans cette analyse corrélatrice croisée, c'est l'influence des précipitations de Méjannes-le-Clap sur les débits des sources Ussel et Monteil qui est regardée (Figure 18). Si le pic de corrélation de la source Monteil s'élève à 0,34, celui de la source Ussel atteint tout juste la référence de 0,2 (limite théorique de corrélation d'après [Mangin, 1975]). Concernant la source Ussel, il n'y a pas de corrélation dans les décalages négatifs. La source Monteil en présente un léger. Cette partie du diagramme qui est de manière générale non-causale, montre que le débit de Monteil est influencé par des pluies un peu plus anciennes que pour Ussel, ou peut-être par des apports continus de la Cèze et du Roméjac. Le faible pic de corrélation d'Ussel peut être associé à la fonction capacitive du karst (effet mémoire du karst). En effet, le réservoir karstique peut jouer le rôle d'effet tampon ou de filtre et ainsi masquer la corrélation entre la pluie qui tombe sur le plateau de Méjannes-le-Clap et son exutoire, la source Ussel. Les pics de corrélation d'Ussel et Monteil atteignent respectivement leur apogée après un décalage de 12 h et 8 h. L'intensité pluvieuse se fait donc ressentir assez rapidement au niveau des sources. Néanmoins en période de crue, ce retardement peut suffire pour que l'eau émerge après le passage de l'onde de crue en rivière. Si une intensité pluvieuse dure au-delà de 12 h, il est possible que le karst contribue à amplifier l'onde de crue.

Ces analyses permettent de comprendre et de différencier le comportement du système karstique en différents points par rapport à une pluie.

+ Avantages :

- Compréhension du fonctionnement du système karstique relié à une source ;
- Différenciation de comportements du système karstique en différents points ;
- Estimation des temps de transit des eaux précipitées qui s'infiltrent.

- Inconvénients :

- Interprétation difficile si la corrélation n'est pas bien marquée ;
- Supposition sur le fonctionnement hydrodynamique d'un système karstique, pas plus de précision.

## **I.5. Conception et mise en œuvre d'un modèle par Réseaux neuronaux pour une approche du karst en tant que réservoir de remplissage et/ou de vidange**

---

La modélisation par réseaux de neurones a été envisagée selon différentes pistes. L'exposé de ces différentes pistes n'est pas destiné à retracer les difficultés inhérentes au processus de modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières auxquelles nous nous sommes confrontées. Il était cependant nécessaire d'explorer différentes solutions potentielles.

### **I.5.1. Hypothèse initiale de modélisation : reproduire le débit des sources en commençant par celle d'Ussel (source aval déjà équipée)**

Dans un premier temps, il était prévu de réaliser un modèle de l'hydrosystème karstique directement avec les données recueillies à l'aide des sondes autonomes CTD placées dans les sources karstiques recensées sur la Cèze avec, en entrée : (i) l'évapotranspiration (ETP), les pluies à Méjannes-le-Clap (MIC) et à Salindres, (iii) le débit en amont des gorges à la station de Pont de Rivières. Dans un second temps, les chroniques de température et de conductivité de la source d'Ussel auraient été rajoutées en entrée pour voir si les résultats étaient meilleurs en précisant les apports du karst.

Le but était de reproduire en sortie de modèle le débit de la source d'Ussel qui est représentative du comportement de l'aquifère karstique puisqu'elle donne un signal retardé et tamponné suite à un événement pluvieux et pouvant être lié à un réservoir karstique développé. De plus, pour cette source les données sont fiables et elle est rarement submergée par les eaux de la Cèze (sauf en cas de fortes crues).

Malheureusement, à l'époque (en 2014), nous ne disposions pas d'une année hydrologique complète, le modèle n'avait donc pas assez de données pour fonctionner correctement et produire de bons résultats. Même si on dispose de données plus complètes, il s'avère plus intéressant de modéliser le comportement global du système karstique en intégrant les débits à l'amont et l'aval de la rivière et celle de la source d'Ussel.

### **I.5.2. Seconde hypothèse : modéliser le comportement de la rivière avec l'apport des débits de la source d'Ussel**

La seconde idée consistait à modéliser le comportement de la rivière avec l'apport de données karstiques grâce aux données de débits de la source d'Ussel qui, comme indiqué dans le chapitre précédent est assez représentative du niveau d'eau dans le karst. Les entrées du modèle sont (i) l'ETP, (ii) les pluies à MIC et Salindres, (iii) le débit en amont des gorges et (iv) le débit de la source d'Ussel.

Dans ces conditions, nous disposions de chroniques de débits de la rivière suffisamment longues, puisque le débit y est mesuré depuis plusieurs décennies à des stations de mesures qui font partie de la banque hydro.

La modélisation du débit de la Cèze en sortie des gorges karstiques avec les débits de la source d'Ussel plus représentative du fonctionnement du karst avait pour objectif d'améliorer le fonctionnement du modèle neuronal. Malheureusement, la trop courte chronique des débits de la source d'Ussel n'a pas permis cette amélioration.

### I.5.3. Troisième possibilité : modélisation du débit de la Cèze à l'aval des gorges à l'aide d'un indice de l'état hydrique du karst

La troisième piste reposait sur un indicateur permettant de connaître et de qualifier simplement si à un instant « t » le karst était plus en mesure de contribuer à la montée des eaux en rivière ou au contraire à tamponner un signal pluvieux. Nous avons appelé cet indicateur : indice de l'état hydrique de l'hydrosystème karstique.

Celui-ci se base sur les données recueillies à la source d'Ussel et aux pluviomètres de MétéoFrance. Sur les chroniques de pluie du pluviomètre de Méjannes-le-Clap et de débit de la source d'Ussel, toutes les précipitations égales ou dépassant 4 mm de lame d'eau sont recensées. Au total, 74 évènements ont été dénombrés. Pour chaque évènement, plusieurs informations sont déterminées (i) volume d'eau précipité, (ii) intensité de la précipitation, (iii) intensité maximale de la précipitation, (iv) centre de gravité de l'hydrogramme de pluie, (v) cumul de pluie précédent l'évènement, (vi) débit initial à la source d'Ussel, (vii) hauteur d'eau initiale à la source d'Ussel (viii) volume d'eau total transité par la source, (ix) volume de l'hydrogramme de la source d'Ussel, (x) centre de gravité de l'hydrogramme de la source, (xi) débit maximal transité à la source.

Toutes ces données ont été croisées entre elles par corrélation multiple. À titre d'exemple, les variations du débit maximal de la source d'Ussel en fonction de l'intensité maximale de la pluie sur 1 heure se distinguent nettement selon le débit initial de la source. On peut donc dire que le débit de la source d'Ussel représente l'état hydrique du karst. En testant itérativement différentes gammes de valeurs du débit initial de la source d'Ussel, il est possible de dire aussi si le karst est en période de tarissement (variations faibles de la source d'Ussel en fonction de la pluie) ou au contraire de remplissage (variations fortes).

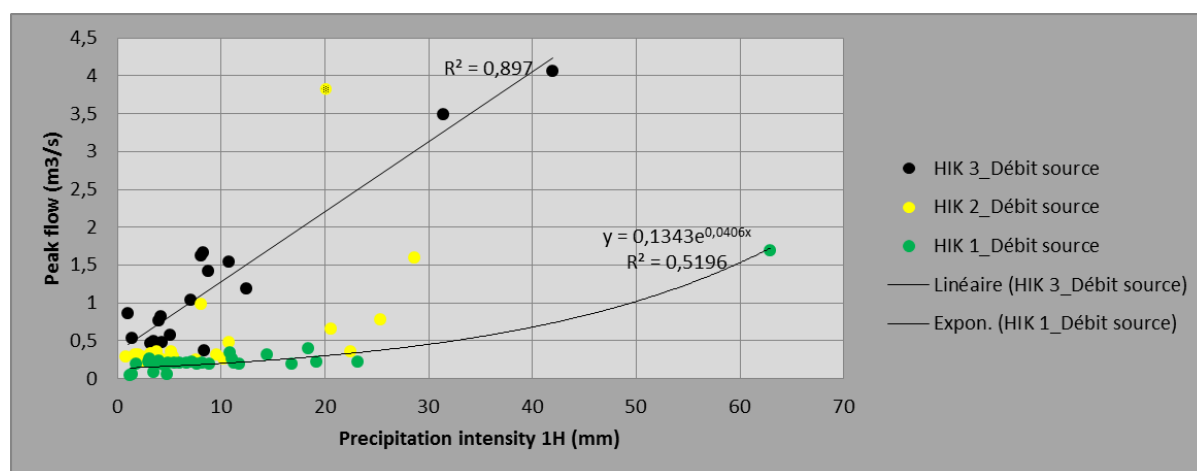


Figure 19 : Représentation du débit maximal que peut atteindre la source d'Ussel en fonction de l'intensité pluvieuse sur 1 heure selon le débit initial de la source d'Ussel. Les points verts représentent un système karstique en période de tarissement ; les points noirs représentent un réseau karstique en vidange ; les points jaunes sont des points intermédiaires entre ces 2 états. Les classes : HIK 1 = classe 1 ; HIK 2 = classe 2 et HIK 3 = classe 3 représentent respectivement l'état hydrique du karst (période de basses eaux à hautes eaux).

La Figure 19 représente le débit maximal qui transite par la source d'Ussel (en ordonnée) en fonction d'une intensité maximale de pluie en 1 heure qui s'est déversée sur le plateau de Méjannes-le-Clap (en abscisse). Si le nuage de points se distingue en 3 couleurs, vert, jaune et noir, c'est parce qu'une troisième variable est intégrée dans cette étude de données : le débit initial de la source d'Ussel qui s'écoulait à la source avant que l'évènement pluvieux ne vienne perturber celui-ci. Cet indicateur est nommé « HIK » et comporte 3 classes qui correspondent aux trois codes couleurs. De HIK 1 à HIK 3, respectivement ce paramètre représente un réseau karstique passant d'un état de remplissage à un état de vidange. Ce

paramètre s'obtient par itération après plusieurs tests. Le résultat obtenu sur la Figure 19 montre que la source d'Ussel se comporte différemment selon l'intensité des pluies. En effet, dans le cas où l'HIK est de valeur 1 le débit maximal de la source d'Ussel n'augmente pas fortement malgré une intensité de pluie élevée. Même si les points verts suivent une courbe de tendance de type exponentielle, seule une intensité de pluie supérieure à 60 mm en 1 heure fait décrocher le débit de la source ( $\approx 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) qui ne dépasse pas les  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  dans les autres cas. Sur le graphique, l'évolution des points noirs, correspondant à un HIK de type 3, est plutôt linéaire et le débit de la source d'Ussel s'incrémente approximativement de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  pour une amplification de 10 mm de précipitation en 1 h.

On peut ainsi représenter l'état hydrique du système karstique avec cet indice selon 3 classes (i) classe 1 = karst en période de basses eaux, (ii) classe 2 = karst en période de moyennes eaux (considérée comme période de transition entre les classes 1 et 3), (iii) classe 3 = hautes eaux. Il s'agit donc d'un bon outil pour renseigner le modèle sur le comportement de la rivière en fonction de l'influence du système karstique.

Le modèle comporte donc cette fois-ci en entrée (i) l'ETP, (ii) les pluies à MIC et Salindres, (iii) le débit en amont des gorges et (iv) l'indice de l'état hydrique. Le but est de reproduire le signal de la Cèze en sortie des gorges karstiques au niveau de la Roques/Cèze.

Malheureusement, au vu des résultats obtenus, le modèle comprend bien plus facilement l'évolution d'un signal comme un hydrogramme plutôt que ce genre d'indicateurs sous forme de classes. Peut-être que cette modélisation serait possible lorsque l'on souhaite recueillir en sortie un résultat également sous forme de classes (gammes de débits). Cette option ne permet donc pas d'améliorer vraiment la modélisation. L'indice hydrique du karst demeure cependant un élément intéressant mais il faut l'utiliser autrement.

#### **1.5.4. Quatrième solution : modélisation du comportement karstique vis-à-vis de la rivière**

Pour ce dernier essai de modélisation, la base de données contenant les mesures effectuées à l'aide des sondes autonomes CTD est devenue plus consistante car nous disposons dorénavant de trois cycles hydrologiques quasiment complets (mi-septembre 2013 à septembre 2016).

Concernant l'indice de l'état hydrique du système karstique, nous avons montré que ce n'était pas une donnée d'entrée pertinente pour le modèle. Nous l'avons donc remplacé par la chronique de débit de la source d'Ussel à partir duquel il a été construit.

Dans ce cas, la stratégie consiste à modéliser le comportement du karst en générant un signal de sortie montrant le rôle écrêteur (atténuation du débit de la rivière par remplissage du karst) ou amplificateur (vidange du karst et contribution à l'augmentation du débit de la rivière).

Pour cela, on utilise en entrée de modèle en entrée : (i) l'ETP, (ii) les pluies de MIC, Salindres et Génolhac, (iii) le débit de la Cèze à l'amont des gorges à Tharoux<sup>1</sup>, (iv) le débit de la source d'Ussel.

En ce qui concerne les données pluviométriques, on aurait pu utiliser les chroniques du pluviomètre de Tharoux plus proche du site d'étude ainsi que celles du pluviomètre de MIC mais elles ne sont pas gérées par MétéoFrance ce qui nécessite un traitement supplémentaire. Les données des pluviomètres de Goudargues et de St Privat de Champclos se sont quant à elles révélées inutilisables (dégradation, lacunes d'enregistrement, déplacement).

Le fonctionnement du modèle se déroule en 2 étapes successives : apprentissage et test. Le modèle fait son apprentissage à partir des données de la banque hydro et de la sonde CTD autonome installée à Ussel, il est ensuite testé pour reproduire la différence entre le débit aval et le débit amont de la rivière

=  $Q_{aval} - Q_{amont}$ . On ne modélise donc pas directement le débit de la Cèze, mais une différence de débit amont-aval et donc le comportement du karst vis-à-vis de la rivière.

Ensuite, on pourra essayer de voir si cette différence, à un instant t, correspond à un indice hydrique du karst tel que défini précédemment : classe 1\_ basses eaux, classe2\_moyennes eaux, classe3\_hautes eaux. C'est à ce niveau qu'il devient intéressant d'utiliser l'indice hydrique du karst à ce niveau.

### Structure du modèle RN (Figure 20)

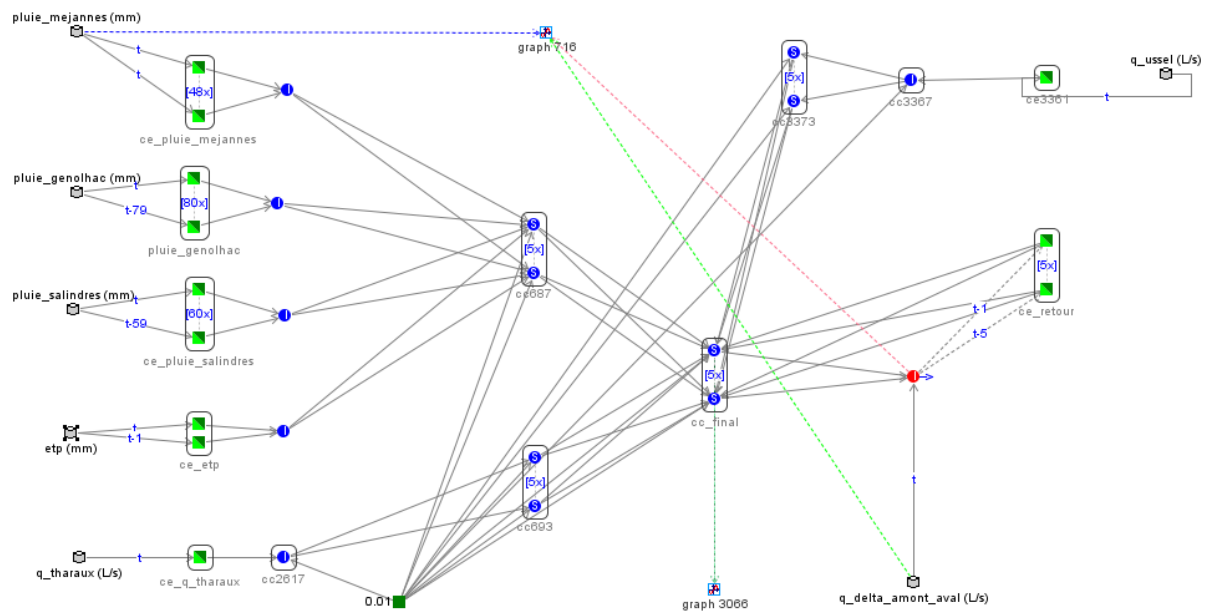


Figure 20 : architecture du modèle à partir du logiciel RNF Pro (développé par Dominique Bertin)

En vert sur le graphe, les données d'entrée : Pluies MLC, Salindres et Genolhac, Etp, Q Ussel et Q Tharoux

En rouge sur le graphe, les résultats : différence de débit amont-aval des gorges

Tableau 1 : Les données d'entrées renseignées au modèle et les résultats (provisoire)

Entrées						Sortie	date
pluie_mejannes (mm)	pluie_salindres (mm)	pluie_genolhac (mm)	etp (mm)	q_tharoux (L/s)	q_ussel (L/s)	q_delta_amont_aval (L/s)	
0	0	0	0,388331787	353,7518578	153,6059902	1632,827982	12/09/2013 00:00
0	0	0	0,387900265	352,3689417	152,5069606	1638,219678	12/09/2013 01:00
0	0	0	0,38746897	350,9927261	151,7793723	1643,604674	12/09/2013 02:00
0	0	0	0,387037902	349,623212	151,7958749	1648,982968	12/09/2013 03:00
0,0	0,0	0,0	0,508091425	0,00	205,2168987	1702,025723	30/08/2016 20:00
0,0	0,0	0,0	0,50761367	0,00	208,669649	1701,511254	30/08/2016 21:00
0,0	0,0	0,0	0,507136034	0,00	210,2067099	1700,996785	30/08/2016 22:00
0,0	0,0	0,0	0,506658516	0,00	212,9002431	1700,482315	30/08/2016 23:00

Ce Tableau 1 présente, sous forme de colonnes, les chroniques qui sont intégrées dans le modèle, avec en entrée les pluies de MIC, de Salindres, de Génolhac, l'ETP, le débit de la Cèze à Tharoux et le débit d'Ussel. En sortie nous obtenons la différence de débit de la Cèze entre l'amont (Tharoux) et l'aval des gorges (Roques sur Cèze). La modélisation est effectuée pour une chronique qui commence le 12/09/2013 et qui se termine le 30/08/2016.

Le logiciel RNF Pro utilisé pour la modélisation par réseaux de neurones évalue la performance du modèle avec le critère de Nash-Sutcliffe donné par la formule ci-dessous :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2}$$

Où  $\overline{Q_o}$  est la moyenne des différences de débits observées et  $Q_m^t$  est la différence de débits modélisée ( $Q\_delta\_amont\_aval$  dans le Tableau 1) au temps t.  $Q_o^t$  est le débit observé au temps t.

Tableau 2 : Résultats du modèle sans l'apport du débit d'Ussel en entrée

Modèle sans le débit d'Ussel						
Expérience	Ensemble	Sj(Validation)	Sq(Validation)	SqPic(Validation)	Sn(Validation)	Remarques
5	1	0,000535142	247701770,9	247701770,9	-0,030205845	-
5	2	0,000943593	436762032,5	436762032,5	0,175335125	-
5	3	0,000609842	282278182,1	282278182,1	0,205260759	-

Tableau 3 : Résultats du modèle avec l'apport du débit d'Ussel en entrée.

Modèle avec le débit d'Ussel						
Expérience	Ensemble	Sj(Validation)	Sq(Validation)	SqPic(Validation)	Sn(Validation)	Remarques
5	1	0,000419464	194168156,1	194168156,1	0,207835241	-
5	2	0,000659221	305150877,3	305150877,3	0,425232497	-
5	3	0,000569182	263472331,2	263472331,2	0,315842395	-

Les Tableau 2 et Tableau 3 ci-dessus, présentent respectivement les résultats du modèle sans le débit d'Ussel et avec. Le critère de Nash-Sutcliffe « Sn » qui exprime l'écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées a une valeur faible dans le Tableau 3 (0,2), elle est plus élevée quand le débit d'Ussel est introduit en entrée du modèle (0,42 pour la deuxième année hydrologique testée 2014-2015). Ce résultat signifie que le modèle reproduit plus efficacement les échanges entre le karst et la Cèze quand il intègre le débit de la source d'Ussel. De ce fait, la source d'Ussel est un bon point de suivi pour analyser le fonctionnement hydrique du karst, donc un bon choix pour la création de l'indice.

Il faut encore améliorer la modélisation pour réduire les écarts entre valeurs calculées et mesurées pour bien caler le modèle et d'autres calculs sont en cours avec modification du pas de temps journalier au lieu d'horaire plus adapté aux échanges karst-rivière. La prise en compte des incertitudes sur les valeurs de pluies données par MétéoFrance, les débits de la banque hydro, les hauteurs d'eau de la sondes CTD installée à la source d'Ussel ainsi que la précision de la courbe de tarage devraient aussi conduire à améliorer les résultats et à un meilleur calage.

Une fois le modèle neuronal calé au mieux, il sera possible d'effectuer des simulations de scénarios basés sur la diminution des précipitations et l'augmentation de l'ETP (selon les projections climatiques locales issues par exemple de DRIAS) pour évaluer les différences de débits à entre l'amont et l'aval des gorges et le rôle du karst. La simulation de scénarios avec des cumuls de pluie encore plus faible l'été mais peut-être plus forts l'hiver (recharge du karst) devrait permettre de savoir si la rivière perdra encore davantage de débit ou non.

Cette technique de modélisation, pour être efficace nécessiterait toutefois une base de données d'au moins 5 années hydrologiques ce qui permettrait de réaliser un meilleur apprentissage et un bon calage du modèle. A défaut de disposer d'une telle base de données, une comparaison avec les résultats qui pourraient être obtenus avec un autre type de modèle est prévue en phase 4. Il s'agit d'adapter et d'utiliser un modèle conceptuel de type « réservoir » permettant de représenter les différents compartiments de l'hydrosystème karstique étudié sous forme de réservoirs mobilisables au cours d'un cycle hydrologique : apports et recharge pluviométriques, débits en rivière, débits aux exutoires des sous-bassins versants et aux sources, stockage dans le karst. La méthode de simulation est basée sur des équations de bilan.



Cependant, une adaptation est à prévoir avec ce type de modèle pour prendre en compte le décalage artificiel des données de débits car l'utilisation d'un réservoir introduit forcément un décalage d'un pas de temps (journalier) qui n'existe pratiquement pas sur le bassin karstique de la Cèze où le pic de crue est synchrone avec le pic de pluie.

## I.6. Synthèse

---

### I.6.1. Fonctionnements hydrodynamiques

Les jaugeages différentiels ont permis de localiser des zones de pertes et d'apports, mais surtout ont permis de quantifier ces échanges karst/rivière. Les analyses fréquentielles ont permis de distinguer les sources entièrement reliées à un système karstique de celles qui sont soutenues par des apports d'eaux superficielles. Les méthodes par débits classés et les analyses corrélatoires ont permis de renseigner sur l'évolution du fonctionnement d'une émergence en fonction de son état hydrique et de quantifier un délai de transit entre l'eau infiltrée et son exutoire.

Le suivi hydrologique a fait ressortir l'importance des apports du karst sur la régulation des débits de la rivière Cèze. En août, ces apports karstiques s'élèvent à hauteur de 68 % du débit de la rivière. Ce résultat illustre la différence de contexte géologique entre la partie cévenole du bassin versant de la Cèze pas ou peu aquifère (origine essentiellement cristalline avec quelques petits aquifères localisés) par rapport à la partie située au niveau du canyon de la Cèze qui constitue un aquifère de grande ampleur (calcaires à faciès urgonien karstifiés).

Les analyses montrent également une grande variabilité des fonctionnements hydrodynamiques des sources dont certaines présentent de bonne capacité de régulation des débits (par exemple, Ussel, Fabrique et Goudargues) et une fonction capacitive importante, d'autres sources sont marquées par une fonction transmissive importante et peu de réserve (par exemple, Vanmâle et Force Mâle) tandis que certaines sources ont un fonctionnement mixte (par exemple Marnade et Bastide Froide). Certaines sources semblent avoir des bassins d'alimentations interconnectés (Ussel, Fabrique et Goudargues) tandis que d'autres sont clairement compartimentés (Fées, Vanmâle, Travers, Force Mâle, Marnade ? et Bastide Froide ?). L'aspect compartimenté ou non des bassins mériterait d'être mieux étudié en situation de hautes eaux et de crue, en effet, des réseaux de drainage perchés peuvent être momentanément remobilisés et peuvent mettre en communication des bassins entre eux. La rivière Cèze influence également le débit de nombreuses sources (Font Canet, Monteil, Ilette, Moulin et Baumes) dans des proportions plus ou moins importantes suivant la situation hydrologique.

Le terrain d'étude est aussi marqué par une forte dissymétrie entre l'amont et l'aval du domaine karstique soulignant le rôle important des sources situées à l'aval, il s'agit des sources d'Ussel, de la Fabrique, de Goudargues et de la Bastide Froide et dans une certaine mesure Marnade (sous-écoulements importants suspectés). En août, ces sources contribuent à 90 % des apports karstiques totaux. D'une manière générale, la vidange du réservoir karstique s'observe progressivement d'amont en aval avec un tarissement rapide dans les parties situées à l'amont et un tarissement lent pour les parties situées à l'aval. L'explication de cette observation est liée au fait que l'amont des gorges fonctionne préférentiellement en pertes tandis que l'aval du terrain étudié collecte l'ensemble des écoulements karstiques régionaux et l'ensemble des eaux de pertes. Pour la période d'avril à août 2015, les jaugeages différentiels indiquent clairement qu'il n'a pas de transfert d'eau du bassin versant de la Cèze vers d'autres bassins. Il pourrait être intéressant de vérifier cette observation pour des situations de hautes eaux et de crue. Les écoulements diffus du karst vers la rivière ainsi que les sous écoulement se sont révélés assez importants soulignant la pertinence des jaugeages différentiels pour les déceler.

Le Tableau 5 ci-après présente la synthèse des informations déduites du suivi hydrologique des sources.

Tableau 4 : Synthèse des informations sur l'hydrodynamisme des émergences karstiques au niveau du canyon de la Cèze (calcaires à faciès urgonien)

Localisation						Hydrodynamisme des émergences													
Nom	pk (km)	Rive	Xl93 (m)	Yl93 (m)	Z (m)	Type d'émergence	Type de source	Réseau de drainage	Fonctionnement hydrodynamique	Origine des eaux	EC (µS/cm) moyenne	T°(C) moyenne	Pérennité	crue max estimée (L/s)	hautes / moyennes eaux (L/s)	étiage (L/s)	sous-écoulement	coefficient de tarissement	Résistance à l'écoulement
Fées	5,0	Droite	805303,0	6350118,4	100,65	Exsurgence	Déversement	au dessus de l'exutoire	Libre	1) Aire alimentation karstique	595	13,6	Permanente	5000	70	30	probable	0,010	moyenne
Foulatier	7,25	Gauche	805840,9	6352203,6	97,96	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique	?	?	Temporaire	?	5	0	peu probable	?	faible
Vanmâle	8,3	Droite	806443,5	6352173,9	97,00	Exsurgence	Déversement	au dessus de l'exutoire	Libre	1) Aire alimentation karstique	620	13,5	Temporaire	?	5	0	peu probable	?	faible
Font Canet	8,7	Gauche	806590,7	6352584,9	96,10	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique	461	14,3	Permanente	225	130	55	peu probable	0,012	faible
Travers	9,9	Gauche	?	?	?	Exsurgence	Déversement	au dessus de l'exutoire	Libre	1) Aire alimentation karstique	?	?	Temporaire	?	1	0	peu probable	?	faible
Force Mâle	12,7	Droite	809707,1	6353025,8	91,31	Exsurgence	Déversement	au dessus de l'exutoire	Libre	1) Aire alimentation karstique	?	?	Temporaire	1000	?	0	probable	?	faible
Monteil	17,0	Gauche	812174,4	6353131,1	87,44	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Aire alimentation karstique 2) Cèze 3) Affluents rive gauche	499	14,1	Permanente	850	250	90	peu probable	0,012	moyenne
Ilette	18,2	Droite	812806,3	6353650,2	86,59	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique	?	?	Permanente	?	?	30	probable	0,010	faible
Moulin	19,9	Droite	813233,2	6352519,2	85,14	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique	434	16,3	Permanente	195	100	50	peu probable	0,005	faible
Baumes	22,0	Gauche	814255,8	6352780,1	82,39	Résurgence	Déversement soutenue par la rivière	au dessus de l'exutoire	Libre et soutenu	1) Aire alimentation karstique 2) Cèze 3) Affluents rive gauche	447	13,4	Permanente	180	150	80	très probable	0,007	forte
Marnade	23,8	Droite	815024,8	6351386,0	80,46	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire ou mixte	En charge ou mixte	1) Aire alimentation karstique 2) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	575	13,7	Temporaire	4300	50	0	très probable	0,048	faible
Ussel	27,7	Droite	815836,5	6348638,9	76,19	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire	En charge	1) Aire alimentation karstique 2) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	540	13,8	Permanente	1760	200	150	peu probable	0,004	forte
Fabrique	28,0	Droite	816362,3	6348574,8	74,29	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire	En charge	1) Aire alimentation karstique 2) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	485	14,6	Permanente	190	70	40	très probable	?	forte
Goudargues	31,1	Droite	817177,6	6347391,7	75,90	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire	En charge	1) Aire alimentation karstique 2) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	508	14,1	Permanente	690	250	220	peu probable	0,005	forte
Bastide Chaude	32,2	Droite	817501,5	6346050,9	?	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire	En charge	1) Aire alimentation karstique 2) hydrothermalisme? 3) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	517	21,0	Permanente	?	1	< 1	peu probable	?	moyenne
Baside Froide	32,4	Droite	817085,3	6346060,8	76,09	Exsurgence	Débordement (vauclusienne)	en dessous de l'exutoire	En charge	1) Aire alimentation karstique 2) remplissages karstiques / formations hauteriviennes ?	610	13,7	Permanente	> 6000	180	80	peu probable	0,013	moyenne



### **I.6.2. Perspectives pour l'analyse des suivis hydrologiques**

La base de données issue des sondes LTC n'est pas encore suffisamment exploitée. Les premiers traitements révèlent une grande richesse d'information à différents pas de temps (infra-horaire, horaire, journalier, mensuel, saisonnier et pluriannuel). Les difficultés de traitement de la base de données sont liées à la très grande quantité de données collectées et aux temps de calculs et d'affichage qui peuvent être prohibitifs. Une réflexion sur la simplification de la base de données (rééchantillonnage) est actuellement menée. Le but est de limiter la perte d'information pour rendre les traitements plus rapides. Une caractérisation plus fine des informations issues des sondes est encore nécessaire. Notamment une comparaison à différentes échelles de temps des signaux en rivière, dans les sources et dans l'endokarst pourrait révéler des phénomènes particuliers seulement suspectés mais pas encore démontrés (basculement chimique, inversion du sens des échanges, effets de seuils, vidanges de réservoirs, etc.).

### I.6.3. Lien entre le fonctionnement hydrodynamique des sources aval et le contexte géologique et géomorphologique (spéléogénèse)

- Réflexion sur la partie septentrionale et orientale du plateau de Méjannes-le-Clap (périmètre de la zone d'étude) :

Le fonctionnement hydrodynamique des sources situées à l'aval du domaine étudié peut s'expliquer par le contexte géologique et par la spéléogénèse liée aux crises tectono-eustatiques. Pour le contexte géologique, la Figure 21 montre que les émergences à l'amont de Marnade suivent le profil altimétrique de la Cèze tandis que les émergences à l'aval de Marnade sont alignées sur la cote altimétrique 76 mètres. Cette cote altimétrique correspond au contact entre les formations urgoniennes karstiques du plateau de Méjannes-le-Clap avec les formations du Crétacé Supérieur imperméables ou le Pliocène. Ce contact est illustré sur la Carte 3. Les émergences d'Ussel, de la Fabrique, de Goudargues et de Bastide Froide sont des sources de débordement (en charge) au contact avec les formations imperméables du Crétacé Supérieur ou du Pliocène. La source de Marnade, située plus à l'amont, à une altitude bien supérieure à la cote de 76 mètres. Cette source doit avoir un fonctionnement hydrodynamique mixte avec un réseau de drainage au-dessus de l'exutoire (réseau sub-horizontale épi-noyé) fonctionnant en déversement et en trop plein et un réseau profond noyé situé sous l'exutoire (source de Marnade explorée par les plongeurs spéléologues à -115 mètres sous le niveau actuel de la Cèze) qui fonctionne en débordement. Ceci expliquerait que la source de Marnade vidange à la fois un réseau épinoyé et un réseau noyé. Une fois que le réseau épi-noyé est vidangé, les écoulements apparents en surface s'interrompent et sont relayés par la vidange du réseau noyé en sous-écoulement (observé dans les rapports précédents sur les données des sondes LTC).

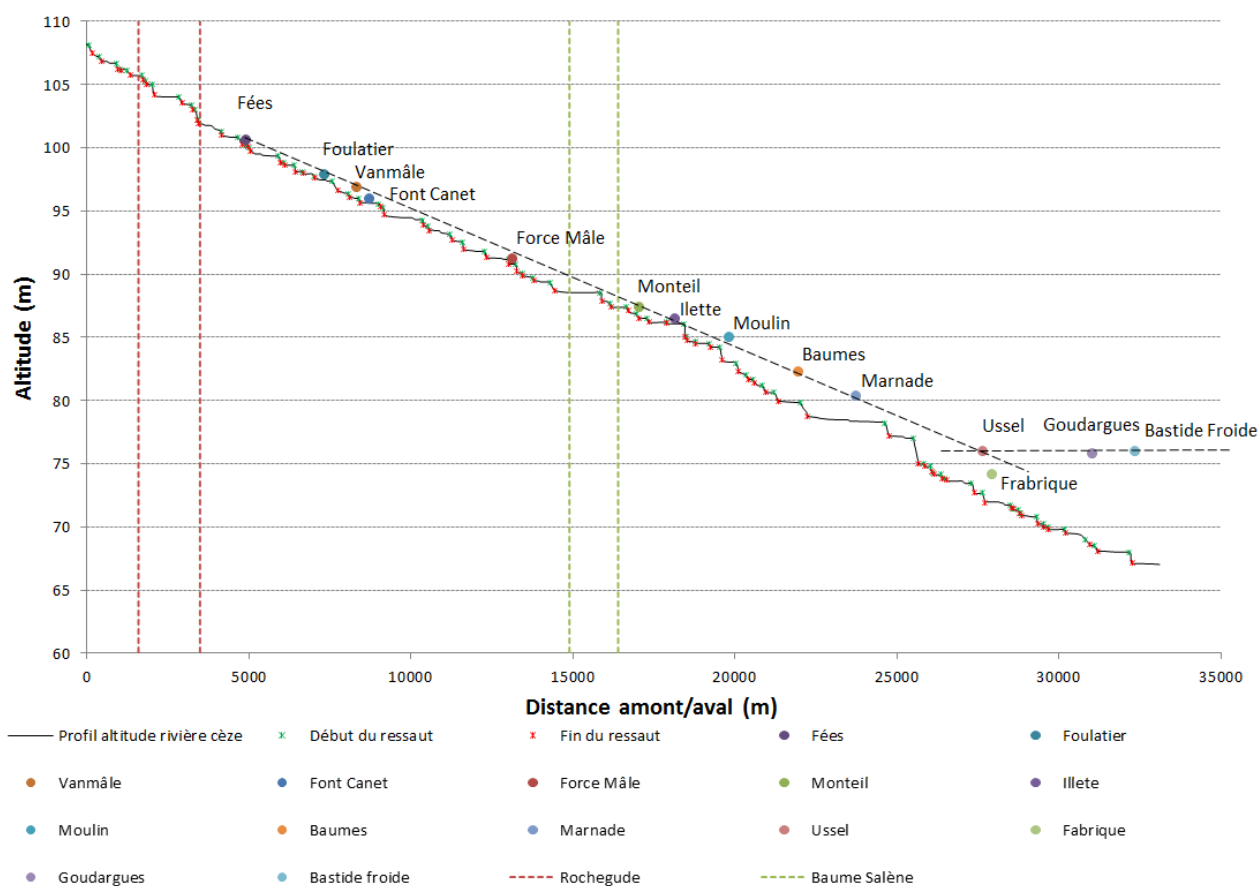
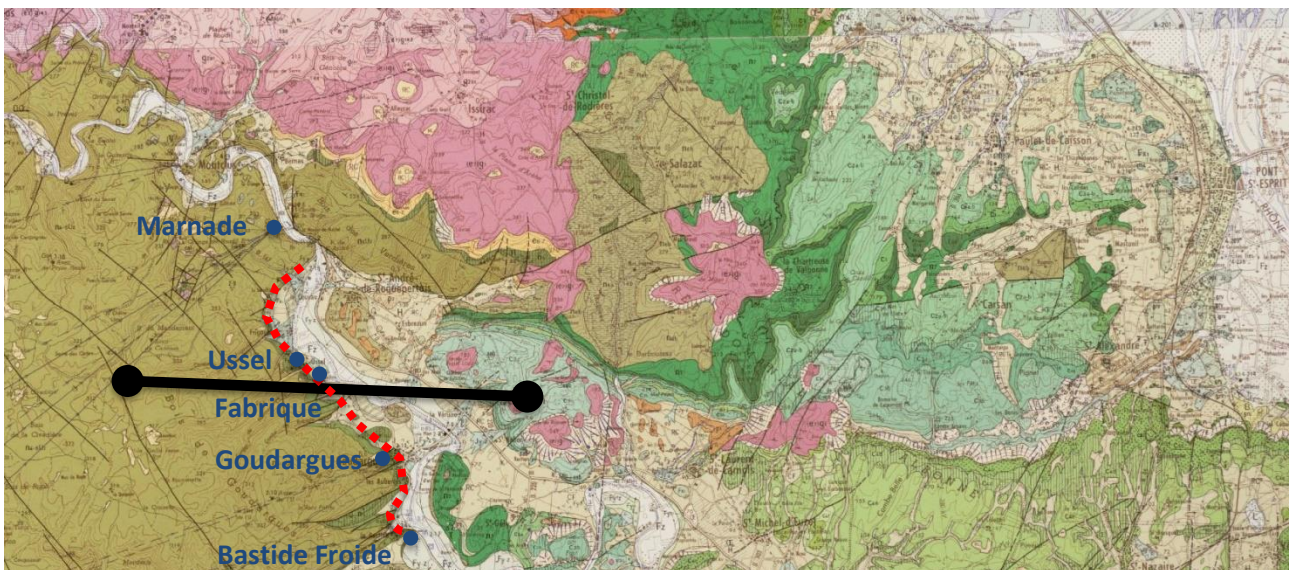


Figure 21 : Profil longitudinal altimétrique du lit de la Cèze d'amont à l'aval du domaine karstique et altitude d'émergence des sources. Les sources à l'amont de Marnade suivent le profil altimétrique de la Cèze, les sources à l'aval de Marnade sont alignées sur la cote altimétrique 76 mètres.

Pour le contexte spéléogénétique, les crises eustatiques du Miocène et les phases tectoniques responsables de la structuration profonde du karst ont certainement eu une influence sur le fonctionnement hydrodynamique des sources aval (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide). En effet, comme l'illustre la Figure 22, les crises tectono-eustatiques du Miocène (par exemple la crise de salinité messinienne (5,5 Ma)) ont pu affecter la partie aval des gorges de la Cèze induisant un fort creusement (dynamique syngénétique) à l'origine de la verticalisation des réseaux (source de Marnade explorée à – 115 mètres par rapport au niveau de la Cèze). Le niveau statique de l'aquifère était alors conditionné par la profondeur de creusement du canyon (messinien ?) induisant une horizontalisation des réseaux et la présence d'une ou plusieurs paléo émergence(s) karstique(s) drainant les eaux du plateau de Méjannes-le-Clap. La remise en eau rapide de la méditerranée au début du Pliocène (5,3 Ma) a été suivie par la mise en place d'une ria qui marqua le comblement du canyon messinien par les sédiments marins du Pliocène (et continentaux sur la partie sommitale ?). A la suite de cette remise en eau de la méditerranée, les niveaux statiques se sont réajustés au niveau de la Cèze actuelle (dynamique paragénétique) avec la mise en place de réseaux verticaux ascendants (per ascensum [Audra et al., 2009]) donnant lieu à la configuration actuelle (type vauclusien) des émergences karstiques (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide).

Ainsi, la composante lente (fortement régulée) de l'écoulement résulte de la mobilisation d'eaux issues des réseaux noyés (en charge) et d'eaux contenues dans la porosité matricielle. La composante rapide (faiblement régulée) de l'écoulement résulte de la mobilisation d'eaux issues des réseaux épinoyés très transmissifs et du transfert rapide en zone non saturée (illustration en Figure 23).

En plus d'avoir des implications sur le fonctionnement hydrodynamique, ce schéma conceptuel (Figure 22) a des implications sur la chimie des eaux des sources (Figure 23). En effet, certaines sources peuvent mobiliser seulement des eaux de la zone épinoyée et de la zone non saturée (Fées, Vanmâle, Travers et Force Mâle) ou seulement les eaux de la zone noyée profonde (Ussel, Fabrique et Goudargues) ou encore un mixte des deux contributions (Bastide Froide ?, Marnade ?).



Carte 3 : Localisation approximative du trait de coupe (trait plein de couleur noire) de la Figure 22 et contact entre les formations urgoniennes karstiques et le crétacé supérieur imperméable (trait tireté de couleur rouge) (fond géologique 1/50 000ième BRGM Infoterre)

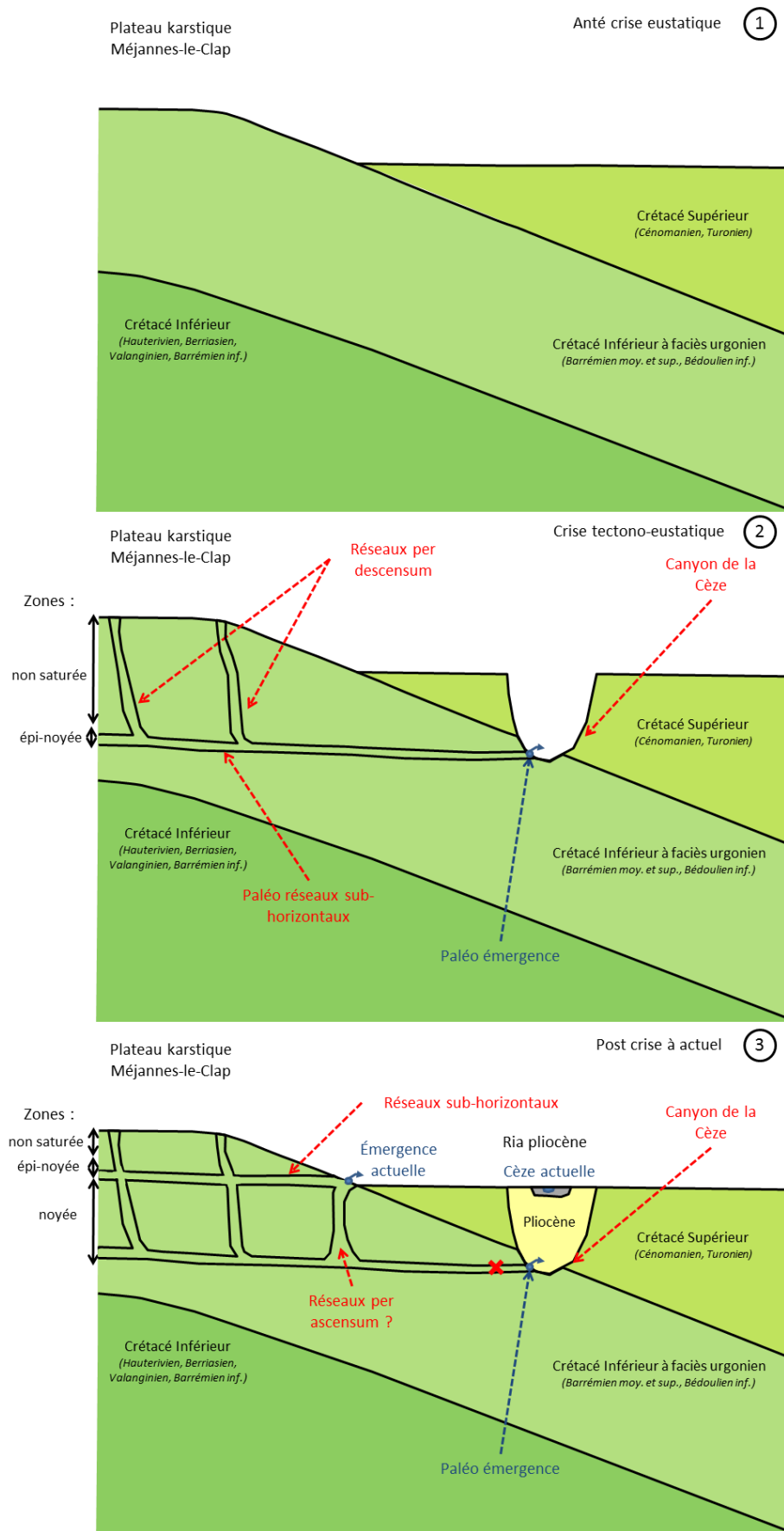
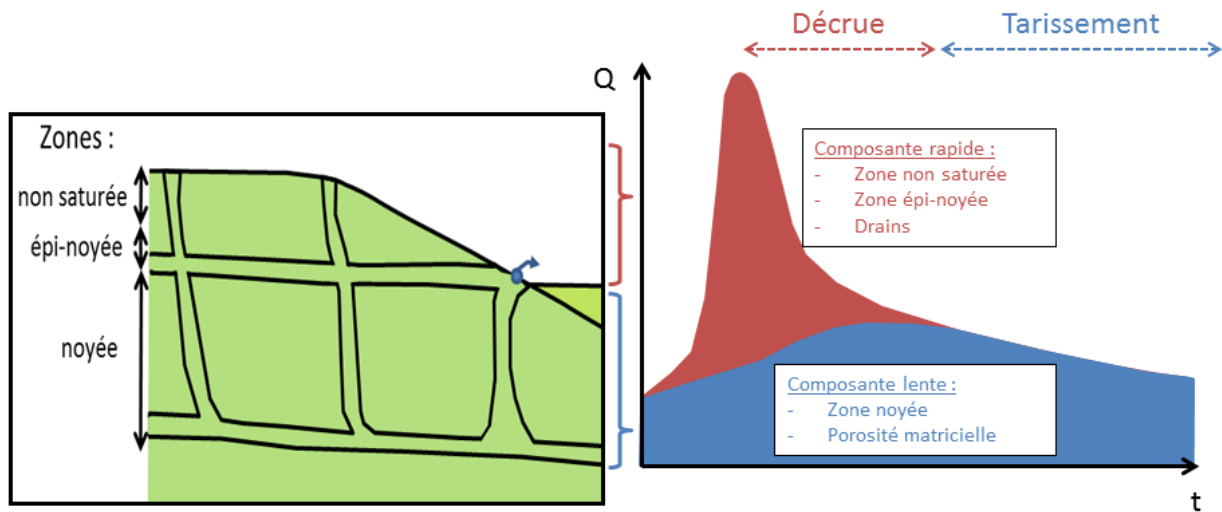


Figure 22 : Coupes schématiques (échelle non respectée) à l'aval du canyon de la Cèze illustrant le lien entre le fonctionnement hydrodynamique des sources aval et le contexte géologique et géomorphologique (spéléogénèse). La localisation du trait de coupe est exposée en Carte 3.



## Circulations karstiques

## Hydrogramme des sources



### Typologie hydrodynamique des émergences:

- Composante rapide seulement
- Composante lente seulement
- Fonctionnement mixte

← Soutien ou non de la rivière

### Masses d'eau :

- Karst de Méjannes
- Karst sous couverture d'Issirac
- Rivière Cèze

Figure 23 : Lien entre l'hydrogramme et les circulations karstiques à l'origine de la diversité des fonctionnements exprimée aux niveaux des émergences karstiques du plateau de Méjannes-le-Clap.

Cette réflexion sur le lien entre fonctionnement hydrodynamique et karstogenèse doit être précisée en phase 4 du projet (surfaces fondamentales et niveaux repères dans l'endokarst, étagement des réseaux, etc.).

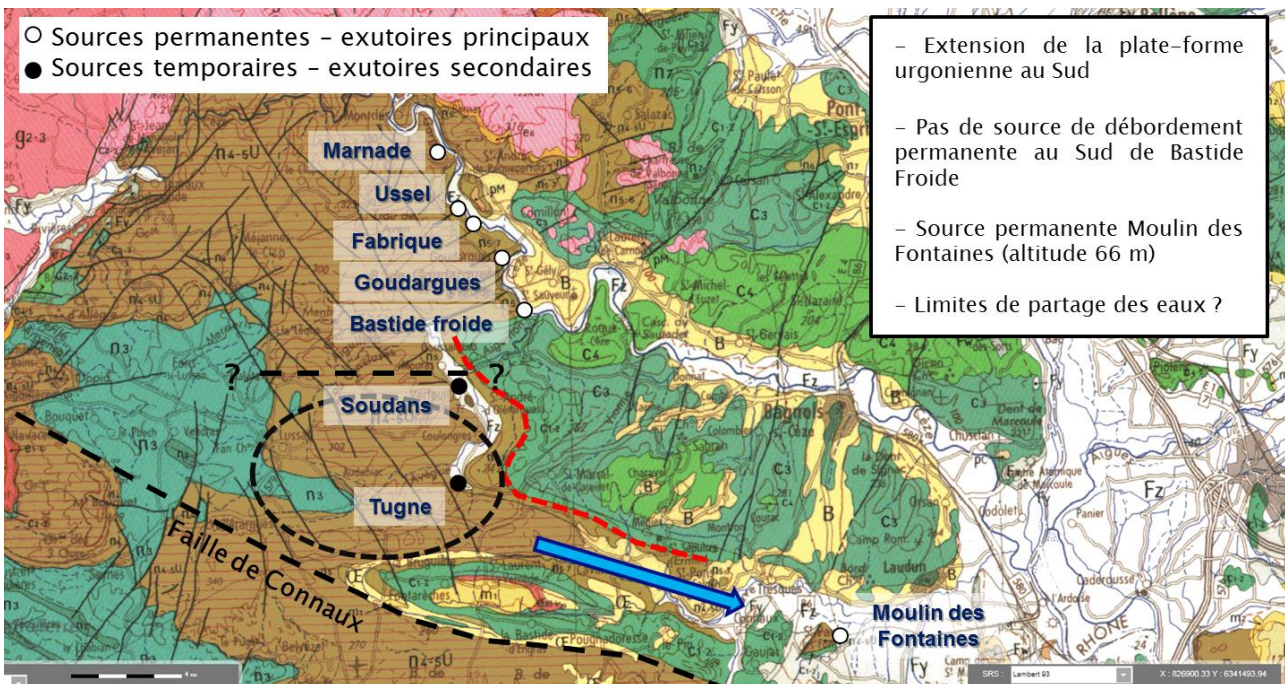
- Réflexion sur la frange méridionale du plateau de Méjannes-le-Clap :

La Carte 4 montre que la plate-forme urgonienne affleurante s'étend largement sur la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap. Cette surface constitue un impluvium karstique important (une 50aine de km<sup>2</sup>) qui ne semble pas être drainé par la source de la Bastide Froide. Or sur cette partie Sud du plateau on ne retrouve pas de sources pérennes de débordements au contact entre les formations urgoniennes et les formations du Crétacé Supérieur. Les seules émergences connues sont la source des Soudans à Verfeuil (exploitée pour l'AEP par forage) et la source de la Tugne à Valsauve. Ces deux sources sont des exutoires secondaires et temporaires des eaux souterraines. Elles ne s'écoulent qu'en situation de sursaturation du karst (évacuation du trop-plein de recharge par dépassement de la surface topographique par la surface piézométrique) quelques jours dans l'année lors de forts épisodes pluvieux. Au contraire, en situation sous saturée en eau, ces sources s'effacent et le karst a plutôt tendance à infiltrer les eaux. Ce mode de fonctionnement suppose que des écoulements se poursuivent en souterrain en direction d'un autre exutoire (exutoire principale). Il est probable que ces écoulements se prolongent jusqu'à la source du Moulin des Fontaines localisée à Saint-Paul-les-Fonts beaucoup plus à l'Est. Cette source pérenne présente des débits importants et assez constants au cours de l'année (débits estimés grossièrement entre 400 et 600 L/s). Elle est positionnée à l'endroit où les formations urgoniennes affleurent à la faveur d'une faille. L'altitude de la source est de 66 mètres et correspond au point bas local d'émergence de l'aquifère urgonien. L'éloignement de la source à son impluvium karstique (supposé) ainsi que son altitude

d'émergence permettent d'expliquer l'absence de sources de débordement au Sud de la source de la Bastide.

La source du Moulin des Fontaines est très vraisemblablement une source de débordement et son fonctionnement hydrodynamique doit s'apparenter à celui des sources d'Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide.

De la même manière que pour les sources de Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide, les crises tectono-eustatiques du Miocène ont probablement structurées les écoulements profonds via des paléo-exutoires probablement connectés au canyon du Rhône. La remontée des niveaux statiques et le comblement du canyon du Rhône par des sédiments a oblitéré les paléo-émergences profondes et a favorisé une spéléogénèse per ascensum [Audra et al., 2009] ; [Mocochain et al., 2006] ; [Mocochain et al., 2009] avec la création d'un nouvel exutoire au niveau de la source du Moulin des Fontaines.



Carte 4 : Quid du fonctionnement hydrodynamique dans la frange méridionale du plateau de Méjannes-le-Clap ?

Bien que située au Sud de la zone investiguée, cette source pourrait faire l'objet d'une caractérisation plus poussée (mesures de débit, analyses géochimiques, traçages, etc.) puisqu'elle représente un débit important et semble avoir des points communs avec les sources de débordements situées à l'aval des gorges de la Cèze.

## PARTIE II

–

### Approche par traçages artificiels

---

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Joël Jolivet

(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

→ Groupement Associatif de Spéléologues d'Orgnac-L'Aven, Issirac et Labastide-de-Virac (« **GASOIL** »)

→ Jordan Ré-Bahuaud, Chapuis Hervé et Didier Graillot

(UMR 5600 EVS, composante Mines Saint-Etienne)

Dans les précédents rapports, une synthèse bibliographique sur les traçages historiques au niveau de la Cèze avec été présentée. Cette synthèse avait notamment révélée des lacunes de connaissances en rive gauche de la Cèze. L'effort c'était alors concentré sur l'interfluve Cèze/Ardèche avec la réalisation de trois campagnes de traçages en 2014 [Chapuis et al., 2016].

#### II.1. Objectifs des traçages de 2015 et 2016

---

Les objectifs pour les campagnes de 2015 et 2016 étaient :

- de compléter la connaissance des circulations souterraines en rive gauche de la Cèze. Un traçage a été réalisé en 2016 au niveau des pertes de la source du Garn au Nord Est du synclinal d'Issirac au contact entre les calcaires à faciès urgonien et les formations Oligocène.
- de répéter le traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rohegude entrepris en 1995 par le bureau d'étude BRLi [BRLi, 1995] mais cette fois en condition de rupture de flux, c'est-à-dire en situation d'assec de la Cèze au niveau de ses pertes. L'été 2015 a été marqué par un étiage sévère et un assec de la rivière qui a permis un tel traçage.

Le protocole général d'injection et de suivi des traceurs a été décrit dans les rapports précédents.

#### II.2. Synthèse des traçages réalisés en 2015 et 2016

---

##### II.2.1. Traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rohegude

Le traçage a été réalisé le 21 juillet 2015 à 0h00 au niveau du pont de la commune de Rivières quelques centaines de mètres en amont des pertes de Rohegude. L'injection de 10 kg de fluorescéine a été effectuée directement dans la Cèze dont le débit a été mesuré à 512 L/s en amont des pertes et 0 L/s en aval des pertes. Les photos de l'injection du traceur et de l'assec de la Cèze sont présentées en annexe 1. Le suivi de la restitution a été effectué à l'aide de fluocapteurs relevés régulièrement et disposés au niveau des sources en rive droite (Fées, Vanmâle, Ilette, Moulin, Frabrique et Bastide Froide) et gauche

(Foulatier, Font Canet, Travers, Monteil, Baumes) de la Cèze mais aussi au niveau de la rivière sur plusieurs points de contrôle. Un fluorimètre de terrain avait été disposé au niveau de la source de Font Canet, malheureusement, ce dernier n'a pas fonctionné du fait d'un mauvais paramétrage du fichier de calibration par le constructeur (Albilis - Suisse). Le suivi a également été complété par des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau. Les fluocapteurs et les échantillons d'eau ont été analysés dans un laboratoire (Sciences Environnement – Besançon) spécialisé dans le suivi de traçages hydrologiques. Les résultats bruts (spectres de fluorescence et concentration dans les eaux) de la restitution du traceur sont présentés en annexe 2.

La chronique de restitution du traceur est présentée en Figure 1, elle débute 11 jours plus tard au niveau de la source de Font Canet en rive gauche de la Cèze. Cette restitution se prolonge pendant 16 jours (dernier échantillon d'eau positif le 16/08/2015). Le pic de concentration a été mesuré 18 jours après injection (le 07/08/2015) avec une concentration de 0,53 ppb. Le colorant commence à être détecté à la source Monteil à partir du 24/08/2015, soit 35 jours plus tard, avec une concentration plus faible de 0,09 ppb. Ce résultat est confirmé le 27/08/2015 mais avec une concentration nette en fluorescéine de 0,84 ppb. Les fluocapteurs continuent d'être positifs à la fluorescéine sur les jours qui suivent mais les échantillons d'eau ne présentent aucune trace de fluorescéine. Il est possible que les fluocapteurs aient accumulé quelques traces de fluorescéine restantes ou qu'ils aient été pollués. Contrairement aux travaux du BRLi, il est impossible d'avancer qu'il y a une relation entre les pertes de la Cèze à Rochegeude et la source Baumes. Les fluocapteurs présentent des traces à trois reprises à la source Baumes (les 27/08/2015, 31/08/2015 et 02/09/2015) dans un laps de temps cohérent, 38 jours après injection mais les échantillons d'eaux ne révèlent aucune trace de fluorescéine. Bien que les résultats sur fluocapteurs soient qualitatifs (ou dans une certaine mesure pseudo-quantitatifs) il est possible d'observer un fort gradient de dilution de la source de Font Canet (première impactée) à la source des Baumes (dernière impactée) en passant par la source de Monteil. Cette dilution importante est à interpréter comme un mélange avec des masses d'eau importante située sous les formations Oligocènes du synclinal d'Issirac (karst urgonien sous couverture). Cette interprétation est corroborée par les résultats des campagnes géochimiques (notamment les isotopes de l'eau) qui indiquent également un gradient de dilution croissant avec pour la source de Font Canet 58 % d'eau de rivière tandis qu'il est de 31 % pour Monteil et seulement 24 % pour les Baumes.

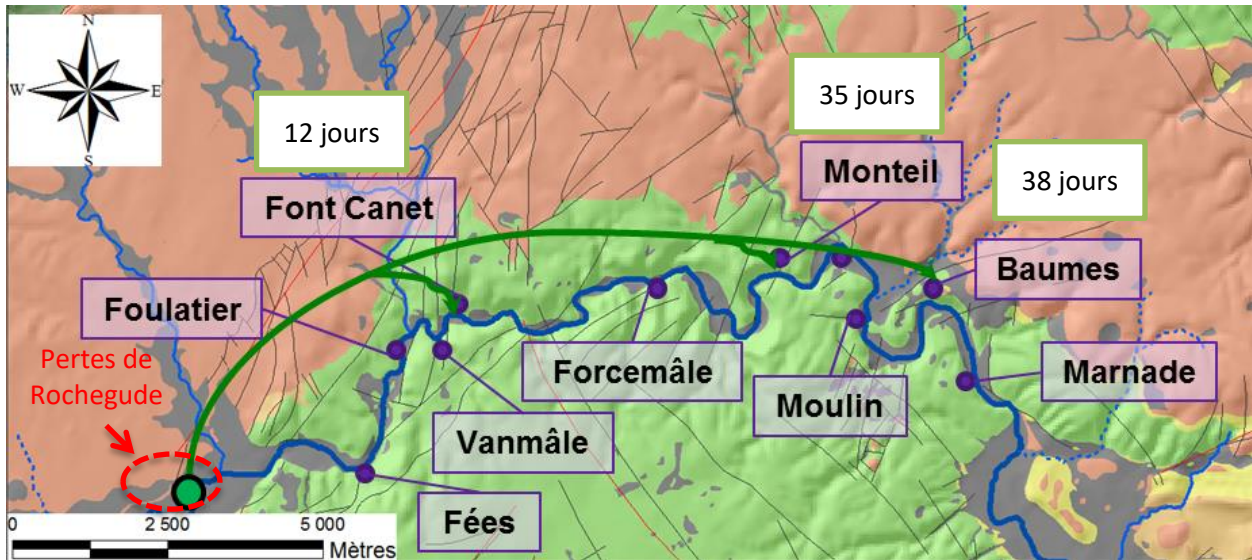
Comme attendu, les sources de la rive droite n'ont pas été impactées par ce traçage, sauf à l'état de traces pour la source de l'Ilette qui est contaminée de manière très localisée par les eaux de la Cèze qui a au préalable collectée les eaux de Font Canet et de Monteil.

Les autres fluocapteurs contenant des traces de fluorescéine ne sont pas interprétés comme des résultats positifs à la fluorescéine s'ils ne sont pas validés par les échantillons d'eaux. À titre d'exemple, c'est le cas pour la source Travers et la Cèze en amont de la source Vanmâle.

Bassin versant	Libellé point de suivi	Précision	Matériel d'analyse	Echantillon	21/07/15	21/07/15	22/07/15	25/07/15	27/07/15	28/07/15	30/07/15	01/08/15	02/08/15	04/08/15	06/08/15	07/08/15	10/08/15	11/08/15	13/08/15	15/08/15	16/08/15	24/08/15	25/08/15	27/08/15	31/08/15	02/09/15		
					CÈZE	source FEES	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																			
Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																										
source TRAVERS	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source FOULATIER	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source VANMALE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source FONT CANET	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source MONTEIL	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source BAUMES	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source MOULIN	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source ILETTE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source FABRIQUE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source USSEL	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source MARNADE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source GOUDARGUES	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
source BASTIDE FRODE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
Cèze pié	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
Cèze amont FOULATIER	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									
Cèze amont VANMALE	Terrain	Colorimètre (WPA CO7500) Fluorimètre/Turbidimètre (AquaFluor®)	Fluocapteur																									
	Laboratoire	Spectrofluorimètre (PE LS50-B "synchroscan")	Fluocapteur Eau (µg/L)																									

Figure 24 : Chronique de restitution du traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rochegude

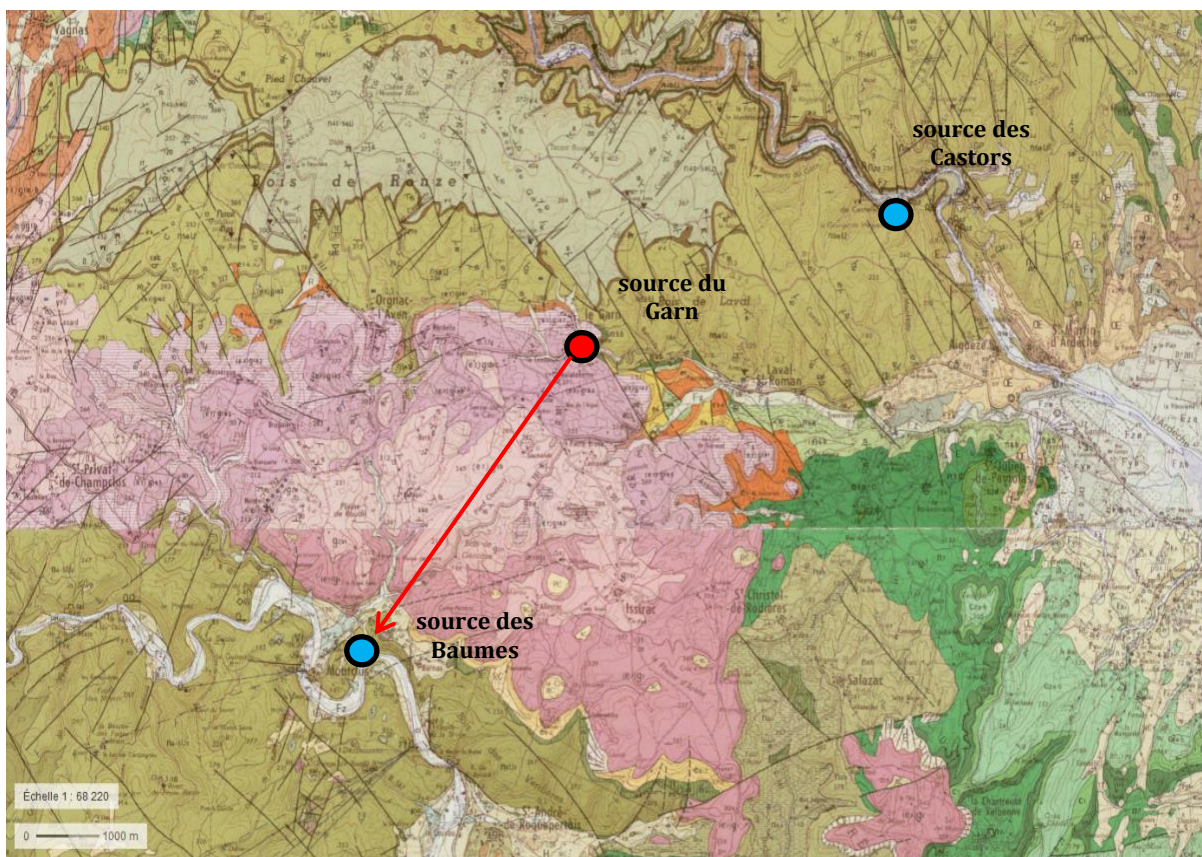
La Carte 5 présente la localisation des points d'injection et de restitution du traceur. La localisation des pertes (Rochegude) à l'amont des gorges est probablement liée à l'existence de la faille de Barjac d'orientation SO-NO provoquée par le glissement des formations du Mésozoïque sur la faille normale d'Alès. Les eaux superficielles s'infiltrent et circulent à la faveur de ce réseau de faille en direction du Nord-Ouest. Ces eaux sont ensuite reprises dans la macroporosité du karst sous couverture situé sous les formations Oligocènes (synclinal d'Issirac). Les eaux de pertes s'écoulent alors vers l'Est et vont alimenter les sources de Font Canet, de Monteil et des Baumes.



Carte 5 : Résultat du traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rocheguide. Restitution enregistrée au niveau des sources de Font Canet, Monteil et les Baumes

## II.2.2. Traçage des pertes la source du Garn (commune du Garn, Ardèche)

L'eau de la source captée du Garn se trouve au niveau des terrains priaboniens ((e7) g1 a3) puis se perd progressivement dans le ruisseau, au contact des calcaires barrémo-bédoulien (n5 b) recoupés par une faille NO-SE (Carte 6).



Carte 6 : Résultat du traçage des pertes de la source du Garn. Restitution enregistrée au niveau de la source des Baumes

L'injection de 5 Kg de Rhodamine B a été réalisée le 16 avril 2016 dans le cours du ruisseau ayant un débit estimé à 3 L/s. Les points supposés de restitution ont été équipés par des fluocapteurs aux sources de Gournier et des Castors ainsi que sur la rivière Ardèche, en amont et aval de cette dernière émergence. Le même dispositif a été installé du côté Cèze aux sources de Monteil, des Baumes, de Bernas et d'Esbrezun, situées en rive gauche et les sources de Marnade, Moulin, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide froide et chaude pour la rive droite. Le Tableau 5 présente les conditions météorologiques durant la période du traçage.

Tableau 5 : Précipitations d'après le pluviographe (CNRS-UMR Espace 7300) installé au lieu-dit le Rieu (commune de Barjac)

pluie avant	injection		
mm	du	au	jours
57,6	01/03/16	31/03/16	31
60,0	01/04/16	16/04/16	16
117,6			47
pendant-	traçage		
après	du	au	jours
12	16/04/16	30/04/16	14
61	01/05/16	31/05/16	31

Le traceur est ressorti le 21 avril 2016, soit 5 jours après l'injection, à la source de Baumes, coté Cèze et sera détecté jusqu'au 25 avril 2016. Le spectre de fluorescence présenté en annexe 2 un pic de réémission autour de 550 nm qui est compatible avec la Rhodamine B. Cependant, l'intensité de ce pic de réémission est assez faible et suppose une assez faible restitution du traceur. Cette faible restitution peut avoir plusieurs explications :

- une partie du traceur a été adsorbé par les terrains marneux du Priabonien ainsi que par les remplissages des paléo-altérites de l'Eocène moyen infiltrés dans la masse fissurée du paléokarst ;
- le karst sous couverture situé sous les formations priaboniennes semble contenir une grande porosité qui laisse supposer qu'une dilution importante du traceur ait pu avoir lieu ;
- la source des Baumes n'est pas la seule à restituer le traceur, un gradient d'écoulement hypogé peut éventuellement exister plus à l'est en direction de la vallée du Rhône.

Tous les autres points surveillés sus cités se révèlent négatifs. Leurs contrôles s'arrêtent le 9 mai 2016.

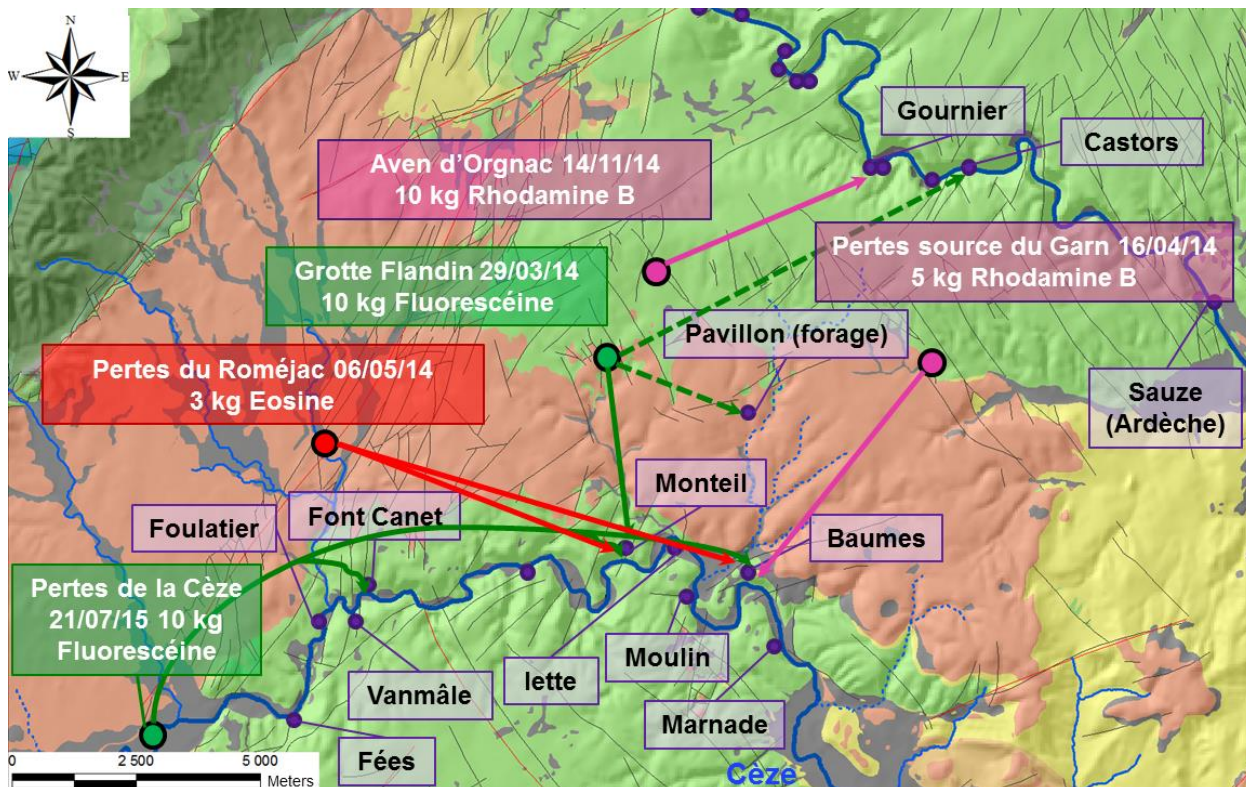
### II.2.3. Synthèse des résultats de traçages effectués en rive gauche de la Cèze

La Carte 7 ci-après présente la synthèse des traçages réalisés au cours du projet (résultats présentés à la conférence Eurokarst 2016 [Chapuis et al., 2016]). La caractérisation des écoulements s'est focalisée sur l'interfluve Cèze/Ardèche.

Le traçage des pertes du Roméjac (06/05/14) a permis de mettre en évidence une relation entre les cours d'eau du Nord du fossé d'Alès (le Roméjac, la Malaygue, le Malibaud et la Chantabre) et les sources de Monteil et des Baumes en rive gauche de la Cèze.

Le traçage de la grotte Flandin (29/03/14) a permis de mettre en évidence des sens de circulations souterrains qui pouvaient s'inverser suivant l'état de saturation du karst avec en situation de basses et moyennes eaux des circulations à la faveur de l'Ardèche et en crue des circulations à la faveur de la Cèze. La limite de partage des eaux pour le secteur de la grotte de Flandin est alors fluctuante en fonction de la situation hydrologique.

Le traçage de l'Aven d'Orgnac (14/11/14) a montré des sens de circulation univoque en direction de l'Ardèche permettant de mieux contraindre la limite de partage des eaux entre les deux rivières (Cèze et Ardèche).



Carte 7 : Synthèse des traçages réalisés en rive gauche de la Cèze entre 2014 et 2016

Les traçages au niveau des pertes de la Cèze, du Roméjac et du Garn ont permis de mettre en évidence un rôle important du karst sous couverture permettant des circulations rapides et une grande dilution des traceurs laissant supposer une porosité interconnectée importante.

Les sources de Monteil et des Baumes sont alimentées par 3 masses d'eau :

- les eaux de l'aquifère urgonien qui se prolonge sous les formations priaboniennes (karst sous couverture) dont la limite de partage des eaux semble se située au Nord de l'axe du synclinal d'Issirac proche du contact entre les formations priaboniennes et les formations urgoniennes ;
- les eaux de pertes de la Cèze à l'amont des gorges ;
- les affluents (Roméjac, Malaygue, Malibaud et Chantabre) de la rive gauche de la Cèze qui drainent la franche septentrionale du fossé d'Alès.

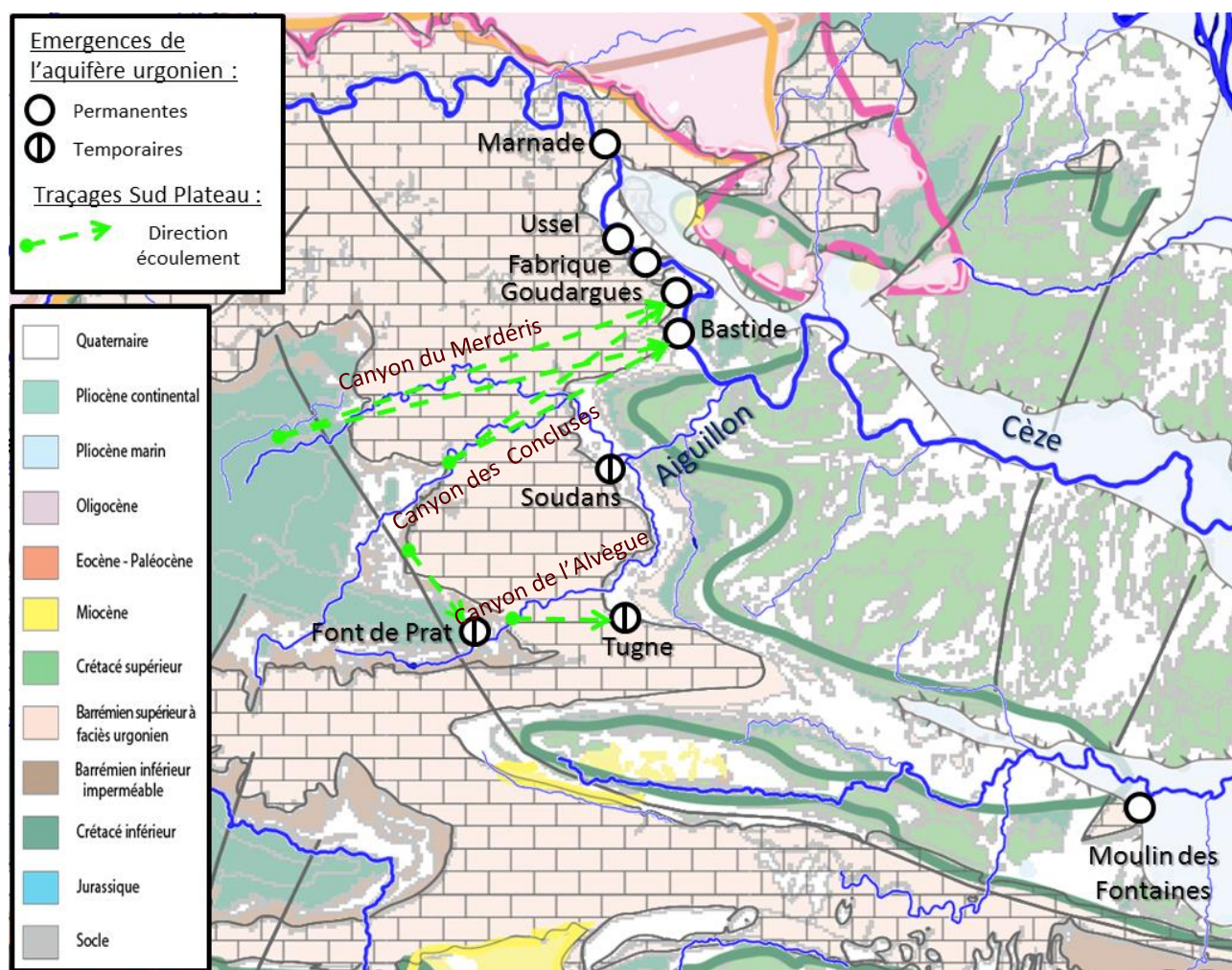
Tous ces résultats concordent assez bien avec ceux issus de la géochimie qui seront présentés dans la partie suivante III.



## II.3. Quid des écoulements au sud du plateau de Méjannes-le-Clap ?

Comme il a été vu dans la section précédente intitulée « Essai de lien entre le fonctionnement hydrodynamique des sources aval et le contexte géologique et géomorphologique (spéléogénèse) », la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap pourrait être intéressante à investiguer du fait de la présence de la source du Moulin des Fontaines dont les aires d'alimentation ne sont pas connues.

La zone d'étude initialement définie s'arrête à la source de la Bastide Froide dans sa partie aval, ce découpage suppose une limite de partage des eaux au Sud du Canyon des Concluses (Carte 8). Au-delà de ce Canyon très peu de traçages ont été entrepris. Les seuls existants sont le traçage de Font de Prat et de l'Aven de Tugne (Carte 8) qui sont des mises en évidence de relations hydrogéologiques locales.



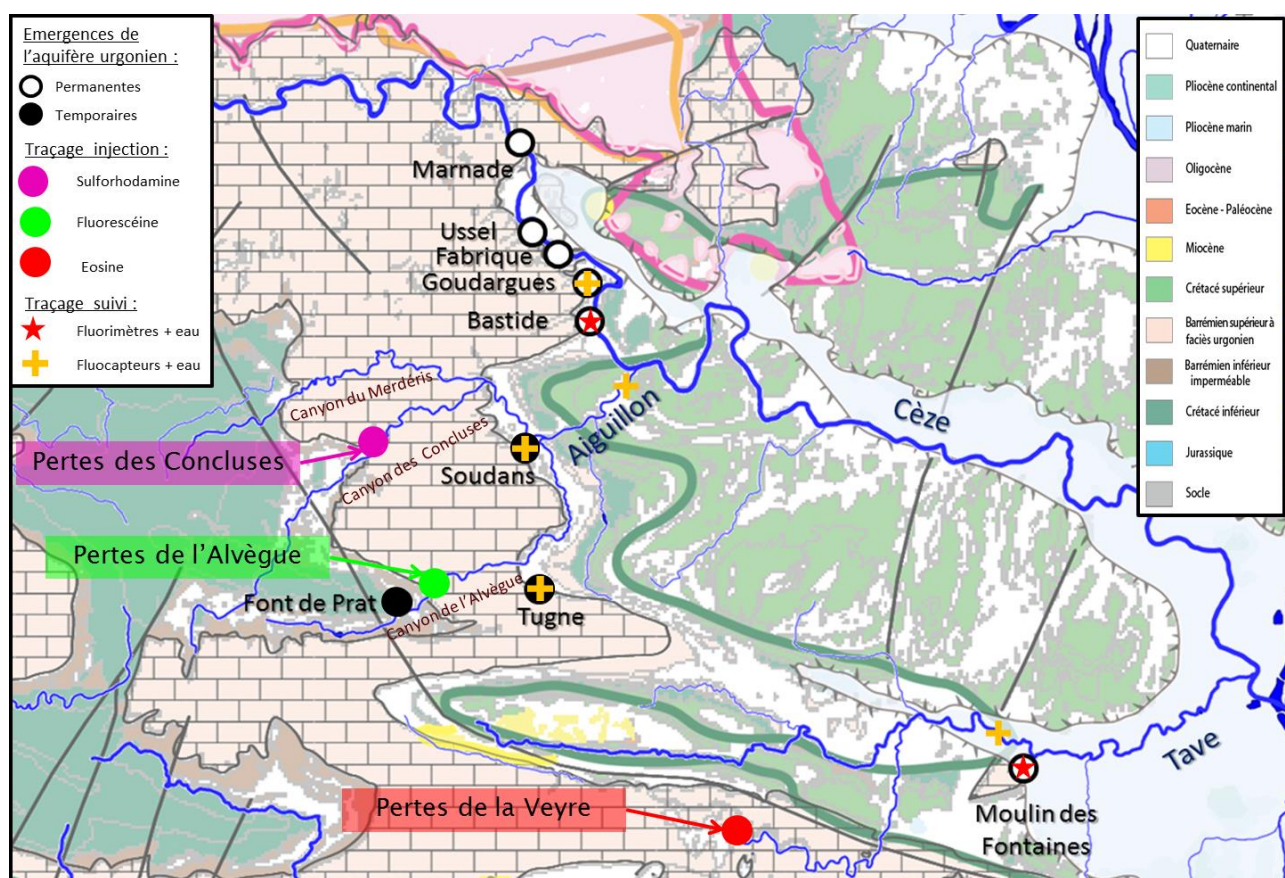
Carte 8 : Traçages réalisés dans la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap révélant des lacunes de connaissances sur la délimitation des aires d'alimentation des émergences et sur les directions des écoulements régionaux.

La mise en évidence d'écoulements profonds régionaux implique l'injection d'une quantité de traceur importante et d'un suivi sur une longue période (plusieurs mois) des émergences permanentes telles que la source de Bastide Froide ou la source de Moulin des Fontaines. Un design expérimental des traçages sur la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap est proposé en Carte 9, il vise à mieux délimiter les aires d'alimentation des émergences permanentes et à mieux définir les directions des écoulements régionaux.

Pour la localisation des points d'injection, le choix s'est orienté vers l'amont des canyons (Concluses, Alvègue et Veyre), en effet, l'avantage réside dans le fait que les eaux superficielles se concentrent et s'infiltrent intégralement dans les formations urgoniennes au niveau des canyons. Les meilleurs périodes pour ces traçages sont des situations hydrologiques de hautes à moyennes eaux et des situations hydrogéologiques de moyennes à basses eaux. En effet, il faut s'assurer au préalable qu'en aval des canyons, les eaux superficielles se sont totalement infiltrées dans le karst.

Le suivi des sources de Bastide et de Moulin des Fontaines doit se faire sur à l'aide de fluorimètres de terrain et de prélèvements d'échantillons d'eau régulièrement relevés et analysés en laboratoire. Le suivi de la restitution doit se faire sur une longue durée et doit permettre la constitution d'une chronique de la concentration de traceur.

Pour les autres sources (Goudargues, Tugne, Soudans) et pour les écoulements superficiels (l'Aiguillon, et la Tave) un suivi avec des fluocapteurs et des prélèvements d'échantillons d'eau relevés régulièrement est suffisant.



Carte 9 : Design expérimental des traçages sur la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap visant à mieux délimiter les aires d'alimentation des émergences permanentes et à mieux définir les directions des écoulements régionaux.

# PARTIE III

## Traceurs géochimiques

---

→Véronique Lavastre, June Chevet

(Université Jean Monnet, CNRS-UMR 6524 Laboratoire Magmas et Volcans, 23, rue du Docteur Paul Michelon, 42023 Saint Etienne Cedex)

→Hervé Chapuis, Jordan Ré-Bahuaud, Frédéric Paran

(Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, CNRS UMR5600, Géosciences et environnement, Cours Fauriel, 42000 Saint Etienne)

→Corinne Le Gal La Salle

(Université de Nîmes, EA7352 Chrome, Parc Georges Besse, 30000 Nîmes)

### III.1. Eléments de contexte préalables à l'étude géochimique

---

Dans le cadre de cette action ZABR sur la caractérisation des échanges entre Karst et Rivière Cèze, le LMV a réalisé les analyses chimiques et isotopiques en collaboration avec l'équipe EVS de l'Ecole des Mines de Saint Etienne et le Laboratoire de géochimie de l'équipe CHROME de l'Université de Nîmes. Trois campagnes d'échantillonnage ont été réalisées, le 9 juillet 2014, en juin 2015 et en juillet 2015. L'objectif était d'apporter des éléments de compréhension à la circulation des eaux souterraines et la connexion entre les impluviums et les différentes sources répertoriées le long de la Cèze au niveau du canyon du plateau de Méjannes-le-Clap.

#### III.1.1. Contexte géologique

Cette étude s'intéresse au cours d'eau de la Cèze dont la source se situe à Saint André de Capcèze dans les Cévennes lozériennes à une altitude de 798 mètres. La Cèze s'écoule globalement du NO vers le SE, elle a une longueur totale de 129km et se jette dans le Rhône entre les communes de Codolet et Laudun – L'ardoise à une altitude de 27 mètres (Carte 10).

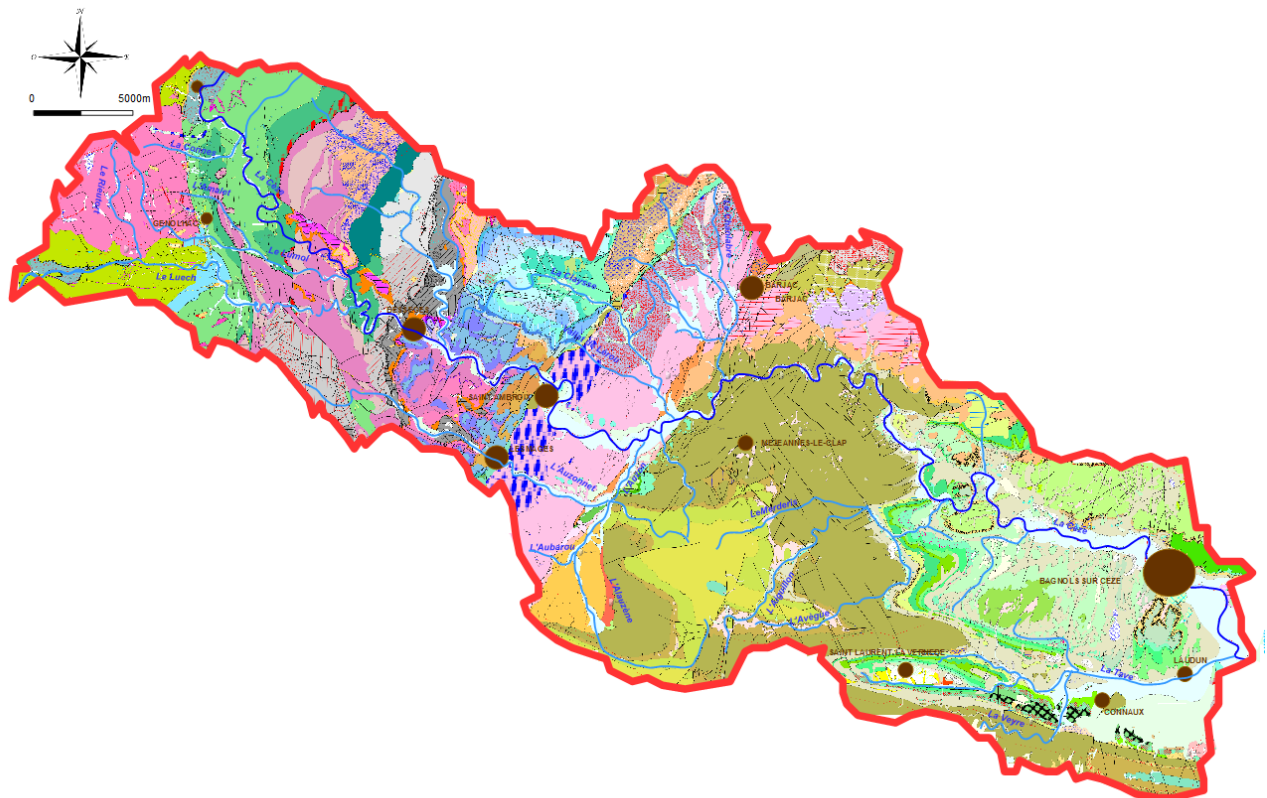
Le bassin versant de la Cèze couvre une superficie de 1384km<sup>2</sup>[Sadaoui et al. 2016] qui est couvert par les cartes géologiques de Génolhac (n°887), de Bessèges (n°888), d'Alès (n°912), de Pont Saint Esprit (n°913), d'Orange (n°914), d'Uzès (n°939), d'Avignon (n°940). Une compilation des extraits de cartes a été réalisée à partir d'Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) et à l'échelle du bassin versant (Carte 10), les limites du bassin versant ont été établies à partir des documents ABCèze disponibles sur le site internet <http://www.abceze.fr/>.

La rivière de la Cèze traverse différents types de formations géologiques dans les proportions suivantes [Sadaoui et al. 2016] :

- 50 % de formations sédimentaires mixtes non faillées ;
- 38 % de calcaires ;
- 9 % de roches plutoniques et métamorphiques ;
- 3 % de formations alluviales et deltaïques.

En tête de bassin et jusqu'au niveau de Bessèges, la Cèze et ses affluents parcourent le domaine des Cévennes cristallines datant du Paléozoïque et essentiellement constituées de roches métamorphiques avec localement des intrusions granitiques porphyroïdes calco-alkalines à biotite du massif du Mont Lozère (Carte 10). Les gneiss sont très présents sur la partie amont du bassin versant de la Cèze, on y retrouve de l'albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), de la biotite ( $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH,F})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$ ) et du microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ). Les micaschistes sont également présents avec la paragenèse biotite, muscovite. La composition chimique des gneiss des unités métamorphiques des Cévennes est la suivante : 2,3 à 3,8 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 0,8 à 3 % de  $\text{CaO}$ , 0,7 à 5,6 % de  $\text{K}_2\text{O}$ , 0,1 à 5,25 %  $\text{MgO}$  [BRGM, 1989]. Quelques affleurements de formations sédimentaires du Trias constituées essentiellement d'argiles, grès, conglomérats et marnes noires sont présents

Entre Bessèges et Saint-Ambroix (Carte 10) se retrouvent des formations sédimentaires du secondaire (Trias et Jurassique) riches en dolomites ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Le Trias est constitué de dolomies, grès dolomitiques, grès grossiers arkosiques à ciments dolomitiques, dolomies laminées, marnes noires, dolomies silteuses. Le sommet de cet ensemble sédimentaire est affecté par un encroûtement dolomitique. Des niveaux riches en barytine ( $\text{BaSO}_4$ ) et en gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) sont observés dans cette zone. D'autres ressources minérales, galène ( $\text{PbS}$ ), chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et Pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) sont référencées dans cette zone sur la notice de la feuille géologique de Bessèges [BRGM, 1989]. Les formations jurassiques sont constituées des calcaires et marnes du Callovien et de l'Oxfordien.



Carte 10 : Carte géologique du bassin versant de la Cèze de sa source jusqu'à sa confluence avec le Rhône. Cartes géologiques n°887, 888, 912, 913, 914, 939 et 940 (<http://infoterre.brgm.fr>).

En aval de Saint Ambroix, la Cèze s'écoule sur les formations sédimentaires du Tertiaire qui viennent en remplissage du fossé d'Alès (altitude moyenne de l'ordre de 200 m). Les formations les plus anciennes dans le fossé d'Alès sont les formations du Stéphaniens qui recouvrent le socle métamorphique (Figure 25). Calcaires et marnes sont les principaux types de formations que l'on retrouve depuis le Trias jusqu'au Tertiaire. On notera cependant la présence de niveaux évaporitiques au Trias et de niveaux de gypse dans le Ludien (Tertiaire), ces derniers sont évoqués pour expliquer l'origine des eaux sulfatées calciques des

sources des Fumades [BRGM, 2011]. On relèvera également la présence de calcaires bitumineux à l'éocène qui affleurent en bordure du fossé d'Alès à proximité de l'entrée des gorges de la Cèze.

En allant vers l'est les formations géologiques rencontrées sont des calcaires du Crétacé (Valanginien, Hauterivien et Barrémien), il s'agit de calcaires à faciès Urgonien. A ce niveau la Cèze a entaillé, les formations calcaires pour former un canyon de 200 mètres de profondeur environ et sur une distance de 12km. Ce canyon s'étend du point repère du pont de Tharoux et se termine au niveau de pont de coureau. Le plateau calcaire se trouve à une altitude de l'ordre de 300 m. A la base de la série se trouve des marnes et marno-calcaire qui affleurent au cœur de l'anticlinal de Lussan (Carte 10). Elles sont recouvertes par 30 à 40 mètres de calcaires blancs à débris datant de l'Hauterivien supérieur. Le barrémien sus-jacent est constitué de calcaires argileux et marneux puis par les calcaires (biocalcarénites) de faciès urgonien. Ces calcaires occupent une large zone du bassin versant de la Cèze à l'est du fossé d'Alès. Ils atteignent une épaisseur de 100 à 200 mètres et forment le plateau calcaire de Méjannes le Clap. Sur la carte géologique sont reportés dans cette même unité les calcaires du Bédoulien qui ont une puissance de l'ordre de 300 mètres. Ces formations sont parcourues par un réseau karstique orienté majoritairement N-S à NE-SO. Le réseau karstique est constitué de galeries subhorizontales étagées et de conduits verticaux dont certains descendent en dessous du niveau de la rivière (karst noyé ; [Jolivet et Martin, 2008]).

En bordure de l'anticlinal de Lussan, en allant vers l'est, se trouvent les formations de l'Aptien avec des calcaires argileux et gréseux, des marnes bleues, chaque niveau ayant une puissance de une à quelques dizaines de mètres. Ensuite à partir de Goudargues, on trouve les formations de l'albien avec des marnes et des grès avec à la base un niveau phosphaté. On retrouve au-dessus des sables rutilants pouvant atteindre jusqu'à 100m. Viennent ensuite les niveaux du Cénomaniens où l'on retrouve des sables glauconieux, des grès quartzites, des calcaires argileux et lignite puis le Turonien et le Coniacien dans la partie aval de la zone d'étude est couverte par des calcaires et des grès.

A l'est du Fossé d'Alès, sur la rive gauche de la Cèze on retrouve les calcaires à faciès urgonien recouverts par les formations calcaires blancs de l'Oligocène dans lesquels sont présentes des lentilles de gypse (Ludien) et les calcaires argileux d'Issirac riches en matière organique.

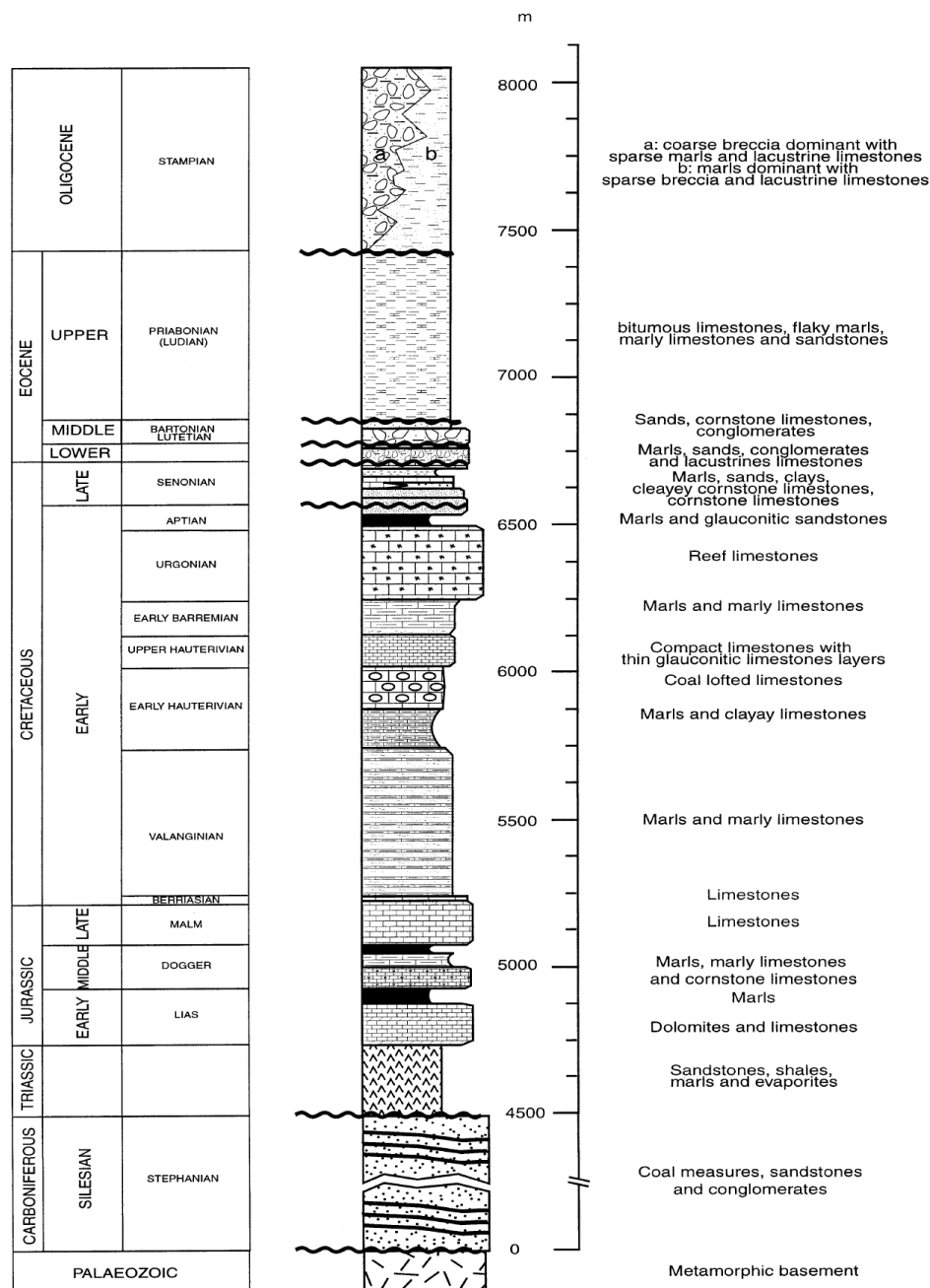


Figure 25 : Log stratigraphique du remplissage du fossé d'Alès [Sanchis et Séranne, 2000].

### III.1.2. Contexte hydrologique et hydrogéologique

Les précipitations annuelles moyennes sont de 750mm dans la partie amont du bassin versant de la Cèze (Genolhac), de 735 mm au niveau du bassin d'Alès (Alès) et de 752 mm dans la partie aval du bassin versant de la Cèze (Bagnols sur Cèze). Les pluies sont abondantes au printemps et à l'automne avec des événements cévenols fréquents à cette saison. Le régime hydrologique de la Cèze est caractéristique d'un climat pluvial méditerranéen, avec de fortes amplitudes de débits entre les saisons humides et sèches. La rivière présente de fortes variations saisonnières de débit (débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/s) allant de 3.5 m<sup>3</sup>/s les deux mois de l'été à 30 m<sup>3</sup>/s en janvier. Les crues peuvent être extrêmement violentes avec un débit instantané maximal pouvant atteindre 670m<sup>3</sup>/s pour les crues biennales et 2100 m<sup>3</sup>/s pour les crues cinquantennales.

Le régime des pluies pour les mois et années de prélèvement sont reportés dans la Figure 26. Les années 2014 et 2015 présentent des pluviométries différentes, en effet en 2014 les mois de mars, avril, mai et juin sont secs, le mois de juillet connaît de fortes précipitations. Le mois d'avril 2015 connaît de fortes précipitations avant de revenir à un mois peu pluvieux en juin.

Tableau 6 : Liste des stations de prélèvement des eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources. Pk signifie point kilométrique et exprime la distance en mètres de la station au point de repère qui est la station R2 (Pont de Rivière)

Station	Indication géographique	pK (m)	Type	X I93 (m)	Y I93 (m)
R1	Cèze amont Auzonnet	-2000	Rivière	800496,918	6348513,25
A1	Auzonnet	-440	Affluent	800930,1	6348122,2
A2	Claysse	2230	Affluent	802904,293	6350095,5
A4	Aiguillon	33885	Affluent	818636,9	6345146,5
R2	Cèze pont Rivières	0	Rivière	801681,2	6349283,0
R2'	Cèze amont Claysse	2000	Rivière	802729	6349931
R3	Cèze amont Féés	3065	Rivière	803699,9	6350096,6
R4	Cèze aval Font Canet	8825	Rivière	806692,9	6352568,8
R4'	Cèze Terris	14950	Rivière	811169,0	6352398,9
R4''	Cèze amont Illette	17750	Rivière	800496,918	6348513,25
R5	Cèze amont Moulin	19440	Rivière	813317,468	6352795,98
R6	Cèze pont Coureau	24610	Rivière	815759,5	6350962,3
R6'	Cèze Grange Coste	26500	Rivière	815356	6349297
R6''	Cèze moulin Bès	33835	Rivière	818579,6	6345156,0
R7	Cèze Roque/Cèze	42000	Rivière	821769,839	6344989,37
S1	Féés	5170	Source	805279,8	6350142,7
S2	Vanmâle	8290	Source	806443,5	6352173,9
S3	Font Canet	8735	Source	806590,3	6352584,6
S3'	Travers	9895	Source	807669,418	6352557,9
S4	Monteil	17040	Source	812173,457	6353130,79
S4'	Illette	18175	Source	812806,35	6353650,24
S5	Moulin	19895	Source	813231,636	6352519,54
S6	Baumes	21975	Source	814238,583	6352770,67
S7	Marnade	23765	Source	815050,251	6351392,3
S8	Ussel	27690	Source	815834,976	6348638,23
S9	Fabrique	28045	Source	816400,0	6348587,1
S10	Goudargues	31130	Source	816362	6348575
S11	Bastide Chaude	32170	Source	817397,6	6346046,4
S12	Bastide Froide	32400	Source	817321,867	6346105,03

La zone d'étude se situe le long de la Cèze, elle débute sur la commune de Rochegude (Pont de rivière) à l'extrémité Est du fossé d'Alès sur le lit de la rivière. La zone d'étude se poursuit vers l'est sur 12 km au travers des gorges de la Cèze creusées dans les calcaires du Crétacé. A la sortie des gorges, la zone d'étude a été étendue vers l'est jusqu'au niveau de la Roque-sur-Cèze.

Dans ce secteur d'étude, la Cèze collecte les eaux de 4 affluents, depuis l'amont vers l'aval : l'Auzonnet en rive droite, la Claysse en rive Gauche, la Chanlabre (Roméjac) rive gauche et l'Aiguillon en rive droite (Carte 11).

Au cours des campagnes de terrain de juillet 2014, juin et juillet 2015 le Roméjac n'a pu être échantillonné du fait d'écoulement nul. Nous ne discuterons pas par la suite des propriétés de cet affluent.

La liste complète des stations de prélèvements figure dans le Tableau 6. Les stations situées sur la Cèze porte l'appellation RX et sont numérotées de 1 à 7 depuis l'amont vers l'aval. Les sources de rive droite et rive gauche sont notées de S1 à S12 dans l'ordre d'apparition le long du linéaire Cèze, les affluents sont notés de A1 à A4 depuis l'amont vers l'aval de la zone d'étude (Tableau 6 et Carte 11)).

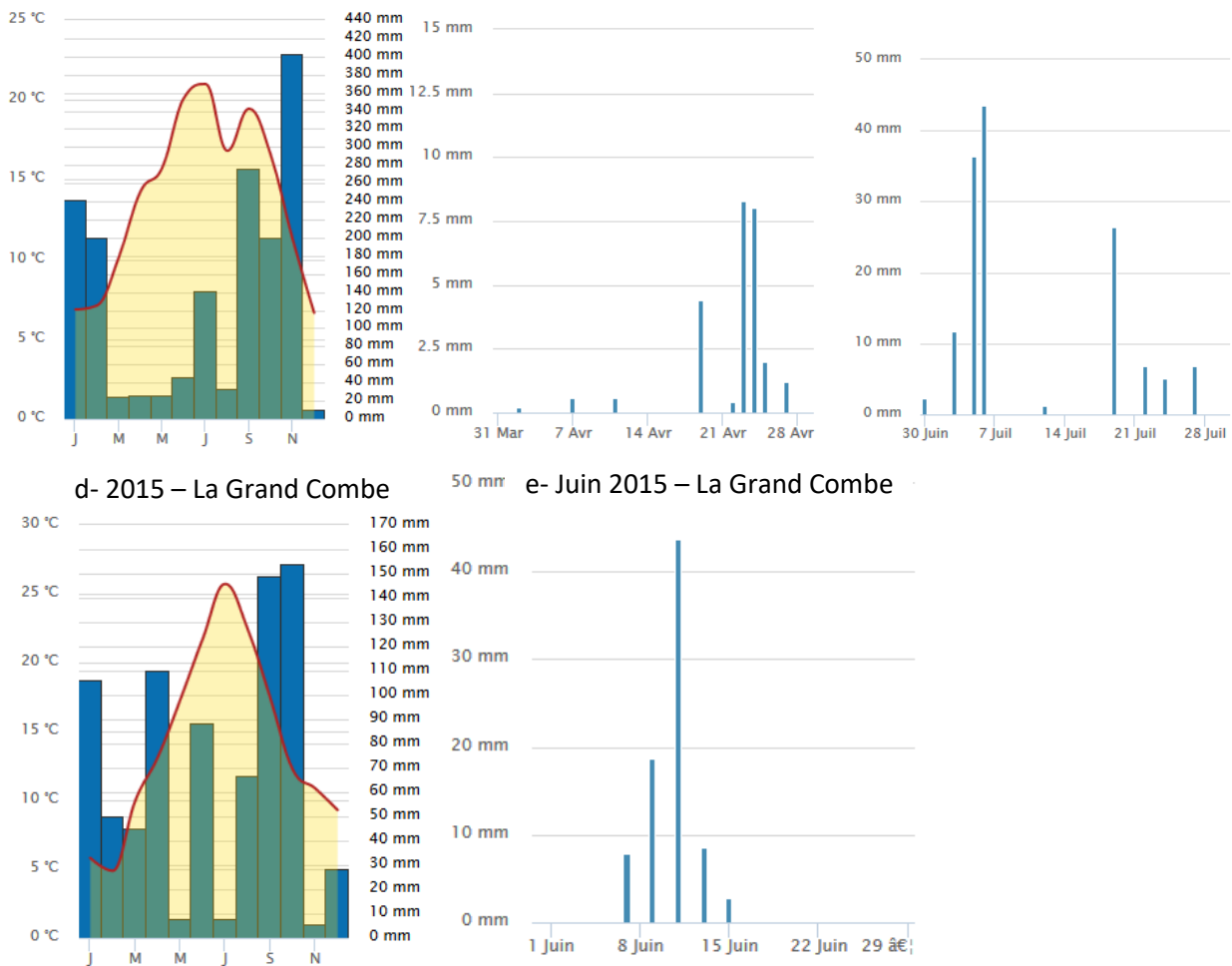


Figure 26 : a- Précipitations et températures à Méjannes-le-Clap en 2014 et b- précipitations des mois d'avril et c- juillet 2014. d- Précipitations et température à La Grand Combe en 2015 et e- précipitation du mois de juin 2015. (<https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/historique-consultation/mejannes-le-clap/2994725>)

L'Auzonnet (A1) prend sa source au niveau des séries métamorphiques des Cévennes puis traverse les formations tertiaires du fossé d'Alès avant de longer la bordure orientale du fossé vers le Nord et rejoindre la Cèze (Carte 10). Sur cette dernière portion de son trajet, l'Auzon draine les formations des calcaires bitumineux de l'Eocène et collecte les eaux de ses affluents l'Argensol et de l'Alauzène. Ces deux affluents prennent leur source au niveau de l'anticlinal de Lussan sur les calcaires du Crétacé. L'altitude du bassin versant de l'Auzon varie de 900 m dans les Cévennes cristallines jusqu'à 110 mètres au niveau de la confluence avec la Cèze en amont des gorges.

La Claysse (A2) et ses affluents drainent les formations géologiques sédimentaires du secondaire situées sur la bordure cévenole dans lesquelles on retrouve un réseau karstique. La Claysse traverse ensuite les formations tertiaires du fossé d'Alès. Dans les derniers kilomètres avant la confluence avec la Cèze, la Claysse traverse les calcaires bitumineux de l'Eocène et les calcaires du Ludien contenant des niveaux de gypse. Le bassin versant de la Claysse a une altitude maximale de 400 mètres, le point de confluence avec la Cèze se trouve à environ 110m d'altitude en amont des gorges.

L'Aiguillon (A4), prend sa source au niveau de l'anticlinal de Lussan, il draine les formations calcaires de l'Hauterivien à l'Aptien inférieur. Il rejoint la Cèze en aval des gorges au sud de la commune de Saint Gély. Son bassin versant a une altitude maximale de l'ordre de 300 mètres et une altitude de 70 mètres environ au niveau de la confluence avec la Cèze.



La notice de la carte géologiques de la feuille de Bessèges recense des eaux peu minéralisées (20 à 100 mg/L) dans la partie amont de la Cèze (Cévennes cristallines) et un pH acide de 5,6 à 6,6. Sur la bordure cévenole, les eaux issues des formations triasiques sont bicarbonatées calciques (minéralisation 100 à 300 mg/L), elles sont localement sulfatées calciques et plus chargées (> 600 mg/L), dans cette zone l'ion sulfate peut servir de marqueur à l'entrée du karst des formations secondaires, il est issu de l'interaction des eaux avec les formations riches en barytine et gypse ou encore avec les niveaux contenant des sulfures (§ 1.3.3). Au niveau des formations karstiques du Crétacé, on retrouve des eaux bicarbonatées calciques avec une minéralisation un peu plus élevée (300-400 mg/L).

En amont de la zone d'étude, au niveau du fossé d'Alès, aux Fumades se trouve des sources d'eau sulfatées calciques. Les études antérieures proposent en appui sur le contexte géographique et hydrogéologique et en appui sur des données isotopiques ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$ ) une mise en charge depuis les calcaires urgonien du Mont Bouquet (altitude moyenne de l'impluvium 430 m) et un lessivage des calcaires à niveaux de gypse du Ludien. Les eaux des sources ont été datées à 39 ans, cet âge peut être l'âge réel des eaux comme être un âge apparent du fait de mélange entre des eaux récentes et des eaux plus anciennes (BRGM, 2011).

## III.2. Les campagnes d'échantillonnage

---

Trois campagnes d'échantillonnage ont été réalisées afin de couvrir les contextes de moyennes eaux (juillet 2014), basses à moyennes eaux (juin 2015) et étiage sévère (juillet 2015).

**La campagne du 9 juillet 2014** était une campagne test destinée à identifier la présence ou non de contrastes isotopiques entre les eaux des sources et les eaux de la rivière (isotopes de l'eau et isotopes du soufre sur les ions sulfates). Neuf échantillons d'eau ont été prélevés sur les stations suivantes :

- Cèze : stations R2', R3, R6', R6''
- Sources rive droite : S1-Les Fées, S10-Goudargues, S12-Bastide Froide
- Source rive gauche : S4- Monteil
- Affluent : A2-La Claysse.

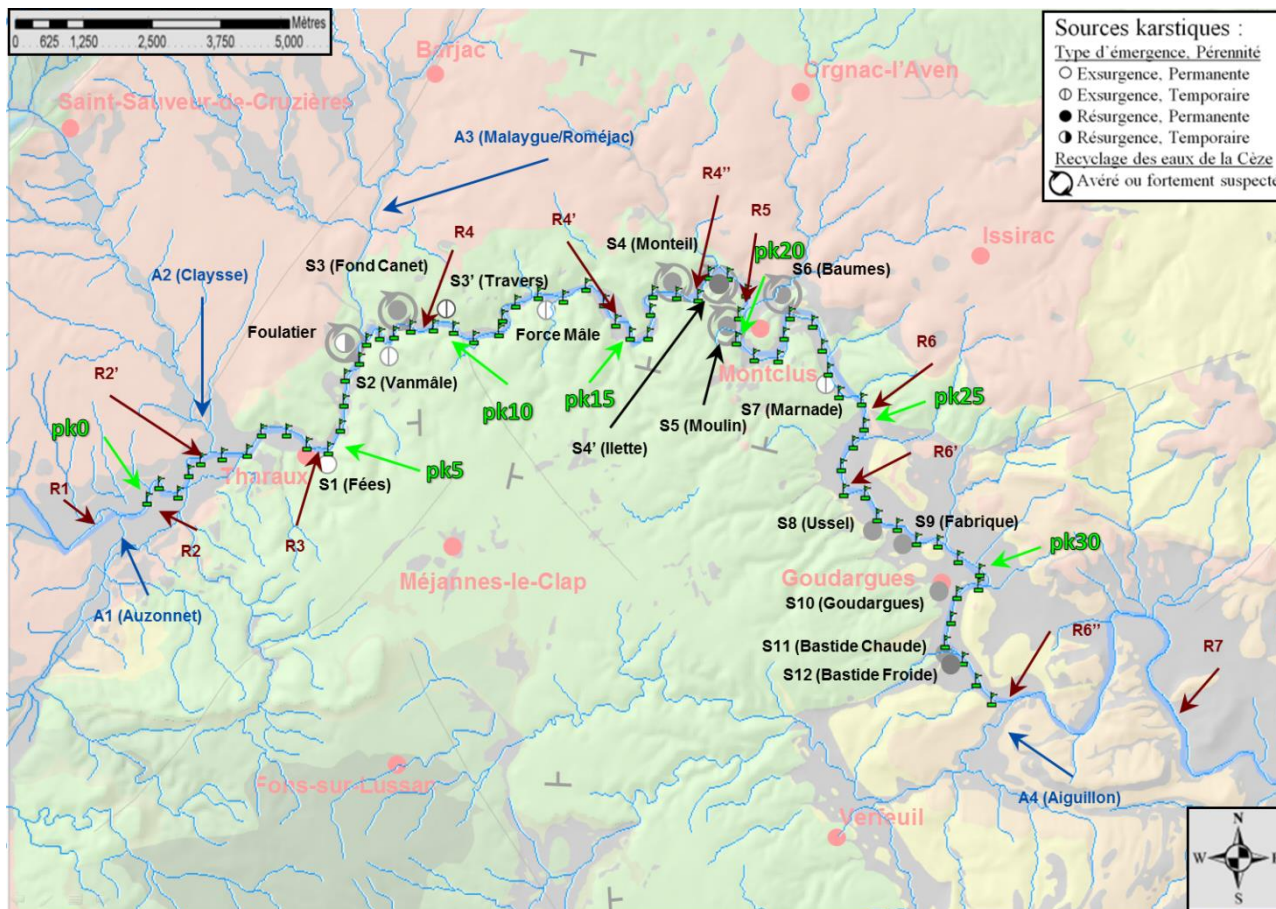
La campagne a été réalisée dans un contexte de moyennes eaux favorisé par un évènement pluvieux les 6 et 7 juillet affectant à la fois le bassin versant amont de la Cèze et la zone d'étude. Le cumul des pluies sur ces deux jours à Méjannes le Clap est de l'ordre de 80mm. Cet évènement pluvieux intervient après une période de précipitations mensuelles de l'ordre de 30mm pour les mois de mars, avril et mai et de l'ordre de 45mm pour le mois de mai (Figure 26 a,b et c).

En 2015 deux campagnes ont été réalisées, un entre le 8 et 11 juin et l'autre entre le 21 et le 23 juillet (Tableau 6). Les mois de mars, avril, mai juin, juillet 2015 sont globalement plus chauds que pour la même période en 2014 (Figure 26) mais aussi plus pluvieux avec des précipitations d'environ 45 mm en mars, 110mm en avril, moins de 10mm en mai, 90 mm en juin et moins de 10mm en juillet.

La campagne de juin 2015 a été réalisée en contexte de moyennes à basses eaux. Elle a été réalisée entre le 8 et le 11 juin. 25 échantillons ont été prélevés au niveau des sources, de la rivière et des affluents (Tableau 6). Les 9 et 11 juin des orages ont eu lieu donnant respectivement des précipitations de 19 et 42mm au niveau de la Grand Combe (Figure 26 d et e).

La deuxième campagne a été réalisée entre le 21 et le 23 juillet, elle a permis de collecter 27 échantillons répartis entre les sources, la rivière et les affluents. Le contexte hydrologique est un contexte d'étiage sévère.

Toutes les stations n'ont pas fait l'objet de prélèvement pour chacune des campagnes, cela au regard des conditions de terrains (écoulement ou pas). L'échantillonnage est cependant exhaustif et offre une bonne couverture du réseau hydrographique local.



Carte 11 : Localisation de l'échantillonnage pour les différentes campagnes de prélèvements géochimiques.

### III.3. Les traceurs géochimiques utilisés

Afin de contraindre au mieux l'origine et le chemin des eaux et les échanges karst-rivière au niveau des gorges de la Cèze, différents traceurs géochimiques ont été utilisés certains dépendants des interactions eau-atmosphère ( $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$ ) et d'autres dépendant des interactions eau-roche (éléments majeurs,  $\delta^{34}\text{SO}_4$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ).

#### III.3.1. Eléments majeurs

L'abondance des ions majeurs dans les eaux ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ) est contrôlée par la nature chimique des roches traversées et par le temps d'échanges entre l'eau et ces dernières. Certaines espèces ioniques peuvent également avoir une origine anthropique, du fait de l'activité industrielle, agricole, ou encore du fait des rejets domestiques. Seule l'activité agricole s'avère significative dans le

secteur d'étude. Les substances issues de l'activité agricole sont les espèces azotés telles que les nitrates, les espèces phosphorées comme les phosphates ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) ou encore les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) qui entrent dans la composition des engrais. Dans les eaux du secteur d'étude, les concentrations en phosphates sont en dessous du seuil de détection, ce paramètre ne sera donc pas abordé dans les discussions qui suivent.

### III.3.2. Les isotopes de l'eau

Les isotopes stables de l'eau ( $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ , Deutérium ou  $^2\text{H}$ ) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux (zone de recharge) dans des environnements variés (montagne, aquifères fracturés, etc.; [Coplen et al., 2000] ; [Barbieri et al., 2005] ; [Chapman et al., 2003] ; [Gurrieri et Furniss, 2004] ; [Kendall et Caldwell, 1998] ; [Maréchal et Etcheverry, 2003] ; [Rademacher et al., 2002]). Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$ , expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau de mer (SMOW). Les  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  des précipitations alimentant les rivières et les nappes sont principalement représentatifs des conditions de leur formation : température de surface (effet saisonnier), latitude, altitude. Sur un diagramme « $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  », les eaux de pluies se répartissent le long de la droite des eaux météoriques mondiales, des droites locales sont définies comme pour les eaux météoriques du Gard [Payne, 1991] et les eaux météoriques de Méditerranées Occidentale [Celle 200]. L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, les compositions isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  des eaux de rivières et des eaux souterraines présentent les mêmes caractéristiques que les eaux de pluie qui les alimentent : variations saisonnières et effet d'altitude. Le principal processus à l'origine de la modification du  $\delta^{18}\text{O}$  et du  $\delta\text{D}$  d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'une ou plusieurs origines différentes.

### III.3.3. Les isotopes du soufre des sulfates

La composition isotopique du soufre  $\delta^{34}\text{S}$  ( $^{34}\text{S}$  et  $^{32}\text{S}$ ) des ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) peut être utilisée pour compléter l'identification des sources d'eau et d'éventuels mélanges de masses d'eau.

Les espèces dissoutes ont pour sources naturelles l'atmosphère et les formations géologiques que les eaux rencontrent. Deux cours d'eau traversant des formations géologiques différentes hériteront de signatures chimiques différentes, ce qui constitue un critère supplémentaire pour l'identification des contributions à une masse d'eau. En ce qui concerne l'espèce dissoute  $\text{SO}_4^{2-}$  (ion sulfate), les principales sources sont:

- *l'oxydation des minéraux* de type sulfure (exemple la pyrite  $\text{FeS}/\text{FeS}_2$ ), lors du lessivage des roches sédimentaires et/ou métamorphiques par les eaux de surface ;
- *la dissolution de minéraux* de type sulfate (exemple le gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) lors du lessivage de roches sédimentaires par les eaux de surface ;
- *les apports atmosphériques* ;
- *l'activité bactérienne* au sein du système hydrogéologique ;
- *les apports anthropiques* (mines, agriculture, décharges,...).

L'analyse chimique fournit l'abondance totale de sulfates dans les eaux mais ne permet pas de discriminer les différentes sources d'apports possibles cités ci-dessus. Seul le couplage de l'outil isotopique  $\delta^{34}\text{S}$  à la mesure  $[\text{SO}_4^{2-}]$  permet d'identifier les différentes sources de sulfates.

### III.3.4. Les isotopes du strontium

Le traceur isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  présente un intérêt tout particulier pour affiner l'étude du chemin des eaux. Le strontium est un élément trace dans les eaux issu de l'interaction eau-roche. Chaque type de roche possède une signature isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  bien spécifique. Dans le cas simple où les eaux ne traversent qu'une seule formation géologique alors, le rapport isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du strontium est proche de celui des roches. Dans les cas plus complexes où les eaux traversent plusieurs formations géologiques, le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du strontium dissous aura une valeur intermédiaire aux rapports  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  des roches sources de strontium, le rapport isotopiques dans ce cas est indicateur de mélange. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème peuvent donner des informations sur l'origine et les proportions de mélange des différentes masses d'eau.

## III.4. Les méthodes analytiques

---

### III.4.1. Les mesures de terrains

Le pH, la température, la conductivité ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'une sonde multi-paramètres VWT 3420Tc. L'alcalinité a été déterminée sur le terrain par titration volumétrique (1.6 et 0.6N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) avec un kit de Hach. Compte-tenu des conditions pH du milieu, l'alcalinité a été reportée en concentration d'ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

### III.4.2. Les ions majeurs

Pour chaque station de prélèvement, deux volumes de 60 mL ont été collectés dans des flacons HDPE de 60 mL. Le flacon destiné à l'analyse des cations a été acidifié avec HNO<sub>3</sub> 2N ultrapur pour atteindre un pH≈3. Les échantillons ont été filtrés en laboratoire avant dosage avec un filtre en fibres de verre à 0,45μm.

Les concentrations en cations ont été mesurées à l'école des mines de Saint Etienne par ICP-AES, un test comparatif avec la technique de chromatographie ionique a été réalisée et a montré la bonne correspondance des dosages par ces deux techniques aux principes différents.

Les anions ont été dosés pour partie à l'école des Mines de Saint Etienne sur un appareillage de chromatographie ionique et pour partie au laboratoire magmas et volcans avec une chromatographie ionique DIONEX ICS-90 équipé d'une colonne IonPac AS12A 4x250 mm et d'une détection conductimétrique avec suppression de l'éluant. L'intervalle de confiance pour les concentrations mesurées est de +/- 5%.

### III.4.3. Les isotopes de l'eau

Les échantillons destinés à la mesure des compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène sur les eaux ont été collectés dans des flacons ambrés de 60 mL en évitant l'emprisonnement de bulle d'air.

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau ont été déterminées par spectroscopie par absorption laser dans un résonateur optique en anneau (CRDS) avec un appareil Picarro L2130i selon les recommandations de l'IAEA [Penna et al., 2010]. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire de géochimie isotopique de l'Université de Nîmes. Les standards internationaux GISP,

SMOW-2 et SLAP ont été utilisés pour calibration. Les valeurs isotopiques sont reportées avec la notation  $\delta$  en ‰ vs SMOW. L'incertitude des mesures est de  $\pm 0,1$  ‰ pour le  $\delta^{18}\text{O}$  et de  $\pm 1$  ‰ pour le  $\delta\text{D}$ .

#### **III.4.4. Les isotopes du soufre sur les ions sulfates**

Les échantillons destinés à la mesure des compositions isotopiques du soufre sur les ions sulfates ont été collectés dans des flacons HDPE de 1 L. Ils ont été acidifiés sur le terrain avec de l'acide chlorhydrique ultra pur pour atteindre un pH inférieur à 3 afin de limiter la formation de  $\text{BaCO}_3$  dans l'étape suivante. De retour au laboratoire, les ions sulfates ont été extraits sous forme  $\text{BaSO}_4$  par l'ajout d'un excès de  $\text{BaCl}_2$ . La solution et les précipités sont centrifugés, le surnageant est jeté et le précipité conservé, rincés à plusieurs reprises avec de l'eau dé-ionisée et séché dans une étuve pour la nuit à  $50^\circ\text{C}$ .

Les analyses isotopiques ont été réalisées au laboratoire Magma et volcans par méthode de EA-IRMS sur un analyseur élémentaire Thermo-Isolink couplé à un spectromètre de masse Thermo Delta V Plus. Les valeurs isotopiques sont reportées sous la notation  $\delta^{34}\text{S}$  et sont exprimés en ‰ vs CDT. L'incertitude sur la mesure est de  $\pm 0,4$  ‰. Les standards internationaux NBS27, SO6, SO5 ont été utilisés pour la calibration de l'instrument.

#### **III.4.5. Les isotopes du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$**

Les échantillons ont été collectés dans des flacons de 60 mL en HDPE. Du fait d'une détérioration du matériel de prélèvement, les échantillons n'ont pu tous être filtrés sur le terrain. Ils ont été acidifiés avec  $\text{HNO}_3$  ultrapur.

Les concentrations en Sr ont été déterminées à l'école des Mines de Saint Etienne par ICP-MS. La séparation chimique du Sr a été réalisée dans une salle blanche avec une résine échangeuse d'ion 5RS-BS-S, selon la méthode de Pin et al. (2003). Les rapports isotopiques du strontium ont été déterminés au laboratoire de géochimie isotopique de l'Université de Nîmes en utilisant un spectromètre de masse à ionisation thermique TRITON. Les données en Sr ont été normalisées pour un fractionnement isotopique au rapport  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$  de 0.1194. Pour la procédure chimique dans sa globalité, le blanc total en Sr est inférieur à 1ng. La précision interne de la mesure est meilleure que 0,000009.

### **III.5. Discussion autour des résultats**

---

#### **III.5.1. Les éléments majeurs**

Tableau 7 : pH, température, conductivité, concentrations en éléments majeurs et en strontium,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  et  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour les eaux collectées dans la Cèze, les sources et les affluents lors des campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015.

Station ID	Location	Type	pk (m)	Sampling Date	T °C	pH	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	Ca mg/l	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Cl mg/L	HCO3 mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	Sr mg/L	$\delta^{18}\text{O}$ ‰/SMOW	$\delta\text{D}$ ‰/SMOW	$\delta^{34}\text{S}$ ‰/CDT	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
A2	Claysse	Affluent	2230	09/07/2014	15,6	8,12	704	100,8	12,2	9,4	1,6	7,2	238,0	107,3	3,6		-5,7	-35,0	-12,2	
R2'	Pont de Rochegude	Rivière	2000	09/07/2014	18,8	8,07	339	48,0	7,6	9,6	1,3	9,9	100,0	38,3	5,5		-5,8	-34,4	11,1	
R3	Cèze Amont Féés	Rivière	3065	09/07/2014	19,4	8,31	383	46,8	6,5	7,5	1,1	4,7	133,0	40,7	1,5		-5,8	-34,4	3,5	
R6'	Cèze grange coste	Rivière	26500	09/07/2014	19,7	8,80	426	70,8	7,8	9,4	1,4	5,6	176,0	38,2	1,8		-5,7	-34,6	5,7	
R6''	Moulin De Bès	Rivière	33835	09/07/2014	19,4	7,90	453	73,0	4,9	6,0	0,9	5,6	182,0	40,7	2,4		-6,1	-36,6	6,2	
S1	Féés	Source	4975	09/07/2014	14,1	6,95	613	95,7	1,3	2,7	0,3	5,0	315,0	23,9	2,1		-6,8	-41,3	6,7	
S10	Goudargues	Source	31130	09/07/2014	15,2	7,30	476	92,5	5,4	5,0	0,8	5,3	206,0	15,8	5,4		-6,6	-40,2	3,9	
S12	Bastide froide	Source	32400	09/07/2014	14,8	7,12	610	72,5	2,6	2,9	0,6	4,7	276,0	6,1	1,5		-6,8	-41,5	0,0	
S4	Monteil	Source	17040	09/07/2014	14,8	7,30	506	71,1	8,0	9,7	1,2	6,5	183,0	45,6	3,7		-6,3	-37,7	3,9	
A1	Auzonnet	Affluent	-440	08/06/2015	22,3	8,03	636	109,4	14,7	9,4	1,8	1,2	237,0	13,1	0,1		-6,2	-37,2	8,7	
R1	Cèze Amont Auzonnet	Rivière	-2000	08/06/2015	25,8	8,03	346	43,3	10,3	15,6	1,8	5,5	98,0	47,3	1,0		-5,9	-34,6	15,0	
R2	Cèze Pont de Rivières	Rivière	175	08/06/2015	25,5	8,02	382	50,2	10,5	14,4	1,8	1,6	113,0	13,6	0,4		-5,9	-34,5	14,3	
R3	Cèze Amont Féés	Rivière	3065	08/06/2015	27,0	8,51	374	51,4	10,3	14,1	1,8	5,8	115,0	48,8	1,3		-5,9	-34,5	13,2	
R4	Cèze aval Font Canet	Rivière	8825	08/06/2015	24,3	7,82	414	66,1	9,9	13,5	1,7	4,7	130,0	37,1	1,2		-5,9	-34,8	nd	
S2	Vanmâle	Source	8290	08/06/2015	13,8	6,89	643	146,3	1,3	2,3	0,2	2,4	326,0	3,2	0,3		-5,5	-37,8	nd	
S3	Font Canet	Source	8735	08/06/2015	14,6	7,21	464	85,9	8,1	9,8	1,4	5,5	170,0	31,6	2,8		-6,3	-37,2	10,2	
R4'	Cèze terris	Rivière	14950	09/06/2015	25,2	8,09	416	62,6	8,8	12,0	1,6	3,5	123,0	25,6	0,9		-6,0	-35,1	13,3	
R5	Cèze amont Moulin	Rivière	19440	09/06/2015	24,1	8,31	425	71,6	8,7	12,2	1,8	4,5	145,0	30,2	1,4		-6,0	-36,1	11,5	
S4	Monteil	Source	17040	09/06/2015	14,3	7,18	510	96,4	6,3	7,0	1,1	1,5	205,0	8,2	1,3		-6,5	-39,0	5,5	
S5	Moulin	Source	19895	09/06/2015	18,3	7,30	448	75,3	7,3	9,8	1,3	4,3	175,0	32,7	1,2		-6,2	-36,7	13,5	
S6	Baumes	Source	21975	09/06/2015	13,7	7,35	468	92,1	4,5	5,6	0,8	1,7	189,0	6,6	1,6		-6,5	-39,7	6,2	
A4	Aiguillon	Affluent	33885	10/06/2015	17,8	7,53	680	117,7	4,5	6,4	1,4	4,9	288,0	17,7	1,7		-6,3	-40,0	-0,4	
R6	Cèze Pont de Coureau	Rivière	24595	10/06/2015	21,8	7,86	440	78,5	8,0	10,3	1,4	3,5	160,0	19,4	1,3		-6,1	-36,5	11,6	
S10	Goudargues	Source	31130	10/06/2015	15,4	7,32	485	80,9	4,9	4,3	0,6	3,0	201,0	9,3	2,9		-6,8	-41,0	4,2	
S12	Bastide froide	Source	32400	10/06/2015	15,6	7,10	620	135,9	3,5	3,5	0,6	2,6	294,0	7,2	1,7		-6,8	-41,3	5,3	
S7	Marnade	Source	23765	10/06/2015	13,7	6,95	613	138,1	2,7	3,3	0,5	2,9	290,0	8,4	0,9		-6,7	-41,1	nd	
S8	Ussel	Source	27690	10/06/2015	14,2	7,10	540	114,6	3,9	4,3	0,6	1,8	244,0	4,7	1,2		-6,7	-40,6	nd	
S9	Fabrique	Source	28045	10/06/2015	14,6	7,38	480	97,9	5,6	5,7	0,9	1,9	202,0	6,4	1,9		-6,7	-40,8	4,6	
A2	Claysse	Affluent	2230	11/06/2015	19,4	7,72	527	117,4	4,0	4,2	1,3	4,6	245,0	13,4	1,8		-5,9	-36,4	0,2	
R4''	Cèze amont illette	Rivière	17750	11/06/2015	22,8	7,94	436	42,5	5,1	6,8	1,0	6,6	148,0	39,5	1,9		-6,0	-35,9	12,1	
R7	Cèze Roque / Cèze	Rivière	42000	11/06/2015	22,0	8,00	476	89,4	6,9	8,4	1,3	2,0	187,0	9,8	0,8		-6,3	-37,8	8,9	
S1	Féés	Source	4975	11/06/2015	14,2	7,08	621	134,6	1,4	2,6	0,2	4,2	301,0	4,9			-6,2	-39,5	4,8	
S11	Bastide chaude	Source	32170	11/06/2015	21,4	7,05	517	99,4	9,4	3,6	0,6	4,4	245,0	7,2	4,1		-6,9	-41,6	-0,5	
S4'	Illette	Source	18175	11/06/2015	14,5	7,24	516	108,6	5,3	5,9	1,2	6,2	208,0	23,2	4,7		-6,6	-40,0	4,4	

Station ID	Location	Type	pk (m)	Sampling Date	T °C	pH	EC μS/cm	Ca mg/l	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Cl mg/L	HCO3 mg/L	SO4 mg/L	NO3 mg/L	Sr mg/L	δ <sup>18</sup> O ‰/SMOW	δD ‰ / SMOW	δ <sup>34</sup> S ‰ /CDT	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
A1	Auzonnet	Affluent	-440	21/07/2015	23,2	7,65	375	104,4	13,5	12,1	2,6	12,5	237,0	87,7		1,85			10,4	0,70859
A4	Aiguillon	Affluent	33885	21/07/2015	19,8	7,29	694	124,0	4,9	6,3	1,5	13,8	286,0	46,3	3,2	1,47			0,8	
R1	Cèze Amont Auzonnet	Rivière	-2000	21/07/2015	26,0	7,60	454	53,3	12,7	22,4	2,5	11,7	122,0	81,2		0,91			16,9	
R2	Cèze Pont de Rivières	Rivière	175	21/07/2015	25,2	7,58	458	57,2	12,2	20,9	2,4	11,2	132,0	77,7		0,97			16,5	0,71049
R3	Cèze Amont Féés	Rivière	3065	21/07/2015	33,0	8,05	418	48,1	11,8	20,7	2,8	11,8	102,0	75,5		0,9			16,7	
R6	Cèze Pont de Coureau	Rivière	24595	21/07/2015	26,6	7,79	475	79,0	6,5	7,8	1,3	8,0	184,0	33,6	1,3	0,99			9,1	
R6'	Cèze grange coste	Rivière	26500	21/07/2015	28,5	7,77	479	85,4	6,5	7,8	1,4	7,8	195,0	31,8	1,5	0,97			9,9	
R7	Cèze Roque / Cèze	Rivière	42000	21/07/2015	26,2	7,82	489	82,4	6,0	6,7	1,3	8,5	197,0	26,3	1,7	1			7,7	
S1	Féés	Source	4975	21/07/2015	14,1	7,03	617	131,8	1,4	3,0	0,3	5,6	289,0	5,1	0,9	0,36			6,1	0,70799
S10	Goudargues	Source	31130	21/07/2015	14,5	7,29	484	91,9	5,3	5,4	0,9	7,7	200,0	23,4	6,0	1,11				0,70828
S11	Bastide chaude	Source	32170	21/07/2015	21,6	7,13	472	85,8	9,0	3,3	0,6	5,3	223,0	7,2	4,4	1,2				
S12	Bastide froide	Source	32400	21/07/2015	14,6	6,82	646	130,8	3,2	3,3	0,6	5,8	319,0	6,4	1,5	0,69				
S4	Monteil	Source	17040	21/07/2015	14,8	7,42	510	92,3	7,1	8,2	1,3	8,2	198,0	39,6	4,2	1,21			7,9	0,70870
S8	Ussel	Source	27690	21/07/2015	14,3	7,09	527	103,3	3,9	4,4	0,7	6,5	226,0	20,5	3,7	0,86			5,4	0,70821
S9	Fabrique	Source	28045	21/07/2015	14,5	7,17	486	91,8	5,3	5,4	0,9	7,6	195,0	23,2	5,8	1,2			6,3	
A2	Claysse	Affluent	2230	22/07/2015	25,9	8,12	407	67,5	6,2	9,5	1,2	9,5	157,0	32,2		1,53			14,7	
R4	Cèze aval Font Canet	Rivière	8825	22/07/2015	20,5	7,32	484	85,3	7,5	9,3	1,5	7,5	192,0	37,2		0,9			13,1	
R4''	Cèze amont illette	Rivière	17750	22/07/2015	23,1	7,53	490	83,8	7,6	9,2	1,5	8,2	190,0	40,8	2,1	1,21			10,5	
R5	Cèze amont Moulin	Rivière	19440	22/07/2015	25,2	7,69	493	80,5	6,9	8,2	1,3	8,3	185,5	39,5	2,4	1,08			9,8	
S2	Vanmâle	Source	8290	22/07/2015	14,4	6,84	634	135,1	1,3	2,3	0,2	4,1	304,0	8,2		0,35			nd	
S3	Font Canet	Source	8735	22/07/2015	14,4	6,89	588	79,2	8,5	11,8	1,7	8,3	174,0	49,8	0,9	0,85			nd	0,70938
S3'	Travers	Source	9895	22/07/2015	14,4	6,89	588	127,8	0,8	2,4	0,2	5,1	295,0	5,0		0,13			nd	
S4'	Illette	Source	18175	22/07/2015	14,5	7,21	513	96,1	5,8	6,5	1,2	7,7	213,0	30,8	4,3	1,05			6,6	
S5	Moulin	Source	19895	22/07/2015	18,0	7,12	481	85,5	6,8	8,9	1,5	7,4	194,0	32,7		0,78			12,4	
S6	Baumes	Source	21975	22/07/2015	13,9	7,24	475	86,8	4,8	6,0	1,0	7,7	209,0	28,0	4,2	1,25			5,9	
S7	Marnade	Source	23765	22/07/2015	14,0	7,05	601	125,4	2,7	3,7	0,6	4,8	282,0	9,8	0,1	0,68			7,3	
R4'	Cèze terris	Rivière	14950	23/07/2015	26,4	7,79	478	80,1	8,0	10,1	1,7	8,1	175,0	38,4	0,3	0,98			12,7	

## Conductivité des eaux

Pour les 3 campagnes d'échantillonnage, les valeurs de conductivité varient entre 339 et 704  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tableau 7), les valeurs les plus faibles sont mesurées dans les eaux de la Cèze (339 à 496  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en amont des gorges et les valeurs les plus élevées sont mesurées dans les affluents de la Cèze (375 à 704  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les eaux des sources présentent une gamme de conductivité allant de 448 à 646  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Le pH varie entre 6.8 et 8.8 (Tableau 7) avec les valeurs entre 6,8 et 7,4 pour les eaux des sources et des valeurs entre 7,3 et 8,8 pour les eaux de la Cèze et de ses affluents.

La conductivité des eaux de la Cèze augmente le long de son parcours (Figure 27) et montre une variabilité dans le temps. Globalement les sources présentent des conductivités homogènes sur les trois campagnes d'échantillonnage. Les affluents de l'Auzonnet (A1) et de la Claysse (A2) présentent une variabilité de la conductivité dans le temps.

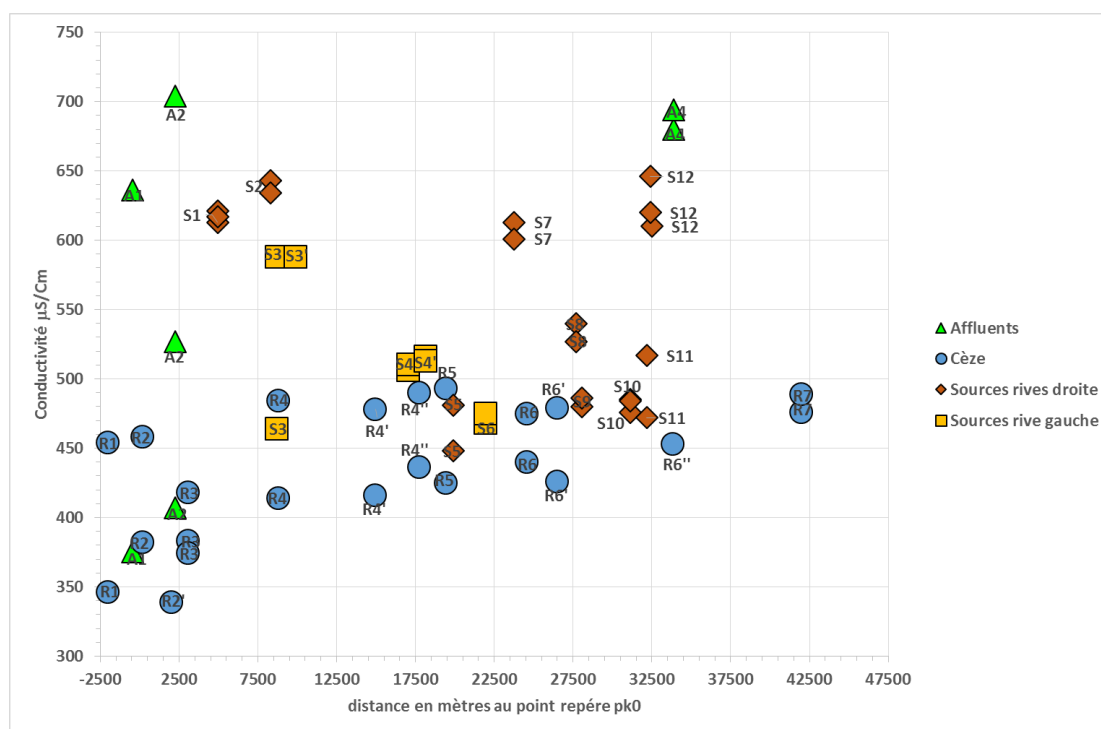


Figure 27 : Evolution de la conductivité le long de la rivière de la Cèze (cercles), de ses affluents (triangles), des sources en rive droite (losanges) et les sources en rive gauche (carrés). Les données obtenues sur les trois campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015 sont reportées.

## Diagrammes de Piper

Les eaux prélevées sur la zone d'étude sont bicarbonatées calciques à bicarbonatées calciques et sulfatées (Figure 28). Ces compositions chimiques sont en accord avec la nature sédimentaire et calcaire des formations géologiques présentes sur la zone d'étude mais aussi en amont au niveau du fossé d'Alès et de la bordure cévenole. Sur le diagramme de Piper se dessine une tendance type mélange entre des eaux enrichies en magnésium et en sulfates correspondant aux eaux de la Cèze en amont des gorges et des eaux enrichies en calcium et en bicarbonates correspondant aux eaux de sources.



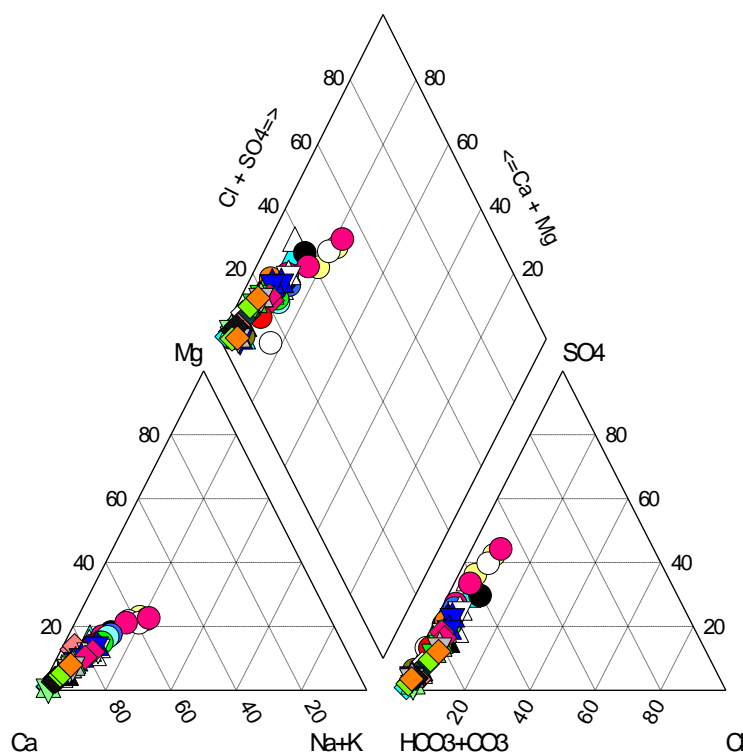
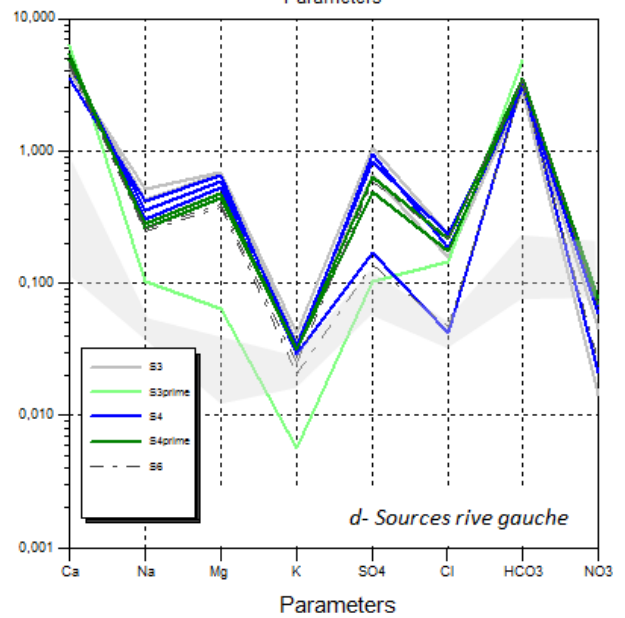
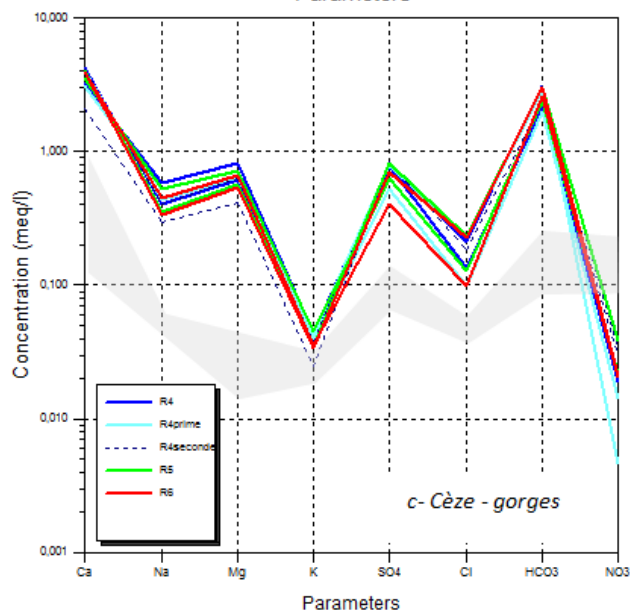
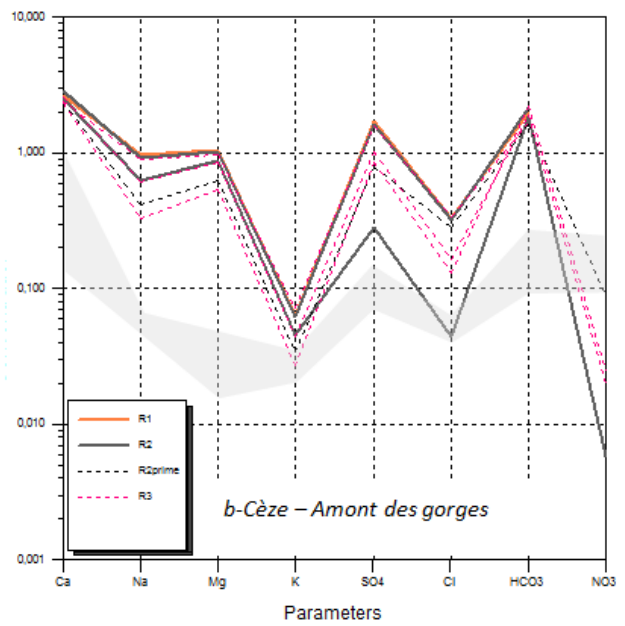
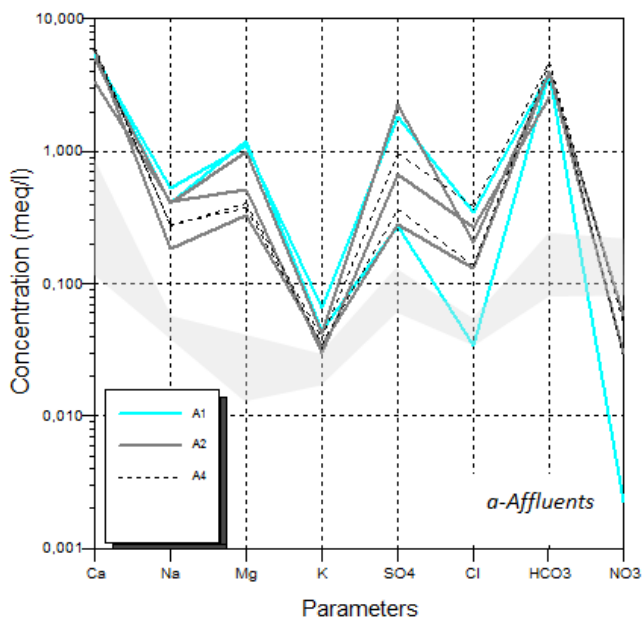


Figure 28 : Diagramme de Piper. Sont reportées les données pour les eaux collectées lors des trois campagnes d'échantillonnage juillet 2014, juin 2015 et juillet 2015. Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.

### Diagrammes de Schoeller

Les données ont été reportées sur les diagrammes de Schoeller (Figure 29) en comparaison avec la composition chimique des eaux de pluies du Gard issues de l'étude de Ladouche et al. [2009] afin de discuter de l'origine du chemin des eaux (eau de pluie moyenne dans le Gard, station de Cabrières :  $[Cl^-]$  0,05 meq/L,  $[SO_4^{2-}]$  0,10 meq/L,  $[NO_3^-]$  0,17 meq/L,  $[HCO_3^-]$  0,16 meq/L,  $[Na^+]$  0,05 meq/L,  $[K^+]$  0,03 meq/L,  $[Ca^{2+}]$  0,34 meq/L,  $[Mg^{2+}]$  0,03 meq/L ; d'après Ladouche et al. [2009]).



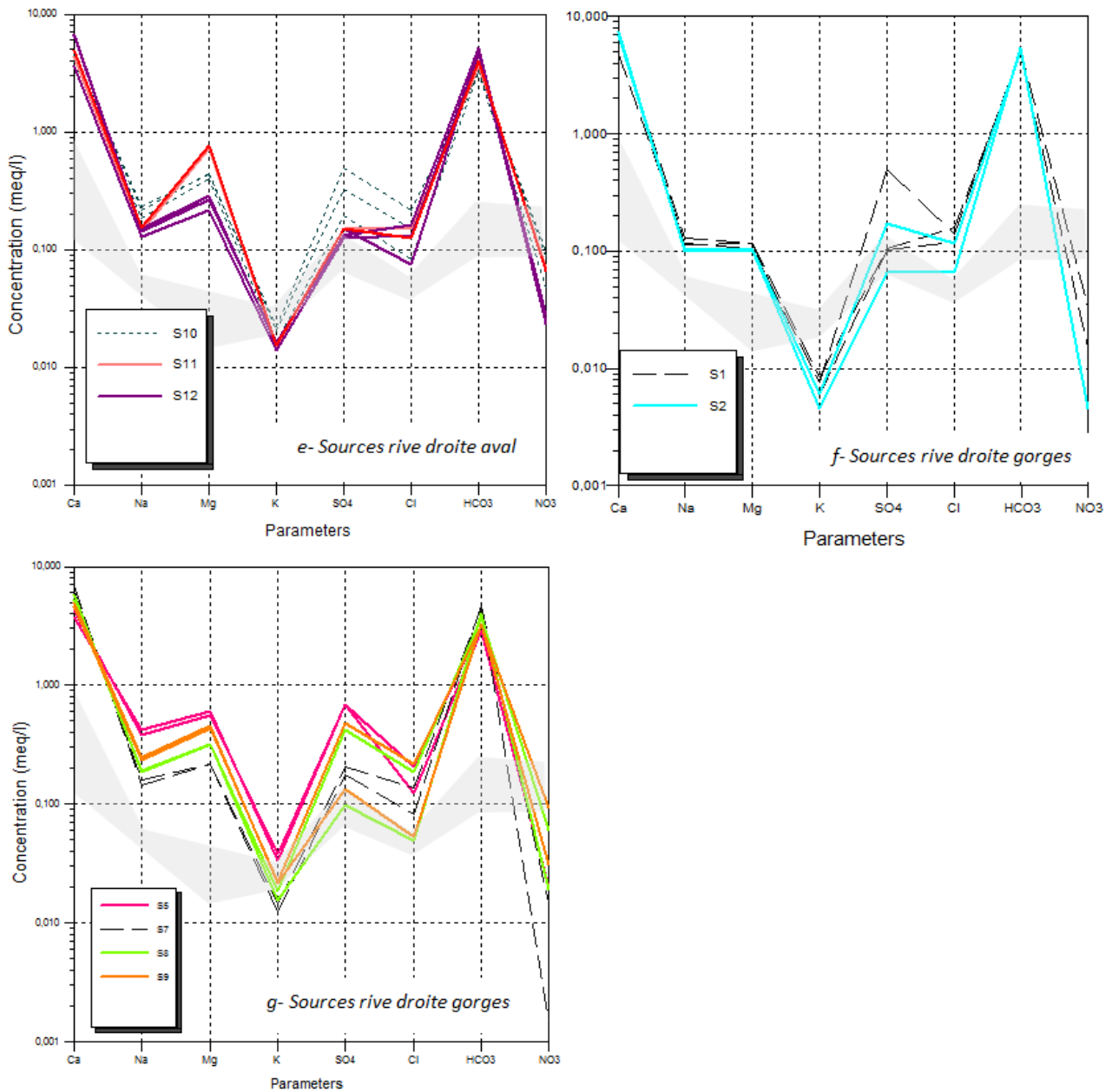


Figure 29 : Diagrammes de Schoeller pour les 3 campagnes de prélèvements. La zone grisée représente le domaine des eaux de pluies collectées dans le Gard au nord de Nîmes [Ladouche et al., 2009].

Il ressort que les eaux des cours d'eau et des sources sont plus minéralisées que les eaux de pluie, ceci met en évidence des interactions eau-roche. Cette observation est appuyée notamment par un enrichissement relatif des eaux en magnésium par rapport au sodium en comparaison avec les eaux de pluie. Les roches traversées par les différentes masses d'eau sont donc en capacité d'apporter du magnésium (présent par exemple dans les minéraux de dolomites).

La tendance la plus proche de celle des eaux de pluie est celle décrite par les sources S1, S2, S11, S12, S3' (Fées, Vanmâle, Bastide Chaude, Bastide Froide et Travers) avec un enrichissement limité à nul en sulfates par rapport aux eaux de pluie. Ces eaux sont enrichies (facteur 2) en calcium, bicarbonates (facteur \*15) et magnésium (<\*2) par rapport aux eaux de pluie. Pour certaines dates de prélèvement les eaux des sources S4 (Monteil) et S6 (Baumes) en rive gauche et de S8, S9 et S10 (Ussel, Fabrique et Goudargues) en rive droite sont aussi dans cette tendance. La minéralisation de ces eaux de pluies évolue au contact des roches calcaires traversées avec l'apport de calcium et de bicarbonates et avec un apport de

magnésium limité. Côté rive gauche les formations du Ludien peuvent être sources de magnésium pour les eaux de S3' (Travers). Pour ces sources on ne peut pas mettre en évidence d'interactions avec les eaux de la Cèze.

→ **Famille 1.** Les sources S1, S2, S7, S11, S12 et S3' (Fées, Vanmâle, Marnade, Bastide Chaude, Bastide Froide et Travers) qui seraient alimentées (quasi)-exclusivement par les eaux de pluie.

La deuxième tendance que l'on peut observer est celle décrite par les eaux des affluents avec un fort enrichissement en calcium (\*10) et bicarbonates (\*15) par rapport aux eaux de pluies mais aussi un enrichissement marqué en ions sulfates (\*10) et magnésium (\*10). Ceci peut s'expliquer par les roches traversées, les trois cours d'eau traversent essentiellement des roches sédimentaires calcaires qui sont capables d'apporter du calcium, ils traversent également les formations du Ludien dans lesquelles on retrouve des niveaux de gypse en capacité d'apporter des ions sulfates.

→ **Famille 2.** Les affluents de la Claysse, l'Auzonnet et l'Aiguillon fortement enrichis par rapport aux eaux de pluie.

Les eaux de la Cèze prélevées en amont des gorges (stations R1) présentent également un enrichissement en ions sulfates par rapport aux eaux de pluie du secteur mais aussi un enrichissement sodium (\*3) et en magnésium important (\*15) amenant à un rapport Na/Mg proche de 1 ; ceci peut s'expliquer aisément par l'interaction des eaux de la Cèze avec les roches métamorphiques en tête de bassin versant qui sont en capacité de fournir du sodium et avec les roches carbonatées du secondaire sur la bordure cévenole et du Tertiaire au niveau du fossé d'Alès pouvant amener du calcium et du magnésium.

→ **Famille 3.** Les eaux de la Cèze amont représentées par les échantillons collectés à la station R1.

Les eaux prélevées au niveau des trois stations les plus proches (R2, R2' et R3) décrivent une tendance qui se détachent légèrement de celle décrite par R1 avec un enrichissement en Na atténué. Cette tendance est proche de celle des eaux de la Cèze prélevées au niveau des gorges (Station R4, R4', R4'', R5, R6, R6' et R7), à la différence près que les eaux de ces dernières stations sont très enrichies en ion calcium (\*5). La différence entre les eaux collectées à la station R1 et celles collectées aux stations R2, R2', R3 montre des apports à la Cèze entre les stations R1 et R2 puis entre R2 et R3 qui peuvent être assurés par les affluents de la Claysse et de l'Auzonnet.

→ **Famille 4.** Les eaux de la Cèze en aval de la station R1 sont caractérisées par un enrichissement en ions sulfates et en calcium par rapport aux eaux de pluie.

Les eaux de la source S3, S4 et S6 (Font Canet, Monteil et Baumes) en rive gauche et les eaux des sources S4' et S5 (Ilette et Moulin) en rive droite présentent une tendance qui se superpose à celle des eaux de la Cèze (Figure 29 c et d), on peut donc envisager que les sources sont alimentées au moins en partie par l'eau de la Cèze même si la proportion varie fortement en fonction de l'état hydrologique (hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux).

→ **Famille 5.** Les sources S3, S4, S4', S5 et S6 alimentées au moins en partie par les eaux de la Cèze en proportion variable suivant la période.

Les eaux des stations S8, S9 et S10 qui présentent des influences majoritairement karstiques et dans une moindre proportion des influences inconnues (influences discutées dans la section traitant des isotopes).

→ **Famille 6.** Les sources S8, S9 et S10 dont les influences semblent évoluer entre un pôle eau de pluie et un pôle inconnu en proportion variable suivant la période.

### Diagrammes rCa vs EC ; rHCO<sub>3</sub> vs EC ; rCa vs rHCO<sub>3</sub> ; rCa vs rMg

A partir de la Figure 30 on peut observer que pour la majorité des échantillons analysés les deux paramètres concentrations en calcium (rCa) et concentration en ions hydrogencarbonates (rHCO<sub>3</sub>) sont positivement corrélés avec la conductivité (la mention r précise que la concentration est exprimée en meq/L). Le rapport rCa/rHCO<sub>3</sub> est compris entre 1,2 et 1,5 (Figure 31-a), ces valeurs proches de 1 et le rapport rMg/rCa nettement inférieur à 1 (Figure 31-b) montrent qu'un processus majeur de dissolution de la calcite se produit dans la zone d'étude et explique l'essentiel de la conductivité mesurée dans les eaux.

La Figure 31-b permet de mettre en évidence une corrélation négative entre les concentrations en ion calcium et en ion magnésium dans les eaux du secteur. Avec un pôle appauvri en calcium et enrichi en magnésium essentiellement représenté par les eaux de la rivière et un pôle enrichi en ion calcium et appauvri en ion magnésium essentiellement représenté par les eaux des sources de la rive droite de la Cèze.

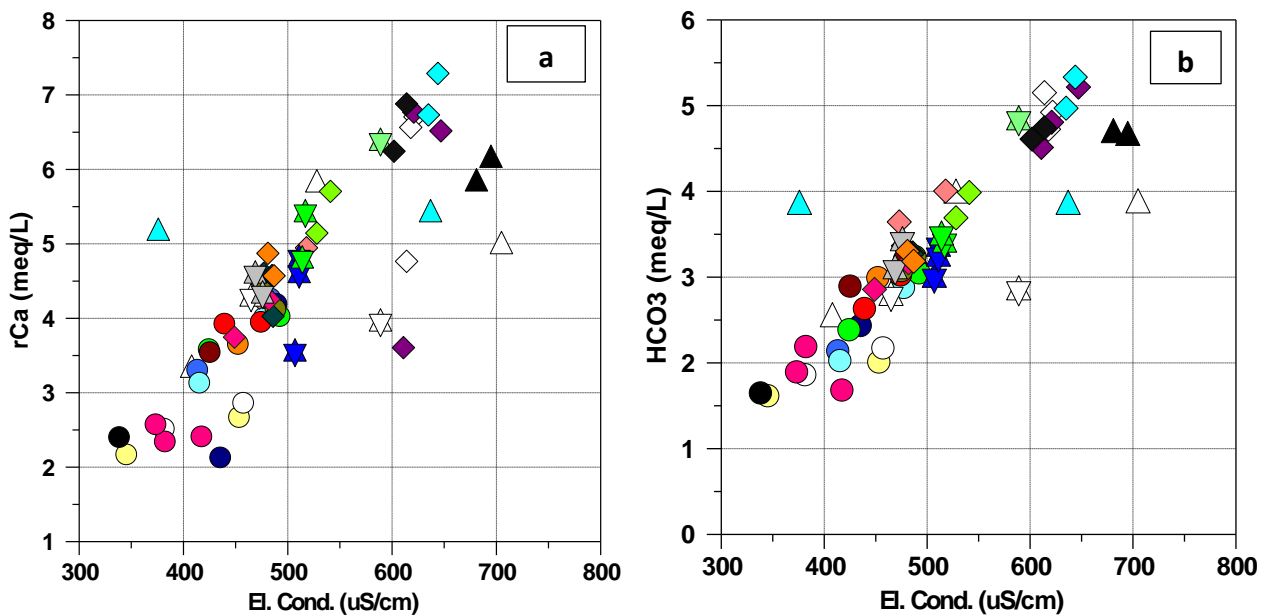


Figure 30 : a- rCa (meq/L) vs conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ ) et b- rHCO<sub>3</sub> (meq/L) vs conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ ). Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.

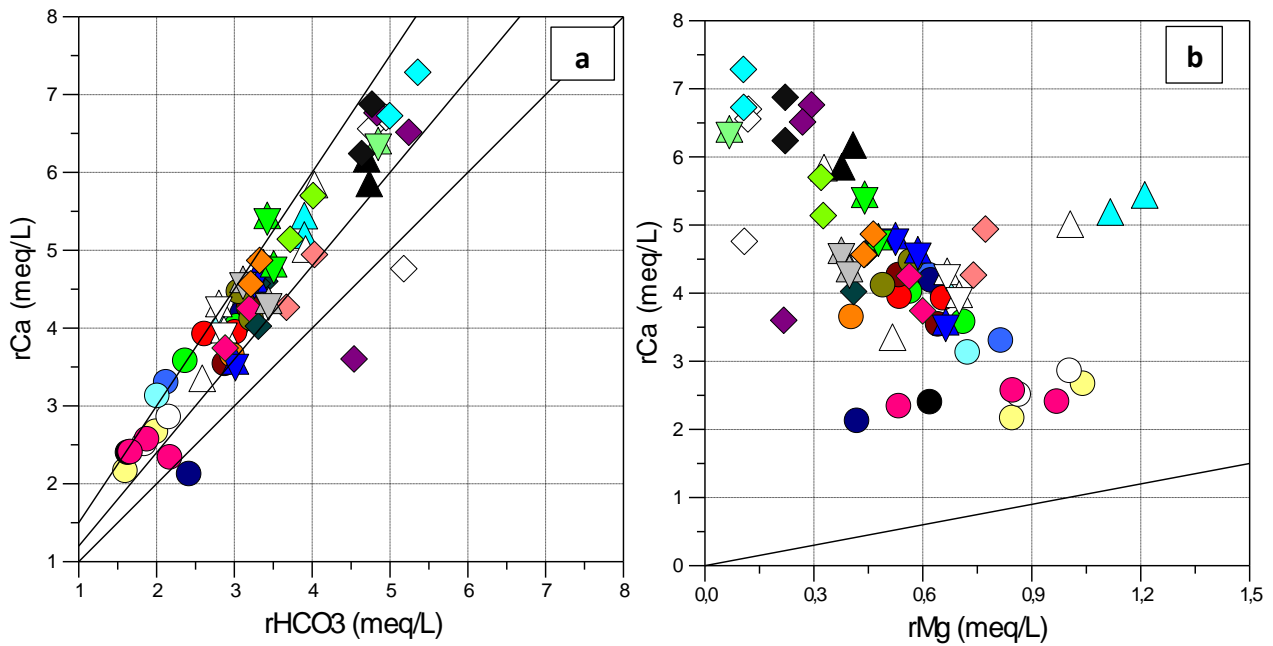


Figure 31 :  $rCa$  (meq/L) vs  $rHCO_3$  (meq/L) (a) et  $rCa$  vs  $rMg$  (meq/L) (b). Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.

### Diagrammes $rNa$ vs $rMg$ et $rNa$ vs $rCl$

Les données décrivent une corrélation positive entre les concentrations  $rNa$  et  $rMg$  (Figure 32-a) avec un pôle enrichi représenté par les eaux de la Cèze (R1 et R2) collectées en amont des gorges et un pôle très appauvri représenté par les eaux prélevées au niveau des sources de la rive droite S1 (Fées) et S2 (Vanmâle) et de la source rive gauche S3' (Travers), qui sont très proche du pôle « pluie ». Les autres échantillons se répartissent en intermédiaire, seule la source S11 (Bastide chaude) sort de cette tendance et montre un enrichissement en magnésium. Cette source se démarquera par la suite à plusieurs reprises, les eaux sont anormalement chaudes (+7°C en moyenne) en comparaison avec les températures mesurées sur les autres sources. Une influence hydrothermale peut être envisagée mais nous ne disposons pas de suffisamment d'informations pour exploiter cette possibilité.

Le rapport  $rNa/rCl$  (Figure 32-b et -c) permet d'identifier l'origine des apports en sodium et chlorure, un rapport égal ou proche de 1 met en évidence l'apport à partir des sels marins présents dans les roches sédimentaires ou dissous dans les pluies. Un rapport  $>1$  met en jeu une source plutôt cristalline telle que les formations métamorphiques des Cévennes pauvres en Cl mais contenant de l'ordre de 2 à 3 % de  $Na_2O$ . Ainsi nous pouvons observer que la majorité des sources de la rive droite S1, S2, S7, S11, S12 (Fées, Vanmâle, Marnade, Bastide Chaude et Bastide Froide) et la source de la rive gauche S3' (Travers) présentent des rapports proches de 1 et ont donc essentiellement une influence d'origine marine pour les abondances en sodium et chlorures. Les autres sources présentent des rapports  $rNa/rCl$  supérieur à 1 ou variable au cours du temps ce qui montre des apports de sodium à partir d'une autre source.

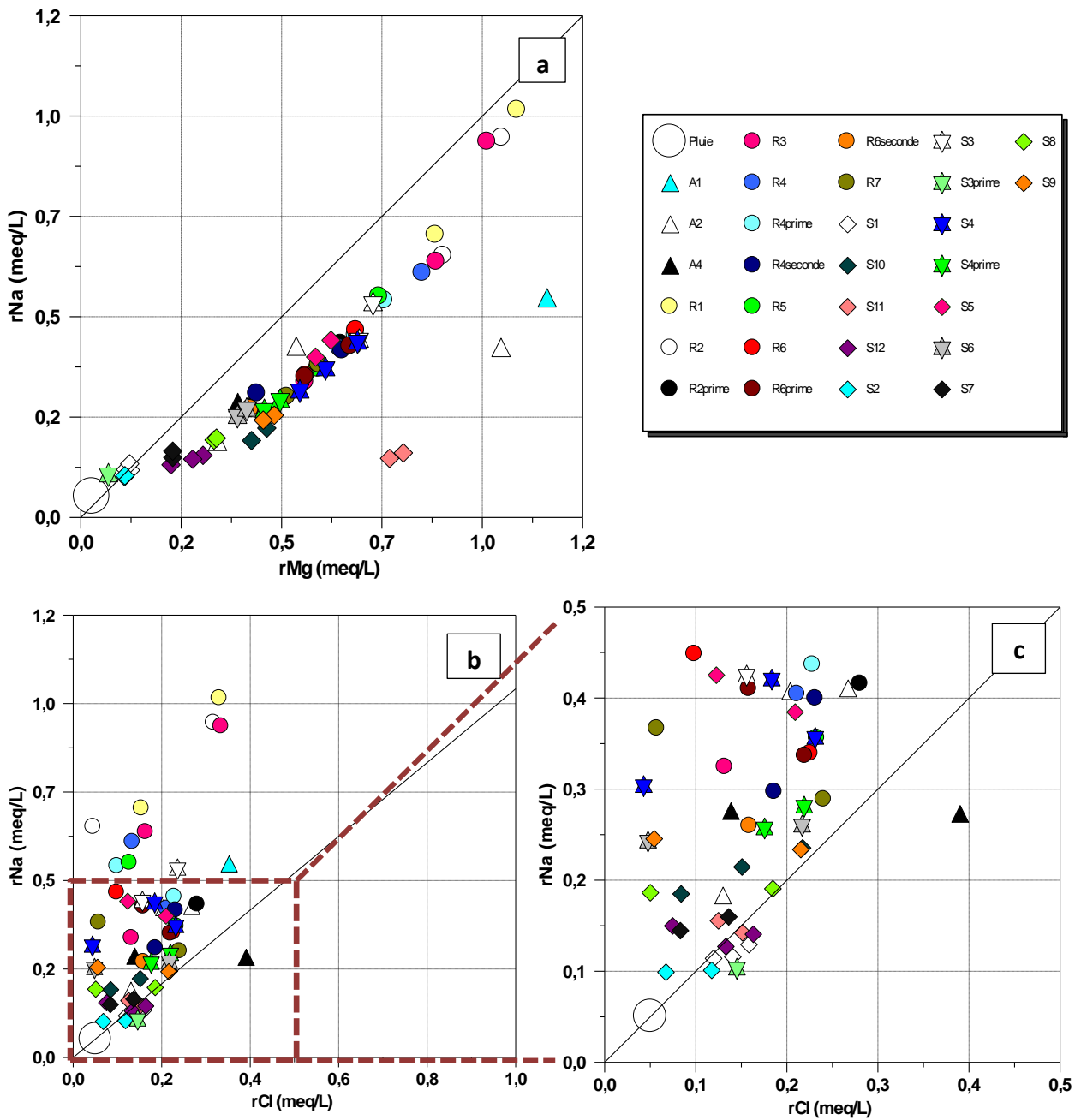


Figure 32 : a- rNa vs rMg et b et c- rNa vs rCl pour les eaux des trois campagnes de prélèvement. Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.

## Diagrammes rMg vs rSO4

Sur le diagramme rMg vs rSO4 (Figure 33-c) les données de juin 2015 montrent une dispersion bien plus importante que celle que l'on observe pour juillet 2015 (Figure 33-d). En effet en juillet 2015 les eaux de la Cèze et les sources S3, S4, S4', S5, S6, S7, S8, S9 et S12 (Font Canet, Monteil, Illette, Moulin, Marnade, Ussel, Fabrique, Bastide Froide) décrivent une très bonne corrélation linéaire ( $r_{Mg}=0,53r_{SO4}+0,16$ ,  $R^2=0,99$ ), ceci met en évidence pour juillet 2015 un mélange entre les eaux de la Cèze arrivant en amont des gorges enrichies en SO<sub>4</sub> et en Mg et des eaux des sources de types S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) appauvries en Mg et SO<sub>4</sub>. Les deux sources S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) ont des concentrations en Mg intermédiaires entre celles des eaux de S1, S2 et S3' (Fées, Vanmâle et Travers) proches du pôle « pluie » et les eaux de la source S11 (Bastide Chaude) qui est en dehors des tendances précédentes.

En juin 2015, on retrouve les mêmes propriétés qu'en juillet 2015 pour les eaux S1 et S2 (Fées et Vanmâle, Travers n'a pas été échantillonnée) pour les eaux de S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) et pour les eaux de S11 (Bastide Chaude). Les eaux de R1 (rivière amont) sont moins concentrées mais cela peut s'expliquer par un régime de moyennes à basses eaux. Globalement les eaux de la Cèze voient leurs concentrations en Na et Mg diminuer sur son parcours. La majorité des sources se retrouve en intermédiaire entre les eaux de S12 et de R1.

Entre les deux périodes de 2015 on observe un saut important pour les concentrations Mg et SO<sub>4</sub> entre les eaux en amont des gorges et les eaux prélevées dans les gorges, ce saut n'existe pas en juin 2015 où on a une évolution plus régulière. Cela implique qu'en juillet on a une masse d'eau conséquente qui se mêle aux eaux de la rivière entre les points kilométriques 3km et 9km. Cet apport peut se faire par l'intermédiaire des sources S1, S2, S3 et S3' (Fées, Vanmâle, Font Canet et Travers) ou de manière diffuse. Les eaux des sources S1, S2 et S3' (Fées, Vanmâle, et Travers) se trouvant en dehors de la tendance de mélange on peut écarter cette hypothèse, S3 (Font Canet) se trouve en revanche sur la tendance de mélange avec des concentrations intermédiaires à celles de la Cèze à amont et celles des stations R4 et R4' (rivière moyenne), cela prouve donc que la source S3 (Font Canet) est influencée par les eaux de la Cèze mais ne permet pas d'expliquer le saut de concentration, nous devons donc faire également intervenir des venues d'eau diffuses qui permettent d'abaisser les concentrations en Mg et SO<sub>4</sub> mesurées au niveau de R1 (rivière amont). D'une manière générale, les modifications chimiques de la rivière sur ce tronçon supposent un apport important d'eau d'origine karstique sous forme diffuse.

Entre les stations R4 (pk8,9), R4' (pk15), R4'' (pk17,7) et R5 (pk 19,5) nous n'observons aucune variation de la concentration en Mg et SO<sub>4</sub> donc sur ce tronçon de la Cèze soit :

- Il n'y a aucun apport d'eau par venue diffuse ou depuis le karst ;
- Soit les eaux qui se déversent dans la Cèze ont une concentration en Na et Mg identique à celle des eaux de la Cèze au point R4, dans ce tronçon sont présentes les sources S3' (Travers), S4 (Monteil), S4' (Illette). Pour la période entre juin et juillet 2015, la source S4 (Monteil) dont le débit décroît de 278 à 147 L/s, présente exactement les mêmes teneurs en Mg et SO<sub>4</sub> que les eaux de la Cèze au niveau de ces 4 stations. Les eaux de S3' (Travers) et de S4' (Illette) sont appauvries par rapports aux eaux des stations R4, R4', R4'', leur influence n'apparaît pas significative sur les eaux de la Cèze du fait de débits assez modestes (< 1 L/s pour les Travers et entre 60 et 48 L/s pour l'Illette).

La source S11 (Bastide Chaude) se détache assez nettement des autres sources, cela donne l'impression que les eaux de S11 traversent des formations différentes de celles traversées par S1, S2 et S3' (Fées, Vanmâle et Travers) qui ne sont pas en capacité d'apporter du magnésium aux eaux. Les eaux de S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) se trouvent en intermédiaire, ceci peut être interprété de trois manières :

- **Mélange souterrain de masse d'eau** - Les sources S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) sont alimentées par des eaux de pluie qui s'enrichissent en magnésium par mélange avec une masse d'eau identique à celle qui alimente la source S11



- **Chemin des eaux** - Les eaux de S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) sont alimentées par des eaux de pluies qui circulent sur différents types de formations géologiques, des formations ne contenant pas de magnésium et des roches contenant du magnésium
- **Chemin et temps de résidence des eaux**- Les eaux de S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) sont des eaux de pluie qui traversent les mêmes formations géologiques que les eaux alimentant S11, il s'agit de formation géologiques qui contiennent du magnésium. La différence en concentration pourrait s'expliquer par un temps de résidence plus court pour les eaux de S7 et S12 que pour les eaux de S11. Ceci implique des modifications dans le système hydrogéologique, soit en termes de source d'eau soit en termes de chemin des eaux.

Les variations des concentrations en Mg et SO<sub>4</sub> dans les eaux, mettent en évidence un contrôle important de la chimie des eaux de la rivière sur la chimie des eaux des sources. Cet effet est beaucoup plus faible, voire nul pour le mois de juin 2015.

On observe une minéralisation plus forte des eaux en amont des gorges (R1) qui peut facilement s'expliquer par le contexte d'étiage. On retrouve toujours le pôle avec les eaux de S1, S2 et S3', S7 et S12 (Fées, Vanmâle, Travers, Marnade et Bastide Froide) qui se maintiennent. En juillet 2015 en période d'étiage on observe une relation type mélange entre les eaux des sources S7 et S12 (Marnade et Bastide Froide) et les eaux de la Cèze à la station R1. On remarque plusieurs tendances. Les eaux de S1, S2 et S3' (Fées, Vanmâle et Travers) qui sont toujours très appauvries et proches des eaux de pluies, les eaux de la Cèze amont enrichies en sulfates et magnésium du fait des formations géologiques traversées en amont. On remarque également que la source S11 (Bastide Chaude) se place à part. On a l'impression qu'il existe un mélange entre les eaux de pluie et les eaux de S11 enrichie en magnésium, ceci voudrait dire concrètement que les eaux de S11 circuleraient sur un niveau enrichi en magnésium, cette observation suggère à nouveau une circulation profonde et une origine hydrothermale.

En juin 2015 on n'est pas dans une tendance de mélange binaire mais plutôt sous l'influence de 3 pôles, le pôle « pluie », un pôle « amont des gorges » et un pôle S11 (Bastide Chaude).

Ces observations permettent de mettre en évidence que les sources S1 et S12 (Fées et Bastide Froide) ne sont pas influencées par les eaux en provenance des Cévennes mais sont influencées uniquement par des eaux circulant dans les formations sédimentaires marines.

La projection des concentrations en éléments majeurs dans les eaux en fonction de la distance des points de prélèvement au point de référence pK0 montre un enrichissement en Ca et un appauvrissement en Na cohérent avec un changement de lithologie des roches traversées par la Cèze. Pour les espèces Mg, K et SO<sub>4</sub> moins concentrées dans les eaux il n'apparaît pas de tendance générale sur l'évolution avec pour certains très peu de variation de la concentration tout du long de la Cèze. Ceci donne l'impression que l'on a un apport continu de ces espèces. Ceci peut être cohérent pour le SO<sub>4</sub> du fait de la présence de formations de gypse en rive droite au-dessus de l'urgonien. Les eaux de pluies s'infiltrant dans le réseau karstique pourraient dans la première partie de son trajet se charger en ions sulfates. Pour les éléments K et Mg il est plus difficile d'envisager ce scénario. En effet il n'y pas de niveaux de dolomies mentionnés sur la carte géologique au niveau des gorges qui pourraient expliquer les teneurs en Mg des eaux. De même les apports en K sont difficiles à discuter.

L'origine du magnésium et du potassium n'est pas entièrement contrainte, une comparaison reste à réaliser entre les eaux thermales des Fumades et les eaux que présentent sur le secteur afin de clarifier certains points sur l'origine des solutés et le parcours des eaux.

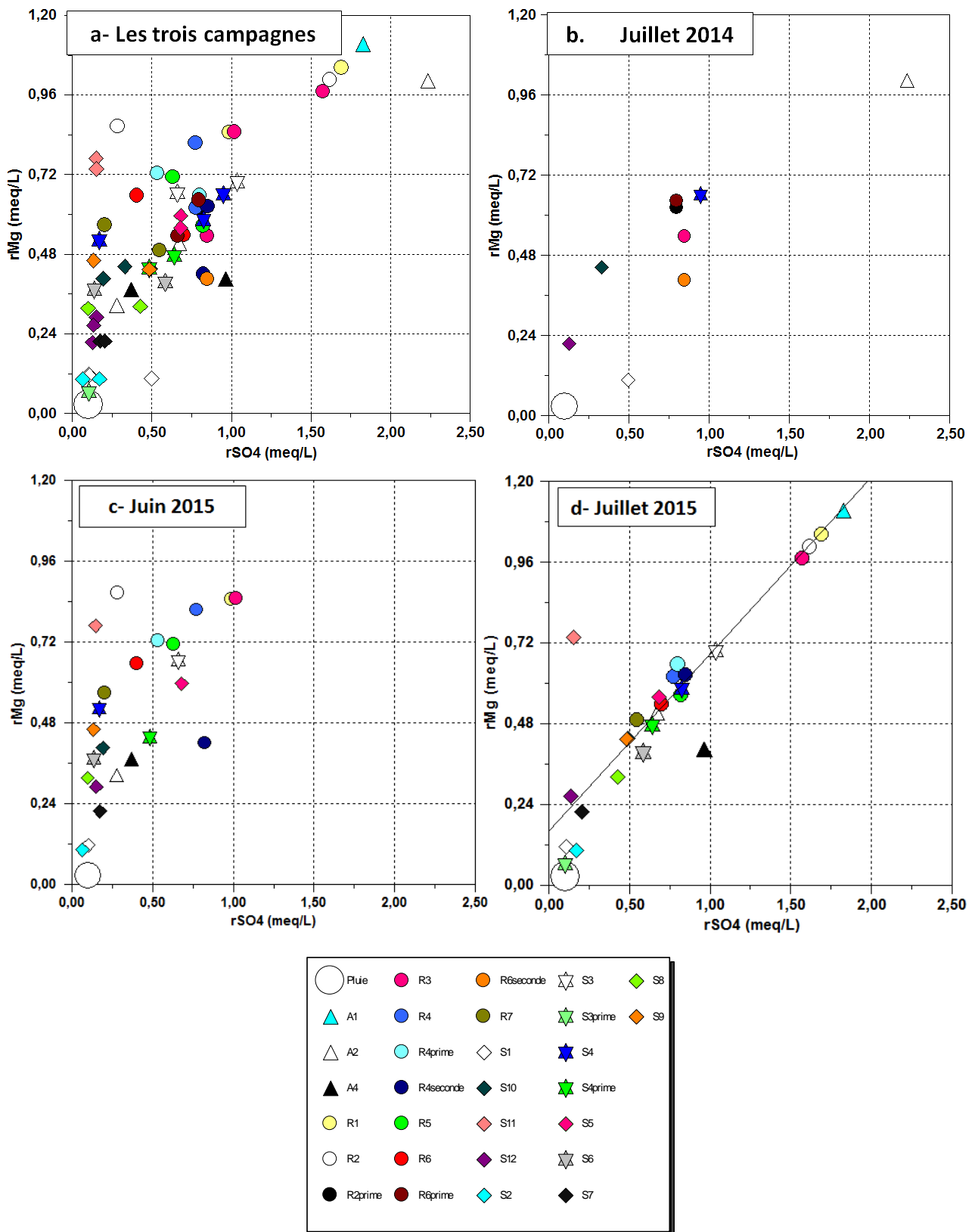


Figure 33 :  $rMg$  vs  $rSO_4$  pour les trois campagnes d'échantillonnage.

### III.5.2. Les isotopes de l'eau

#### Campagne de juillet 2014

Les données de la campagne de juillet 2014 montrent des contrastes isotopiques entre les différentes eaux collectées sur la zone d'étude. Le  $\delta^{18}\text{O}$  varie entre -6,8 et -5,7 ‰ /SMOW et le  $\delta\text{D}$  entre -34 et -42 ‰ /SMOW (Tableau 7). Ces valeurs se répartissent le long de la droite des eaux météoriques mondiales (GMWL ;  $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O} + 10$  ; Figure 34) et plus précisément entre les droites définies par Payne [1991] pour les eaux météoriques du Gard (GardMWL ;  $\delta\text{D}= 7,4 (\pm 0,1) \delta^{18}\text{O} + 7,3 (\pm 0,7)$ ) et par Celle [2000] pour les eaux météoriques de Méditerranée Occidentale (OMMWL,  $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 14$ ). L'excès en deutérium noté  $d = \delta\text{D} - 8*\delta^{18}\text{O}$  est une source d'indication sur l'origine des masses nuageuses, les masses d'air en provenance de l'Atlantique ont un excès en deutérium de +10 ‰, les masses d'air en provenance de la Méditerranée ont un excès en deutérium de +22 ‰, un mélange de ces masses d'air aura un excès en deutérium intermédiaire entre +10 et +22 ‰. Les travaux de Payne [1991] ont montré que les précipitations dans le Gard étaient influencées par un processus d'évaporation des gouttes de pluies lors de leur chute dans la colonne d'air sous l'effet de la faible humidité de l'air. Ce processus amène à un excès en deutérium de 7,3 ‰.

Dans la zone d'étude les pluies d'automne viennent généralement de la Méditerranée, alors que durant les autres saisons plusieurs origines sont possibles pour les masses d'air qui génèrent les précipitations, l'Atlantique, la Méditerranée et les sources locales (orages d'été qui recyclent les pluies précédentes).

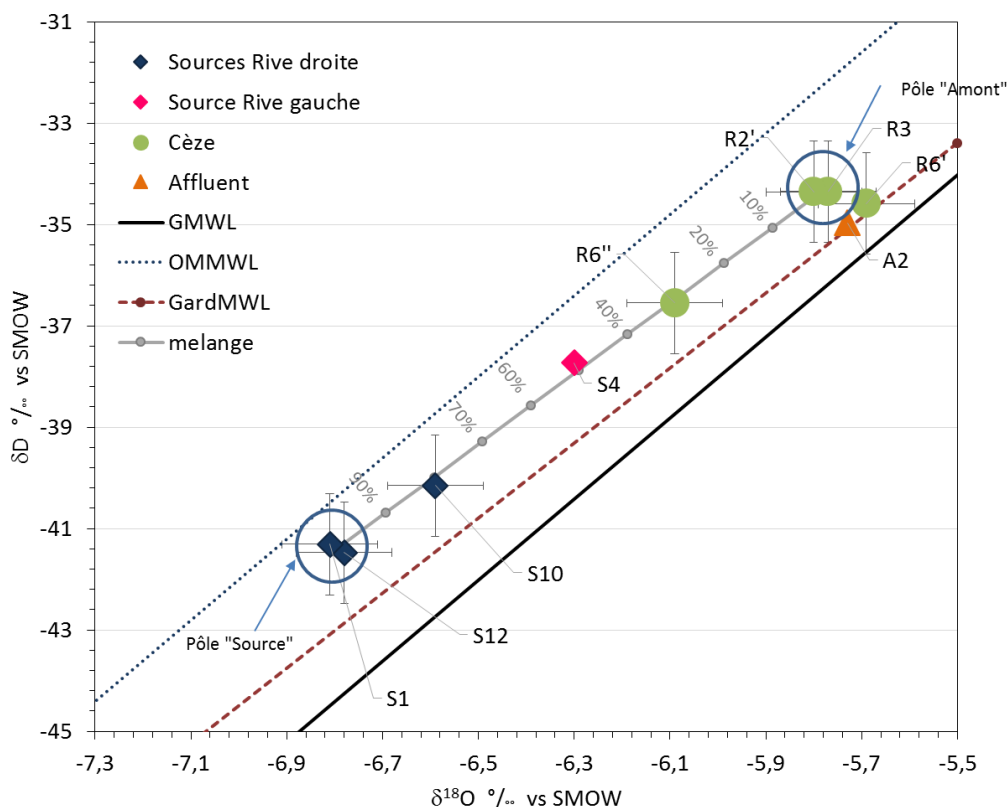


Figure 34 :  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  pour les eaux de la Cèze des sources et des affluents rencontrés sur le secteur de RocheGude à La Roque sur Cèze. La ligne grise représente l'évolution des  $\delta$  pour un mélange entre les eaux de la Cèze (Pôle amont) et les eaux des sources karstiques (pôle Source), la droite est graduée de 10 en 10 % (juillet 2014).

Les différences de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  observées d'un échantillon à l'autre peuvent mettre en évidence :

- Des eaux météoriques générées par des masses d'air différentes, résultant donc d'évènements pluvieux différents ;

- Des eaux météoriques générées lors d'un même évènement pluvieux mais à différentes altitudes ;
- Des mélanges entre des masses d'eau de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  différents.

Les  $\delta^{18}\text{O}$  attendus pour les précipitations du secteur d'étude ont été calculés à partir des travaux de Celle et al. [2000] qui reportent des  $\delta^{18}\text{O}$  moyens mensuels sur une période de 14 années d'observation. Ces données concernent la région avignonnaise qui se situe à une altitude de 24m. Celle et al. [2000] ont défini un gradient altitudinal de  $-0,28 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$  dans la région avignonnaise et Ladouche et al. [2009] ont défini un gradient altitudinal de  $-0,27 \text{ ‰} / 100 \text{ m}$  ( $\pm 0,1/100 \text{ m}$ ) dans l'Hérault, ces deux valeurs sont en parfait accord, on considérera pour notre étude que ce gradient altitudinal s'applique également au bassin versant de la Cèze qui se trouve à proximité des deux zones citées ci-dessus. Pour calculer les  $\delta^{18}\text{O}$  attendus pour les précipitations de notre secteur d'étude nous avons retenu une valeur de  $-0,28 \text{ ‰}/100 \text{ m}$  pour le gradient altitudinal, les résultats des calculs sont reportés dans le Tableau 8.

Tableau 8 :  $\delta^{18}\text{O}$  calculés pour les précipitations du secteur d'étude à partir des données de (\*) Celle et al. [2000]. Sont reportées les gammes de variation d'altitude des bassins versants (BV) des cours d'eau considérés. Le bassin versant amont de la Cèze comprend toute la zone géographique drainée par la Cèze et ses affluents en amont de la commune de Rochegude.

Lieu	Altitude de référence m	Gamme $\delta^{18}\text{O}$ ‰ / SMOW attendus										
		Janvier et Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Avignon*	22*	-8,2*	-8*	-6,1*	-7,5*	-3,9*	-4,7*	-4,4	-3,9	-6,7	-7,3	-8,7
Plateau de Méjannes-le-Clap	300	-9	-8,8	-6,9	-8,3	-4,7	-5,5	-5,2	-4,7	-7,5	-8,1	-9,5
BV amont de la Cèze	640 à 110	-9,9 à -8,4	-9,7 à -8,2	-7,8 à -6,3	-9,2 à -7,7	-5,6 à -4,1	-6,4 à -4,9	-6,1 à -4,6	-5,6 à -4,1	-8,4 à -6,9	-9 à -7,5	-10,4 à -8,9
BV de l'Auzonnet	900 à 110	-10,7 à -8,4	-10,75 à -8,2	-8,6 à -6,3	-10 à -7,7	-6,4 à -4,1	-7,2 à -4,9	-6,9 à -4,6	-6,4 à -4,1	-9,2 à -6,9	-9,8 à -7,5	-11,2 à -8,9
BV de la Clayse	400 à 110	-9,3 à -8,4	-9,1 à -8,2	-7,2 à -6,3	-8,6 à -7,7	-5 à -4,1	-5,8 à -4,9	-5,5 à -4,6	-5 à -4,1	-7,8 à -6,9	-8,4 à -7,5	-9,8 à -8,9
BV de l'Aiguillon	350 à 70	-8,3 à -9,1	-8,9 à -8,1	-7 à -6,2	-8,4 à -7,6	-4,8 à -4	-5,6 à -4,8	-5,3 à -4,5	-4,8 à -4	-7,6 à -6,8	-8,2 à -7,4	-9,6 à -8,8

Les eaux S1 et S2 (Fées et Vanmâle) présentent les mêmes compositions isotopiques ce qui montrent qu'elles proviennent du même évènement pluvieux ou qu'elles ont subi les mêmes processus de mélange, elles constituent un pôle appauvri en isotopes lourds ( $^{18}\text{O}$  et D) sur notre zone d'étude. L'alimentation de ces sources peut se faire à partir de l'impluvium que constitue le plateau de Méjannes-le-Clap et à partir de pertes depuis la Cèze. L'analyse des données en éléments majeurs nous a permis de mettre en évidence que la minéralisation de ces eaux résulte de leur interaction exclusive avec de roches calcaires, un mélange avec des eaux de la Cèze ne peut donc être envisagé. Le  $\delta^{18}\text{O}$  mesuré sur les eaux des sources S1 et S2 (Fées et Vanmâle) est de l'ordre de  $-6,8 \text{ ‰}$ , il peut correspondre à des précipitations se produisant sur le plateau de Méjannes-le-Clap en avril. Les données météorologiques (Figure 26 ; <https://www.terre-net.fr>) indiquent un cumul de précipitation de 25,7 mm pour le mois d'avril. Une recharge du karst est donc possible avec les pluies d'avril.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  moyen des eaux des deux stations R2' et R3 est de  $-5,8 \text{ ‰}$  et se trouve dans la gamme des  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations qui peuvent être collectées sur le bassin versant amont de la Cèze ( $-6,4$  à  $-4,9 \text{ ‰}$ ) pour un mois de juillet. La campagne de prélèvement s'est déroulée le 9 juillet après l'épisode pluvieux des 6 et 7 juillet où 40mm d'eau ont été enregistrés à La Grand Combe et plus de 80mm à Méjannes-le-Clap (<https://www.terre-net.fr>). Les deux stations R2' et R3 se trouvent à une distance de 1km l'une de l'autre, et la Clayse rejoint la Cèze sur ce tronçon. Les eaux de la station R2' et les eaux de la Clayse (A2) présentant les mêmes  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ , la masse d'eau résultante est affectée du même  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  donc il n'y a pas d'évolution visible de ces deux paramètres entre R2' et R3.

Le  $\delta^{18}\text{O}$  de la Claysse (A2) avec une valeur de  $-5,8 \text{ ‰}$  est dans la gamme des  $\delta^{18}\text{O}$  attendues pour des précipitations de juillet sur le bassin versant de ce cours d'eau. Comme pour l'alimentation de la Cèze en R2' et R3 on peut mettre en évidence une alimentation en réponse aux événements pluvieux des jours précédant les prélèvements.

Les eaux de la source S4 (Monteil) ont un  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-6,3 \text{ ‰}$  intermédiaires aux valeurs discutées ci-dessus pour les sources S1 et S2 (Fées et Vanmâle) et pour la zone amont des gorges (R2' et R3) qui ne correspondent pas au  $\delta^{18}\text{O}$  attendu pour des précipitations de juillet sur l'impluvium karstique (rive gauche de la Cèze, altitude similaire à celle du plateau de Méjannes-le-Clap). Le diagramme  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  suggère un mélange entre les eaux des sources et les eaux de la Cèze amont. Selon cette hypothèse et après un calcul de mélange en considérant un  $\delta^{18}\text{O}$  moyen de  $-6,8 \text{ ‰}$  pour S1 et S2 et de  $-5,8 \text{ ‰}$  pour R2' et R3, les eaux de S4 (Monteil) seraient composées à 49 % par les eaux de source à hauteur de 51 % par des eaux de la Cèze de type R2'-R3. ***Les conditions du calcul font l'hypothèse que l'on mélange des eaux de la Cèze du moment à des eaux plus anciennes présentes dans le karst, implicitement on fait l'hypothèse que les eaux de la Cèze ont un parcours rapide dans le karst.***

Plus en aval dans la Cèze, les eaux de la station R6' présente des  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  ( $-5,7 \text{ ‰}$  ;  $-34,6 \text{ ‰}$ ) similaires à ceux relevés au niveau de la zone amont des gorges aussi bien dans la Cèze (stations R2' et R3) qu'au niveau de l'affluent de la Claysse (A2). Entre les stations R3 et R6' de nombreuses sources sont recensés dont certaines avec une alimentation supposée à partir de l'impluvium karstique. On s'attendrait donc à obtenir en R6' des  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  intermédiaires à ceux de R3 et de S1 et S2 (Fées et Vanmâle), or ce n'est pas le cas : deux hypothèses peuvent être avancées :

- La contribution des sources karstiques à l'alimentation de la Cèze entre les points R3 (pk3) et R6' (pk26,5) n'est pas suffisante ( $<10 \text{ ‰}$ ) pour modifier de manière significative les paramètres  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  d'entrée des gorges ;
- Soit une erreur est intervenue au niveau des prélèvements, identification et stockage des échantillons.

Les eaux collectées à la station R6'' (pk34) présentent un couple  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  de ( $-6,09 \text{ ‰}$  ;  $-36,5 \text{ ‰}$ ) intermédiaire aux données de R3 et S1-S2. Sur le tronçon R6' – R6'' de la Cèze, 6 sources (S7 à S12) sont identifiées en rive droite (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) et pourraient venir modifier les propriétés  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  observées pour les eaux de la Cèze en partie amont. En appliquant les mêmes calculs que pour S4 (Monteil) nous pouvons estimer à 32 % la part d'eau du karst contribuant au débit de la Cèze à la station R6''.

#### **Synthèse de la campagne de juillet 2014**

Cette campagne a été réalisée après un épisode pluvieux de 3 jours ayant affecté le bassin amont de la Cèze et la zone des gorges avec une intensité 2 fois plus forte dans ce dernier secteur.

Les eaux de la Cèze à l'entrée des gorges sont les eaux des précipitations qui se sont produites sur le bassin versant amont de la Cèze les jours précédents les échantillonnages. Les eaux des sources S1 et S12 résultent de l'infiltration d'eau météorique au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap qui daterait du mois d'avril. Ceci implique un temps de résidence de l'eau dans le milieu karstique de l'ordre de 74 jours. A partir des données  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  nous ne pouvons pas mettre en évidence une contribution significative de ces deux sources au débit de la Cèze pour le mois de juillet 2014. Les deux autres sources étudiées auraient une alimentation mixte à partir des eaux de pluie infiltrées au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap et des eaux de la Cèze pénétrant dans le karst par des phénomènes de perte. L'apport à la Cèze de ces masses d'eau à  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  très négatifs entraîne une évolution du  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de la Cèze entre l'entrée des gorges et l'aval. La contribution du karst à l'alimentation de la Cèze dans ce contexte hydrologique est de l'ordre de 35 % et se ferait essentiellement entre les points kilométriques pk27 et pk34 sous l'influence des sources S7 à S12.

## Campagne de juin 2015

Pour la campagne de juin 2015 (Figure 35), un échantillonnage plus important a été réalisé, les gammes de variation des  $\delta^{18}\text{O}$  (-6,9 à -5,5 ‰) et des  $\delta\text{D}$  (-41,6 et -34,5 ‰) sont similaires à celles observées en juillet 2014. Pour cette campagne les échantillons S1 et S2 n'ont pas été conditionnés de manière optimale, une bulle d'air était présente et on observe également un biais dans les résultats qui traduit un processus d'évaporation. Ces données ne seront donc pas discutées.

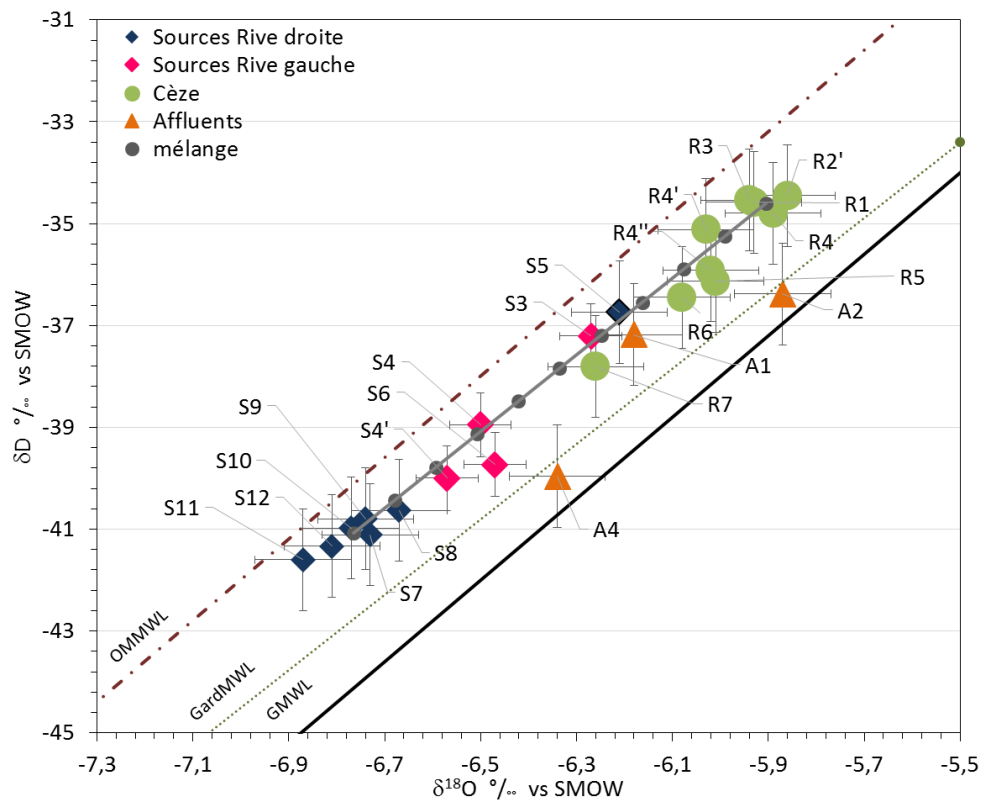


Figure 35 :  $\delta\text{D}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  pour les eaux de la Cèze des sources et des affluents rencontrés sur le secteur de Rochevide à La Roque sur Cèze. La ligne grise représente l'évolution des  $\delta$  pour un mélange entre les eaux de la Cèze (Pôle amont) et les eaux des sources karstiques (pôle Source), la droite est graduée de 10 en 10 % (juin 2015)

Les sources de rive droite S7, S8, S9, S10, S11 et S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) ont des valeurs très proches les unes des autres et en prenant en compte les incertitudes sur la mesure on peut considérer un point unique pour lequel on adoptera les valeurs moyennes  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen}} = -6,8 \text{ ‰}$  et  $\delta\text{D}_{\text{moyen}} = -41,1 \text{ ‰}$ , ces valeurs se placent dans la gamme des  $\delta^{18}\text{O}$  attendus pour des précipitations d'avril sur le plateau de Méjannes-le-Clap. Au niveau du karst on se retrouve dans le même contexte que juillet 2014, avec des eaux qui dateraient du mois d'avril et qui auraient donc un temps de résidence au moment du prélèvement de l'ordre de 45 jours. Ces données isotopiques suggèrent également que toutes ces sources qui apparaissent entre le point kilométrique 28 et le point kilométrique 32,5 sont alimentées par un même réservoir.

On retrouve les valeurs isotopiques les plus élevées dans les eaux de la Cèze collectées aux stations les plus en amont R1, R2, R3 et ici R4 qui présente des valeurs très proches ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen}} = -5,9 \text{ ‰}$  ( $\pm 0,04$ ) et  $\delta\text{D}_{\text{moyen}} = -34,6 \text{ ‰}$  ( $\pm 0,15$ )). A partir de R4 et jusqu'à R7 on voit l'évolution des  $\delta$  vers des valeurs plus négatives. Le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen}}$  des eaux des stations amont de la Cèze est légèrement en dehors de la gamme des  $\delta^{18}\text{O}$  attendus (-5,6 à 4,9 ‰) pour les précipitations d'un mois de juin sur le bassin versant amont de la Cèze. Les échantillons ont été collectés entre le 8 et le 11 juin. Au cours de cette période un événement pluvieux est intervenu le 9 et le 11/06 pour un cumul de 53 mm avec une température moyenne journalière de 15 à 20°C à la Grand Combe (<https://www.terre-net.fr>). Le mois de mai n'a vu que peu de

précipitations (<10 mm), pour avoir des précipitations significatives il faut remonter à la fin du mois d'avril (>80mm) pour lequel les  $\delta^{18}\text{O}$  attendus pour les précipitations sur le bassin versant amont de la Cèze sont compris entre -7,8 et -6,3 ‰. Les valeurs mesurées en juin 2015 sur les eaux des stations amont de la Cèze sont donc intermédiaires entre les gammes d'avril et de juin.

Les eaux de la Claysse (A2) avec un  $\delta^{18}\text{O}$  de -5,9 ‰ et les eaux de l'Aiguillon avec un  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,34 ‰, comme pour la Cèze, présentent des valeurs en dessous les gammes moyennes attendues pour un mois de juin, respectivement -5 à -4,1 ‰ et -4,8 à -4 ‰ (Tableau 8). Une influence des précipitations du mois d'avril peut également être évoquée pour expliquer les valeurs mesurées.

L'Auzonnet en revanche présente un  $\delta^{18}\text{O}$  de -6,14 ‰ qui se trouve dans la partie basse de la gamme des  $\delta^{18}\text{O}$  attendus (-6,4 à -4,1 ‰) pour les précipitations sur son bassin versant.

La source S5 (Moulin) en rive droite et les sources de rive gauche S4, S4' et S6 (Monteil, Ilette et Baumes) montrent des  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  intermédiaires entre les valeurs mesurées sur les eaux des stations R1 à R4 et des sources S7 à S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) suggérant un processus de mélange entre ces deux dernières masses d'eau. Le Tableau 9 reporte les résultats de calcul de mélange entre les eaux de la Cèze amont et les eaux des sources karstiques. Pour la source S5 (Moulin) serait alimentée à 65 % par les eaux de la rivière et à 35 % par des eaux du karst. Les sources S4 et S6 (Monteil et Baumes) de la rive gauche montre la même tendance avec une alimentation à 31 % par la rivière et à 69 % par le karst. La source S3 (Font Canet) serait quant à elle alimentée à 58 % par la rivière et à 42 % par le karst. D'après ces calculs la source S4' (Ilette) en rive gauche serait alimentée par la rivière seulement à hauteur de 23 % et donc à hauteur de 77 % par le karst.

*Tableau 9 : Calcul de mélange réalisés à partir des  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  obtenus sur les eaux de la Cèze, des sources et des affluents en juin 2015. Les pôles de mélange considérés sont les eaux de la Cèze arrivant à l'amont de la zone d'étude et les eaux de sources karstiques représentatives d'un pôle pluie locale assimilées à la moyenne des propriétés  $\delta\text{D}$  -  $\delta^{18}\text{O}$  des sources S7 à S12*

	Apport depuis la Cèze %	Apport depuis le karst %
<b>Source Rive droite</b>		
S5	65	35
<b>Sources rive gauche</b>		
S3	58	42
S4	31	69
S4'	23	77
S6	34	66
<b>Cèze en aval de Tharoux</b>		
R4'	85	15
R4''	87	13
R5	88	12
R6	80	20
R7	59	41

Le  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux de la Cèze commence à évoluer significativement entre les stations R4 (pk 9) et R4' (pk15), cela implique que sur le tronçon R1-R4, les eaux de l'Auzonnet (A1 ;  $\delta^{18}\text{O}$ =-6,2 ‰ ;  $\delta\text{D}$ =-37,2 ‰); la Claysse (A2 ;  $\delta^{18}\text{O}$ =-5,9 ‰ ;  $\delta\text{D}$ =-36,4 ‰) et de la source de rive gauche S3 (Font Canet) contribuent de manière insuffisante au débit de la rivière pour entraîner une modification du  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  des eaux de la Cèze collectées à la station R1.

Les eaux des stations R4', R4'', R5, R6, R7 ont des  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  intermédiaires aux  $\delta$  des eaux des sources rive droite et des eaux de la Cèze amont, les proportions de mélange sont reportées pour chacune de ces stations sur le Tableau 8. Les calculs montre que sur le tronçon de R4 (pk9) à R4' (pk15) le karst contribue

au débit de la Cèze à hauteur de 15 %. Au regard des mesures de débits réalisées indépendamment des analyses chimiques et isotopiques, ce résultat peut paraître surprenant dans la mesure où seulement deux sources sont répertoriées sur le tronçon R4-R4', la source de Travers S3' en rive gauche et la source de Force Mâle en rive droite qui sont toutes deux des sources non pérennes qui ont tendance à se tarir (juin –juillet) rapidement en l'absence de précipitation. Entre R4' et R4'', il y a peu de modification du  $\delta^{18}\text{O}$  et du  $\delta\text{D}$ , les calculs donnent des proportions de mélanges entre les eaux de la Cèze amont et les eaux du karst similaires à celles obtenues pour les eaux de la station R4. Sur ce tronçon c'est la source S5 en rive gauche qui peut contribuer au débit de la Cèze, ces eaux sont-elles même un mélange d'eau de rivière (65 %) et d'eau du karst (35 %), sont impactées sur les compositions isotopiques de la rivière est donc diluée. On se retrouve dans la même configuration sur le tronçon R4'' – R5 où il n'y a pas d'évolution notable des contributions de chacune des masses d'eau, sur ce tronçon la source Ilette (S4') peut contribuer au débit de la Cèze mais les calculs de mélange indiquent qu'elle est elle-même alimentée par les eaux de la rivière (23 %) et les eaux du karst (77 %). Sur le tronçon R5 à R6 la contribution du karst au débit de la rivière augmente à 20%, les sources S5 (Moulin : 65 % rivière + 35 % karst), S6 (Baumes : 34 % rivière + 66 % karst) et S7 (Marnade : considérée comme 100 % karst) viennent alimenter la rivière. Cela est donc cohérent.

Enfin de R6 (pk25) à pk (42) on voit la contribution du karst grimper à 41 %, ces 21 % supplémentaires sont apportés par les sources de la rive droite S8 à S12 (Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) qui sont dans nos calculs considérées comme le pôle représentatif du karst.

#### **Synthèse campagne de juin 2015**

Cette campagne a été réalisée en partie pendant un événement pluvieux affectant le bassin amont de la Cèze et le secteur des gorges. Cet événement pluvieux fait suite à un mois d'avril très pluvieux et un mois de mai sec.

Les eaux collectées dans les affluents et dans la Cèze en amont des gorges contiennent des eaux dont les compositions isotopiques en oxygène et en hydrogène sont représentatives d'un mélange entre des précipitations du mois d'avril et en moindre quantité des précipitations du mois de mai et de début juin.

Les sources de la rive droite S7 à S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) ont probablement été rechargées à partir de l'impluvium du plateau calcaire en avril 2015 et n'ont pas subi de perturbation isotopiques  $\delta\text{D}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  par les eaux de la Cèze. La source Moulin mobilise des eaux du karst à hauteur de 35% et les eaux de la Cèze à hauteur de 65 %.

En rive gauche, toutes les sources collectées S3, S4, S4', S6 (Font Canet, Monteil, Ilette et Baumes) sont un mélange de précipitations infiltrées au niveau du plateau calcaire et des eaux de la Cèze, pour des contributions variables d'une source à l'autre (de 21 à 58 % d'eau du karst).

En juin 2015, le karst a contribué à l'alimentation de la Cèze à hauteur de 59 % et le bassin versant amont de la Cèze a apporté les 41 % d'eau restant. En comparaison, la proportion de contribution du karst au débit de la rivière déduite des jaugeages ***différentiels donne la valeur de 48 % qui est compatible avec la proportion de 59 % déduite du calcul de mélange pour les isotopes de l'eau.*** L'ensemble de ces eaux résultent majoritairement des précipitations du mois d'avril.

#### **Comparaison des périodes juillet 2014 et juin 2015 en appui sur les données $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta\text{D}$ des eaux**

Les deux campagnes de prélèvements de juillet 2014 et de juin 2015, ont été réalisées dans des contextes hydrologiques différents. Nous retrouvons les mêmes gammes de composition isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  pour les eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources situées entre l'entrée des gorges et la Roque sur Cèze. Nous retrouvons pour les deux périodes l'indication d'une recharge du karst au cours du mois d'avril impliquant un temps de résidence minimum de 45 à 75 jours. Les eaux des cours d'eau sont en revanche sous des influences différentes, en juillet 2014 les cours d'eau drainent des eaux probablement issues de l'événement pluvieux intervenu quelques jours avant la campagne de prélèvement, alors qu'en juillet 2015 la campagne fait suite à un épisode plutôt sec et les cours d'eau semblent influencés par des masses d'eau ayant mis en charge les alimentations des cours d'eau au mois d'avril.



Pour les deux périodes nous pouvons mettre en évidence des sources karstiques pas ou peu influencées par les eaux de la rivière, il s'agit des sources de rive droite S1 et S2 (Fées et Vanmâle) pour la partie amont et S7 à S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude) pour la partie aval de la zone d'étude. Les sources rives gauche S3, S4, S4', S6 (Font Canet, Monteil, Ilette et Baumes) et la source S5 (Moulin) de la rive droite résultent d'un mélange entre les eaux du karst et les eaux de la rivière en proportions variables d'une source à l'autre.

Les données de juillet 2014 montrent que l'apport des eaux depuis le karst sur le tronçon R1 (pk-2)-R6' (pk 27) est négligeable en revanche il atteint 35 % à la station R6'' (pk34) sous l'influence des sources S8 à S12 (Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude). Les données de juin 2015 montrent que l'apport du karst est négligeable sur le tronçon R1 (pk-2)-R4 (pk9) et devient significatif à partir de R4' (pk15) avec une contribution de 15 % au débit de la Cèze. Cette contribution monte à 20 % au niveau de la station R6 et à 41 % au niveau de la station R7.

Les données isotopiques pour les deux campagnes d'échantillonnage convergent vers la même conclusion, ce sont les sources situées en aval du point kilométrique 9 (S3', S4, S4', S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11 et S12) qui contribuent à l'alimentation de la Cèze avec un apport plus important depuis les sources S8 à S12 (Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide et Bastide Chaude).

### III.5.3. Les isotopes du soufre

Dans les premières campagnes de reconnaissance des propriétés chimiques des eaux il a été mis en évidence des variations importantes de la concentration des eaux en ions sulfates, d'un point à l'autre de la Cèze, d'une source à l'autre aussi bien en rive droite qu'en rive gauche. Il a été proposé de travailler sur un nombre réduit de campagnes pour caractériser les eaux à partir des isotopes stables du soufre et tenter d'obtenir des informations supplémentaires sur l'origine des sulfates et sur les connexions entre les différentes entités de l'hydro-système étudié.

De manière générale, les sources de sulfates sont les roches traversées (oxydation des sulfures, dissolution des évaporites et des carbonates, mais aussi des sources anthropiques comme la combustion d'énergies fossiles et l'utilisation de fertilisants en agriculture). Dans notre contexte d'étude, les potentielles sources de sulfates pour les eaux prélevées sont :

- Les sulfates amenés par la Cèze depuis son bassin versant amont constitué des Cévennes cristallines (apport possible à partir de l'oxydation de la pyrite), des formations sédimentaires secondaires de la bordure Cévenole, et les formations sédimentaires de l'Oligocène du bassin d'Alès. Ces sulfates se retrouvent donc dans les eaux de la station R1. Payton et al. [2011] reporte des gammes de variation du  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  pour les sulfates d'origine marine de 13.2 ( $\pm 2.5$  ‰) à 17 ‰ pour la période Trias-Jurassique, et supérieur à 20 ‰ pour le Tertiaire. Les pyrites des roches ignées présentent des valeurs généralement entre 0 et 10 ‰ (Strauss, [1996] ; Thode, [1991] ; et Seal II, [2006]). Il n'y a que très peu de fractionnement isotopique lors des processus d'oxydation et de dissolution, les ions sulfates issus de l'altération des roches présentent donc un  $\delta^{34}\text{S}$  proche de celui de leur source.
- Les sulfates récoltés par les eaux au niveau des formations karstiques de l'Urgonien (plateau de Méjannes le Clap). La notice de la carte géologique de Pont Saint Esprit ne reporte pas d'information concernant la présence de minéraux sulfatés ou de niveaux évaporitiques dans ces formations. Les analyses élémentaires réalisées sur des échantillons de roche donnent des teneurs en soufre inférieures à 0,2 % pour les calcaires de l'Hauterivien supérieur, les calcaires du Barrémo-Bédoulien (Malataverne) et les remplissages de fines de la grotte Prével. Les calcaires du Bédoulien (Goudargues) et les calcaires du Ludien contiennent moins de 0,5 % de soufre. Les formations karstiques ont donc une faible capacité pour enrichir les eaux en ions sulfates. D'après Payton et al. [2011] les sulfates du Crétacé auraient un  $\delta^{34}\text{S}$  de l'ordre de 15 ‰ et les pyrites sédimentaires un  $\delta^{34}\text{S}$  inférieur à 0 ‰.

- Les sulfates contenus dans la pluie. Ladouche et al. [2009] et Celle-Jeanton et al. [2009] reportent des concentrations dans les eaux de pluie au niveau de Nîmes et d'Avignon comprises entre 0.01 0,340meq/l pour le  $SO_4$  soit de 1.5 à 8.5 mg/L à Avignon. Pour les eaux peu chargées en sulfates de notre zone d'étude (cf. ci-dessous) cette source peut jouer un rôle important. Les sulfates atmosphériques peuvent être d'origine marine et/ou d'origine anthropique, les aérosols marins auront un  $\delta^{34}S$  de l'ordre de +20 ‰ [Hoefs, 1996] alors que les sulfates atmosphériques dérivés de l'activité humaine ont généralement des  $\delta^{34}S$  compris entre 2 et 6 ‰ (d'après Brénot et al. [2007] et travaux cités) et Thode [1991] indique dans un travail bibliographique une gamme de 4 à 6 ‰ pour les pluies continentales à travers le monde.
- Les sulfates issus de l'agriculture. L'étude de Brénot et al ; [2007] a montré que les engrais utilisés en Moselle ont des compositions isotopiques en soufre qui sont entre 2 et 4 ‰.

La première campagne de juillet 2014 a été réalisée afin de s'assurer de la présence de contrastes sur les valeurs des  $\delta^{34}S_{SO_4}$  dans les eaux de la Cèze, des sources et de ses affluents. Ceci avant de lancer une étude plus large pour identifier les sources d'ions sulfates et discuter des connexions entre les différentes sources et la Cèze. Il s'avère que des contrastes isotopiques sont observés d'une source à l'autre, d'un point de la Cèze à l'autre et d'un affluent à l'autre (Figure 36).

L'ensemble des données isotopiques obtenues montrent une évolution du  $\delta^{34}S_{SO_4}$  des eaux de la Cèze depuis l'amont vers l'aval (Fig. 12). Cela implique un processus de mélange entre les eaux arrivant à l'entrée des gorges par l'intermédiaire de la Cèze et d'autres masses d'eaux contenant des sulfates d'origine différentes et collectées par la Cèze le long de son parcours dans les gorges et jusqu'à la partie aval de la zone d'étude. Chaque campagne est traitée individuellement.

*Les données  $\delta^{34}S$  et  $[SO_4]$  permettent de discuter de l'origine des ions sulfates présents dans les eaux et du chemin des eaux mais pas de l'origine des masses d'eau comme cela a pu être discuté avec les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène dans la section précédente.*

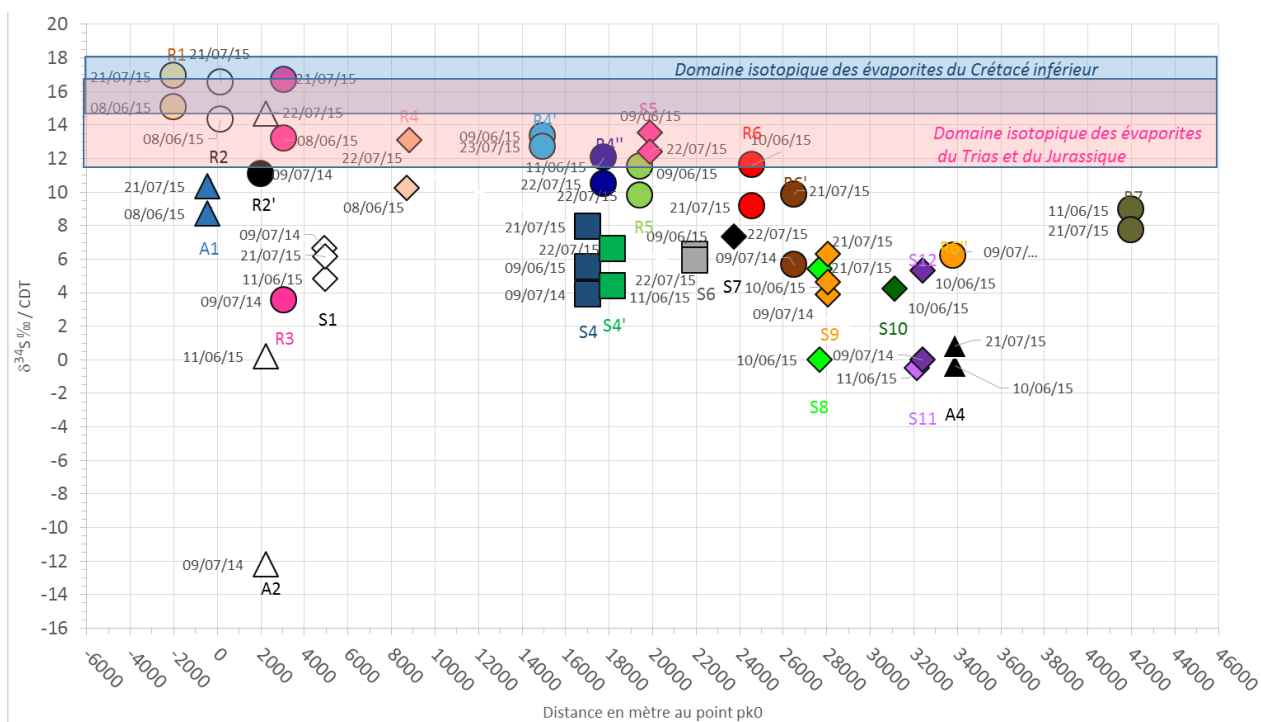


Figure 36 : Evolution du  $\delta^{34}S$  des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle.

## Campagne de juillet 2014

Les 9 échantillons collectés sur la zone d'étude présentent des concentrations en ions sulfates variables (6.1 à 40.7 mg/L) et des  $\delta^{34}\text{S}$  variant de -12.2 à +11.1 ‰/CDT (Tableau 7 et Figure 37). Les  $\delta^{34}\text{S}$  extrêmes sont portés par les eaux de Cèze arrivant en amont de la confluence avec la Claysse (station R2') avec  $\delta^{34}\text{S} = 11.08$  ‰, cette valeur est dans la gamme isotopique des sulfates d'origine marine d'âge triasique à tertiaire, nous pouvons donc faire l'hypothèse que les sulfates amenés sur la zone d'étude par la Cèze proviennent des formations sédimentaires secondaires de la bordure cévenole et/ou des formations du Ludien du fossé d'Alès.

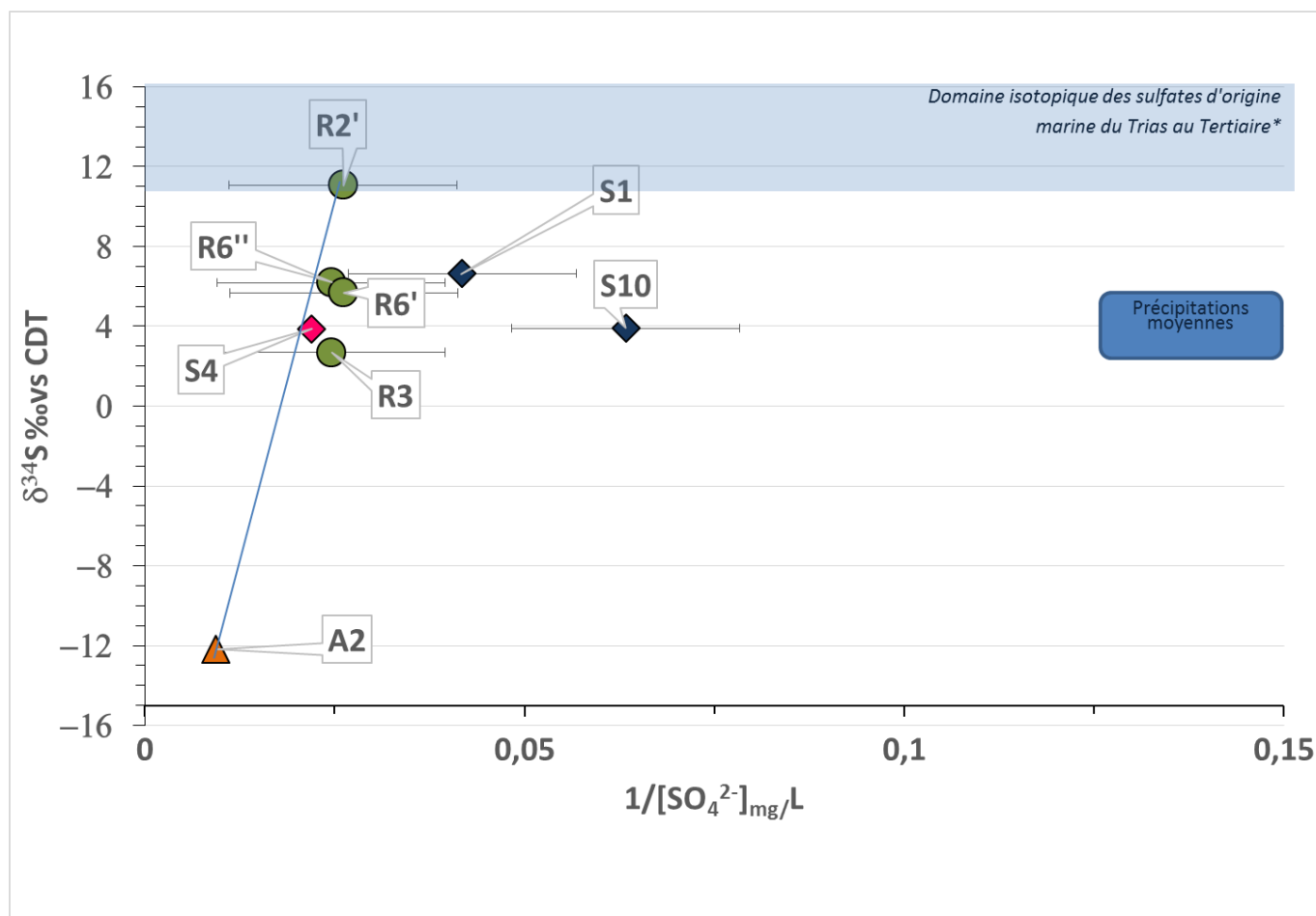


Figure 37 : Evolution du  $\delta^{34}\text{S}$  des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juillet 2014, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique données par Strauss (1996) pour les précipitations à l'intérieur des terres.

Le  $\delta^{34}\text{S}$  le plus bas est observé au niveau de la Claysse (-12,2 ‰), des valeurs aussi négatives peuvent traduire la lixiviation de pyrite d'origine sédimentaire que l'on pourrait éventuellement trouver dans les calcaires bitumineux du Ludien. Cette possibilité doit être vérifiée par un l'analyse d'un échantillon frais des calcaires du Ludien.

La différence de  $\delta^{34}\text{S}$  observée (Figure 37) entre les points d'échantillonnage R2' et R3 suggère un apport d'eau à la Cèze entre ces deux points avec un  $\delta^{34}\text{S}$  inférieur à celui de R3 ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{R3}} = 3,5$  ‰). A partir des affluents et des sources recensés, seul l'affluent de la Claysse est en mesure d'apporter des eaux à la Cèze sur le tronçon R2'-R3. Le  $\delta^{34}\text{S}$  très négatif et la concentration élevée en sulfates (107,2 mg/L) des eaux de l'affluent A2 (Claysse) et la distribution des points A2, R2' et R3 sur le diagramme  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $1/[\text{SO}_4^{2-}]$

(Figure 37) permet d'envisager un tel mélange. Ainsi la Claysse contribuerait pour 16 % au débit de la Cèze au niveau de la station R3 et les 84 % restant proviendraient du bassin versant de la Cèze en amont de la station R2'.

Les sources S1 et S10 (Fées et Goudargues), présentent des concentrations de 23,9 et 15,8 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}$  de 6,65 ‰ et 3,9 ‰. Les concentrations en sulfates de ces eaux sont supérieures aux concentrations en sulfates des précipitations d'un facteur 2 à 3, le  $\delta^{34}\text{S}$  est en revanche dans ou proche de la gamme isotopique des précipitations. Sur la figure  $\delta^{34}\text{S}$  vs  $1/[\text{SO}_4^{2-}]$  (Figure 37), le domaine des eaux de pluie se place en dehors de la tendance de mélange binaire observée pour les eaux de rivière (R2', R3, R6' et R6'') et de source (S4) et l'affluent A2, la contribution des eaux de pluie à l'alimentation en ions sulfates des eaux des sources et de rivière peut donc être considérée comme négligeable. Nous relèverons tout de même que les eaux des sources S1 et S10 s'éloignent également de cette tendance de mélange binaire par leur concentrations en ions sulfates et qu'une autre origine est à discuter.

Entre la station R3 et la station R6' de nombreuses sources viennent alimenter la Cèze (S1, S2, S3, S3', S4, S4', S5, S6, S7). Seules les sources S1 (Fées) en rive droite et S4 (Monteil) en rive gauche ont été analysées pour cette campagne. De par ses propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}]$  -  $\delta^{34}\text{S}$ , la source S4 (Monteil :  $[\text{SO}_4^{2-}] = 45,6$  mg/L ;  $\delta^{34}\text{S} = 3,9$  ‰) se place en intermédiaire à A2 (Claysse) et R2' et présente des propriétés assimilables à celles de R3 ( $[\text{SO}_4^{2-}] = 40,7$  mg/L ;  $\delta^{34}\text{S} = 3,5$  ‰).

Au regard de ces similitudes concernant les ions sulfates pour ces deux masses d'eau R3 et S4 et au regard de la faible concentration en sulfates des eaux du karst et de leur gamme  $\delta^{34}\text{S}$  entourant les valeurs mesurées dans les eaux de S4 (Monteil) nous pouvons avancer l'hypothèse suivante : les sulfates présents dans les eaux de S4 (Monteil) proviennent essentiellement d'une perte de la Cèze située en amont en un point où les propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}]$  -  $\delta^{34}\text{S}$  des eaux de la Cèze observées en R3 ne sont pas ou peu perturbées par des venues d'eau du karst ou autre.

Par la suite on voit à nouveau le  $\delta^{34}\text{S}$  de la Cèze réaugmenter jusqu'en R6' et R6'' où il atteint une valeur autour de 6 ‰. Entre R3 et R6' la Cèze collecte les eaux de plusieurs sources (S1, S2, S3, S4, S4', S5, S6, S7) dont les sources S1 et S4 (Fées et Monteil) qui ont été analysées lors de cette campagne. La source S1 (Fées) présente une faible minéralisation et montre une tendance isotopique proche de celles des eaux de pluie, son rôle dans l'évolution du  $\delta^{34}\text{S}$  des eaux de la Cèze d'amont en aval est difficile à évaluer à partir de ce jeu de données.

Pour voir augmenter le  $\delta^{34}\text{S}$  des eaux de la Cèze de l'amont vers l'aval sans en modifier significativement la concentration, il est nécessaire de faire intervenir une masse d'eau contenant des sulfates avec un  $\delta^{34}\text{S}$  supérieur à 6 ‰ et une concentration de l'ordre de 40 mg/L. Les seules influences recensées dans la zone pouvant répondre à ces critères sont des eaux qui se seraient chargées en sulfates au contact des formations sédimentaires soit au niveau du bassin versant amont de la Cèze soit au niveau des bassins versant des affluents.

Ce jeu de données ne permet pas de mener plus loin la discussion, il montre cependant qu'entre les stations R6' et R6'' les propriétés du couple de traceurs  $[\text{SO}_4^{2-}]$  -  $\delta^{34}\text{S}$  n'évoluent pas, suggérant un rôle limité des sources S8 à S12 (Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Chaude et Bastide Froide) à l'apport de sulfates dans les eaux de la Cèze depuis le karst.

#### ***Informations apportées par le couple de traceurs $[\text{SO}_4^{2-}]$ - $\delta^{34}\text{S}$ pour la campagne de juin 2014***

Les ions sulfates présents dans les eaux de la Cèze à la station R2' proviennent des roches sédimentaires des formations secondaires de la bordure Cévenole et/ou des formations tertiaires du bassin d'Alès.

Sous le régime hydrologique de juillet 2014, la Claysse (A2) présente une concentration en sulfates élevées et un  $\delta^{34}\text{S}$  très négatif, l'hypothèse que ce  $\delta^{34}\text{S}$  est expliqué par une interaction avec des pyrites sédimentaires est avancée et doit être vérifiée par un échantillonnage des formations du Ludien notamment (calcaires bitumineux).

Les données  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}$  de la source S4 (Monteil) sont expliquées par un apport essentiellement en provenance de la Cèze. L'apport de sulfates par les eaux du karst (mélange de sulfates atmosphériques et de sulfates qui pourraient être lessivés au niveau des calcaires de l'urgonien) serait négligeable.

Les données  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}$  obtenues pour les sources S1 et S10 (Fées et Goudargues) ne nous permettent pas d'évaluer leur rôle dans l'apport de sulfates à la Cèze.

Il est cependant à noter que les paramètres  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}$  n'évoluent pas entre les stations R6' et R6'' rendant négligeable le rôle joué par les sources S7 à S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Chaude et Bastide Froide) dans l'alimentation de la Cèze en ions sulfates.

### Campagne de juin 2015

Les concentrations en sulfates des eaux collectées sur la zone d'étude varient entre 3,2 et 48,8 mg/L et les  $\delta^{34}\text{S}$  varient entre -0,5 et 15 ‰/CDT. L'échantillon R2 présente une mauvaise balance ionique, ses données sont reportées dans le Tableau 7 et sur les Figure 36 et Figure 38 mais la valeur de sa concentration en sulfates doit être utilisée avec précaution.

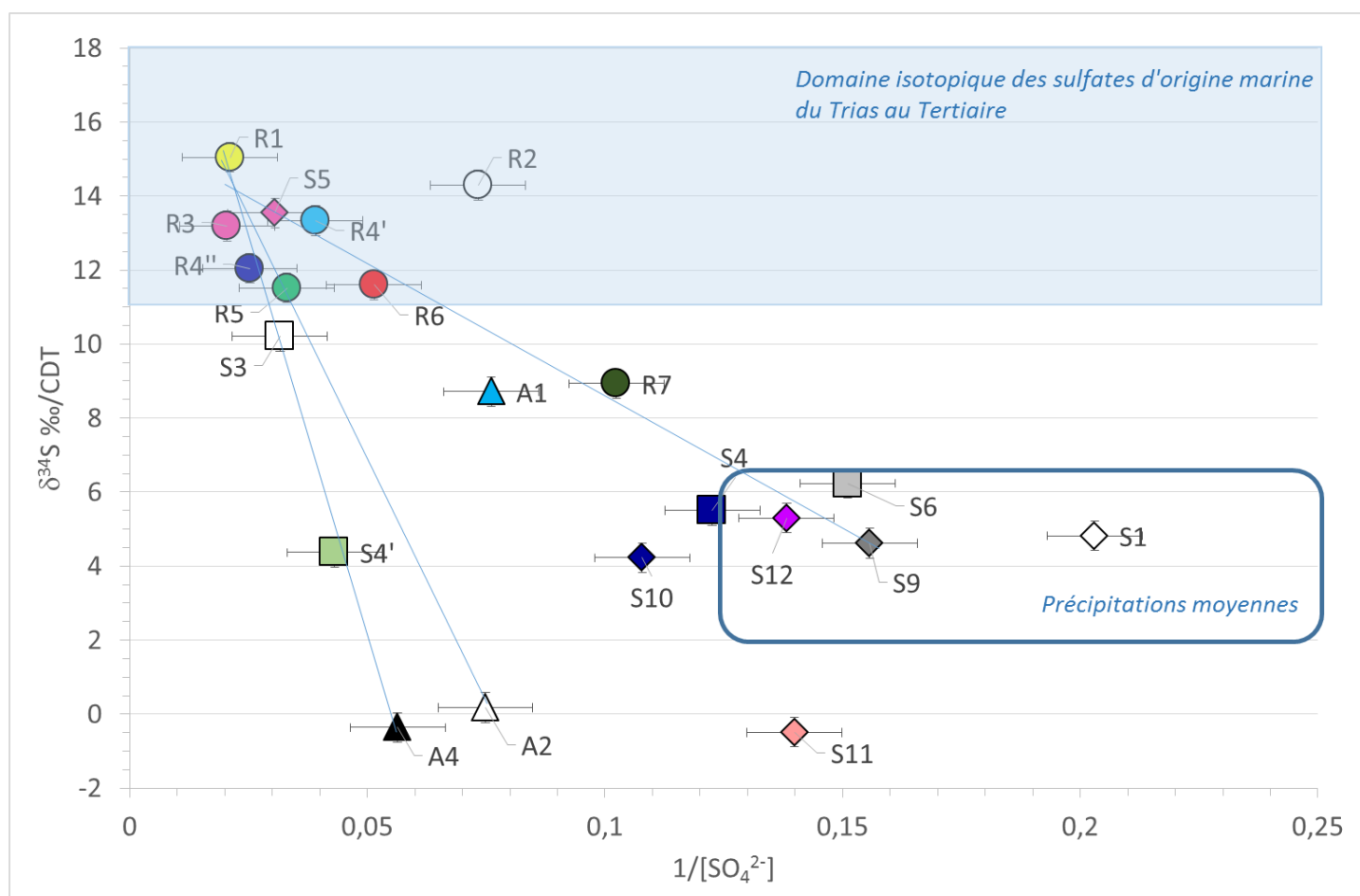


Figure 38 : Evolution du  $\delta^{34}\text{S}$  des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juin 2015, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique données par pour les précipitations à l'intérieur des terres.

La Figure 38 permet de visualiser la **dispersion des données sur le diagramme  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  vs  $1/[\text{SO}_4^{2-}]$** , traduisant un contexte complexe sous plusieurs influences.

Le digramme  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  vs  $1/[\text{SO}_4^{2-}]$  (Figure 38) nous permet de visualiser que les eaux des sources S1, S4, S6, S9 et S12 (Fées, Monteil, Baumes, Fabrique et Bastide Froide), appauvries en sulfates, se superposent au domaine des précipitations, il s'agit donc d'eau de pluie qui auraient interagi dans le karst avec des roches ne contenant pas de soufre.

Les eaux arrivant au niveau de la station R1 ont une concentration en sulfates de 47,3 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 15 ‰. Comme pour la campagne de juillet 2014, le  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  permet de rattacher les sulfates présents dans les eaux de la Cèze en R1 aux formations sédimentaires du secondaire et/ou du Tertiaire, le  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  est également plus élevé, de 2 à 3 ‰ que ce mesuré en juillet 2014. Ceci signifie que les différentes sources de sulfates disponibles dans le bassin versant de la Cèze n'ont pas été mobilisées de la même manière.

Les eaux de A2 (Claysse) présentent une concentration en sulfates de 13,4 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 0,2 ‰. Ces propriétés sont très différentes de celles observées en juillet 2014. On retrouve ici une concentration 8 fois plus faible et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  plus élevé de 12 ‰ par rapport à juillet 2014. Ceci signifie que les sources de soufre alimentant les eaux de la Cèze, évoluent d'une période à l'autre. Cette valeur de 0,2 ‰ peut résulter d'un mélange de sulfates extrait de différentes natures de roches traversées, pour ces très basses valeurs nous pouvons faire l'hypothèse que l'oxydation de la pyrite peut jouer un rôle et/ou encore l'apport anthropique. L'affluent A4 (Aiguillon) présente la même signature isotopique avec une concentration en sulfates de 17,7 mg/L. Les affluents A2 et A4 (Claysse et Aiguillon) ne drainent pas les mêmes formations géologiques. A2 (Claysse) s'écoule en rive gauche de la Cèze et il draine les formations sédimentaires du secondaire sur la bordure cévenole et les formations du tertiaire du fossé d'Alès alors que l'affluent A4 (Aiguillon) s'écoule en rive droite dans la partie aval de la Cèze et draine les formations calcaires de faciès urgonien et des formations marneuses et les calcaires argileux de l'Hauterivien. La source S11 (Bastide Chaude) présentent aussi la même signature isotopique mais avec des concentration inférieures à 8 mg/L caractéristiques des précipitations moyennes sur le secteur (Ladouche et al., [2009]; Celle et al., [2000]). L'origine de cette signature isotopique commune pour ces trois masses d'eau n'est pour l'instant pas expliquée et nécessite un travail d'identification de sources de sulfates supplémentaires (sulfates issus de l'activité agricole, niveaux géologiques spécifiques etc). *Des échantillonnages supplémentaires sont donc envisagés avec notamment des prélèvements de sols en provenance des parcelles cultivées. Il s'ra également nécessaire de mieux définir le pôle pluie locale par la collecte et l'analyse des eaux de pluie sur le plateau e Méjannes le Clap.*

La Figure 38 permet de mettre en évidence une évolution des paramètres  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  dans les eaux de la Cèze depuis la station R1 située en amont de la zone d'étude jusqu'à la station R7 située en aval, ces deux paramètres ont tendance à décroître. Mais la très grande dispersion des points rend le système complexe dès lors que l'on s'essaye à des calculs de mélange à 2 ou 3 pôles et ceci nécessite également d'envisager des relations hydrogéologiques complexes entre la rivière et les différentes sources qui ne s'accordent pas avec les observations du système à partir d'autres paramètres (débits etc).

*Il sera nécessaire de reproduire une campagne de prélèvement dans le même contexte hydrologique de moyennes à basses eaux afin de confirmer la distribution des données  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ . Nous noterons cependant que les balances ioniques calculées à partir du jeu de données des concentrations en ions majeurs pour cette campagne sont de moins bonne qualité que celles des deux autres campagnes, un biais analytique sur les concentrations en ions sulfates dans les eaux pourrait être à l'origine de la dispersion des points. Ce biais n'aurait en revanche pas de répercussion sur la mesure des  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ . Dans ce contexte nous ne réaliserons pas de calculs de mélange.*

### **Synthèse des informations obtenues à partir des traceurs $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}$ pour la campagne de juin 2015**

Les sources S1, S4, S6, S9, S12 (Fées, Monteil, Baumes, Fabrique, Bastide Froide) et probablement S10 (Goudargues) portent la signature isotopiques  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  des pluies qui ont alimenté le karst. Les roches traversées par ces pluies ne contenaient pas ou très peu de soufre, ce qui a permis aux eaux de conserver leurs propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ .

Les deux affluents de A2 et A4 (Claysse et Aiguillon) et la source S11 (Bastide Chaude) présentent des  $\delta^{34}\text{S}$  proche de zéro qu'il reste à expliquer par des analyses supplémentaires des roches traversées pour

identifier clairement l'impact possible de formations géologiques contenant des pyrites sédimentaires ou des sols agricoles qui pourraient perturber le système  $[SO_4^{2-}] - \delta^{34}S_{SO_4}$  de ces affluents et sources.

Dans sa partie amont la Cèze est alimentée en sulfates à partir des roches sédimentaires de la bordure cévenole et/ou du fossé d'Alès. Les eaux de la Cèze voient globalement leurs paramètres  $[SO_4^{2-}] - \delta^{34}S_{SO_4}$  diminuer d'amont en aval, cela est possible à la fois par la contribution des affluents, mais l'influence principale vient des sources S8 à S12 (Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Froide) situées dans la partie aval qui pourraient contribuer de manière importante au débit de la Cèze. La qualité du jeu de données ne permet pas de réaliser des calculs de mélange cohérents à ce stade.

### Campagne de juillet 2015

Les concentrations en ions sulfates varient entre 5 et 87,7 mg/L et les  $\delta^{34}S_{SO_4}$  varient entre 0,8 et 16,9 ‰ (Tableau 7). Les gammes de concentrations sont plus élevées que sur les campagnes précédentes. Le mois de juillet 2015 connaît un étiage sévère ce qui permet d'expliquer les concentrations plus élevées observées sur le site d'étude. Les concentrations en ions sulfates augmenteraient artificiellement par ce biais-là, la tendance à l'augmentation générale des  $\delta^{34}S_{SO_4}$  des sulfates dans les eaux entre juin et juillet 2015 va aussi dans ce sens avec une contribution moins importante des eaux de précipitation qui présentent un  $\delta^{34}S_{SO_4}$  entre 2 et 6 ‰. Seul l'échantillon de la source S1 (Fées) reste dans le domaine des précipitations (Figure 39), le prélèvement en milieu souterrain pourrait réduire l'impact de l'étiage/évaporation sur cette masse d'eau.

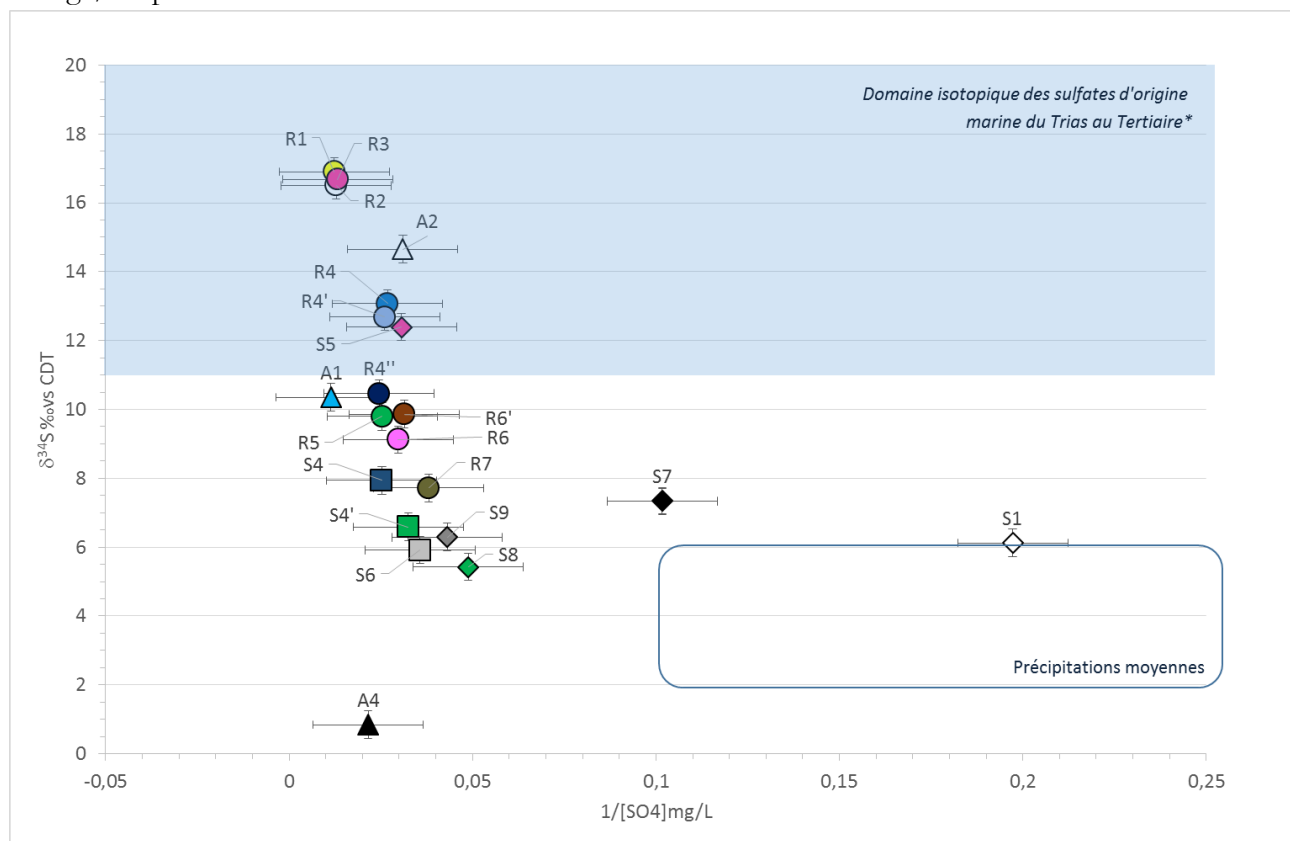


Figure 39 : Evolution du  $\delta^{34}S$  des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors de la campagne de juillet 2015, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique donnée par Strauss [1990] pour les précipitations à l'intérieur des terres.

L'affluent A4 (Aiguillon) présente le  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  le plus bas de la série d'échantillons analysés et avec une valeur similaire à celle obtenue pour la campagne de juin 2015. Nous relevons la constance de ces données mais restons confrontés à la même difficulté d'identifier la source de sulfates qui alimente cet affluent.

L'affluent A2 (Claysse) présente une concentration en sulfates de 32,2 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 14,7 ‰ (Tableau 7) qui se place désormais dans le domaine des compositions isotopiques attendues pour des sulfates issues de l'altération chimique des roches sédimentaires du Trias au Tertiaire, nous pouvons donc faire l'hypothèse que pour ce contexte hydrologique les sulfates présents dans les eaux de la Cèze sont apportés par les formations sédimentaires de la bordure cévenole et/ou du fossé d'Alès à partir de dépôts de gypse.

L'affluent A1 (Auzonnet) présente une concentration en sulfates de 87,7 mg/l et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 10,4 ‰ (Tableau 7). Ces propriétés isotopiques sont différents de celles observées lors de la campagne de juin 2015 ce qui montre une contribution de sources à  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  bas (précipitations) moins importante que pour les campagnes précédentes. Le  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  se trouve proche du domaine isotopique des sulfates marins, une contribution depuis les formations sédimentaires de la bordure cévenole et ou du Fossé d'Alès peut être envisagée mais cela n'est pas suffisant pour expliquer la valeur  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ . Nous n'avons pas suffisamment d'éléments pour discuter de cette source supplémentaire.

Les propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  des eaux de la source S1 (Fées) indique une origine atmosphérique pour les sulfates. Les eaux de la source S1 ne montrent pas d'augmentation des concentrations par rapport aux campagnes précédentes. Cela peut s'expliquer par son contexte souterrain qui l'isole des processus d'évaporation.

La station amont de la Cèze R1 a une concentration en sulfates de 81,2 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 16,9 ‰ (Tableau 7). Ces valeurs se placent dans le domaine isotopique des sulfates marins, on retrouve donc la signature des roches sédimentaires du bassin versant amont de la Cèze.

Les stations amont de la Cèze R1, R2 et R3 présentent des propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  très proches les unes des autres ce qui montre que les apports des affluents A1 et A2 (Auzonnet et Claysse) ne contribuent pas significativement au débit de la Cèze sur ce tronçon. En revanche à partir de R3 les paramètres  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  évoluent et diminuent de manière régulière (Figure 39) et une tendance de mélange se dessine entre les eaux de R3 et les eaux des sources S4', S6, S8, S9 (Ilette, Baumes, Ussel et Fabrique) (Figure 39). La source S8 présente une concentration de 20,5 mg/L et un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  de 5,4 ‰ (Tableau 7) qui se superpose au domaine isotopique des sulfates atmosphériques (Figure 39).

Pour cette campagne il n'y a pas de tendance de mélange simple entre les sulfates atmosphériques et les sulfates de la Cèze amont. La source S1 se trouve en dehors de la tendance (Figure 39). La source S7 (Marnade) se trouve également en dehors de la tendance et ses propriétés diffèrent de celles des eaux de pluies et de celles des autres sources étudiées (Figure 39). *Il sera nécessaire de mieux définir le contexte de cette source.*

Le domaine isotopique couvert par les eaux des sources S4', S6, S8 et S9 (Ilette, Baumes, Ussel et Fabrique) est similaire à celui couvert en juin 2015 et se superpose au domaine isotopique des eaux de précipitation pour le secteur. L'augmentation de la concentration en sulfates pour ces eaux est attribuée au contexte d'étiage. Ces quatre sources sont considérées comme le pôle karstique de notre secteur d'étude, leur alimentation en ions sulfates se fait exclusivement par le biais des précipitations. Les calculs de mélange ci-dessous assimilent le pôle karst à la source S8 (Ussel).

La diminution progressive des paramètres  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  (Figure 39) des eaux de la Cèze d'amont en aval a été expliquée par un processus de mélange entre les eaux de la Cèze amont (station R3) et les eaux du pôle karstique ( $\approx$ S8). Les résultats des calculs sont reportés dans le Tableau 10. Nous avons considéré dans un premier temps l'évolution générale des propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  des eaux de la Cèze. Les calculs mettent en évidence un apport d'eau du karst dans les premiers kilomètres (<pk 8500) des gorges qui viendraient à contribuer à 67 % au débit de la Cèze, ces apports pourraient se faire depuis les sources S1 (Fées), S2 (Vanmâle), Foulatier et S3 (Font Canet) (Tableau 6). Les eaux du karst continuent à contribuer au débit de la Cèze plus en aval mais en proportion moindre (Figure 40 et Tableau 10). L'apport des eaux du karst au débit de la Cèze s'élèverait à 92 % au niveau de la station R7 située à l'extrémité est de notre zone d'étude.



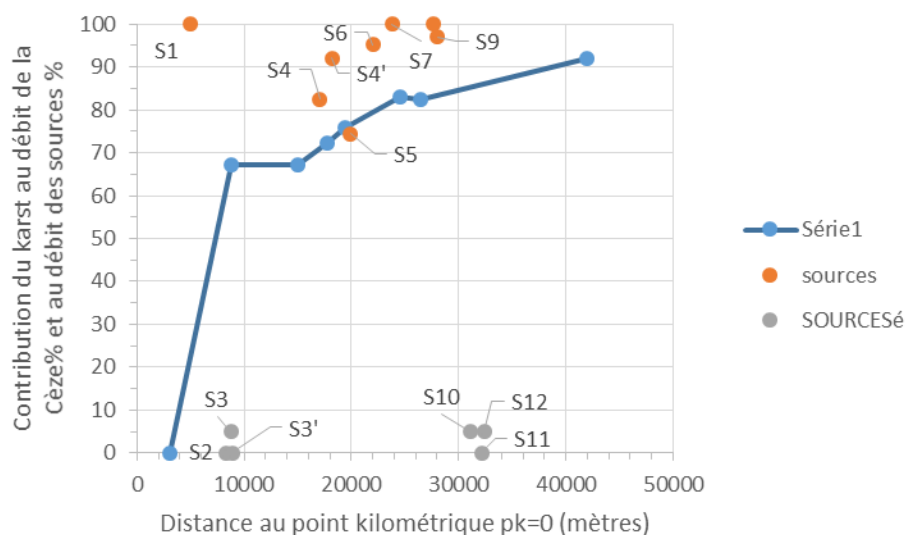


Figure 40 : Evolution de la contribution des eaux du karst à l'alimentation du débit de la Cèze en juillet 2015. Points bleus –stations de la Cèze, points orange : sources analysées, points gris : sources recensées mais non analysées. Les proportions d'apport ne sont pas calculées pour ces dernières sources, les points reportent seulement leur position sur le linéaire de la Cèze.

Tableau 10 : Résultats des calculs de mélange à partir du jeu de données  $[SO_4^{2-}] - \delta^{34}S_{SO4}$  pour les eaux de la Cèze, des sources et des affluents collectées en juillet 2015 dans la zone d'étude. Les pôles de mélange considérés sont les eaux de R3 (rivière amont) et els eaux de S8 (pôle karstique).

Station	PK mètres	$[SO_4^{2-}]$ mg/L	$\delta^{34}S$ ‰/CDT	Proportion de l'apport du karst dans le tronçon amont	Contribution du karst depuis R3	Contribution de la Cèze amont	Sources possibles des apports depuis le karst pour le tronçon amont
R3	3065	75,5	16,7	0	0	100	
S8	27690	20,5	5,4	100		0	
R4	8825	37,2	13,1	67	67	33	S1+S2+Foulatier + S3
R4'	14950	38,4	12,7	0	67	33	S3'+Force Mâle
R4''	17750	40,8	10,5	16	72	28	S4
R5	19440	39,5	9,8	13	76	24	S4'
R6	24595	33,6	9,1	29	83	17	S5+S6+S7
R6'	26500	31,8	9,9	-4	82	18	none
R7	42000	26,3	7,7	55	92	8	S8+S9+S10+S11+S12
Source	PK mètres	$[SO_4^{2-}]$ mg/L	$\delta^{34}S$ ‰/CDT	Alimentation en eau depuis le karst %	Alimentation en eau depuis la Cèze		
S1	4975	5,1	6,1	100	0		
S4	17040	39,6	7,9	82	18		
S4'	18175	30,8	6,6	92	8		
S5	19895	32,7	12,4	74	26		
S6	21975	28,0	5,9	95	5		
S7	23765	9,8	7,3	100	0		
S9	28045	23,2	6,3	97	3		

Dans une deuxième approche, nous avons considéré les apports d'eau du karst à la Cèze tronçon par tronçon pour évaluer la contribution des sources. Il convient en premier lieu d'identifier les sources qui

sont sous l'influence couplée du karst et de la Cèze et celle qui sont seulement sous l'influence des eaux karstiques (S1, S8, S7). Ces informations sont reportées dans le Tableau 10. Les eaux des sources S4', S6 et S9 (Ilette, Baumes, Fabrique) seraient influencées par les eaux du karst à plus de 92 % en relevant tout de même les  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  proches de ceux attendus dans les précipitations. Ainsi nous pouvons mettre en évidence un apport d'eau karstique important dans la zone amont des gorges entre les stations R3 et R4 et puis en aval de la station R6 (Tableau 9).

### ***Synthèse des informations obtenues***

Le contexte d'étiage entraîne une augmentation des concentrations en sulfates des eaux de la Cèze et des sources. L'affluent A1 et la source S1 présentent des propriétés  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  similaires à celles de obtenues en juin 2015, ce qui indique une constance des sources d'alimentation en sulfates entre ces deux périodes. Les eaux des affluents A1 et A2 et les eaux de la Cèze sont influencées par des apports en sulfates à partir de l'altération des roches sédimentaires situées en bordures cévenole et dans le fossé d'Alès. Les eaux des sources karstiques (S1, S8, etc.) sont influencées par des sulfates d'origine atmosphérique amenées dans le karst par le biais des précipitations infiltrées.

Les eaux de la Cèze voient leur  $[\text{SO}_4^{2-}]$  et leur  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  diminuer d'amont en aval. Une zone contribuerait de manière importante à l'apport de masses d'eau peu concentrées en sulfates et avec un  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  élevé, il s'agit de la zone située entre les stations R3 (pk 3) et R4 (pk 8,9) où les sources S1, S2, Foulatier et S3 se jettent dans la Cèze, ces sources contribueraient à 67 % du débit de la Cèze mesuré à la station R4'. Les sources S4 à S12 contribueraient à hauteur de 25 % au débit de la Cèze mesuré à la station R7, soit une contribution totale du karst entre R3 et R7 de 92%.

Ces estimations sont en désaccord avec les évaluations de la contribution du karst de 68% en R7 obtenues pour la même période à partir des mesures de débits. ***Cet écart dans les estimations à partir des deux méthodes peut-être dû à une identification et caractérisation insuffisantes des pôles de mélanges en jeu, notamment le pôle karst. La caractérisation des pôles de mélanges et des précipitations sera nécessaire pour mieux contraindre le système et mieux définir les pôles sources et leur contribution au système hydrologique.***

### **Synthèse des données $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$**

Pour les trois campagnes de prélèvements, les paramètres  $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  montrent des dispersions différentes sur le diagramme  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  vs  $[\text{SO}_4^{2-}]$ , ceci suggère une variation au cours du temps de la contribution des différentes sources en capacité d'apporter des ions sulfates aux eaux du secteur.

Le point le plus caractéristique et l'affluent A2 (Claysse) qui décrit des variations isotopiques très importantes au cours du temps parfois à rapprocher des propriétés isotopiques des sulfates marins du secondaire et du Tertiaire, parfois suggérant l'influence de l'oxydation de la pyrite sédimentaire, ce dernier point restant à confirmer par des échantillonnages de roche complémentaires.

Deux principales sources de sulfates sont identifiées dans cette étude, les sulfates atmosphériques et les sulfates issus de dissolution des sulfates d'origine marine de la bordure cévenole et/ou du fossé d'Alès. Une autre source est à rechercher, l'influence anthropique ou l'influence de l'oxydation de la pyrite des roches cristalline, des investigations supplémentaires doivent être menées.

Les sources alimentées exclusivement par les précipitations (S1, 10, S9, S8, etc.) se détachent des autres. Et certaines sources sont des sources mélangeant des pertes de la Cèze et des précipitations, il s'agit exclusivement des sources rive gauche et de S5 (Moulin) rive droite.

Les mélanges des différentes masses d'eau évoluent d'une date à l'autre. Les calculs de mélange restent à affiner.

### **III.5.4. Les isotopes du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$**

L'étude des isotopes du strontium s'est limitée à 7 échantillons de la campagne de juillet 2017 afin d'identifier l'éventuel potentiel de ce traceur pour la compréhension des circulations des eaux au sein du système karstique (Figure 41). L'étude a porté sur les eaux de l'Auzonnet (A1), de la Cèze en amont des gorges (station R2) et des sources de la grotte des Fées (S1), de Font Canet (S3), de Monteil (S4), d'Ussel (S8) et de Goudargues (S10). Il est important de noter que la filtration des échantillons sur le terrain avant filtration n'a pas pu être opérée dans de bonnes conditions, une dissolution de particules carbonatées lors de l'acidification de l'échantillon est donc possible et pourrait perturber le signal.

Les concentrations en strontium des eaux collectées varient de 360 ppm dans les eaux de la grotte des Fées (S1) à 1885 ppm dans les eaux de l'Auzonnet (A1) (Tableau 7). Les rapports isotopique  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  varient entre 0,70105 et 0,70938 (Tableau 7).

Les données  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtenues pour les eaux de la Cèze se démarquent très clairement des autres données, avec un rapport isotopique très radiogénique (0,710498) cohérent avec la présence de roches cristalline dans la partie amont du bassin versant de la Cèze. La source S1 (Fées) présente un rapport isotopique proche de celui des roches sédimentaires marines du Jurassique (0,7068-0,7078), du Crétacé (0,7072-0,7078) et du Paléogène (0,7078-0,7079) [Jones et al., 1994]. L'apport de strontium radiogénique peut être envisagé à partir des eaux de pluies mais il est à noter que les eaux prélevées présentent des concentrations bien plus élevées que celles mesurées par Khaska et al. [2013] [4 à 6 ppm ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  0,708993-0,709225] au niveau de Narbonne. Khaska et al. [2013] évoque la possibilité d'un apport de strontium radiogénique à partir de dépôts argileux présents dans le système karstique étudié. Concernant notre étude, cette possibilité doit être explorée plus finement en caractérisant les dépôts argileux présents dans le karst, en caractérisant les précipitations locales et les calcaires. La configuration de la source S1 en hauteur par rapport à la Cèze ne permet pas d'imaginer un mélange avec les eaux de cette dernière pour expliquer le rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Il ressort cependant une grande similitude des rapports isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour les eaux des sources S8 et S10 (Ussel et Goudargues), comme cela l'a été relevé à partir des autres traceurs utilisés précédemment. Pour les sources S3 et S4 (Font Canet et Monteil) on peut mettre en évidence un mélange entre du strontium radiogénique (pôle cristallin) et du strontium d'origine sédimentaire en proportion variable. Le rapport isotopique mesuré sur les eaux de l'affluent A1

(Auzonnet) est cohérent avec un mélange de strontium en provenance de roches cristallines et de roches sédimentaires.

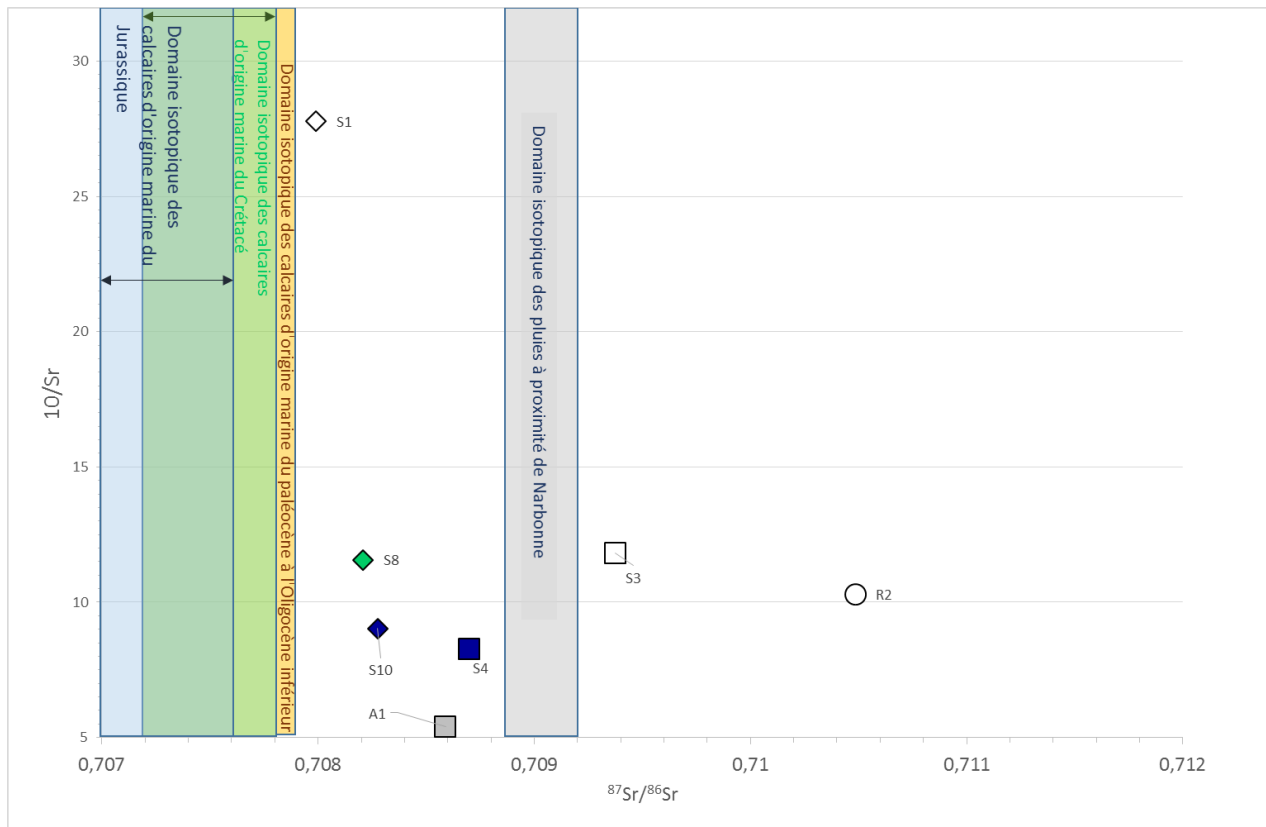


Figure 41 : Inverse de la concentration en Sr vs Rapports isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour une partie des échantillons prélevés lors de la campagne de juillet 2015. Les domaines isotopiques des roches sédimentaires sont reportés à partir de Jones et al. [1994] et les données pour les précipitations sont issues de Khaska et al. [2013].

## III.6. Synthèse générale

### III.6.1. Complémentarité des traceurs géochimiques

D'une manière générale, les différents traceurs géochimiques utilisés pour cette étude (ions majeurs, isotopes de la molécule d'eau, isotopes du soufre et du strontium) ont dévoilé la présence de deux masses d'eau principale. L'une, autochtone, représentée par les précipitations au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap (bassin versant karstique) qui s'infiltrent, interagissent avec les roches et qui sont redistribuées au niveau de la Cèze par l'intermédiaire d'émergences karstiques (constituant le « pôle karstique »), l'autre, allochtone, provient des précipitations du bassin versant amont drainé par la rivière Cèze (constituant le pôle « rivière amont ») et qui sont amenées sur notre zone d'étude par la rivière.

Les ions majeurs ont permis de caractériser chimiquement les deux principales masses d'eau mises en jeu (pôle « karstique » et pôle « rivière amont ») et de mettre en évidence des processus de mélanges entre ces deux pôles sans pour autant en permettre une quantification.

Les isotopes de la molécule d'eau ont confirmé la présence de deux masses d'eau distinctes et ont permis de quantifier les mélanges entre ces masses d'eau, notamment pour les sources affectées par les eaux de la rivière dans des proportions plus ou moins importantes mais aussi pour la rivière qui est elle aussi

alimentée par les eaux des sources le long de son parcours en domaine karstique. Ces quantifications de proportions de mélanges sont bien corroborées avec ceux déduits des jaugeages en rivière. Les isotopes de l'eau ont également permis de préciser les périodes de recharge des aquifères karstiques.

Les isotopes du Soufre des sulfates ont également confirmé l'existence de deux masses d'eau, les calculs de mélanges donnent des résultats qui sont cependant très éloignés de ceux issus des isotopes de la molécule d'eau et de ceux des jaugeages en rivière. Les traceurs  $[\text{SO}_4]-\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  ont permis de mettre en évidence un apport en sulfates depuis le bassin versant amont de la Cèze (origine cristalline et sédimentaire) avec une signature isotopique propre et un apport en sulfates à partir des précipitations pour les sources non alimentées par le Cèze. Il reste cependant des influences avec des signatures isotopiques différentes pour lesquelles nous ne pouvons pas identifier la source à partir des données disponibles, cela concerne notamment les affluents de la Claysse, de l'Aiguillon et la source de Bastide chaude. L'origine des sulfates est à trouver soit sur le bassin versant (marnes hauteriviennes et des calcaires argileux hauteriviens) soit au niveau des paléo-remplissages du karst (gypses) liées aux multiples variations des niveaux statiques (karst polyphasé) soit au niveau des sols agricoles du secteur. La dernière phase du projet (phase 4) permettra d'apporter un éclairage sur ces différentes phases de remplissage du karst ainsi que sur la nature de ces remplissages (baux, gypses, etc.). Par ailleurs, un échantillonnage géochimique complémentaire pourrait être envisagé.

Les données obtenues avec les isotopes du strontium permettent également de mettre en évidence les deux mêmes masses d'eau qui sont mélangées au niveau du karst pour données des rapports isotopiques intermédiaires. Le jeu de données étant restreint il n'a pas été exploité pour des calculs de mélange. Ce traceur se présente comme un bon outil pour la caractérisation des chemins des eaux, il est cependant plus complexe et plus onéreux pour sa mise en œuvre par rapport aux traceurs discutés ci-dessus.

### **III.6.2. Implications hydrogéologiques**

De nombreuses sources en rive droite peuvent être considérées comme des exurgences (Fées, Vanmâle, Travers, Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide) et ne sont, de fait, pas affectées par des eaux de pertes de la rivière Cèze. Ces sources drainent des bassins versants de tailles variables qui peuvent être indépendants ou connectés. Les bassins versants indépendants semblent être ceux de la source des Fées (S1), de Vanmâle (S2), des Travers (S3'), de Marnade (S7) et, avec plus de réserves, celui de Bastide Froide (S12). Tandis que les bassins versants interconnectés semblent être ceux d'Ussel, Fabrique et Goudargues (S8, S9 et S10) qui présentent des grandes similarités chimiques et hydrodynamiques. Une influence hydrothermale avec la mobilisation d'eau profonde est suspectée pour la source de la Bastide Chaude (S11).

Les autres sources (Font Canet, Monteil, Baumes, Moulin et Ilette) sont des résurgences affectées par les eaux de pertes de la rivière Cèze dans des proportions variables au cours du temps. Chacune des sources mobilisent plus ou moins d'eau du karst et plus ou moins d'eau de la Cèze. La proportion d'eau d'origine karstique dépend essentiellement de l'ampleur et de l'état de saturation des réservoirs karstiques mobilisés. La proportion d'eau issue de la rivière dépend de la hauteur d'eau en rivière Cèze à l'entrée des gorges (au niveau des zones de pertes) qui est le reflet de l'état hydrique du bassin versant amont. Le Tableau 11 présente de manière synthétique les informations hydrogéologiques sur les sources déduites des traceurs géochimiques.

Pour la rivière, son évolution chimique d'amont en aval est conditionnée par les apports d'origine karstique et par les affluents. On distingue le tronçon situé à l'amont des gorges (entre R1 et R3) entre les pk0 et pk3 qui est influencé de manière plus ou moins importante suivant l'état hydrologique des affluents de l'Auzonnet et de la Claysse. Puis le tronçon (entre R3 et R4) entre les pk3 et pk9 qui voit une modification importante de la chimie de la Cèze qui ne peut pas être expliquée par les simples apports

des sources S1, S2 et S3' (Fées, Vanmâle et Travers), il est nécessaire d'envisager d'autres apports diffus d'origine karstique.

Ensuite, le tronçon (entre R4 et R5) entre les pk9 et pk19,5 est marqué par une très faible modification de la chimie de la rivière qui suppose une faible proportion d'alimentation d'origine karstique. L'alimentation est assurée par des sources qui ont des propriétés chimiques assez proches de celles de la rivière R3, R4, R4', R5 et R6 (Font Canet, Monteil, Ilette, Moulin et Baumes). Enfin, le tronçon (entre R5 et R7) entre les pk19,5 et pk42 qui est très influencé par les apports karstiques des sources S7, S8, S9, S10, S11 et S12 (Marnade, Ussel, Fabrique, Goudargues, Bastide Chaude et Bastide Froide) qui supposent une mobilisation de masses d'eau très importante.

En période de basses eaux voire d'étiage, le karst alimente la Cèze à un niveau très élevé. Les calculs réalisés à partir des isotopes de l'eau (juillet 2014 et juin 2015) et ceux réalisés à partir des isotopes du soufre (Juillet 2014, juin et juillet 2015) concordent pour certaines stations et divergent pour d'autres sans que pour l'instant nous en ayons identifié la cause.

Les isotopes mettent en évidence la variation de la contribution des différentes sources au cours du temps ou la contribution de sources différentes d'une période à l'autre, cet aspect doit être approfondi.

Les données géochimiques présentent une variabilité temporelle importante d'une campagne à l'autre. Avec en situation de basses eaux un fonctionnement assez simple pouvant se résumer au mélange entre deux masses d'eaux (pôle « karstique » et pôle « rivière amont ») pour les situations de moyennes eaux, la dispersion des données géochimiques est plus importante et laisse supposer un fonctionnement plus complexe qui demeure encore difficile à cerner complètement.

Afin de mieux comprendre cette plus grande dispersion des données et de mieux cerner les basculements chimiques observés d'une campagne à l'autre, il est intéressant d'envisager un échantillonnage temporel plus resserré sur un nombre de point de suivi plus restreint. Par ailleurs, des lacunes de connaissances existent aussi en situation de hautes eaux. De ce fait lors de la phase 4 de l'action Cèze, il est envisagé de réaliser de compléter la présente étude en déployant les mêmes traceurs géochimiques sur un nombre d'échantillons qu'il reste à définir :

- Collecte et caractérisation géochimique des eaux de pluie du plateau de Méjannes le Clap
- Caractérisation géochimique des formations géologiques des formations karstiques et du Tertiaire
- Caractérisation géochimique des eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources en période de hautes eaux
- Caractérisation géochimique des eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources en période de moyennes eaux
- Caractérisation géochimique des eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources en période basses eaux
- Chronique isotopique à réaliser sur une à deux exurgences (exemple S1- Les Fées et S12-Bastide Froide) et sur une résurgence (exemple S4-Monetil).

Tableau 11 : Synthèse sur les masses d'eau mobilisées pour chacune des émergences karstiques investiguées (issue de la caractérisation géochimique)

Libellé	pk	Sources	Rive	Type d'émergence	Pérennité	Origine des eaux
<b>S1</b>	5,0	Fées	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique
<b>S2</b>	8,3	Vanmâle	Droite	Exsurgence	Temporaire	1) Aire alimentation karstique
<b>S3</b>	8,7	Font Canet	Gauche	Résurgence	Permanente	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique
<b>S3'</b>	9,9	Travers	Gauche	Exsurgence	Temporaire	1) Aire alimentation karstique
<b>S4</b>	17,0	Monteil	Gauche	Résurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Cèze 3) Affluents rive gauche
<b>S4'</b>	18,2	Ilette	Droite	Résurgence	Permanente	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique
<b>S5</b>	19,9	Moulin	Droite	Résurgence	Permanente	1) Cèze 2) Aire alimentation karstique
<b>S6</b>	22,0	Baumes	Gauche	Résurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Cèze 3) Affluents rive gauche
<b>S7</b>	23,8	Marnade	Droite	Exsurgence	Temporaire	1) Aire alimentation karstique
<b>S8</b>	27,7	Ussel	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Remplissages karstiques ? / Formations Hauteriviennes ?
<b>S9</b>	28,0	Fabrique	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Remplissages karstiques ? / Formations Hauteriviennes ?
<b>S10</b>	31,1	Goudargues	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Remplissages karstiques ? / Formations Hauteriviennes ?
<b>S11</b>	32,2	Bastide Chaude	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Hydrothermalisme? 3) Remplissages karstiques ? / Formations Hauteriviennes ?
<b>S12</b>	32,4	Baside Froide	Droite	Exsurgence	Permanente	1) Aire alimentation karstique 2) Remplissages karstiques ? / Formations Hauteriviennes ?





## PARTIE IV

—

### 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. Campagne d'acquisition 03/09/14

---

##### IV.1.1. Acquisition des clichés IRT

Le principe de l'imagerie infrarouge thermique aéroportée a été décrit dans les précédents rapports. Plusieurs campagnes d'acquisition avaient été réalisées, la première effectuée le 13/04/13 ne comportait pas assez de contrastes thermiques entre la rivière et les sources, la seconde effectuée le 08/07/13 n'incluait pas les sources à l'aval du domaine karstique (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide), la dernière effectuée le 03/09/14 présente des contrastes thermiques significatifs et inclut l'ensemble des sources. Le survol de la zone d'étude a été assuré par un ULM (ultra-léger motorisé) supportant la caméra thermique (Figure 42) entre 15h30 et 16h00.



Figure 42 : ULM supportant la caméra thermique (VarioCAM® hr research – Infratec)  
(Photo : V. Wawrzyniak)

La Figure 43 présente les variations de températures enregistrées en différents points de la rivière lors du survol de l'ULM, ces températures sont utilisées pour calibrer les clichés thermiques. On peut remarquer que la période de survol de l'ULM correspond au moment où les contrastes thermiques (température de la rivière maximale) entre la rivière et les sources sont les plus forts.

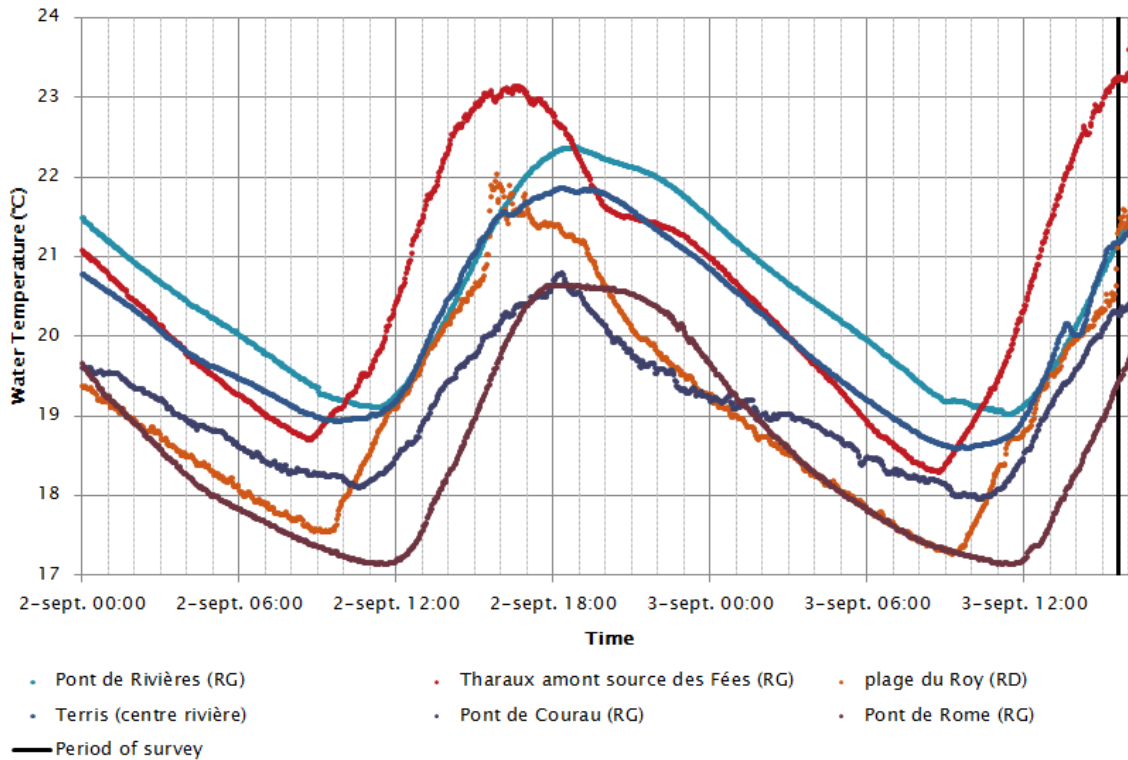
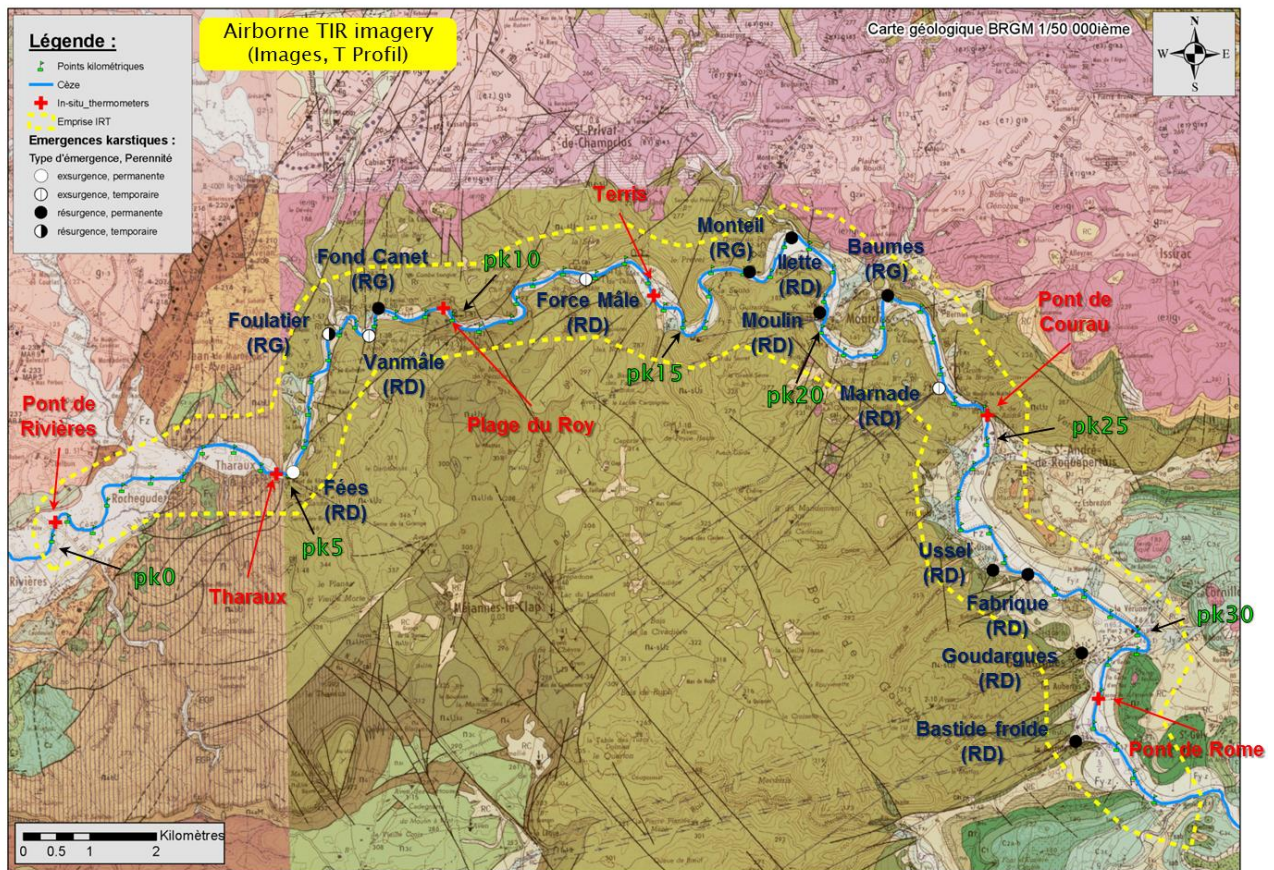


Figure 43 : Variation de température de la rivière Cèze au niveau de 6 points de suivi. L'encadré de couleur noire représente la fenêtre d'acquisition des clichés thermiques. La localisation des points de suivi est présentée en Carte 12.

La température de la rivière pendant l'acquisition des données se situe entre 20 et 23°C tandis que celle des sources varie entre 13 et 14,5°C.

La Carte 12 présente la zone d'acquisition des clichés thermiques ainsi que la localisation des points de suivi de la température en rivière.



Carte 12 : Zone d'acquisition des clichés thermiques et localisation des points de suivi de la température en rivière.

#### IV.1.2. Rappel sur le traitement des clichés IRT

Le principe du traitement des données infrarouge thermique avait été décrit dans les précédents rapports. Les données traitées sont de deux types :

- 1) Une mosaïque de clichés thermiques géoréférencés couvrant l'intégralité du linéaire de la Cèze entre le pk0 et le pk34 (Carte 12). Cette visualisation en carte des températures des eaux de mieux apprécier la signature thermique des émergences c'est-à-dire d'identifier les écoulements ponctuels ou diffus, d'estimer la distance de mélange des eaux, de caractériser les phénomènes de stratification thermique, etc. ;
- 2) 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 et il permet, dans certains cas, une estimation des débits des sources par calcul de proportion de mélange.

Pour rappel, le calcul de proportion de mélange s'appuie sur 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 :

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

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 ;

$T_2$  : Température mesurée de l'eau émergente ;

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

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

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

$Q_3$  : Débit de la rivière à l'aval de l'émergence qui correspond au débit  $Q_1$  incrémenté des apports souterrains  $Q_2$ .

## IV.2. Résultats de la campagne du 03/09/14

---

Les clichés thermiques de l'ensemble des sources sont présentés en annexe 4. Dans ce présent rapport, l'exemple des émergences d'Ussel et de la Fabrique a été sélectionné car ces sources n'avaient pas pu être survolées lors des précédentes campagnes d'acquisition. Elles présentent par ailleurs une signature thermique bien marquée.

### IV.2.1. Exemple des sources d'Ussel et de la Fabrique

La Figure 44 illustre la signature thermique des sources d'Ussel et de la Fabrique au contact avec la rivière Cèze.

Au niveau de la confluence entre la source d'Ussel et la Cèze, la rivière est en régime supercritique (ou torrentiel), le mélange des eaux superficielles et souterraines est rapide. La température à l'aval de l'émergence tend à s'homogénéiser rapidement sur une distance de moins de 500 mètres. Le débit de la source a été mesuré à 163 L/s (courantomètre EM).

Au niveau de la confluence de la source de la Fabrique, le régime de la rivière est subcritique (ou fluviale), le mélange des eaux est moins rapide que pour Ussel. Par ailleurs, l'émergence de la Fabrique est diffuse, une partie de l'écoulement est apparent et a pu être grossièrement estimé à 70 L/s tandis qu'une autre partie du flux, dont les débits sont impossibles à estimer, s'écoule dans les alluvions et sourd au niveau du lit de la rivière (sous-écoulements).

La température de la rivière à l'amont de ces deux sources est d'environ 20,7°C et diminue pour atteindre une température de 19,75°C à l'aval des sources, soit une diminution d'environ 1°C entre l'amont et l'aval. C'est cette différence de température qui permet une estimation des débits des émergences.

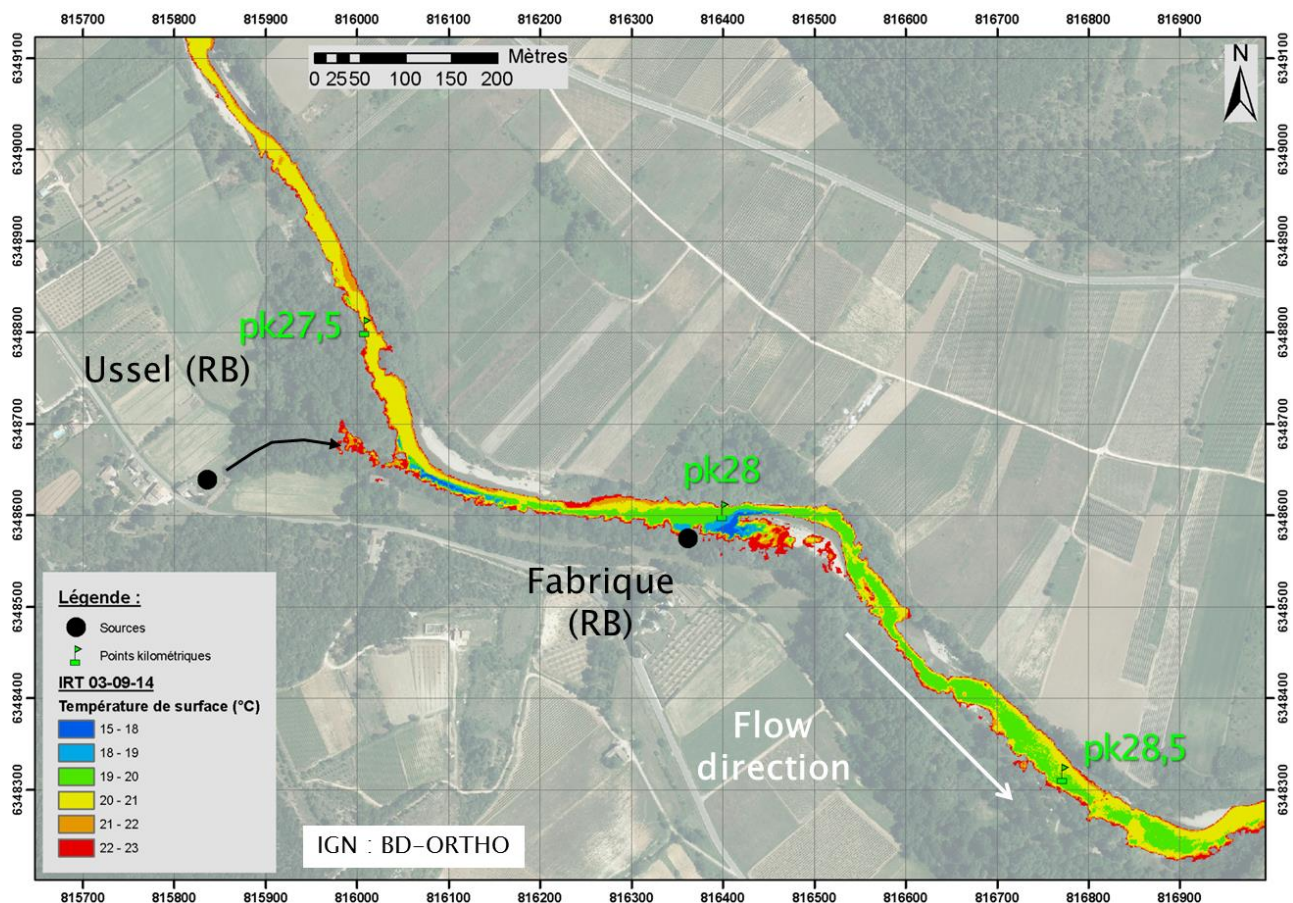


Figure 44 : Image IRT du 03/09/14 au niveau des sources d'Ussel et de la fabrique (entre les points kilométriques 27,5 et 28,5). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 23°C ont été filtrées.

#### IV.2.2. Profil de température de la rivière

Le profil de température (axe gauche des ordonnées) est obtenu à partir de l'extraction des valeurs moyennes de température sur l'axe de la rivière (Figure 45). Les températures moyennes (symbolisées par les points de couleur noire) ont ensuite été lissées (symbolisées par les points de couleur rouge) avec une moyenne mobile (fenêtre de lissage de 2\*350 mètres) afin de mieux représenter la température stabilisée de la rivière et éviter de représenter une température locale correspondant à une eau mal mélangée ou en cours de mélange. Le profil de débit (axe droit des ordonnées) a été obtenu à partir de mesures (courantomètre EM) effectuées sur 6 tronçons de rivière (symbolisées par des carrés de couleur verte). Les carrés de couleur rouge représentent le débit estimé de la rivière entre 2 tronçons de mesures, ils sont obtenus en incrémentant les débits mesurés des sources. La localisation des sources est symbolisée par les traits tiretés verticaux.

Il est intéressant de noter que la présence d'une source se traduit toujours par une baisse de température en rivière même pour les sources fortement affectées par le recyclage des eaux de la Cèze (Moulin, Font Canet et Ilette). Les baisses ne sont pas toujours de la même ampleur suivant les sources considérées, par exemple les sources de Goudargues, des Baumes ou encore de Monteil ont une forte influence sur la température de la rivière.

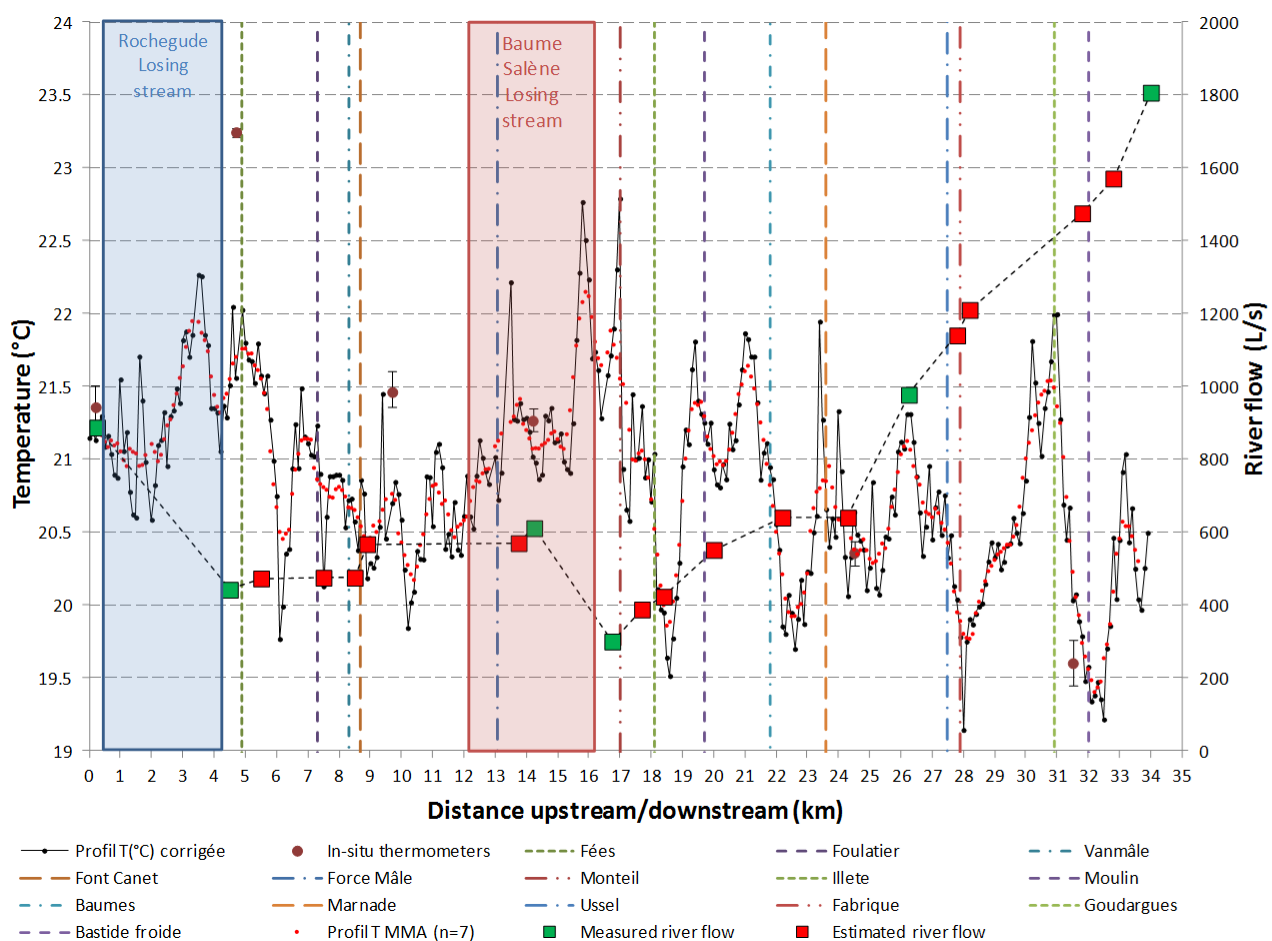


Figure 45 : Profil de température et de débit de la rivière Cèze le 03/09/14. Les températures, symbolisées par des points, ont été extraites et des images IRT et se lisent sur l'axe gauche des ordonnées. Les débits, symbolisés par des carrés, ont été mesurés (courantomètre EM) sur 6 tronçons de la rivière et se lisent sur l'axe droit des ordonnées.

#### IV.2.3. Essai d'estimation des débits des émergences à partir du profil de température de la rivière

Bien que soumis à de fortes incertitudes (décrites dans les rapports précédents) et à un certain degré de subjectivité dans le choix des températures en rivière à l'amont et à l'aval des émergences, les estimations de débit par calculs de mélange donnent des résultats intéressants. Ces résultats sont illustrés en Figure 46 et sont confrontés aux mesures de débits (courantomètre EM) effectuée au niveau des sources le 03/09/14.

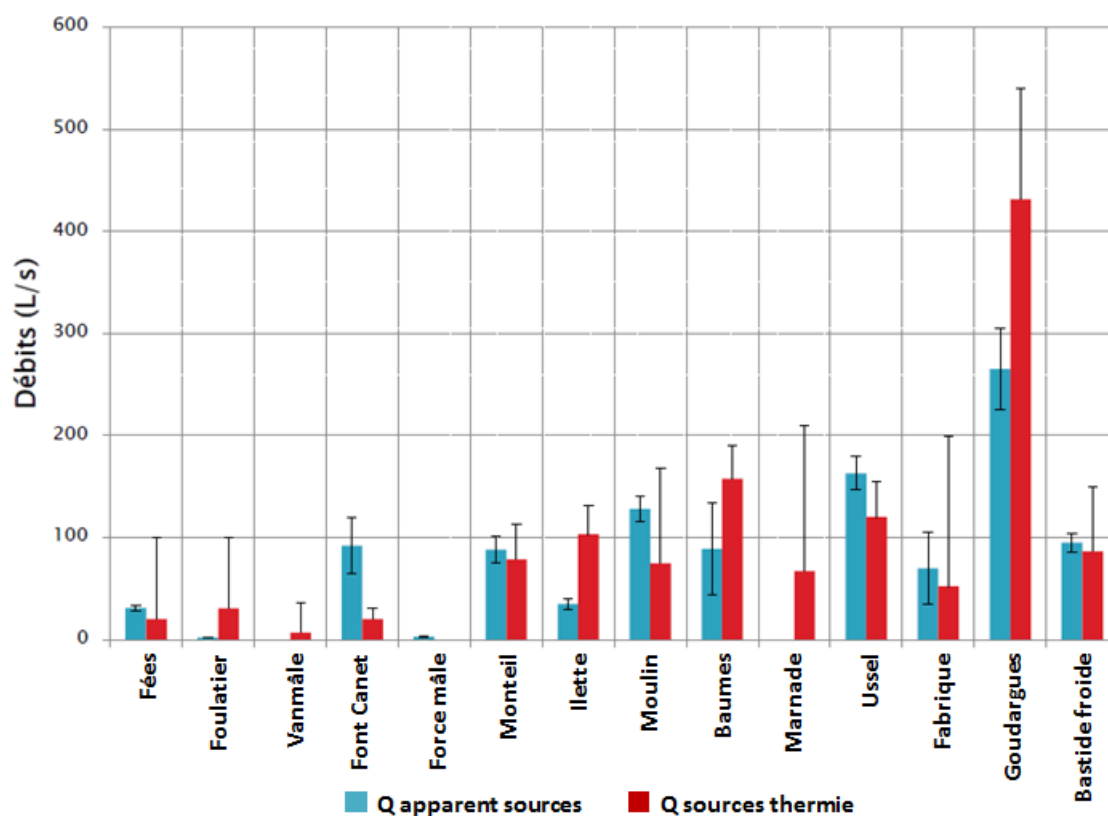


Figure 46 : Comparaison des débits des sources estimés grâce au profil thermique de la rivière du 03/09/14 avec les débits mesurés par jaugeage (courantomètre EM)

Les histogrammes de couleur bleu correspondent aux débits apparents (hors sous-écoulements) des sources mesurée le 03/09/14. Les barres d'erreurs associées correspondent à des incertitudes qui peuvent varier de 10 à 50% suivant la confiance accordée à la mesure (Baumes et Fabrique ont une incertitude forte de 50% tandis qu'Ussel, Bastide Froide et les Fées ont une incertitude faible de 10 %).

Les histogrammes de couleur rouge correspondent aux valeurs de débits estimées par thermie (prenant en compte le sous-écoulement) pour des contrastes de température déduits du profil (Figure 45) à partir des valeurs moyennes lissées (points de couleur rouge sur la Figure 45). Les barres d'erreurs associées correspondent au contraste maximal (points de couleur noire sur la Figure 45) de température à l'amont et à l'aval de la source considérée. Le détail du paramétrage des calculs de mélange par contraste thermique est présenté en Tableau 12.

Il est intéressant de noter que certaines sources présentent des débits estimés par thermie et mesurés par jaugeage qui sont assez comparables (Fées, Monteil, Ussel et Bastide Froide). Ces sources ont plusieurs points communs, elles semblent ne pas présenter de sous-écoulement, la mesure par jaugeage est jugée très fiable (10 % d'incertitude) et le mélange avec les eaux de la Cèze est rapide (régime supercritique des écoulements au niveau de la confluence). Ce résultat montre que dans des conditions de mélange rapide entre les eaux de source et la rivière, la valeur de débit estimée par thermie est assez fiable.

Pour de nombreuses sources les débits estimés par thermie sont très supérieurs à ceux mesurés par jaugeage (Foulatier, Ilette, Baumes, Marnade et Goudargues). Ce résultat peut être expliqué par le sous-écoulement et les écoulements diffus qui ne sont pas pris en compte dans les mesures par jaugeage. La source de Marnade est de fait très intéressante puisque les débits apparents sont nuls (0 L/s) tandis que la baisse de température de la rivière indique qu'un sous-écoulement important existe. La source des Baumes est reconnue comme diffuse et présentant des sous-écoulements. La source de Goudargues émerge également de manière diffuse et des écoulements dans les alluvions sont fortement suspectés.

Pour quelques sources (Moulin et Font Canet) les débits estimés par thermie sont largement sous-estimés. Ces sources ont en commun, d'être fortement influencées par les eaux de la Cèze, d'avoir des contrastes

thermiques assez faibles avec la rivière (moins de 3 °C pour Moulin et environ 5°C pour Font Canet) et de se mélanger lentement avec les eaux de la Cèze qui est en régime subcritique (stratification thermique dans le cas de Font Canet).

D'une manière générale, ces résultats rejoignent ceux issus du suivi hydrologique réalisé en 2015 (jaugeages différentiels en rivière et mesures des débits apparents des sources). La mise en évidence des sous-écoulements et des écoulements diffus est particulièrement notable et influence de manière non négligeable le débit de la Cèze.

Tableau 12 : Paramétrage des calculs de mélange par contraste thermique (valeurs de température issues du profil thermique en Figure 45)

Localisation	mois	année	Distance amont/aval (km)	Températures (°C)			Débits (L/s)			
				T sources	T rivière amont	T rivière aval	Q rivière	Q apparent sources	Q2 sources Thermie	Différence
Rivières	septembre	2014	0.25				888			
Tharoux	septembre	2014	4.5				443			
Fées	septembre	2014	5.5	13.8	21.75	21.4	474	31	20	-11
Foulatier	septembre	2014	7.5	13.8	21.2	20.75	476	2	31	29
Vanmâle	septembre	2014	8.5	13.8	20.8	20.7	476	0	7	7
Font Canet	septembre	2014	8.9	15.6	20.7	20.5	568	92	19	-73
Force Mâle	septembre	2014	13.75	13.8	20.9	21.4	571	3		
Amont Salène	septembre	2014	14.25				612			
Aval Salène	septembre	2014	16.75				301			
Monteil	septembre	2014	17.7	14.9	22.6	21	389	88	79	-9
Illete	septembre	2014	18.4	14.9	21.1	19.8	424	35	103	68
Moulin	septembre	2014	20	18.4	21.4	20.95	552	128	75	-53
Baumes	septembre	2014	22.2	13.6	21.7	19.9	641	89	158	69
Marnade	septembre	2014	24.3	14.6	20.9	20.3	641	0	67	67
Grange Coste	septembre	2014	26.25				978			
Ussel	septembre	2014	27.8	14.3	20.7	20	1141	163	120	-43
Fabrique	septembre	2014	28.2	14.3	20	19.75	1211	70	52	-18
Goudargues	septembre	2014	31.8	14.7	21.55	19.75	1476	265	432	167
Bastide froide	septembre	2014	32.8	14.3	19.7	19.4	1571	95	87	-8
Moulin de Bès	septembre	2014	34				1607			



## PARTIE V

—

# Analyses statistiques pour étudier les potentialités de pertes du système karstique de la Cèze

---

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Thomas Darras, Michaël Savary et Anne Johannet  
(IMT EMA, LGEI, Alès)

## V.1. Introduction et objectifs

---

Cette partie concerne les travaux de modélisation réalisés au LGEI de l'École des Mines d'Alès ayant pour objet de mettre en évidence d'éventuelles pertes situées dans les gorges de la Cèze qui traverseraient le plateau karstique de Méjannes-le-Clap. Si ces pertes existent et sont identifiées, et si une partie de l'eau infiltrée à la faveur de ces pertes résurge dans les mêmes gorges, en revanche, on ignore si une partie de l'eau pourrait alimenter un aquifère profond lié à l'épisode messinien, qui pourrait constituer un gisement d'eau exploitable pour le futur. La possibilité géologique de l'existence de ce réservoir avait déjà été proposée dans le rapport phase 2 de ce projet. Ici, l'objectif est de présenter les analyses réalisées, insuffisamment concluantes, et une nouvelle méthode afin d'évaluer si ces pertes se retrouvent intégralement dans le débit de la Cèze à la sortie du plateau de Méjannes-le-Clap, ou si une partie notable de cette eau est déviée vers un autre exutoire encore plus à l'aval de la rivière Cèze.

À cette fin une méthode originale a été proposée croisant l'analyse des systèmes et les analyses corrélatoires et spectrales [Mangin, 1975]. Cette méthode s'inspire de la modélisation des systèmes en automatique et pose l'hypothèse suivante : il est possible de détecter sur le spectre d'un signal si ce dernier est issu d'un processus intégrateur (additions des pluies et conversion en débit dans une rivière) ou d'un processus dérivateur (perte, c'est-à-dire soustraction d'un débit à la rivière). Cependant les premiers résultats ne sont pas à la hauteur de nos espérances et ont été difficiles à analyser. De ce fait, afin d'acquérir les clés de lecture des spectres ainsi obtenus, nous avons envisagé de revenir à un bassin hydrologique plus simple ne possédant pas d'inconnue ni d'erreur de mesure : un bassin simulé. Ce bassin simulé va nous servir de « bassin pilote » afin de parvenir à établir les liens entre les propriétés du bassin étudié et les sorties des méthodes systémiques et issues de l'automatique. Dans ce contexte, cette partie comporte d'abord un rappel des éléments du site d'étude pour cette méthode d'analyse statistique, suivi des premières analyses réalisées pour tenter de diagnostiquer l'éventuelle présence d'un réservoir profond reliant l'amont à l'aval de la Cèze. Enfin les simulations sur plusieurs bassins pilotes virtuels, de complexité croissante, ont été réalisées à partir des analyses spectrales et corrélatoires.

## V.2. Eléments importants concernant le site

---

Le bassin de la Cèze a déjà été amplement présenté dans ce rapport et les précédents ; nous n'y reviendrons donc pas. Spécifiquement reliés aux travaux réalisés, quatre éléments méritent d'être rajoutés : (i) la présentation de la base de données utilisée dans cette étude, (ii) la proposition d'une nouvelle courbe de tarage pour la station de La Roque-Sur-Cèze, (iii) la réalisation du bilan hydrologique et (iv) l'analyse de l'évolution des débits de la Cèze le long de son linéaire.

### V.2.1. Base de données

La base de données a été compilée à partir des données du SPC Grand Delta. Elle comprend plusieurs lacunes significatives qui sont reportées dans la Table 1. On pourra noter que ces lacunes, présentes sur différents points de mesures, sont rarement synchrones sauf sur la période (04/10/2001 au 03/02/2002) pour toute la base excepté pour les pluies à Sénéchas et du (01/11 au 31/12 2011) pour toute la base de données y compris les précipitations à Sénéchas. Ces lacunes ne permettront pas une comparaison rigoureuse des modèles aux différentes stations puisque ces dernières ne pourront être réalisées que sur des périodes différentes en fonction des stations limnimétriques considérées. Les modélisations du débit à Tharoux et Montclus ont un recouvrement significatif, mais ce n'est pas le cas pour la station de La Roque-Sur-Cèze qui recouvre peu celles des deux précédentes stations (Table 1).

Tableau 13 : Synthèse de la base de données

Années hydro	Secteurs	Bessages				Tharaux				Moncais				La-ROQUE-sur-CÈZE				Bagnols-sur-CÈZE			
		P_cumul max (h)	Débits max (h)	débits min (j)	débits moy (an)	Max P_cumul (j)	P_cumul (an)	Débits max (h)	débits min (j)	débits moy (an)	Max P_cumul (j)	P_cumul (an)	Débits max (h)	débits min (j)	débits moy (an)	Débits max (h)	débits min (j)	débits moy (an)	Max P_cumul (j)	P_cumul (an)	
92/93		879,50	253,51	0,00	4,56																
93/94		1213,00	109,07	0,00	6,52																
94/95		1114,00	292,83	0,00	6,43																
95/96		1480,00	572,42	1,20	9,22																
96/97		1342,50	339,39	1,51	6,23																
97/98		1924,00	334,60	1,28	6,84																
98/99		892,00	85,06	1,09	4,13																
99/00		1196,00	157,11	1,36	4,06																
00/01		1702,00	234,77	1,10	11,17																
01/02		688,50		X	X																
02/03		1104,50		X	X																
03/04		1670,50		X	X																
04/05		617,00		X	X																
05/06		1152,00		X	X																
06/07		1193,50		X	X																
07/08		1272,50		X	X																
08/09		1860,50		X	X																
09/10		1565,00		X	X																
10/11		1293,50		X	X																
11/12		584,00		X	X																
12/13		1436,50		X	X																
13/14		1506,00		X	X																
14/15				X	X																
Moyenne		1255,77	229,87	0,50	5,93																

## V.2.2. Courbe de tarage pour la station de La Roque-sur-Cèze

La station limnimétrique de La Roque-sur-Cèze était une station d'étiage gérée par la DIREN. Pour s'adapter aux crues, l'échelle de crue et la prise de pression ont été modifiées en 2010 par le SPC Grand Delta. Les valeurs fournies par le SPC-GD n'étant pas suffisamment resserrées, nous avons cherché une fonction permettant de calculer les débits en fonction des pluies pour toute notre période d'étude pour obtenir une courbe de tarage plus précise.

## V.2.3. Réalisation du bilan hydrologique

Pour évaluer l'importance du phénomène de pertes durant la traversée par la Cèze du plateau de Méjannes-le-Clap et l'éventuelle restitution par l'intermédiaire d'un aquifère profond, nous avons d'abord procédé par la méthode la plus simple : le calcul du bilan hydrologique aux différentes stations de l'amont vers l'aval. Ce bilan est la différence entre le volume d'eau tombé sous forme de pluie d'une part, et écoulé sous forme de débit d'autre part. Il quantifie les pertes intervenues sous toutes les formes possibles : évapotranspiration, pertes karstiques, pompages et divers prélèvements anthropiques. Le fait que ce bilan prenne en compte des phénomènes aussi différents ne facilite pas son interprétation, mais il nous a paru nécessaire de le calculer selon une approche relativement simple. Les Tableau 14 et Tableau 15 indiquent respectivement, les volumes d'eau tombés et les bilans associés pour les deux périodes pour lesquelles les comparaisons étaient possibles de l'amont à l'aval, compte-tenu des lacunes dans les mesures.

La période 1 concerne les 7 années hydrologiques 92/93, 93/94, 95/96, 96/97, 97/98, 98/99, 99/00, 00/01 ; la période 2 les 5 années hydrologiques : 07/08, 08/09, 09/10, 10/11, 12/13. Les valeurs obtenues sur ces deux périodes sont présentées sous forme de moyenne pour s'affranchir de la variabilité interannuelle très nettement visible dans le Tableau 13.

Tableau 14 : Bilan des hauteurs d'eau moyennes tombées sur les deux périodes d'observations définies

Hauteur d'eau moyenne tombée sur le bassin (mm/m <sup>2</sup> )					
	Bessèges	Tharoux	Montclus	La Roque-sur-Cèze	Bagnols-sur-Cèze
Période 1	1403	1206	1122	1122	990
Période 2	1271	1139	1027	1027	1046
Moyenne <sup>2</sup>	1337	1173	1075	1075	1018

---

<sup>2</sup> La moyenne est calculée sur toutes les années des périodes 1 et 2 ; elle n'est pas la moyenne des deux valeurs respectives pour les périodes 1 et 2.

Tableau 15 : Bilan des pertes sur les différents sous bassins pour les deux périodes d'observations définies

<b>Bilan des pertes : pluies cumulées - débit écoulé pour les différents sous-bassins par unité de surface (mm/m<sup>2</sup>)</b>					
	Bessèges	Tharoux	Montclus	La Roque-sur-Cèze	Bagnols-sur-Cèze
Période 1	721	859	607	X	621
Période 2	457	766	X	467	460
Moyenne <sup>3</sup>	589	813	607	467	541
Moyenne (%) en relatif par rapport à la pluie	42%	67%	54%	42%	55%
Relations eaux de surface /eaux souterraines. Les apports proviennent des eaux souterraines	Neutre	Pertes ++	<i>Pertes + Apports +</i>	<i>Pertes + Apports ++</i>	<i>Pertes + Apports +</i>

En première analyse, la quantité de précipitation décroît tandis que le débit augmente, d'amont en aval. Cette observation peut servir à valider grossièrement les données.

Si l'on regarde les pertes, on peut noter qu'elles sont beaucoup variables sur les deux périodes que les volumes de pluies. Malheureusement, compte-tenu des lacunes de données, on ne peut les comparer sur les 2 périodes que pour les 3 stations de Bessèges, Tharoux et Bagnols.

Signalons tout d'abord que si la valeur des pertes à Bessèges ne peut pas être rigoureusement interprétée journalièrement car le cours d'eau de la Cèze à Bessèges est fortement perturbé par le barrage de Sénéchas situé à son amont (ce dernier a une vocation d'écrêteur de crues, mais il fait également office de soutien d'étiage), en revanche, en bilan annuel ou pluriannuel, cette information a vraisemblablement plus de sens, ce qui est confirmé par le Tableau 14, car elle a le même ordre de grandeur que les pertes plus à l'aval du cours d'eau (hors Tharoux)

Ainsi, une fois ces précautions prises, on peut noter sur le tableau que les pertes sont les plus importantes à la station de Tharoux, tant en valeur absolue qu'en valeur relative (par rapport au cumul de précipitations). Si ces pertes sont principalement d'origine karstique, bien que l'on sache qu'il y a des prélèvements anthropiques à l'amont de cette station dans le secteur cévenol, cela conforte le fait que le karst absorbe une partie de l'eau de la rivière. Cette eau serait ensuite restituée à la rivière entre la station de Tharoux et Montclus (les pertes à Montclus sont plus faibles que celles Tharoux), puis avec plus d'importance entre les stations de Montclus et de La-Roque-sur-Cèze (pertes les plus faibles et exurgences karstiques connues). Concernant Bagnols sur Cèze, les pertes sont plus importantes, en absolu comme en relatif.

Selon les pertes et les exurgences connues le long de la rivière dans sa traversée du plateau karstique, il est possible de décrire le type d'échanges entre la rivière et l'eau souterraine. Ceci est proposé dans la dernière ligne du Tableau 15. Si l'on considère que l'amont Cévenol est « neutre » en termes d'interactions eaux de surfaces-eaux souterraines, alors on peut en déduire les interactions entre eaux souterraines et eaux de surface plus à l'aval de la rivière. De fortes pertes interviennent à Tharoux, pertes compensées

<sup>3</sup> La moyenne est calculée sur toutes les années des périodes 1 et 2 ; elle n'est pas la moyenne des deux valeurs respectives pour les périodes 1 et 2.

ver l'aval par un apport d'eau souterraine. Ce phénomène étant plus important à la station de La Roque-Sur-Cèze.

Cette analyse très simple permet de dégager une certaine cohérence avec ce qui a été déterminé par l'approche hydrologique par jaugeages mais il demeure difficile d'en déduire s'il y a des infiltrations ou pertes dans des aquifères plus profonds. Pour cela nous proposons de compléter cette première approche par deux autres méthodes, un peu plus sophistiquées, l'une bien connue en hydrologie et l'autre inspirée de la théorie des systèmes, qui devrait pouvoir nous permettre d'ajouter des indices afin d'identifier les processus dominants : pertes ou restitution des eaux.

#### V.2.4. Analyse de l'évolution des débits de la Cèze le long de son linéaire.

Pour détecter des anomalies sur les phénomènes de perte et de stockage, il nous paraît intéressant de compléter l'étude précédente par l'analyse de l'évolution des débits de la rivière le long de son linéaire au fur et à mesure que la superficie du bassin augmente. Il a été remarqué par [Rodier, 1964] ; [Réménieras, 1986] que l'on pouvait représenter les évolutions des débits spécifiques de pointe selon la relation suivante :

$$Q_s = CA^b$$

Où  $Q_s$  est le débit spécifique,  $A$  l'aire du bassin considéré et  $C$  et  $b$  des coefficients à ajuster pour chaque bassin. Ainsi l'évolution du débit spécifique de différents bassins cévenols a été reportée par [Artigue, 2012], comme représenté en Figure 47. On peut noter que les différents bassins, qui sont type cévenol, s'alignent globalement selon une loi de puissance où le coefficient  $b$  est négatif. Sur la Figure 47, on peut noter une assez grande variabilité qui diminue d'amont en aval. Cette variabilité est due à la difficulté d'observer le maximum possible d'une crue pour un bassin donné sur une courte période d'observation (30 ans), mais aussi à la difficulté de mesurer précisément ce pic de crue. Il est d'ailleurs à noter qu'un certain nombre de ces valeurs est issu de l'épisode de crue de 2002 qui sont assez imprécises. Pour les bassins de petite taille, on peut avoir une variabilité de 100% tandis que pour ceux de plus grande taille la variabilité est beaucoup plus faible (30%). Ces incertitudes restent dans tous les cas considérables.

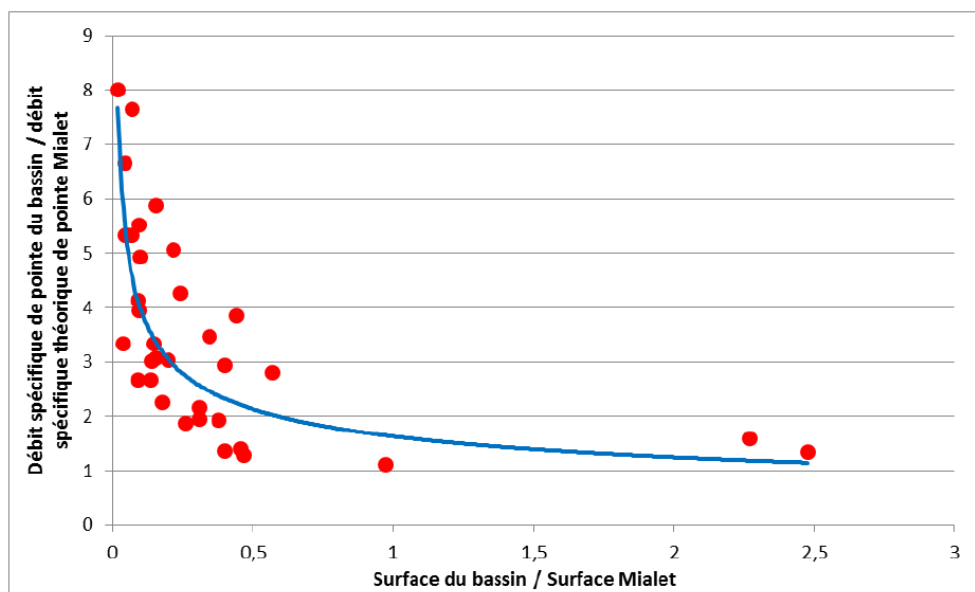


Figure 47 : Évolution des débits spécifiques en fonction de la superficie des bassins cévenols, normalisé par la superficie d'un bassin moyen : celui du Gardon de Mialet à Mialet (Gard)

Si l'on cherche, de la même manière, à décrire l'évolution des débits de pointe le long du linéaire de la Cèze, depuis les stations de Bessèges jusqu'à Bagnols sur Cèze, on s'attend à ne pas avoir une courbe aussi régulière puisque les bassins sont de types très différents : cévenols à l'amont, karstique en la partie médiane, puis couverts d'alluvions dans la partie aval. N'oublions pas également que le débit de pointe à Bessèges est atténué par le barrage de Sénéchas.

Les superficies retenues pour les sous-bassins versants sont les suivantes (source SPC-GD):

- Bessèges : 230 km<sup>2</sup>, altitude station 171 m
- Tharoux : 665 km<sup>2</sup>, altitude station : 103,45 m
- Montclus : 834 km<sup>2</sup>, altitude station 78,57 m
- La Roque-sur-Cèze : 1060 km<sup>2</sup>, altitude station : 55 m
- Bagnols sur Cèze : 1120 km<sup>2</sup>, altitude station 36,46 m

Tableau 16 : Statistiques descriptives des sous-bassins de la Cèze.

	Bessèges	Tharoux	Montclus	La Roque-Sur-Cèze	Bagnols sur Cèze
Superficie du BV (km <sup>2</sup> )	230	665	834	1060	1320
Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	5,38	7,20	11,50	19,15	15,60
Débit Maximum (m <sup>3</sup> /s)	1019	1975	1755	1677	2927
Débit Spécifique de pointe (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	4,43	2,97	2,10	1,68	2,22

Les valeurs pour les sous-bassins versants d'amont en aval de la Cèze (Tableau 16) montrent que le débit évolue bien de manière croissante de l'amont vers l'aval, tandis que le débit spécifique évolue en sens inverse. Cependant les stations de Montclus et de La Roque-sur-Cèze montrent des valeurs légèrement plus faibles qui expriment le pouvoir écrêteur de crues du karst : les pluies s'infiltrent rapidement et viennent remplir le réservoir souterrain avant de contribuer à la crue de surface. Si des eaux issues des pertes en amont et ressortant aux stations aval de Montclus et La Roque sur-Cèze viennent contribuer à la crue, il est probable que leur apport soit également différé dans le temps, mais il n'est pas facile de connaître leur distribution temporelle sans analyse physico-chimique (température ou conductivité) de l'eau.

Dans la Figure 48, qui indique les relations entre les débits spécifiques et la superficie des bassins drainés depuis l'amont vers l'aval, le long du linéaire de la Cèze, il apparaît clairement que le secteur cévenol a un débit spécifique très élevé tandis que la partie karstique a un débit spécifique nettement plus faible. Ceci confirme le caractère atténuateur du karst et ne semble pas porter la marque de grands apports d'eau souterraine venant de l'amont vers l'aval. Il faut cependant garder en tête les ordres de grandeur des débits étudiés qui s'élèvent à plus de 1000 m<sup>3</sup>/s, débits qui peuvent très difficilement être influencés par des apports karstiques.

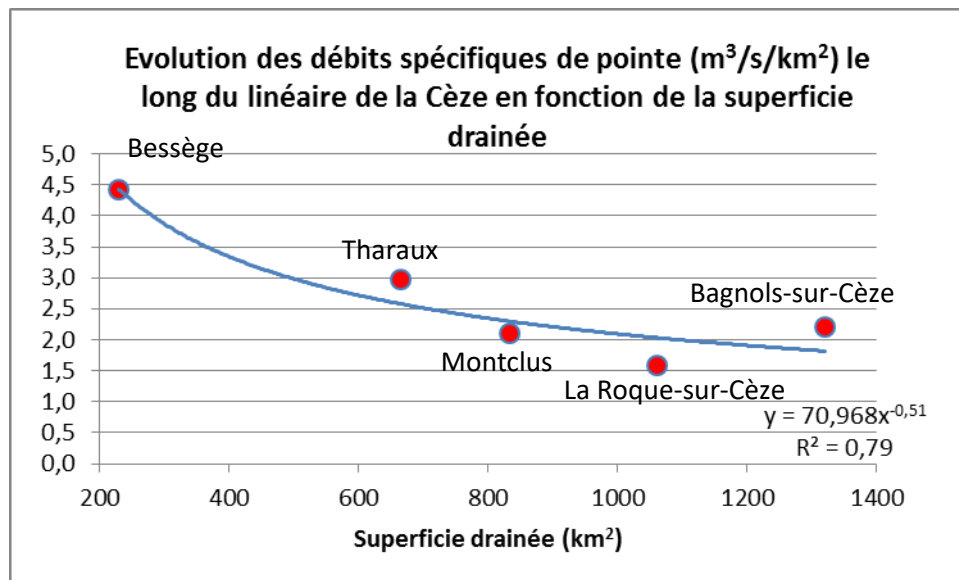


Figure 48 : Évolution des débits spécifiques le long du linéaire de la Cèze.

En synthèse, il apparaît que l'existence de flux d'eau souterrains venant de l'amont (Tharoux) vers l'aval (entre La Roque-Sur-Cèze et Bagnols-sur-Cèze) n'est pas clairement établie par ces analyses un peu simplistes. Nous allons proposer dans la section qui suit une autre approche, fondée sur les analyses spectrales, introduites en hydrologie par Alain Mangin.

### V.3. Vers une méthode de mise en évidence des pertes par analyse spectrale

#### V.3.1. Périodes de simulation

Les simulations sont effectuées sur deux années hydrologiques, du 1er août au 31 juillet (Figure 49). Le choix d'un découpage en année hydrologique permet de conserver une cohérence hydrologique en ne coupant pas une période de hautes eaux en deux avec un "état zéro" en début et en fin de cycle qui correspond dans le sud-est de la France à une période avec peu de précipitations. Les deux années choisies sont les années hydrologiques du 1er août 1997 au 31 juillet 1998 et du 1er août 1998 au 31 juillet 1999, respectivement appelées par la suite HY 1997 et HY 1998. Afin de pouvoir tester des conditions hydrologiques différentes, nous avons choisi une année particulièrement humide (HY 1997) et une autre particulièrement sèche (HY 1998).



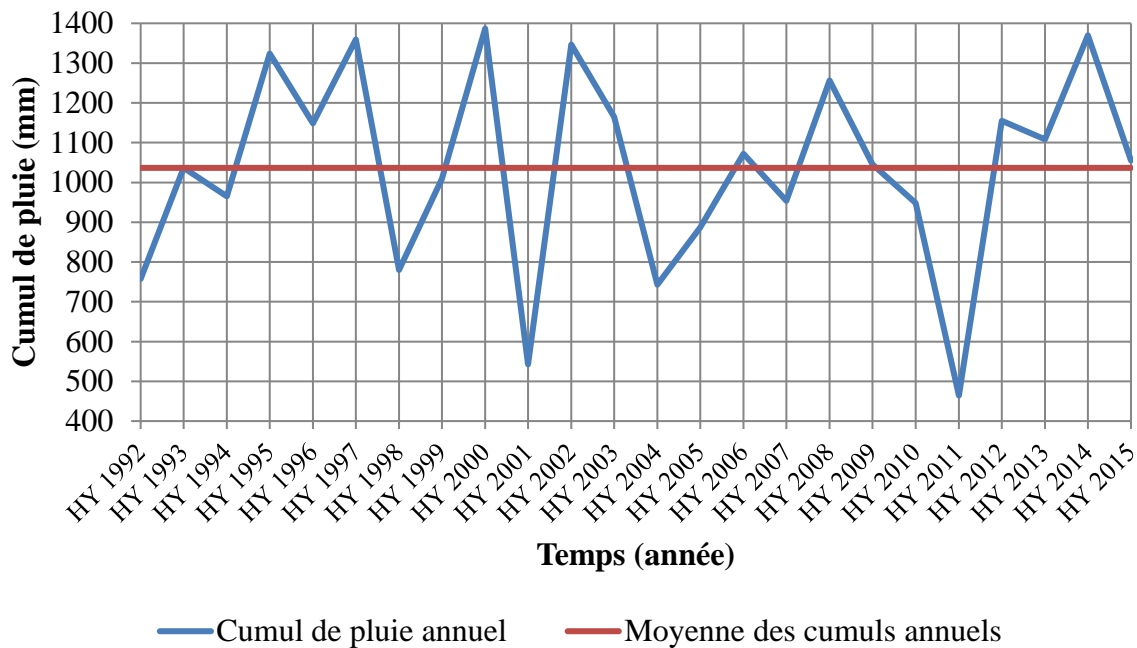


Figure 49 : Cumuls annuels des pluies moyennes mesurées sur l'ensemble du bassin versant de la Cèze estimé à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen sur les stations de Sénéchas, Tharoux, Montclus et Bagnols-sur-Cèze.

Précisons que les années hydrologiques HY 2001 et HY 2011 apparaissent comme particulièrement sèches mais les chroniques de pluie présentent d'importantes lacunes ce qui rend le cumul de pluie sur ces périodes largement déficitaire.

### V.3.2. Outils et Méthodes

En préliminaire, rappelons que la présentation détaillée des méthodes d'analyses corrélatoire et spectrales a été effectuée dans les précédents rapports. Nous n'en rappellerons ici que le principe.

### V.3.3. Caractérisation par les méthodes issues de l'analyse des systèmes en automatique

L'analyse des filtres en automatique et en traitement du signal permet de distinguer deux types de filtres : les filtres intégrateurs et les filtres dérivateurs. Les premiers sont le résultat d'additions qui effectuent l'équivalent d'une « moyenne » et ont une fonction de régularisation. C'est qualitativement la fonction qu'effectue un bassin qui « additionne » les pluies pour les transformer en débit. Il est bien connu, grâce à cette fonction de régularisation, que les pluies sont qualitativement plus variables et moins prévisibles que les débits [thèse A Mangin]. Concernant le second type de filtre, le filtre dérivateur, celui-ci est formalisé sous la forme d'une dérivée, c'est-à-dire, en représentation discrétisée, par une différence. Ainsi lorsque se produisent des pertes, on soustrait des débits à ceux de la rivière. Nous émettons ainsi l'hypothèse que le schéma spectral du filtre dérivateur pourrait servir à dépister des pertes au sein d'un bassin versant.

Si l'on représente les fonctions de transfert (au sens de la théorie des systèmes) des filtres linéaires dans le domaine fréquentiel, on obtient typiquement les types de graphiques suivants : le spectre en fréquence du filtre intégrateur (pluie-débit) en Figure 49, et le spectre du filtre dérivateur (pertes) en Figure 50.

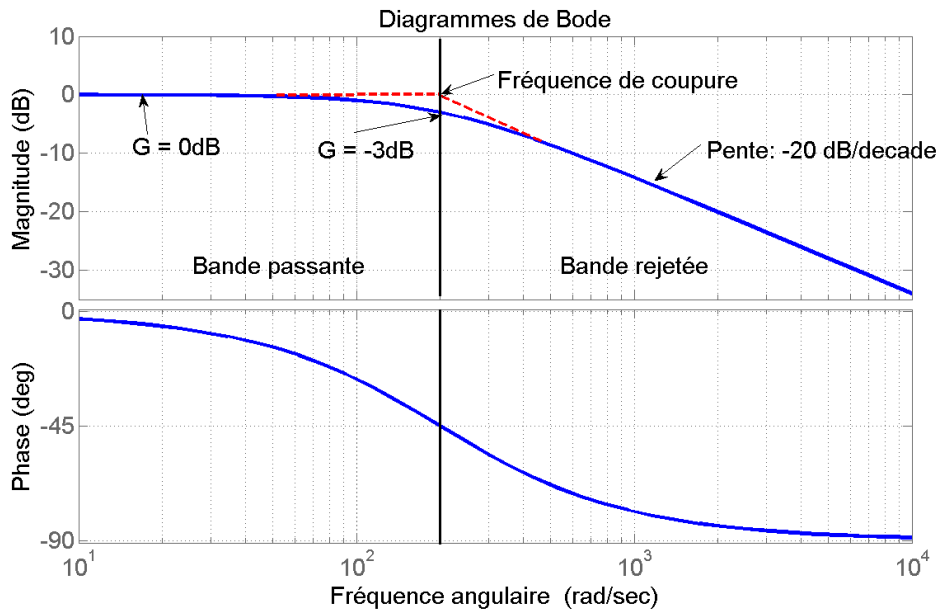


Figure 50 : Filtres « pluie-débit » (intégrateur) pour le modèle du premier ordre, équivalent de la loi de Maillet [Kong A Siou JoH]

Afin de mettre en évidence les comportements hydrodynamiques de la Cèze induits par la présence d'un système karstique et de ses pertes associées, nous proposons d'appliquer les méthodes d'analyses corrélatoire et spectrale. Ces méthodes sont couramment utilisées pour étudier le comportement hydrodynamique des systèmes karstiques, cependant les résultats obtenus apparaissent difficilement interprétables et ne permettent souvent que de retrouver des caractéristiques déjà connues de l'hydrosystème. Par exemple, comme l'a montré le stage de Anaïs Bonnet, financé dans le cadre de cette action ZABR-AERMC, le résultat des analyses corrélatoires varie selon que l'on utilise la hauteur et le débit (Tableau 17), alors que « l'effet mémoire », ou inertie de la rivière paraît intuitivement devoir être toujours le même. Cette différence provient du fait que la hauteur et le débit ne sont pas liés linéairement. Par exemple lorsque la rivière possède un lit en « escalier », le débit varie progressivement alors que la hauteur varie par paliers : augmentant très peu lorsque la rivière s'étale sur le palier. Ces différences se traduisent par des ruptures de pente sur la courbe de tarage.

Tableau 17 : Comparaison des inerties, telles que définies par A. Mangin [Mangin, 1975], du bassin versant de la Cèze à différentes stations, pour les hauteurs (Savary) et pour les débits (Bonnet).

Station	Inertie (en jour)	
	Bonnet, 2016	Savary, 2014
Tharoux	4	18
Montclus	5	22
Bagnols	10	19

Les méthodes d'analyses corrélatoire et spectrale, issues de la théorie des systèmes, ont démontré leur efficacité, mais leur application à des systèmes naturels est rendue compliquée par les erreurs de mesures des variables relevées sur le terrain.

Afin de définir les domaines d'application des méthodes d'analyses corrélatoire et spectrale nous avons défini un ensemble de 7 modèles conceptuels simples, dont les paramètres conditionnant le comportement hydrodynamiques sont connus. La complexité des modèles est progressivement

augmentée, nous permettant, pas à pas, de relier les résultats des analyses corrélatoire et spectrale aux fonctions de production et de transfert (au sens hydrologique) mises en œuvre par les modèles.

### **V.3.4. Application des analyses corrélatoire et spectrale à des données issues de modèles conceptuels**

#### *V.3.4.1. Modèle 1*

##### **Description du modèle**

Il s'agit d'un modèle global représentant un unique bassin (A) alimenté par les précipitations mesurées à Sénéchas. On trouvera reporté le débit observé à Sénéchas, même si cette information n'est pas très pertinente puisque ce qui nous intéresse ici sont les débits générés par un modèle artificiel soumis aux pluies reçues à Sénéchas. Le modèle qui sert à générer les débits est le modèle HEC-HMS. Les fonctions de production (Loss Method et Transform Method) sont fixées. Un modèle de référence avec un premier jeu de paramètres (P1) est donné en Table 6. D'autres jeux de paramètres sont testés successivement en faisant varier les paramètres un à un pour étudier l'impact de chacun sur l'hydrogramme, les pertes par infiltration (dépendantes de la fonction de production), les autocorrélations, les corrélations croisées et l'analyse spectrale.

Objectif : étude du rôle des paramètres du modèle HEC-HMS. Plusieurs jeux de paramètres (10) sont testés et leurs impacts sur l'hydrohyétogramme, l'autocorrélation, la corrélation croisée et l'analyse spectrale sont étudiés. Le jeu de paramètre P4 correspond à P1 pour lequel les précipitations sont multipliées par deux.

## Paramétrisation

Tableau 18 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (*Loss Method* et *Transform Method*) pour les jeux de paramètres  $P_1$  à  $P_7$  du modèle 1.

Jeux de paramètres		$P_1^*$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$
Précipitation A (Sénéchas)		A	A	A	<b>2A</b>	A	A	A	A	A	A
<b>Loss Method:</b> <i>Deficit and Constant</i>	<i>Initial Deficit</i> (mm)	10	10	10	10	0	0	0	0	0	0
	<i>Maximum Deficit</i> (mm)	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0
	<i>Constant Rate</i> (mm/h)	0,5	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	<i>Impervious</i> (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Transform Method:</b> <i>Clark Unit Hydrograph</i>	<i>Time of Concentration</i> (h)	24	24	24	24	<b>48</b>	<b>72</b>	24	24	<b>48</b>	<b>72</b>
	<i>Storage Coefficient</i> (h)	24	24	24	24	24	24	<b>48</b>	<b>72</b>	<b>48</b>	<b>72</b>

\* $P_1$  est le jeu de paramètres du modèle de référence : le modèle A.

Note :

Le Tableau 18 présente le paramètre *initial deficit* qui décrit le niveau de saturation du sol ; s'il vaut 0 le bassin est saturé et aucune lame d'eau n'est soustraite de la pluie tombée, qui est alors intégralement convertie en débit. Le paramètre *constant rate* décrit les propriétés d'infiltration du sol. Le paramètre quantifie le taux maximal d'infiltration en régime permanent : la pluie se concentre de manière plus ou moins efficace et cela se traduit par une "amplification", sans retard, de la crue. En l'absence d'évapotranspiration, il n'y a pas de vidange du compartiment sol lorsque les précipitations sont nulles. Il est donc plus judicieux de fixer les valeurs des paramètres *Initial Deficit* et *Maximum Deficit* à 0 si aucune évapotranspiration n'est appliquée au modèle. *Impervious* quantifie le pourcentage de surfaces imperméables du bassin. La totalité de l'eau tombée sur ces surfaces est convertie en ruissellement.

## Hydrohyétogrammes

Les Figure 51 et Figure 52 présentent les débits, simulés à l'exutoire du sous-bassin A pour la période entre le 14 décembre 1997 et le 26 décembre 1997, respectivement avec les paramètres  $P_1$  à  $P_4$  et pour les paramètres  $P_1$ ,  $P_5$ ,  $P_6$  et  $P_7$ . Les hydrogrammes se concentrent sur un événement de crue pour pouvoir mettre en évidence l'impact des paramètres.

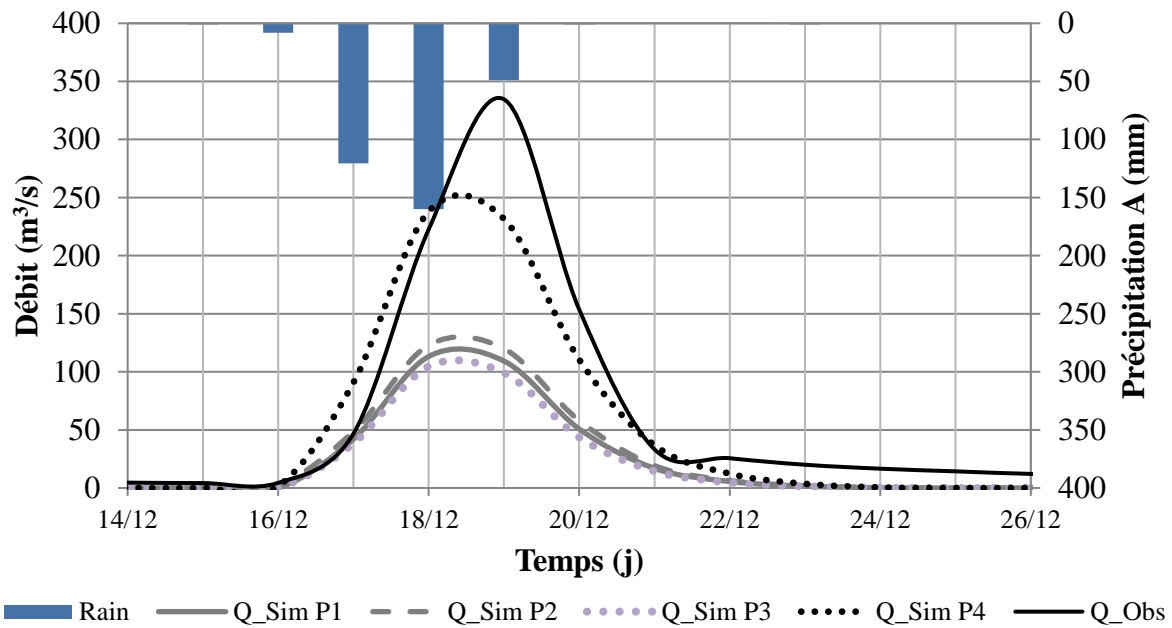


Figure 51 : Hydrohyetogrammes du modèle 1 (bassin A) avec les jeux de paramètres  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ , ainsi que les débits mesurés.

On peut noter sur ce diagramme que le Constant Rate influence assez peu l'amplitude de la crue (avec les valeurs choisies). Le débit est grossièrement multiplié par 2 lorsque la pluie appliquée est doublée. Les paramètres de la fonction de production influencent essentiellement l'amplitude du débit simulé sans introduire de déphasage.

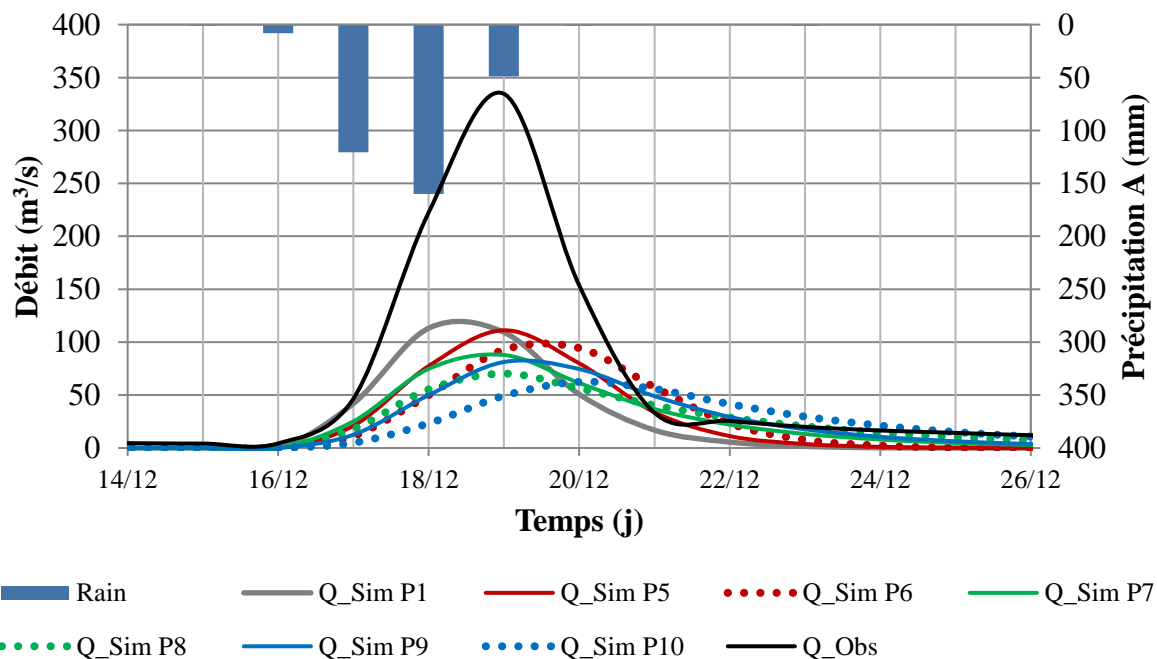


Figure 52 : Hydrohyetogrammes du modèle 1 (bassin A) avec les jeux de paramètres,  $P_1$ ,  $P_5$ ,  $P_6$ ,  $P_7$ , ainsi que les débits mesurés.

La Figure 52 montre que les paramètres de la fonction de production impactent à la fois l'amplitude des débits simulés et leur dynamique (synchronisation du pic). L'augmentation de la valeur du paramètre Time of Concentration de 24 et 48h induit un retard du pic de crue respectivement de 24 et 48h ainsi

qu'un léger amortissement des amplitudes qui s'accroît avec l'augmentation de la valeur du paramètre. En revanche, l'augmentation de la valeur du paramètre Storage Coefficient de 24 et 48h induit un retard du pic de crue de 24h dans les deux cas avec un amortissement plus important, fonction de l'augmentation de la valeur du paramètre. Enfin, l'augmentation de la valeur des deux paramètres simultanément de 24h et 48h engendre un retard du pic de crue respectivement de 24 et 48h ainsi qu'un amortissement plus important que celui généré par l'augmentation seule de la valeur du paramètre Storage Coefficient.

### Analyses statistiques

Les Figure 53 et Figure 54 présentent respectivement les corrélogrammes simples et les corrélogrammes croisés des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres P1 à P7, pour l'année hydrologique HY1997.

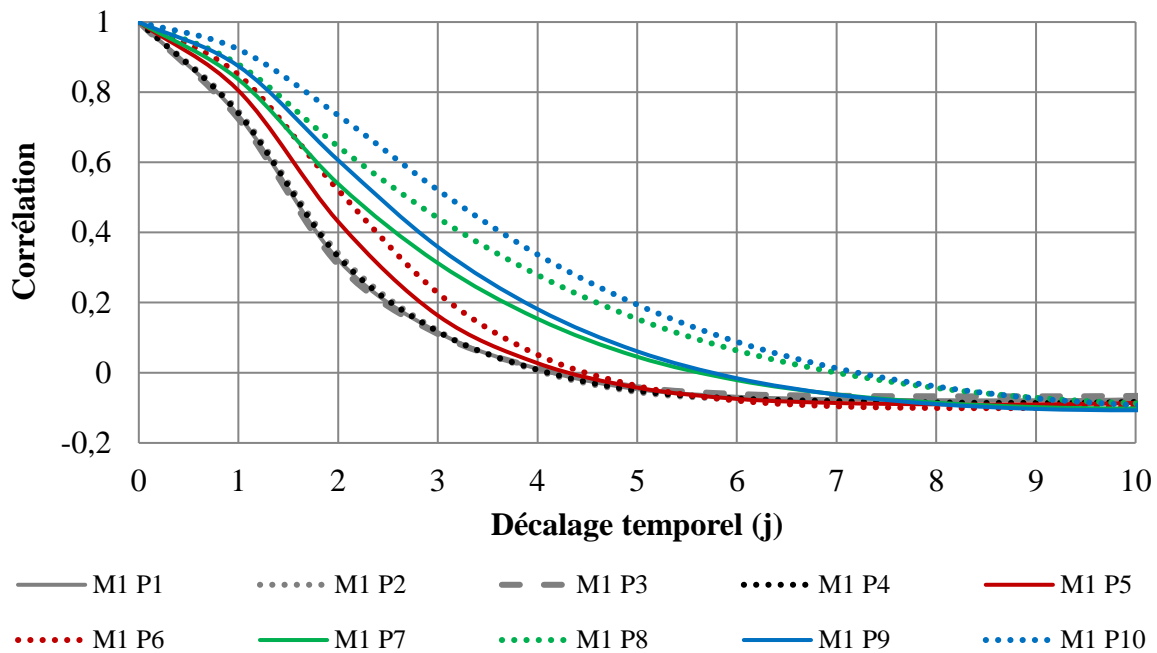


Figure 53 : Corrélogrammes simples des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres P1 à P7 pour l'année hydrologique HY1997.

Les corrélations simples permettant de quantifier l'"effet mémoire" du système, il apparaît très logiquement que les modèles P1, P2, P3 affichent le même effet mémoire. Ce dernier augmentant pour les modèles P5, P6, P7, P9, P8 puis P10, par ordre croissant. Le coefficient de stockage apparaît donc comme déterminant sur l'effet mémoire.

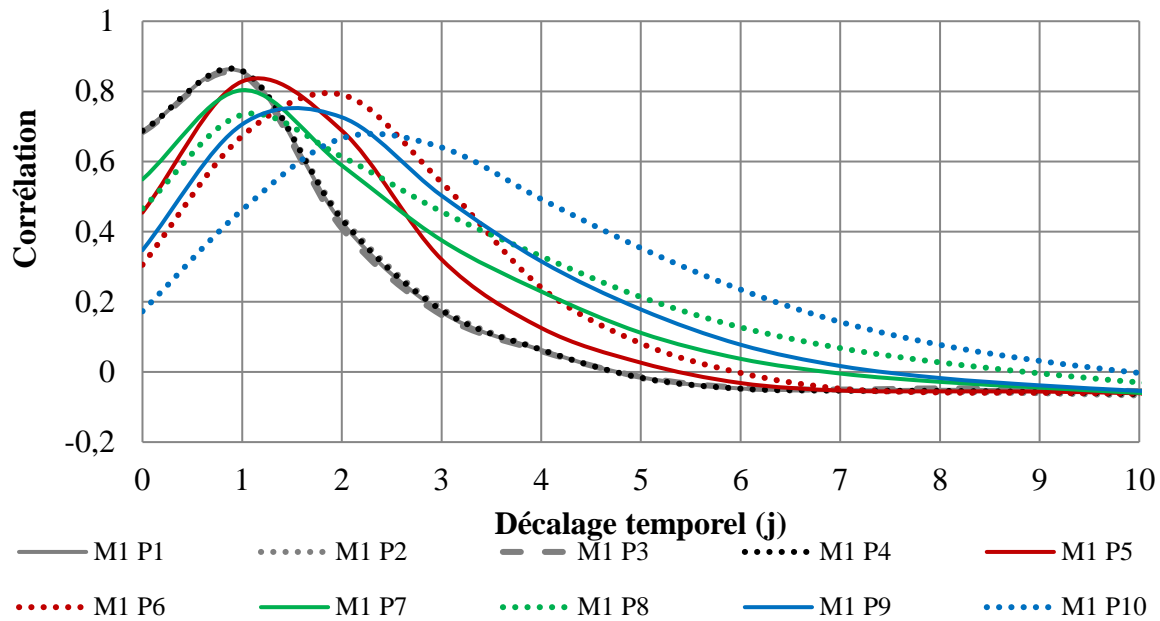


Figure 54 : Corrélogrammes croisés pluie/débit simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres P1 à P7 pour l'année hydrologique HY1997.

Concernant les corrélogrammes croisés, ceux-ci permettent d'accéder au temps de réponse de l'hydrosystème. Ces temps de réponse varient ici de presque 1 jour (P1 à P3) à 2 jours et demi, dans l'ordre : P7, P5-P8, P9, P6, P10. Ils transcrivent bien la durée de concentration du ruissellement.

### Analyse fréquentielle

La Figure 55 présente les spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres P1 à P7, pour l'année hydrologique HY1997. On peut noter que les basses fréquences sont globalement identiques, avec une faible amplification, tandis qu'une différenciation est notable en haute fréquence, en particulier pour P10.

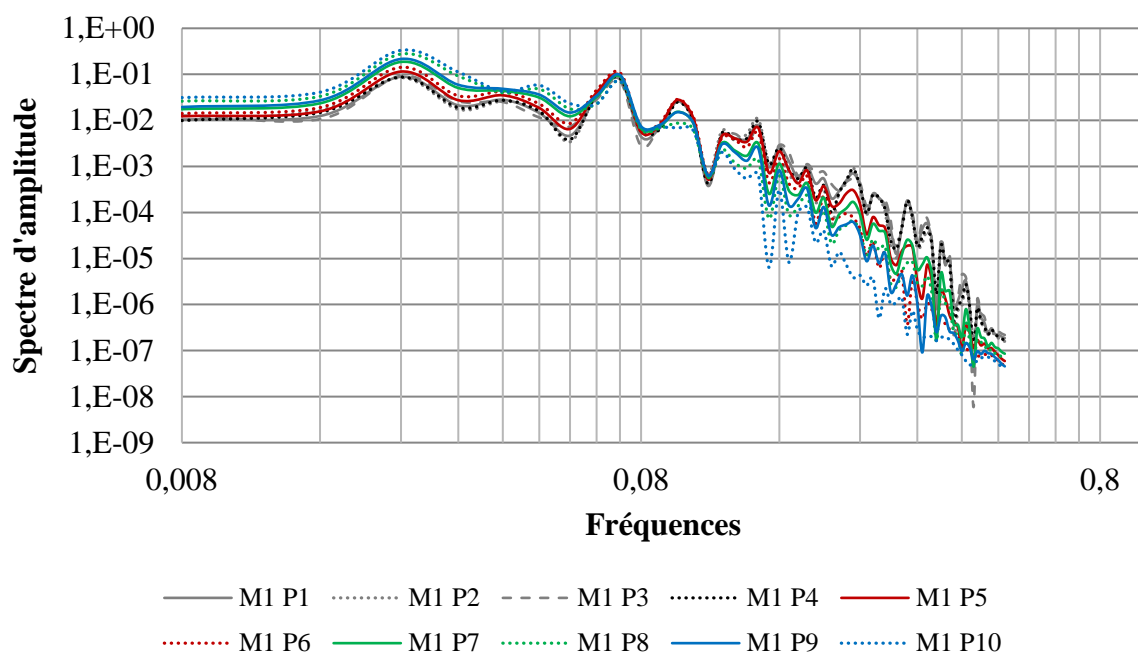


Figure 55 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres P<sub>1</sub> à P<sub>7</sub> pour l'année hydrologique HY1997.

#### V.3.4.2. Modèle 2

##### Description

Le Modèle 2 est composé d'un sous-bassin A (Modèle 1) et d'un élément de liaison (Reach ou tronçon de cours d'eau) à son aval, appliquant une fonction de transfert (Routing). Cette fonction de transfert comprend 4 paramètres. Un modèle de référence avec un premier jeu de paramètres (P1) est donné. D'autres jeux de paramètres sont testés successivement en faisant varier les paramètres un à un pour étudier l'impact de chacun sur le transfert amont/aval. Les autocorrélations, corrélations croisées et analyses spectrales sont aussi appliquées et l'impact de chacun de ces paramètres sur les résultats de ces méthodes permettent de mieux comprendre comment les interpréter.

Objectifs :

1. Etude des rôles des paramètres de la fonction de transfert du modèle HECHMS, mise en œuvre par un élément de liaison représentant un tronçon de cours d'eau.
2. Identifier les processus hydrodynamique qui peuvent être mis en lumière à l'aide des analyses statistiques tels que l'autocorrélation, la corrélation croisée et l'analyse spectrale.

##### Paramétrisation

Tableau 19 : Valeurs des paramètres des fonctions de transfert (Routing Method) pour les jeux de paramètres P1 à P7 du modèle 2.

Jeux de paramètres	P1*	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Length (km)	100	100	100	100	100	100	100
Slope (m/m)	0,1	<b>0,01</b>	<b>0,001</b>	0,1	0,1	0,1	0,1
Manning's n	0,6	0,6	0,6	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	0,6	0,6
Shape : Rectangle /Width (m)	10	10	10	10	10	<b>1</b>	<b>50</b>

\*P1 est la paramétrisation du modèle de référence



Avec une longueur de cours d'eau de 10km il apparait que la variation des autres paramètres de la fonction de transfert impacte très faiblement les débits de sortie du Modèle 2. Nous avons donc choisi d'utiliser uniquement une longueur de cours d'eau de 100km qui permet aux autres paramètres d'avoir une influence significative (Tableau 19).

### Hydrogrammes de l'entrée et des sorties de l'élément de liaison (Reach)

La Figure 56 présente les débits simulés à l'amont (Sim Amont) et à l'aval de l'élément de liaison (Reach) du Modèle 2, entre le 16 décembre 1997 et le 26 décembre 1997, respectivement avec les jeux de paramètres P1 à P7. Le jeu de paramètres P1 étant la référence il est représenté sur les 3 hydrohyétogramme.

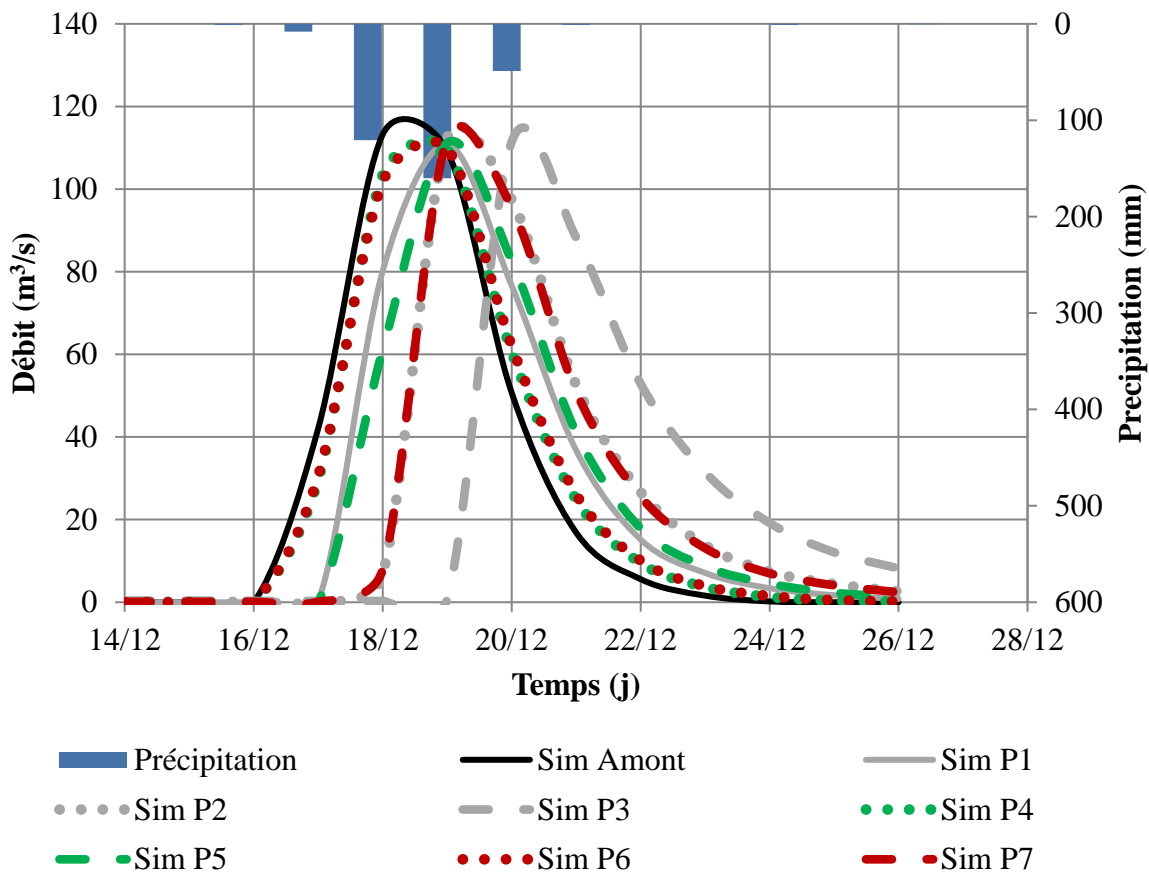


Figure 56 : Effet de la pente. Hydrohyétogramme des débits simulés à l'amont et à l'aval de l'élément de liaison du Modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P7

La Figure 56 présente les hydrogrammes de sortie du Modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P3 c'est-à-dire avec des pentes de l'élément de liaison (cours d'eau) de respectivement 0,1 m/m, 0,01 m/m et 0,001m/m. Cette variation de la pente engendre un retard du pic de crue à l'aval de l'élément de liaison par rapport au pic de crue amont de environ 1 jour pour les jeux de paramètres P1 et P2 et de 2 jours pour P3. Rappelons que le pas de temps journalier ne nous permet pas de savoir si la diminution de la pente engendre un retard du pic de crue à l'échelle horaire. Il est probable qu'à l'échelle horaire les pics de crue obtenus à l'aide des jeux de paramètres P1 et P2 ne soient pas synchrones.

Avec les jeux de paramètres P4 et P5, c'est-à-dire pour des valeurs de coefficient de Manning n de respectivement 0,6, 0,1 et 0,9, il apparait que l'augmentation du coefficient de Manning (frottement) engendre un ralentissement des écoulements sans décaler significativement la date d'occurrence du pic

de crue. Un jour de retard entre le pic de crue amont et l'ensemble des pics de crues aval est observé. Là aussi, le pas de temps journalier peut dissimuler un retard du pic de crue à des échelles de temps infra-journalière.

Avec les jeux de paramètres P6 et P7, c'est-à-dire pour des largeurs de cours d'eau (considéré rectangulaire) de respectivement 10m, 1m et 50m, le même effet que l'augmentation de coefficient de Manning est observé.

### Analyses statistiques

Les Figure 57 et Figure 58 présentent les corrélogrammes simples et les corrélogrammes croisés des débits simulés à l'exutoire du modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P7, pour l'année hydrologique HY1997. Le corrélogramme simple des débits simulés à l'amont de l'élément de liaison (i.e. à l'exutoire du sous-bassin A) est aussi représenté.

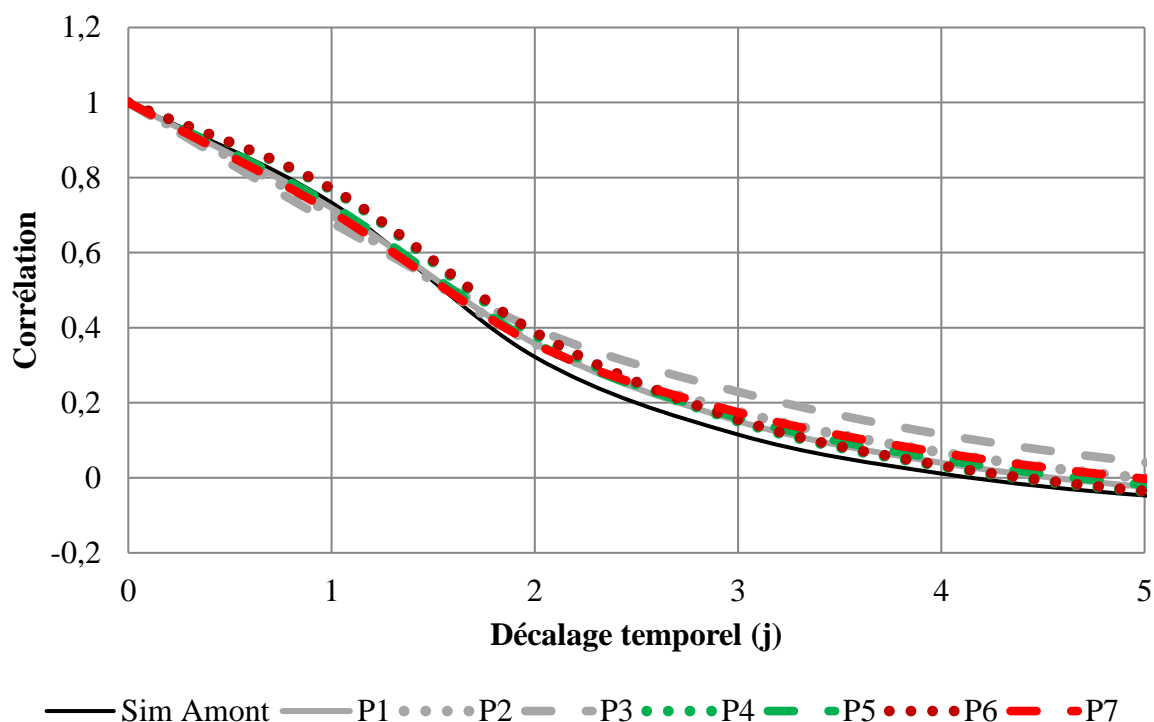


Figure 57 : Autocorrélogramme des débits simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P7 pour l'année hydrologique HY1997.

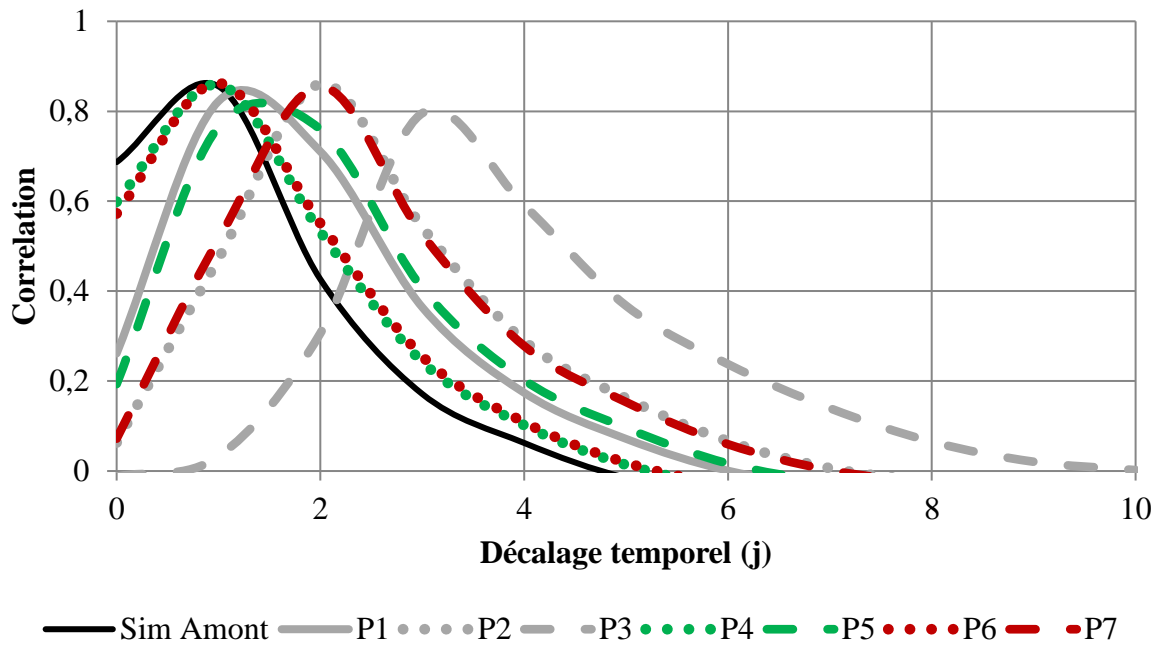


Figure 58 : Corrélogrammes croisés pluie/débit simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P7 pour l'année hydrologique HY1997.

### Analyse fréquentielle

Les Figure 59 et Figure 60 présentent respectivement les spectres d'amplitude des débits aval et les rapports de spectres aval/amont avec les jeux de paramètres P1 à P7, pour l'année hydrologique HY1997.

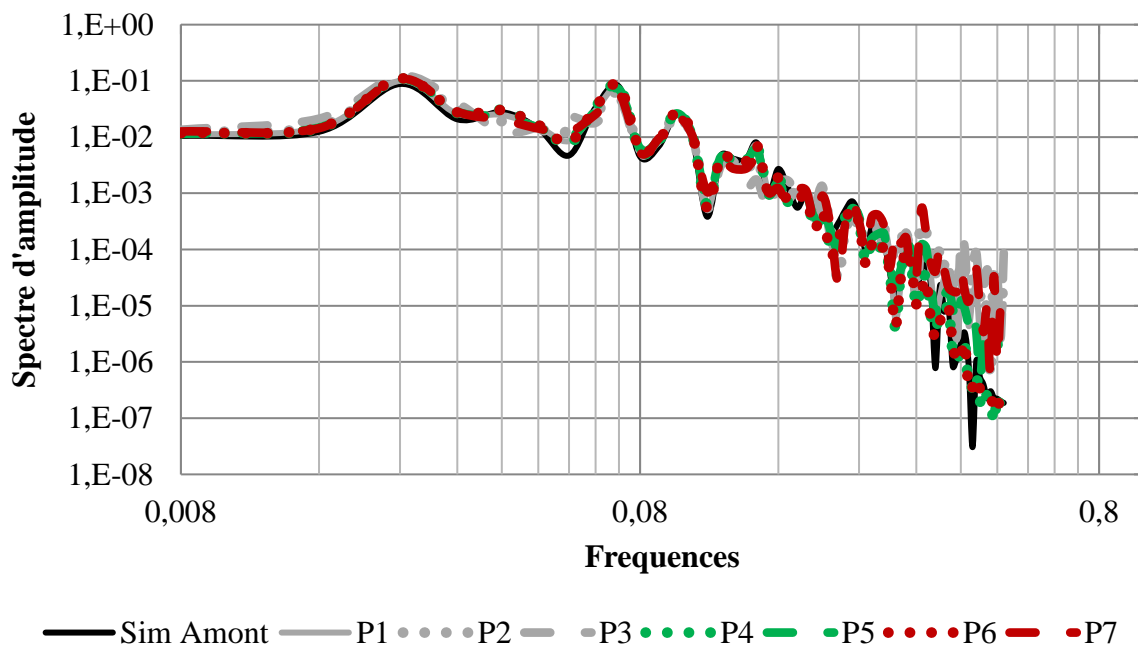


Figure 59 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres P1 à P3 pour l'année hydrologique HY1997.

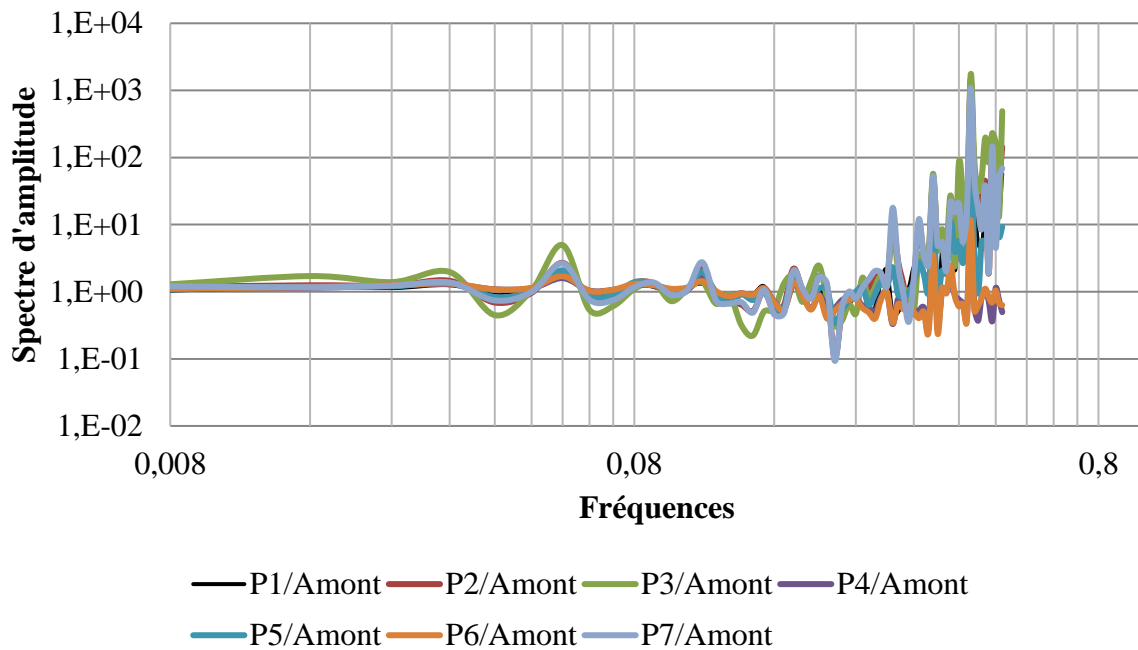


Figure 60 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval obtenu avec les paramètres P1 à P7, sur les débits amont calculés pour le jeu de paramètres P1 uniquement, sur l'année hydrologique HY 1997.

Afin de déterminer des apports ou des pertes entre deux points d'un cours d'eau nous proposons d'utiliser une méthode basée sur le rapport des spectres aval sur les spectres amont. Si le spectre d'amplitude résultant présente une pente négative, cela signifie qu'il y a un gain d'eau entre les deux points du cours d'eau ; si la pente est positive, cela signifie qu'il y a une perte d'eau entre les deux points. Deux approches sont testées : i) calcul du rapport du spectre des débits aval sur le spectre des débits amont, et ii) calcul du spectre du rapport de l'autocorrélation des débits avals sur l'autocorrélation des débits amonts. Les résultats obtenus sont sensiblement différents et donnent parfois lieu à des conclusions contradictoires (e.g. Figure 68).

### V.3.4.3. Modèle 3

#### Description du modèle

Le Modèle 3 est composé de 4 sous-bassins A, B, C et D identique reliés entre eux par des éléments de liaison (Reach), appliquant une fonction de transfert (Routing). Seul le sous-bassin A est alimenté par des précipitations. Le Modèle 3 est donc le Modèle 2 avec 3 éléments de liaison d'affilé en aval et un point de mesure à chacune des jonctions entre les éléments de liaison. La Figure 61 présente la représentation graphique du Modèle 3. Un unique jeu de paramètres est utilisé pour ce modèle.

Objectifs :

1. identifier les processus hydrodynamiques qui peuvent être mis en lumière à l'aide des analyses statistiques tels que l'autocorrélation, la corrélation croisée et l'analyse spectrale.
2. comparer les résultats d'analyses corrélatoire et spectrale selon la variable de sortie du système considérée (hauteur d'eau ou débit).

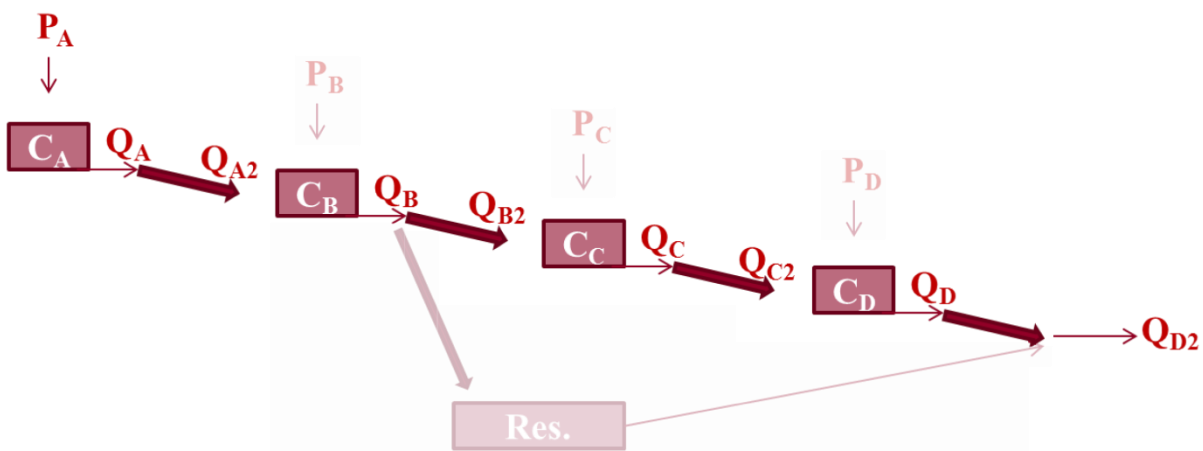


Figure 61 : Représentation schématique du modèle 3.

#### Paramétrisation

Tableau 20 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3.

<b>Loss Method:</b>		
	Initial Deficit (mm)	0
Deficit and Constant	Maximum Deficit (mm)	0
	Constant Rate (mm/h)	0,5
	Impervious (%)	0
<b>Transform Method:</b>		
Clark Unit Hydrograph	Time of Concentration (h)	24
	Storage Coefficient (h)	24
Length (km)		100
Slope (m/m)		0,1
Manning's n		0,6
Shape : Rectangle /Width (m)		10

## Hydrogrammes des différents sous-bassins

Les Figure 62 et Figure 63 présentent les hydrohyétogrammes de sorties du Modèles 3, entre le 16 décembre 1997 et le 26 décembre 1997 avec respectivement les débits et les hauteurs d'eau à l'exutoire du sous-bassin A et des 4 éléments de liaison.

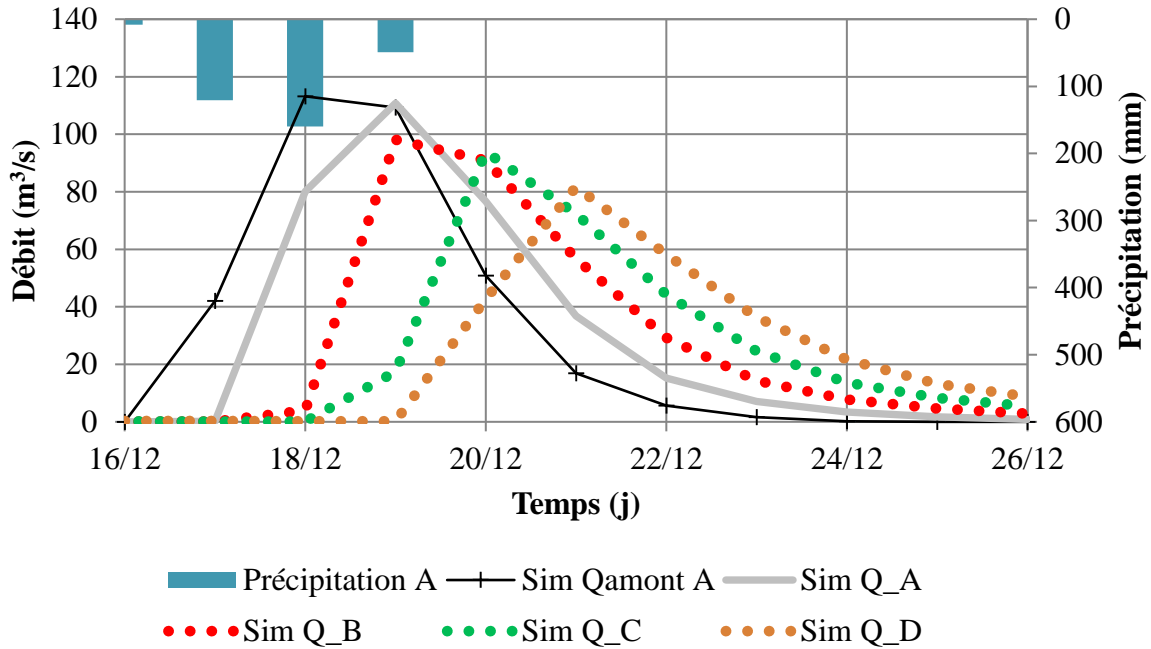


Figure 62 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 3 à l'exutoire du sous-bassin A et des 4 éléments de liaison.

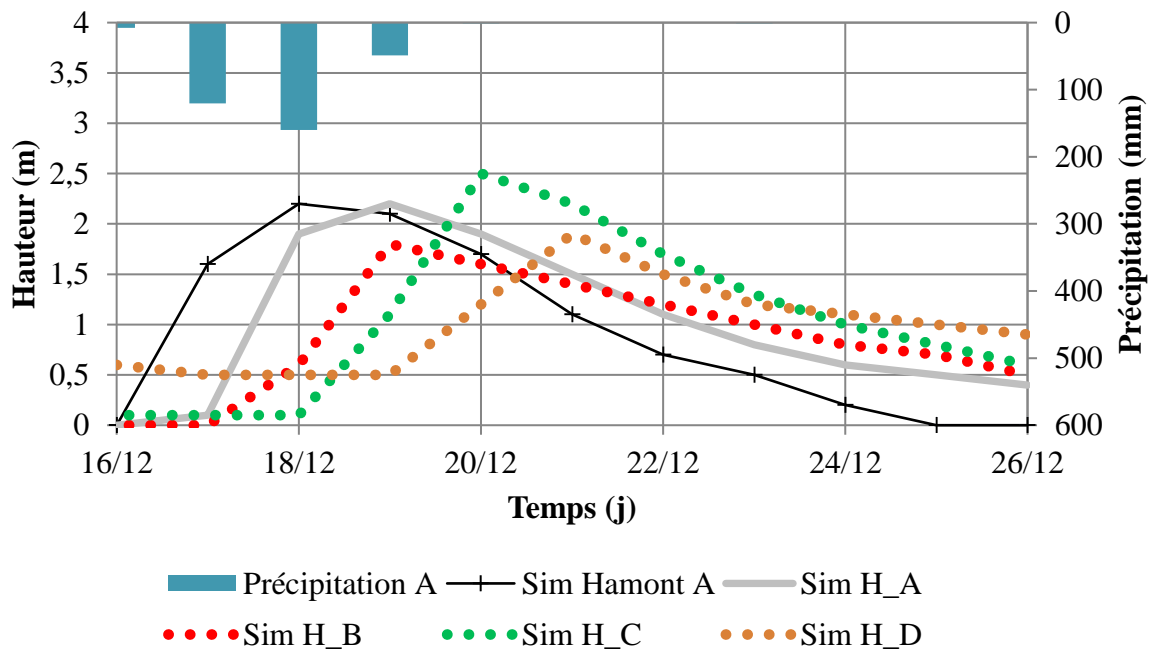


Figure 63 : Hydrohyétogrammes des Hauteur d'eau simulées par le Modèles 3 à l'exutoire du sous-bassin A et des 4 éléments de liaison.

## Analyses statistiques

Les Figure 64 et Figure 65 présentent les autocorrélations respectivement sur les débits et sur les hauteurs d'eau des 5 points de mesure d'amont en aval pour l'année hydrologique HY 1997.

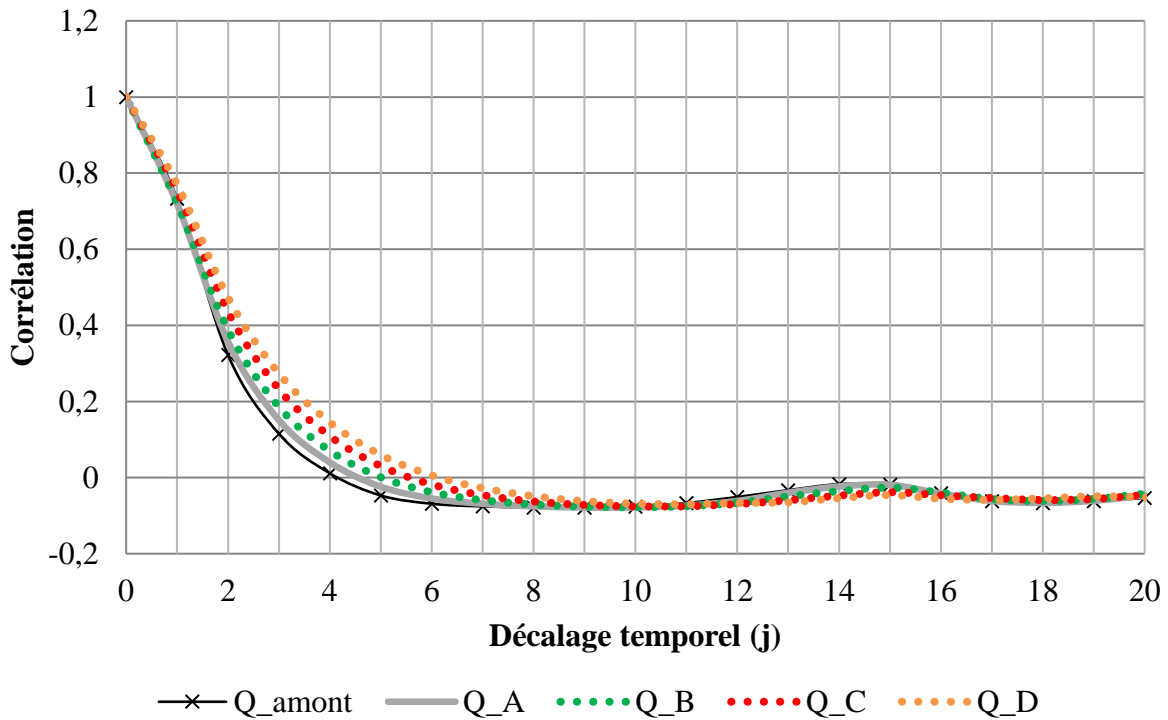


Figure 64 : Autocorrélation des débits mesurés aux 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

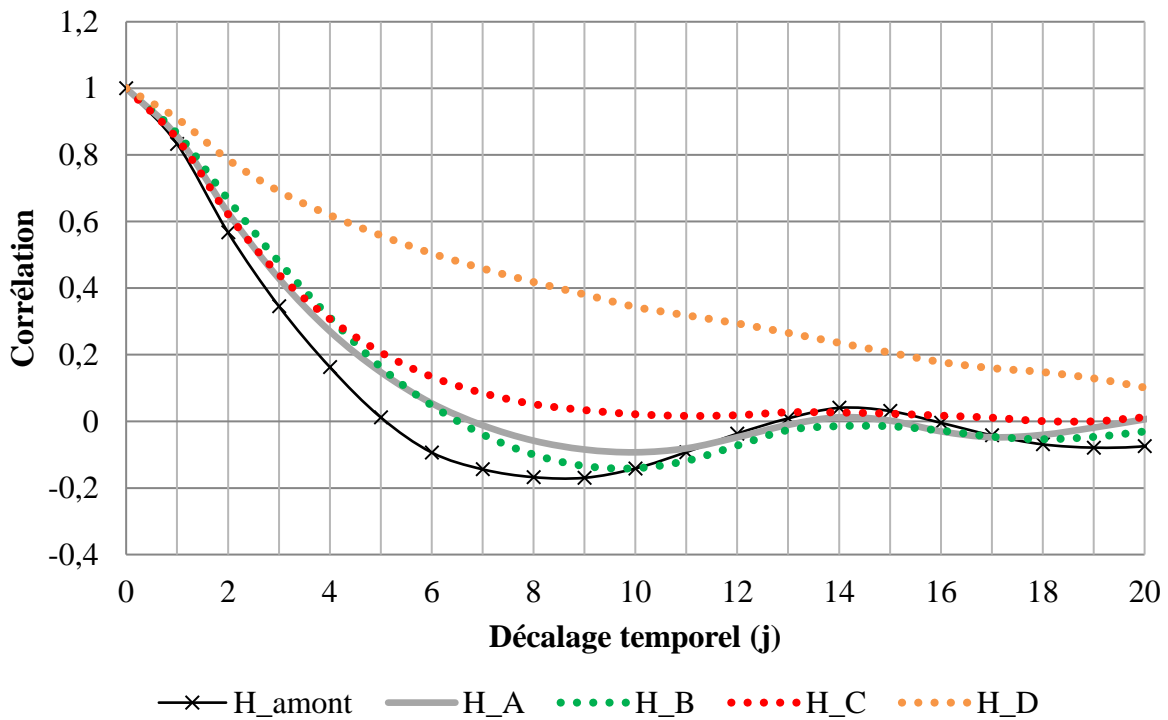


Figure 65 : Autocorrélation des hauteurs mesurées aux 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

Les Figure 66 et Figure 67 présentent les autocorrélations respectivement sur les débits et sur les hauteurs d'eau des 5 points de mesure d'amont en aval pour l'année hydrologique HY 1997.

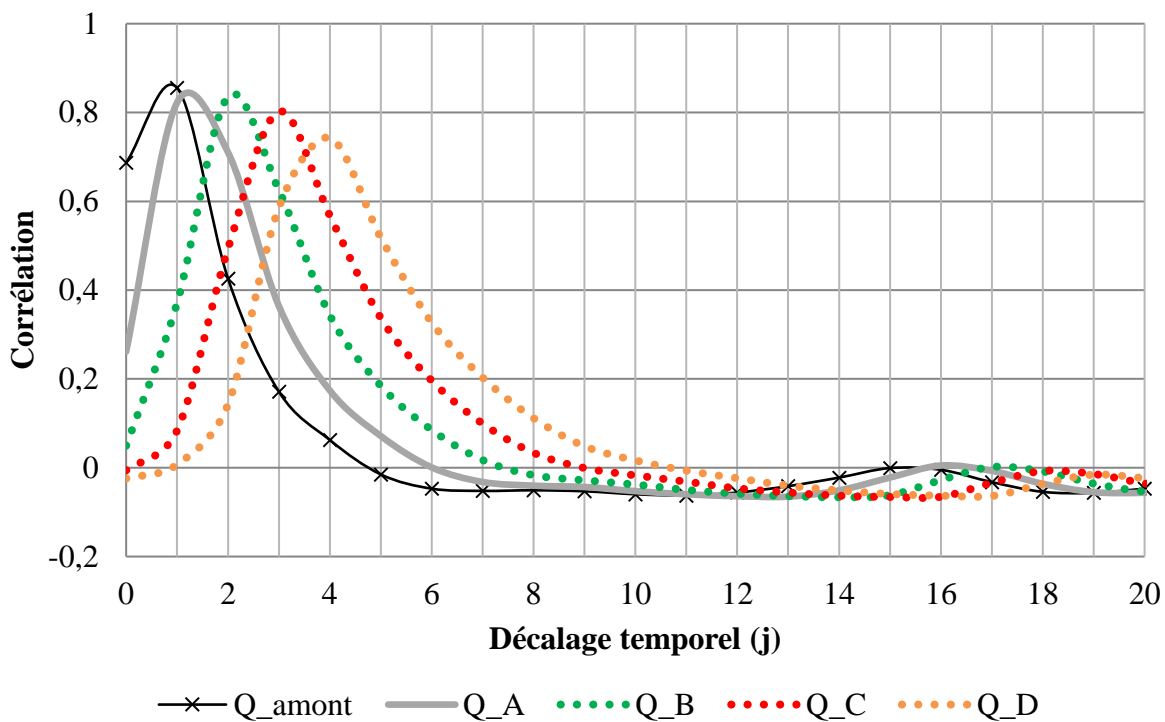


Figure 66 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

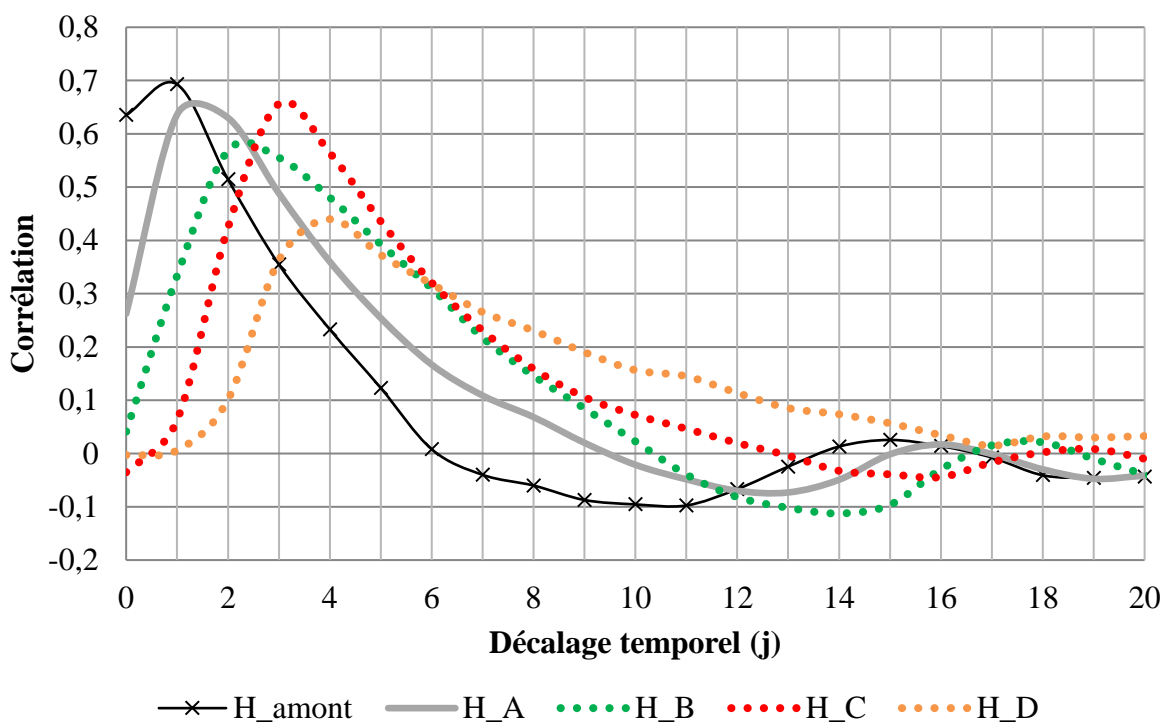


Figure 67 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les hauteurs mesurées à chacune des 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.



Pour les analyses corrélatoires simples, il apparaît que l'utilisation du débit comme variable de sortie permet de retrouver les inerties des sous-systèmes imbriqués. Les 4 sous-systèmes étant identiques et placés à la suite, l'inertie de chacun des systèmes d'amont en aval est supposée croître de manière régulière. En revanche l'inertie estimée à partir des résultats de corrélation simple basée sur la hauteur d'eau n'est pas cohérente avec la structure du modèle 3.

Pour les analyses corrélatoires croisées, il apparaît que l'utilisation du débit comme des hauteurs d'eau permettent d'estimer un temps de réponse entre les précipitations en A et les débits à chacun des exutoires des sous-systèmes cohérent avec les paramètres du modèle 3. Cependant les valeurs de corrélation obtenues avec les hauteurs d'eau semblent indiquer des résultats moins fiables qu'avec les débits.

Il ressort de ces analyses corrélatoires que l'utilisation des hauteurs d'eau comme variable de sortie n'est pas adapté à l'utilisation des analyses corrélatoires. Dans la mesure où les analyses spectrales découlent d'analyses corrélatoires, seules seront présentées dans la suite les analyses spectrales issues des données de débit.

### Analyse fréquentielle

Les Figure 68 et Figure 69 présentent respectivement les spectres d'amplitude des débits et les rapports de spectres aval/amont de chacun des tronçons, pour l'année hydrologique HY1997.

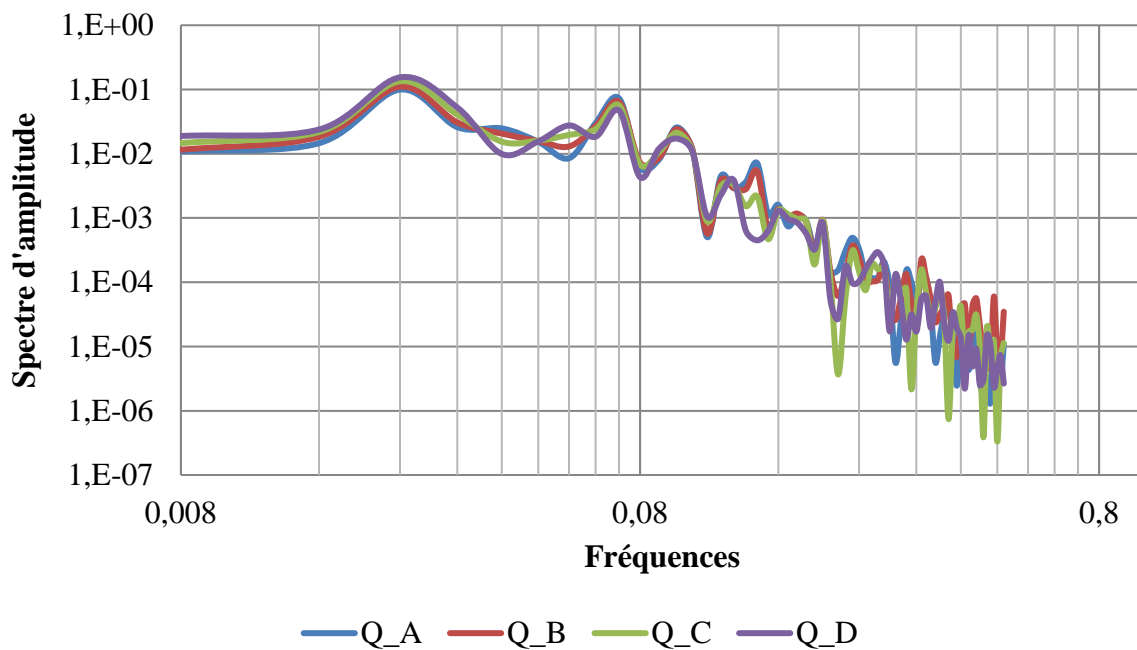


Figure 68 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 3 pour l'année hydrologique HY1997.

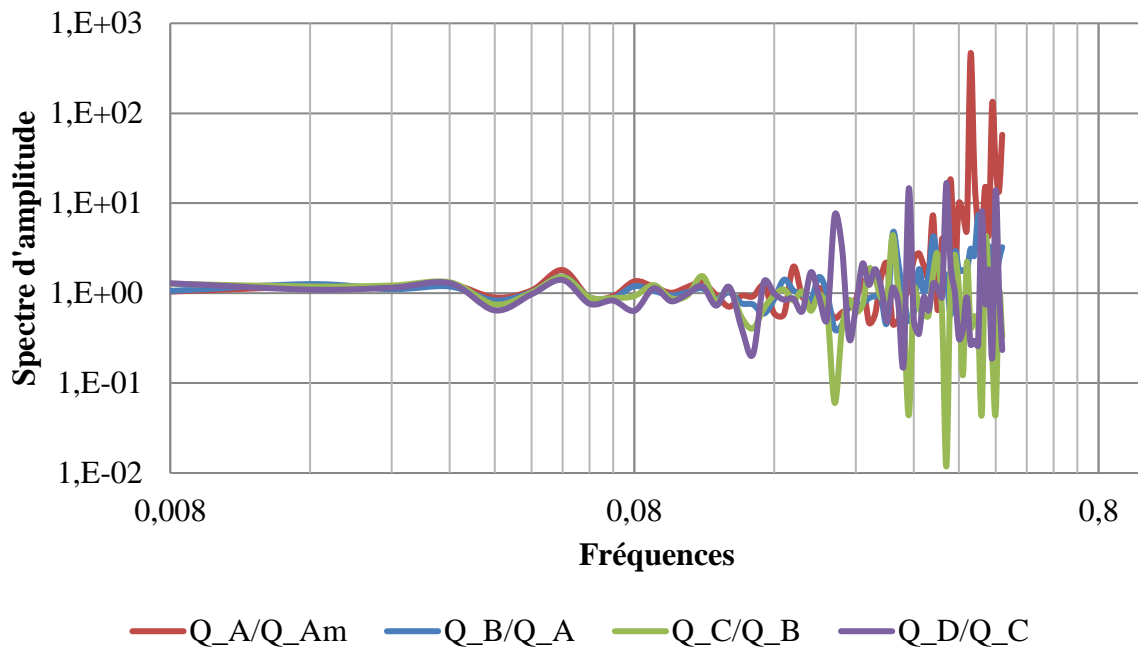


Figure 69 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.

#### V.3.4.4. Modèle 4

##### Description du modèle

Le Modèle 4 présente la même structure que le Modèle 3, à la différence que chacun des sous-bassins est aussi alimenté par des précipitations. La Figure 70 présente la représentation graphique du Modèle 4. Un unique jeu de paramètres est utilisé pour ce modèle.

Objectif : identifier les processus hydrodynamiques qui peuvent être mis en lumière à l'aide des analyses statistiques tels que l'autocorrélation, la corrélation croisée et l'analyse spectrale.

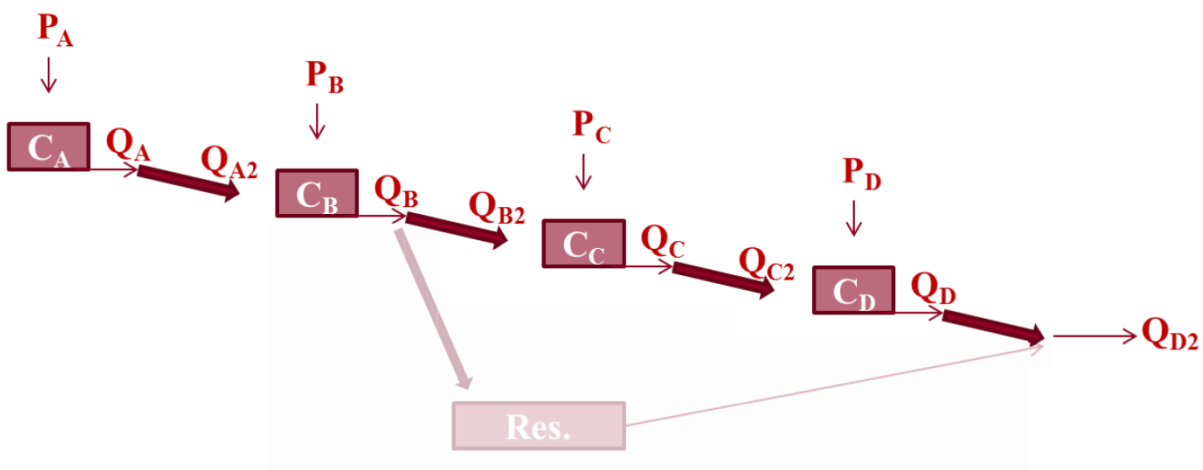


Figure 70 : Représentation schématique du modèle 4.

##### Paramétrisation

Tableau 21 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3.

<b>Loss Method:</b>		
Deficit and Constant	Initial Deficit (mm)	0
	Maximum Deficit (mm)	0
	Constant Rate (mm/h)	0,5
	Impervious (%)	0
<b>Transform Method:</b>		
Clark Unit Hydrograph	Time of Concentration (h)	24
	Storage Coefficient (h)	24
Length (km)		100
Slope (m/m)		0,1
Manning's n		0,6
Shape : Rectangle /Width (m)		10

### Hydrogrammes des différents sous-bassins

La Figure 71 présente les hydrohyétogrammes des débits du Modèles 4, mesurés à la sortie de chacun des sous-bassins, entre le 16 décembre 1997 et le 26 décembre 1997.

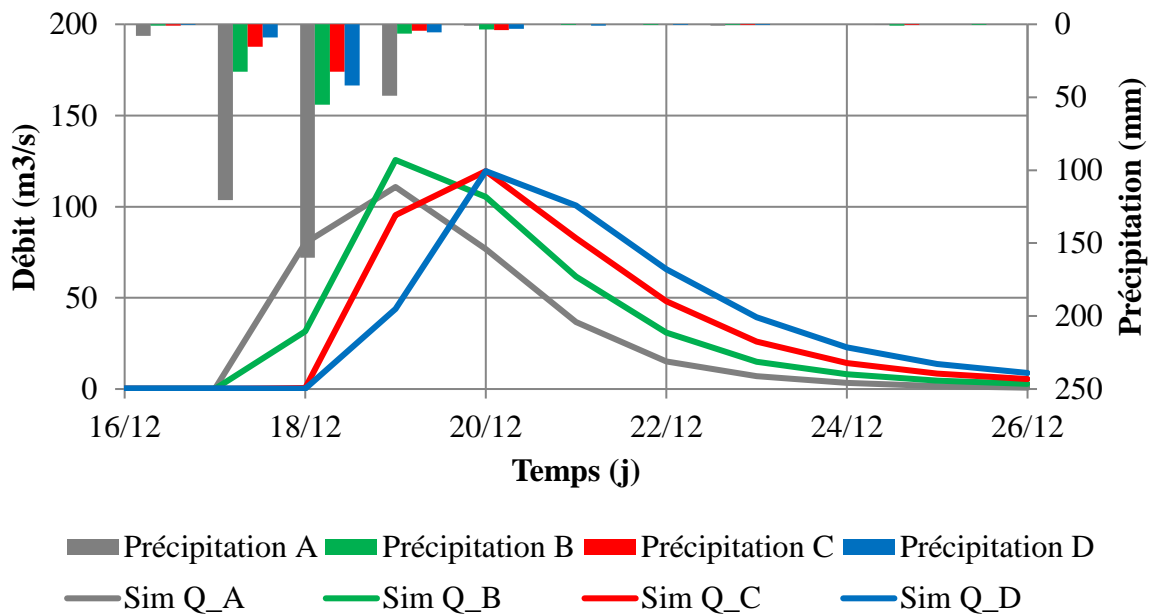


Figure 71 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 4 à l'exutoire des 4 sous-bassins.

### Analyses statistiques

Les Figure 72 et Figure 73 présentent respectivement les autocorrélations des débits mesurés sur chacun des sous-bassins, et les corrélations croisées entre les pluies en A et les débits aux exutoires de chacun des sous-bassins, pour l'année hydrologique HY 1997.

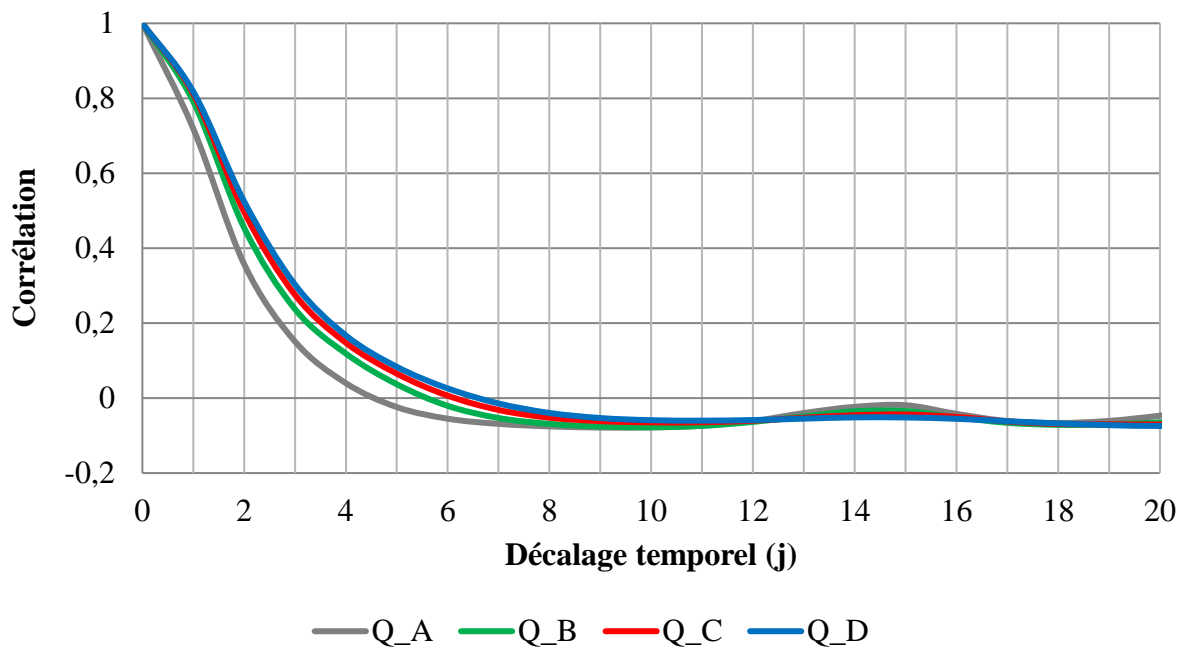


Figure 72 : Autocorrélation des débits mesurés aux 4 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

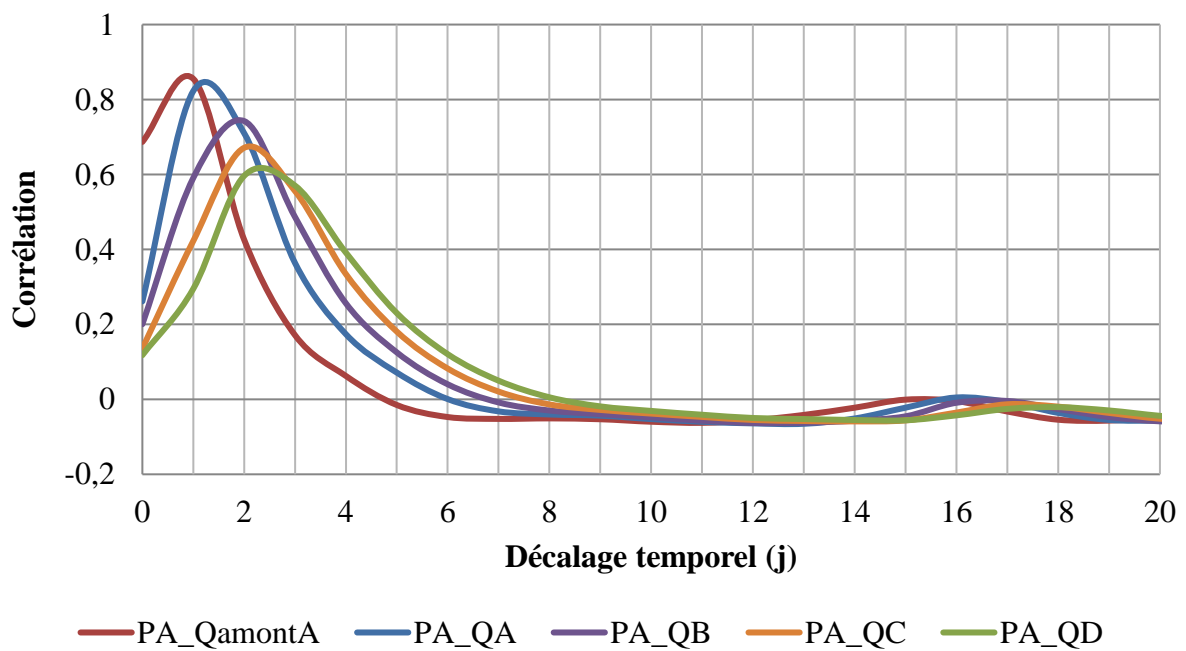


Figure 73 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 5 stations, pour de l'année hydrologique HY1997.

### Analyse fréquentielle

Les Figure 74 et Figure 75 présentent respectivement les spectres d'amplitude des débits et les rapports de spectres aval/amont de chacun des tronçons, pour l'année hydrologique HY1997.

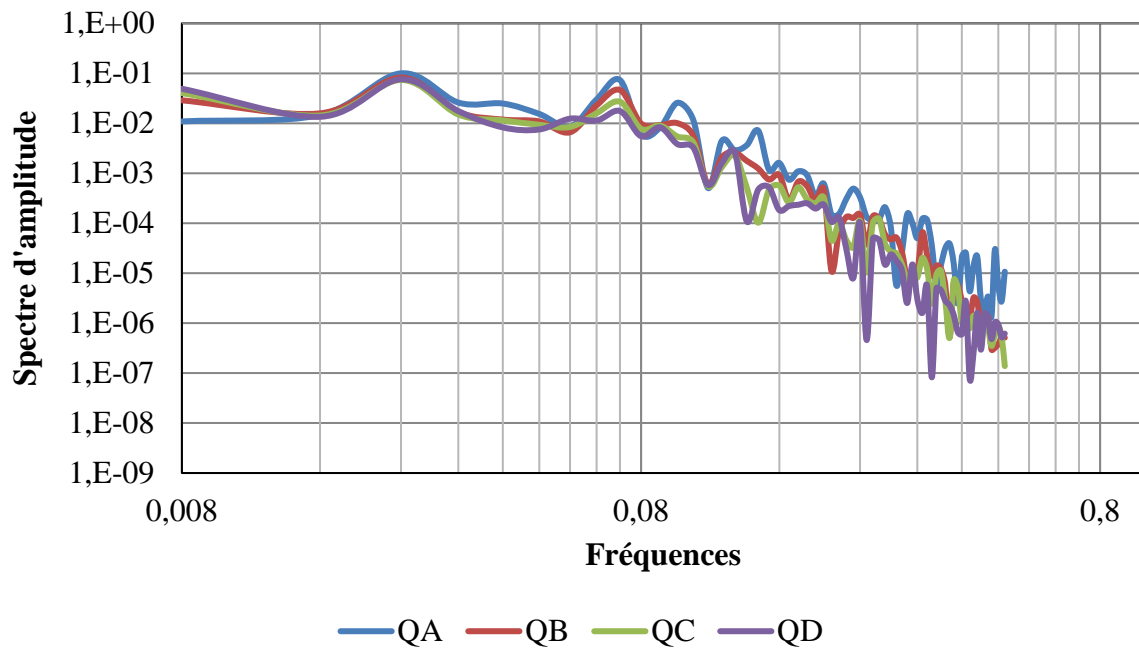


Figure 74 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 4 pour l'année hydrologique HY1997.

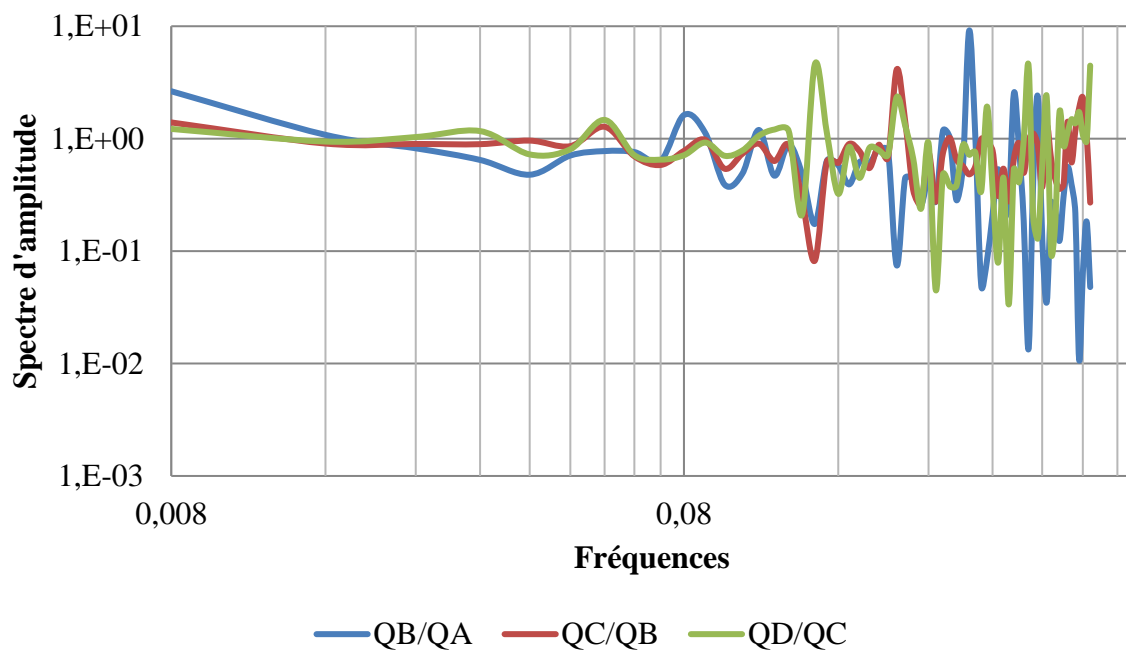


Figure 75 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.

#### V.3.4.5. Modèle 5

#### Description du modèle

Le Modèle 5 est conçu sur la même base que le modèle 3 avec une partie du débit à l'exutoire du sous-bassin B qui est déviée vers un réservoir (pouvant représenter un compartiment karstique) selon l'équation (Équation 1). Le réservoir se remplit et le débit est restitué au réseau principal au niveau de l'exutoire D en fonction du remplissage du réservoir selon l'équation (Équation 2). Seul le bassin A est alimenté par des précipitations. La Figure 76 présente la représentation graphique du Modèle 5. Un unique jeu de paramètres est utilisé pour ce modèle.

Objectif : identifier les processus hydrodynamiques qui peuvent être mis en lumière à l'aide des analyses statistiques tels que l'autocorrélation, la corrélation croisée et l'analyse spectrale, en suivant la propagation du débit d'amont en aval sur un système connu.

Équation 1 :

$$Q_{B_{div}} = \frac{100}{1 + 1000e^{-0.1Q_B}}$$

Équation 2 :

$$Q_{B_{div}} = \frac{30}{1 + 1000e^{-0.25Q_B}}$$

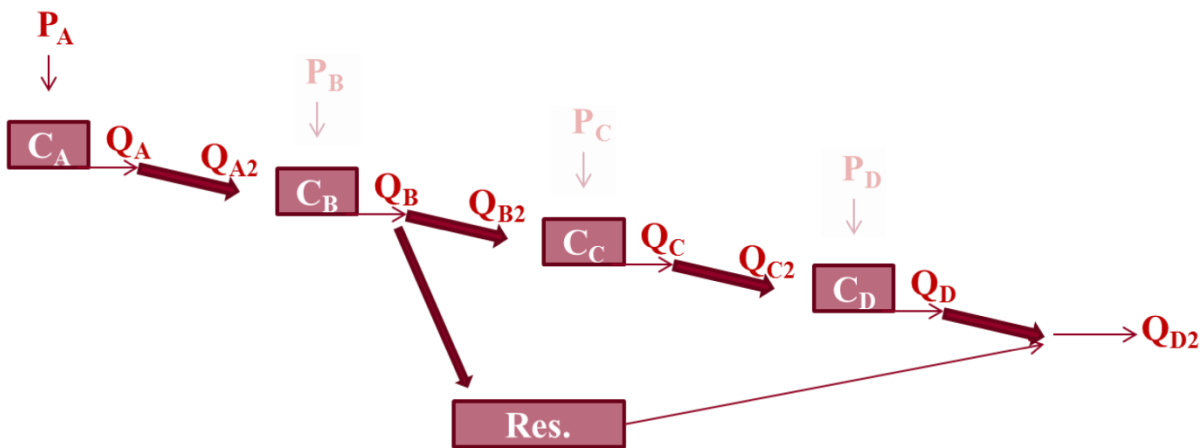


Figure 76 : Représentation schématique du modèle 5.

## Paramétrisation

Tableau 22 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3.

<b>Loss Method:</b>		
	Initial Deficit (mm)	0
Deficit and Constant	Maximum Deficit (mm)	0
	Constant Rate (mm/h)	0,5
	Impervious (%)	0
<b>Transform Method:</b>		
Clark Unit Hydrograph	Time of Concentration (h)	24
	Storage Coefficient (h)	24
Length (km)		100

<i>Slope</i> (m/m)	0,1
<i>Manning's n</i>	0,6
<i>Shape : Rectangle /Width</i> (m)	10

### Hydrogrammes des différents sous-bassins

La Figure 77 présente les hydrohyétogrammes des débits du Modèles 5, mesuré à la sortie de chacun des sous-bassins et à l'entrée et à la sortie du réservoir, entre le 16 décembre 1997 et le 26 décembre 1997.

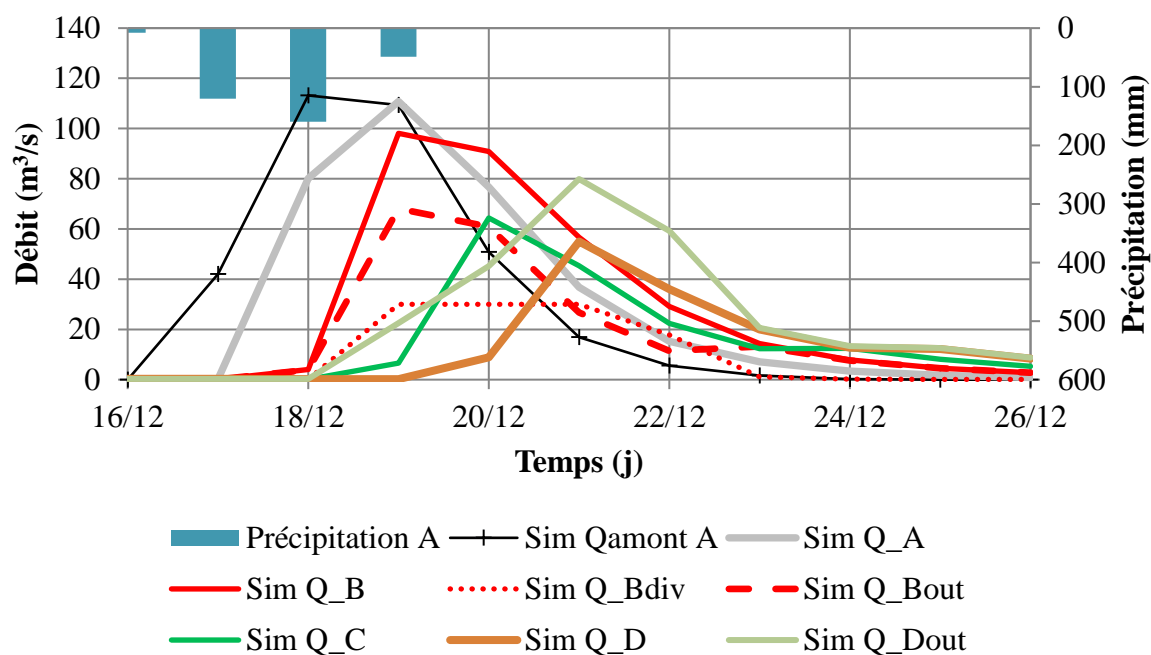


Figure 77 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 5.

### Analyses statistiques

Les Figure 78 et Figure 79 présentent respectivement les autocorrélations des débits mesurés sur chacun des sous-bassins, et les corrélations croisées entre les pluies en A et les débits aux exutoires de chacun des sous-bassins, pour l'année hydrologique HY 1997.

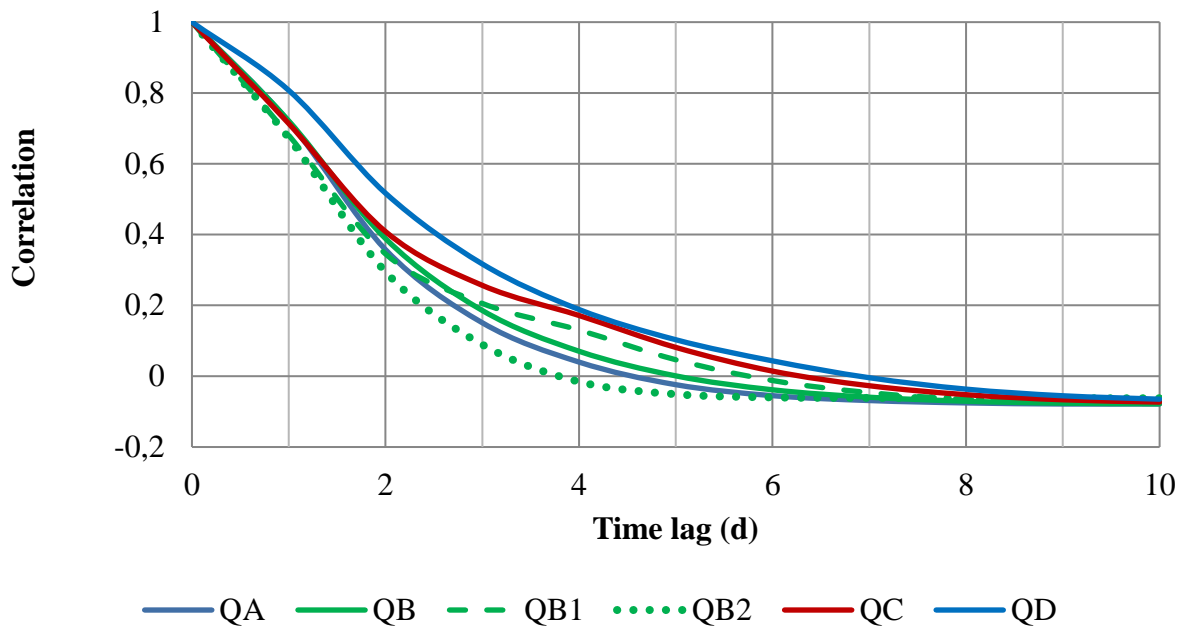


Figure 78 : Autocorrélation des débits mesurés aux 6 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

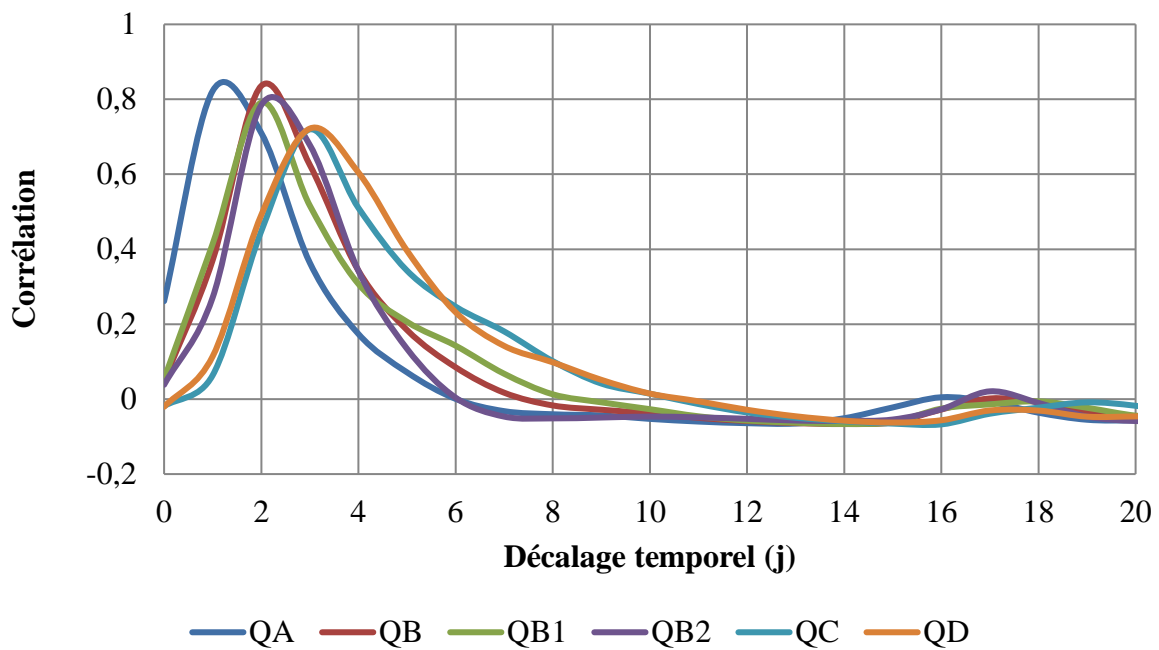


Figure 79 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 6 stations, pour de l'année hydrologique HY1997.

### Analyse fréquentielle

Les Figure 80 et Figure 81 présentent respectivement les spectres d'amplitude des débits et les rapports de spectres aval/amont de chacun des tronçons, pour l'année hydrologique HY1997.



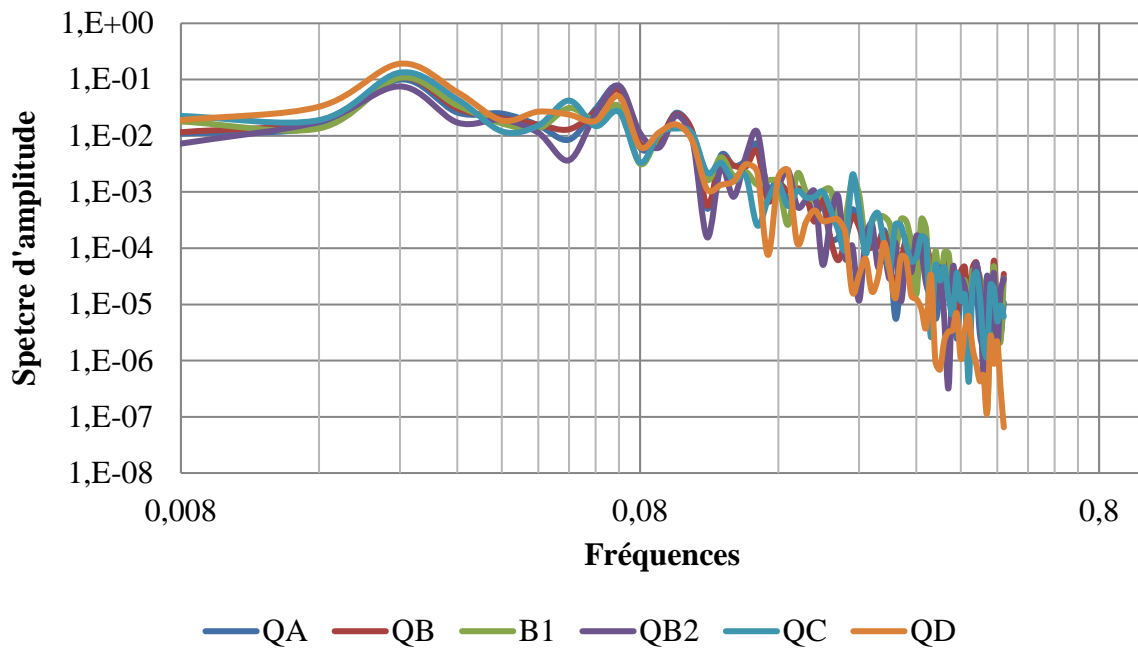


Figure 80 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 5 pour l'année hydrologique HY1997.

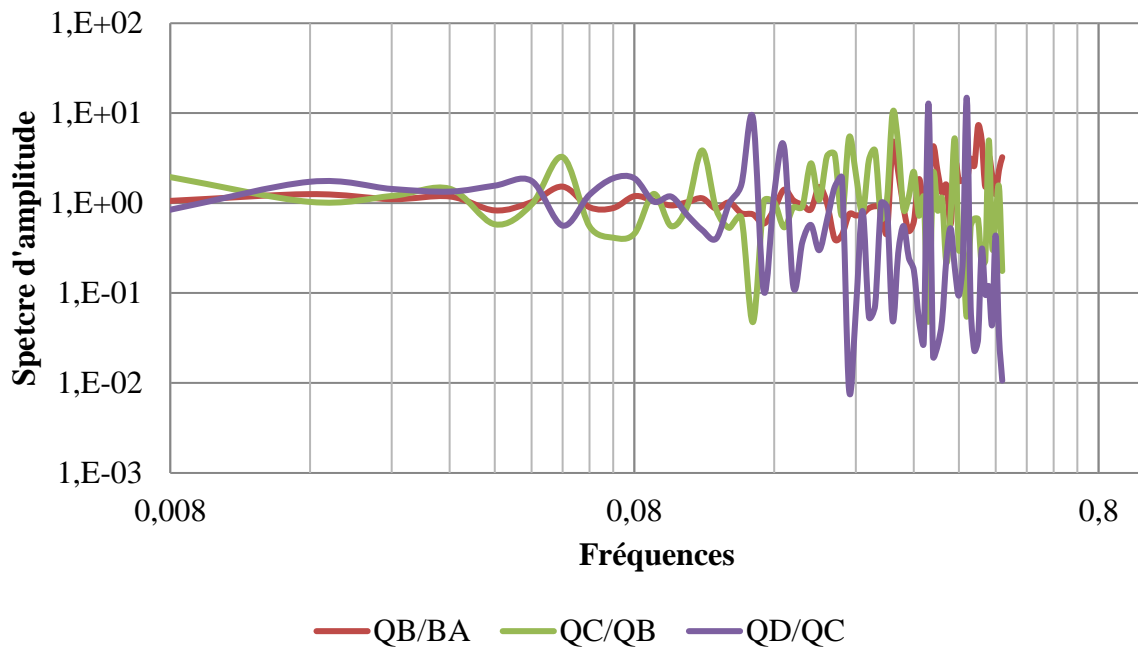


Figure 81 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.

### V.3.4.6. Modèle 6

#### Description du modèle

Le Modèle suivant présente la même structure que le modèle 5 mais chacun des sous-bassins est alimenté par des précipitations différentes. Comme pour le modèle 5, une partie du débit à l'exutoire du sous-bassin B est déviée vers un réservoir (pouvant représenter un compartiment karstique) selon l'équation (Équation 1). Le réservoir se remplit et le débit est restitué au réseau principal au niveau de l'exutoire D en fonction du remplissage du réservoir selon l'équation (Équation 2). La Figure 82 présente la représentation graphique du Modèle 5. Un unique jeu de paramètres est utilisé pour ce modèle.

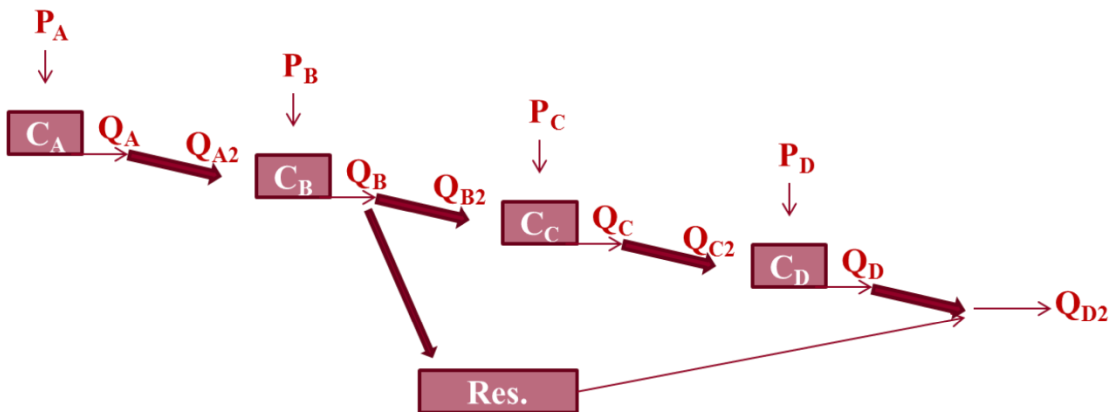


Figure 82 : Représentation schématique du modèle 6.

#### Paramétrisation

Tableau 23 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3.

<b>Loss Method:</b>		
	Initial Deficit (mm)	0
Deficit and Constant	Maximum Deficit (mm)	0
	Constant Rate (mm/h)	0,5
	Impervious (%)	0
<b>Transform Method:</b>		
Clark Unit Hydrograph	Time of Concentration (h)	24
	Storage Coefficient (h)	24
Length (km)		100
Slope (m/m)		0,1
Manning's n		0,6
Shape : Rectangle /Width (m)		10

## Hydrogrammes des différents sous-bassins

La Figure 83 présente les hydrohyétogrammes des débits du Modèles 6, mesuré à la sortie de chacun des sous-bassins et à l'entrée et à la sortie du réservoir, entre le 16 décembre 1997 et le 26 décembre 1997.

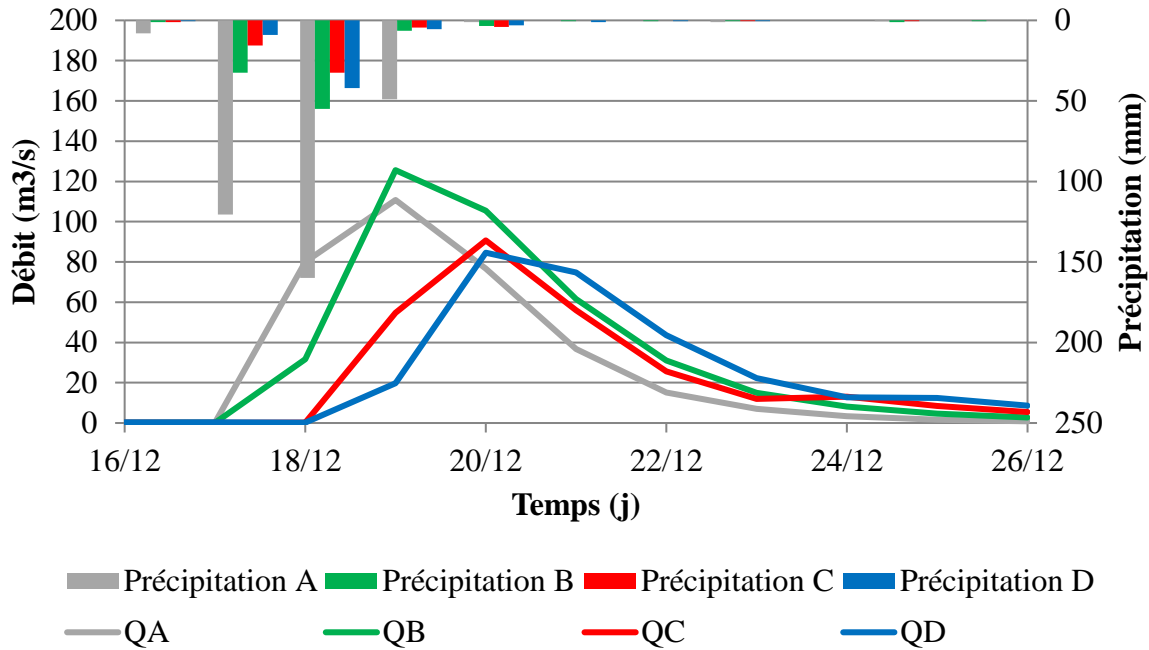


Figure 83 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 6 à l'exutoire des 4 sous-bassins.

## Analyses statistiques

Les Figure 84 et Figure 85 présentent respectivement les autocorrélations des débits mesurés sur chacun des sous-bassins, et les corrélations croisées entre les pluies en A et les débits aux exutoires de chacun des sous-bassins, pour l'année hydrologique HY 1997.

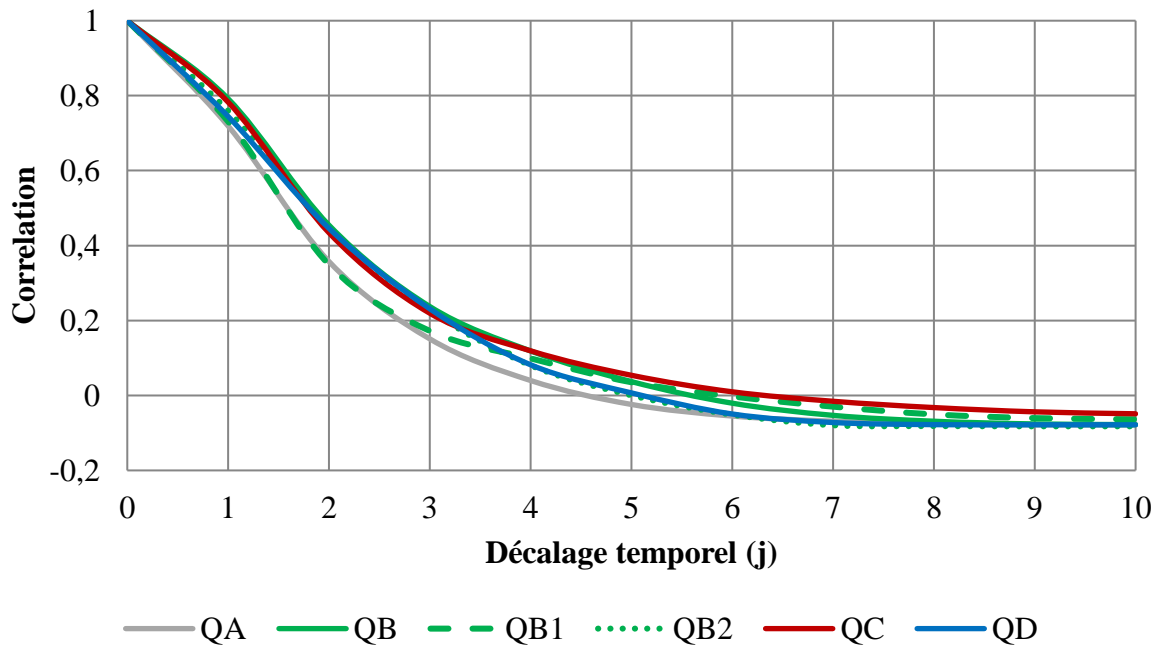


Figure 84 : Autocorrélation des débits mesurés aux 6 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.

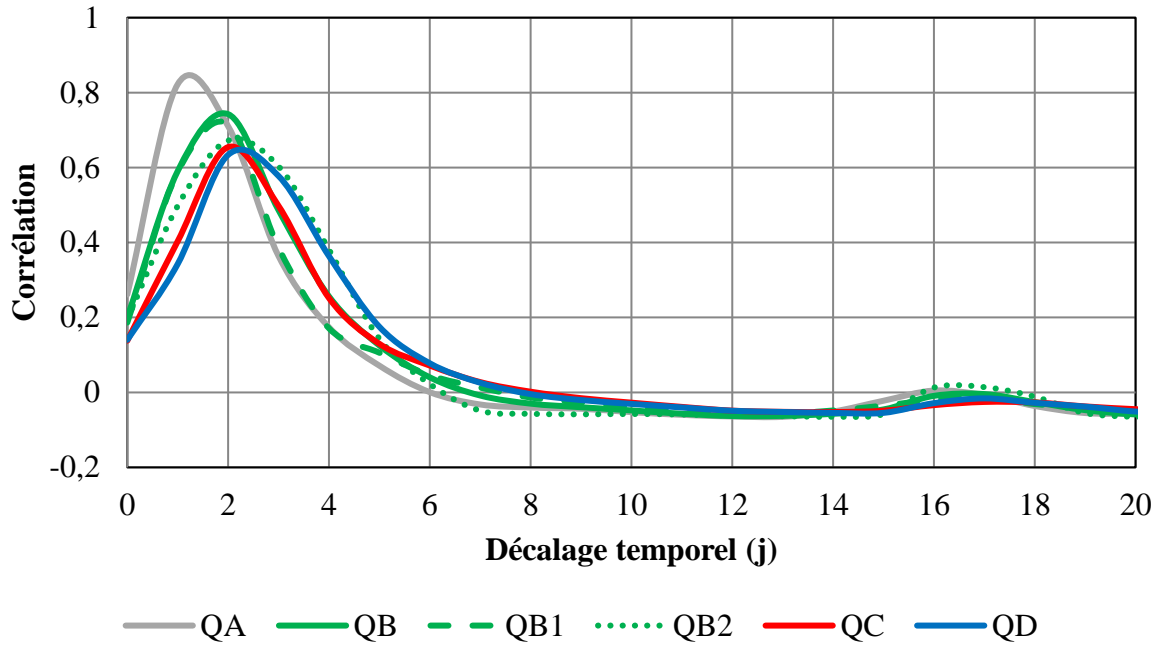


Figure 85 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 6 stations, pour de l'année hydrologique HY1997.

### Analyse fréquentielle

Les Figure 86 et Figure 87 présentent respectivement les spectres d'amplitude des débits et les rapports de spectres aval/amont de chacun des tronçons, pour l'année hydrologique HY1997.

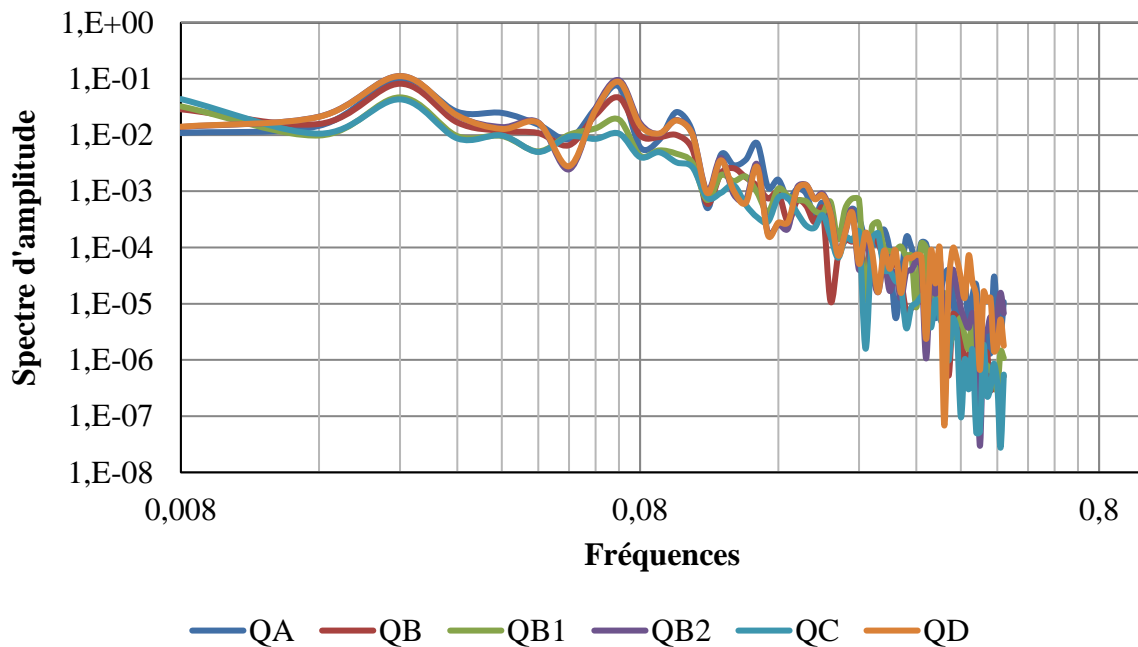
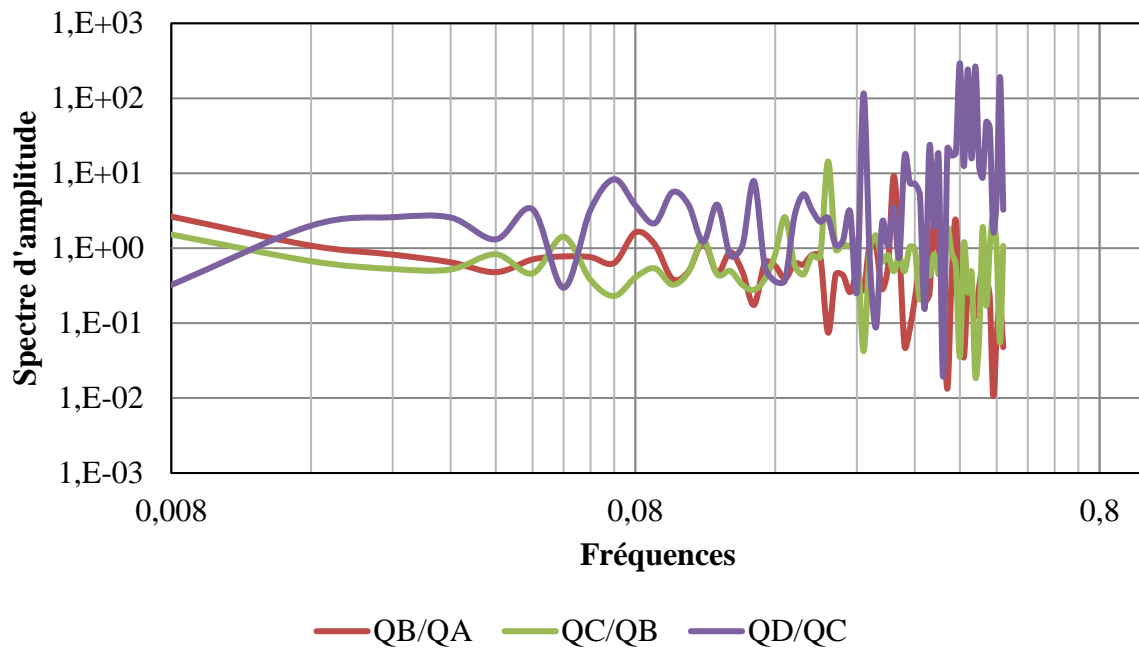


Figure 86 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 5 pour l'année hydrologique HY1997.



*Figure 87 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.*

## Conclusion

Cette partie avait pour objectif de présenter les analyses réalisées pour évaluer si les pertes intervenant le long du linéaire de la rivière Cèze se retrouvent intégralement dans le débit de la Cèze à la sortie du plateau de Méjannes-le-Clap, ou si une partie notable de cette eau est déviée vers un autre exutoire encore plus à l'aval de la rivière Cèze.

Pour cela, une méthode originale a été proposée croisant l'analyse des systèmes et les analyses corrélatoires et spectrales [Mangin, 1975]. Cette méthode s'inspire de la modélisation des systèmes en automatique et repose sur l'hypothèse suivante : il est possible de détecter sur le spectre d'un signal si ce dernier est issu d'un processus intégrateur (additions des pluies et conversion en débit dans une rivière) ou d'un processus dérivateur (perte, c'est-à-dire soustraction d'un débit à la rivière). Cependant les premiers résultats n'ont pas été à la hauteur de nos espérances et ont été difficiles à analyser. De ce fait, afin d'acquérir les clés de lecture des spectres ainsi obtenus, nous avons envisagé de revenir à un bassin hydrologique plus simple ne possédant pas d'inconnue ni d'erreur de mesure : un bassin théorique simulé. Ce bassin simulé nous a servi de « bassin pilote » afin de parvenir à établir les liens entre les propriétés du bassin étudié et les sorties des modèles systémiques issus de l'automatique.

Malheureusement, les différents modèles de bassins virtuels proposés n'ont pas permis de pouvoir diagnostiquer clairement sur les figures à quelle station du linéaire de la rivière intervenaient les pertes et où elles réapparaissaient. Deux explications sont proposées : d'une part nous avons utilisé des précipitations réelles et différentes pour chaque station (donc fortement différentes compte tenu de la caractéristique hétérogène des précipitations cévenoles), les spectres sont donc potentiellement différents et difficiles à comparer d'amont vers l'aval ; d'autre part, pour n'avoir qu'un type de comportement de bassin, nous nous sommes limités à un événement de crue, mais ceci a aussi induit une dépendance des pluies. Il aurait peut-être fallu appliquer des pluies purement aléatoires et uniformes dans un premier temps pour interpréter les graphiques obtenus.

Au-delà de ces questions techniques qui nécessitent d'être mieux calibrées et comparées à un autre aquifère mixte imperméable/karstique, il convient de s'interroger sur la possibilité de mesurer ces apports d'eau sur des signaux de crue. En effet lorsque le débit de la rivière atteint plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/s, les apports provenant de pertes diffuses, non visibles directement dans le cours d'eau, ne peuvent qu'être mineures et donc indétectables sur les signaux.

Il ressort des analyses corrélatoires que l'utilisation des hauteurs d'eau comme variable de sortie n'est pas adapté à leur utilisation.

Malgré ces inconvénients, on retiendra cependant l'intérêt de la démarche développée dans cette partie en particulier pour identifier les variables et paramètres clé pour une autre démarche de modélisation de type « réservoirs » à savoir :

- l'état initial (déficit initial et maximal) de ces réservoirs représentant les apports (précipitations, eaux du karst), les pertes par infiltration, la rivière, les sous bassins versants
- le coefficient de stockage des réservoirs, leur pouvoir tampon ou inertie
- le temps de concentration des sous bassins versant
- le pourcentage de surfaces imperméables du bassin
- les éléments de liaison ou tronçon de cours d'eau entre sous-bassins fonction de transfert

La démarche qui consiste à élaborer différents modèles de complexité progressive est également à retenir.





# PARTIE VI

## -

## Croisement des méthodes

Personnes directement impliquées dans cette action :

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

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

### VI.1. Synthèse des complémentarités entre les différentes méthodes

Le croisement des méthodes reprend les éléments de la thèse de Chapuis [2017]. Le croisement des méthodes fait également référence à la caractérisation Radon de la Cèze qui a fait l'objet d'un rapport présenté indépendamment (Fiche Radon pilotée par l'Univ. Avignon (A. Mayer) et le CEREGE Aix-en-Pce (O. Radakovitch)). Les résultats obtenus à l'aide des différentes approches mises en pratique sur la zone d'étude ont toutes contribué à apporter des informations sur les échanges entre le karst et la rivière. Chacune des méthodes ne permet pas à elle seule d'obtenir la totalité des informations souhaitées. Néanmoins l'association de plusieurs méthodes permet d'atteindre l'objectif. Les complémentarités entre chaque méthode sont synthétisées dans le Tableau 24.

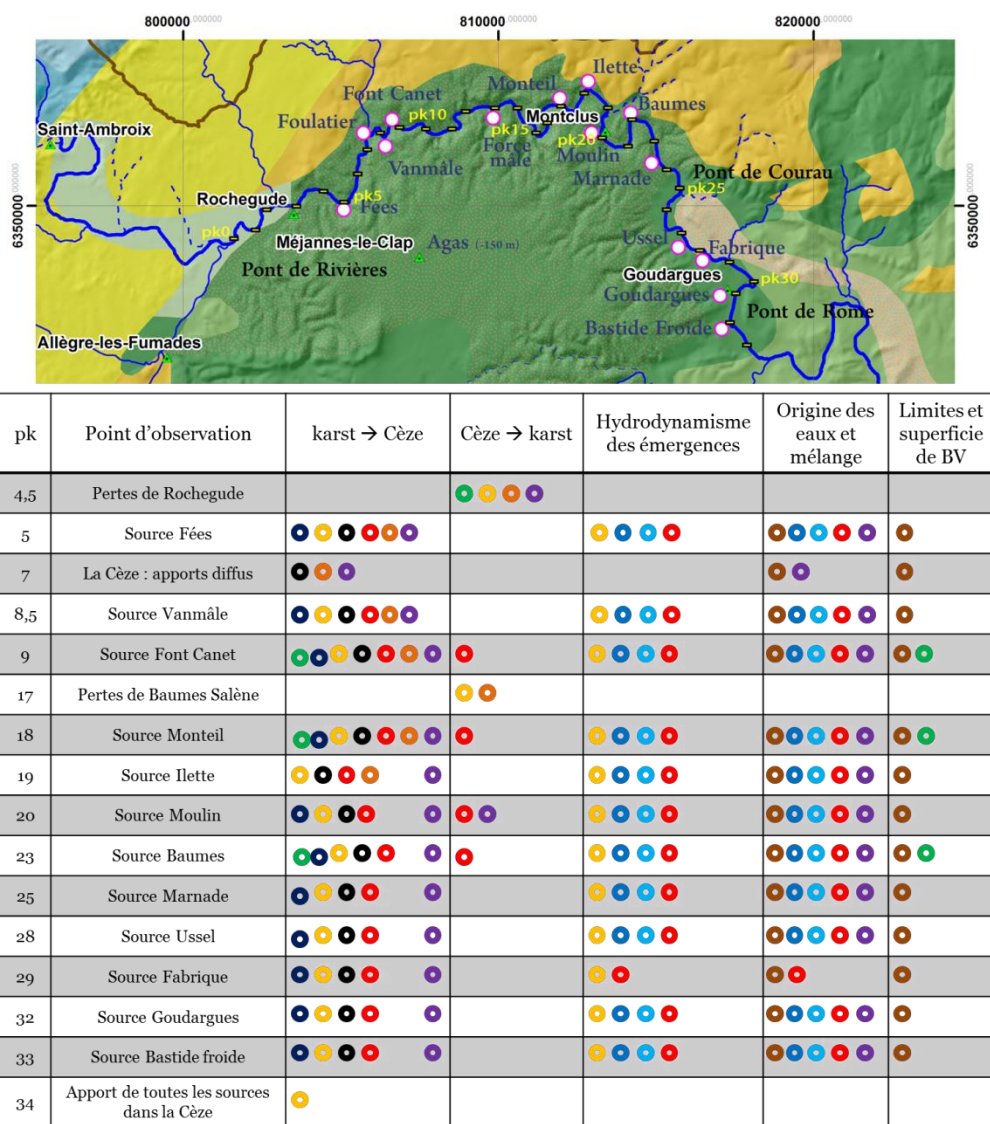
Tableau 24 : Utilité des méthodes d'analyse pour déterminer les échanges entre le karst et la rivière

Approches	Utilité pour la caractérisation des échanges entre karst et rivière	Exemples de recoupements et complémentarités de résultats entre différentes approches
<b>Thermie et profil longitudinal de conductivité</b>	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 ?
<b>Biologie</b>	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
<b>Géochimie (ions majeurs)</b>	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
<b>Traçages artificiels</b>	Relations entre aires d'alimentations/sources et relations entre pertes/sources	Compatibilité avec l'agencement des formations géologiques
<b>Géologie</b>	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
<b>Hydrologie et météorologie</b>	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
<b>Modélisation</b>	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 météorologique)

L'étude géologique est complémentaire de l'investigation par traçages artificiels et constitue un préalable indispensable. En effet, la géologie donne des informations sur de potentielles circulations des eaux souterraines à l'échelle locale et régionale. À l'échelle locale, les traçages artificiels peuvent être une solution pour localiser les communications hydrauliques entre les aires d'alimentation et la rivière et déduire le trajet de circulation des eaux souterraines.

Les profils longitudinaux et les données thermiques obtenues par image IRT permettent d'obtenir des résultats précis afin de géoréférencer précisément les zones d'échanges entre la rivière et le karst. Par contre, les données thermiques obtenues par imagerie IRT combinées à des mesures de jaugeage permettent d'estimer les débits des sources.

La géochimie permet quant à elle, de déterminer précisément les apports en eau karstique dans la rivière. L'étude biologique et l'analyse isotopique du radon sont deux méthodes qui ont permis de mettre en évidence des zones d'infiltration et des zones d'apports karstiques diffus le long du lit de la rivière. Ces métriques permettent dans le cadre de cette étude d'obtenir, à ce niveau d'exploitation des données, des résultats qualitatifs mais permettent de valider des zones d'échange entre le karst et la rivière.



Coupes géologique ● Traçages artificiels ●●●●●  
 Profils longitudinaux ● Jaugeages ●●●●●  
 Débits classés ●●●●●  
 Géochimie ●●●●●  
 Biologie ●●●●●  
 Analyses fréquentielles ●●●●●  
 radon ●●●●●  
 Imagerie IRT ●●●●●

Figure 88 : Synthèse des résultats qu'apporte chaque méthode sur le tronçon de la Cèze étudié

La Figure 88 présente les informations qu'apportent chacune des méthodes (coupes géologiques, traçages artificiels, profils longitudinaux, jaugeages, analyses fréquentielles, débits classés, imagerie IRT, géochimie, biologie et radon) dans l'analyse des interactions entre le karst et la rivière et la compréhension globale de l'hydrodynamisme de l'aquifère karstique : (i) hydrodynamisme des émergences, (ii) origine des eaux et mélange et (iii) limites et superficies de bassin versant. Les méthodes sont représentées par des cercles colorés. Chaque méthode est associée à une couleur. Cette figure permet de montrer les informations que certaines approches permettent d'obtenir et d'autres non, comme la source d'Ilette qui a été trouvée seulement à l'aide des images IRT par exemple.

Les apports diffus dans la Cèze entre les sources Fées et Foulatier sont difficilement visibles et mesurables, néanmoins les analyses par imagerie IRT, biologie et activité en radon convergent vers ce résultat. Si nous avons seulement les images IRT pour observer cet apport, nous pourrions interpréter la différence de température comme une erreur liée à la présence de la végétation. Il est donc nécessaire de coupler les images IRT à une autre métrique afin de valider ce qui est observé.

Pour certaines sources, sept méthodes permettent de déterminer les échanges du karst vers la rivière (traçages artificiels, profils longitudinaux, jaugeages, imagerie IRT, géochimie, biologie et radon). On s'aperçoit qu'il est plus difficile de déterminer les échanges de la rivière vers le karst. Pour détecter les zones de pertes de la rivière, les jaugeages et l'analyse biologique sont efficaces. Les traçages artificiels ne peuvent se faire qu'une fois les zones de pertes identifiées et la mesure du radon demande une connaissance préalable pour permettre une telle interprétation. L'étude géologique couplée aux traçages artificiels est la meilleure solution pour estimer les limites de bassin versant.

Ces résultats nous conduisent à proposer une méthode décrite dans la Figure 89 pour analyser les échanges entre le karst et la rivière d'un hydrosystème.

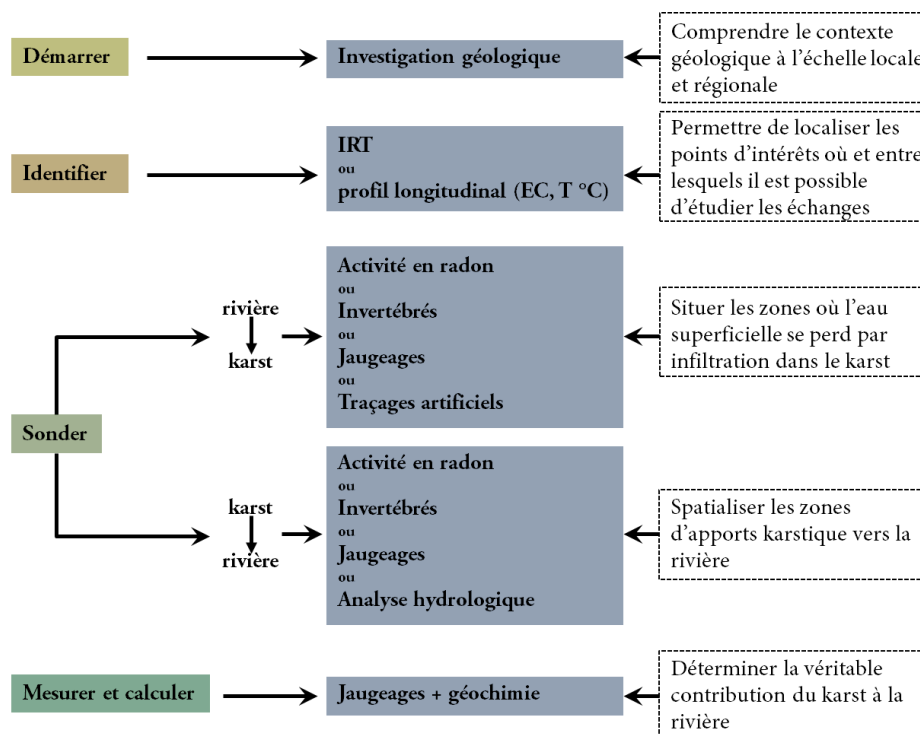


Figure 89 : Proposition d'une méthodologie pour analyse les échanges entre le karst et la rivière d'un hydrosystème karstique

La Figure 89 présente la démarche à suivre pour réaliser une analyse complète des échanges entre le karst et la rivière de l'hydrosystème karstique étudié. Ce résultat est l'aboutissement de l'analyse et de l'interprétation faite à partir de chacune des méthodes utilisées (coupes géologiques, traçages artificiels,

profils longitudinaux, jaugeages, analyses fréquentielles, débits classés, imagerie IRT, géochimie, biologie et radon).

Dans cette méthodologie, on propose de commencer par une phase "d'identification" du système karstique par investigation géologique et par traçages artificiels pour comprendre le fonctionnement global du système et se familiariser avec la zone. La seconde phase consiste à "identifier" les points où se font les échanges entre le karst et la rivière. Cette identification des zones et points d'échanges karst/rivière doit se faire par imagerie IRT et/ou profils longitudinaux. Ces méthodes permettent de repérer et situer précisément les zones d'échanges. La troisième phase consiste à "sonder" le terrain, autrement dit, analyser les échanges karst/rivière et l'hydrodynamisme de ceux-ci à l'aide de métriques permettant d'avoir des résultats qualitatifs mais aussi quantitatifs (jaugeages, biologie, activité en radon, analyse hydrologique). Une fois les échanges complètement identifiés et analysés, une dernière phase de "calcul", consiste à assembler les résultats de mélange de l'eau de la Cèze avec l'eau d'origine karstique obtenus par analyse ACP avec les jaugeages des sources et de la rivière pour déterminer la réelle contribution du karst vers la rivière.

L'ensemble des connaissances en matière d'échange entre le karst et la rivière mises en évidence et développées dans les chapitres précédents a pour objectif de converger vers l'élaboration d'un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème karstique intégrant les relations entre le karst et la rivière.

## VI.2. Conclusion et perspectives

---

Les conclusions et perspectives reprennent les éléments de la thèse de Chapuis [2017].

### VI.2.1. Conclusion

La Cèze karstique est située dans une zone climatique de type méditerranéen marqué par des épisodes pluvieux Cévenols. Le réseau hydrographique de cette rivière en période de sécheresse est, par endroit, en état d'assec. Ce phénomène risque de s'amplifier si l'on se réfère aux prévisions de changement climatique et à l'augmentation de la population permanente et surtout touristique.

La conclusion de ce travail porte sur les résultats obtenus par chacune des méthodes d'analyse pour évaluer les échanges karst/rivière. Ces résultats sont confrontés de manière à rendre évidentes leurs convergences et divergences. Enfin, une articulation méthodologique est proposée entre les différents volets (géologie, traçage artificiel, suivi hydrologique, biologie, hydrogéochimie, imagerie IRT, radioactivité en radon et modélisation) pour permettre d'appréhender de la façon la plus complète possible un hydrosystème karstique.

Tout d'abord, les résultats obtenus par ces différentes méthodes d'analyses sont repris de manière synthétique. Les connaissances nécessaires pour bien caractériser un système karstique dans son ensemble sont évaluées. Il s'agit de :

- Déterminer les échanges karst/rivière à travers une analyse interdisciplinaire ;
- Établir un diagnostic des complémentarités et/ou divergences entre les résultats provenant de chaque méthode ;
- Proposer une méthodologie d'ensemble pour appréhender un aquifère karstique en fonction des résultats obtenus pour l'objectif précédent ;
- Modéliser le comportement du système karstique ;
- Élaborer un indicateur permettant de surveiller l'état hydrique du système karstique dans un intérêt opérationnel pouvant être une aide à la gestion pour les acteurs locaux.

Les différentes méthodes utilisées apportent chacune des informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système karstique local (la Cèze karstique). Cependant, chaque approche fournit un résultat qualitatif et/ou quantitatif supplémentaire afin de faire apparaître les convergences et divergences des résultats de chacune des autres méthodes d'analyses. La synthèse des résultats obtenus selon les différentes métriques est présentée ci-dessous :

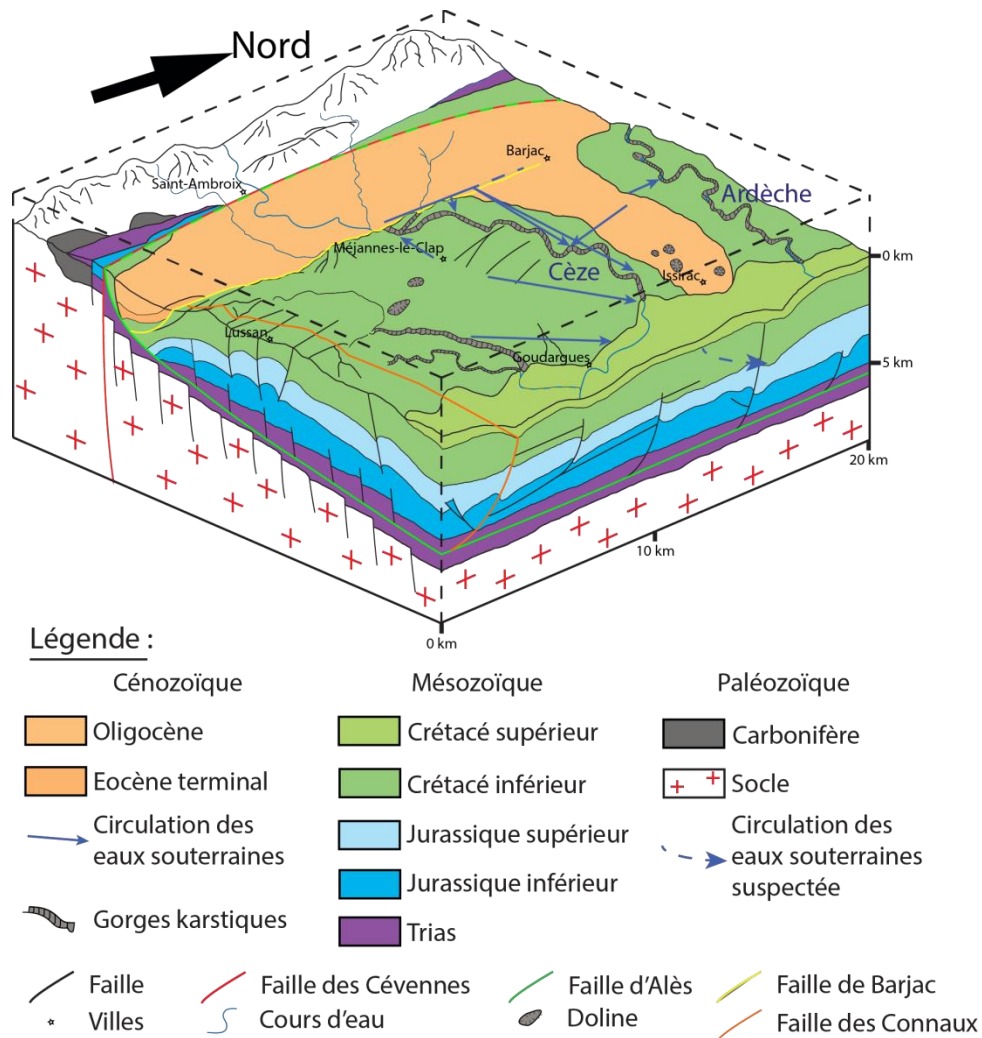


Figure 90 : Représentation des circulations d'eaux souterraines dans le karst

Le domaine karstique étudié et son bassin versant ont fait l'objet d'une représentation géologique en trois dimensions afin de comprendre la disposition des différentes couches et leur influence sur les écoulements souterrains. À partir des coupes géologiques en 3D de la zone d'étude, on observe une diffluence des écoulements souterrains (Figure 90). De la bordure Ouest du fossé d'Alès jusqu'aux formations du Crétacé supérieur à l'Est du plateau de Méjannes-le-Clap, des formations géologiques capables d'infiltrer les eaux de surface affluent.

Ces écoulements peuvent être directement reliés à l'exutoire de sources karstiques via le réseau karstique. Cependant, il est possible que ces sources ne restituent pas la totalité des eaux infiltrées. En effet, les pentages Est, Nord-Est des couches Mésozoïques positionnent les calcaires karstifiés de l'Urgonien sous les formations imperméables du Crétacé supérieur et forment un aquifère confiné. Ces eaux souterraines peuvent aussi avoir un écoulement à l'échelle régionale dépassant les limites de la zone d'étude. En effet, les formations karstifiées plongent en direction du Rhône et du fait de la forte présence de failles, il est possible que des couches perméables appartenant à des unités différentes soient en contact les unes avec les autres.

## Traçages artificiels

Les traçages artificiels dans l'endokarst (aven d'Ornac et grotte de Flandin) ont permis de situer la limite hydrogéologique entre le bassin de la Cèze et celui de l'Ardèche. Le traçage de la grotte Flandin a permis de mettre en évidence un écoulement souterrain en direction de l'Ardèche en basses eaux. Cet écoulement est sans doute toujours existant en hautes eaux mais des écoulements souterrains de la grotte Flandin prennent la direction de la source Monteil (côté Cèze) à la faveur de drains karstique remis en charge. Ce phénomène génère un déplacement spatial de la limite hydrogéologique entre le bassin de la Cèze et celui de l'Ardèche en supposant que sa dynamique de surcreusement accroît son bassin hydrogéologique aux dépens de celui de la Cèze.

Les traçages des pertes du Roméjac et des pertes de la Cèze à Rochegude montrent que les écoulements souterrains sont conditionnés par la présence de failles normales et par le développement du réseau karstique.

## Suivi hydrologique

Le travail d'instrumentation et de suivi hydrologique de la Cèze et de ses émergences karstiques a permis de réaliser de nombreuses analyses. À partir des différentes analyses des données hydrologiques de terrain, il est possible de localiser les lieux stratégiques pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système karstique. En effet, les profils longitudinaux de température, conductivité et d'altimétrie mesurés dans la rivière permettent de situer les émergences et d'en évaluer ainsi leur impact sur la Cèze. Les jaugeages différentiels permettent de localiser des zones de pertes et d'apports, mais surtout fournissent des données permettant de quantifier les échanges entre le karst et la rivière. Le débit de l'eau qui s'infiltré au niveau des pertes recensées peut être jaugé ainsi que le débit superficiel des émergences karstiques qui alimentent la Cèze.

Les analyses fréquentielles permettent de dissocier les sources entièrement reliées au système karstique de celles qui sont soutenues par des apports d'eaux superficielles telles que les eaux de la Cèze et du Roméjac qui s'infiltré au niveau du fossé d'Alès le long de la faille normale de Barjac.

Les méthodes de débits classés et les analyses corrélatoires permettent de décrire l'évolution du fonctionnement d'une émergence en fonction de son état hydrique et de quantifier un délai de transit entre l'eau infiltrée et son exutoire.

## Imagerie infra-rouge thermique

Les images IRT sont un excellent outil pour repérer et localiser les émergences karstiques en bordure de rivière. Néanmoins, pour obtenir un tel résultat, il est nécessaire que les conditions météorologiques et hydrologiques soient favorables (temps clément et sources non taries). L'estimation des débits à partir des données infra-rouge thermiques en partant du principe de conservation de la masse et de la chaleur est comparée à celle obtenue par jaugeages pour certaines sources. Cependant, l'incertitude qui y est associée est souvent importante car il est, au minimum, nécessaire de connaître le débit en amont des émergences. Cette estimation par analyse thermique est donc possible dans le cas où une station de mesure est installée en amont de la section étudiée. Néanmoins, le jaugeage par courantomètre est plus précis que l'estimation faite à partir des images IRT.

L'analyse des images IRT donne une information indispensable dans le cas où des prélèvements géochimiques par exemple doivent être faits dans la zone de mélange entre l'eau karstique et celle de la rivière. En effet, le panache d'eau froide de l'émergence karstique s'étale le long de la bordure de la rivière avant de se mélanger de façon homogène avec l'eau de la rivière quelques centaines de mètres plus en aval.

## Géochimie

Les campagnes géochimiques représentent un travail d'analyse des données important mais incontournable pour caractériser les échanges entre le karst et la rivière. Si les analyses géochimiques ont permis d'identifier les différentes typologies chimiques des sources et des eaux superficielles, elles ont aussi permis d'évaluer les contributions du karst vers la rivière.

La représentation des concentrations en ions majeurs des sources et la Cèze à l'aide d'un diagramme de Piper a permis de classer les points d'échantillonnage en fonction de faciès chimiques. Grâce à ce diagramme, l'évolution du chimisme de la Cèze de l'amont à l'aval est mise en évidence. Si en entrée des gorges, la Cèze présente une eau avec un faciès sulfaté calcique, elle devient bicarbonatée calcique en aval des sources karstiques. Le diagramme met en évidence que certaines sources ont un chimisme plus carbonaté, proche de celui des eaux karstiques, que d'autres, notamment les sources en rive droite par rapport à celles de la rive gauche.

L'ACP permet d'identifier des pôles chimiques. Elle permet aussi d'interpréter l'évolution du chimisme de la Cèze et de ses sources en fonction de l'état hydrique du système. En période de décrue, si les sources karstiques ont un chimisme stable, les eaux sulfatées provenant d'un mélange avec la Cèze tendent à davantage se charger en sulfates. Les eaux peu chargées en sulfates dont l'origine est d'ailleurs encore une énigme, sont stables chimiquement ou alors évoluent légèrement vers un faciès carbonaté en décrue.

Il est possible d'estimer les proportions de mélange entre les eaux karstiques et l'eau de la Cèze avec l'ACP. Pour les mois de juin et juillet de l'année 2015, la totalité des contributions karstiques, sur le tronçon de la Cèze étudié, sont évaluées à 52 % et 60 % par ACP, pour respectivement 46 % et 60 % par jaugeages au courantomètre EM.

## Biologie

Le prélèvement des invertébrés présents dans les bancs de galets, combiné avec des mesures physico-chimiques permet de déterminer les conditions propices à la présence des espèces représentatives du système karstique. Les échantillonnages réalisés au cœur du système karstique dans les grottes (grotte du Barry) et les avens (aven de l'Everest, aven de l'Armédia) ont permis d'identifier des espèces des eaux souterraines comme *Niphargus Virei*. Cette discrimination liée au lieu de vie des espèces, permet de déterminer les sens d'échange entre la rivière et le karst en se basant sur l'hypothèse suivante : si une espèce d'un environnement donné se trouve dans un environnement qui ne lui est pas propice alors celle-ci a été déplacée par les flux.

Les résultats indiquent des apports d'eau superficielle vers le karst en amont de l'entrée des gorges. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus par traçages artificiels et jaugeages. De la source Fées jusqu'à la source Font Canet, les apports à la Cèze proviennent d'eaux souterraines profondes ou du karst. Dans ce secteur, les apports karstiques peuvent provenir des sources karstiques Fées, Foulatier, Vanmâle et Font Canet, mais des apports diffus le long du lit de la Cèze entre les sources Fées et Foulatier ne sont pas à exclure. D'ailleurs, d'après les jaugeages réalisés dans cette zone, la Cèze augmente de 400 L/s alors que les apports des sources se limitent à 200 L/s. Il y a donc 200 L/s qui proviennent probablement d'une part de la Malaygue et d'autre part d'apports diffus. En aval de la source Font Canet jusqu'à la source Monteil, les analyses physico-chimiques et les invertébrés identifiés démontrent des apports d'eau superficielle en direction du karst. Dans le secteur de la source Monteil, ce sont des apports karstiques qui alimentent la Cèze.



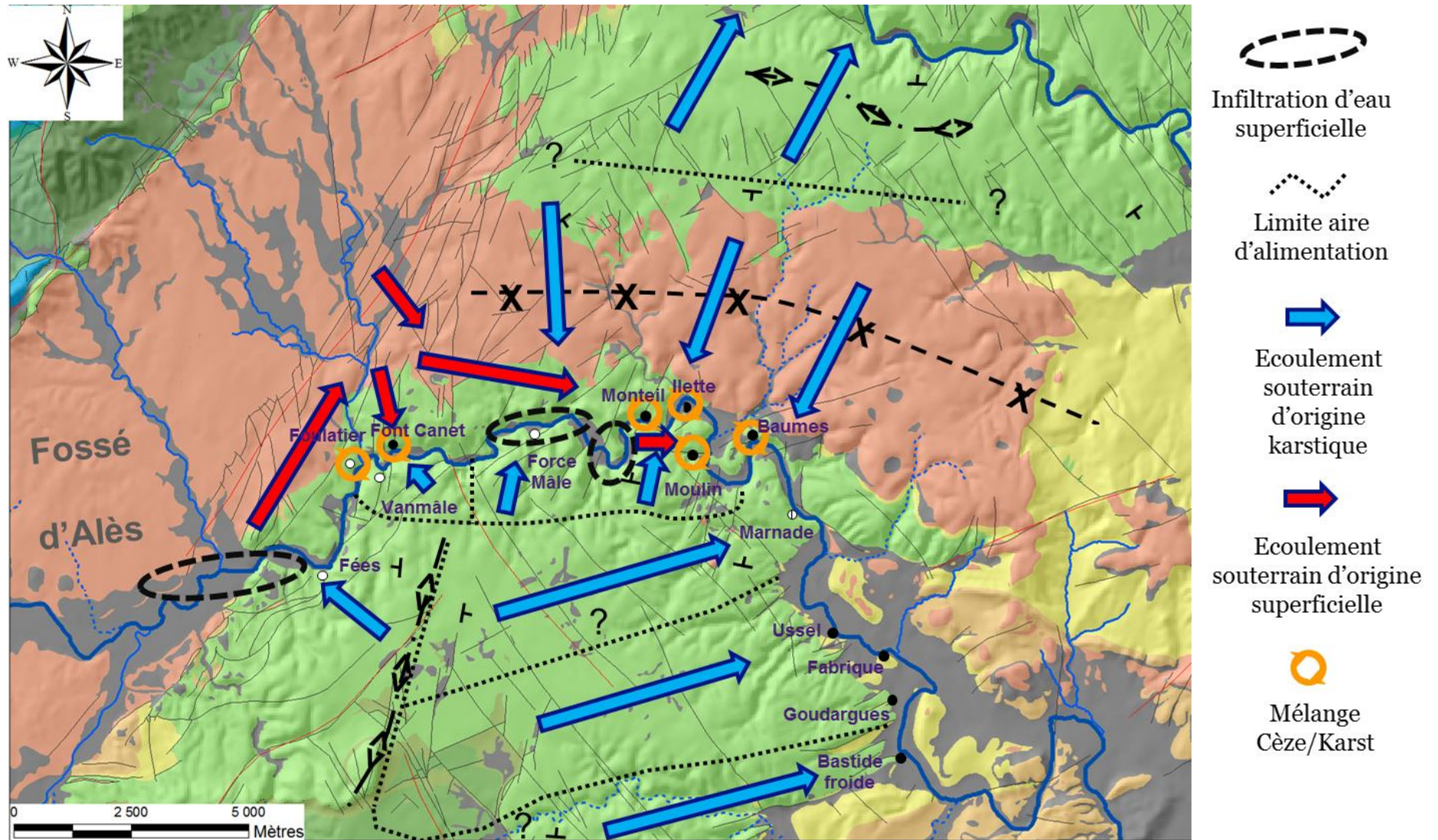
## **Radioactivité en radon**

La mesure de l'activité en radon de la Cèze et de ses sources - technique qui semblait pertinente pour contribuer à l'évaluation des échanges karst/rivière - s'est révélée intéressante. La concentration en  $^{222}\text{Rn}$  de la source Marnade est très faible compte tenu du fait qu'elle dispose d'un réservoir karstique important. Cette faible valeur peut être expliquée par un réseau karstique non-saturé dans lequel l'eau souterraine est "ventilée" ce qui facilite le dégazage du radon. À l'inverse, la source Baumes présente une concentration très élevée en radon alors que l'eau de cette source en rive gauche de la Cèze est un mélange d'eau karstique et d'eau de la Cèze (ainsi que des affluents du fossé d'Alès). Cet enrichissement en radon peut s'expliquer uniquement par la géologie. Une partie des eaux infiltrées qui se dirige vers la source Baumes traverse des formations marneuses ou des failles qui l'enrichissent en radon.

Le profil radon de la Cèze d'amont en aval des gorges karstiques montre des variations. Les zones où la radioactivité augmente sont associées à des apports ponctuels d'eaux enrichies en radon (sources) ou diffus qui alimentent la rivière continuellement. Les zones où l'activité décline montrent qu'il n'y a plus d'apport en radon.

## ***Circulations souterraines déduites des différentes méthodes***

La Carte 13 présente une synthèse des circulations souterraines déduites des différentes méthodes déployées au cours du projet. Les limites approximatives des aires d'alimentation sont données à titre indicatif en situation de basses eaux et mériteraient d'être précisées notamment en tenant compte de leurs fluctuations en situation de hautes eaux (démonstrées par les traçages).



Carte 13 : Synthèse générale des écoulements dans le karst pour une situation hydrologique de basses eaux.

## Discussion des résultats qualitatifs de chacune des méthodes

Pour obtenir les informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème karstique, les résultats obtenus par cette approche globale interdisciplinaire doivent aboutir à plusieurs critères : les apports (représentatifs des échanges) du karst vers la rivière, les apports de la rivière vers le karst, l'hydrodynamisme des émergences, l'origine des eaux et le taux de mélange, les limites et superficies de bassin versant des émergences. Ces informations sont rassemblées dans la Figure 91.

		Compréhension du fonctionnement hydrogéologique karstique				
Méthodes employées		Échanges		Hydrodynamisme des émergences	Origine des eaux et mélanges aux émergences	Limites et superficies de bassin versant
		Karst → Rivière	Rivière → Karst			
Géologie		●			●	●
Traçages artificiels		●	● <sup>1</sup>	●	●	●
hydrogéologie	Profils longitudinaux	●				
	Jaugeages	●	● <sup>2</sup>	● <sup>1</sup>		●
	Analyses fréquentielles	●		●	●	
	Débits classés	●		●	●	●
Imagerie IRT		●				
Géochimie (diagramme de Piper, ACP)		●		● <sup>2</sup>	●	
Biologie		●	● <sup>3</sup>		●	
Radon		●	● <sup>4</sup>		●	

Légende :  
 ● Réponse complète      ● Réponse partielle

Figure 91 : Résultats produits par les différentes méthodes d'analyses afin de comprendre le fonctionnement

Dans la Figure 91, le degré de satisfaction des différents critères est symbolisé par des sphères de couleur différente. Les sphères de couleur verte signifient que la méthode employée permet de répondre aux différents critères.

Plusieurs entourés (marron, violet, bleu et rouge) regroupent les méthodes permettant d'obtenir et/ou de valider les résultats en fonction des critères définis précédemment (échanges karst/rivière, hydrodynamisme, origine des eaux, limites de BV) :

— L'entouré marron met en évidence les méthodes permettant de déterminer les échanges du karst vers la rivière et de la rivière vers le karst. Utiliser deux méthodes parmi les quatre proposées permet d'obtenir et de valider des résultats portant sur la localisation et le sens des échanges entre le karst et la rivière. En cas de divergence, l'utilisation d'une autre méthode est nécessaire.

— L'entouré violet fait apparaître les différentes méthodes qui renseignent sur l'hydrodynamisme des émergences. Il y a deux possibilités de mise en œuvre : (i) campagnes de mesures par jaugeages ou analyse géochimique, (ii) suivi en continu par analyses fréquentielles ou méthode des débits classés.

— L'entouré bleu met en avant la méthode permettant de déterminer l'origine des eaux et les taux de mélange. Si plusieurs méthodes renseignent sur les origines des eaux des émergences (géologie, traçages, analyses fréquentielles, biologie et radioactivité en radon), seule la géochimie distingue les teneurs d'une eau d'origine karstique mélangée à une eau d'une autre origine (eau de la Cèze infiltrée).

— L'entouré rouge rassemble les analyses géologiques et par traçages artificiels qui permettent de déterminer plus ou moins précisément les limites et/ou superficie de bassin versant. L'association des méthodes : géologie et traçages artificiels, est pertinente pour appréhender au mieux, spatialement, les limites hydrogéologiques. Car parfois, la géomorphologie d'un réseau karstique ne correspond pas à la direction des circulations des eaux souterraines [Chapuis et al., 2017].

Les entourés (marron, violet, bleu et rouge) de la Figure 91 ont pour vocation d'optimiser le nombre de méthodes à mobiliser et mettre en œuvre. Si l'imagerie IRT ou les profils longitudinaux ne renseignent pas tous les critères, ce sont néanmoins des approches importantes pour localiser les émergences. Le choix de prédilection porte sur l'imagerie IRT qui permet non seulement de localiser facilement les émergences karstiques en période estivale, mais fait aussi apparaître les zones de mélange entre l'eau souterraine et l'eau de la rivière grâce aux contrastes thermiques. Elle est donc indispensable au bon échantillonnage biologique et géochimique qui est une approche primordiale pour quantifier les apports karstiques. Pour cette raison, l'imagerie IRT apparaît en premier dans la méthodologie pour appréhender un système karstique. Elle devrait être mise en œuvre en premier lieu ou en même temps que le diagnostic géologique.

Après avoir localisé toutes les émergences karstique grâce aux images IRT (ou par profil longitudinal), la géologie peut être associée aux résultats des traçages artificiels si des points d'injection intéressants sont recensés. En effet, la combinaison de la géologie et des traçages permet de déterminer les circulations des eaux souterraines entre pertes et émergences (à l'échelle du système karstique) et d'émettre des hypothèses sur les circulations plus profondes (à l'échelle régionale).

L'analyse des échanges entre le karst et la rivière devient exhaustive avec une analyse biologique ou la mesure de l'activité en radon. L'analyse des invertébrés est minutieuse, elle permet donc d'avoir des résultats sur le sens des échanges ponctuels tout au long du tronçon. Le profil par mesure de la radioactivité en Rn présente des résultats similaires à la biologie et fait apparaître des zones de pertes et d'apports plus précisément que si nous devions procéder à un quadrillage du tronçon par plusieurs sections de jaugeages, ce qui est parfois impossible.

Il est préférable que l'hydrodynamisme des émergences soit analysé par jaugeages et par géochimie. Le premier est une métrique importante, d'une part pour quantifier les apports karstiques et d'autre part, pour renseigner d'autres outils (débits classés, modèles). L'analyse géochimique permet de valider les premières interprétations faites par les mesures de débits et est une mesure indispensable pour déterminer l'origine des eaux et le taux de mélange entre eau karstique et eau de rivière d'une émergence.

Le taux de mélange et/ou l'origine des eaux des sources karstiques sont dans notre cas, déterminés par la géochimie. Cependant, les résultats obtenus peuvent être confortés par d'autres approches telles que : la géologie, les traçages artificiels, les analyses fréquentielles et/ou débits classés, la biologie et la radioactivité en radon.

Les connaissances acquises sur le fonctionnement de l'hydrosystème karstique permettent finalement de passer à une étape de modélisation pour comprendre et reproduire le fonctionnement du karst en fonction de son état hydrique (approvisionnement de la Cèze, ou infiltration des eaux superficielles dont celle de la Cèze). Les sorties du modèle utilisant, dans notre cas les techniques neuronales représentent

un résultat utile et potentiellement opérationnel dans l'optique d'une meilleure gestion du système karstique.

Le modèle par réseau de neurones a permis d'étudier le rôle du système karstique sur les eaux superficielles de la Cèze le long des gorges karstiques. Cette modélisation a été réalisée en parallèle d'un indicateur de l'état hydrique (IETHY) du karst fondé sur l'analyse de 74 événements pluvieux (comptabilisés à partir de 4 mm de lame d'eau) qui permet de déterminer : (i) à partir d'un débit de la source Ussel inférieur à 220 L/s, le système karstique du plateau de Méjannes-le-Clap est à l'étiage (ii) pour un débit supérieur à 350 L/s, le système karstique se vidange. Le karst à l'étiage a tendance à stocker les eaux qui s'infiltrent dans son réservoir et à être alimenté par l'eau de la Cèze. Dans le cas inverse, le karst fait transiter les apports superficiels et contribue à l'augmentation du débit de la rivière. Le IETHY du karst est donc un outil destiné à déterminer si le karst joue un rôle de pertes des eaux de la Cèze ou de gains. Les résultats de la modélisation ne sont malheureusement pas encore tout-à-fait à la hauteur de ce qui était souhaité car la base de données représentant 3 années hydrologiques est trop courte pour un modèle par réseau de neurones. De plus, cette base de données n'est pas représentative de cycles hydrologiques ordinaires du fait de l'été 2014 exceptionnellement pluvieux et de la forte période de sécheresse durant l'été 2015.

### **Bilans quantitatifs des échanges karst/rivière**

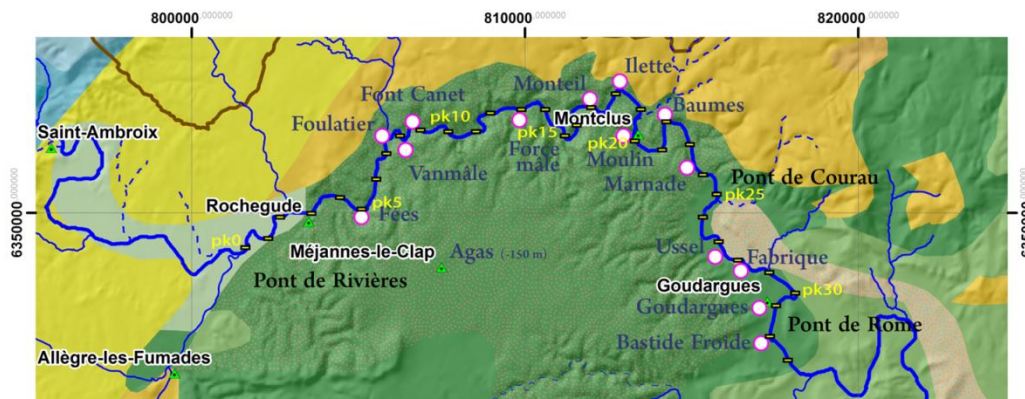
Plusieurs approches permettent d'obtenir le même type d'information, ou sont complémentaires (Figure 91). C'est le cas pour la quantification des apports karstiques vers la rivière. Le jaugeage et la géochimie sont complémentaires pour quantifier la contribution des eaux karstiques à la Cèze. Les mesures par jaugeages différentiels intègrent la totalité du débit de l'eau superficielle. La géochimie permet déterminer les proportions d'eau de provenance karstique dans le débit d'une source. La combinaison des deux permet d'estimer plus précisément le débit de la contribution karstique à la source jaugée.

Les travaux réalisés montrent que le karst soutient la Cèze en période d'étiage. Les circulations d'eau souterraine au sein du karst sont représentées par des flèches bleues sur la Figure 90. C'est même ce soutien d'étiage par le karst qui permet à la Cèze d'avoir parfois un écoulement en entrée de ses gorges.

La contribution du karst en étiage reste modeste, les campagnes de jaugeages de juin 2015 (moyennes eaux) et juillet 2015 (basses eaux) en attestent. Les contributions karstiques estimées le long des gorges sont de **1085 L/s** en juin 2015 (Figure 92) et **702 L/s** en juillet 2015, qui représentent respectivement un apport karstique à la Cèze de **49 %** et de **44 %**. Pour rappel, le débit prélevable dans la Cèze au niveau de la commune de Rivières (en amont des gorges) est de **330 L/s**. Ce débit peut donc être compensé par les apports karstiques, mais cette compensation est très limitée en période d'étiage. De plus en amont des gorges, la Cèze s'infiltré à la vitesse de **400 L/s** en moyenne. Le prélèvement peut donc provoquer le tarissement de la rivière. À cet endroit, la Cèze se tarit en moyenne tous les 10 ans. Le GIEC prévoit une augmentation moyenne de 2°C d'ici 2050, une partie des écoulements superficiels de la Cèze risque de disparaître en entrée des gorges à cause de précipitations insuffisantes et de l'augmentation des pertes par ETP.

Si l'on reprend les jaugeages des pertes de la Cèze à Rochegude et de Baume Salène en juin et juillet 2015, les pertes totales par infiltration s'élèvent respectivement à 876 L/s et 669 L/s. En faisant les mêmes calculs sur les sources mais pour les eaux n'étant pas d'origine karstique, on obtient pour juin 2015 : 492 L/s et pour juillet 2015 : 310 L/s. Soit en juin 2015, 44 % des eaux infiltrées ne sont pas restituées en rivière, 54 % en juillet 2015. Les eaux infiltrées qui circulent dans le réseau karstique profond ne sont donc pas restituées entièrement à la Cèze par les émergences karstiques. Il est possible que ces eaux suivent un gradient hydraulique qui est peut-être celui du Rhône (direction plus ou moins Nord-Est) dans les formations calcaires du Crétacé supérieur. Des contacts avec des aquifères du Jurassique ne sont pas à exclure au vu du nombre de failles important.

Sur la totalité du tronçon étudié, en intégrant toutes les sources karstiques, le différentiel entre le débit de la Cèze à Rivières (amont des pertes de Rochegude) et celui à Moulin-de-Bès (aval des sources karstiques) est positif (presque équilibré ; 47 L/s supplémentaire en juin 2015 et 61 L/s en juillet 2015). Autrement dit, **pour le moment le karst comble les pertes de la Cèze.**



Juin 2015						
pk	Point d'observation	Jaugeage (L/s) ± 2%	Apport karstique par ACP (L/s) ± 2%	Biologie	Radon	IRT
4,5	La Cèze à Tharoux	1193	0	-	-	+
5	Source Féés	50	50	+	+	+
7	La Cèze : apports diffus	/	/	+	+	+
8,5	Source Vanmâle	0	0	+	+	+
9	Source Font Canet	137	50,7	+	+	+
15	La Cèze en amont des pertes de Baumes Salène	1603	/	-	-	+
17	La Cèze en aval des pertes de Baumes Salène	1319	/	-	+	+
18	Source Monteil	278	169,6	+	+	+
19	Source Ilette	60	36	/	+	+
20	Source Moulin	107	40,66	/	-	+
23	Source Baumes	150	103,5	/	+	+
25	Source Marnade	39	37,1	/	-	+
28	Source Ussel	194	163	/	+	+
29	Source Fabrique	70	47,6	/	+	+
32	Source Goudargues	287	198	/	+	+
33	Source Bastide froide	205	188,6	/	+	+
34	La Cèze au moulin de Bès	3414	1084,76	/	-	+

Figure 92 : Apports karstiques à la Cèze le long des gorges karstiques; le signe + signifie des apports du karst; le signe - signifie des pertes vers le karst; le signe / signifie qu'il n'y a pas de données (l'incertitude pour le débit correspond à celle du matériel, elle peut être plus importante à cause de certaines sections accidentées)

## VI.2.2. Perspectives

Les connaissances acquises sur le système karstique et la méthodologie développée et mise en œuvre peuvent être améliorées à plusieurs niveaux, en particulier en augmentant les chroniques de suivi hydrologique, en approfondissant les résultats obtenus à partir des approches utilisées (géochimie, thermie, traçages artificiels, modélisation). Les perspectives proposées dans le cadre de ce travail seraient les suivantes :

### — *Continuité du suivi hydrologique de la Cèze et des sources aux exutoires du karst*

Le dispositif actuel de suivi au cœur des gorges karstiques de la Cèze est composé de sondes autonomes CTD (10 au niveau des sources et 4 en rivière) ainsi que de trois pluviomètres. Il pourrait être opportun de prolonger le suivi sur plusieurs années supplémentaires. Un tel apport de données permettra l'analyse de chroniques plus longues pour affiner la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème. Il sera alors possible d'effectuer une analyse fonctionnelle fondée sur des techniques de traitement du signal. Un des objectifs visera à déterminer d'éventuels patterns spatio-temporels de fonctionnement de l'hydrosystème karstique en fonction de scénarios de pluies, de remplissage ou de conditions de débits en rivière. Il est indispensable d'accroître la base de données existante pour réaliser ce type d'analyses et renseigner de façon optimale le modèle par réseaux de neurones. Pour ce modèle, les données provenant des sources de débordement, possédant un grand bassin d'alimentation sont à privilégier. Ces données en entrée de modèle permettront de réaliser un meilleur apprentissage et de générer en sortie un signal représentatif du fonctionnement global du plateau karstique de Méjannes-le-Clap.

Il s'agira aussi de poursuivre les campagnes de jaugeages afin d'améliorer ou compléter les courbes de tarage des sources qui peuvent être biaisées suite aux crues.

Compte tenu des travaux réalisés, la Cèze karstique pourrait devenir un bassin hydrogéologique de référence pour les processus hydrodynamiques rivière/karst. La transposition à d'autres cours d'eau karstiques non encore équipés est possible à condition d'identifier les configurations dans lesquelles s'effectuent les transferts hydrodynamiques (géomorphologie de la rivière, ruptures de pentes, zones de pertes, temps de réponse des sources, surface d'alimentation des sources).

Afin de faciliter le suivi hydrologique et grâce aux connaissances déjà acquises sur le karst de la Cèze, il serait possible d'envisager un allègement du dispositif du suivi et d'optimiser en quelque sorte l'instrumentation du site pour un suivi hydrologique en continu. Pour cela, il faudrait définir les paramètres à suivre dans le cadre d'une pérennisation du système de mesures hydrologiques (conductivités, températures, niveaux, qualité physico-chimique et biologique) pour les stations les plus pertinentes et nécessaires à un suivi en continu du bassin karstique de la Cèze. Une analyse comparée de plusieurs scénarios de mesures fonctionnant en mode dégradé serait à conduire avec un nombre décroissant de stations de mesures par rapport au système actuel ; ceci sans altérer l'information sur les relations karst/rivière.

La Cèze karstique peut être un bassin de référence pour les processus hydro rivière/karst et ceci justifie la pérennisation du dispositif. La transposition à d'autres cours d'eau karstiques non encore équipés peut s'avérer très utile à condition d'identifier les configurations dans lesquelles il est important d'installer ou de conserver des moyens de mesure (géomorphologie de la rivière, ruptures de pentes, zones de pertes, temps de réponse des sources, surface du bassin d'alimentation des sources).

Il apparaît donc important de continuer l'acquisition de données de suivi hydrologique au-delà des 3 cycles hydrologiques enregistrés de 2014 à 2016. Ce dispositif ainsi optimisé permettra le suivi et la

compréhension de l'hydrosystème en s'appuyant sur un nombre de sondes enregistreuses et de campagnes de terrains réduites voire minimales.

Suite à la réflexion engagée avec le syndicat ABCèze pour la reprise du dispositif allégé et optimisé, des spécifications d'ordre technique (choix du type de sonde, maintenance des capteurs, fréquence des collectes des mesure, ...) seront à établir avec des recommandations pour l'analyse et l'interprétation des mesures. L'ensemble de ces indications sera intégré dans le guide méthodologique qui sera réalisé en dernière phase.

### — *Approfondissement de l'analyse hydrogéomorphologique pour améliorer la compréhension du fonctionnement et de la structure de l'hydrosystème karstique*

Une étude géomorphologique plus poussée du site permettrait de mieux positionner les fonctionnements hydrodynamiques dans le contexte géomorphologique en fonction de l'évolution des niveaux de base. L'évolution du niveau de base peut être analysée à partir de l'étude des morphologies superficielles et de l'endokarst. Ce travail suppose d'analyser les données spéléologiques collectées sur et dans les deux parties (Nord et Sud) du plateau karstique de Méjannes-le-Clap. Il vise à prendre en compte les évolutions morphologiques liées aux oscillations eustatiques (Messinien) et climatiques (Quaternaire) pour analyser la relation entre les morphologies karstiques et les modalités de fonctionnement. Au final, cette analyse prévue dans la dernière phase du projet Cèze permettra de mieux comprendre l'évolution des échanges entre le karst et la Cèze au cours des périodes d'étiage ou de crue.

Finalement, l'objectif consisterait à améliorer le schéma conceptuel de mise en place de la karstification. Ce type de schéma permettra de mieux caractériser l'importance de la karstification en profondeur et visera à reconstituer les paléo-directions d'écoulement et de localiser les secteurs où se trouvaient les principaux paléo-exutoires. Une meilleure cartographie des éléments endo et exo-karstiques, avec leur position altitudinale, l'identification des conduits drainants par analyse des forages existants et des topographies des plongées spéléologiques devraient pouvoir apporter des éléments pour la construction de ce modèle conceptuel et permettront d'identifier les secteurs éventuels à privilégier pour la reconnaissance des ressources karstiques profondes par forage. Ce résultat permettra d'identifier des "cibles hydrogéologiques" qui s'avèreraient les plus favorables à une exploitation future.

### — *Approfondissement des résultats obtenus*

Les différentes méthodes utilisées ont permis d'identifier et de quantifier les échanges entre le karst et la rivière. Cependant, il est possible d'améliorer l'analyse ou de mieux définir les limites de certaines méthodes :

- La méthode d'analyse de la radioactivité en radon  $^{222}$  en rivière est très sensible. Un apport d'eau avec une teneur en  $^{222}\text{Rn}$  importante fait grimper fortement la concentration en radon de la rivière. Comme pour les ions majeurs, cette concentration en isotope associée à une valeur de débit permettrait peut-être de déterminer l'apport karstique d'un mélange eau karstique avec de l'eau superficielle infiltrée.
- Dans le but d'affiner la détermination de la provenance des eaux qui sont à l'origine d'un mélange pôle carbonaté et pôle sulfaté, la caractérisation isotopique des roches et des eaux serait probablement une méthode efficace [Lavastre et al., 2011].



- L'analyse thermique par imagerie IRT aéroportée montre tout son intérêt pour l'échantillonnage géochimique car les panaches d'eau fraîche ou chaude des sources suivant les saisons sont très bien identifiés. Cependant pour le calcul des débits, l'incertitude est grande car seule la thermie de la surface de l'eau est mesurée. La mesure distribuée de la température par fibre optique est une technique récente qui semble intéressante pour quantifier des flux locaux sur toute la profondeur de la rivière [Selker et al., 2006]. Les mesures de température avec une précision de 0,01°C à 0,2°C et spatialement distribuées à l'échelle de l'ordre du centimètre, permettraient de prendre en compte la totalité du panache d'eau fraîche ou chaude pour quantifier la mesure. Cette méthode permettrait aussi de mettre en évidence les apports diffus au fond du lit de la rivière.
- La modélisation par réseaux de neurones devrait être reprise avec une base de données d'au moins 5 années hydrologiques ce qui permettrait de réaliser un meilleur apprentissage et un bon calage du modèle. A défaut de disposer d'une telle base de données, une comparaison avec les résultats qui pourraient être obtenus avec un modèle réservoir comme Karstmod est prévue en phase 4. Des tests avec le logiciel Karstmod sont prévus en collaboration avec le laboratoire Hydrosociences de Montpellier (H. Jourde et N. Mazzilli) toujours en lien avec l'équipe du LGEI à l'École des mines d'Alès.
- Enfin, d'autres traçages pourraient être envisagés en particulier pour l'identification des zones de diffluence des écoulements souterrains issus du plateau de Méjannes-le-Clap. Une injection de 10 kg de fluorescéine est programmée pour juin 2018. Les traçages destinés à préciser l'interfluve Ardèche-Cèze pour situer plus précisément la ligne de partage des eaux seraient éventuellement à reprendre en hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux, pour observer l'évolution du fonctionnement de l'hydrosystème.

Dans la continuité de ces perspectives d'amélioration, il semble intéressant de valoriser d'ores et déjà ce travail par un transfert de connaissance à des fins opérationnelles.

#### — *Valorisation opérationnelle par l'élaboration d'un guide méthodologique*

Comme pour l'évaluation des échanges entre nappe alluviale et rivière (guide Nappes/Rhône et NAPROM) [Paran et al., 2015], il est envisagé de réaliser un nouveau guide adapté au domaine karstique et intégrant les méthodes développées et mises en œuvre dans le cadre de ce travail. Ce type de guide méthodologique qui serait dédié à l'interprétation des échanges karst/rievère (description des méthodes de caractérisation des échanges, avantages potentiels, limites et conditions d'utilisation, coûts de mise en œuvre) serait conçu pour les gestionnaires, acteurs dans le domaine de l'eau et techniciens en environnement. Cette valorisation pourrait ainsi contribuer à la gestion équilibrée et raisonnée de la gestion des ressources en eau. La réalisation de ce guide méthodologique fera partie de la dernière phase de ce programme de recherche.



## Bibliographie

---

ABCèze, Bilan de l'activité sur les BEALS de la haute vallée de la Cèze (Syndicat Mixte d'aménagement du bassin versant de la Cèze, ABCèze) 2010-2012.

Arfib B., 2013 – Hydrométrie pratique des cours d'eau – Mesure du débit – Guide pratique de terrain. Cours de l'Univ. Aix-Marseille.

[En ligne] <http://www.karsteau.fr/cours/polymethodoHydroArfib2pagesParFeuille.pdf>

Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Charollais, J., Conrad, M.-A., Cotillon, P., Ferry, S., Masse, J.-P., Peybernès, B., 1979 - Paléogéographie des calcaires urgoniens du sud de la France. *Géobios* 12, 363–383.

Arthaud F., Matte P., 1975 - Les décrochements tardi-hercyniens du sud-ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation. *Tectonophysics* 25, 139–171. doi:10.1016/0040-1951(75)90014-1.

Audra P., Mocochain L., Bigot J.-Y., 2009 - Spéléogénèse per ascensum par remontée du niveau de base. Interprétation des réseaux ennoyés, dénoyés, des sources vauclusiennes et des puits-cheminées. *Karstologia Mémoires* n°17, 12p.

Bailly-Compte V., 2008 - Interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique. Approche descriptive, analyse fonctionnelle et modélisation hydrologique appliquées au bassin versant expérimental du *Conlazon, Causse d'Aumelas*, France. Université Montpellier II.

Bailly-Comte V., Martin J.B., Jourde H., Sreaton 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

Barbieri M., Boschetti T., Petitta M., Marco T., 2005 - Stable isotope ( $2\text{H}$ ,  $18\text{O}$  and  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ ) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Appl. Geochem.* 20, 2063-2081.

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 : Faciès, 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.

Benedicto, A., Labaume, P., Séguret, M., Séranne, M., 1996 - Low-angle crustal ramp and basin geometry in the Gulf of Lion passive margin: Oligocene-Aquitainian Vistrenque graben, SE France. *Tectonics* 15, 1192–1212.

Berger, G., Lefebvre, A., Turc, R., Gras, H., Poidevin, J.-L., Arène, J., Guérangé, B., Pellet, J., 1978. Carte géologique de la France - Alès.

Biju-Duval, B., 1999 - Géologie sédimentaire. Editions OPHRYS.

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., Cluzon 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.

Bosredon S., 1985 - Essai de synthèse sur l'hydrogéologie des karsts des hauts bassins versants du Gard, de la Cèze et de la rive droite de l'Ardèche. Thèse présentée à l'université des sciences et technique du Languedoc pour obtenir le grade de docteur d'université.

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

Brénot A., Carignan J., France-Lanord C., Benoît M., 2007. Geological and land use control on  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of river dissolved sulfate: The Moselle river basin, France. *Chemical Geology* 244 (2007) 25–41.

BRGM- 1980 Carte Géologique de la France au 1/50000. N°913. Pont Saint Esprit par Diamani L., Masse J.-P., Philip J., Trochetti G., Triat J.-M., Truc G., Vogt J., Bazille F., Humbert S., Anglada R. Eds BRGM.

BRGM, 1989. Carte Géologique de la France au 1/50000. N°888 Besèges par Elmi S., Brouder P., Berger G., Gras H., Busnardo R., Berard P., Vautrelle C. Eds BRGM.

BRGM, 2011. Ressource en eau thermale de la station des Fumades à Allègre. Etat des lieux. Rapport Final. BRGM/RP-59873-FR. Eds BRGM.

- 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'exsurgence 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.
- Cailhol D., 2014 - Documentation du fonctionnement des différents aquifères et systèmes karstiques des Gorges de l'Ardèche - Suivi hydrologique 2012-2013.
- 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.
- Celle H., 2000. Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée occidentale. Approche isotopique et chimique, thèse, université d'Avignon, 2000, 222p.
- Celle H., Daniel M., Mudry J., Blavoux B., 2000. Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud-Est de la France). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes* 331 647-650.
- Celle-Jeanton H., Travi Y., Loÿe-Pilot M.-D., Huneau F., Bertrand G., 2009. Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France) : Local contribution versus long-range supply.
- Hoefs J., 1996. Stable isotope geochemistry. 4th edition. Springer.
- Cèze Cévennes, communauté des communes, le printemps de l'eau (13 mai 2015 journée tables rondes et échanges, St-Ambroix).
- Chapman J.B., Lewis B., Litus G., 2003 - Chemical and isotopic evaluation of water sources to the fens of southPark, Colorado. *Environ. Geol.* 43, 533-545.
- Chapuis H., Jolivet J., Paran F., Ré-Bahuaud J., Guy B., Graillet D., 2014 - Méthodologie pluridisciplinaire pour l'étude des interactions karst/rivière - Cas de la Cèze. Colloque E3D, Ecole des Mines d'Alès, p. 8.
- Chapuis H., 2015 – La Cèze et l'Ardèche : Sœurs ou cousines ? Conférence du 23/09/15 au Grand Aven d'Orgnac organisée par l'associatif de spéléologues d'Orgnac, d'Issirac et de Labastide (Gasoil).

Chapuis H., Ré-Bahuaud J., Jolivet J., Graillet D., Guy B., 2016 - Délimitation hydrogéologique par traçages artificiels entre 2 rivières d'un système karstique. Communication à la conférence Eurokarst 2016 à Neuchâtel.

Chapuis H., 2017 - Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières – Application à la Cèze (Gard, France). Thèse de doctorat de l'Univ. De Lyon soutenue aux Mines de Saint-Etienne, 403p.

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.

Coplen T.B., Herczeg A.L., Barnes C., 2000 - Isotope engineering – using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: Cook, P.G., Herczeg, A.L. (Eds), *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 79-110.

Cotillon, P., Ferry, S., Busnardo, R., Lafarge, D., Renaud, B., 1979 - Synthèse stratigraphique et paléogéographique sur les faciès urgoniens du Sud de l'Ardèche et du Nord du Gard (France SE). *Geobios* 12, 121–139.

Coutouis A., Savary M., Chapuis H., Johannet A., Salze D., Vayssade B., Vinches M., Ré-Bahuaud J., Paran F., Graillet D., Jolivet J., & Cadilhac L., 2015 - Characterization of karst/river exchanges thanks to rainfall runoff modelling and sorted water levels : Case study of Cèze river with the karst plateau of Méjannes-le-Clap, France. Poster présenté à la conférence KG@B International Conference on Groundwater in Karst, 20-26 June 2015, Birmingham, UK.

Coutouis A., 2015 - Analyse et traitement de la base de données pluie-hauteur en vue de simulation des hauteurs par réseaux de neurones. Cas du bassin versant de la Cèze. Stage de master 2 effectué aux Mines d'Alès (LGEI) et soutenu à l'Université de Poitiers.

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'Orgnac, valorisation touristique, apports scientifiques.

Douvillé, H., 1918 - Le barrémien supérieur de brouzet: Les rudistes, XVIII. *Bulletin de la Société géologique de France, Paléontologie*.

Eurisouke S., 2006 - Prédiction des crues par réseaux de neurones formels. rapport de stage de master 2 professionnel géotechnologie environnementale.

Fabre G., 1972 - Les Garrigues Septentrionales du Gard. Étude de géomorphologie karstique. Thèse de 3<sup>ème</sup> 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.

- Fabre, G., 1990 - La catastrophe hydrologique éclairée de Nîmes (3 octobre 1988). The Nimes flash flood on October 3, 1988. Bulletin de l'Association de Géographes Français 67, 113–122.
- Faillat J-P., Lancelot J., Verdoux P., 2003 – L'apport d'isotopes du milieu ( $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{34}\text{S-SO}_4$ ) à la détermination de l'origine des sulfates des écoulements thermo-minéraux et côtiers. Exemples des sources du Synclinorium de Saint-Paul de Fenouillet et du littoral des Corbières. 10<sup>ème</sup> journée technique du Comité Français de l'AIF, Carcassonne, p 97 – 104.
- Faroux J., 2015 - La rivière Cèze et ses émergences karstiques au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap (Gard) - Analyse et traitement du signal appliqué aux séries chronologiques (hauteurs/débits, conductivités et températures) en vue de quantifier les échanges karst-rivière. Stage de master 2 effectué aux Mines d'Alès (LGEI) et soutenu à l'Université de Poitiers, 50p.
- 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.
- Fournillon A., 2012 - Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Var et Bouches-du-Rhône, SE France). Aix-Marseille Université.
- 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.
- Gurrieri J.T., Furniss G., 2004 - Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. J. Hydrol. 297, 187-208.
- 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
- Hausdorff J.M., Purdon P.L., Peng C.K., Ladin, Z., Wei J.Y. & Goldberger A.R., 1996- Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuation. Journal of Applied Physiology, 80, pp. 1448-1457.
- 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 Cèze 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.

Johannet A., Taver V., Kong A Siou L. et al., 2012 - Les réseaux de neurones artificiels pour la modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques. *Karstologia* n°60, pp. 45-59.

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 mio-pliocène. *Physio-Géo* 2, 53–75.

Jolivet J., 2011 - Comparaison de l'évolution endokarstique du réseau de Camelié 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.

Jolivet J., Chapuis H., Ré-Bahuaud J., Graillot D., Guy B., Van den Broek E., 2017 – Évolution paléogéographique et karstogenèse du bassin d'Issirac (Gard, France) du Crétacé supérieur au Miocène inférieur. <hal-01612184>

Jones C.E., Jenkyns H.C., Coe A.L., Hesselbo S.P., 1994. Strontium intrusion and associated variations in Jurassic and Cretaceous seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 58, 3061-3074.

Kendall C., Caldwell E.A., 1998 - Fundamentals of isotope geochemistry. In : Kendall C., McDonnell J.J. (Eds), *Isotope tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam, 51-86.

Khaska M., Le Gal La Salle C., Lancelot J., Aster Team, Mohamad A., Verdoux P., Noret A., Simler R., 2013. Origin of groundwater salinity (current seawater vs. saline deep water) in a coastal karst aquifer based on Sr and Cl isotopes. Case study of the La Clape massif (southern France). *Applied Geochemistry* 37, 212-227.

Khomsis, S., Bédier, M., Ben Jemia, M.G., Zouari, H., 2004 - Mise en évidence d'un nouveau front de chevauchement dans l'Atlas tunisien oriental de Tunisie par sismique réflexion. Contexte structural régional et rôle du Trias salifère. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 1401–1408. doi:10.1016/j.crte.2004.06.007.

Kong A Siou L., 2011 - Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). *Hydrology*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011. French. <tel-00649103>



- 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.
- Labat D., Ababou R., Mangin A., 2000 - Rainfall-runoff relations for karstic spring. Part II: continuous wavelet and orthogonal multi resolution analyses, *Journal of Hydrology*, 238, pp. 149-178.
- Labat D., Ababou R., Mangin A., 2002 - Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques – Multi resolution cross-analysis of rainfall rates and karstic spring runoffs. *Comptes Rendus Geosciences*, 334(8), pp.551-556.
- Lacassin, R., Meyer, B., Benedetti, L., Armijo, R., Tapponnier, P., 1998 - Signature morphologique de l'activité de la faille des Cévennes (Languedoc, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 326, 807–815. doi:10.1016/S1251-8050(98)80247-4.
- Ladouche B., Aquilina L., Dörfliger N. 2009. Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996-2002) : potential use as input signal for karst functioning investigation.
- 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.
- Lang C., 2007 - Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Université de Metz, 375p.
- Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O., 1998 - Contribution of correlation and spectral analyses to the region study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of hydrology* 205 (1998) 217-231.
- Lavastre, V., Ader, M., Buschaert, S., Petit, E., Javoy, M., 2011 - Water circulation control on carbonate- $\delta^{18}\text{O}$  records in a low permeability clay formation and surrounding limestones: The Upper Dogger-Oxfordian sequence from the eastern Paris basin, France. *Applied Geochemistry* 26, 818–827. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.02.003
- Lee D. R., Cherry J. A., 1978 - A field exercise on groundwater seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education*, 27: 6-10.
- Lemoine M., 1972 - Rythme et Modalités des Plissements Superposés dans les Chaînes Subalpines Méridionales des Alpes Occidentales Françaises. *Geol Rundsch* 61, 975 1010. doi:10.1007/BF01820902.
- Lickorish W.H., Ford, M., 1998 - Sequential restoration of the external Alpine Digne thrust system, SE France, constrained by kinematic data and synorogenic sediments. *Special publication-geological society of London*, 134, 189–212.
- Maillet E., 1905 - Essais d'hydraulique souterraine et fluviale, pp. 218, Librairie Sci., A. Hermann, Paris. ISBN-13: 978-1161872910
- Mangin A., 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique.

- Mangin A., 1970 – Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrues et de tarissement. *Annales de Spéléologie*, 25, 3 p. 581 – 609.
- Mangin A., 1981 - Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *CR Acad. Sci. Paris*, 293, pp.401-404.
- Mangin A., 1981 – Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *c.r.a.s. paris, série ii*, 293, p. 1011-1014.
- 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.
- Mangin A., 2008 - Caractérisation des propriétés des systèmes karstiques d'après l'étude des écoulements (A. Mangin CFH - colloque hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller 17 mai 2008).
- Mangin A., Razack M., Banton O., 1998 - Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *journal of hydrology* 205, 217-231.
- Masse, J.-P., Triat, J.-M., Truc, G., Humbert, S., Damiani, L., Philip, J., Tronchetti, G., Vogt, J., Bois, J.-J., 1980. Carte géologique de la France - Pont-Saint-Esprit.
- Maréchal J.C., Etcheverry D., 2003 - The use of  $^3\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$  tracers to characterize water inflows in alpine tunnels. *Appl. Geochem.* 18, 339-351.
- MARNADE, 2009 - Source de Marnade.  
Site internet : [www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm](http://www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm)
- Marsaud B., 1997 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse Université Paris XI Orsay.
- 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.
- Mattauer, M., 1973 - Le rôle des décrochements tardi-hercyniens dans l'évolution sédimentaire et tectonique de la couverture du socle hercynien. *Réunion Ann. Sci. Terre*, Paris 291.
- Mattauer, M., 1968 - Les traits structuraux essentiels de la chaîne Pyrénéenne. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique* 10, 3–11.
- Mattauer, M., Malavieille, J., Calassou, S., Lancelot, J., Roger, F., Ziwen, H., Zhiqin, X., Liwei, H., 1992 - La chaîne triasique de Songpan-Garze (ouest Sechuan et est Tibet): Une chaîne de plissement-décollement sur marge passive. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 314, 619–626.

Mattauer, M., Matte, P., 1998 - Le bassin Stéphaniens de St-Etienne ne résulte pas d'une extension tardi-hercynienne généralisée: c'est un bassin pull-apart en relation avec un décrochement dextre. *Geodinamica Acta* 11, 23–31.

Marmonier, P., Dole-Olivier, M.-J., Creuzé des Châtelliers, M., Chapuis, H., Ré-Bahuaud, J., Johannet, A., Cadilhac, L., 2017. Apport des zones d'échanges entre eau de surface et eau souterraine à la biodiversité des cours d'eau. Exemple d'une rivière méditerranéenne, la Cèze. *Physio-Géo* 18. (à paraître)

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.

Mercier, J., Vergely, P., Missenard, Y., 2011 - Tectonique.

Meylan P., Favre A.-C., Mussy A., 2008 - Hydrologie fréquentielle, une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes.

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.

Molliex, S., 2009 - Caractérisation de la déformation tectonique récente en Provence (SE France). *Tectonics*. Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III.

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

Paran F., Arthaud F., Bornette G., Graillot 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.

Pascal, M., Elmi, S., Busnardo, R., Lafarge, D., Truc, G., Valleron, M.-M., Chedhomme, J., Combiér, J., 1989. Carte géologique de la France - Bourg-Saint-Andéol.

Payne, B.R., 1991. On the statistical treatment of environmental isotope data in hydrology. In: *Isotope technics in water resources development*, IAEA-SM 319/36, pp273-290.

Paytan A., Gray E.T., Ma Z., Erhardt A., Faul K., 2011. Application of sulphur isotopes for stratigraphic correlation. *Isotopes in Environmenta and health Studies*, 1-2 First.

Pellat, E., 1903 - Le Néocomien (Valanginien et Hauterivien) et le Barrémien entre Mons et Brouzet (Gard); quelques mots sur les faciès urgoniens de Martigues et d'Apt; sur l'Aptien des environs d'Uzès, et le Barrémien de Lussan (Gard). *Bulletin de la Société géologique de France (4ème série)* 3, 119–127.

Pellat, E., Cossmann, M., 1907 - Le Barrémien supérieur à faciès urgonien de Brouzet-les-Alès (Gard). Mémoire de la Société Géologique de France, Paléontologie 37, 5–42.

Penna D., Stenni B., Sanda M., Wrede S., Bogaard T.A., Gobbi A., Borga M., Fischer B.M.C., Bonazza M., Charova Z., 2010. On the reproductibility and repetability of laser absorption spectroscopy measurements for  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic analysis. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 7, 2975-3014.

Peyraube N., Lastennet R., Denis A., 2012 – Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of karstic massif, using the PCO<sub>2</sub> – Sic relationship. Journal of Hydrology 430 – 431 (2012) p13 – 24.

Philippe, Y., 1995 - Rampes latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées: géométrie, condition de formation et pièges structuraux associés. Université de Savoie.

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.

Publications SHF (Société Hydrotechnique de France), 2014 - Etiages et crues extrêmes régionaux en Europe – perspectives historiques (Colloque d'Hydrotechnique, 175eme session du Comité Scientifique et Technique Lyon 28-29 Janvier 2004).

Rademacher L.K., Clark J.F., Hudson G.B., 2002 - Temporal changes in stable isotope composition of spring waters: implications for recent changes in climate and atmospheric circulation. Geology 30, 139-142.

Rapport ABCèze, 2011 - Détermination des volumes prélevables maximum sur le bassin versant de la Cèze.

(a) Ré-Bahuaud J., Jolivet J., Paran F., Chapuis H., Guy B., Graillot 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 Méjannes-le-Clap. Colloque E3D, Ecole des Mines d'Alès.

(b) Ré-Bahuaud J., Jolivet J., Marmonier P., Johannet A., Graillot D., Paran F., Chapuis H., 2014 - Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique. Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30). Rapport provisoire Années 1 et 2 (2013 – 2014). Rapport 113p., Annexes 43p.

(c) Ré-Bahuaud J., Graillot D., Paran F., Chapuis H., 2014 - Identification des échanges entre karst et rivière - Analyses d'images Infra Rouges Thermiques et de profils de conductivité sous SIG. Conférence Francophone ESRI, Versailles 1 et 2 octobre 2014, 5p.

(d) Ré-Bahuaud, J., H. Chapuis, B. Guy, D. Graillot, F. Paran, S. Gaur, J. Jolivet, M. Savary, A. Johannet, D. Salze, B. Vayssade; M. Vinches, L. Cadilhac, 2014 - Étude et caractérisation des échanges entre karst et rivières : cas de la Cèze et de ses échanges avec le plateau de Méjannes-le-Clap (France, Gard). Communication sous forme de poster à la 7<sup>ième</sup> Conférence internationale FRIEND-WATER 2014.

(e) Ré-Bahuaud J., Paran F., Guy B., Marmonier P., Johannet A., Salze D., Lavastre V., Mayer A., Radakovitch O., Wawrzyniak V., Chapuis H., Jolivet J., Graillot D., Piegay H., 2016 - Vers une méthodologie pour un diagnostic pluridisciplinaire des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux

- souterraines en domaine karstique. Exemple de la Cèze au niveau du plateau de Méjannes-le-Cap (Gard, France). Communication à la conférence Eurokarst 2016 à Neuchâtel.
- (f) Ré-Bahuaud J., Lavastre V., Chapuis H., Jolivet J., Le Gal La Salle C., Graillet D., 2016 - Caractérisation hydrogéochimique (ions majeurs et isotopes) des échanges entre karst et rivière. La rivière Cèze et ses émergences karstiques au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap (Gard, France). Communication à la conférence Eurokarst 2016 à Neuchâtel.
- (g) Ré-Bahuaud J., Wawrzyniak V., Chapuis H., Jolivet J., Graillet D., Piegay H., 2016 - Caractérisation des échanges entre karst et rivière par imagerie infrarouge thermique (IRT) aéroportée. La rivière Cèze et ses émergences karstiques au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap (Gard, France). Communication à la conférence Eurokarst 2016 à Neuchâtel.
- Réméniéras, 1986 - Hydrologie de l'ingénieur, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Ed. Eyrolles, 456p.
- Rodier J.A., Roche M., 1984 - Répertoire mondial des crues maximales observées, AISH, Wallingford (UK), n°143.
- Sadaoui M., Ludwig W., Bourrin F., Raimbault P., 2016. Controls, budgets and variability of riverine sediment fluxes to the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea). *Journal of Hydrology* 540 1002-1015.
- Salomon J.-N., 2006 - Précis de karstologie. Presses universitaires de Bordeaux, Pessac (Gironde).
- Sanchis, E., Séranne, M., 2000 - Structural style and tectonic evolution of a polyphase extensional basin of the Gulf of Lion passive margin: the Tertiary Alès basin, southern France. *Tectonophysics* 322, 219–242. doi:10.1016/S0040-1951(00)00097-4.
- Savary M., 2014 - Inventaire, critique, analyse et traitement de la base de données pluie-hauteur en vue d'une instrumentation du Bassin versant de la Cèze (Gard). Rapport de Maser 2, Hydrogéologie et Transferts de l'Université de Poitiers, 69p.
- Seal II R.R., 2006. Sulfur Isotope Geochemistry of sulfide Minerals. USGS Staff – Published Research. 345.
- Secretan Y., Leclerc M., Duchesne S., Heniche M., 2001 – Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 14, n° 2, 2001, p. 187-212.
- Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van De Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., Parlange, M.B., 2006 - Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research* 42.
- Séranne, M., Camus, H., Reynaud, J.-Y., 2011 - Evolution post-rift du golfe du Lion en Languedoc: une marge pas si passive que ça!
- Schoen R., Bakalowicz M., Ladouche B., Aquilina L. 2004 - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpelliérains. Rap. BRGM R 40939 volume III, 91 p., 16 fig., 4 annexes.

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. Édit. Société Cévenole de Spéléologie et de Préhistoire d'Alès (SCSP), 2 tomes, 96 et 144 p.

Strauss H., 1997. The isotopic composition of sedimentary sulfur through time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132 97-118.

Taver V., 2014 - Caractérisation et modélisation hydrodynamique des karsts par réseaux de neurones. Application à l'hydrosystème du Lez. Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université de Montpellier.

Thode H.G., 1991. Sulphur isotopes in Nature and the Environment: An overview. In : *Stable Isotopes in the Assessment of natural and anthropogenic Sulphur in the environment*. H.R. Krouse and V.A. Grinenko. 1999.

Torcapel, A., 1882 - Sur l'Urgonien du Languedoc. *Bull. Soc géol. Fr* 11, 72–77.

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](http://www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm)

Verdoux P., Lancelot J., Faillat J.-P., 1995 – Traçage de l'origine des eaux karstiques en bordure d'un massif cristallin à l'aide des isotopes du strontium. Exemple des causses lozériens (France). *C.R. Acad. Sci. Paris t. 230, série II a*, p. 387 – 394.

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

Site internet : [www.plongeesout.com/explorations/explorations.htm](http://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 : Situation hydrologique de la rivière Cèze lors des campagnes de jaugeages de 2015 (données SPC/vigicrue).....	22
Figure 2 : Résultats de jaugeages des principales sources d'avril à août 2015 .....	23
Figure 3 : Coefficients de tarissement calculés pour la période de tarissement de 2014 et de 2015 pour les sources.....	25
Figure 4 : Volume dynamique des sources en phase de tarissement calculé pour l'année 2015.....	26
Figure 5 : Bilan par tronçon des gains et pertes de la Cèze pour les situations hydrologiques d'avril, juin, juillet et août 2015.....	27
Figure 6 : Apports d'origine karstique à la rivière Cèze : comparaison entre apports totaux et apports « karst aval ».....	28
Figure 7 : A) Profil de débit de la rivière Cèze ; B) Rôle du karst sur la rivière (débit initial soustrait). Les campagnes de jaugeages représentées correspondent aux périodes du 15 au 17 avril 2015, du 8 au 9 juin 2015, du 21 au 22 juillet 2015 et du 2 au 4 août 2015.....	30
Figure 8 : Ajustement de fonctions exponentielles décroissantes pour modéliser le tarissement du karst en prenant pour scénarios de conditions initiales deux événements de recharge par les précipitations. ....	31
Figure 9 : Ajustement de fonctions exponentielles décroissantes pour modéliser le tarissement du karst et des tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34 en prenant pour scénarios de conditions initiales deux événements de recharge par les précipitations .....	32
Figure 10 : Coefficients de tarissement $\alpha$ déduits des ajustements de fonctions exponentielles après le 2 <sup>ème</sup> événement pluvieux (Figure 8 et Figure 9) pour le karst et les tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34. ....	33
Figure 11 : Volumes dynamiques calculés pour les tronçons pk5-14, pk16-26 et pk 26-34.....	33
Figure 12 : Analyse fréquentielle des sources à partir des données de conductivité électrique enregistrées par les sondes LTC F30M10 sur la période du 09/2013 au 04/2016.....	34
Figure 13 : Analyse fréquentielle des sources à partir des données de température enregistrées par les sondes LTC F30M10 sur la période du 09/2013 au 04/2016.....	36
Figure 14 : Méthode des débits cumulés classés sur la source d'Ussel pour une période couvrant le cycle hydrologique de 2015 (du 10/2015 au 09/2016). ....	37
Figure 15 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de pluies de Méjannes-le-Clap obtenues par MétéoFrance.....	39
Figure 16 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de débits mesurées in situ de la source Ussel. ....	39
Figure 17 : Analyse autocorrélatrice à partir des données de débits mesurées in situ de la source Monteil.....	40
Figure 18 : Analyse corrélatoire croisée entre les débits des sources Ussel et Monteil et les pluies de Méjannes-le-Clap.....	40
Figure 19 : Représentation du débit maximal que peut atteindre la source d'Ussel en fonction de l'intensité pluvieuse sur 1 heure selon le débit initial de la source d'Ussel. Les points verts représentent un système karstique en période de tarissement ; les points noirs représentent un réseau karstique en	

vidange ; les points jaunes sont des points intermédiaires entre ces 2 états. Les classes : HIK 1 = classe 1 ; HIK 2 = classe 2 et HIK 3 = classe 3 représentent respectivement l'état hydrique du karst (période de basses eaux à hautes eaux). .....	43
Figure 20 : architecture du modèle à partir du logiciel RNF Pro (développé par Dominique Bertin) .....	45
Figure 21 : Profil longitudinal altimétrique du lit de la Cèze d'amont à l'aval du domaine karstique et altitude d'émergence des sources. Les sources à l'amont de Marnade suivent le profil altimétrique de la Cèze, les sources à l'aval de Marnade sont alignées sur la cote altimétrique 76 mètres.....	52
Figure 22 : Coupes schématisques (échelle non respectée) à l'aval du canyon de la Cèze illustrant le lien entre le fonctionnement hydrodynamique des sources aval et le contexte géologique et géomorphologique (spéléogénèse). La localisation du trait de coupe est exposée en Carte 3.....	54
Figure 23 : Lien entre l'hydrogramme et les circulations karstiques à l'origine de la diversité des fonctionnements exprimée aux niveaux des émergences karstiques du plateau de Méjannes-le-Clap. ....	55
Figure 1 : Chronique de restitution du traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rochegude.....	59
Figure 25 : Log stratigraphique du remplissage du fossé d'Alès [Sanchis et Séranne, 2000]. .....	68
Figure 26 : a- Précipitations et températures à Méjannes-le-Clap en 2014 et b-précipitations des mois d'avril et c- juillet 2014. d- Précipitations et température à La Grand Combe en 2015 et e- précipitation du mois de juin 2015. ( <a href="https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/historique-consultation/mejannes-le-clap/2994725">https://www.terre-net.fr/meteo-agricole/historique-consultation/mejannes-le-clap/2994725</a> ).....	70
Figure 27 : Evolution de la conductivité le long de la rivière de la Cèze (cercles), de ses affluents (triangles), des sources en rive droite (losanges) et les sources en rive gauche (carrés). Les données obtenues sur les trois campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015 sont reportées. ....	78
Figure 28 : Diagramme de Piper. Sont reportées les données pour les eaux collectées lors des trois campagnes d'échantillonnage juillet 2014, juin 2015 et juillet 2015. Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze. ....	79
Figure 29 : Diagrammes de Schoeller pour les 3 campagnes de prélèvements. La zone grisée représente le domaine des eaux de pluies collectées dans le Gard au nord de Nîmes [Ladouche et al., 2009].....	81
Figure 30 : a- rCa (meq/L) vs conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et b- rHCO <sub>3</sub> (meq/L) vs conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.....	83
Figure 31 : rCa (meq/L) vs rHCO <sub>3</sub> (meq/L) (a) et rCa vs rMg (meq/L) (b). Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze. ....	84
Figure 32 : a- rNa vs rMg et b et c- rNa vs rCl pour les eaux des trois campagnes de prélèvement. Les symboles « cercle » correspondent aux eaux de la Cèze, les symboles « losange » aux eaux des sources rive droite et les symboles « étoile » aux sources rives gauches, les triangles correspondent aux affluents de la Cèze.....	85
Figure 33 : rMg vs rSO <sub>4</sub> pour les trois campagnes d'échantillonnage. ....	88
Figure 34 : $\delta\text{D}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de la Cèze des sources et des affluents rencontrés sur le secteur de Rochegude à La Roque sur Cèze. La ligne grise représente l'évolution des $\delta$ pour un mélange entre les eaux de la Cèze (Pôle amont) et les eaux des sources karstiques (pôle Source), la droite est graduée de 10 en 10 % (juillet 2014). ....	89
Figure 35 : $\delta\text{D}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les eaux de la Cèze des sources et des affluents rencontrés sur le secteur de Rochegude à La Roque sur Cèze. La ligne grise représente l'évolution des $\delta$ pour un mélange entre	



les eaux de la Cèze (Pôle amont) et les eaux des sources karstiques (pôle Source), la droite est graduée de 10 en 10 % (juin 2015) .....	92
Figure 36 : Evolution du $\delta^{34}\text{S}$ des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle.....	96
Figure 37 : Evolution du $\delta^{34}\text{S}$ des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juillet 2014, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique données par Strauss (1996) pour les précipitations à l'intérieur des terres. ....	97
Figure 38 : Evolution du $\delta^{34}\text{S}$ des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors des campagnes de juin 2015, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique données par pour les précipitations à l'intérieur des terres. ....	99
Figure 39 : Evolution du $\delta^{34}\text{S}$ des ions sulfates sur les eaux collectées le long du linéaire Cèze lors de la campagne de juillet 2015, en fonction de l'inverse de la concentration en ions sulfates en mg/L. Les échantillons de la Cèze sont représentés par un cercle, les échantillons des sources rive droite par un losange, les sources rive gauche par un carré et les affluents par un triangle. Le domaine des précipitations est défini à partir des concentrations en ions sulfates reportées par Ladouche et al. [2009] pour les précipitations du Gard et par la plage isotopique donnée par Strauss [1990] pour les précipitations à l'intérieur des terres. ....	101
Figure 40 : Evolution de la contribution des eaux du karst à l'alimentation du débit de la Cèze en juillet 2015. Points bleus –stations de la Cèze, points orange : sources analysées, points gris : sources recensées mais non analysées. Les proportions d'apport ne sont pas calculées pour ces dernières sources, les points reportent seulement leur position sur le linéaire de la Cèze. ....	103
Figure 41 : Inverse de la concentration en Sr vs Rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour une partie des échantillons prélevés lors de la campagne de juillet 2015. Les domaines isotopiques des roches sédimentaires sont reportés à partir de Jones et al. [1994] et les données pour les précipitations sont issues de Khaska et al. [2013].....	106
Figure 42 : ULM supportant la caméra thermique (VarioCAM® hr research – Infratec) (Photo : V. Wawrzyniak) .....	111
Figure 43 : Variation de température de la rivière Cèze au niveau de 6 points de suivi. L'encadré de couleur noire représente la fenêtre d'acquisition des clichés thermiques. La localisation des points de suivi est présentée en Carte 12. ....	112
Figure 44 : Image IRT du 03/09/14 au niveau des sources d'Ussel et de la fabrique (entre les points kilométriques 27,5 et 28,5). Le fond de carte est issu de la BD-ORTHO. Les températures supérieures à 23°C ont été filtrées. ....	115
Figure 45 : Profil de température et de débit de la rivière Cèze le 03/09/14. Les températures, symbolisées par des points, ont été extraites et des images IRT et se lisent sur l'axe gauche des ordonnées. Les débits, symbolisés par des carrés, ont été mesurés (courantomètre EM) sur 6 tronçons de la rivière et se lisent sur l'axe droit des ordonnées.....	116
Figure 46 : Comparaison des débits des sources estimés grâce au profil thermique de la rivière du 03/09/14 avec les débits mesurés par jaugeage (courantomètre EM) .....	117

Figure 47 : Évolution des débits spécifiques en fonction de la superficie des bassins cévenols, normalisé par la superficie d'un bassin moyen : celui du Gardon de Mialet à Mialet (Gard) .....	124
Figure 48 : Évolution des débits spécifiques le long du linéaire de la Cèze. ....	126
Figure 49 : Cumuls annuels des pluies moyennes mesurées sur l'ensemble du bassin versant de la Cèze estimé à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen sur les stations de Sénéchas, Tharoux, Montclus et Bagnols-sur-Cèze. ....	127
Figure 50 : Filtres « pluie-débit » (intégrateur) pour le modèle du premier ordre, équivalent de la loi de Maillet [Kong A Siou JoH].....	128
Figure 51 : Hydrohyétogrammes du modèle 1 (bassin A) avec les jeux de paramètres $P_1, P_2, P_3, P_4$ , ainsi que les débits mesurés. ....	131
Figure 52 : Hydrohyétogrammes du modèle 1 (bassin A) avec les jeux de paramètres, $P_1, P_5, P_6, P_7$ , ainsi que les débits mesurés. ....	131
Figure 53 : Corrélogrammes simples des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ pour l'année hydrologique HY1997. ....	132
Figure 54 : Corrélogrammes croisés pluie/débit simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ pour l'année hydrologique HY1997.....	133
Figure 55 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire du sous-bassin A avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ pour l'année hydrologique HY1997. ....	134
Figure 56 : Effet de la pente. Hydrohyétogramme des débits simulés à l'amont et à l'aval de l'élément de liaison du Modèle 2 avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ .....	135
Figure 57 : Autocorrélogramme des débits simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ pour l'année hydrologique HY1997.....	136
Figure 58 : Corrélogrammes croisés pluie/débit simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_7$ pour l'année hydrologique HY1997.....	137
Figure 59 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire du Modèle 2 avec les jeux de paramètres $P_1$ à $P_3$ pour l'année hydrologique HY1997.....	137
Figure 60 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval obtenu avec les paramètres $P_1$ à $P_7$ , sur les débits amont calculés pour le jeu de paramètres $P_1$ uniquement, sur l'année hydrologique HY 1997.....	138
Figure 61 : Représentation schématique du modèle 3. ....	139
Figure 62 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 3 à l'exutoire du sous-bassin A et des 4 éléments de liaison.....	140
Figure 63 : Hydrohyétogrammes des Hauteur d'eau simulées par le Modèles 3 à l'exutoire du sous-bassin A et des 4 éléments de liaison. ....	140
Figure 64 : Autocorrélation des débits mesurés aux 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.	141
Figure 65 : Autocorrélation des hauteurs mesurées aux 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997. ....	141
Figure 66 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997. ....	142
Figure 67 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les hauteurs mesurées à chacune des 5 stations au cours de l'année hydrologique HY1997. ....	142
Figure 68 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 3 pour l'année hydrologique HY1997. ....	143

Figure 69 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.....	144
Figure 70 : Représentation schématique du modèle 4. ....	144
Figure 71 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 4 à l'exutoire des 4 sous-bassins.....	145
Figure 72 : Autocorrélation des débits mesurés aux 4 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.	146
Figure 73 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 5 stations, pour de l'année hydrologique HY1997. ....	146
Figure 74 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 4 pour l'année hydrologique HY1997. ....	147
Figure 75 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.....	147
Figure 76 : Représentation schématique du modèle 5. ....	148
Figure 77 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 5. ....	149
Figure 78 : Autocorrélation des débits mesurés aux 6 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.	150
Figure 79 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 6 stations, pour de l'année hydrologique HY1997. ....	150
Figure 80 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 5 pour l'année hydrologique HY1997. ....	151
Figure 81 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.....	151
Figure 82 : Représentation schématique du modèle 6. ....	152
Figure 83 : Hydrohyétogrammes des débits simulés par le Modèles 6 à l'exutoire des 4 sous-bassins.....	153
Figure 84 : Autocorrélation des débits mesurés aux 6 stations au cours de l'année hydrologique HY1997.	153
Figure 85 : Corrélations croisées entre les pluies sur le sous bassin A et les débits mesurés à chacune des 6 stations, pour de l'année hydrologique HY1997. ....	154
Figure 86 : Spectres d'amplitude des débits simulés à l'exutoire de chacun des sous-bassins du Modèle 5 pour l'année hydrologique HY1997. ....	154
Figure 87 : Rapport des spectres d'autocorrélations des débits aval/amont sur chacun des tronçons, sur l'année hydrologique HY 1997.....	155
Figure 88 : Synthèse des résultats qu'apporte chaque méthode sur le tronçon de la Cèze étudié .....	160
Figure 89 : Proposition d'une méthodologie pour analyse les échanges entre le karst et la rivière d'un hydrosystème karstique .....	161
Figure 90 : Représentation des circulations d'eaux souterraines dans le karst .....	164
Figure 91 : Résultats produits par les différentes méthodes d'analyses afin de comprendre le fonctionnement .....	169
Figure 92 : Apports karstiques à la Cèze le long des gorges karstiques; le signe + signifie des apports du karst; le signe - signifie des pertes vers le karst; le signe / signifie qu'il n'y a pas de données (l'incertitude pour le débit correspond à celle du matériel, elle peut être plus importante à cause de certaines sections accidentées) .....	172

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Les données d'entrées renseignées au modèle et les résultats (provisoires) .....	45
Tableau 2 : Résultats du modèle sans l'apport du débit d'Ussel en entrée .....	46
Tableau 3 : Résultats du modèle avec l'apport du débit d'Ussel en entrée.....	46
Tableau 5 : Synthèse des informations sur l'hydrodynamisme des émergences karstiques au niveau du canyon de la Cèze (calcaires à faciès urgonien) .....	49
Tableau 5 : Précipitations d'après le pluviographe (CNRS-UMR Espace 7300) installé au lieu-dit le Rieu (commune de Barjac).....	61
Tableau 6 : Liste des stations de prélèvement des eaux de la Cèze, de ses affluents et des sources. Pk signifie point kilométrique et exprime la distance en mètres de la station au point de repère qui est la station R2 (Pont de Rivière) .....	69
Tableau 7 : pH, température, conductivité, concentrations en éléments majeurs et en strontium, $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ , $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les eaux collectées dans la Cèze, les sources et les affluents lors des campagnes de juillet 2014, juin et juillet 2015.....	76
Tableau 8 : $\delta^{18}\text{O}$ calculés pour les précipitations du secteur d'étude à partir des données de (*) Celle et al. [2000]. Sont reportées les gammes de variation d'altitude des bassins versants (BV) des cours d'eau considérés. Le bassin versant amont de la Cèze comprend toute la zone géographique drainée par la Cèze et ses affluents en amont de la commune de Roche-gude.....	90
Tableau 9 : Calcul de mélange réalisés à partir des $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta\text{D}$ obtenus sur les eaux de la Cèze, des sources et des affluents en juin 2015. Les pôles de mélange considérés sont les eaux de la Cèze arrivant à l'amont de la zone d'étude et les eaux de sources karstiques représentatives d'un pôle pluie locale assimilées à la moyenne des propriétés $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ des sources S7 à S12 .....	93
Tableau 10 : Résultats des calculs de mélange à partir du jeu de données $[\text{SO}_4^{2-}] - \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ pour les eaux de la Cèze, des sources et des affluents collectées en juillet 2015 dans la zone d'étude. Les pôles de mélange considérés sont les eaux de R3 (rivière amont) et les eaux de S8 (pôle karstique). .....	103
Tableau 11 : Synthèse sur les masses d'eau mobilisées pour chacune des émergences karstiques investiguées (issue de la caractérisation géochimique) .....	109
Tableau 12 : Paramétrage des calculs de mélange par contraste thermique (valeurs de température issues du profil thermique en Figure 45) .....	118
Tableau 13 : Synthèse de la base de données.....	121
Tableau 14 : Bilan des hauteurs d'eau moyennes tombées sur les deux périodes d'observations définies	122
Tableau 15 : Bilan des pertes sur les différents sous bassins pour les deux périodes d'observations définies .....	123
Tableau 16 : Statistiques descriptives des sous-bassins de la Cèze. ....	125
Tableau 17 : Comparaison des inerties, telles que définies par A. Mangin [Mangin ,1975], du bassin versant de la Cèze à différentes stations, pour les hauteurs (Savary) et pour les débits (Bonnet). ....	128
Tableau 18 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method et Transform Method) pour les jeux de paramètres P <sub>1</sub> à P <sub>7</sub> du modèle 1.....	130
Tableau 19 : Valeurs des paramètres des fonctions de transfert (Routing Method) pour les jeux de paramètres P1 à P7 du modèle 2. ....	134
Tableau 20 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3. ....	139

Tableau 21 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3. ....	145
Tableau 22 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3. ....	148
Tableau 23 : Valeurs des paramètres des fonctions de production (Loss Method) et de transfert (Routing Method) pour le modèle 3. ....	152
Tableau 24 : Utilité des méthodes d'analyse pour déterminer les échanges entre le karst et la rivière .....	159

## 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].....	7
Carte 2 : Localisation des points de suivi (Fond IGN au 1/50 000 <sup>ème</sup> ). .....	22
Carte 3 : Localisation approximative du trait de coupe (trait plein de couleur noire) de la Figure 22 et contact entre les formations urgoniennes karstiques et le crétacé supérieur imperméable (trait tireté de couleur rouge) (fond géologique 1/50 000 <sup>ième</sup> BRGM Infoterre).....	53
Carte 4 : Quid du fonctionnement hydrodynamique dans la frange méridionale du plateau de Méjannes-le-Clap ? .....	56
Carte 5 : Résultat du traçage des pertes de la Cèze au niveau de Rochegude. Restitution enregistrée au niveau des sources de Font Canet, Monteil et les Baumes.....	60
Carte 6 : Résultat du traçage des pertes de la source du Garn. Restitution enregistrée au niveau de la source des Baumes.....	60
Carte 7 : Synthèse des traçages réalisés en rive gauche de la Cèze entre 2014 et 2016 .....	62
Carte 8 : Traçages réalisés dans la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap révélant des lacunes de connaissances sur la délimitation des aires d'alimentation des émergences et sur les directions des écoulements régionaux. ....	63
Carte 9 : Design expérimental des traçages sur la partie Sud du plateau de Méjannes-le-Clap visant à mieux délimiter les aires d'alimentation des émergences permanentes et à mieux définir les directions des écoulements régionaux. ....	64
Carte 10 : Carte géologique du bassin versant de la Cèze de sa source jusqu'à sa confluence avec le Rhône. Cartes géologiques n°887, 888, 912, 913, 914, 939 et 940 ( <a href="http://infoterre.brgm.fr">http://infoterre.brgm.fr</a> ). ....	66
Carte 11 : Localisation de l'échantillonnage pour les différentes campagnes de prélèvements géochimiques. ....	72
Carte 12 : Zone d'acquisition des clichés thermiques et localisation des points de suivi de la température en rivière.....	113
Carte 13 : Synthèse générale des écoulements dans le karst pour une situation hydrologique de basses eaux. ....	168

## TABLE DES MATIERES DES ANNEXES

---

<b>Annexes .....</b>	<b>198</b>
Annexe 1 : Photos du traçage de la Cèze .....	198
Annexe 2 : Traçages colorimétriques - Résultats brutes du laboratoire .....	203
Annexe 3 : Courbes de tarage des sources .....	232
Annexe 4 : Campagne d'acquisition d'images IRT du 3 septembre 2014 .....	233
Annexe 5 : Courbes de tarages fictives stations A, B, C, D, E.....	238

# Annexes

---

## Annexe 1 : Photos du traçage de la Cèze

---

- Injection en rivière le 21/07/15 à 00h00



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



- **Assec de la Cèze en aval du pont de Tharaux le 21/07/15 à 19h00**



*La Cèze tarie au niveau du pont de Tharaux le 21 juillet 2015 à 19h00 (photo : Joël Jolivet)*

- **Assec de la Cèze en amont de la source des Fées le 06/08/15**



*La Cèze tarie au niveau de la source des Fées le 6 août 2015*

- **Équipement de la source de Font Canet**



*Équipement de la source Font Canet par un fluorimètre de terrain et deux fluocapteurs (photo : Joël Jolivet)*



*Fluorimètre de terrain installé dans la source Font Canet*



*Fluocapteurs fabriqués pour les traçages*

## Annexe 2 : Traçages colorimétriques - Résultats brutes du laboratoire

---

**Moyen analytique** : Identification de colorants fluorescents par spectromètre de luminescence  
(Perkin Elmer – LS 50 B)

**Analyses réalisées par** : Sciences Environnement, 1 6B Boulevard Diderot 25 000 BESANCON  
Tèl : 03 81 53 02 60 – Fax : 03 81 80 01 08 E Mail : labo@sciences-environnement.fr



**Opérateur** : Claire PEIGNEY et Julie PERROT

**Demandeur** : Ecoles des Mines de Saint-Etienne

**Etude** : Projet ZABR – Agence de l'eau « Cèze »

**Spectre excitation / émission (dans l'eau) :**

- ..... Uranine  $\approx$  490 / 515 nm
- ..... Eosine Y  $\approx$  512 / 537 nm
- ..... Rhodamine B  $\approx$  551 / 576 nm

**Spectre émission (prenant en compte l'éluant pour fluocapteurs) :**

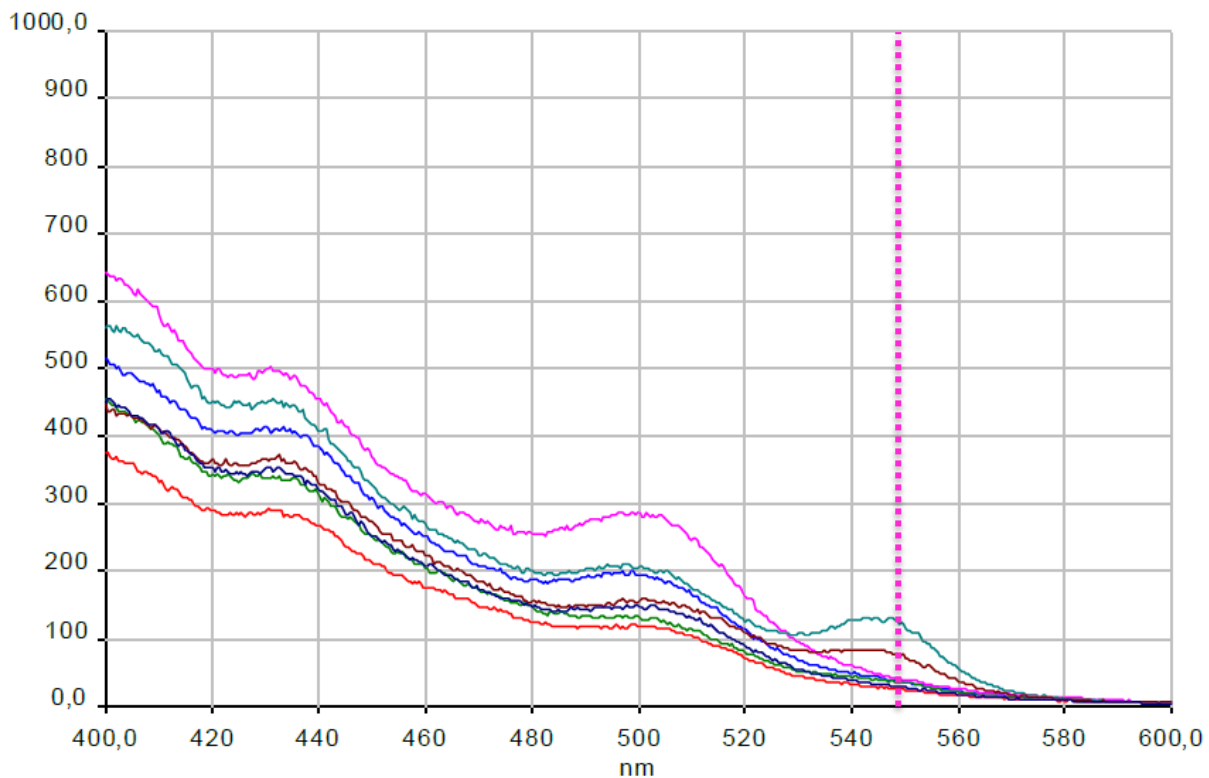
- ..... Uranine  $\approx$  494 - 496 nm
- ..... Eosine Y  $\approx$  518 - 520 nm
- ..... Rhodamine B  $\approx$  550 - 552 nm

- **Traçage des pertes de la source du Garn**

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source des Baumes** »

- |                  |   |                  |   |
|------------------|---|------------------|---|
| - 21/04/16 09h00 |  | - 04/05/16       |  |
| - 25/04/16 09h00 |  | - 06/05/16       |  |
| - 29/04/16 08h00 |  | - 09/05/16 08h00 |  |
| - 02/05/16 10h00 |  |                  |   |

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



- **Traçage des pertes de la Cèze**

→ Eau : Analyse réalisée les échantillons d'eau

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

Dénomination	Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine	Concentration en Rhodamine (µg/L)
FONT CANET	27/07/2015	09h	O	NO	∅	1,39	∅
	28/07/2015	08h	O	NO	∅	∅	∅
	30/07/2015	10h	O	NO	∅	∅	∅
	01/08/2015	09h	O	NO	0,08	∅	∅
	02/08/2015	10h	O	NO	0,17	∅	∅
	04/08/2015	08h	O	NO	0,40	∅	∅
CEZE AMONT VANMALE	27/07/2015	08h	O	NO	∅	∅	∅
	30/07/2015	09h	O	NO	∅	∅	∅
	02/08/2015	09h	O	NO	∅	∅	∅

Dénomination	Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
CANET	06/08/2015	9h30	OUI	NON	0,48	∅	∅
	07/08/2015	9h00	OUI	NON	0,53	∅	∅
	10/08/2015	9h30	OUI	NON	0,43	∅	∅
	13/08/2015	8h30	OUI	NON	0,31	∅	∅
	16/08/2015	10h00	OUI	NON	0,21	∅	∅
	24/08/2015	16h00	OUI	NON	∅	∅	∅
MONTEIL	10/08/2015	14h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	24/08/2015	17H30	OUI	NON	0,09	∅	∅
FEES	25/07/2015	10h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	28/07/2015	17h00	OUI	NON	∅	∅	∅
	30/07/2015	18h00	OUI	NON	∅	∅	∅
	06/08/2015	15h00	OUI	NON	∅	∅	∅
	11/08/2015	17h00	OUI	NON	∅	∅	∅
	15/08/2015	11h00	OUI	NON	∅	∅	∅
VANMALE	27/07/2015	8h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	30/07/2015	9h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	02/08/2015	9h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	07/08/2015	9h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	16/08/2015	9h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	24/08/2015	16h30	OUI	NON	∅	∅	∅

CEZE AMONT VANMALE	07/08/2015	9h30	OUI	NON	∅	∅	∅
	16/08/2015		OUI	NON	∅	∅	∅
	24/08/2015	16h30	OUI	NON	∅	∅	∅
TRAVE RS	07/08/2015	10h15	OUI	NON	∅	∅	∅
CEZE AMONT FOULATIER	06/08/2015	17h00	OUI	NON	∅	∅	∅
MOUL IN	24/08/2015	17h00	OUI	NON	∅	∅	∅
CEZE POINT PK3	06/08/2015		OUI	NON	∅	∅	∅
CEZE PK6 AVAL	06/08/2015	16h00	OUI	NON	∅	∅	∅

Dénomination	Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
CANET	02/09/2015	15h15	OUI	NON	∅	∅	∅
FEES	25/08/2015	15h00	OUI	NON	∅	∅	∅
VANMALE	02/09/2015	15h00	OUI	NON	∅	∅	∅
TRAVERS	02/09/2015	15h45	OUI	NON	∅	∅	∅
BAUMES	27/08/2015	10H30	OUI	NON	∅	∅	∅
	31/08/2015	10H15	OUI	NON	∅	∅	∅
	02/09/2015	18H15	OUI	NON	∅	∅	∅
CEZE AMONT FOULATIER	25/08/2015	9H00	OUI	NON	∅	∅	∅
MOULIN	31/08/2015	9H00	OUI	NON	∅	∅	∅
MONTEIL	27/08/2015	9H30	OUI	NON	0,84	∅	∅
	31/08/2015	8H45	OUI	NON	∅	∅	∅
	02/09/2015	17H00	OUI	NON	∅	∅	∅
FABRIQUE	31/08/2015	11H30	OUI	NON	∅	∅	∅
BASTIDE FROIDE	31/08/2015	11H00	OUI	NON	∅	∅	∅
USSEL	27/08/2015	11H00	OUI	NON	∅	∅	∅
MARNADE	31/08/2015	9H30	OUI	NON	∅	∅	∅
ILETTE	27/08/2015	10H00	OUI	NON	∅	∅	∅
	31/08/2015	8H30	OUI	NON	∅	∅	∅
	02/09/2015	16H45	OUI	NON	∅	∅	∅
FOULATIER	25/08/2015	9H00	OUI	NON	∅	∅	∅
GOUDARGUES	31/08/2015	10H30	OUI	NON	∅	∅	∅

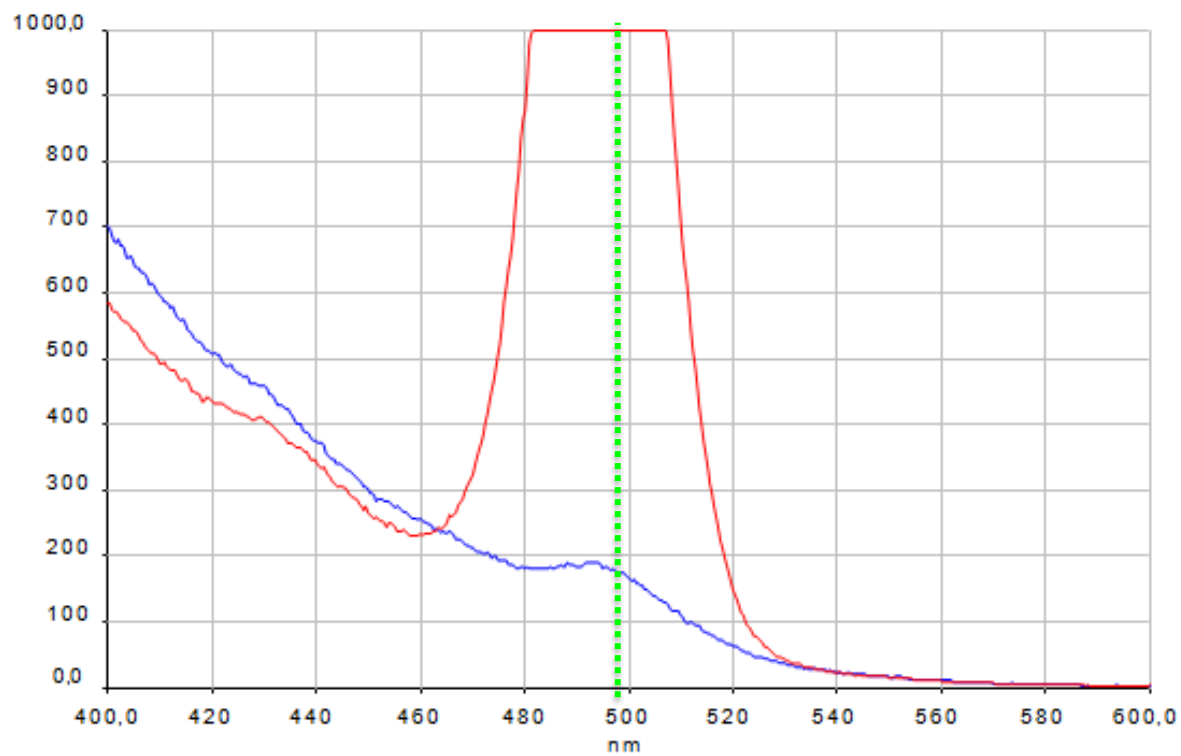
∅ Absence de colorant



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source de Font Canet »

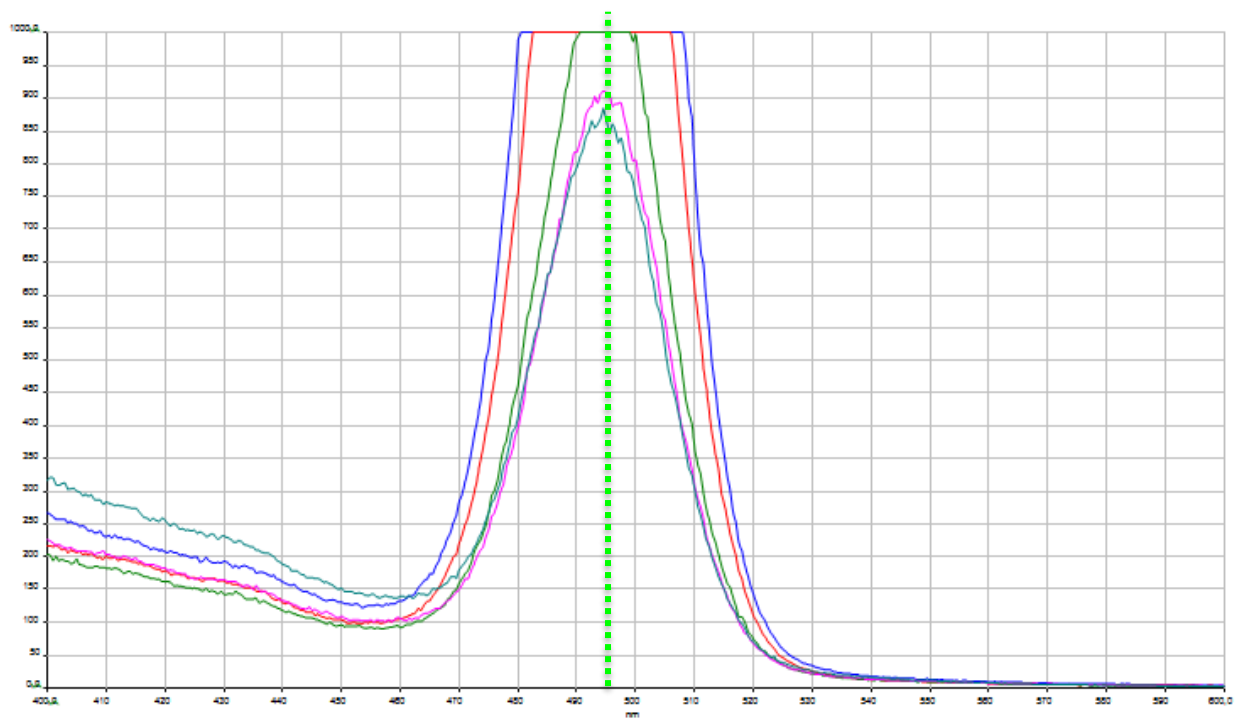
- 30/07/15 10h00 —
- 04/08/15 08h00 —

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

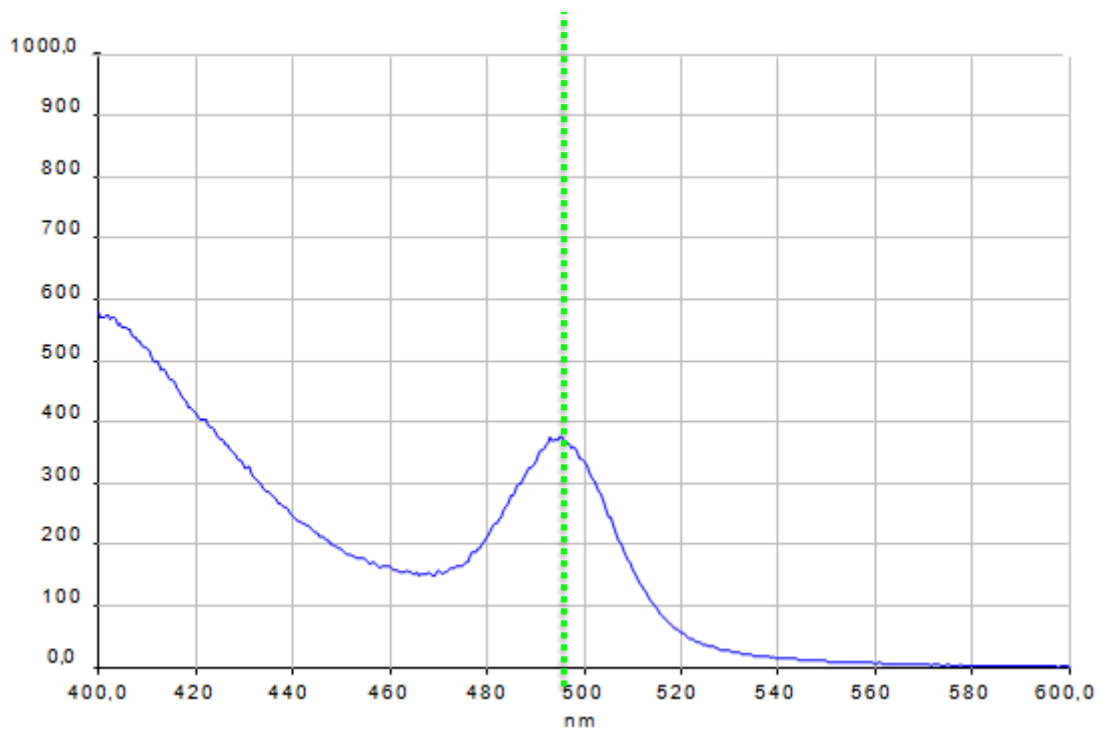


- 07/08/15 —
- 10/08/15 —
- 13/08/15 —
- 16/08/15 —
- 24/08/15 —

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



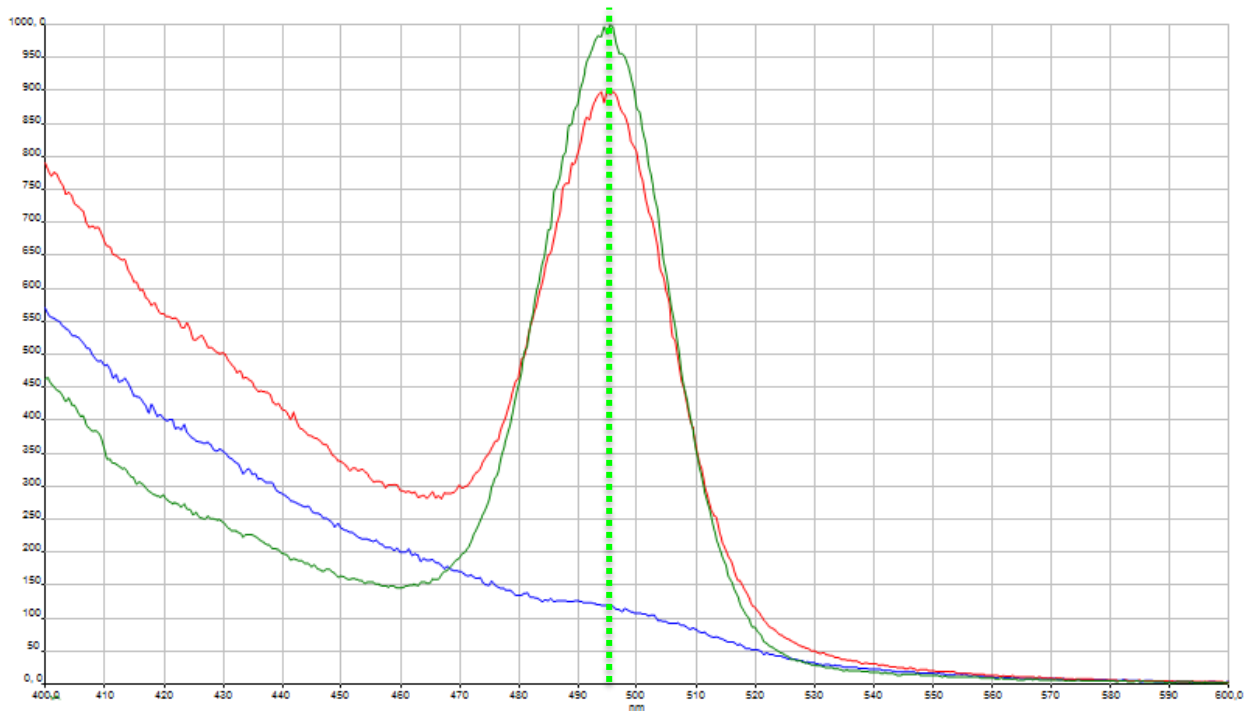
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source de Monteil** »

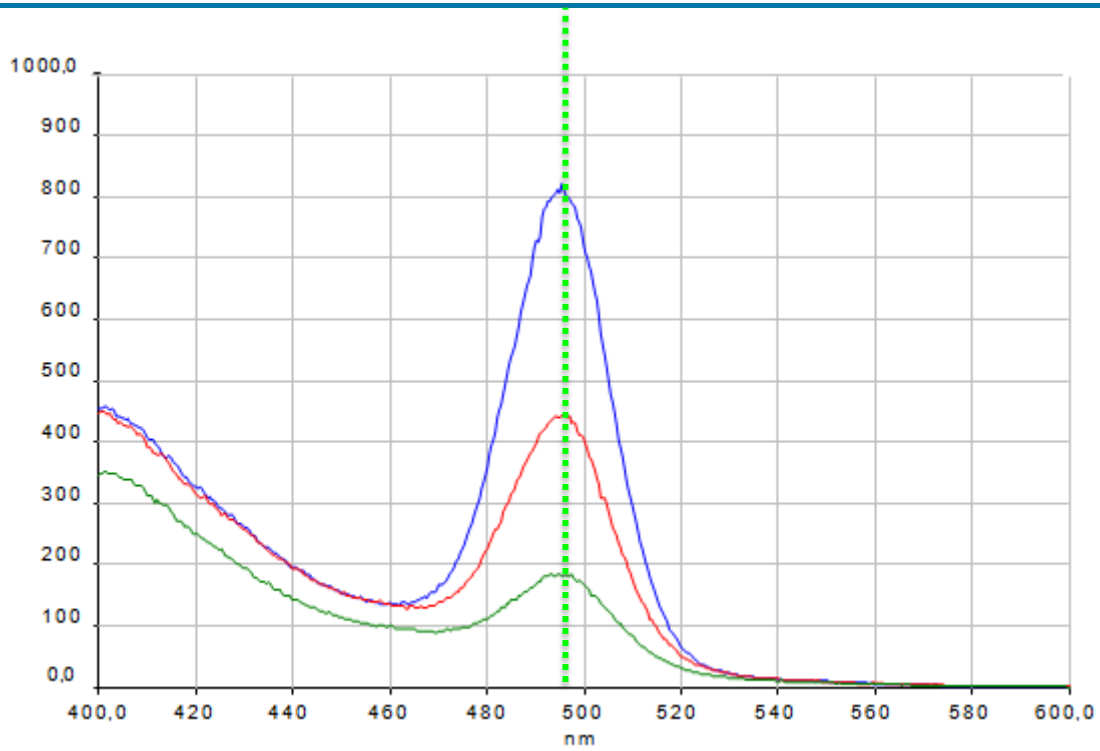
- 10/08/15 —
- 24/08/15 —
- 24/08/15 17h30 —

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



- 27/08/15 09h30 ————
- 31/08/15 08h45 ————
- 02/09/15 17h00 ————

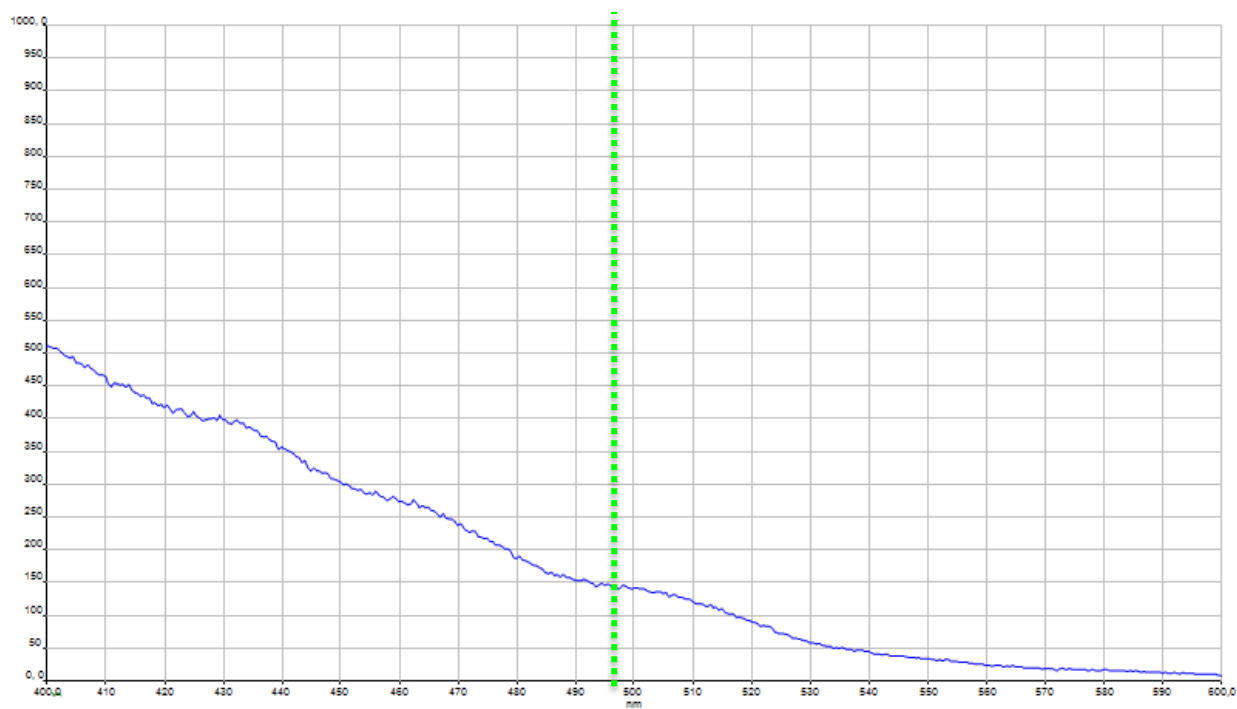
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



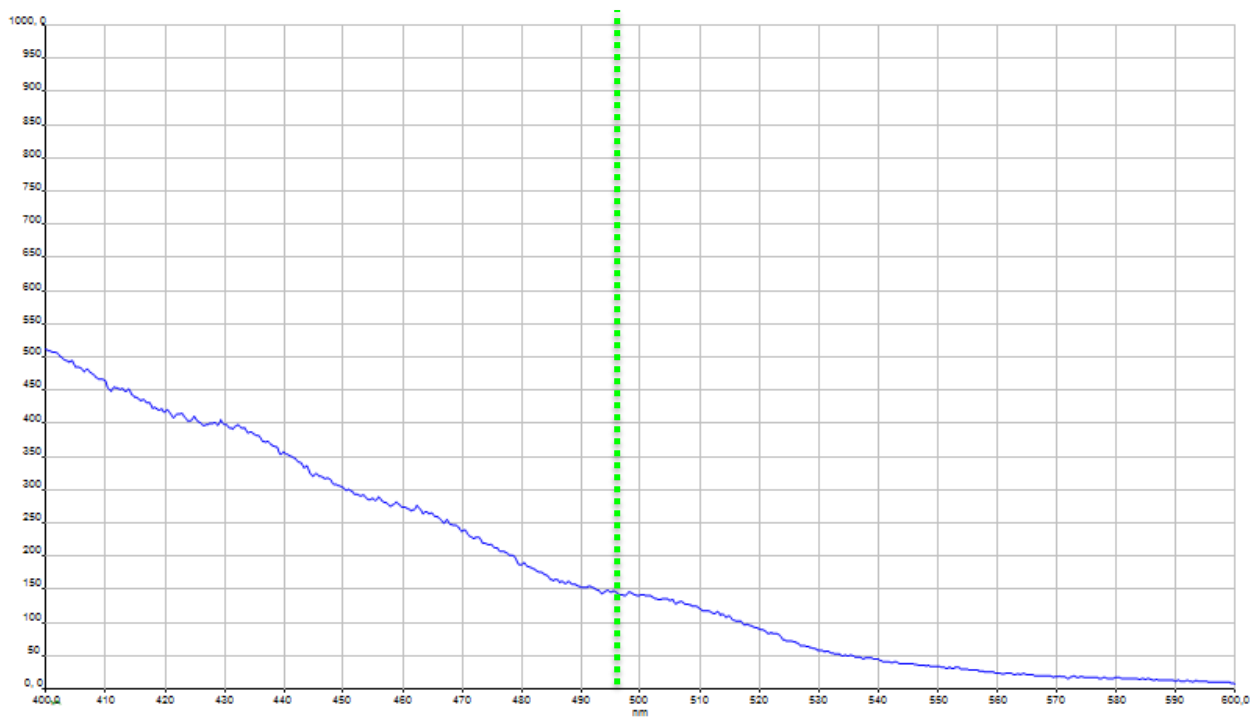
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source des Baumes** »

- 22/07/15

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

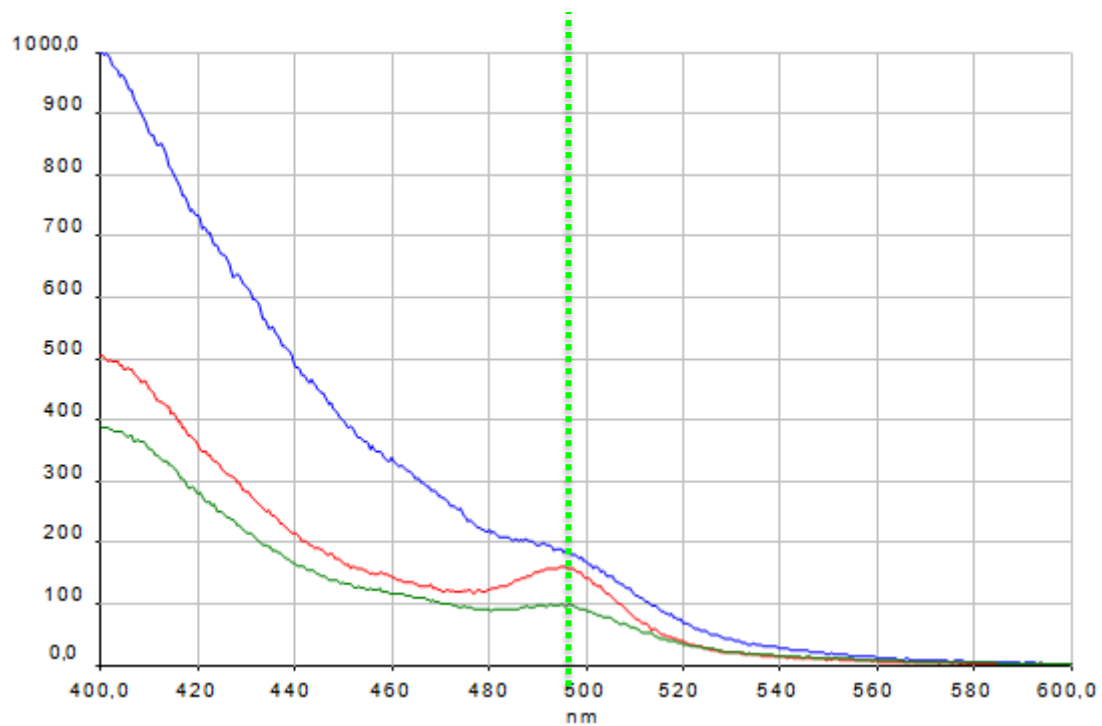


## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



- 27/08/15 10h30 ————
- 31/08/15 10h15 ————
- 02/09/15 18h15 ————

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

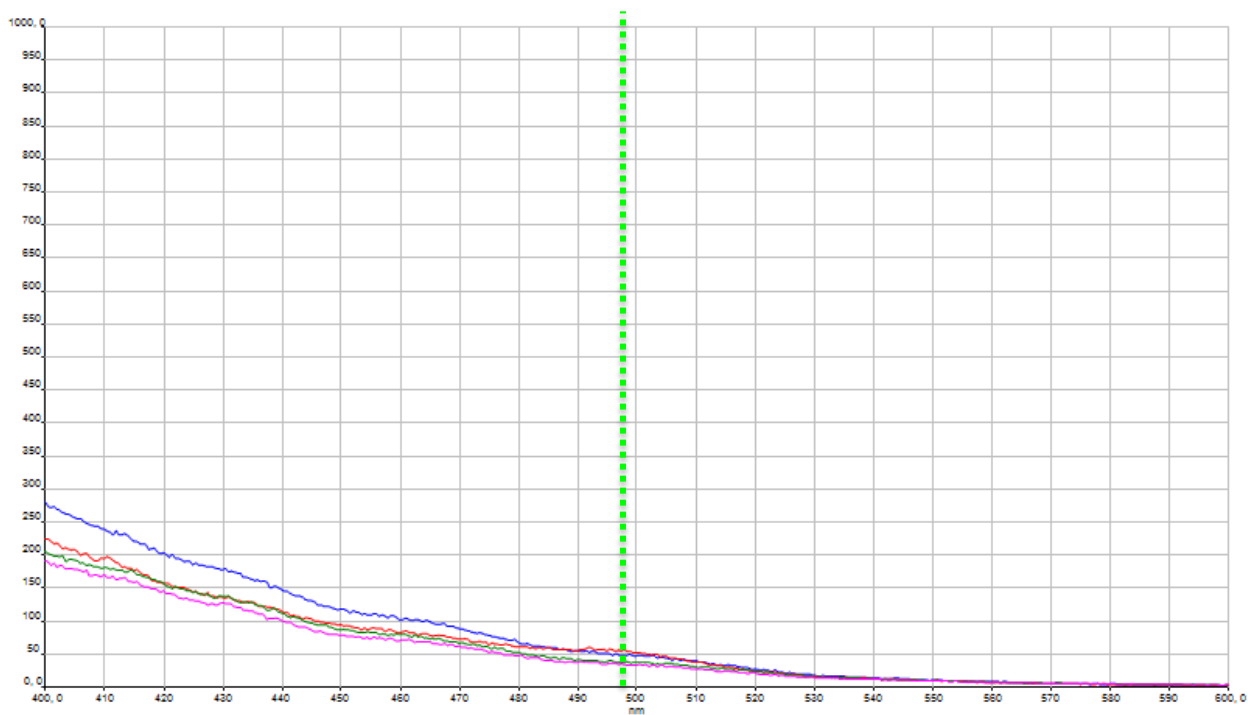




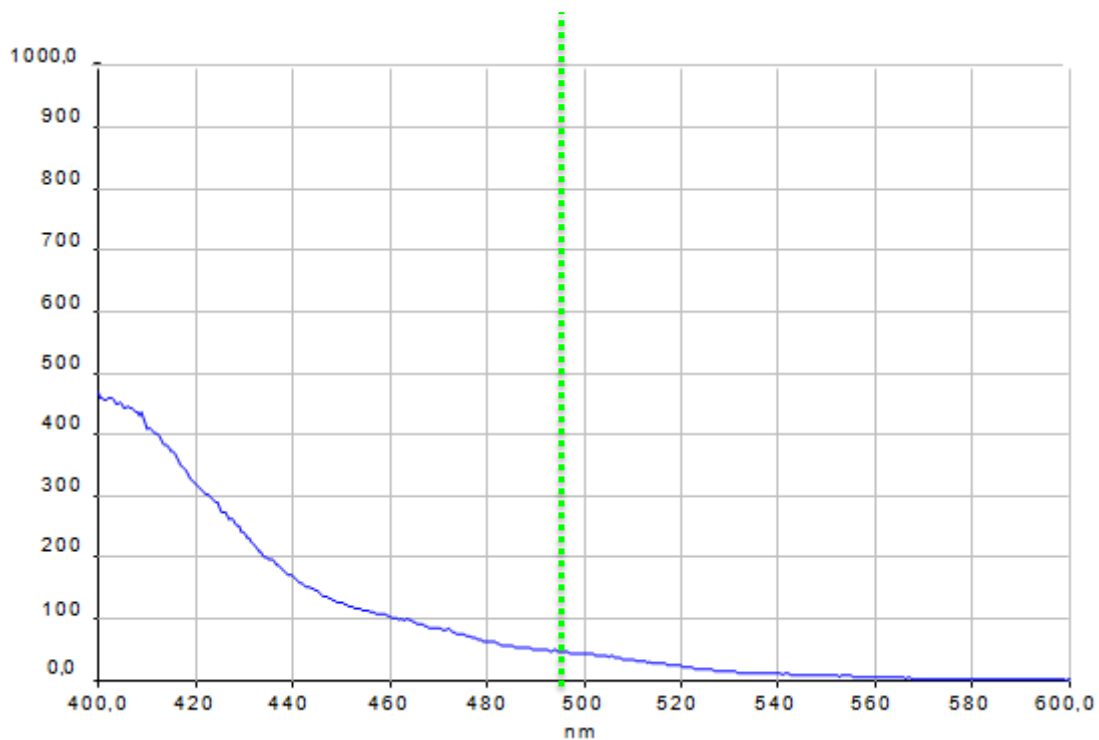
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source des Fées »

- 01/08/15 ————
- 06/08/15 ————
- 11/08/15 ————
- 15/08/15 ————

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



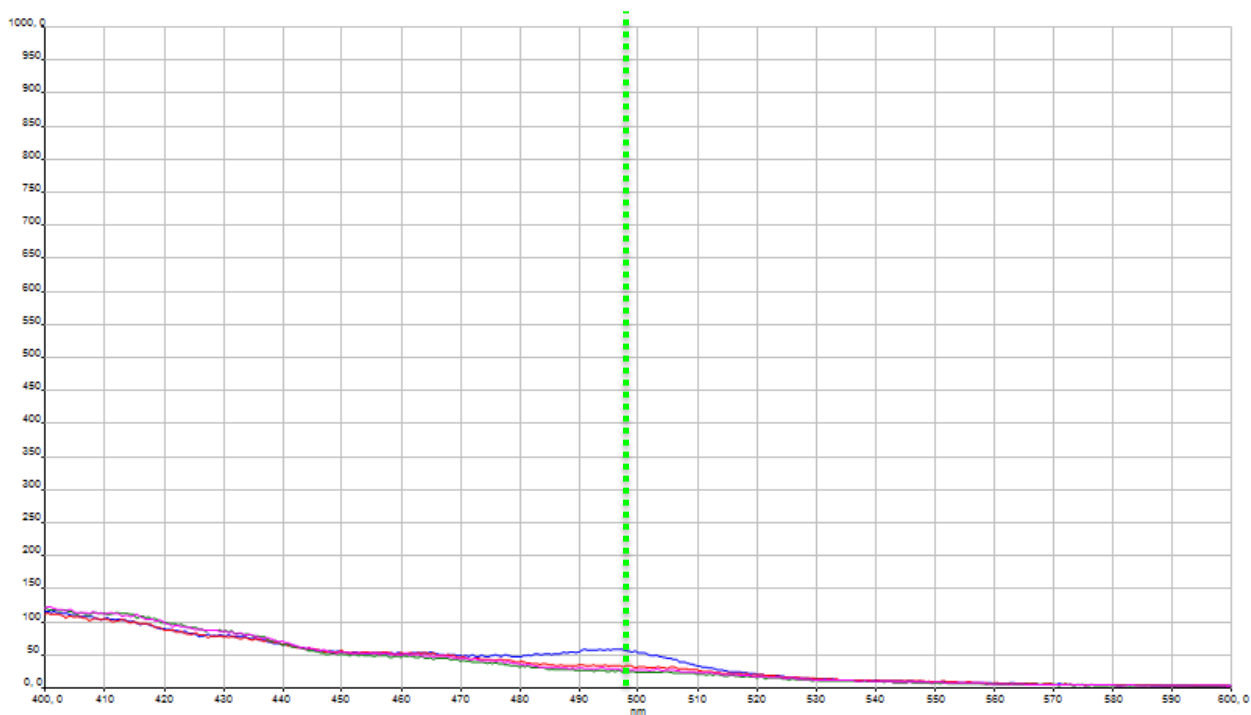
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



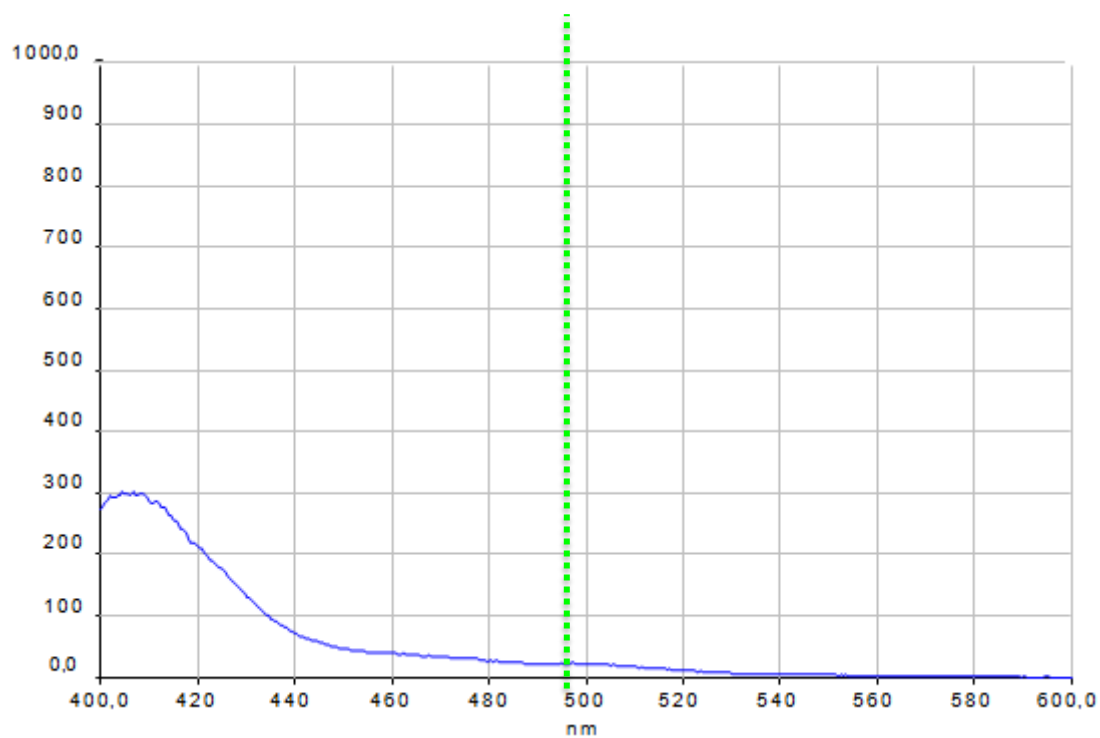
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source de Vanmâle »

- 02/08/15 ————
- 07/08/15 ————
- 16/08/15 ————
- 24/08/15 ————

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



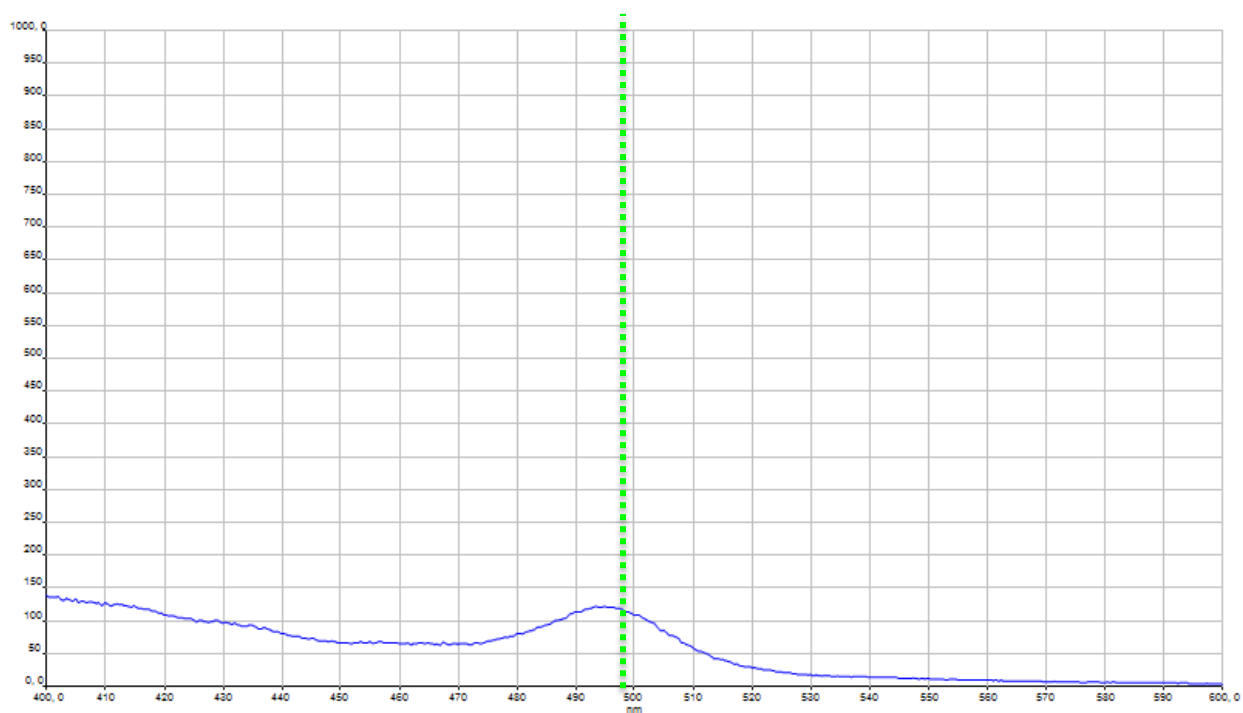
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



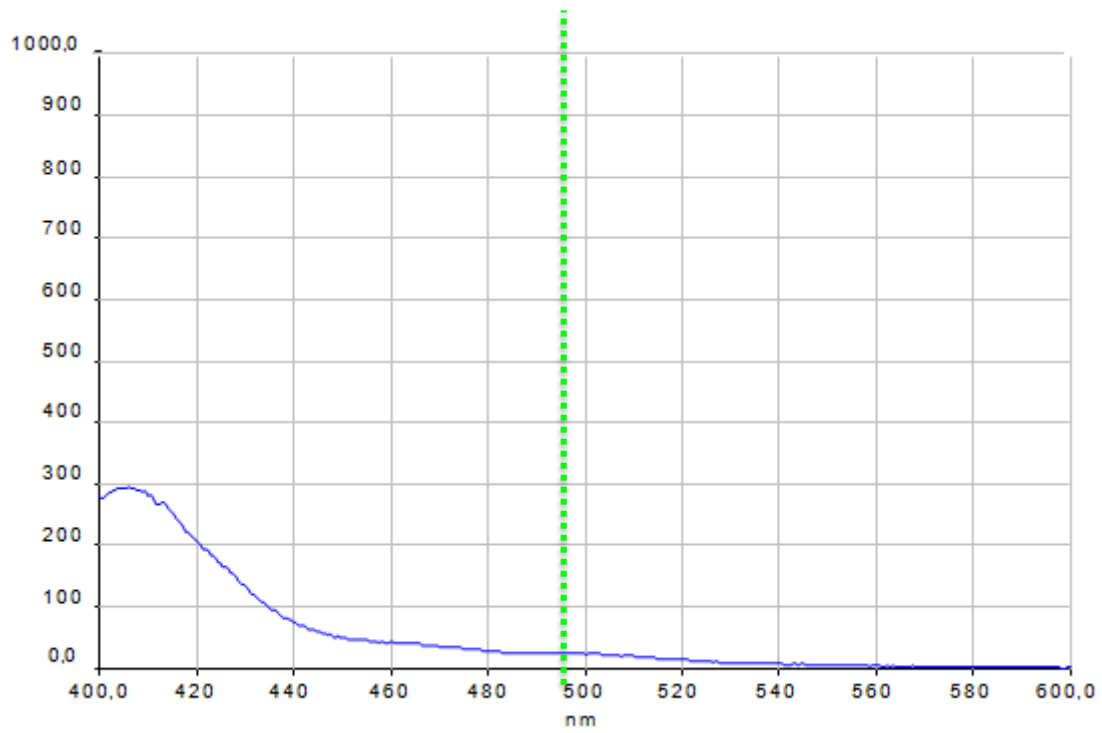
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source des Travers** »

- 07/08/15

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



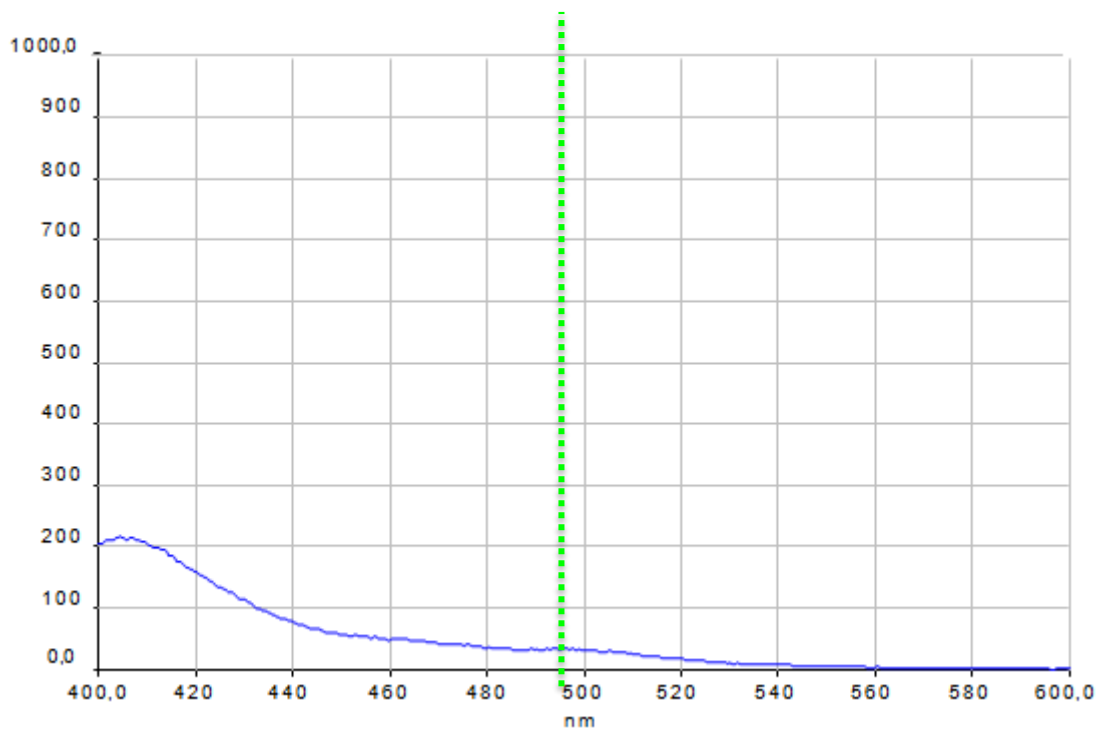
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source de Foulatier** »

- 25/08/15 09h00

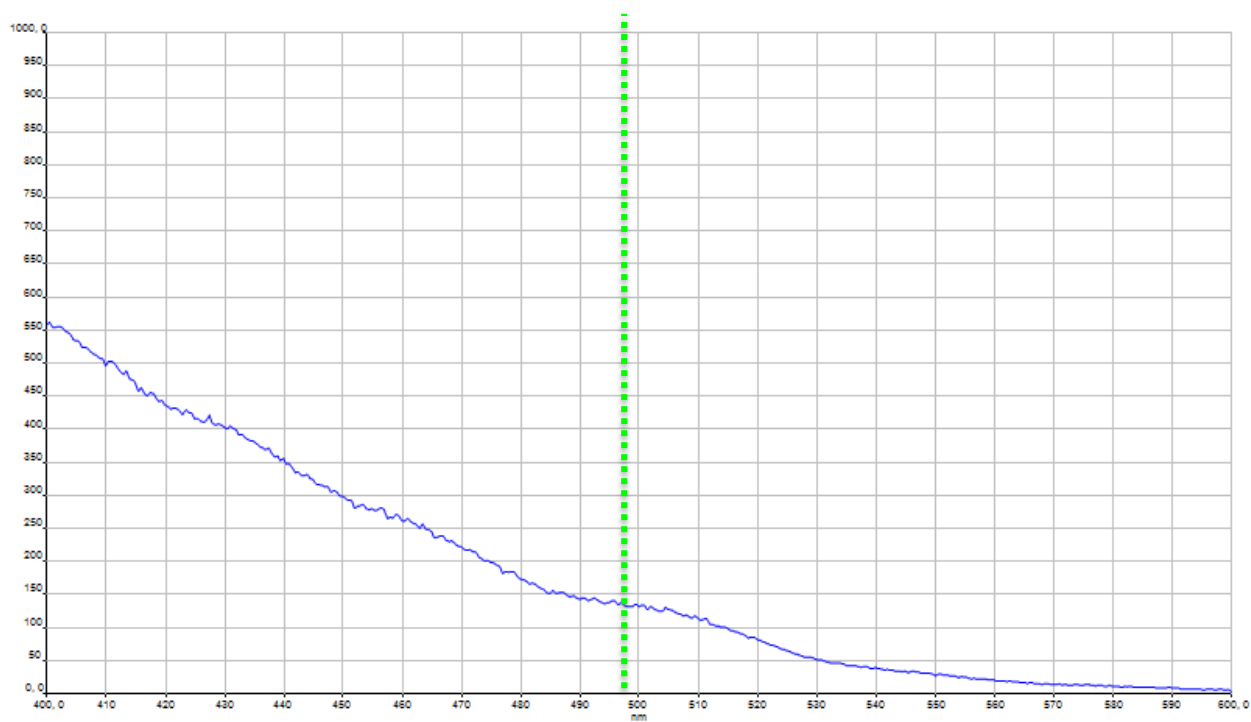
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source de Moulin »

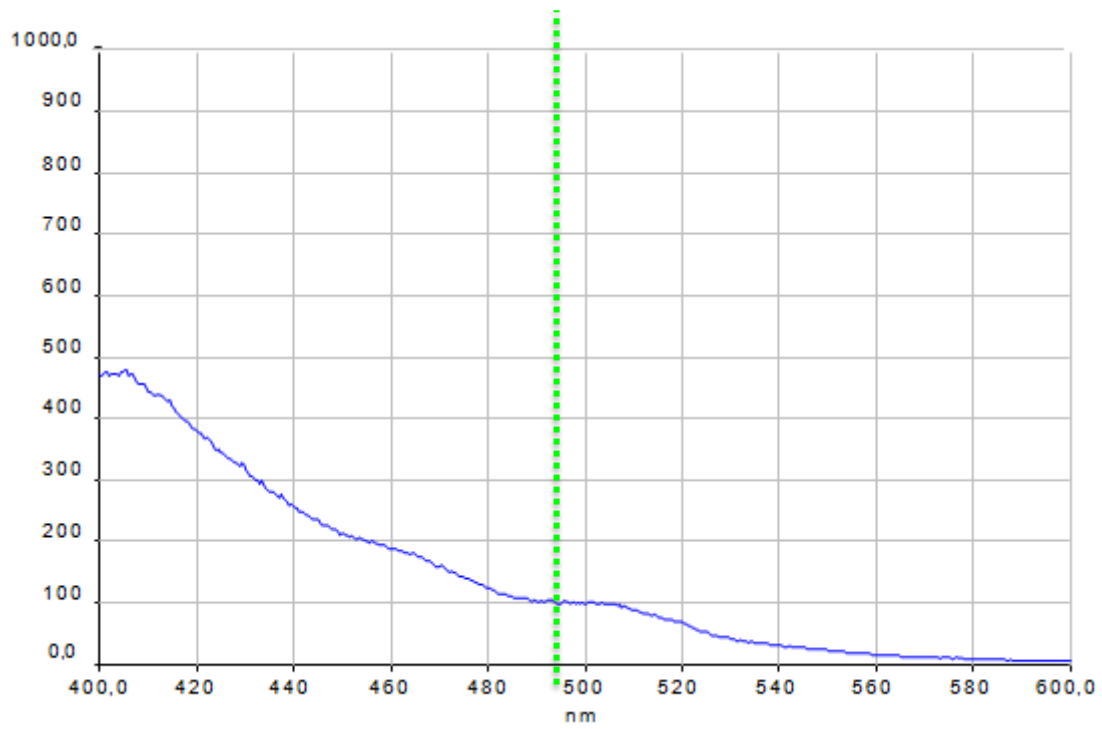
- 24/08/15

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

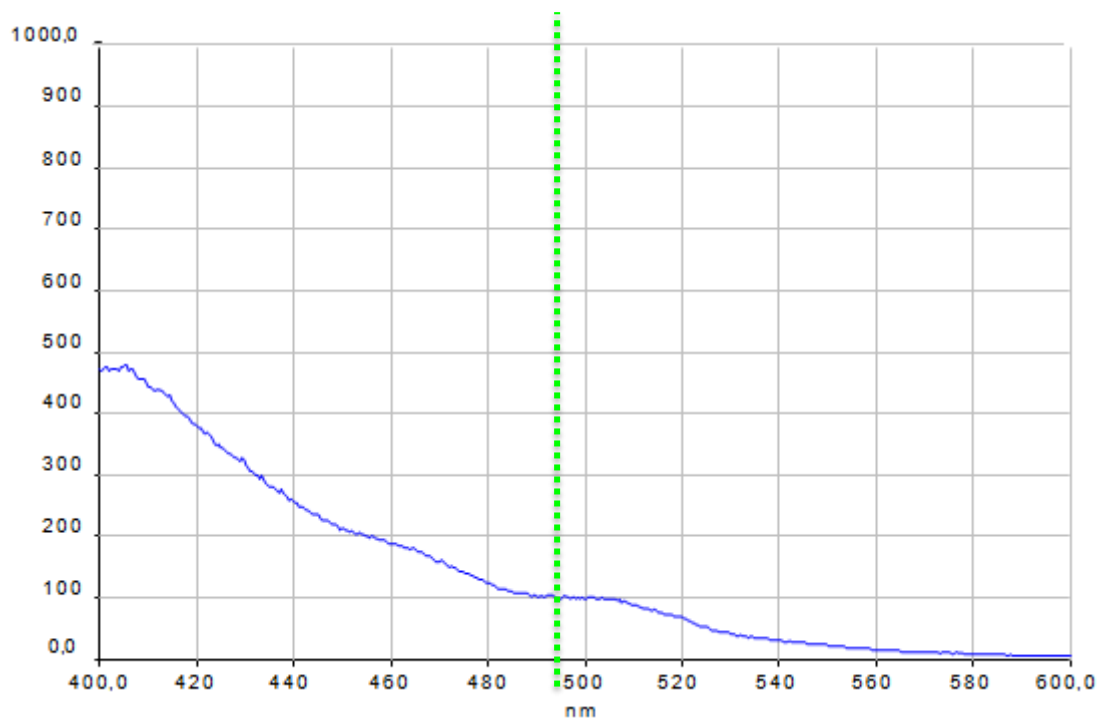




## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



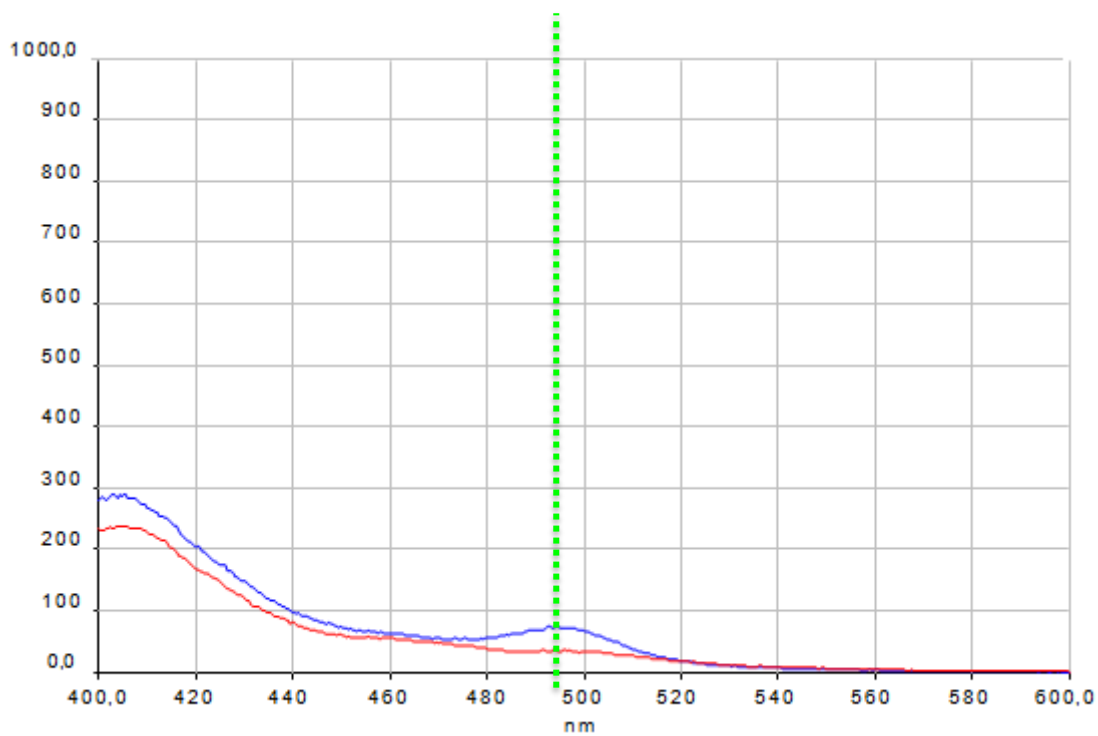
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source de l'Ilette »

- 31/08/15 08h30 ———
- 02/09/15 16h45 ———

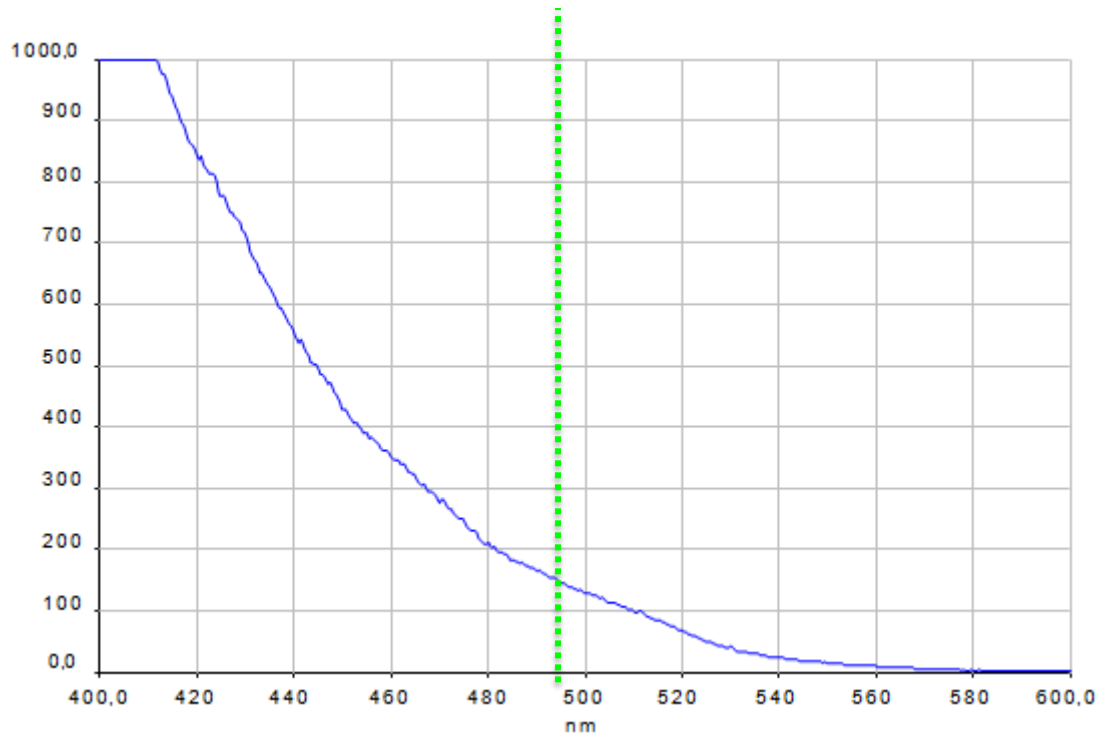
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source de la Fabrique** »

- 31/08/15 11h30

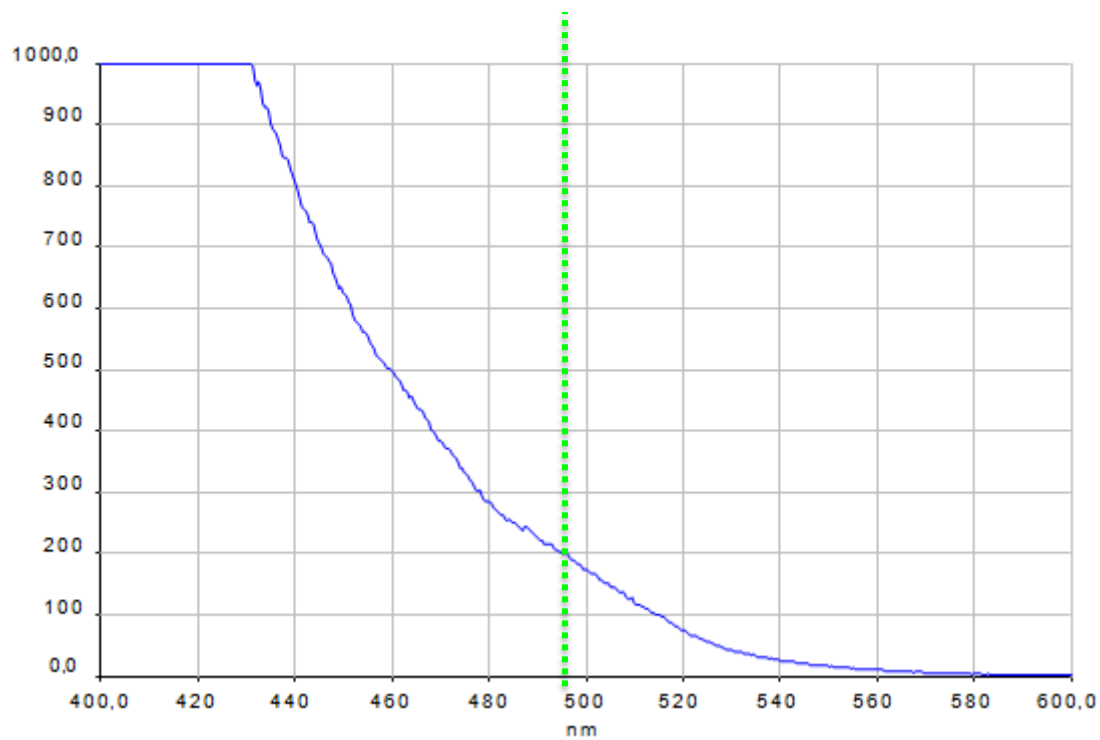
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Source de la Bastide Froide** »

- 31/08/15 11h00

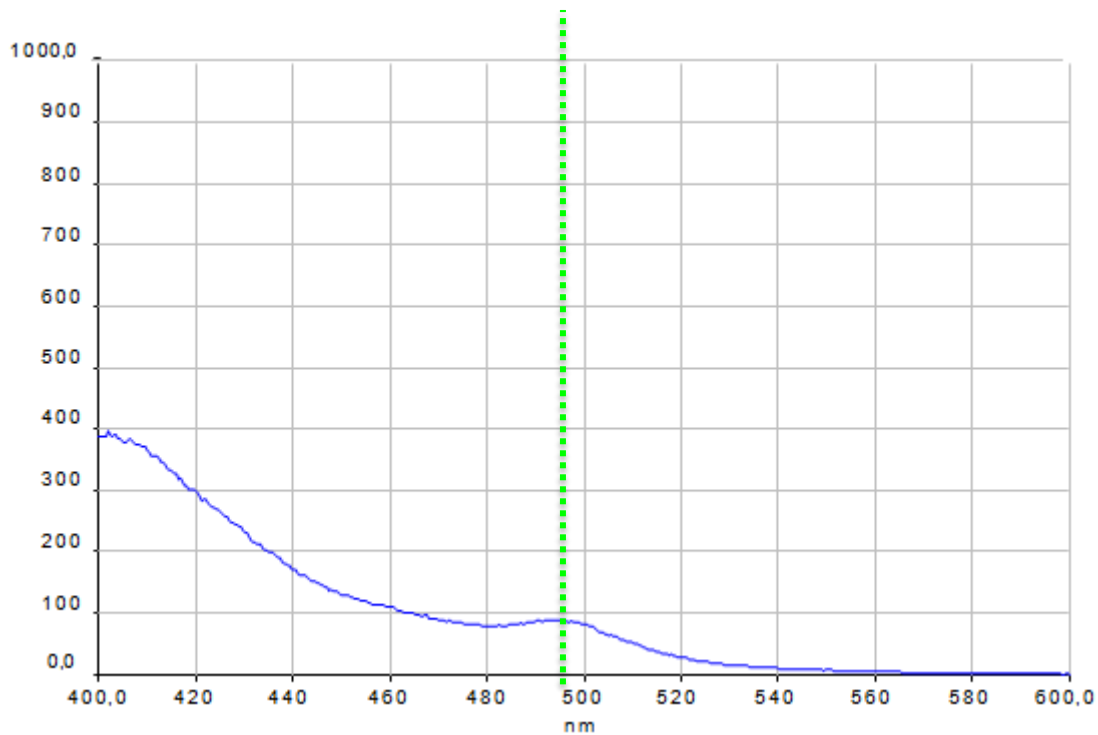
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Source de la Marnade »

- 31/08/15 09h30

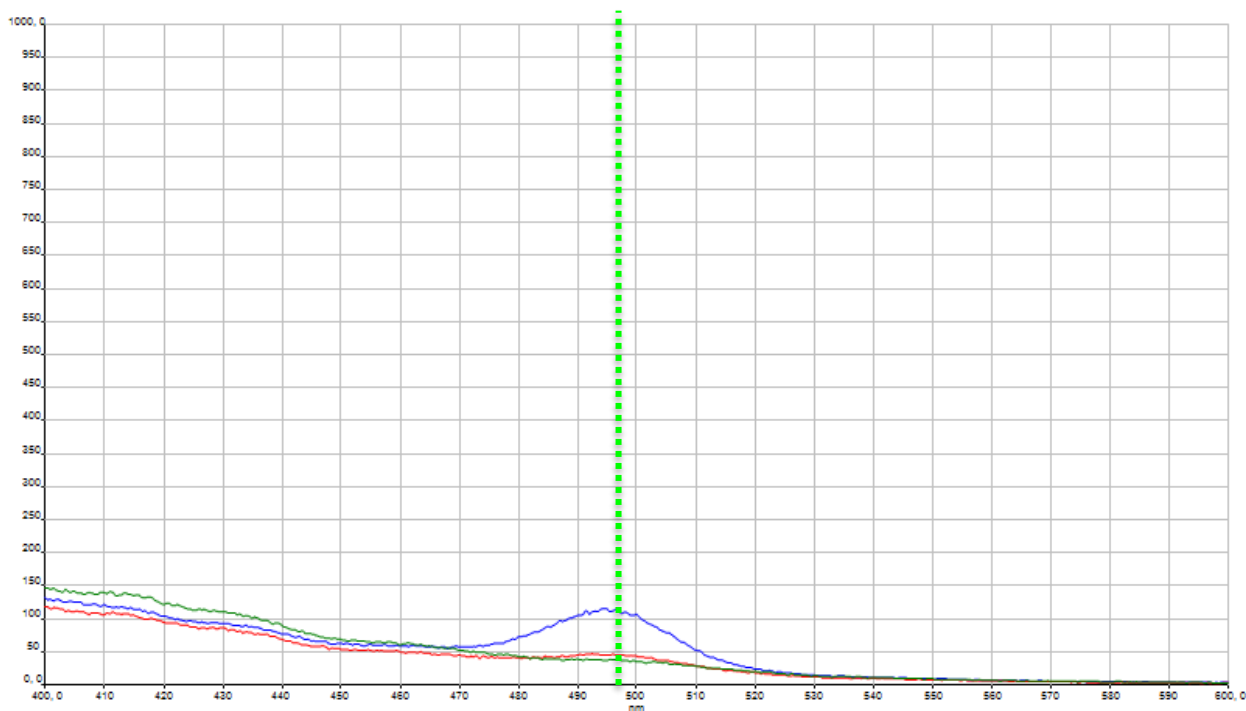
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Cèze amont Vanmâle »

- 02/08/15 ————
- 07/08/15 ————
- 24/08/15 ————

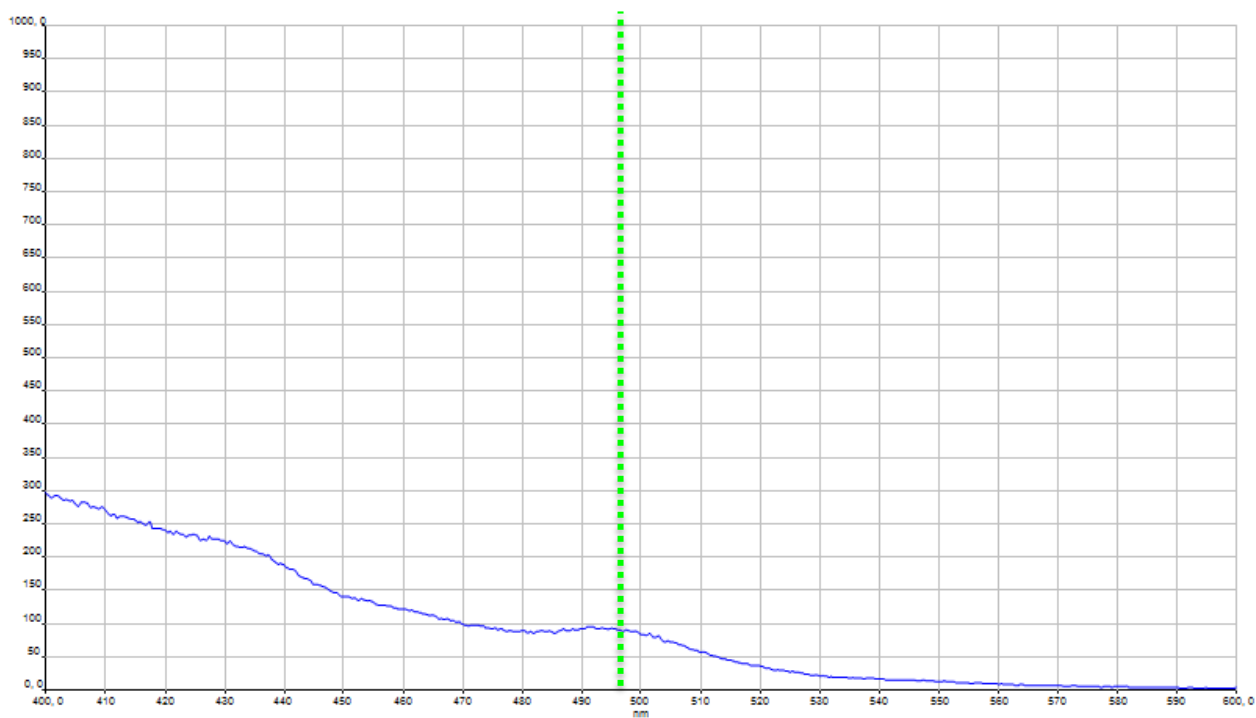
## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Cèze amont Foulatier »

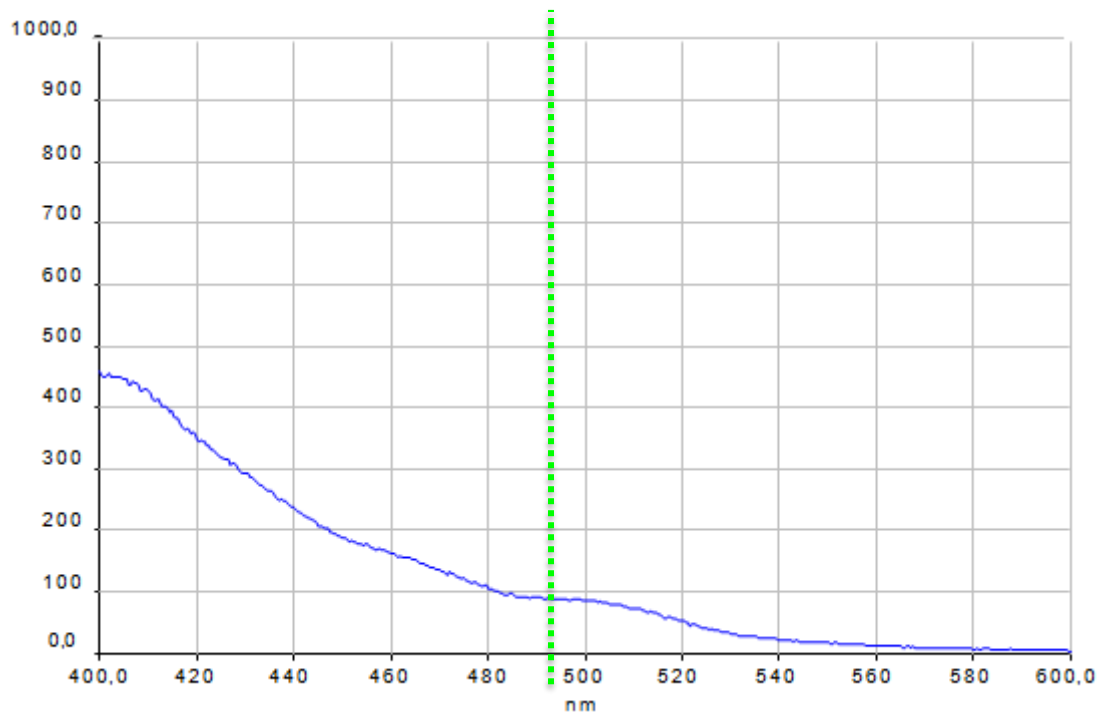
- 06/08/15

## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

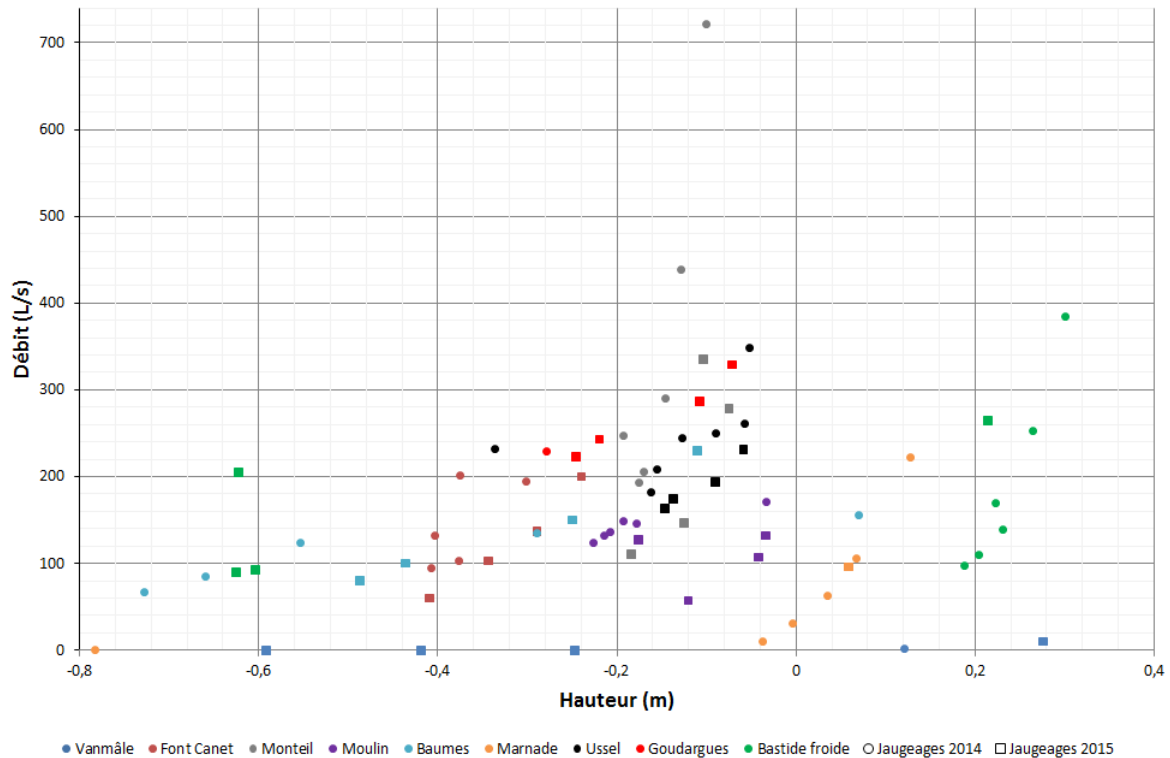




## RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



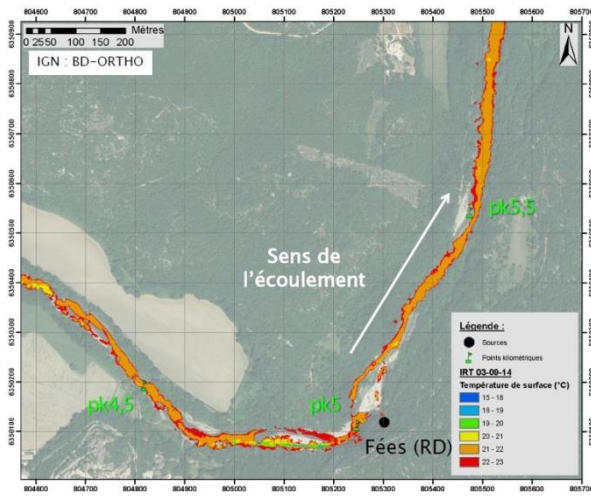
## Annexe 3 : Courbes de tarage des sources



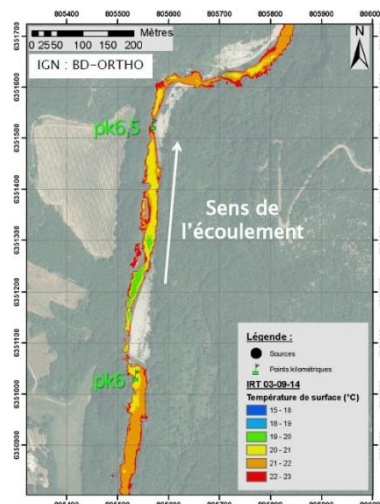
*Courbes de tarage réalisées sur les sources des gorges karstiques de la Cèze*

Sur ces courbes de tarages sont symbolisés les jaugeages réalisés en 2014 par des ronds et les jaugeages réalisés en 2015 par des carrés. Cette différenciation est mise en évidence pour faire apparaître la différence du placement des points entre l'année 2014 et l'année 2015. Les jaugeages sont généralement réalisés à la sortie de l'hiver jusqu'aux épisodes cévenols (à partir de septembre). Durant l'année 2014, les crues liées aux épisodes cévenols étaient très importantes. Elles ont déplacés certains bancs de galets et ont donc modifiées les sections de jaugeages en rivière et pour les sources. Il y a donc un décalage qui s'est créé sur les courbes de tarage dégradant cette dernière.

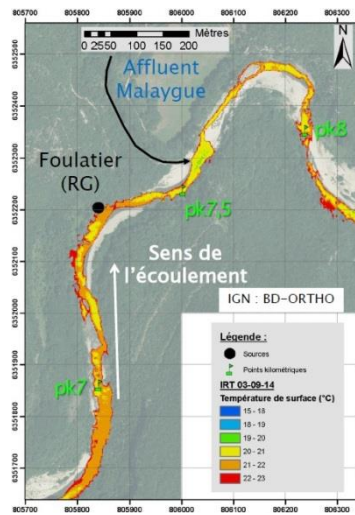
# Annexe 4 : Campagne d'acquisition d'images IRT du 3 septembre 2014



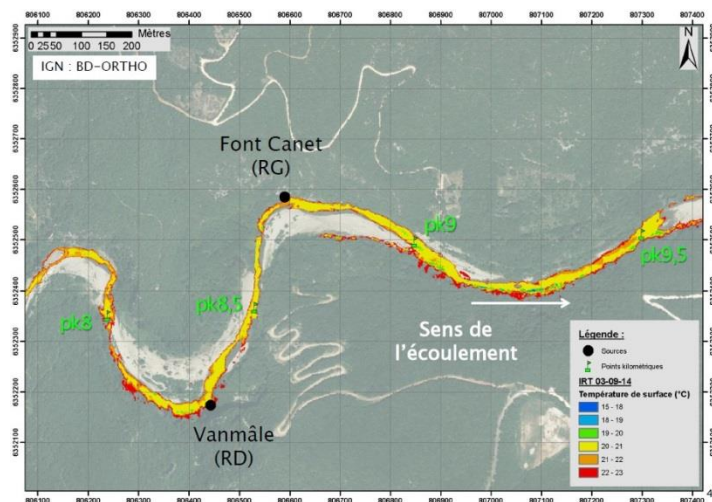
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°1/13



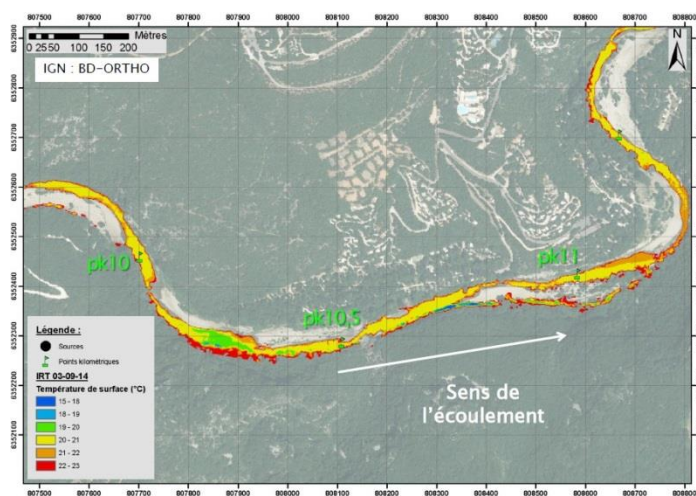
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°2/13



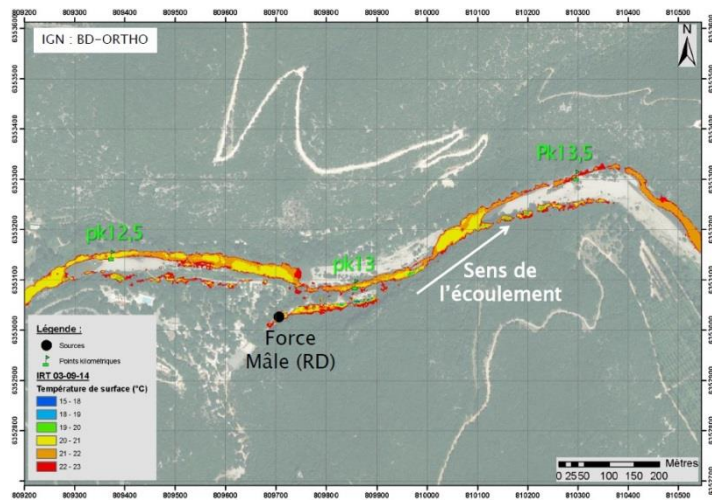
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°3/13



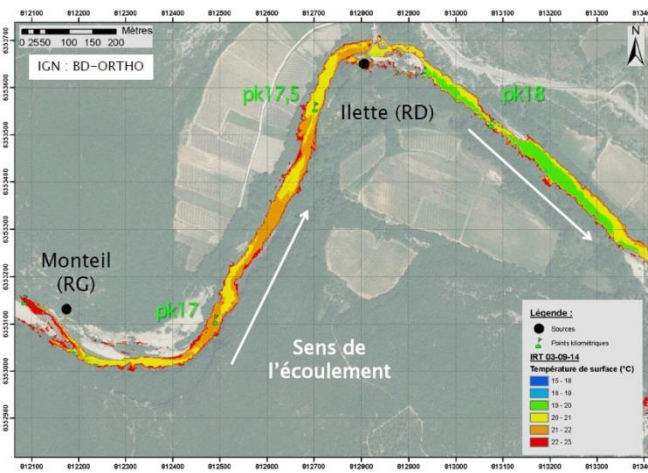
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°4/13



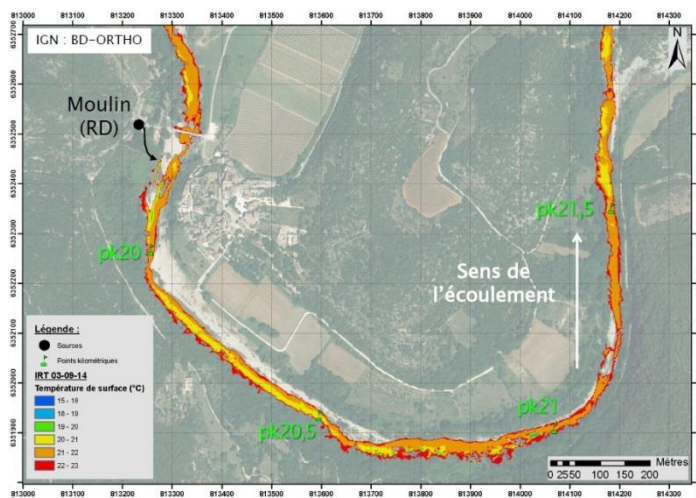
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°5/13



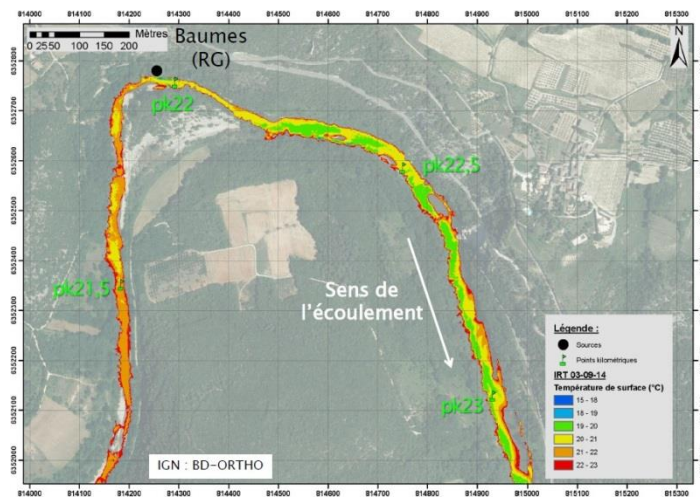
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°6/13



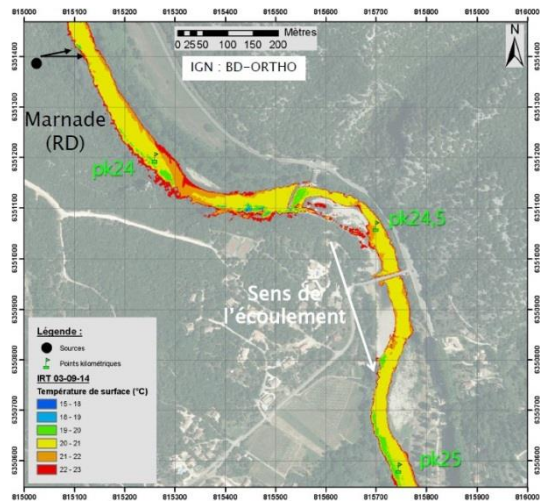
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°7/13



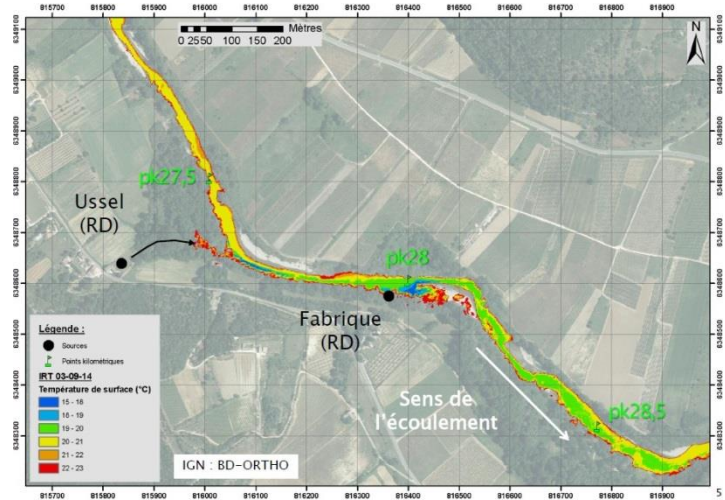
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°8/13



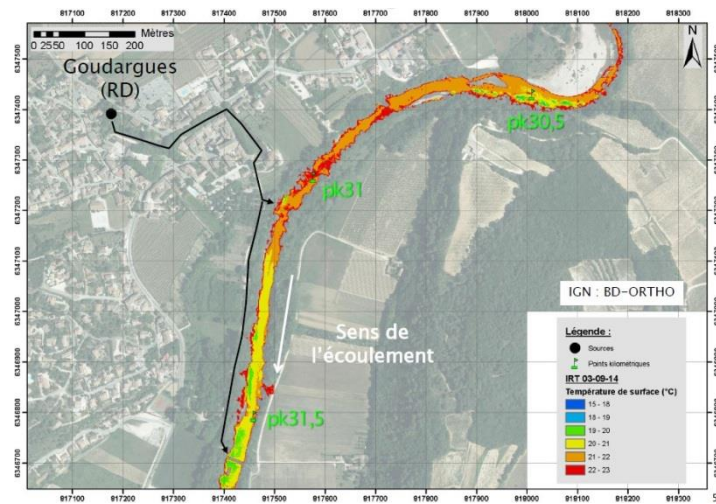
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°9/13



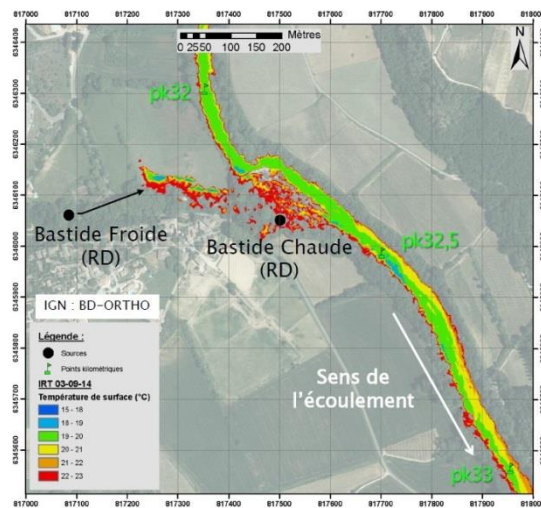
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°10/13



Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°11/13



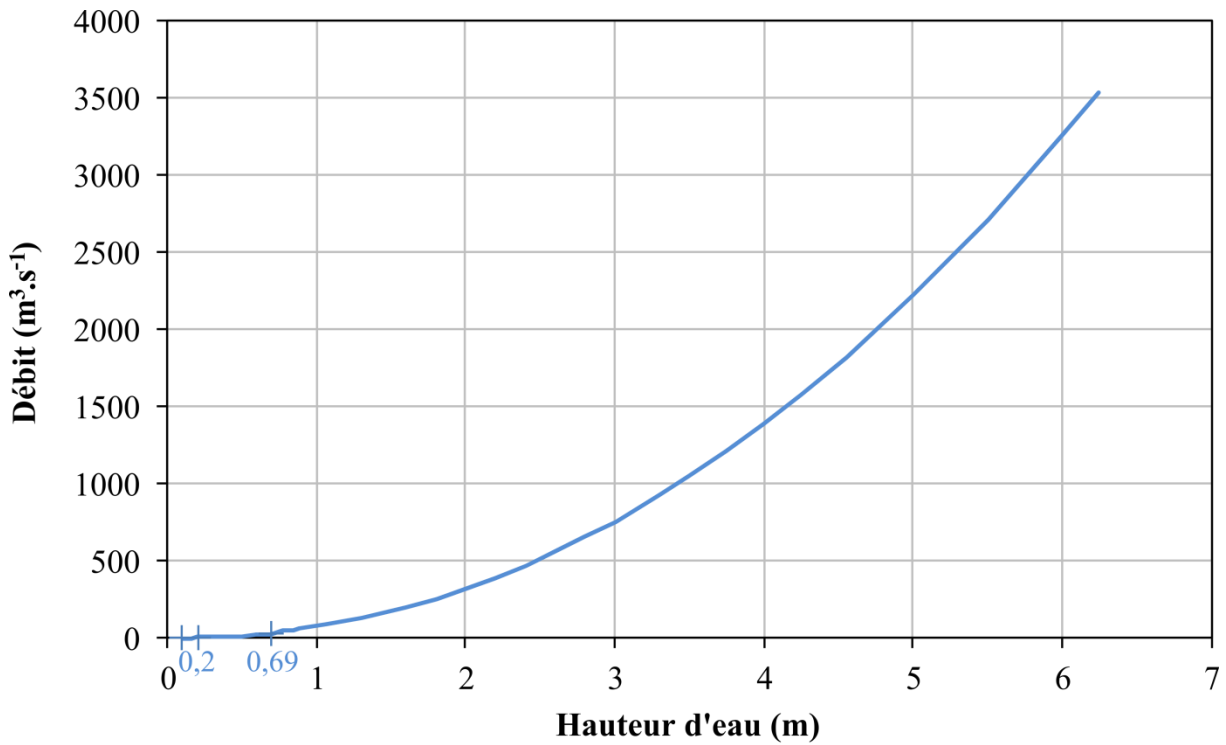
Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°12/13



Représentation de la Cèze par images IRT, campagne du 3/09/2014, image IRT n°13/13

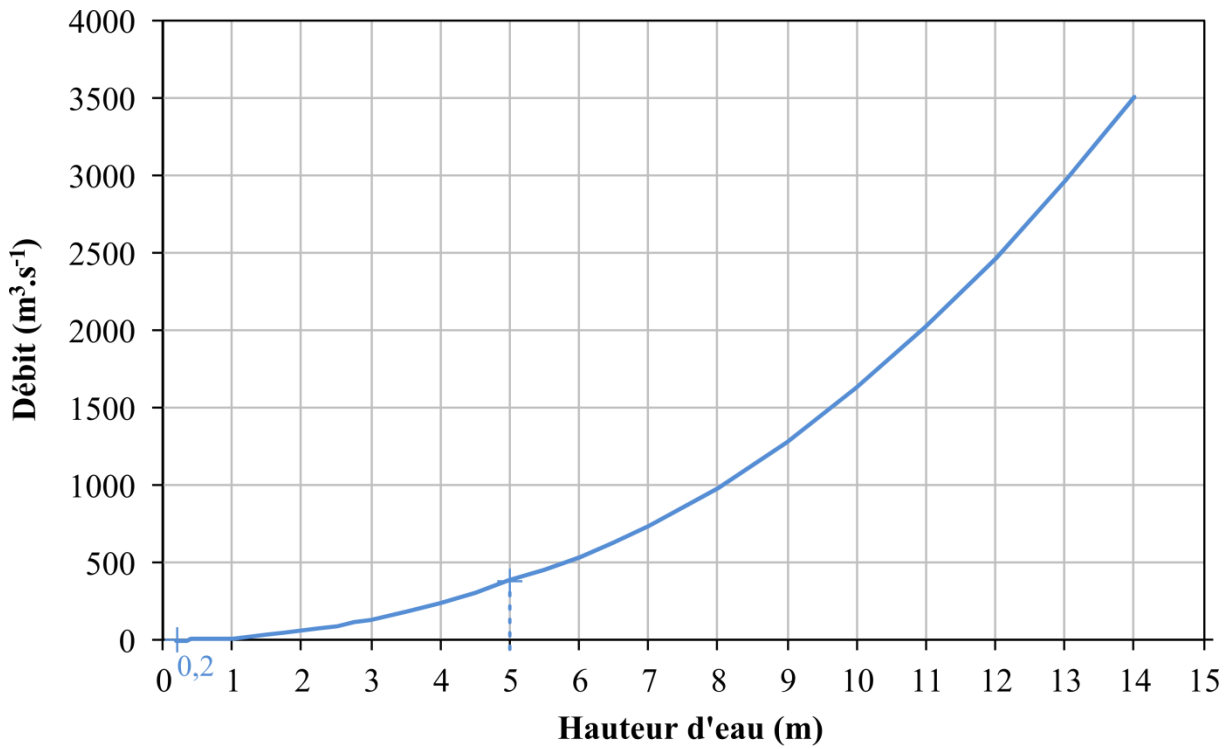
## Annexe 5 (partie V): Courbes de tarages fictives stations A, B, C, D, E

---

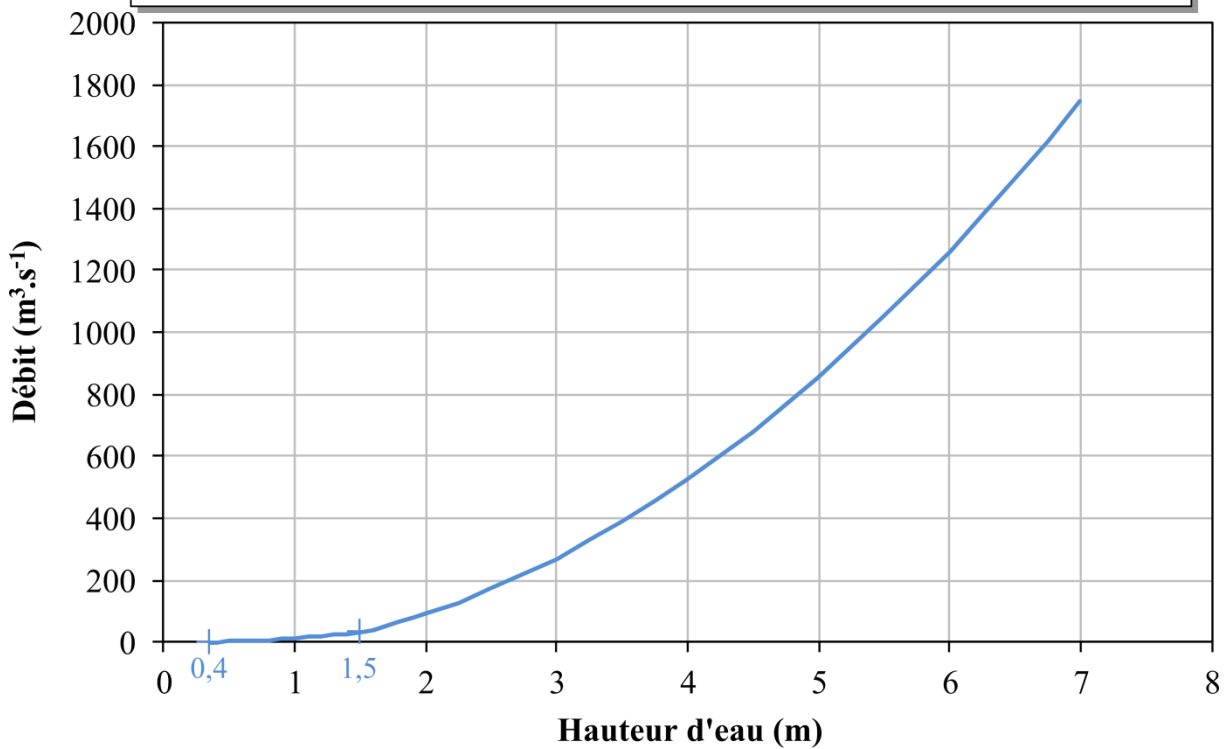


$0,1\text{m} < H \leq 0,2\text{m}$	$H > 0,69\text{m}$
$Q=75,016H^2 - 8,3781H + 1,276$	$Q=97,59H^2 + 49,008H + 25,002$
$0,2\text{m} < H \leq 0,69\text{m}$	
$Q=31,48H^2 + 22,951H - 3,2335$	

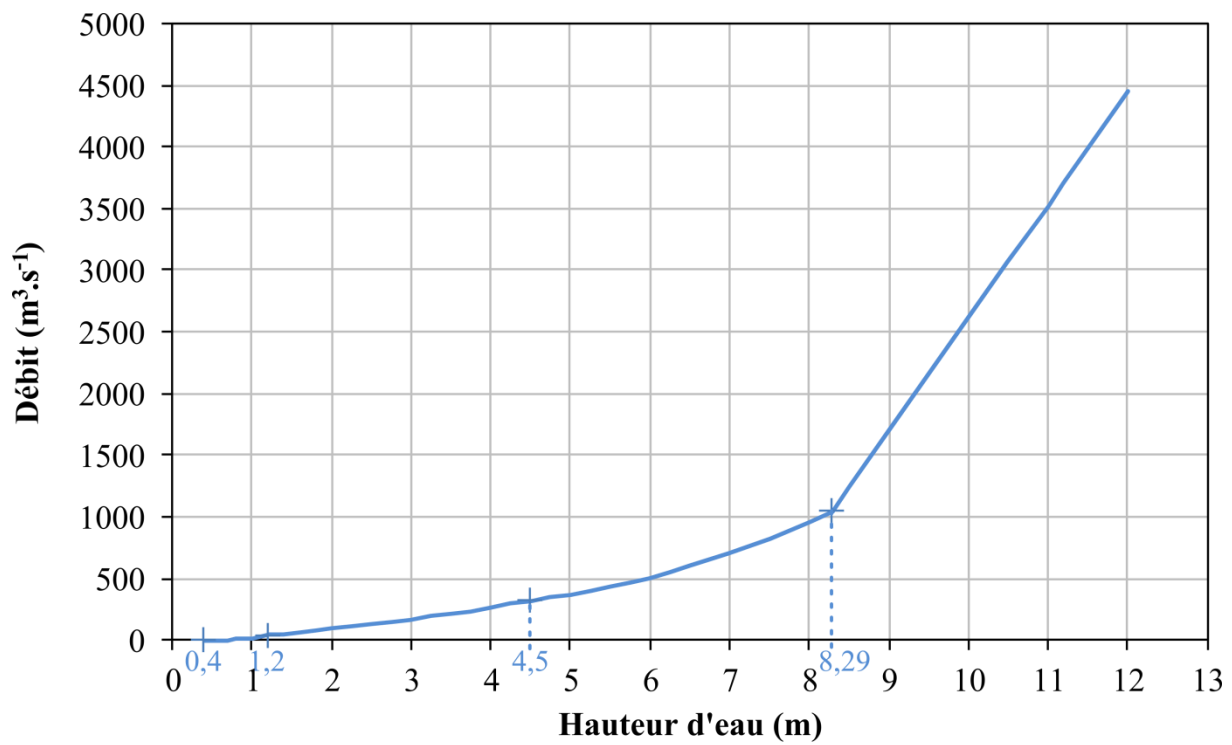




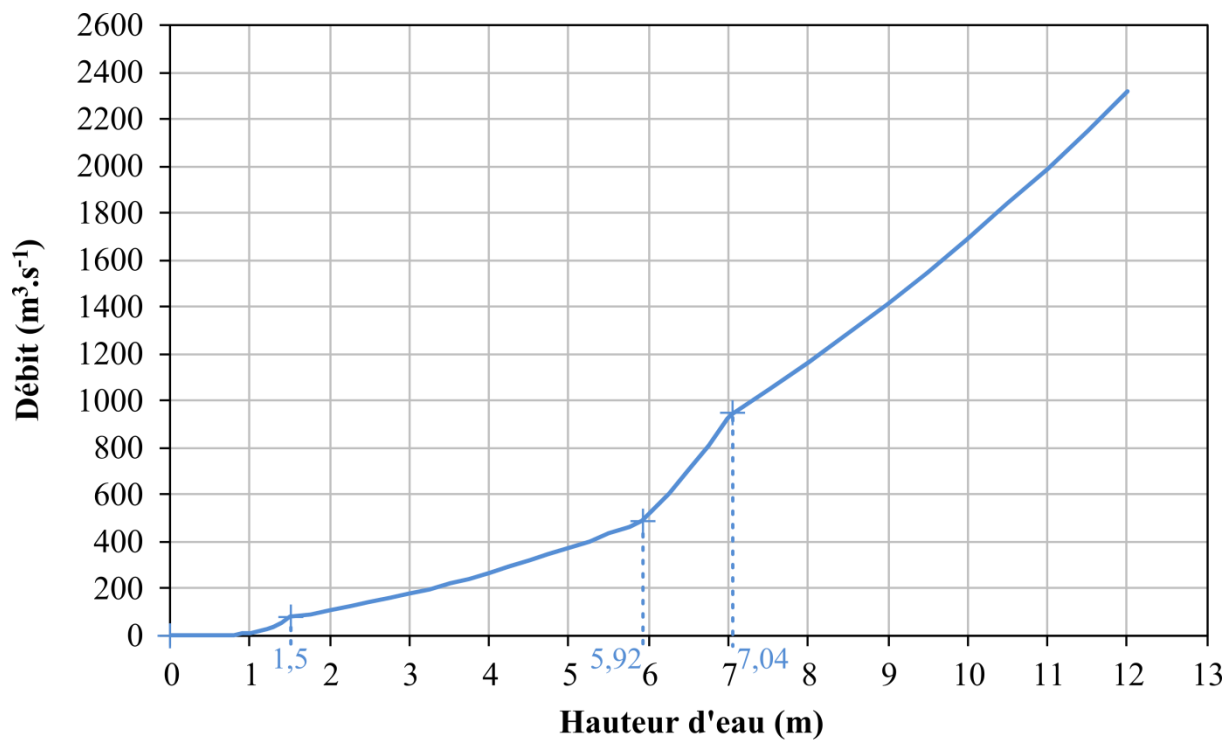
$0,2\text{m} < H \leq 5\text{m}$	$H > 5\text{m}$
$Q = 14,931H^2 - 0,0914H - 0,1402$	$Q = 24,429H^2 - 116,72H + 355,5$



$0,4\text{m} < H \leq 1,5\text{m}$	$H > 1,5\text{m}$
$Q = 18,855H^2 - 6,9562H + 0,7862$	$Q = 37,701H^2 - 8,5109H - 43,09$



$0,4\text{m} < H \leq 1,2\text{m}$	$4,5\text{m} < H \leq 8,29\text{m}$
$Q=12H^{6,604}$	$Q=29,262H^2 - 183,13H + 554,16$
$1,2\text{m} < H \leq 4,5\text{m}$	$H > 8,29\text{m}$
$Q=8,6981H^2 + 34,992H - 15,289$	$Q=915,99H - 6547,7$



$H \leq 1,5\text{m}$	$5,92\text{m} < H < 7,04\text{m}$
$Q=0,48e^{3,44H}$	$Q=67,564H^2 + 470,34H + 908,86$
$1,5\text{m} < H \leq 5,92\text{m}$	$H > 7,0\text{m}$
$Q=9,4834H^2 + 22,096H + 28,985$	$Q=12,175H^2 + 44,848H + 27,16$