

2nd rapport d'avancement 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 provisoire année 2 (2014-2015)

Action n°43 du Programme 2014 (action 49 en 2015)
au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR



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

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

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

Juin 2015

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 : Juillet 2015

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

Statut du rapport :

Version provisoire	☺
Version intermédiaire	☹
Version de travail	○
Version finale	○

Auteurs :

- UMR 5600 EVS – EMSE – Département Géo-Sciences et Environnement (Jordan Ré-Bahuaud, Didier Graillot, Frédéric Paran et Hervé Chapuis) ;
- UMR 5023 LEHNA – Université Lyon I – Ecologie souterraine (Pierre Marmonier, Michel Creuzé des Châtelliers, Marie-José Olivier, Margot Jacquy, Martin Lawniczak et Mathilde Novel) ;
- UMR 7300 ESPACE – Université Sophia Antipolis Nice (Joël Jolivet) ;
- UMR 7300 ESPACE – EMA – LGEI (Anne Johannet, Michaël Savary et Bernard Vayssade).

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 : 229

Nombres de pages du rapport hors annexes : 136

Nombres de pages d'annexes : 93

Nombre d'annexes : 9

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 sur une durée de 4 années (années 1, 2, 3 et 4) de 2013 à 2016 et est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC). En parallèle du projet, un sujet de thèse a débuté en octobre 2013 et s'étale sur une durée de 3 ans.

Personnes responsables et référentes :

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

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

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

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

Autres partenaires :

- Recherche :
 - Hydrosiences Montpellier, suivi de la thèse associée à l'action ;
- Institutionnel :
 - Syndicat ABCèze : 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

Table des matières synthétique	III
Résumé du projet.....	VII
Avant-propos.....	VII
Introduction	9
Site étudié : le canyon de la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap	9
Contexte et problématiques	11
Méthodologie employée et objectifs.....	12
Récapitulatif des actions réalisées (2013 – 2014) et engagées (2015 – 2016).....	13
PARTIE I – Contexte géologique	25
I.1. Diversité des formations géologiques présentes à l'échelle du bassin versant de la Cèze	25
I.2. Focus sur la zone étudiée : Les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap	29
I.3. Regard tectonique pour expliquer l'aspect structural de la zone d'étude	31
I.4. Evolution structurale et tectonique des calcaires urgoniens	33
I.4.1. Mise en place du calcaire à faciès urgonien	33
I.4.2. Rifting Oligo-miocène	39
I.4.3. Modèle géochronologique	42
PARTIE II – Approche par traçages artificiels	45
II.1. Principe.....	45
II.2. Synthèse succincte des traçages réalisés.....	45
II.2.1. Bilan des traçages historiques	46
II.2.2. Inconvénients des suivis qualitatifs	46
II.2.3. Questionnement sur les résultats de certains traçages	47
II.2.4. Lacunes de connaissances en rive gauche et au Sud de la zone d'étude	47
II.3. Synthèse des traçages réalisés en 2014	48
II.3.1. Protocole des traçages	48
II.3.1.i. Contexte des traçages.....	49
II.3.1.ii. Choix des traceurs (qualité et quantité).....	50
II.3.1.iii. Conditions météorologiques	50
II.3.2. Traçage de la grotte Flandin	51
II.3.3. Traçage de la Salle Rouge de l'Aven d'Orgnac	56
II.3.4. Traçage des pertes du Roméjac (Malaygue)	59
II.3.5. Regard critique sur les traçages réalisés en 2014	61
II.4. Perspectives pour 2015.....	63
II.4.1. Traçage des pertes de la Cèze	63
II.4.2. Traçages sur le plateau de Méjannes-le-Clap	63
PARTIE III – Suivi hydrologique des sources et de la rivière.....	65
III.1. Mesures ponctuelles synchrones de débits (sources et rivière).....	65
III.1.1. Principe des mesures	65
III.1.1.i. Mesures de débits	65
III.1.1.ii. Bilans par jaugeages différentiels.....	65
III.1.1.iii. Qualité des mesures	67
III.1.2. Résultats	68

III.1.2.i. Sources.....	68
III.1.2.ii. Rivière.....	70
III.1.2.iii. Bilans par jaugeages différentiels en rivière	71
III.1.3. Perspectives (2015 et 2016)	72
III.2. Suivi hydrologique des sources et de la rivière	73
III.2.1. Localisation des points de suivi	73
III.2.2. Acquisition des données	74
III.2.3. Traitement des données brutes	75
III.2.4. Eléments bibliographiques sur les traitements statistiques appliqués aux données hydrologiques	75
III.2.4.i. Statistiques descriptives	75
III.2.4.ii. Analyses en composantes principales (ACP).....	76
III.2.4.iii. Analyses fréquentielles	77
III.2.4.iv. Analyses Corrélatoires et Spectrales (ACS).....	79
III.2.4.v. Méthode des débits classés	83
III.2.4.vi. Analyse en ondelettes	84
III.2.5. Bilan et perspectives	85
PARTIE IV – Utilisation des invertébrés interstitiels pour localiser les zones d’échange rivière-nappe	87
IV.1. Objectif de l’étude	87
IV.2. Echantillonnage des communautés interstitielles	88
IV.3. Résultats	89
IV.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles	89
IV.3.2. Caractéristiques des communautés interstitielles	91
IV.4. Discussion et perspectives	94
PARTIE V – Approches de modélisation « pluies - débits » par réseaux neuronaux.....	97
V.1. Rappel de la position du problème	97
V.2. Méthodes et travaux envisagés	97
V.3. Méthodes d’analyse du signal et modélisation	98
V.3.1. Analyses corrélatoires	98
V.3.1.i. Définition	98
V.3.1.ii. Corrélations simples	98
V.3.1.iii. Corrélations croisées	99
V.3.2. Analyses spectrales	100
V.3.3. Modélisation par réseaux de neurones	101
V.3.3.i. Modèle de neurones et architectures.....	102
V.3.3.ii. Identification universelle et parcimonie	102
V.3.3.iii. Sélection de variables pour optimiser la complexité	102
V.4. Elaboration de la base de données	103
V.4.1. Acquisition des données	103
V.4.2. Correction des données	103
V.4.3. Traitement des données (procédure de ré-échantillonnage)	104
V.5. Travaux réalisés	105
V.5.1. Analyses corrélatoires et spectrales	105
V.5.1.i. Bassin versant complet : Corrélations simples	105
V.5.1.ii. Bassin versant complet : Corrélations croisées	107
V.5.1.iii. Bassin versant complet : Analyses spectrales	109
V.5.2. Simulations des hauteurs d'eau à Tharax	111
V.6. Conclusions et travaux futurs.....	113

Conclusions et perspectives	115
Bilan général	115
Vers une caractérisation des hydrosystèmes karstiques complexes :	116
Perspectives pour 2015-2016	118
Bibliographie	121
Liste des figures	131
Liste des tableaux.....	133
Liste des cartes.....	134

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 Méjannes-Le-Clap. Ce projet de 4 ans (2013 à 2016) correspond à une action de recherche ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et est actuellement cofinancé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. La méthodologie qui découle du projet est nommée « **EVEREST-K2** » (**E**valuation des **V**olumes **E**changés entre **R**ivières et **E**aux **S**ou**T**erraines en milieu **K**arstique et pseudo**K**arstique). Cette méthodologie est en cours de développement et s'appuie sur les approches suivantes : thermie, hydrogéochimie, biologie, hydrologie, géologie, traçages artificiels et modélisation pluie - débit.

Avant-propos

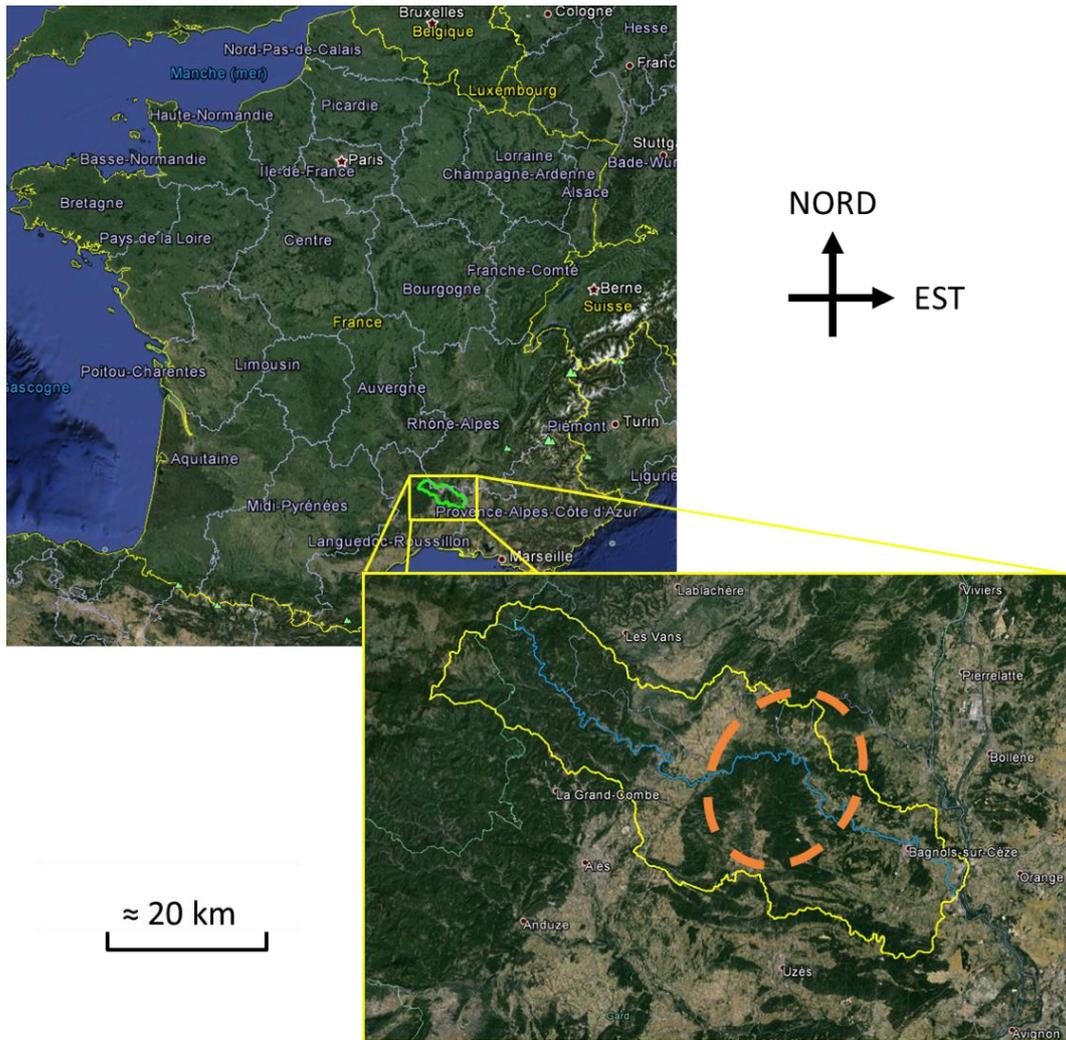
Ce présent document constitue le second rapport d'avancement du projet. Il rend compte pour l'essentiel des actions réalisées en 2014 (année 2). Ce rapport présente également un bref rappel des actions menées en 2013 (cf. rapport d'avancement 2013 année 1) et aborde les actions en cours (2015) et les actions à mener (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). Ces pages sont destinées en particulier dans le cas d'une lecture rapide du rapport.**

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 km². L'étude hydrogéologique est focalisée sur le plateau karstique, en partie aval de la Cèze, incisé par la Cèze elle-même, formant un canyon profond de plus de 200 m [Jolivet & Martin, 2008] (Figure 1). Le terrain d'étude comprend un plateau calcaire en rive droite de la Cèze ainsi qu'une zone carbonatée plissée présentant plusieurs formations géologiques différentes entre rive gauche de la Cèze et rive droite de l'Ardèche. Cette zone expérimentale qui n'est pas encore entièrement délimitée, du fait que les limites hydrogéologiques ne sont pas précisément connues, couvre une surface d'environ 500 km². 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 le précédent rapport d'avancement (année 2013), 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'agit 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) et le 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 le manque de connaissance. D'un point de vue scientifique, il convient donc de s'intéresser en particulier :

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

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). Ces sources ont des fonctionnements contrastés. Elles se démarquent notamment par leurs chimismes, leurs thermies, leurs hydrodynamismes, leurs débits, leurs natures ponctuelles ou diffuses et le fait qu’elles 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 au cours de cycles hydrologiques. Le groupement d’outils issus de plusieurs disciplines constitue la méthodologie nommée « **EVEREST – K2** » comme **E**valuation des **V**olumes **E**changés entre **R**ivières et **E**aux **Sou**Terraines en milieu **K**arstique et pseudo**K**arstique. Cette méthodologie pluridisciplinaire est structurée en plusieurs approches telles que la thermie, l’hydrogéochimie, la biologie, l’hydrologie, la métrologie, la géologie, les traçages artificiels et la modélisation pluie – débit.

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

- Contenu sommaire des actions à conduire sur l'intégralité du projet (2013 – 2016) :

Pour atteindre les objectifs du projet, plusieurs approches sont nécessaires :

- l'hydrologie et la métrologie pour quantifier les variations des débits dans le temps et l'espace des sources karstiques et de la rivière ainsi que les échanges entre les deux compartiments ;
- la thermie pour localiser les zones d'échanges et guider l'échantillonnage géochimique et biologique ;
- la géologie pour identifier les structures aquifères et les relations entre ces aquifères (fractures, limites d'aires d'alimentation en particulier) ;
- les traçages artificiels pour confirmer et préciser les délimitations des aires d'alimentation ;
- la biologie (invertébrés souterrains) pour confirmer les échanges entre karst et rivières ;
- la géochimie pour identifier l'origine des eaux et confirmer ainsi les aires de drainages.

Ces approches nécessitent une instrumentation in-situ appropriée accompagnée d'une maintenance et de relevés réguliers (en particulier des sondes CTD, des pluviomètres, des fluorimètres de terrain et des fluocapteurs).

L'ensemble de ces données servira à disposer des connaissances nécessaires pour alimenter les modèles pluies – débits dans des objectifs de prévision (impacts d'aménagements, de prélèvements ou de scénarios d'étiages sévères).

Une brève description des actions réalisées (2013 – 2014) et engagées (2015 – 2016) est proposée ci-après.

- Actions réalisées (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, qualité des eaux a été effectuée. Cette synthèse est nécessaire afin de mieux cerner le lien étroit entre les problèmes de gestion de la ressource et les lacunes de compréhension du système karstique. Ces lacunes de connaissances concernent la localisation des pertes et des gains de débits le long du linéaire de la Cèze dans sa traversée du plateau karstique et plus généralement le fonctionnement et les réponses variées du karst d'amont en aval, à travers un cycle hydrologique (crues et étiages).

- **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 cohérence avec l'action ZABR thermie (*pilotée par l'ENS (V. Wanrzyńskiak et H. Piegay)*). La première campagne a été réalisée le 13-04-13 en situation de hautes eaux, les contrastes de températures entre les eaux souterraines et les eaux superficielles étaient alors assez faibles, de plus, le débit de la rivière était trop fort ce qui a eu pour effet de masquer les apports souterrains. La seconde campagne a eu lieu le 11-07-13 en situation de moyennes eaux avec des contrastes de températures importants (plus de 15°C). 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 (micromoulinet) réalisées jusqu'alors ;
- La distance d'homogénéisation des eaux en vue d'un échantillonnage optimisé en rivière pour les campagnes hydrogéochimiques.

L'approche thermique 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. Réalisation de prélèvements d'eaux pour analyses chimiques en différents points de la Cèze et au niveau des sources karstiques connues afin de déterminer l'origine des eaux et d'estimer des proportions de mélanges ainsi que des phénomènes de recyclage des eaux. L'échantillonnage des sources et de la rivière 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 ;
- De caractériser 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'échantillonnages des invertébrés souterrains. Il s'agissait d'une part, d'évaluer le pool régional d'espèces par échantillonnage de la faune présente dans les karsts (piégeage et filtration des sources, échantillonnage des grottes accessibles) et d'autre part, d'établir un profil longitudinal de la faune interstitielle présente dans les avals de bancs (-50 cm de profondeur et échantillons triples), complété par la mesure de paramètres chimiques indicateurs des apports (température, conductivité, pH, oxygène dissous, Calcium, Magnésium). Les échantillons ont été prélevés en juillet 2013 entre la source des Fées et la source de Monteil sur 18 bancs de graviers, 4 sources et 4 benthos.

- **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 a pour ambition in fine d'analyser les potentialités de développement des karsts profonds, de mieux appréhender le devenir des eaux non reprises par la Cèze ainsi que 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 limites soulevées 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).

- **Actions réalisées (2014) :**

- **Prospections par traçages artificiels**. Les objectifs principaux des traçages sont de mettre en évidence les relations entre certaines pertes de la Cèze et certaines sources 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 comprend l'installation de fluorimètres de terrain couplés à des fluocapteurs renouvelés régulièrement et 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 analysé 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 fait 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 m³ d'eau issue du pompage du siphon. Le traceur a été analysé 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'est 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 coule plus, 3 kilogrammes d'éosine ont été injectés et la restitution du traceur a été suivie au niveau des sources de Foulatier, de Fond 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 mettre en œuvre un tel traçage. Il sera donc 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 températures 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 est 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 par le tri et le dénombrement des individus en 2014. Les résultats ont été analysés et l'ébauche d'un diagnostic des échanges karst – rivière a pu être établie le long du linéaire de la Cèze entre Tharoux à l'entrée des gorges et Monclus à la sortie des gorges. Le calcul de l'indice d'échanges entre karst et rivière se base notamment sur le type (traits biologiques) et l'abondance d'espèces triées et dénombrées dans les eaux échantillonnées. Des actions complémentaires permettant d'améliorer le diagnostic sont actuellement conduites (2015) et sont décrites plus précisément dans ce rapport.

- **Suivi des débits** et de la **pluviométrie** locale: Les sondes CTD permettent d'enregistrer par pas de temps d'un quart d'heure les variations de hauteur, de température et de conductivité des eaux. Ces sondes ont été disposées en fin d'hiver et début de printemps au niveau des principales sources connues (environ 12 sources) et au niveau de la rivière (sur 4 tronçons). Le suivi en continu est prévu sur au moins deux cycles hydrologiques (2014 et 2015). Il a pour objectif de compléter la vision générale des écoulements pour mieux appréhender les transferts d'eau et l'inversion des échanges entre les 2 milieux (souterrain et superficiel) mais aussi de définir une typologie hydrodynamique des différentes sources. Les résultats des campagnes de jaugeages ponctuelles (approche hydrologique) pourront être positionnés par rapport à l'évolution générale des chroniques de hauteurs et serviront pour les courbes de tarage.

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 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) serviront 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 permettront 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 incluent des observations macroscopiques fines des différents faciès carbonatés, la localisation des failles et zones broyées, des mesures de pendages le long de transect N/S, du prélèvement d'échantillons pour l'observation des faciès en lame mince.

Les objectifs de ces reconnaissances sont 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'Orgnac (Edytem, F Bourges). La réunion 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 est de modéliser les échanges entre la Cèze et les aquifères karstiques qui l'entourent. Cette étape est destinée à mettre en place un modèle de reconstitution des débits à l'exutoire des arrivées karstiques dans la Cèze en fonction des variables de forçages climatiques (pluie, ETP, températures). Pour cela le travail s'est orienté vers une modélisation statistique de type réseau neuronal (RN). L'étape préalable à ce travail de modélisation est 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 constituée 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 sont toujours en cours (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'Ecole 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'Ecole 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 actuellement engagées (2015 - 2016) :**

La valorisation des données acquises en 2013 et 2014 nécessite de poursuivre sur 2015 et 2016 les investigations engagées et non terminées et de réaliser de nouvelles actions. Les perspectives de ce rapport reprennent pour l'essentiel ce paragraphe.

- **Poursuite des actions engagées en 2013 – 2014 :**

- **Prospections par traçages artificiels** : Si les conditions hydrométéorologiques le permettent, un traçage des pertes de la rivière Cèze en amont des gorges sera effectué. Ce traçage n'a jamais été réalisé en condition de rupture de continuité du flux d'eau. Il aura pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de quantifier dans quelles proportions et au bout de combien de temps ces sources sont impactées (bilan de masse). En situation de hautes eaux (automne 2015 et/ou hiver 2015-2016), plusieurs points d'injection sur le plateau karstique de Méjannes-le-Clap sont à l'étude.

- En bordure méridionale, à l'aven des Cartouses, une cavité joue le rôle de perte du ruisseau qui le borde. Il s'agira de vérifier si une diffluence endokarstique se produit entre les circulations souterraines de la rivière de Camélié (moins 125 mètres) et de l'aven de l'Agas (moins 160 mètres). Ces circulations seront à mettre en relation avec leurs cotes NGF respectives. Les eaux de ces deux avens feront l'objet de surveillance (fluocapteurs) ainsi que les principales résurgences en rive droite côté Cèze et au niveau de la source temporaire des Soudans (ou Issoudans) située sur la commune de Verfeuil (le suivi par fluorimètre sur ces sources, dans la mesure du possible, sera privilégié).
- En bordure occidentale, au niveau des pertes du ruisseau du Pâtis. Si aucun exutoire n'est apparent sur cette zone, il existe des puits artificiels au niveau du fossé d'Alès, qui permettront de vérifier s'il existe une relation entre les roches carbonatées de la bordure du plateau urgonien et les terrains priaboniens du fossé d'Alès.
- En bordure septentrionale, l'aven Rouge qui délimite deux bassins d'alimentation de surface, l'un orienté vers le N-O, l'autre vers le N-E.

- Approche **biologique** : Pour l'année 2015, deux tâches principales sont encore à réaliser. Tout d'abord, le tri et d'identification de la faune du compartiment benthique de la rivière permettra de savoir si elle évolue d'amont en aval des gorges. Ensuite, afin de mieux connaître la composition spécifique de la faune karstique, des échantillons de l'endokarst seront 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 températures 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 de jaugeages par les crues de la Cèze et de la difficulté à jauger certaines sources. D'avantage de mesures de débits de sources sont réalisées afin de compléter et d'améliorer la robustesse des relations hauteurs/débits. Une réflexion sur la manière d'apprécier la qualité des mesures est actuellement menée afin de mieux qualifier la confiance que l'on peut accorder aux données.

- Pour la rivière : Les jaugeages différentiels (entre 6 et 8 tronçons jaugés) réalisés en rivière sont beaucoup moins soumis aux incertitudes et donnent les résultats les 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 vice versa. Ces bilans par tronçons sont comparés aux mesures réalisées au niveau des sources et dévoilent des différences notables qu'il conviendra de critiquer.

- **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 tous problèmes de dysfonctionnement et 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. Pour mener à bien cette analyse, un stage de master 2 à l'EMA a débuté en mars 2015 (Jocelyn Faroux, Univ. Poitiers).

- **Comparaison des profils altimétriques Cèze/Ardèche** : Le profil altimétrique de la Cèze avait été réalisé en 2013, il est comparé à celui de l'Ardèche qui a été réalisé le 20 mai 2015. Les deux profils d'altitudes côté Cèze et Ardèche présentent des pentes générales d'amont en aval des gorges assez similaires d'environ 1 ‰. Au niveau du massif urgonnien incluant la Cèze et l'Ardèche, le profil de la Cèze est en moyenne plus élevé que celui de l'Ardèche. La pente moyenne entre les lignes d'eau des deux bassins versants (Cèze et Ardèche) est comprise entre de 1 à 2 ‰. Cette comparaison de profil altimétrique permet d'alimenter la réflexion sur l'évolution géomorphologie des deux rivières mais également sur les potentielles relations hydrauliques entre Cèze et Ardèche.

- **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 actuellement mené 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.

Pour mener à bien ce travail, un stage de master 2 à l'EMA a débuté en février 2015 (Adrien Coutouis, Univ. Poitiers). Ce stage s'intéresse également à la mise en œuvre d'un modèle à réseaux de neurones sur les stations de Tharax et La Roque-sur-Cèze et, par comparaison de ces deux stations, d'étudier les échanges nappes rivière. Par ailleurs, les résultats de ces modélisations permettant de caractériser les échanges karst-rivières seront comparés aux résultats obtenus par la méthode des débits classés.

- Nouvelles actions à mener :

- **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 pallier les limitations liées à l'analyse en ions majeurs seule, les outils isotopiques ont été envisagés pour lever certaines incertitudes.

Pour ce faire, les isotopes du soufre (^{34}S et ^{32}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) est 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. Par ailleurs, le fractionnement isotopique du carbone inorganique dissous (^{13}C) des eaux des sources et de la rivière est analysé afin de déterminer si il est discriminant.

Un test a été réalisé en juillet 2014 comprenant une quinzaine d'échantillons. Ces échantillons comprennent des 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).

Les premiers résultats montrent :

- Il existe des contrastes dans le fractionnement isotopique du soufre entre les eaux des sources et de la rivière. Il va de soi qu'en l'état, l'échantillonnage n'est pas suffisamment exhaustif pour tirer des conclusions définitives. Il est notamment impératif d'isoler/identifier les caractéristiques chimiques et isotopiques des différents pôles participant aux mélanges des eaux et d'assurer un suivi temporel au cours d'un cycle hydrologique.
- Les échantillons prélevés sur les roches (marnes et argiles au niveau du plateau karstique), quant à eux, contiennent que très faibles quantités de soufre et il est donc peu probable que ces roches participent significativement à l'apport en sulfate des eaux. Dans ces conditions, les sulfates proviennent du fossé d'Alès et/ou de l'amont du bassin versant de la Cèze (notamment les formations Triasiques). Un échantillonnage plus exhaustif des roches à l'origine des sulfates pourra être réalisé.

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 déjà été réalisée en juin 2015. Les échantillons sont en cours d'analyse.

Suite au 2nd comité de pilotage du projet, un traceur naturel des eaux avait été suggéré. Il s'agit des isotopes du Strontium. 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 (réalisé à Nîmes) étant particulièrement onéreuses, un essai sur quelques points (moins de 10) sera réalisé en période de basses eaux de l'été 2015.

- **Caractérisation par des échanges karst/rivière par radioéléments** : Cette action est directement liée au projet mais fait l'objet d'une fiche ZABR 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 (226Ra) et il montre des valeurs généralement faibles (qq centaines de Bq/m³) car il s'échappe relativement vite dans l'atmosphère. Dans les eaux souterraines par contre, les activités sont nettement plus élevées car le radon est contenu et produit à partir de l'ensemble des minéraux qui constitue la roche encaissante : les activités atteignent généralement plusieurs milliers de Bq/m³. Lorsque des eaux souterraines sont injectées en surface, quel que soit le type d'injection (ponctuel ou diffus), l'analyse du 222Rn 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 222Rn dans la Cèze sur une portion délimitée permettra de définir les flux entrants (apports d'autres affluents, par diffusion du sédiment, par décroissance du 226Ra 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 222Rn dans les eaux souterraines sont mesurées en parallèle, ce flux de 222Rn 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 sont prévues 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 montrés 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 prévue. Les premiers tests ont également pu déterminer que la navigation était envisageable, rendant la mesure en continu au fil de l'eau possible.

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. Il s'accompagne du 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 (³⁴S, ¹⁸O, ²H, ¹³C), un échantillonnage exhaustif des sources, de la rivière et des affluents a été réalisé.

Toutes les données collectées au cours de cette campagne sont en cours de traitement, une réunion de travail sur les résultats de la campagne Radon est prévue en septembre 2015. Il sera également question de confronter ces résultats à ceux des jaugeages et de l'échantillonnage hydrochimique et isotopique réalisé en parallèle.

- **Synthèse, interprétation et valorisation des résultats :** En plus d'être analysés individuellement, les résultats de chacune des approches seront confrontés les uns aux autres et mis en perspective du point de vue de la caractérisation des échanges karst - rivière. Il s'agira d'identifier les points de convergences et de divergences mais aussi les complémentarités et les limites de chaque des approches. L'ensemble de ces résultats sera consigné dans un rapport, ces éléments seront destinés à venir enrichir dans un second temps le guide méthodologique sur les échanges nappes/rivière.

- **Communications sur le projet**

- Un 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].
- Un 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). Le compte rendu figure en Annexe 1.

- Annonce du plan :

Après avoir décrit de manière succincte le principe des approches propres à la méthodologie et les actions réalisées (année 2013 -2014), engagées et à venir (année 2015 et 2016), l'objet de ce rapport d'avancement est de présenter quelques résultats issus de ces actions. Par ailleurs, le contenu de ce rapport est aussi l'occasion de proposer pour chacune des approches des perspectives d'améliorations.

La première partie aborde précisément le contexte géologique régional et local de la zone étudiée et s'intéresse à l'évolution structurale et tectonique des calcaires urgoniens mais aussi du lien entre le contexte géologie et les écoulements souterrains. La seconde partie présente une synthèse des trois opérations de traçages réalisées en 2014 et propose une planification de nouveaux traçages complémentaires. La troisième partie évoque les mesures de débits réalisés (sources et rivière), dévoile les données de suivi en continu des sources et de la rivière et des méthodes statistiques envisagées pour traiter ces données. La quatrième partie présente les derniers résultats de l'utilisation des invertébrés interstitiels pour localiser les zones d'échange rivière-nappe. La cinquième partie expose les résultats sur les analyses corrélatoires et spectrales appliquées aux données publiques disponibles sur la Cèze et aborde les premiers essais de modélisation pluie – hauteurs par réseaux neuronaux. Une conclusion générale reprend celle du précédent rapport, elle est ciblée les premiers résultats permettant de caractériser les échanges entre karst et rivière et aborde les perspectives d'améliorations.

NB : Les annexes sont présentées à la fin de ce rapport. Un sommaire référence l'ensemble de ces annexes.

PARTIE I

—

Contexte géologique

Personnes directement impliquées dans cette action :

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

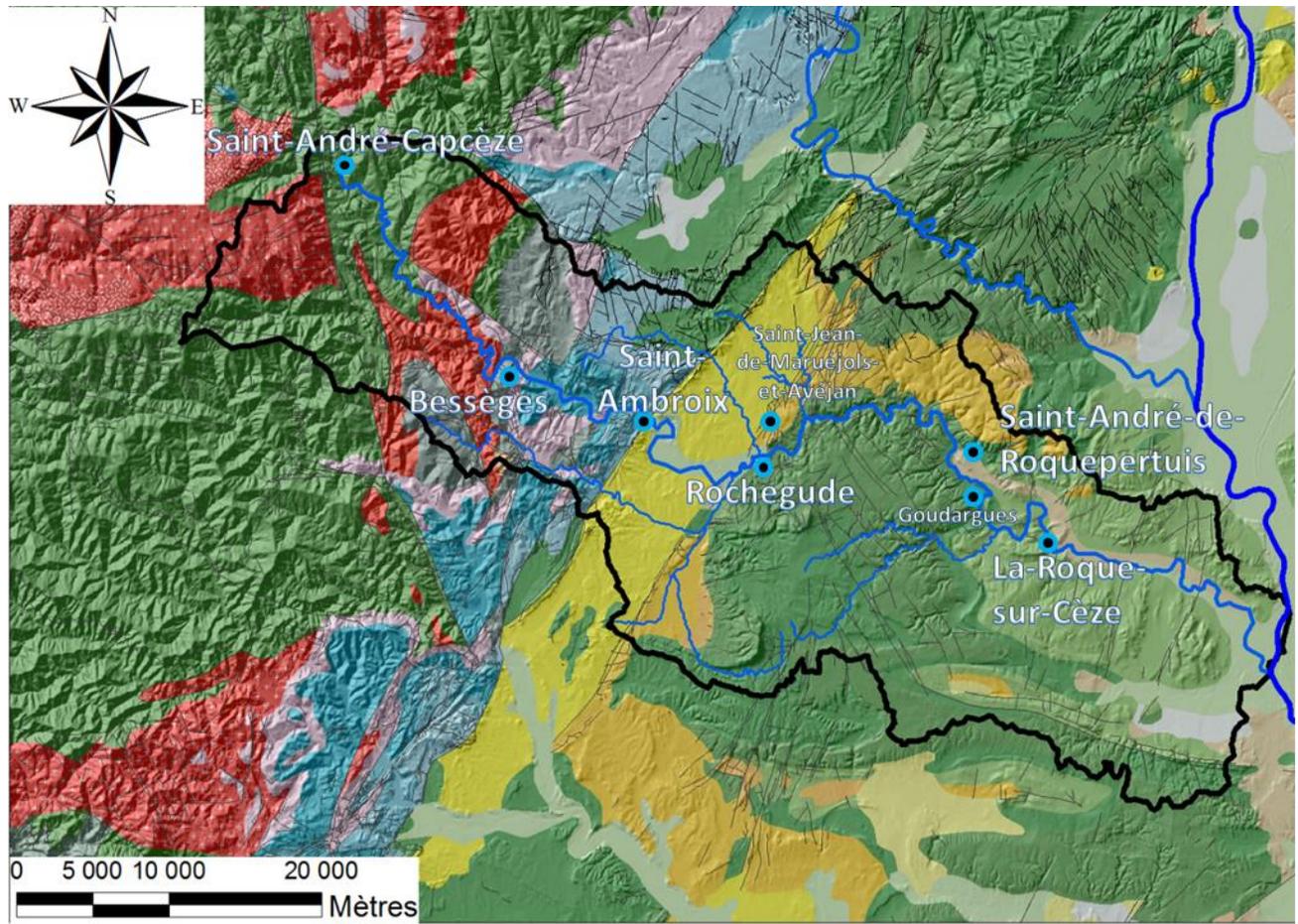
→ Joël Jolivet
(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice)

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

Ce paragraphe décrit les principales formations géologiques rencontrées sur l'ensemble du bassin versant de la Cèze encadrant la zone étudiée. La description est basée sur les cartes et notices géologiques du BRGM au 1 / 50 000^{ème} de Pont-de-Saint-Esprit [BRGM - Pont-Saint-Esprit, 2005] et Bourg-Saint-Andéol [BRGM - Bourg-Saint-Andéol, 1989]. Il est indispensable de décrire les formations géologiques de l'ensemble du bassin de la Cèze car la géologie elle-même conditionne fortement les écoulements superficiels et souterrains et est également à l'origine des forts contrastes concernant la chimie des eaux (interactions entre les eaux et l'encaissant rocheux). L'interprétation des résultats de chacune des approches fait référence à cette description.

A l'échelle du bassin hydrologique, autrement dit topographique, la rivière Cèze traverse plus d'une dizaine de formations géologiques différenciées. La Carte 2 présente un regroupement des principales formations géologiques. Le socle sur lequel repose le site d'étude date du système Paléozoïque. Sur la partie amont, d'Ouest en Est du bassin de la Cèze, on observe des Micaschistes, des Quartzites micacés, des Orthogneiss et des Granites. Cet ensemble de formations est chevauché d'Est en Ouest, aux alentours de Bessèges, par des schistes, du charbon, des grès et des conglomérats du Stéphanien moyen, eux-mêmes chevauchés par d'autres schistes, charbon, grès et psammites du Stéphanien inférieur. Sur ces anciennes formations géologiques reposent directement des roches sédimentaires telles que des grès, des argiles, des conglomérats et des dolomies datant du Trias moyen et supérieur. Il y a donc toutes les formations géologiques du Permien, soit environ 50 Ma de formations qui n'apparaissent pas. Au-dessus des formations triasiques, on retrouve des formations carbonatées comme des calcaires (parfois argileux ou marneux ou à entroques) ainsi que des dolomies du Jurassique. Le Jurassique apparaît difficilement là où la Cèze le traverse, au niveau de la commune de Saint-Ambroix, car il a été enfoui par un jeu de failles normales puis recouvert par des formations géologiques plus récentes. Toujours au niveau de Saint-Ambroix, affleure des marnes et une faible épaisseur de calcaires à faciès urgonien ($\approx 100\text{m}$) (Barrémien-Bédoulien) qui plongent dans le fossé d'Alès. Dans ce fossé d'Alès sont répertoriées plusieurs formations sédimentaires et sédimentaires détritiques. A l'Ouest de Saint-Ambroix reposent des conglomérats de l'Oligocène, qui reposent eux-mêmes sur des formations marneuses (parfois à gypses), gréseuses, calcaires, de lignites et aussi conglomératiques datant du Priabonien à l'Oligocène. Certains calcaires sont bitumeux/asphaliques et ont fait l'objet d'exploitation (Exemple : Mines de la S.F.A. à Saint-jean-de-Marvejols-et-Avejan jusqu'en 2008), ils sont retrouvés avec des calcaires lacustres. A l'Est de ce

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

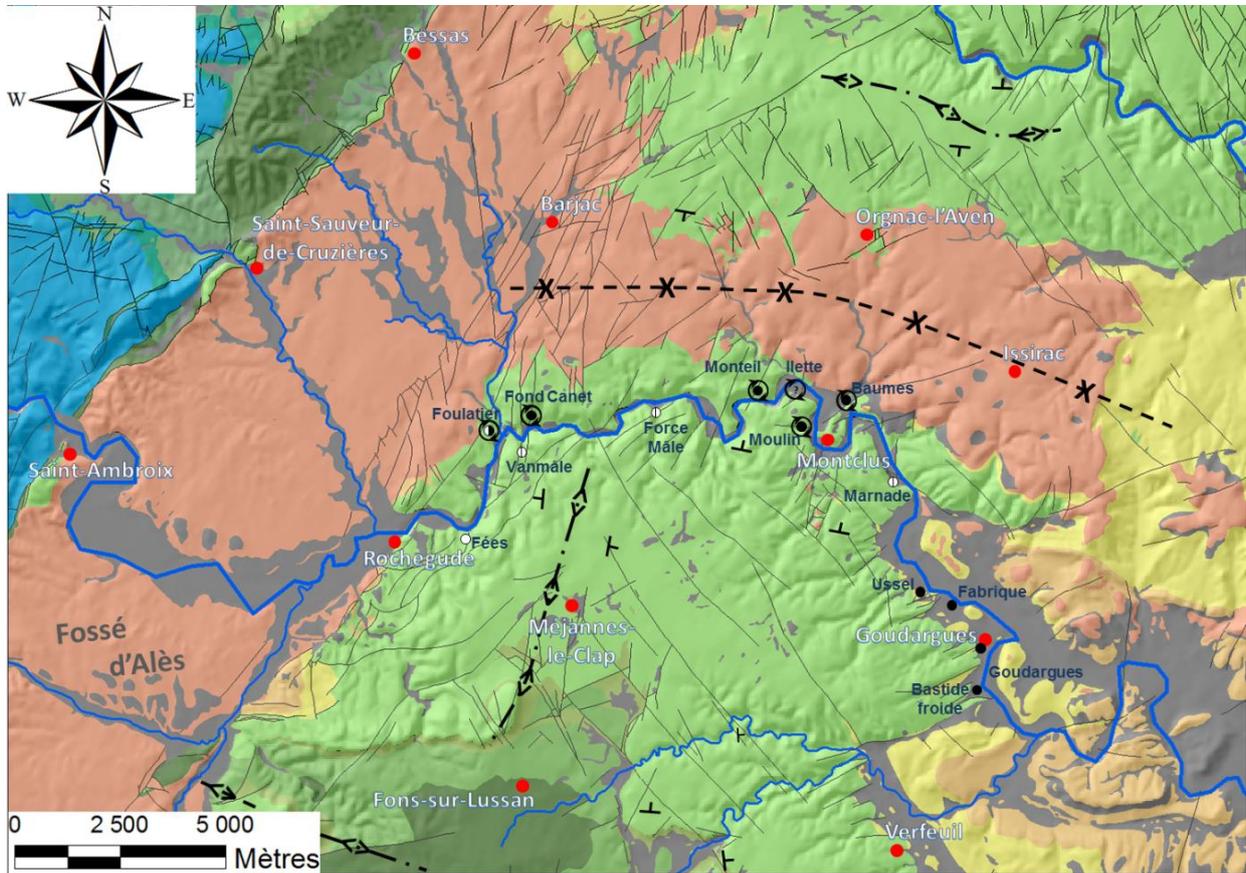


Légende:

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

Carte 2 : Géologie régionale simplifiée du bassin versant de la Cèze.

I.2. Focus sur la zone étudiée : Les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap



Légende:

- Villes
- ~ Rivière
- ~ Affluents
- Failles principales
- ⋆ Axe anticlinal
- ∠ Pendages
- ∠ Axe synclinal

Sources karstiques :

Type d'émergence. Pérennité

○ Exsurgence, Permanente

⊙ Exsurgence, Temporaire

● Résurgence, Permanente

⊙ Résurgence, Temporaire

⊙ Inconnu, Inconnu

Recyclage des eaux de la Cèze

⊙ Avéré ou fortement suspecté

Perméabilité karstique	± Perméable	Imperméable	Perméabilité d'interstice	
			IV ^{aire}	
			III ^{aire}	
			II ^{aire}	Crétacé supérieur (Maastrichien au Turonien)
			II ^{aire}	Crétacé moyen (Cénomaniens; Albien; Aptien)
			II ^{aire}	Faciès Urgonien; Crétacé inférieur (Aptien basal; Barrémien supérieur/moyen)
			II ^{aire}	Barrémien inférieur; Crétacé inférieur
			II ^{aire}	Hauterivien supérieur; Crétacé inférieur
			II ^{aire}	Hauterivien inférieur; Crétacé inférieur
			II ^{aire}	Valanginien; Crétacé inférieur
			II ^{aire}	Berriasien; Crétacé inférieur
			II ^{aire}	Jurassique

Carte 3 : Contexte géologique de la zone d'étude, les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap.

La Carte 3 présente la zone étudiée qui comprend majoritairement les formations carbonatées à faciès urgonien du plateau de Méjannes-le-Clap. Les calcaires du plateau sont inclinés différemment selon le lieu d'observation. Un axe anticlinal NOO-SEE important fait affleurer au Sud du plateau des marnes du Valanginien et de l'Hauterivien. Ce pli coïncide avec des pendages faibles orientés généralement en direction du Nord sur la partie Est du plateau. Dans cette autre moitié, partie Ouest du plateau de Méjannes-le-Clap apparaissent des pendages Ouest et Est faisant percevoir un anticlinal d'axe NNE-SSO. Cet axe anticlinal peut être mis en relation par rapport à la formation du rift que constitue le fossé d'Alès, car il suit la même direction que les failles majeures qui délimitent ce fossé.

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

Plus au Nord du synclinal d'Issirac, les calcaires urgonien dans lesquels la rivière Ardèche est encaissée forment un anticlinal en rive droite de celle-ci. La connexion souterraine entre les calcaires côté Ardèche et ceux côté Cèze n'est pour le moment pas vérifiée. De plus, outre le fait qu'il n'y ait plus de jonction à cause des jeux de failles, l'hypothèse que l'épaisseur du calcaire varie est probable. Ce massif calcaire urgonien compris entre les âges du Barrémien et du Bédoulien, comme il a été signalé auparavant, voit certaines couches avoir une épaisseur différente de part et d'autre du plateau karstique. Pour une puissance du calcaire pouvant atteindre environ 400 m d'épaisseur, des diminutions de plus de 100 m d'épaisseur sont signalés côté Ouest du plateau par rapport à l'Est [BRGM Pont-Saint-Esprit, 2005]. C'est un critère qui reste à déterminer sur tout l'horizon du plateau afin d'en reconstituer si possible son volume et sa répartition spatiale.

Le travail réalisé sur cette carte a aussi pour objectif de mettre en évidence l'hypothétique fonctionnement des sources, dans l'optique d'être officialisé par les différentes approches présentées dans la suite de ce rapport. Les symboles des sources, suivant si ce sont des ronds teintés en noir ou sur fond blanc représentent respectivement Si ce sont des résurgences ou des exurgences. Si ces mêmes symboles sont respectivement teintés à moitié ou dotés d'un trait vertical, cela traduit leur aptitude à se tarir en période d'assèchement. Lorsque le cercle comprend un point d'interrogation, c'est pour signifier que le fonctionnement de cette dernière n'est pas encore bien défini à ce stade de l'étude. Une caractéristique particulière de certaines sources s'est avérée au cours des premières analyses. En effet, quelques sources débitent en plus de l'eau souterraine, de l'eau provenant de l'amont de la rivière. Ce phénomène de recyclage des eaux de la Cèze par les sources est matérialisé par un cercle composé de deux flèches entourant le symbole de la source.

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

Une réflexion sur le nombre de failles et/ou linéaments recensés sur le terrain ainsi que la détermination de leurs orientations constitue un bon moyen de comprendre et peut-être de d'expliquer la mise en place des différentes structures telles que les anticlinaux, synclinaux ainsi que les discordances géologiques de la zone d'étude. Que ce soit à l'échelle du bassin versant ou encore du plateau karstique de Méjannes-le-Clap, 4 directions principales (Figure 1) sont mises en évidence ; NE-SO ; NO-SE ; E-O et N-S.

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

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

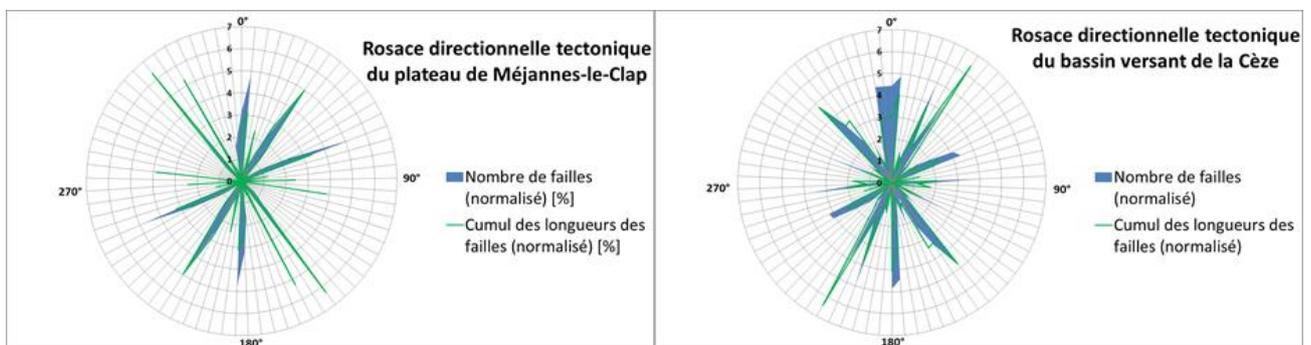


Figure 1 : Rosaces de directions des failles du plateau karstique de Méjannes-le-Clap et du bassin versant de la Cèze, à partir de l'étude des cartes 1/50 000 du BRGM et de l'analyse in-situ.

La chronologie de la structuration du bassin versant de la Cèze soulevée ci-dessus est en corrélation avec les résultats d'une étude réalisée sur la mise en place des calcaires à faciès urgonien dans le Sud-Est de la France [Bastide, 2014], ci-dessous en Figure 2.

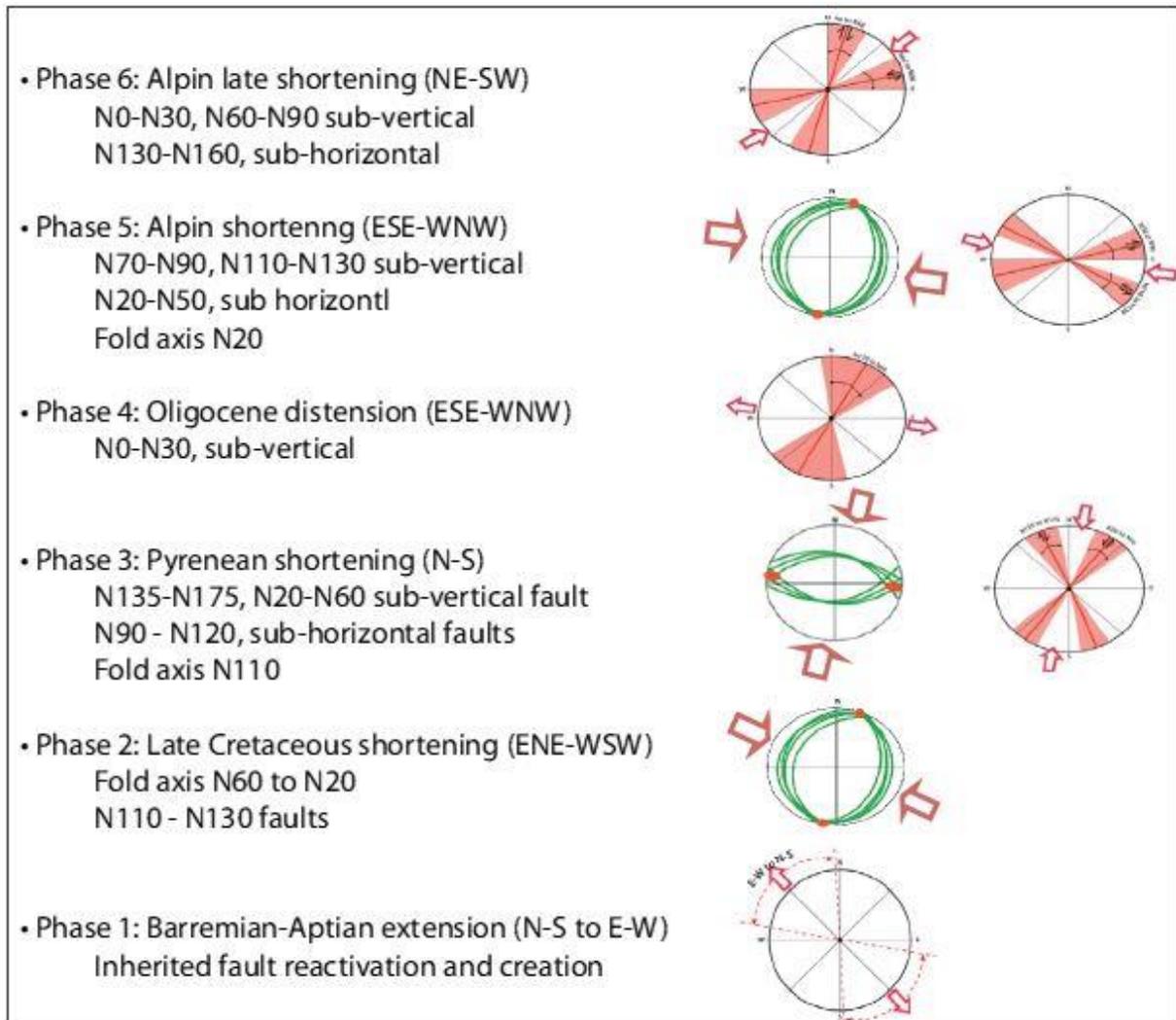


Figure 2 : Calendrier tectonique [Bastide, 2014].

I.4. Evolution structurale et tectonique des calcaires urgoniens

Dans ce paragraphe, 3 objectifs parmi ceux qui ont été cités dans le rapport d'avancement 2013 ont été soulevés. A savoir :

- Quel est l'extension spatiale, la géométrie, les épaisseurs de dépôts et l'évolution paléostratigraphique des formations urgoniennes (affleurentes et non affleurentes) qui permettraient de mieux comprendre la distribution des écoulements souterrains? De telles informations à l'échelle du Sud-Est de la France sont désormais disponibles par le biais de données inédites de forages profonds recoupant l'intégralité des calcaires urgoniens (notamment les forages de Barjac et de Verfeuil) et un modèle géologique (sédimentaire et tectonique) [Bastide, 2014]. Il est question d'intégrer les singularités géologiques locales au contexte régionale du Sud-Est de la France.
- Quelle est l'influence des structures anticlinales et synclinales sur le partage des eaux? Au Nord, le synclinal d'Issirac pose la question du partage des eaux et/ou de la continuité des écoulements entre Cèze et Ardèche [Delannoy et *al.*, 2007] ; [Jolivet et Martin, 2008]. Au Sud, la structure anticlinale pose la question de la connexion de l'aquifère karstique de la Cèze vers celui du Gardon [DDE du Gard, 2003].
- Quel est le rôle des failles sur les écoulements? En lien avec les questions précédentes, certaines failles peuvent jouer le rôle de drain et conditionner l'orientation des réseaux karstiques (failles apparentes sur le terrain). D'autres failles syn-sédimentaires (failles masquées) peuvent jouer le rôle de barrière hydraulique et peuvent être considérées comme des lignes de partage des eaux [Bastide, 2014].

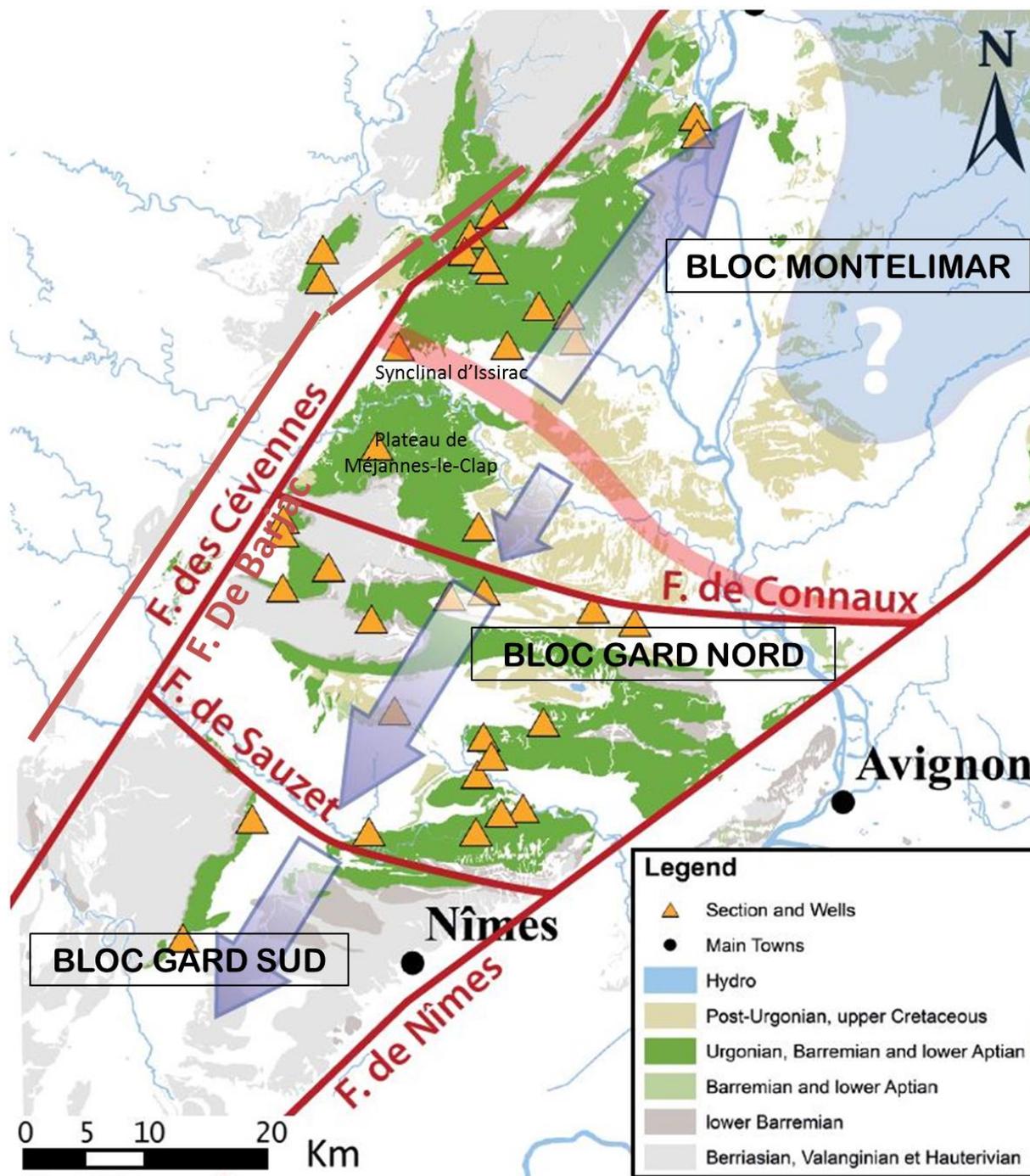
I.4.1. Mise en place du calcaire à faciès urgonien

Cette partie de l'étude a pour but de recenser les connaissances pré-existantes sur le calcaire urgonien au Nord du département du Gard et du Sud de l'Ardèche, ainsi que d'apporter une interprétation personnelle sur sa répartition actuelle à l'échelle de la zone d'étude.

Le calcaire urgonien, au sein du département du Gard, a déjà fait l'objet de plusieurs études. En effet l'écrit le plus ancien répertorié à ce jour date de 1882 par A. Torcapel, où ce faciès qu'est l'urgonien est attribué au "Donzérien" autrement dit entre le Barrémien supérieur et l'Aptien inférieur (Bédoulien) [Torcapel, 1882 in Bastide, 2014]. Cette première datation du calcaire à faciès urgonien a convaincue et été confirmée par la communauté scientifique. En effet, d'autres recherches ont été réalisées sur ce sujet, elles ont permis de déterminer ce faciès entre les niveaux Néocomien comprenant seulement les étages Valanginien et Hauterivien ainsi que le Barrémien, au sud de la zone d'étude puisqu'entre Mons et Brouzet-lès-Alès [Pellat, 1903]. La microfaune et la macrofaune au sein de ces calcaires ont fait l'objet d'études quelques années plus tard, ces paramètres ce sont avérés comme de bons marqueurs des différentes strates de l'urgonien [Pellat et *al.*, 1907] ; [Douvillé, 1918] ; [Cotillon et *al.*, 1979]. D'après Bastide[2014], B. Olivier et M.H. Chaupitre [2006] ont étudié les calcaires urgoniens aux alentours de la commune de Lussan. Ces travaux ont conclu que l'âge de la série urgonienne de cette zone, soit du plateau de Méjannes-le-Clap, est situé entre le Barrémien supérieur et le Bédoulien inférieur. Sur l'ensemble de la répartition des calcaires urgoniens en France, certaines spécificités régionales sont marquées.

En 1979, Arnaud-Vanneau et *al.* distinguent les régions delphino-provençale et aquitano-pyrénéenne. Les calcaire à faciès urgonien de la première région citée, qui se rapprochent le plus de la zone d'étude, ont tendance à se développer en ceintures péri-vocontiennes. Les terres émergées sont quant à elles situées relativement loin des aires de dépôts urgoniens [Arnaud-Vanneau et *al.*, 1979].

Plus récemment, les calcaires urgoniens ont été compartimentés en plusieurs blocs influencés par des phénomènes de subsidences différentielles, voir Carte 4.



Carte 4 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard et de l'Ardèche. Les traits rouges représentent les failles délimitant les blocs basculés, les flèches bleues, la subsidence induite par le jeu des failles, la zone rouge représente la zone de haut-fond et le bassin Vocontien est représenté en bleu clair. Le point d'interrogation illustre l'incertitude sur sa géométrie dans ce secteur (modifié depuis [Bastide, 2014]).

D'après cette représentation sous forme de blocs, la zone étudiée se situe au Sud du bloc Montélimar ainsi qu'au Nord du bloc Gard Nord. Cette limite entre ces deux blocs suscite un intérêt particulier car elle est représentée par la faille des Connaux, qui est une faille majeure N110E, pouvant avoir un impact sur les circulations d'eaux souterraines au sein du réservoir qui fait l'objet de cette étude. En effet, d'après le bassin topographique déterminé par SIG (Carte 1), la partie Nord du bloc Gard Nord figure dans ce dernier (Carte 4).

Or, si cette faille représente une limite hydrogéologique, une des limites de la zone d'alimentation sera déterminée. De plus à ce point d'intérêt, au cœur du bloc Montélimar apparaissent des formations tertiaires affleurantes sur une structure présentée comme le synclinal d'Issirac.

Si ces calcaires fonctionnent comme des blocs, quelle est la géomorphologie du bloc Montélimar face à cette particularité structurale?

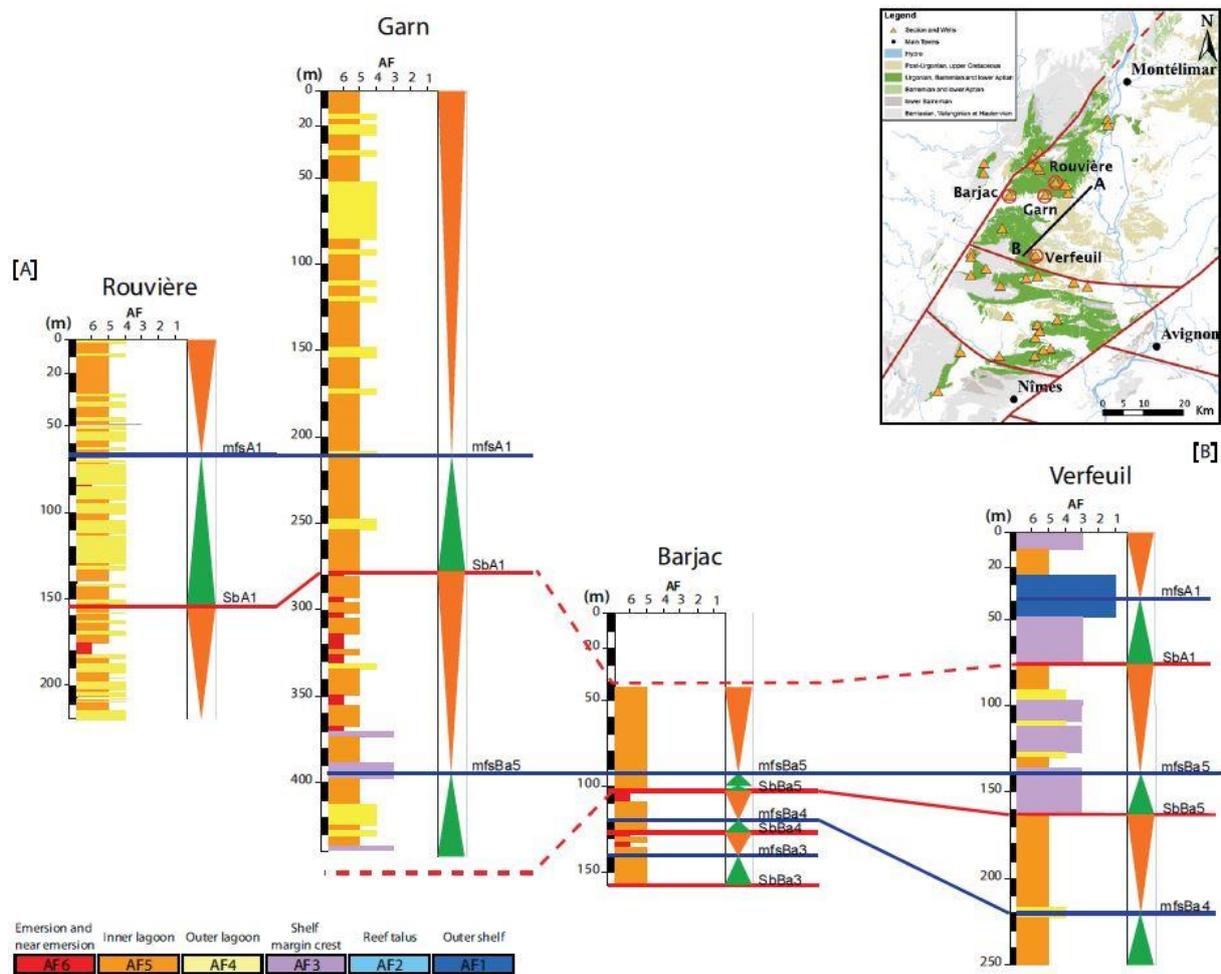


Figure 3 : Corrélations des coupes du Nord du Gard et de l'Ardèche [Bastide, 2014].

A partir de la Figure 3, il apparaît que les épaisseurs des différentes stratifications des calcaires urgoniens varient en fonction des 4 logs stratigraphiques représentés. Concernant les variations Nord-Sud, les différences d'épaisseurs entre les différentes phases de stratifications SbA1, mfsA1 et mfsBa5 pour les forages "Rouvière", "Garn" et "Barjac" montrent un amincissement de l'urgonien du Nord vers le Sud. A noter que les différences d'épaisseurs observables entre les forages "Garn" et "Barjac" sont très fortes alors que les forages se situent pratiquement sur une même longitude.

D'après les observations faites à partir de ces 2 forages, l'épaisseur de l'urgonien augmente d'Ouest en Est. Le quatrième et dernier forage "Verfeuil" représenté sur cette Figure 3, se situant encore plus au Sud et à l'Est de celui de "Barjac" fait paraître une augmentation d'épaisseur de l'urgonien en comparaison de ce dernier forage mais cette couche calcaire reste moins épaisse par rapport au forage de "Garn". A partir des observations faites, la répartition du calcaire urgonien au sud du bloc Montélimar manifeste un épaissement général de l'Ouest vers l'Est ainsi qu'une variation d'épaisseur complexe sur un transect Nord-Sud puisque celui-ci subit un amincissement important au niveau du synclinal d'Issirac.

Au vue de la complexité de la répartition de l'urgonien au sein du bloc Montélimar, la transition de ce dernier avec le bloc Gard Nord par la faille des Connaux N110E est un point de connaissance impératif à obtenir.

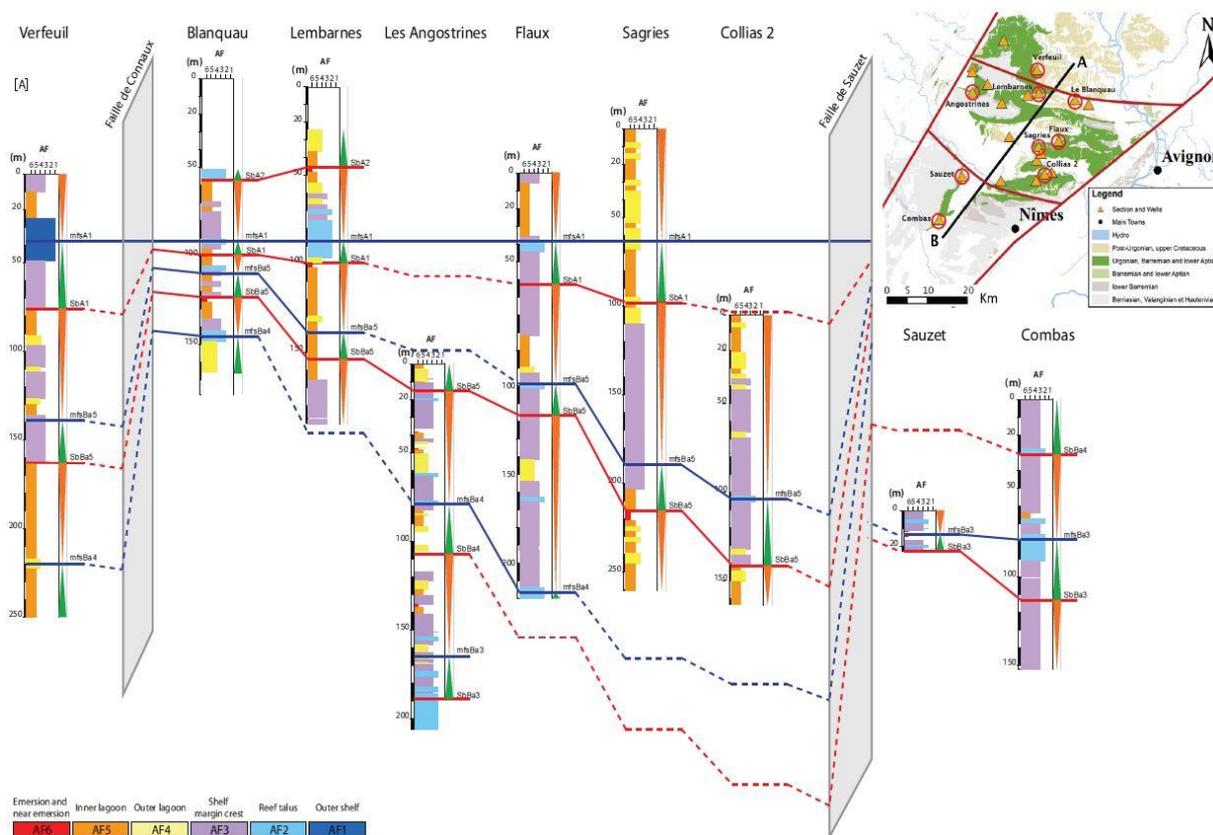
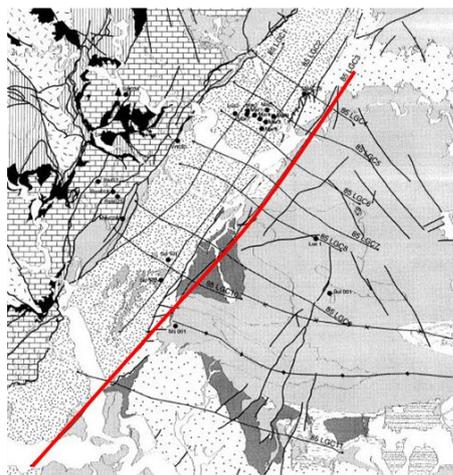


Figure 4 : Corrélation de plusieurs coupes et puits du secteur du Gard. Les rectangles gris représentent les failles d'orientation N110E délimitant les blocs basculés [Bastide, 2014].

Cette Figure 4, de par le rassemblement de 7 forages sur un transect Nord-Sud et un forage de référence par rapport au bloc Montélimar qui est celui de "Verfeuil" montre clairement l'évolution de l'épaisseur de certaines strates du calcaire urgonien au niveau de la faille des Connaux. Cette limite de bloc se traduit par un amincissement immédiat du calcaire, qui va ré-épaissir constamment sur un transect Nord-Sud.

Ces quelques points de références que sont les logs stratigraphiques ont permis d'avoir une première approche spatiale sur la mise en place des calcaires urgoniens.

Grâce à une étude structurale réalisée par E. Sanchis et M. Séranne [2000] au niveau du fossé d'Alès, un profil sismique orienté Nord-Sud est à disposition (Figure 5 ci-après).



- /** Profil sismique
- BS** : Stampien basale
- BL** : Ludien basale
- BE** : Eocène basale
- TB** : interface Tithonien-Berriasien
- DM** : interface Dogger-Malm
- LD** : interface Lias-Dogger
- TL** : interface Trias-Lias
- ⊙ Décrochement en direction du point d'observation
- ⊗ Décrochement en direction opposée du point d'observation

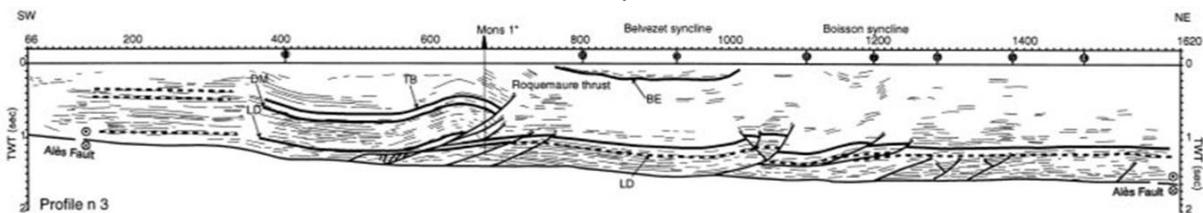


Figure 5 : Profil sismique longitudinal au fossé d'Alès dans les formations du Crétacé, sur un transect partant non loin de Saint-Privas-de-Champclos et terminant vers Lézan (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).

Ce profil, représenté en Figure 5, n'est pas assez étendu au Nord pour représenter efficacement la zone du synclinal d'Issirac. De plus, il borde le rift d'Alès, à cet endroit il se peut que ce soit justement ce phénomène tectonique qui soit le plus marqué par rapport au synclinal. Néanmoins, ce profil reste un résultat intéressant pour observer les contraintes tectoniques sur la zone d'étude. Première observation des plus importantes, la zone d'étude considérée au sein du canyon de la Cèze est un bloc qui glisse sur la faille d'Alès. A noter, la présence d'un autre synclinal, nommé le synclinal de Belvezet. Ce dernier est moins prononcé que celui d'Issirac et non recouvert par des formations tertiaires. Au niveau de la faille des Connaux, nommé la faille de Roquemaure sur la Figure 5, l'amincissement des formations géologiques apparaît nettement. Ce plissement associé à une faille inverse semble comprendre les formations du Jurassique et du Crétacé et est façonné comme un pli lié aux contraintes émises par un chevauchement. Du fait de la faille, un détachement au sein des formations géologiques se produit, entraînant les formations qui se trouvent au-dessus. Sans doute, au début de cette déformation les couches supérieures au décollement sont compétentes, c'est-à-dire qu'elles présentent la particularité de se déformer de manière continue. Mais le décollement a dû continuer de fonctionner, accentuant le pli qui monte dans la pile sédimentaire.

S'en suit alors d'un chevauchement. Ce phénomène semble dû à une contrainte de poussée par le Sud, soit sans doute liée à l'orogénèse Pyrénéenne.

Afin d'avoir un résultat finalisé dans ce travail, une coupe géologique NE-SO appuyée sur les résultats présentés par Sanchis et Séranne, [2000] figure ci-dessous.

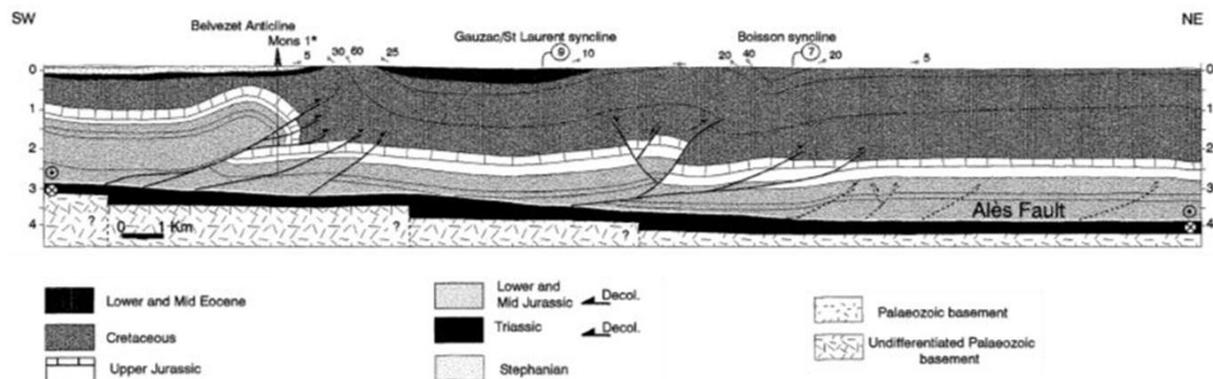


Figure 6 : Coupe géologique correspondant au profil sismique de la Figure 5 (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).

Cette coupe met en évidence que c'est au niveau des formations triasiques que la faille d'Alès s'est mise en place et donc que le décollement se produit. Le bloc calcaire, comprenant les formations du Jurassique et du Crétacé glisse sur les formations triasiques dans une direction plus ou moins Sud-Est. Le chevauchement engendré par les failles inverses dont la faille des Connaux, présenté dans la partie précédente, comprend les formations du Jurassique moyen et supérieur ainsi que le Crétacé dans lequel se trouve l'urgonien. Cette surélévation est la conséquence directe de l'amincissement de l'urgonien observé à partir des logs stratigraphiques en Figure 4. Au sein du Jurassique en plein cœur du plateau de Méjannes-le-Clap subsiste d'autres chevauchements plus légers liés à la présence de failles inverse. De plus, il y a la présence de horst, résultats de ces jeux de failles, qui conditionne à certains endroits le niveau, donc l'épaisseur du calcaire urgonien.

Les résultats présentés par ce transect NE-SO montre la complexité du système urgonien, conséquence des contraintes exercées par les différentes phases tectoniques. Mais aussi, il est complexifié par les amincissements et épaissements des calcaires urgoniens du fait de subsidences différentielles et de chevauchements dû aux phases extensives et compressives respectivement liées à des failles de type normal et inverse.

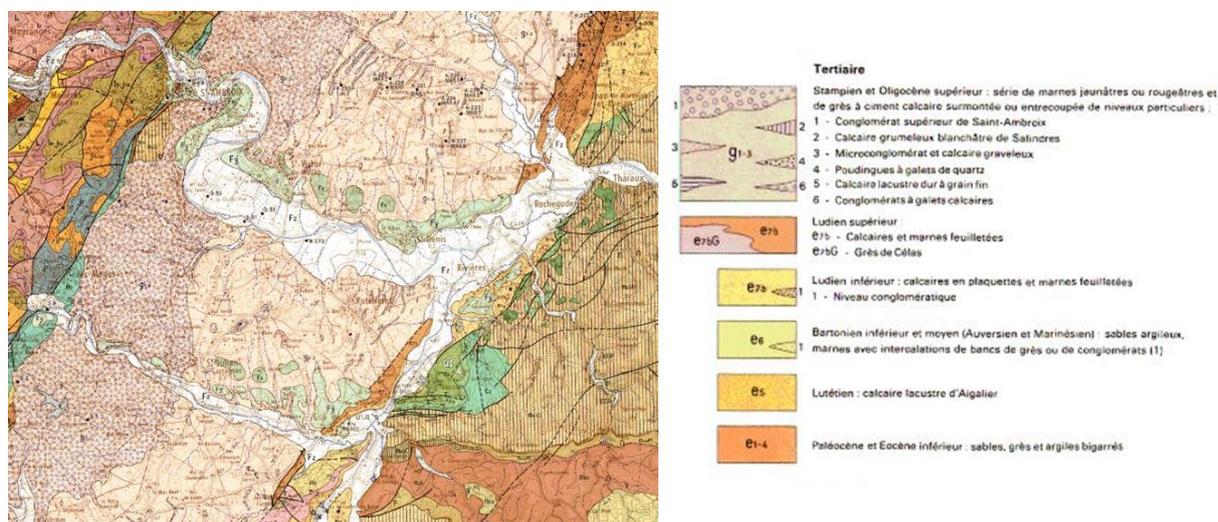
D'un point de vue hydrogéologique, tous ces paramètres ont sans doute une influence sur la circulation des eaux souterraines et sur les potentiels d'échanges entre les eaux souterraines avec des réservoirs plus profonds. A titre d'exemple, les contacts entre les calcaires urgoniens et les calcaires du Jurassique au niveau de la faille des Connaux et au niveau des horsts peuvent permettre des échanges sub-verticaux. Dans ces conditions, l'hypothèse qu'une partie des eaux présente dans l'aquifère du plateau de Méjannes-le-Clap peut s'infiltrer dans un aquifère plus profonds est possible.

Afin d'améliorer les connaissances et la compréhension sur la géomorphologie des calcaires à faciès urgonien, à l'échelle de la zone d'étude, et d'éclaircir les points soulevés précédemment, il est nécessaire de réaliser la même étude que précédemment mais cette fois-ci d'un point de vue longitudinal à la faille des Connaux.

I.4.2. Rifting Oligo-miocène

A l'échelle nationale, le fossé d'Alès est un des principaux bassins syn-rift qui affleure (

Carte 5). Cette particularité permet de révéler son remplissage et ses indices structuraux.



Carte 5 : Représentation du fossé d'Alès par la carte géologique 1/50 000 d'Alès du BRGM.

Le panorama montre une dépression allongée au contact d'une géomorphologie montagneuses, sur son côté Nord-Ouest, dans lesquels des formations carbonatés du Jurassique et du Crétacé inférieur sont recensées. Le tout sur un fond géologique Carbonifère. Étant donné que ce fossé d'Alès est composé de formations Eocène-Oligocène, il y a donc des discordances entre celles-ci et les formations Mésozoïques sur sa bordure Nord-Ouest. De même concernant le côté Sud-Est du fossé d'Alès, les contacts entre ce dernier (Éocène ; Oligocène) et le plateau karstique (Crétacé inférieur) sont discordants. En effet, pour la plupart ce sont des marnes et des calcaires lacustres du Priabonien qui sont tangent aux calcaires du Coniacien. A noter que ces discordances correspondent à la présence de failles majeures telles que la faille des Cévennes pour le Nord-Ouest du fossé et la faille de Barjac pour le Sud-Est.

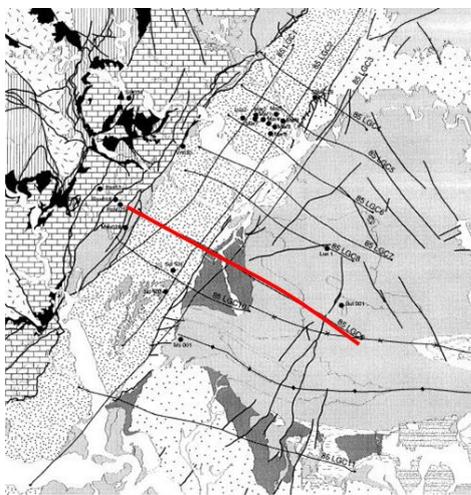
Que ce soit la rivière Cèze ou son affluent, l'Auzonnet, lorsque ceux-ci traverse le fossé d'Alès d'Ouest en Est, ils traversent d'abord des dépôts conglomératiques datant de l'Oligocène pour ensuite traverser des marnes, grès et calcaires lacustres du Rupélien. Ces conglomérats sont composés de brèches et de clastes provenant pratiquement en totalité des marnes du Valanginien, de l'Hauterivien et du calcaire urgonien [Sanchis et Séranne, 2000] ; [Séranne et *al.*, 2011]. Les formations du Crétacé semblent donc être les formations les plus vulnérables à l'érosion par l'eau de ruissellement. Cette fragilité est peut-être due à la fracturation de la roche par les jeux tectoniques. Il se peut que les formations du Jurassique affleurent du fait que la couverture Crétacé a complètement été érodée à certains endroits.

D'un point de vue structural, comme renseigné dans le paragraphe précédent, le fossé d'Alès est bordé par les failles majeures des Cévennes et de Barjac. Respectivement par rapport à ces 2 failles, les pendages des calcaires du Crétacé et du Jurassique s'orientent en Sud-Est pour une inclinaison d'environ 30° et en Nord-Ouest pour une inclinaison plus faible avoisinant 10°. Donc, de part et d'autre du fossé d'Alès, les formations affleurantes datant du Jurassique au Crétacé plongent sous les formations de remplissage du Paléogène. Les formations Éocène et Oligocène du fossé d'Alès ont un pendage général orienté Nord-Ouest. Sauf, en extrême bordure Nord-Ouest du fossé où le pendage est orienté Sud-Est. Ce dernier pendage correspond sans doute à la mise en place des dépôts les plus récents formant ces cônes alluviaux bordiers.

- Coupe géologique Nord-Ouest - Sud-Est

Comme présenté à travers les rosaces de directions des failles, en paragraphe I-3, plusieurs familles de failles sont présentes sur la zone étudiée. Parmi celles-ci, les failles orientées NE-SO ont principalement influencées la zone d'étude. Les premiers indices de cette hypothèse sont que ces failles marquent des discordances géologiques franches. De plus, ces failles sont anciennes, elles ont donc sans doute rejouées plusieurs fois en fonction des différentes phases tectoniques.

Le fossé d'Alès, du fait de son aptitude à contenir des calcaires bitumineux et se situant non loin de la mine de La Grand-Combe, se présentait comme un terrain intéressant pour la prospection d'hydrocarbures. De ce fait, durant les années 1960 à 1985, plusieurs compagnies ont prospectées le sous-sol en réalisant des profils sismiques. Ces profils sismiques, associés à l'acquisition de logs stratigraphiques, sont une aide considérable pour déterminer, comprendre et interpréter la mise en place des calcaires urgoniens au niveau du plateau de Méjannes-le-Clap.



- / Profil sismique
- BS : Stampien basale
- BL : Ludien basale
- BE : Eocène basale
- TB : interface Tithonien-Berriasien
- DM : interface Dogger-Malm
- LD : interface Lias-Dogger
- TL : interface Trias-Lias

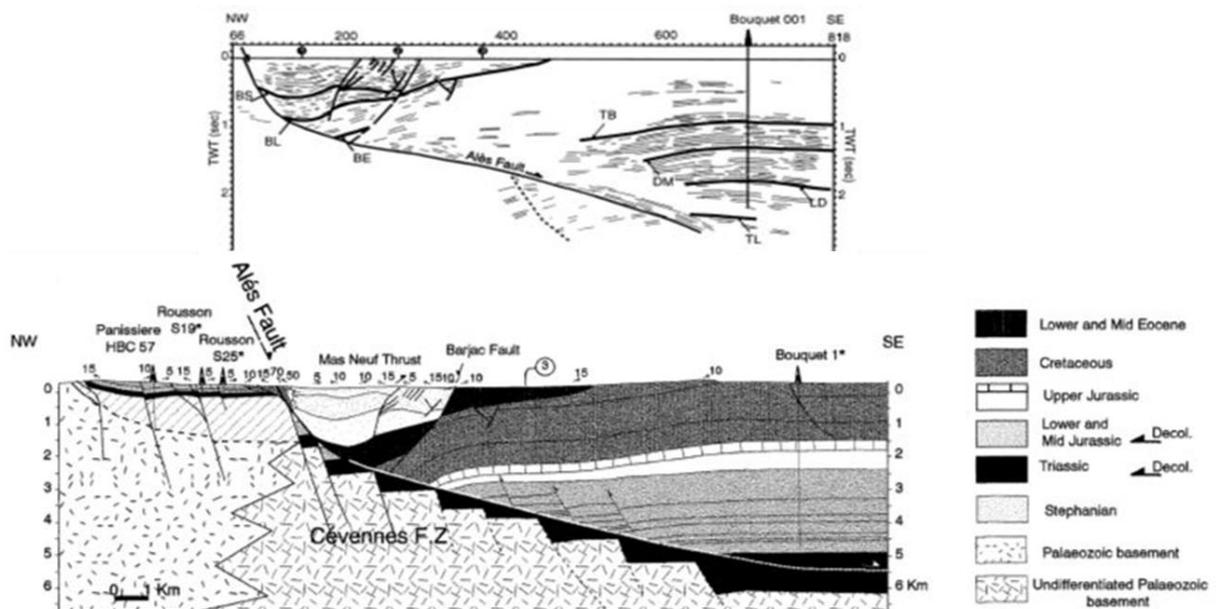


Figure 7 : Représentation d'une coupe géologique en fonction du profil sismique, perpendiculaire au fossé d'Alès (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).

A partir de la coupe schématique NO-SE, voir la Figure 6, il est possible d'observer la limite de profondeur du calcaire urgonien et le conditionnement qu'il a subi. Le plateau de Méjannes-le-Clap repose sur une stratification ordinaire puisque les formations du Jurassique et du Crétacé sont retrouvées dans le bon ordre. C'est au niveau du Jurassique inférieur et des formations du Trias que des décollements se sont produits. En effet, les formations marneuses du Trias font office de "couche savon" sur la faille d'Alès qui se confond en surface avec la faille des Cévennes. Ce phénomène n'est pas surprenant car les formations triasiques sont réputées pour être la base de décollement lors de jeux tectoniques [Mattauer et *al.*, 1992] ; [Phillipe, 1995] ; [Khomsi, 2004] ; [Lickorish et Ford, 1998].

Du point de vue de ce bloc glissant en direction Sud-Est sur la couche triasique, le fonctionnement structural global ressemble à celui d'un demi-graben. Au niveau du fossé d'Alès, la faille de Barjac a joué un rôle de faille normale en relation avec le phénomène d'extension provoqué par le demi-graben évoqué auparavant.

Les formations jurassiques et crétacées vont donc décrocher le long des failles d'Alès et de Barjac pour venir se reposer au fond d'une formation structurale fonctionnant cette fois-ci comme un graben. Le fossé d'Alès est donc un graben avec un remplissage tertiaire inclus dans une structure générale (à l'échelle de la zone étudiée) de type demi-graben. Ce résultat structural est lié aux contraintes de distensions provoquées l'extension à l'Oligocène.

D'un point de vue stratification, l'ensemble du plateau de Méjannes-le-Clap est bombé avec des pendages généralement orientés Nord-Ouest au niveau du graben d'Alès et orientés Sud-Est sur la partie Est du plateau. D'après la coupe (Figure 6), en profondeur les couches géologiques ont tendance à s'incliner comme si elles avaient subies une contrainte compressive de direction Est. Ce phénomène est possible du fait de la phase tectonique compressive Alpine ayant débuté après la phase d'extension de l'Oligocène [Lemoine, 1972] ; [Molliex, 2009]. Sous la contrainte compressive provenant de l'orogénèse Alpine, le plateau karstique a commencé à se plisser légèrement, d'où la déformation générale des couches géologiques du Jurassique mais surtout du Crétacé et donc de l'urgonien. Au niveau de la faille d'Alès et aux abords de la faille de Barjac, les formations calcaires à faciès urgonien s'amincissent. Cette différence d'épaisseur est peut-être en relation avec la subsidence différentielle révélée dans le paragraphe précédent mais sans doute principalement due aux décrochements et compressions liés à la tectonique.

Pour reprendre une information retenue toujours dans le précédent paragraphe, sur le transect NE-SO, sur le profil longitudinal en Figure 6, des décollements s'observent aussi dans les formations inférieures du Jurassique. Celles-ci correspondent en surface à des failles N0-N30 sub-verticales comme la faille de Seynes créant des décalages au sein des formations Jurassique et Crétacé. Ces décalages mettent en contact ces différentes couches géologiques citées auparavant et donc permettent potentiellement des échanges d'eaux souterraines entre l'aquifère des calcaires urgoniens et un aquifère plus profond. De plus les failles ayant pu jouer en normale et/ou en inverse suivant la phase tectonique associée, ont créées des décalages en altitude au sein des formations urgoniennes. Ces décalages émettent l'hypothèse qu'il y a des aquifères perchés dans les calcaires urgoniens (exemple de l'Agas et de Camélié).

I.4.3. Modèle géochronologique

L'exercice proposé dans ce paragraphe consiste à valoriser les résultats obtenus, les hypothèses et les interprétations fondées à l'aide des analyses précédentes, par une modélisation schématique de la zone d'étude. Il s'agit d'une interprétation géochronologique et simplifiée :

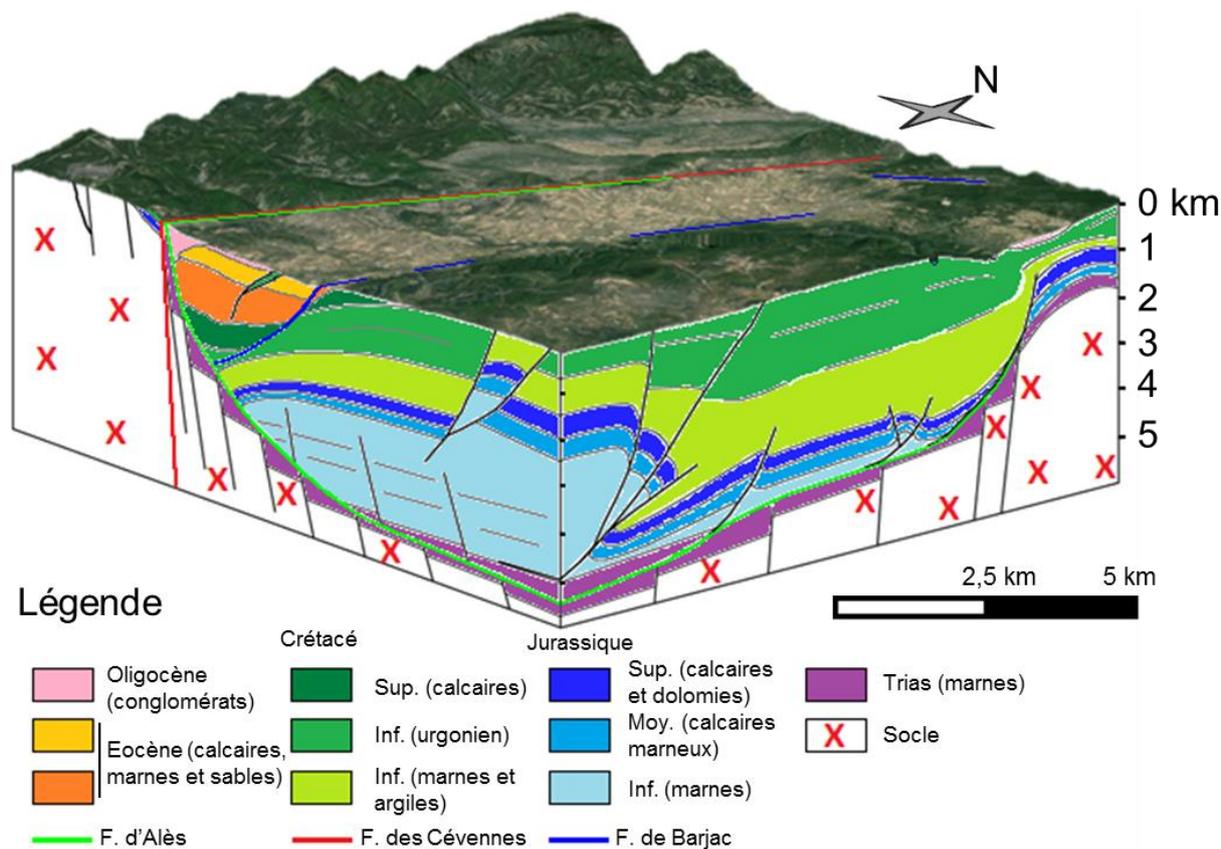


Figure 8 : Interprétation géologique schématique du plateau karstique de Méjannes-le-Clap.

La faille des Cévennes s'est formée dans une zone de faille à la fin de l'orogénèse hercynienne [310 - 270 Ma]. Elle est causée par de grands accidents crustaux décrochants [Mercier et *al.*, 2011] qui ont impactés entre autre l'actuel Sud-Ouest Européen. A cette période, entre le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur, les continents sont rassemblés, formant pratiquement la Pangée.

La zone étudiée est alors émergée mais influencée par la tectonique des plaques. La faille des Cévennes à ce moment précis fonctionne probablement comme un décrochement dextre [Mattauer, 1973] ; [Arthaud et Matte, 1975], associé à des décrochements senestres de direction NNO-SSE (Exemple: faille de Villefort en Lozère) et dextres de direction E-O (Exemple: failles au niveau de la Montagne Noire dans l'Hérault) qui contrôlent la formation des bassins houillers Stéphaniens du Massif Central [Mattauer et Matte, 1998] ; [Mercier et *al.*, 2011].

Au Trias, l'environnement ne diffère pas beaucoup de celui du Permien, au niveau de la zone d'étude qui est côtière à l'océan Téthys à ce moment-là. Des formations marneuses et quelques dolomies se déposent.

Au Jurassique, alors que l'océan Atlantique commence à s'ouvrir, l'océan Téthys poursuit son expansion à l'Ouest faisant jouer la faille des Cévennes, ainsi que celles qui l'entourent, en failles normales.

La zone d'étude se retrouve immergée, seule la partie amont du bassin versant reste émergé. Ainsi à cette période, d'un point de vue sédimentation, des formations calcaires se déposent sur une couche de marnes imperméables.

Au Crétacé inférieur, les conditions sont les mêmes. De ce fait, des dépôts calcaires comme ceux à faciès urgonien se sont déposés sur des marnes et argiles de la fin du Jurassique.

Au Crétacé supérieur, l'Atlantique rejoint l'océan Téthys, des continents commencent à migrer vers le Nord ce qui provoque une transgression marine. L'abaissement eustatique est propice à la sédimentation de formations gréseuses au niveau de la zone d'étude.

Durant cette période Mésozoïque décrite ci-dessus, la zone de faille des Cévennes et la faille des Cévennes elle-même ont joué en failles normales. Ces jeux tectoniques sont associés aux subsidences différentielles retrouvées dans les formations du Crétacé, et particulièrement les calcaires urgoniens, décrits dans le paragraphe précédent "Mise en place du calcaire à faciès urgonien".

Enfin, entre le Paléogène et le Néogène [66 - 2,58 Ma], la zone d'étude a été soumise à 3 phases tectoniques majeures bien distinctes. Au cours de l'orogénèse pyrénéenne, durant l'Éocène, les contraintes de compression de directions Sud-Nord alors subies par la zone de failles ont fait décrocher la faille des Cévennes de manière senestre [Mattauer, 1968] ; [Lacassin et *al.*, 1998] ; [Mercier et *al.*, 2011], créant ainsi des décollements au niveau de la couche Triasique et Jurassique inférieur dans des directions Nord, Nord-Est [Benedicto et *al.*, 1996] ; [Sanchis et Séranne, 2000]. L'extension générale en direction Sud-Est lors du rifting Oligo-Miocène réactive le décollement Pyrénéen sur les formations du Trias et Jurassique inférieur. Cependant toute la couche Mésozoïque glisse en direction Sud-Est sur ces formations décollées, donnant lieu à la formation d'une faille normale.

En surface, le tracé de cette faille normale se superpose à celui de la faille des Cévennes, mais contrairement à cette dernière, son pendage diminue en profondeur et elle n'atteint pas le socle. Ces deux failles sont donc bien distinctes. D'une part, il y a la faille des Cévennes qui est une faille de socle ayant jouée en décrochement dextre puis senestre et en faille normale. D'autre part, il y a la faille nommée "faille d'Alès", qui se met en place sur le tracé de la faille des Cévennes et qui joue en faille normale lors du rifting Oligocène. Sa limite est représentée par les formations marneuses du Trias.

La propagation des couches Mésozoïque entraîne un décollement dans les formations géologiques meubles du Crétacé (marnes du Néocomien). Ce décollement, va se traduire par la formation d'une « rampe de glissement ». Sous l'effet de cette contrainte d'étirement, une faille normale de direction Nord-Est se met en place, c'est la faille de Barjac (voir Figure 8). Ce graben, ainsi formé, entame une phase de remplissage commencée durant la genèse de cette rampe par des formations de l'Éocène.

La dernière phase tectonique majeure qui n'a pas encore été décrite, est celle de l'orogénèse Alpine. Cette formation de chaînes de montagnes créant des contraintes de compressions Est-Ouest a réactivé des failles de directions Nord-Sud et NE-SO. Ces failles qui ont joué en failles normales durant la phase de rifting, jouent en failles inverses durant cette orogénèse. Cette série d'activités tectoniques provoque un décalage en forme d'escaliers des formations géologiques au sein du plateau de Méjannes-le-Clap, comme celui engendré par la faille de Seynes. Mais aussi, il est suggéré que le bombement de ce même plateau représenté par des pendages Nord-Ouest en bordure Ouest et des pendages Sud-Est en bordure Est sont la conséquence de la contrainte de compression Est-Ouest exercée par l'orogénèse Alpine.

Le Sud du plateau est quant à lui influencé par le rôle de la faille normale des Connaux. Ces phénomènes d'extension et de compression ont respectivement créé et accentué un anticlinal de compensation dit "roll-over" [Biju-Duval, 1999]. Ces structures peuvent être à l'origine d'un épaissement des formations géologiques dont les calcaires urgoniens, au niveau Est, Sud-Est du plateau de Méjannes-le-Clap (voir Figure 8).

Toutes les étapes de structuration et de sédimentation qui viennent d'être décrites sont représentées sur la Figure 8. Ces informations mettent en évidence la complexité du système (réservoir) aquifère urgonien du fait de l'abondance de failles, de la diversité de leurs directions mais aussi des nombreuses manières dont elles ont joué et rejoué.

Les différentes épaisseurs de calcaires à faciès urgoniens, entre le département de l'Ardèche et du Gard sont la conséquence de dépôts en éventails suite à la mise en place de blocs par des failles normales NE-SO et Ouest-Est, ainsi que de subsidences différentielles parfois amplifiées par des phénomènes de roll-over associés aux failles.

Les décalages créés au sein des formations Mésozoïques du fait des décollements et des phases de compressions et d'extensions mettent en contact des formations normalement séparées par des couches géologiques imperméables. Il y a donc des échanges verticaux possibles entre l'aquifère urgonien et des aquifères plus profonds. Cette hypothèse interroge sur la circulation potentielle des eaux profondes?

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, EMSE)

II.1. Principe

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

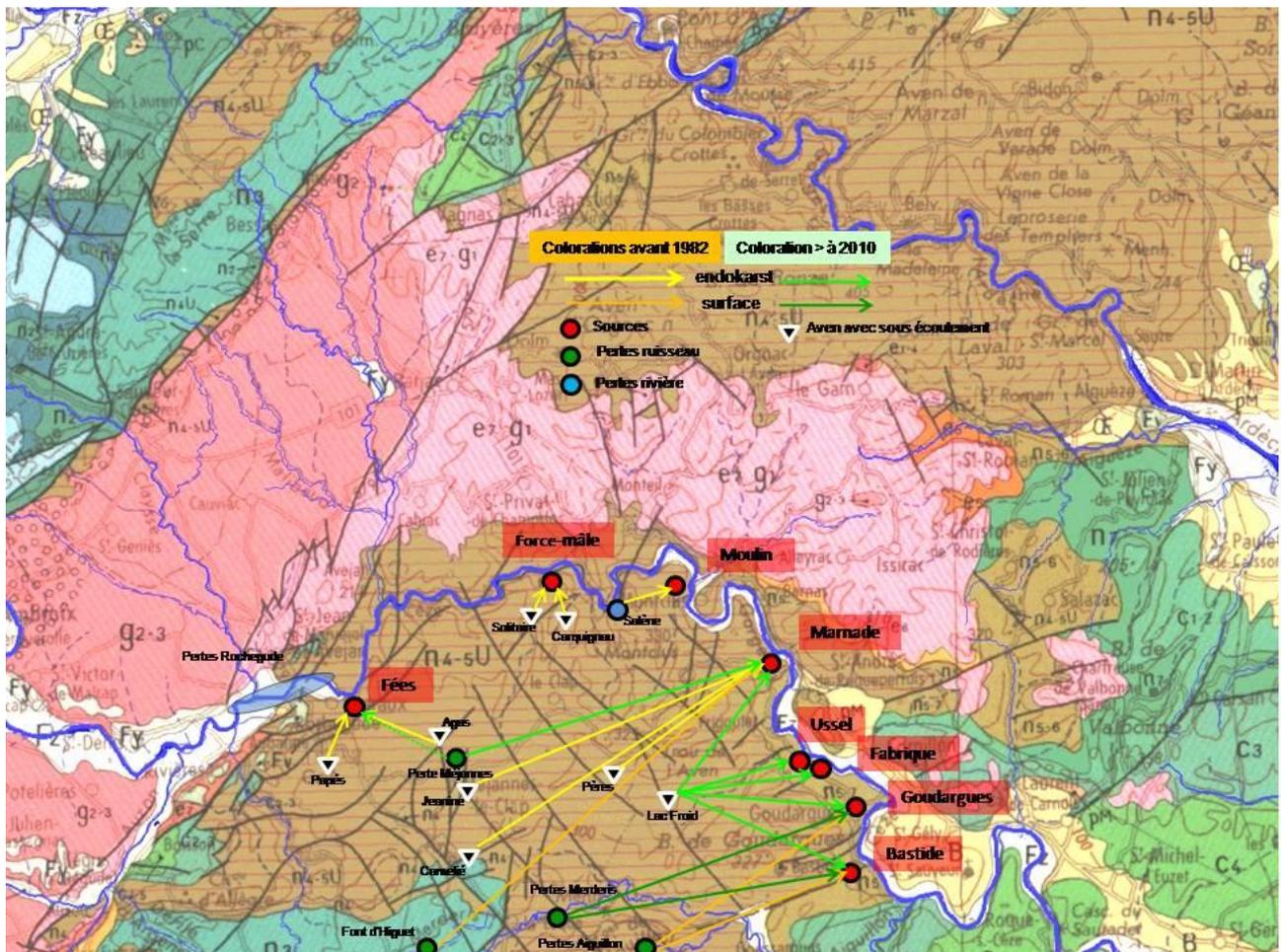
- Tout d'abord, de mettre en évidence les relations entre certaines pertes de la Cèze et certaines sources en aval. C'est le cas des relations hydrauliques entre les pertes de Rochegude et les sources de la rive gauche (en particulier Foulatier, Fond Canet, Monteil et les Baumes) ;
- Ensuite, d'aider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

Le prochain paragraphe présente brièvement l'historique des traçages réalisés avant le projet avec un bilan critique de ces derniers. Il présente les traçages déjà réalisés en 2014. Le dernier paragraphe traite des prochains traçages prévus pour fin 2015 et/ou 2016 (en fonction des conditions hydrométéorologiques).

II.2. Synthèse succincte des traçages réalisés

Ce paragraphe propose une carte (Carte 6) de synthèse des principaux traçages réalisés mais aussi une critique de ces résultats de traçage. Le détail de l'historique des traçages a été présenté dans le précédent rapport d'avancement.

II.2.1. Bilan des traçages historiques



Carte 6 : Synthèse cartographique des résultats des traçages historiques.

II.2.2. Inconvénients des suivis qualitatifs

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

- La réponse est binaire (positif ou négatif), il est impossible de réaliser un bilan de masse pour connaître le taux de restitution du traceur. Il est cependant parfois possible d'apprécier de manière relative une augmentation ou une diminution de la restitution d'un fluocapteur à l'autre si ceux-ci sont relevés de manière régulière, sont disposés de la même manière le long d'une même ligne d'écoulement et que le débit de l'émergence ne varie pas pendant la durée de la restitution ;
- Corollaire de l'affirmation précédente, le temps correspondant au passage du maximum de concentration à l'exutoire n'est pas connu ;
- Les temps des premières arrivées du traceur sont approximatifs et dépendent de la fréquence de renouvellement des fluocapteurs.

II.2.3. Questionnement sur les résultats de certains traçages

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

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

II.2.4. Lacunes de connaissances en rive gauche et au Sud de la zone d'étude

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

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

- Premièrement, se pose la question de l'extension des bassins d'alimentation des sources de Foulatier, Fond Canet, Monteil et les Baumes. En effet, ces sources ont une part d'alimentation qui ne provient pas de la rivière Cèze. Quelle est la contribution réelle du karst ?
- Deuxièmement, se pose la question des relations entre la Cèze et l'Ardèche pour laquelle plusieurs hypothèses sont possibles.
 - Dans le premier cas, on suppose une ligne de partage des eaux entre le bassin versant de la Cèze avec ses sources en rive gauche et le bassin versant de l'Ardèche avec ses sources en rive droite. Dans ce cas de figure, le synclinal d'Issirac doit jouer un rôle hydraulique encore inconnu.
 - Dans le second cas, on suppose qu'une partie des débits de perte de la rivière Cèze alimente les sources de l'Ardèche. Le suivi simultané des débits des sources en rive gauche et de la Cèze en amont et en aval des pertes permettra probablement de lever cette incertitude.
 - Dans le troisième cas, on suppose un fonctionnement mixte qui dépend de l'état de saturation du karst. Avec en situation de hautes eaux la vérification de la première hypothèse et en situation de basses eaux celle de la seconde hypothèse.

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

Ce bilan dressé a permis d'orienter l'organisation et la planification des opérations de traçages actuelles et futures. Les résultats de ces traçages sont présentés dans le prochain paragraphe.

II.3. Synthèse des traçages réalisés en 2014

II.3.1. Protocole des traçages

L'organisation des campagnes de traçages a été aiguillée par le guide pratique de référence pour l'utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie [Schudel et Al., 2002]. Le choix du dispositif de suivi a été orienté par la comparaison des méthodes décrite en Annexe 2. Une formation a été suivie par un des membres de l'équipe (Hervé Chapuis) afin de bien respecter les protocoles de mise en place des traçages. Cette formation a eu lieu en 2014 à l'Université d'Orléans et était intitulée : « *Perfectionnement théorique et pratique en traçage hydrogéologique* ».

Dans la mesure du possible, le suivi de la restitution des traceurs est assuré de manière quantitative. Cependant, les difficultés liées au terrain sont multiples et ne permettent pas toujours un tel suivi. En effet, il s'agit de composer avec :

- L'accessibilité des sources : L'accès est parfois difficile, comme c'est le cas de la plupart des sources du versant ardéchois, dont certaines ne sont atteignables qu'en canoë lorsque les conditions de débit de l'Ardèche le permettent ;
- La nature de l'émergence karstique : En effet, certaines sources (Castors) émergent sous ou au niveau de la cote altimétrique de la rivière Ardèche. Dans ce cas, des plongeurs ont disposé des fluocapteurs en remontant la source sur plusieurs centaines de mètres en s'éloignant de la rivière Ardèche ;
- Le coût du suivi : Compte tenu du fait que ces traçages sont prospectifs, le nombre des points de restitution potentiels est important (entre 2 et 4 côté Cèze et entre 8 et 14 côté Ardèche). Par ailleurs, le temps de réponse entre l'injection et la restitution n'est pas connu. Ces inconnues rendent prohibitif le coût d'installation de fluorimètres sur tous les points de suivi potentiels sur une durée possiblement longue ;
- Le risque de dégradations diverses et/ou vandalisme : Sur les quatre fluorimètres de terrain installés, trois ont été abîmés par les castors (câbles sectionnés) ;
- Le risque de crues : Les crues spectaculaires (notamment de l'Ardèche) rendent difficile un suivi avec des fluorimètres ou des préleveurs automatiques.

Plusieurs moyens analytiques ont été mobilisés pour la détection des traceurs dans les eaux et sur les fluocapteurs :

- Des appareils de détection de terrain ont été utilisés, il s'agit d'un colorimètre WPA CO 7500 et d'un Fluorimètre/Turbidimètre Aquafluor® à 2 canaux Fluorescéine/Rhodamine (limite de détection à 0,4 ppb pour la Fluorescéine et la Rhodamine).
- Pour plus de précision, les échantillons ont également été analysés par un laboratoire (Sciences Environnement à Besançon) qui dispose d'un spectromètre de luminescence (Perkin Elmer – LS 50 B). Pour ce type de matériel, la limite de détection de la fluorescéine est de 0,02 ppb. La mesure de fluorescence s'effectue par la technique du double balayage synchronisé (« synchroscan ») qui est considérée actuellement comme la méthode standard la plus adaptée pour l'analyse des composés fluorescents dans le domaine des traces, comparativement au fluorimètre à filtre trop peu sélectif et trop peu sensible [Schudel et Al., 2002]. L'identification des colorants peut s'effectuer directement sur échantillons d'eau, ou pour certains composés fluorescents, sur charbon actif (analyse sur fluocapteurs). Sur fluocapteurs, l'identification qualitative est très fine et permet sur des éluants spécifiques d'identifier précisément les différents colorants même en cas de mélange (multitraçage).

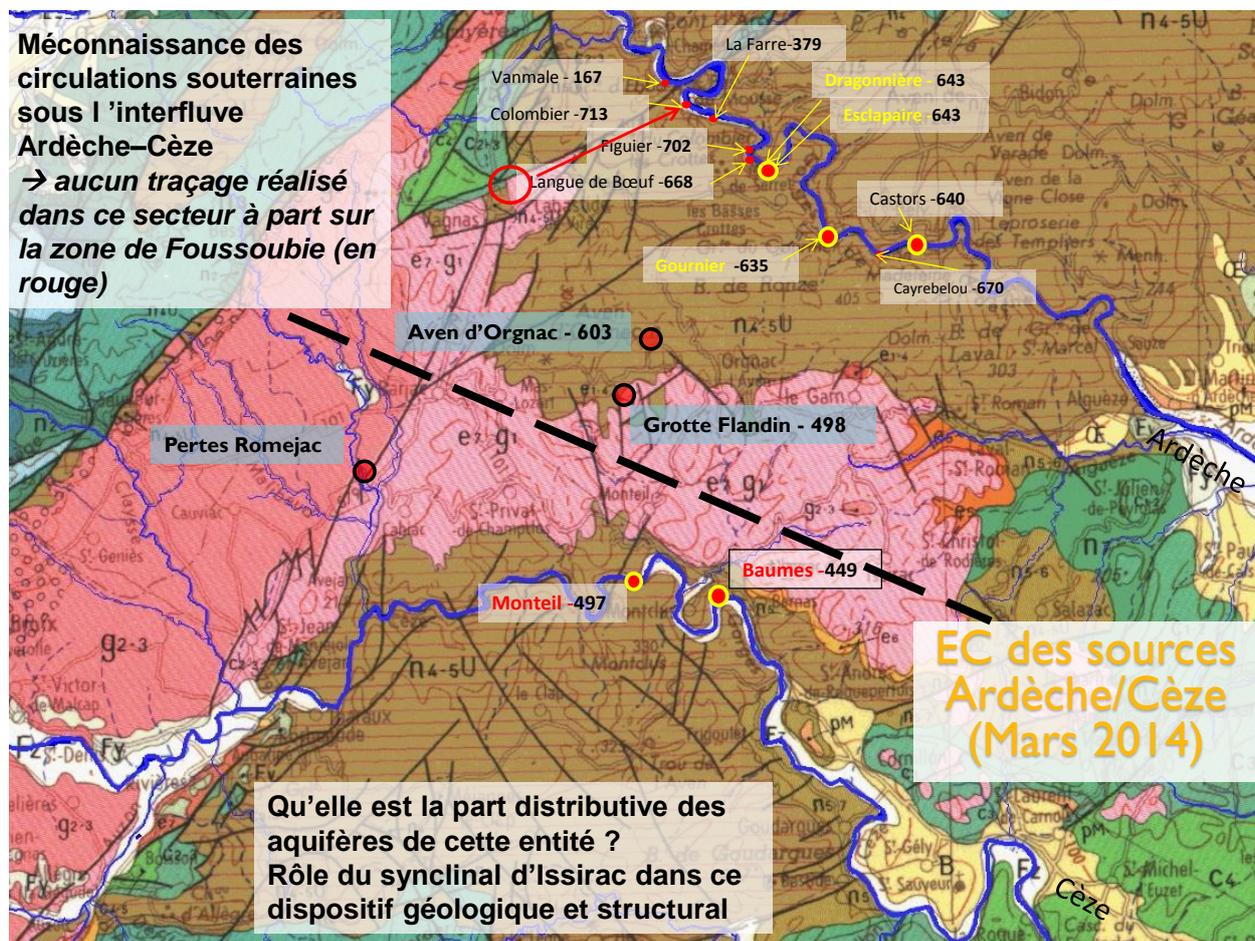
L'ensemble des spectres de fluorescence obtenus sur fluocapteurs et sur échantillons d'eau, sont présentés en Annexe 3. La visualisation de l'ensemble du spectre permet de mieux apprécier la qualité de l'analyse et notamment de constater si la matière organique adsorbée par le fluocapteur n'occulte pas l'identification du traceur. En effet, pour la MO, le maximum d'intensité d'émission après excitation se situe aux alentours de 400 nm (violet/bleu). Le choix des traceurs dont le pic d'émission est éloigné de celui de la matière organique est privilégié. Par ailleurs, compte tenu de la précision de la mesure en laboratoire, d'avantage de crédit sera accordé aux résultats de ces analyses (eaux et fluocapteurs).

Les chroniques de restitution pour chacun des traçages sont présentées en Tableau 3, Tableau 4 et Tableau 5.

II.3.1.i. Contexte des traçages

La méconnaissance des circulations souterraines à l'interfluve Cèze – Ardèche a nécessité une recherche sur carte et sur le terrain pour sélectionner des points d'injections favorables. Seulement un traçage a été réalisé très au Nord-Est de la zone prospectée (Carte 7). Ce traçage a été réalisé par l'Edytem et a affecté la source de Foussoubie. Ce résultat n'est pas suffisant pour comprendre le rôle du synclinal d'Issirac sur les circulations souterraines. Par ailleurs, une autre interrogation (issue d'observations sur le terrain) concerne le devenir des eaux de pertes des affluents du fossé d'Alès (le Roméjac, la Malaygue, le Malibaud et la Chantabre).

La Carte 7 ci-après, présente les points d'injection qui ont été identifiés en 2013 et qui ont fait l'objet de traçages entre mars et novembre 2014.



Carte 7 : Points d'injection des traceurs au niveau de l'interfluve Cèze / Ardèche.

II.3.1.ii. Choix des traceurs (qualité et quantité)

Le Tableau 1 expose les caractéristiques détaillées des trois injections. Le choix des traceurs a été déterminé à partir des recommandations formulées dans Schudel et Al. [2002].

Tableau 1 : Caractéristiques des injections de traceurs réalisées en 2014

Campagnes 2014				Injection							
Points d'injection	XL93 (m)	YL93 (m)	ZL93 (m)	Objectif de caractérisation	Situation hydrologique	Date d'injection	Contexte d'injection	Contexte géologique	Traceur	Quantité injectée (kg)	Eau ajoutée (m ³)
Grotte Flandin	811988	6357335	125	Répartition des eaux entre BV Cèze et Ardèche	hautes eaux, fin de décrue, début tarissement	29-mars-14	Endokarst (ruisseau souterrain à -100 m)	Crétacé inf (Urgonien)	Fluorescéine (Uranine)	15	0
Roméjac	805906	6355259	119	Où sont redistribuées les eaux de perte du Roméjac (Malaygue)	basses eaux	19-mai-14	pertes du ruisseau	Contact crétacé/tertiaire	Eosine	3	0
Aven d'Orgnac (Salle Rouge)	812602	6358892	155	Répartition des eaux entre BV Cèze et Ardèche	crues, hautes eaux	11-nov-14	Endokarst (siphon - 150 m)	Crétacé (Urgonien)	Rhodamine B	10	70

Les critères qui ont guidé le choix des traceurs ont été classés par ordre décroissant d'importance :

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

La quantité de traceur a été déterminée de manière empirique à partir des retours d'expériences sur les opérations de traçage au niveau de la zone d'étude ou dans des contextes similaires. La quantité utilisée correspond grossièrement à 1 kg de traceur pour 1 km de transfert dans le milieu souterrain. Cette quantité est pondérée suivant les limites de détection du traceur sélectionné et le type d'injection. C'est-à-dire, soit pour une injection depuis la surface, soit directement dans l'endokarst (grotte Flandin et Orgnac) ou soit au niveau de pertes (Roméjac).

II.3.1.iii. Conditions météorologiques

Le Tableau 2 résume les quantités d'eau précipitées lors des opérations de traçage. Il est intéressant de noter que la situation hydrologique avant le traçage de la grotte Flandin (fin mars 2014) correspondait à des hautes eaux. Cependant, lors de l'injection, la situation hydrologique correspondait à une fin de décrue évoluant rapidement vers un tarissement, suivie d'une situation de quasi-étiage pendant la période de restitution. En effet, après l'injection la quantité d'eau précipitée a été particulièrement faible et n'a pas facilité le transfert du traceur. Le manque de précipitation entre avril et juin a été favorable à l'assèchement du Roméjac (affluent de la Malaygue) et a permis l'injection de traceur au niveau des pertes. Le traçage de la Salle Rouge de l'Aven d'Orgnac correspond à une période où les précipitations ont été particulièrement abondantes, ceci ayant eu pour effet de faciliter le transfert du traceur.

Tableau 2 : Quantité d'eau précipitée lors des traçages de l'année 2014

Grotte Flandin 29/03/14 – 10 kg Fluo	janvier – février – mars 2014 : 469 mm
Pertes Romejac 06/05/14 – 3 kg Eosine	avril – mai – juin 2014 : 99 mm
Aven d'Orgnac 14/11/14 – 10 kg Rhodamine	mi-octobre 2014 à mi-février 2015 : 570 mm

La description technique des traçages est présentée de manière synthétique en Annexe 4.

II.3.2. Traçage de la grotte Flandin

Le 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, soit une altitude NGF de 125 m) située entre la Cèze (rive gauche) et l'Ardèche (rive droite) à la bordure Nord du synclinal d'Issirac. L'injection a eu lieu dans le seul actif endokarstique connu sous le plateau interfluvial Cèze / Ardèche. Le débit de l'actif endokarstique a été estimé entre 5 à 10 L/min tandis qu'il peut être compris entre 120 à 300 L/min en situation de crue. Un dispositif de suivi de restitution du traceur a été installé au niveau de sources tant côté Ardèche que côté Cèze. Ce suivi a consisté à l'installation de fluorimètres de terrain couplés à des fluocapteurs renouvelés régulièrement et des prélèvements ponctuels d'eaux. La chronique de suivi de la restitution du traceur est synthétisée dans le Tableau 3. L'ensemble des spectres de fluorescence issus de l'analyse en laboratoire sont présentés en Annexe 3.

La période qui a succédé à l'injection, s'étalant d'avril à mi-juillet, a été particulièrement sèche et n'a donc pas facilité le transfert rapide vers les exutoires. Seules quelques traces ont été décelées moins d'un mois après l'injection côté Ardéchois à la source de Gournier le 24/04/14 et, avec plus de réserves compte tenu du contexte géologique, à la source de la Dragonnière. Des doutes subsistent également 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.

Compte tenu de la quantité de traceur injectée et du peu de précipitations succédant l'injection, il est fort probable que le traceur ait été stocké au sein du karst (siphons désamorçés). Le traceur a été remobilisé à la faveur d'une remise en charge du karst liée à un fort épisode pluvieux. Il a été analysé 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. La chronique de restitution du traceur (Tableau 3 et Annexe 3) est typique et est aussi plus franche que les analyses des sources ardéchoises. La relation hydraulique entre la grotte Flandin et le bassin de la Cèze a donc été clairement établie.

Concernant l'interprétation des écoulements souterrains, deux hypothèses semblent se dessiner :

- Soit on considère que le traceur n'a pas affecté le versant ardéchois. Ainsi, la restitution au niveau du bassin versant de la Cèze, n'a eu lieu que 8 mois plus tard lors d'une mise en charge importante du karst suite à de fortes précipitations ;
- Soit on considère que le traceur a affecté à la fois le versant ardéchois en situation de moyennes et basses eaux et le versant gardois en situation de crue (ou hautes eaux). Ceci suggère un fonctionnement hydrogéologique particulier, illustré en Figure 9. Pour une même longitude, la cote altimétrique de l'Ardèche est plus faible que celle de la Cèze (Annexe 5 la différence d'altitude se situe entre 10 et 15 m). Dans sa dynamique actuelle de surcreusement, on peut supposer que l'Ardèche est sur le point d'étendre son bassin versant hydrogéologique et de « capturer » peu à peu celui de la Cèze. Les anciens conduits karstiques étaient initialement orientés en direction de la Cèze et évoluent actuellement en direction de l'Ardèche.

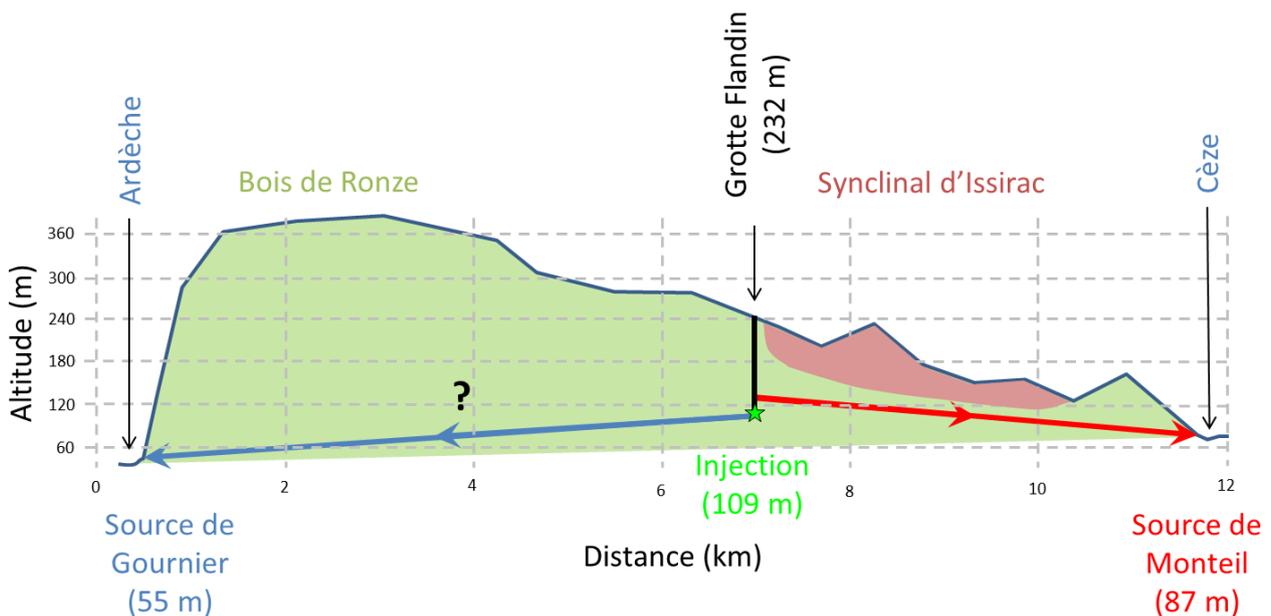


Figure 9 : Coupe schématique de l'interfluve Cèze / Ardèche, essai d'interprétation des écoulements souterrains. En fonctionnement hydrologique moyennes eaux et basses eaux, possibilité de circulation vers le bassin versant ardéchois. En hautes eaux, la mise en charge induit la recirculation dans des paléo-conduits karstiques.

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

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 soit une altitude NGF de 155 m). Ces explorations ont nécessité la mise en œuvre de pompages pour extraire les eaux du siphon noyé. L'injection de 10 kg de rhodamine en bas du déversoir dans la Salle Rouge, a été accompagnée de 70 m³ d'eau issue du pompage du siphon. Le siphon de la salle Rouge qui ne collecte qu'un petit actif temporaire qui coule seulement lors de précipitations fortes et prolongées. Le suivi a consisté à l'installation de fluocapteurs renouvelés régulièrement et des prélèvements ponctuels d'eaux. La chronique de suivi de la restitution du traceur est synthétisée dans le Tableau 4. L'ensemble des spectres de fluorescence issus de l'analyse en laboratoire sont présentés en Annexe 3.

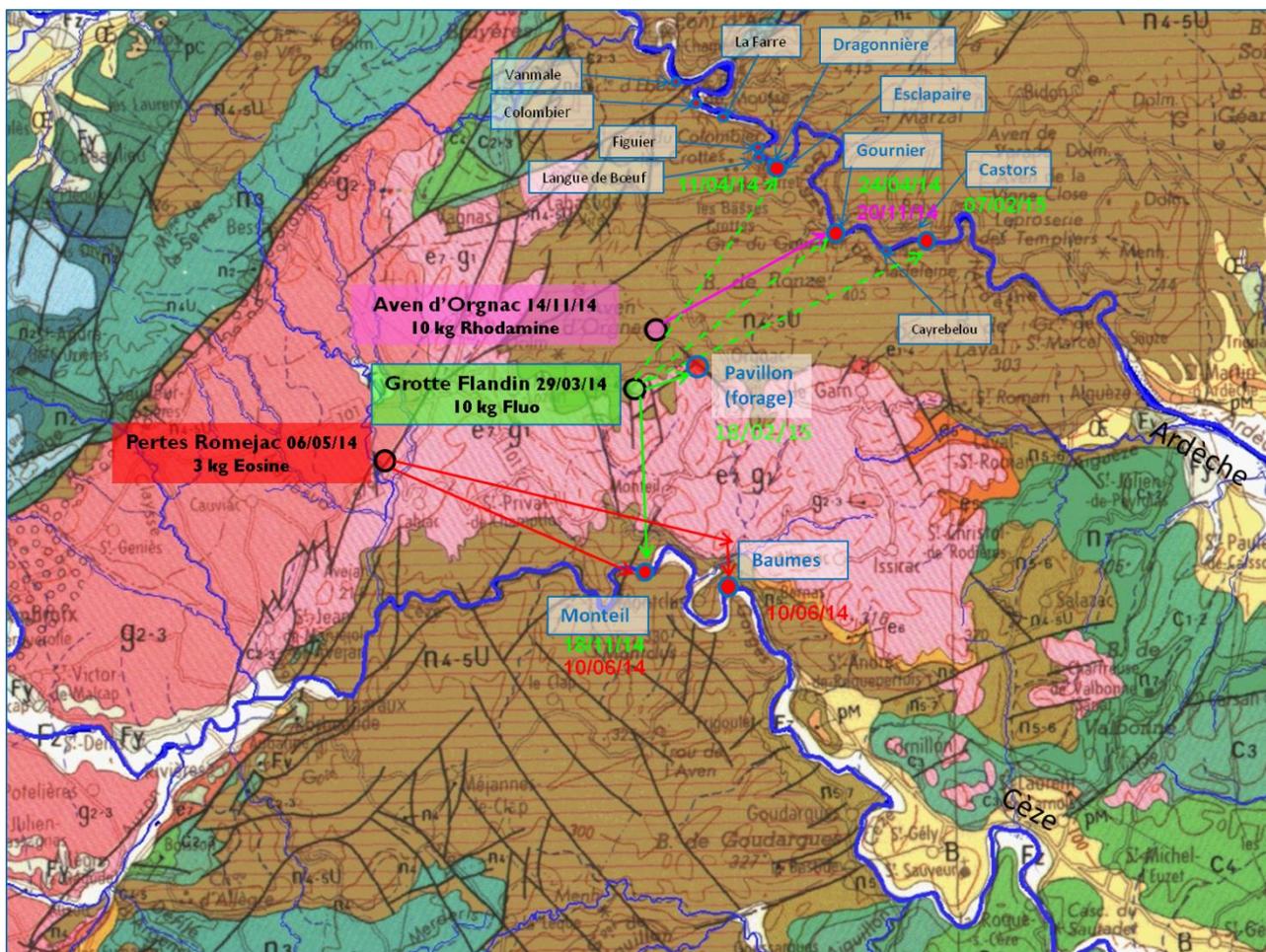
Le traceur a été analysé moins d'une semaine après l'injection côté ardéchois à la source de Gournier (fluocapteurs et échantillons d'eaux, les 20/11/14, 24/11/14 et 01/12/14). Il semblerait que le traceur n'ait pas impacté d'autres sources tant sur le versant ardéchois (Castors et Dragonnière) que sur le versant Cèze (Baumes et Monteil). Dans le Tableau 4, on remarque que le suivi côté Cèze n'a pas pu être poursuivi après le 11/12/14 du fait de la disparition des fluocapteurs de Monteil (vol ou crue ?). En effet, pour le traçage de la grotte Flandin, la fluorescéine avait affecté le bassin versant de la Cèze 8 mois après l'injection.

II.3.4. Traçage des pertes du Roméjac (Malaygue)

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 coule plus, 3 kilogrammes d'éosine ont été injectés et la restitution du traceur a été suivie au niveau des sources de Foulatier, de Fond Canet de Monteil et des Baumes. Le suivi est assuré à l'aide de fluocapteurs renouvelés régulièrement et des prélèvements ponctuels d'eaux. La chronique de suivi de la restitution du traceur est synthétisée dans le Tableau 5. L'ensemble des spectres de fluorescence issus de l'analyse en laboratoire sont présentés en Annexe 3.

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).

La Carte 8 ci-dessous, illustre de manière synthétique les résultats des trois traçages réalisés en 2014.



Carte 8 : Synthèse des résultats des traçages réalisés en 2014.

II.3.5. Regard critique sur les traçages réalisés en 2014

Les 3 campagnes de traçages réalisées en 2014 se voulaient prospectives. Elles ont permis de mieux cerner quels points de restitutions étaient impactés, en combien de temps et pour quelles conditions hydrologiques. Les restitutions de la Rhodamine B pour le traçage de l'Aven d'Orgnac et de l'Eosine pour le traçage des pertes du Roméjac ont été particulièrement concluantes.

En ce qui concerne le traçage de la grotte Flandin à la Fluorecécine, bien que tardive, la restitution au niveau des sources du bassin versant de la Cèze (Monteil et les Baumes) a été probante. Quelques doutes subsistent sur les restitutions de la Fluorecécine du côté ardéchois. En effet, le traceur a été décelé par le matériel de mesure de terrain (Gournier, Dragonnière, Castors et le forage du Pavillon) mais n'a pas été confirmé par les analyses en laboratoire (sauf forage du Pavillon et Dragonnière).

Deux points semblent particulièrement étonnants :

- Pourquoi la remise en circulation du colorant (fluorescéine) en octobre 2014 (fort épisode pluvieux) est elle clairement perceptible sur le bassin versant de la Cèze alors qu'elle ne l'est pas sur l'Ardèche ?
- Pourquoi y a-t-il de telles différences entre les résultats positifs enregistrés par le matériel de terrain et les analyses réalisées par le laboratoire ? Cette différence pourrait être expliquée soit par des problèmes liés au matériel de terrain, soit à des erreurs de manipulation des échantillons ou encore à la possible dégradation des échantillons stockés puis envoyés plus tard au laboratoire.

Néanmoins, on observe une certaine cohérence spatiale (groupement de sources aval) et temporelle (quelques semaines après l'injection) des « positifs » enregistrés sur le bassin versant de l'Ardèche. Cette observation semble confortée par le traçage de l'Aven d'Orgnac dont la restitution sur le versant ardéchois est clairement établie.

Ce traçage (grotte Flandin) mériterait d'être repris afin de confirmer la liaison hydraulique avec l'Ardèche. A la lumière de ce premier travail prospectif, il conviendrait d'ajuster le protocole de traçage en envisageant un suivi plus quantitatif sur un nombre plus restreint de sources (forage du pavillon, Dragonnière, Castors et Gournier). Il pourrait être intéressant de prospecter plus à l'aval de la source des Castors à la recherche d'éventuels points de restitution supplémentaires.

II.4. Perspectives pour 2015

La Carte 9 présente le traçage des pertes de la Cèze et les autres traçages envisagés pour 2015.

II.4.1. Traçage des pertes de la Cèze

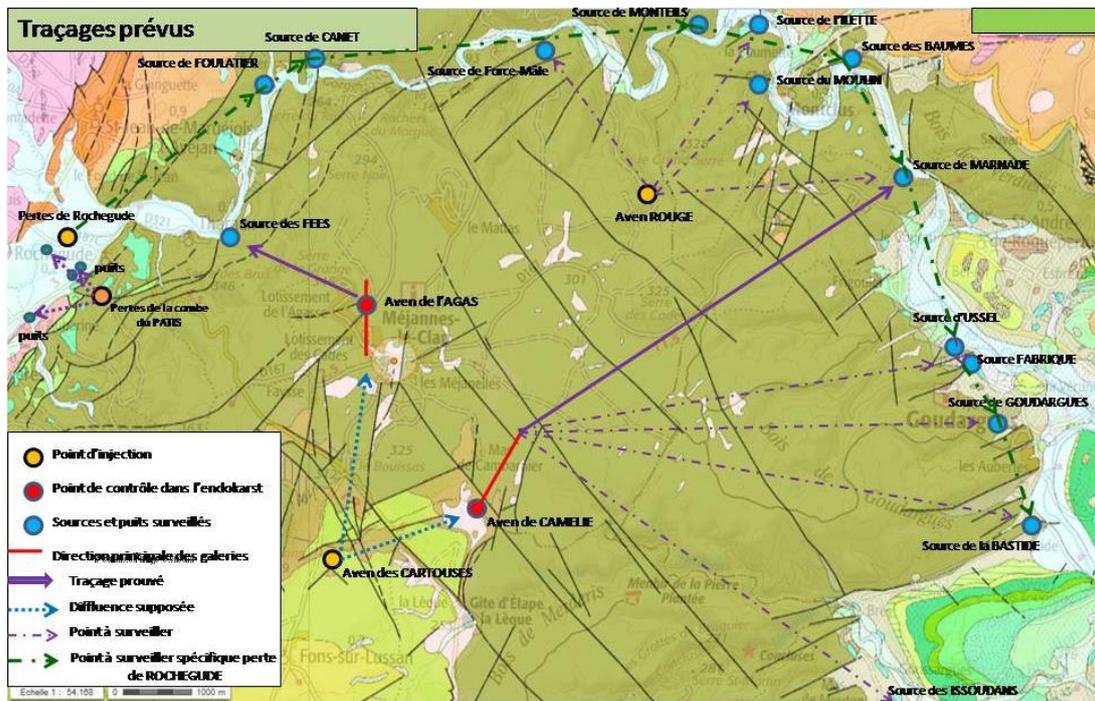
Si les conditions hydrométéorologiques le permettent, un traçage des pertes de la rivière Cèze en amont des gorges (au niveau de Rochegude) sera effectué. Ce traçage n'a jamais été réalisé en condition de rupture de continuité du flux d'eau. Ce traçage aura pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de quantifier dans quelles proportions et au bout de combien de temps ces sources sont impactées (bilan de masse). Pour assurer un tel suivi, un fluorimètre de terrain a été acquis (juillet 2015).

II.4.2. Traçages sur le plateau de Méjannes-le-Clap

En situation de hautes eaux (automne 2015 et/ou hiver 2015-2016), plusieurs points d'injection sur le plateau karstique de Méjannes-le-Clap sont à l'étude :

- En bordure méridionale, à l'aven des Cartouses, une cavité joue le rôle de perte du ruisseau qui le borde. Il s'agira de vérifier si une diffluence endokarstique se produit entre les circulations souterraines de la rivière de Camélié (moins 125 mètres) et de l'aven de l'Agas (moins 160 mètres). Ces circulations seront à mettre en relation avec leurs cotes NGF respectives. Les eaux de ces deux avens feront l'objet de surveillance (fluocapteurs) ainsi que les principales résurgences en rive droite côté Cèze et au niveau de la source temporaire des Soudans (ou Issoudans) située sur la commune de Verfeuil (le suivi par fluorimètre sur ces sources, dans la mesure du possible, sera privilégié) ;
- En bordure occidentale, au niveau des pertes du ruisseau du Pâtis. Si aucun exutoire n'est apparent sur cette zone, il existe des puits artificiels au niveau du fossé d'Alès, qui permettront de vérifier s'il existe une relation entre les roches carbonatées de la bordure du plateau urgonien et les terrains priaboniens du fossé d'Alès ;
- En bordure septentrionale, l'aven Rouge qui délimite deux bassins d'alimentation de surface, l'un orienté vers le N-O, l'autre vers le N-E.

A l'issue de ces traçages complémentaires, il devrait être possible d'aboutir à une cartographie des aires d'alimentation de la plupart des sources de la zone d'étude.



Carte 9 : Traçages envisagés pour l'été de l'été 2015 et pour les années 2015 et 2016.

PARTIE III

—

Suivi hydrologique des sources et de la rivière

Personnes directement impliquées dans cette action :

- Jocelyn Faroux (stage de M2), Joël Jolivet et David Salze
(UMR 7300 ESPACE, Université Sophia Antipolis, Nice et EMA)
- Jordan Ré-Bahuaud, Chapuis Hervé et Didier Graillot
(UMR 5600 EVS, EMSE)

III.1. Mesures ponctuelles synchrones de débits (sources et rivière)

III.1.1. Principe des mesures

III.1.1.i. Mesures de débits

Les débits des sources et des sections de rivière sont mesurés avec un micromoulinet et/ou un courantomètre EM (électromagnétique). La méthode de mesure au micromoulinet et au courantomètre EM est adaptée aux gammes des débits rencontrées pour la rivière et les sources (de quelques L/s à plusieurs milliers). Cette mesure consiste à estimer la répartition des champs de vitesses le long dans profil transversal de rivière (Annexe 6). Ces vitesses sont reportées sur un quadrillage géométrique du tronçon de rivière (profil géométrique transversal en Annexe 6). Le calcul de débit s'obtient en combinant la somme des vitesses réparties le long de ce profil transversal géométrique.

III.1.1.ii. Bilans par jaugeages différentiels

Pour connaître les gains (provenant des sources) ou pertes de débits de la rivière, il convient de mesurer de manière synchrone les flux entrants et sortants le long de tronçons de rivières répartis de manière stratégique. La Figure 10, ci-après, illustre le principe de ces jaugeages différentiels. Pour un tronçon de rivière donné, les flux entrants correspondent à la somme des débits des sources le long de ce tronçon tandis que les débits sortants correspondent à la somme des débits de pertes sur ce même tronçon.

Ces campagnes de mesures synchrones de débits sont répétées durant plusieurs périodes de l'année. Le but étant de quantifier l'évolution des flux entrants et sortants durant la période de tarissement (grossièrement de mars à septembre). Un effort particulier est concédé pour caractériser les faibles débits de la rivière et des sources en période d'étiage. En effet, cette période est la plus critique concernant la gestion de la ressource en eau et les données publiques disponibles pour les basses eaux (banque hydro, SPC grand delta et OHM-CV) ne sont pas suffisamment précises.

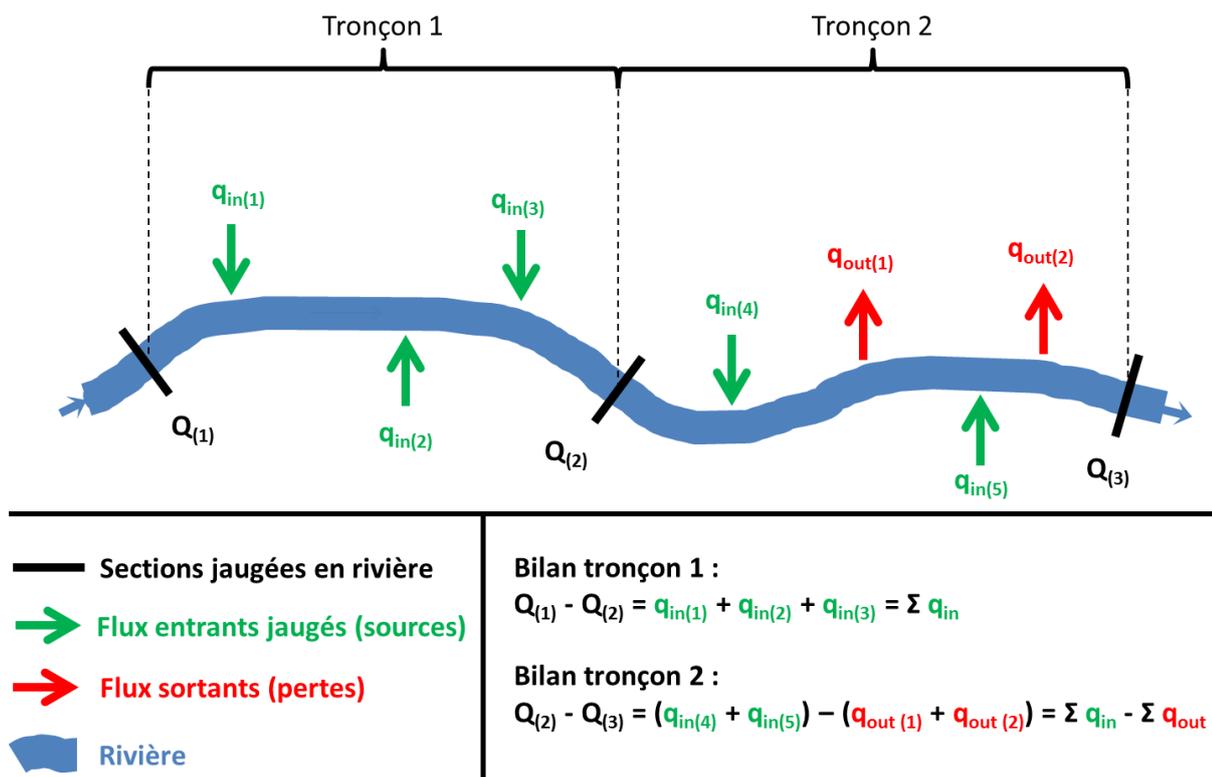


Figure 10 : Schéma de principe des jaugeages différentiels pour l'estimation des échanges entre karst et rivière.

La Carte 10 localise les sections jaugées en rivière. Soit une première section à l'amont des pertes de Rochegude (pk0), une seconde à l'aval des pertes de Rochegude (pk4,5), une troisième (pk27) qui sépare les sources de l'amont (Fées, Foulatier, Fond Canet, Vanmâle, Force Mâle, Monteil, Moulin, les Baumes et Marnade) des sources de l'aval (Ussel, Fabrique, Goudargues et Bastide Froide) et une quatrième à l'aval des sources et de la zone d'étude (pk34). Toutes les sources citées précédemment font également l'objet de jaugeages. Le Tableau 6 récapitule l'ensemble des mesures de débits réalisées au cours du projet.

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

Pour l'année 2014, un suivi plus complet du tarissement de la Cèze et des sources a été réalisé (Figure 11 et Figure 13). Ce suivi comprend entre 5 à 6 campagnes de jaugeages réalisées entre mars et septembre. De plus, deux sections de mesures supplémentaires (respectivement pk15 et pk16,5) ont été ajoutées pour encadrer les pertes de Baume Salène.

Pour 2015, deux sections de mesures supplémentaires sont à l'étude, l'une au premier tiers des gorges au niveau de la plage du Roy (pk10) et l'autre au deuxième tiers des gorges au niveau du pont de Jules (pk19) près de Monclus et en amont de la source du Moulin. Ces deux sections complémentaires permettront de mieux comprendre comment sont restituées les eaux de pertes de la Cèze (restitution ponctuelle ou diffuse) et si cette restitution est totale ou partielle.

Tableau 6 : Mesures de débits réalisées entre juillet 2013 et juin 2015.

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

III.1.1.iii. Qualité des mesures

Toutes les valeurs de débits mesurées ne se valent pas en termes de qualité. En effet, de nombreuses incertitudes peuvent entacher les mesures. Les difficultés généralement rencontrées sont :

- **Les difficultés pour estimer le débit des émergences diffuses.** C'est notamment le cas de la source des Baumes (en Annexe 6) et de Fabrique. Des jaugeages différentiels en amont et en aval de chacune des sources avaient initialement été envisagés. Cependant, les sections de rivières favorables aux mesures de qualité ne sont pas toujours disponibles et l'incertitude sur les mesures de débit en rivière sont souvent de l'ordre de grandeur des débits de la source estimée (par exemple, une incertitude de 5% sur un débit de rivière à 2000 L/s, représente une erreur potentielle sur l'estimation du débit de la source d'au moins 100 L/s).
- **Les difficultés pour prendre en compte les sous-écoulements.** Les valeurs mesurées correspondent à des débits « apparents ». Les clichés thermiques (présentés dans le rapport d'avancement 2013) illustrent clairement ce phénomène, notamment au niveau de la source de Monteil. D'autres sources présentent ces caractéristiques, c'est notamment le cas de Vanmâle, Marnade et Fabrique. Le sous-écoulement est aussi décelable grâce aux variations de hauteurs des sondes CTD. En effet, pour la Marnade et Vanmâle, alors que le débit « apparents » de ces sources est nul, on enregistre malgré tout une décroissance progressive des niveaux. Ceci suppose que le drainage de la source continue en souterrain. Comme pour la prise en compte des émergences diffuses, les jaugeages différentiels en rivière ne sont pas adaptés pour estimer ces sous-écoulements.
- **Les difficultés liées à la qualité de la section jaugées.** En rivière, le choix d'une section de qualité est en générale plus aisée du fait de la longueur du linéaire. Pour les sources qui émergent à proximité immédiate de la rivière, le choix de la section est souvent très restreint. Il est souvent nécessaire d'avoir recours à des sections de moindre qualité (écoulement turbulent, contre-courants, etc.). C'est le cas des sources de Font Canet, les Baumes, Fabrique Vanmâle et Monteil. Par ailleurs, les sections jaugées (en rivière et en sources) évoluent à la faveur des crues importantes de la Cèze (phénomène particulièrement marquant entre 2014 et 2015). Les nouvelles sections n'ayant parfois rien à voir avec les anciennes.

- **Les difficultés liées aux différences de débits mesurés entre le courantomètre et le micromoulinet.** L'acquisition du courantomètre EM au milieu de l'année 2014 a permis de réaliser, de manière synchrone, d'avantage de mesures. Cependant, la comparaison des débits mesurés sur les mêmes sections entre le courantomètre et le micromoulinet, donne des résultats assez différents nécessitant une correction. Une plus grande confiance est accordée aux mesures du courantomètre car, étant plus récent, sa calibration est probablement meilleure. De nombreux tests ont permis de montrer que pour corriger les mesures du micromoulinet, il a été nécessaire d'établir, pour chacune des hélices (6 hélices), de nouvelles relations permettant de relier le nombre de tour par minute à la vitesse du courant. L'explication de l'élaboration de ces nouvelles relations est présentée en Annexe 7.

D'une manière générale, les plus fortes incertitudes de mesure de débits concernent les sources. Les mesures réalisées en rivières sont moins entachées d'incertitudes et donnent des résultats cohérents. D'autres méthodes vont être employées afin de mieux apprécier la fiabilité des mesures. Il s'agira notamment de tester l'ADCP (Univ. Montpellier) en situation de hautes eaux (voir en crue) ou la méthode de dilution d'un traceur pour une injection instantanée (réalisable avec le nouveau fluorimètre de terrain acquis en 2015).

III.1.2. Résultats

III.1.2.i. Sources

La Figure 11 montre les premiers résultats des jaugeages des principales sources durant la période de tarissement de 2014. Les mesures de débits des sources pour les années 2013 et 2015, ne sont présentées dans ce rapport.

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

La Figure 12 dévoile les courbes de régression de type exponentielle décroissante qui ont été ajustées aux mesures de débits lors de cette période de tarissement (ne pas confondre avec la décrue). Les fonctions exponentielles décroissantes sont adaptées pour représenter le comportement de vidange de réservoir [Mangin, 1970]. Le coefficient α donne des informations sur le caractère plus ou moins capacitif du réservoir (aquifère) en relation l'évolution temporelle des débits de la source investiguée. Plus ce coefficient est faible, plus l'effet capacitif est important.

Ces mesures de débits sont actuellement comparées aux variations (hauteur, température et conductivité) enregistrées par les sondes CTD. Une description fine des différents comportements est prévue pour les années 2015 et 2016 (stage de M2 de Jocelyn Faroux).

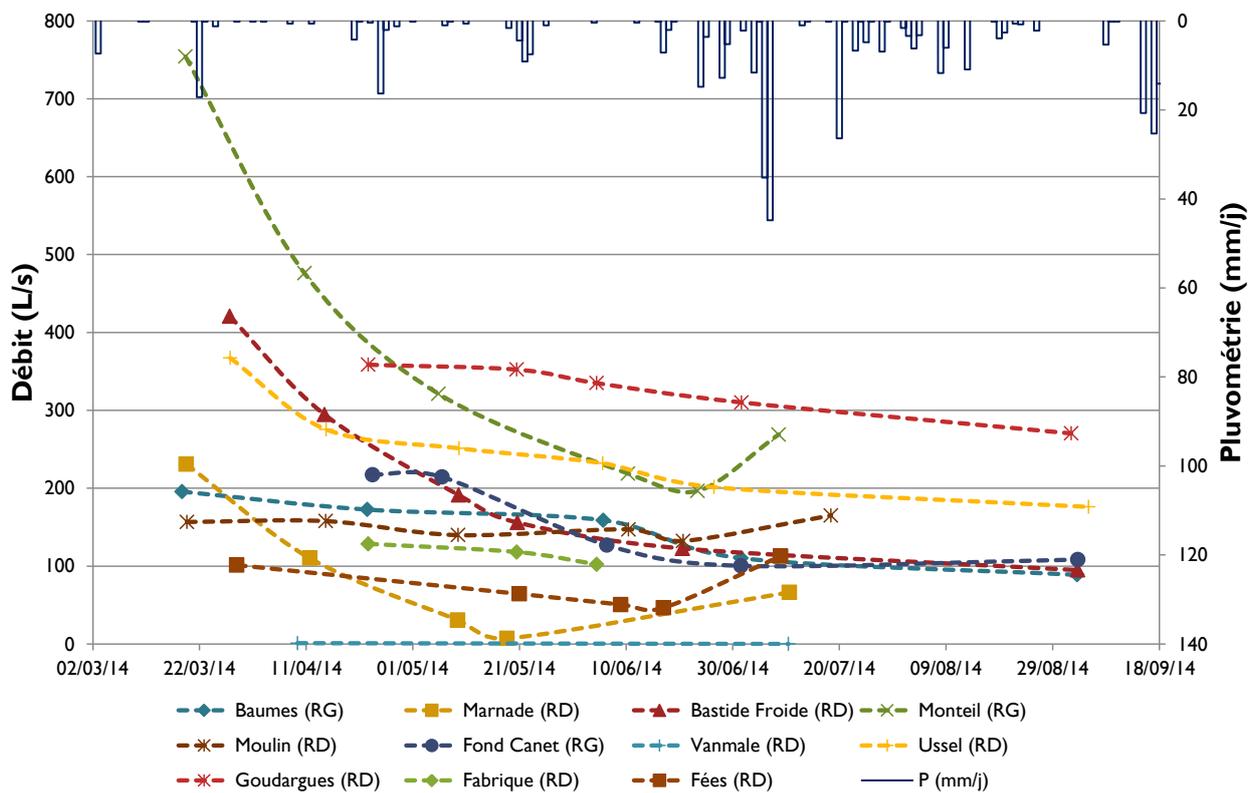


Figure 11 : Résultats de jaugeages des principales sources durant la décrue de 2014.

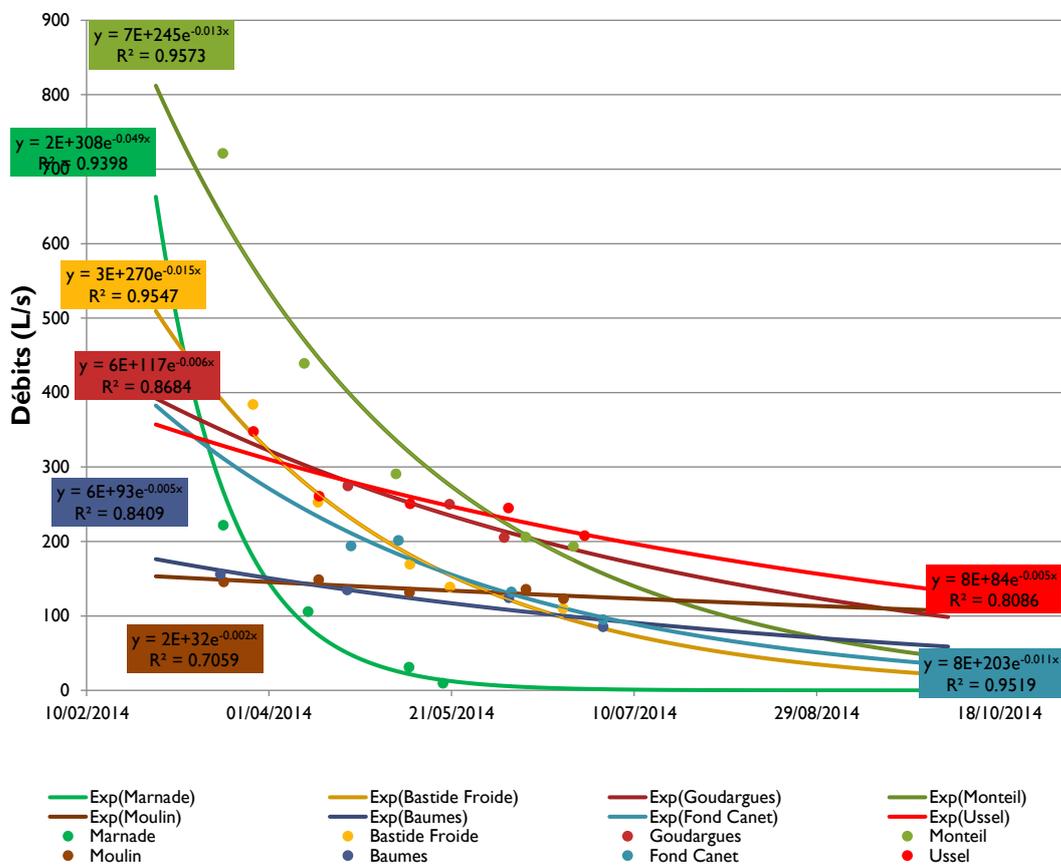


Figure 12 : Ajustement de courbes de régression de type exponentielle décroissante durant la période de tarissement de 2014 pour les sources.

III.1.2.ii. Rivière

La Figure 13 montre les résultats des jaugeages des quatre tronçons de la Cèze entre avril et septembre 2014. Sur les quatre tronçons, les débits ont fortement diminués sur la période du 23/04 au 16/05, soit en moyenne une diminution d'environ 1800 L/s. Les débits de pertes de Rohegude évoluent en fonction du débit amont de la Cèze, ils passent de 519 L/s le 23/04 à 406 L/s le 16/05.

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

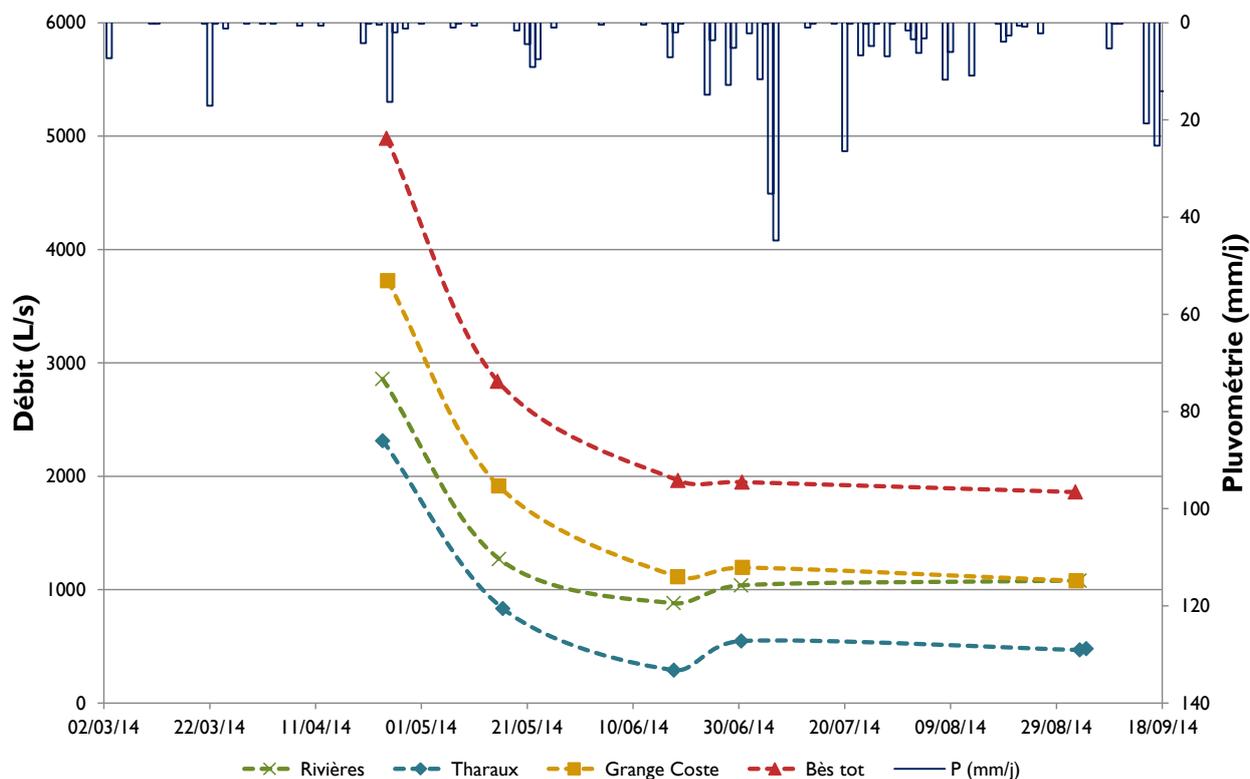


Figure 13 : Résultats de jaugeages de 4 tronçons de la Cèze durant la décrue de 2014.

III.1.2.iii. Bilans par jaugeages différentiels en rivière

Le Tableau 7 ci-dessous expose les bilans gains ou pertes par tronçons et compare les gains ou pertes à un pourcentage par rapport au débit de la rivière (entrant ou sortant). Par exemple, pour la dernière ligne du tableau, mi-juin 2015, le débit à l'entrée des gorges était de 1785 L/s pour un débit tout à l'aval du site d'étude de 3414 L/s. Les pertes de Rochegude représentaient un débit de 592 L/s, c'est-à-dire une baisse de 33 % du débit initial avant les pertes. Les pertes de Baumes Salène ont été estimées à 284 L/s, soit une baisse de 18 % par rapport au débit juste avant ces pertes. La somme estimée des débits des sources de l'amont (jusqu'à Marnade) est de 492 L/s, soit 14 % du débit total de la Cèze à l'aval de la zone d'étude. La somme des débits des sources aval est de 1137 L/s, c'est-à-dire une contribution au débit total de la Cèze de 33 %. Ainsi, l'ensemble des gains de débits issu des sources (eaux souterraines du massif calcaire) est de 2095 L/s et représente 48 % du débit final de la Cèze.

Tableau 7 : Bilan (pertes et gains) des jaugeages différentiels entre 2013 et 2015.

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

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

La Figure 14 illustre au cours de l'année 2014, les gains et pertes de débits de la rivière établis précédemment. Il est intéressant de constater que la contribution imputable à la partie amont du massif calcaire (« Gains sources amont ») décroît très vite dans le temps jusqu'à devenir négative. La contribution imputable à la partie aval (« Gains sources aval ») est toujours très supérieure à la contribution amont et décroît plus lentement en demeurant très positive. On constate également que le débit entrant de la Cèze (« Q_{in} ») est totalement lié à ce qui se passe en amont du bassin (essentiellement au niveau des Cévennes).

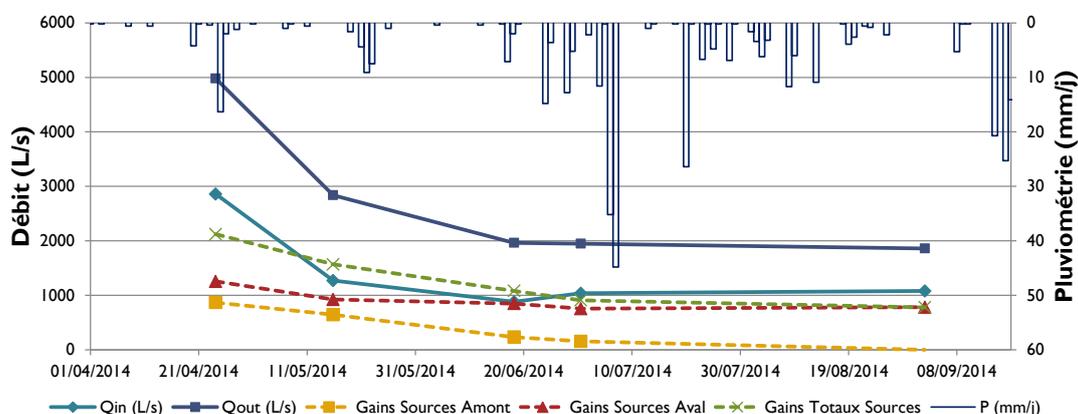


Figure 14 : Evolution des débits entrants et sortants et des débits des sources amont et des sources aval en 2014.

III.1.3. Perspectives (2015 et 2016)

Sur la base des résultats sur le suivi des débits, des préconisations pourront être formulées en matière de prélèvements d'eau dans la rivière ou dans le karst. Cette réflexion fera l'objet d'un paragraphe particulier dans le rapport final.

La constitution de relations hauteurs/débits est en cours de réalisation, l'Annexe 8 présente des exemples d'ajustement de fonctions polynomiales pour les sondes CTD disposées en rivière.

Cependant, la constitution de ces 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 de jaugeages par les crues de la Cèze et de la difficulté à jauger certaines sources. D'avantage de mesures de débits de sources sont réalisées afin de compléter et d'améliorer la robustesse des relations hauteurs/débits. Une réflexion sur la manière d'apprécier la qualité des mesures est actuellement menée afin de mieux qualifier la confiance que l'on peut accorder aux données. Concernant les jaugeages différentiels (entre 6 et 8 tronçons jaugés) réalisés en rivière, ils sont beaucoup moins soumis aux incertitudes et donnent les résultats les 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 vice versa. Ces bilans par tronçons sont comparés aux mesures réalisées au niveau des sources et dévoilent des différences notables qu'il conviendra de critiquer d'avantage.

Le suivi des débits constitue la partie centrale du projet. En effet, ce suivi quantitatif permet une comparaison avec les résultats des autres approches (biologie, thermie et hydrogéochimie) et en révèle les complémentarités ou les divergences. De plus, ce suivi des débits, débuté en mars 2014 et se prolongeant jusqu'en 2015-2016, permettra d'alimenter en données l'approche par modélisation (réseaux neuronaux).

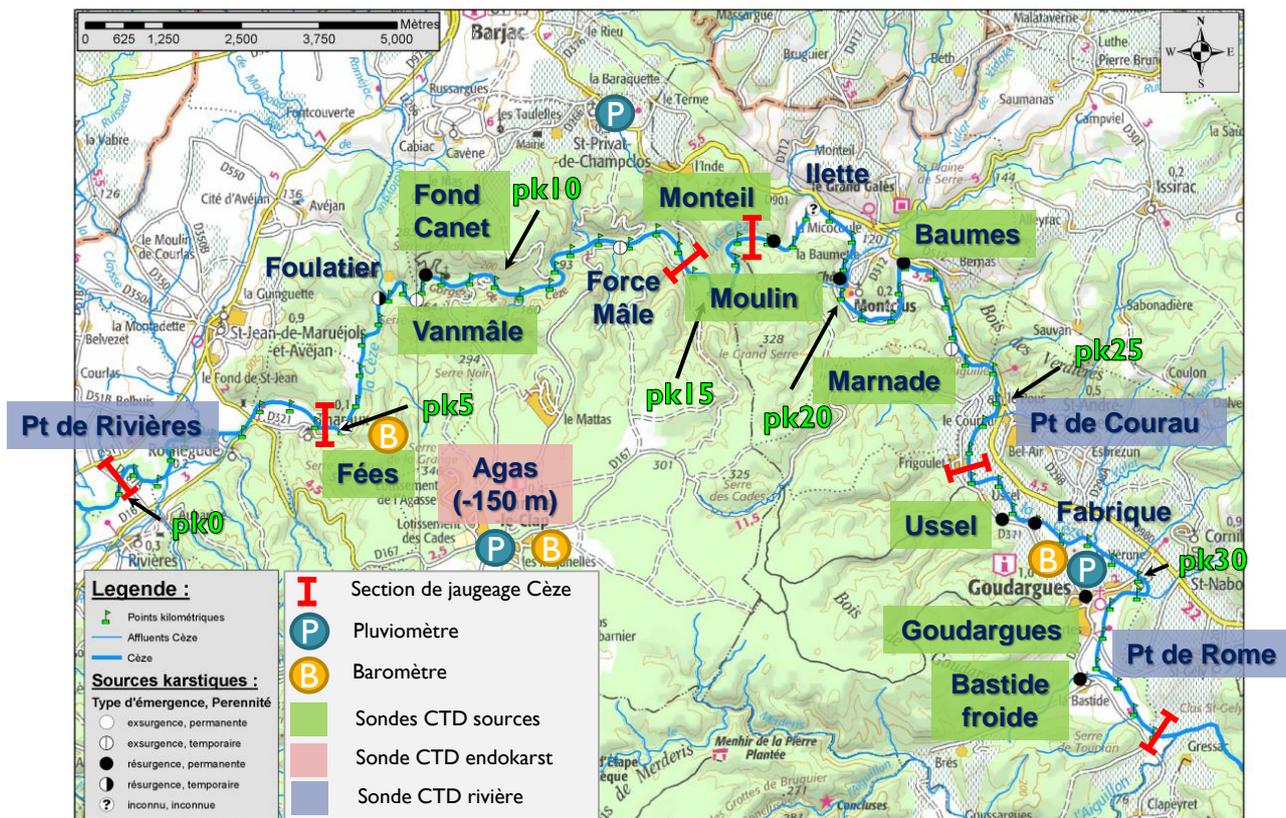
Les mesures de débits et le suivi hydrologique par les sondes CTD, sont intimement liés. Le prochain paragraphe traite de la construction de la base de données des sondes CTD ainsi que des analyses envisagées pour décrire qualitativement et quantitativement les données de ces sondes. C'est l'objet d'un stage de M2 effectué par Jocelyn Faroux à l'EMA.

III.2. Suivi hydrologique des sources et de la rivière

Les données extraites des sondes CTD serviront de support à la description, l'analyse et les traitements statistiques (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. Pour mener à bien cette analyse, un stage de master 2 à l'EMA a débuté en mars 2015 (Jocelyn Faroux, Univ. Poitiers).

III.2.1. Localisation des points de suivi

Du fait de l'hétérogénéité spatiale des milieux karstiques, il est impossible d'isoler un volume élémentaire représentatif et d'appliquer son comportement, ses propriétés à l'ensemble du karst [Bailly-Compte, 2008]. L'analyse du comportement des exutoires naturels est donc privilégié pour décrire le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère [Bailly-Compte, 2008]. La carte référençant la localisation des points de suivi est présentée ci-après (Carte 10).



Carte 10 : Localisation des points de suivi (Fond IGN au 1/50 000^{ème}).

III.2.2. Acquisition des données

Les données ont été récoltées au pas de temps de 15 minutes par des sondes CTD (conductivité, température, hauteur d'eau). Les mesures ont été effectuées entre juillet 2013 et mai 2015 (Figure 15) sur :

- 11 stations de sources karstiques (classées d'amont à aval) :
 - Fées ;
 - Agas (station endokarstique du bassin versant de la source des fées) ;
 - Fond Canet ;
 - Vanmâle ;
 - Monteil ;
 - Baumes ;
 - Moulin ;
 - Marnade ;
 - Ussel ;
 - Puits Goudargues ;
 - Bastide Froide.
- 3 stations en rivière (classées d'amont à aval) :
 - Pont de Rivières ;
 - Pont de Courau ;
 - Pont de Rome.

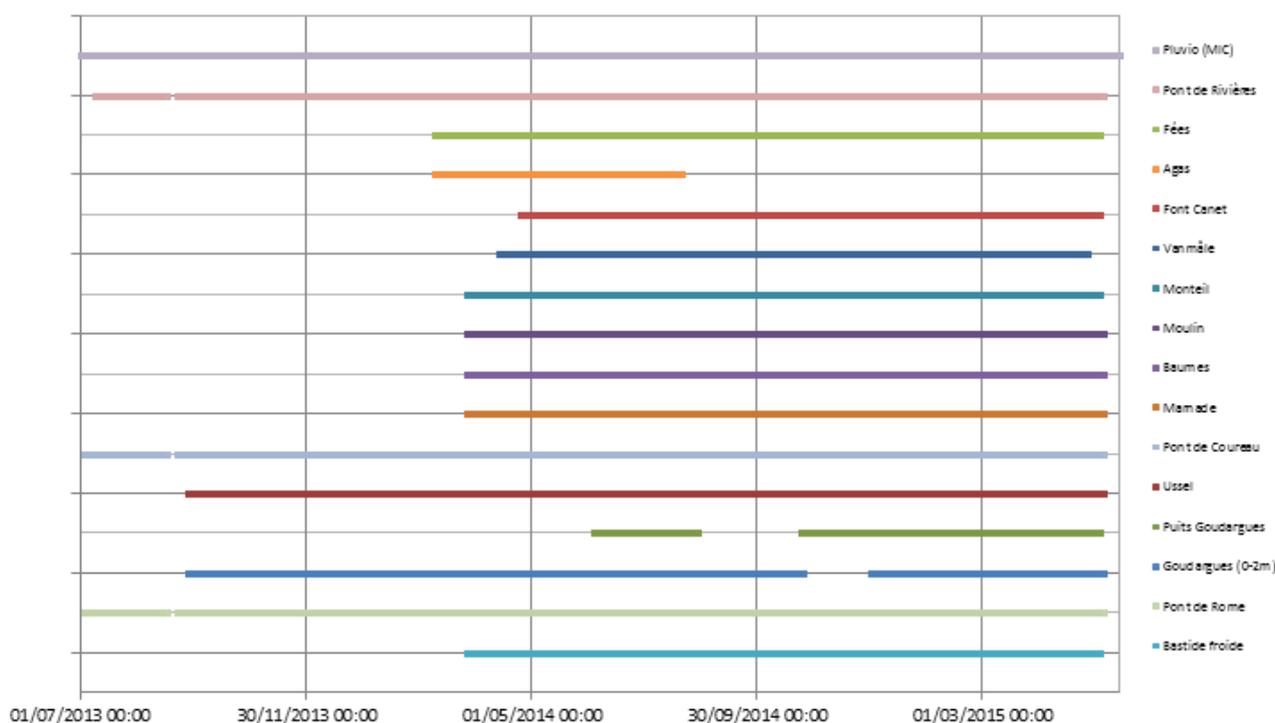


Figure 15 : Répartition dans le temps des données récoltées.

III.2.3. Traitement des données brutes

La sonde ne corrigeant pas les valeurs de conductivité en fonction de la température, ce traitement a dû être réalisé selon la correction linéaire de température donnée par le fabricant de la sonde CTD :

$$K_{ref} = \frac{100}{100 + \theta(T - T_{ref})} * K_T$$

Où :

- K_{ref} : Conductivité à T_{ref} ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- K_T : Conductivité à T ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- T_{ref} : Température de référence ($^{\circ}\text{C}$).
- T : Température de l'échantillon ($^{\circ}\text{C}$).
- θ : Coefficient de température.

Les données brutes 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) et ont été centrées autour de la moyenne. Cela permet de visualiser l'évolution des tendances entre les séries à une même échelle. Ensuite, l'ensemble des données (traitées le cas échéant) sont étudiées au pas de temps horaire. Une simple régression linéaire est utilisée pour recalculer les valeurs de ce nouveau pas de temps.

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 tous problèmes de dysfonctionnement et nombreuses dérives communément constatées pour ces sondes. Le but étant de constituer une base de données fiable, lisible, intègre et homogène [Secretan et al., 2001].

III.2.4. Eléments bibliographiques sur les traitements statistiques appliqués aux données hydrologiques

La constitution d'une base de données fiable est indispensable car elle constituera le support des analyses et de l'interprétation. En l'état actuel, la base de données est encore en cours de traitement et de validation. Les premiers graphiques des variations de hauteurs d'eau, température et conductivités des sondes CTD est présentée en Annexe 9. Cependant, les relations hauteurs / débits ne sont pas toutes établies et les analyses statistiques n'ont pas encore été appliquées sur l'ensemble des données. Les prochains paragraphes présentent essentiellement des éléments bibliographiques sur les analyses et traitements statistiques appliqués aux données hydrologiques.

III.2.4.i. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives (Moyennes, écart-types, minima, maxima, médianes, quantiles, ...) permettent d'avoir un aperçu des données et de commencer à dégager des tendances et des ensembles.

Cailhol [2014] identifie des phénomènes de mises en charge, de fonctionnement du réseau de drainage, d'infiltration d'eau de rivière dans le système à partir de quelques outils statistiques (étendue, écart interquartile, moyenne et écart-type) appliqués à deux paramètres : les hauteurs d'eau et la température des eaux.

Appliquée aux hauteurs d'eau, l'étendue permet de mettre en évidence les mises en charge des conduits associés à des phénomènes extrêmes. L'écart interquartile (2^{ème} et 3^{ème} quartile seulement) permet au contraire de préciser les événements réguliers de mise en charge. La moyenne permet de rendre compte des dimensions de mise en charge tandis que l'écart-type permet d'identifier la complexité et la taille de l'aquifère.

Appliquée aux températures, l'étendue souligne la différence entre l'homéothermie du karst et les variations nycthémérales de température associées aux eaux superficielles. L'espace interquartile traduit l'importance des infiltrations d'eau dans le système et l'écart-type illustre la variation et la fréquence des changements de température dans l'aquifère. Cailhol [2014] utilise la moyenne des températures pour chaque station et les confrontent à la relation de Choppy :

$$T^{\circ}_{Moyenne} = 54,3 - (0,9 \lambda - 0,006 \alpha)$$

Avec λ la latitude en degrés et α l'altitude en mètre.

III.2.4.ii. Analyses en composantes principales (ACP)

Les ACP sont des représentations graphiques qui déterminent les deux dimensions qui expliquent le mieux la dispersion du nuage de point, d'un jeu de données à n individus et p variables aléatoires. Ce type de représentation permet de mieux visualiser un jeu de données, d'identifier des similitudes de comportement, des ensembles ou encore des corrélations entre les variables. Le graphique des individus (Figure 16) représente la répartition des individus en fonction des deux dimensions et permet de dégager des ensembles de comportement. Le cercle de corrélation des variables permet d'expliquer quelles sont les variables qui contrôlent le plus la dispersion des données, mais également de comprendre les corrélations entre ces variables (Figure 17). La package FactoMineR permet notamment de réaliser des ACP rapidement sous le logiciel libre R.

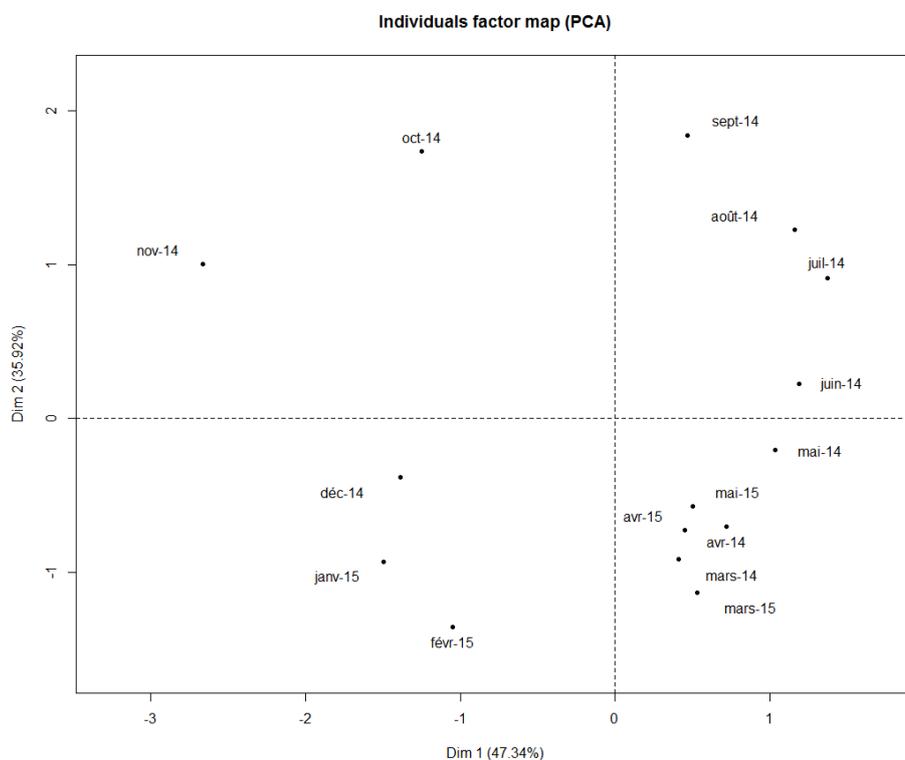


Figure 16 : Graphique des individus pour une ACP réalisée sur les chroniques de mars 2014 à mai 2015 de la station de Monteil.

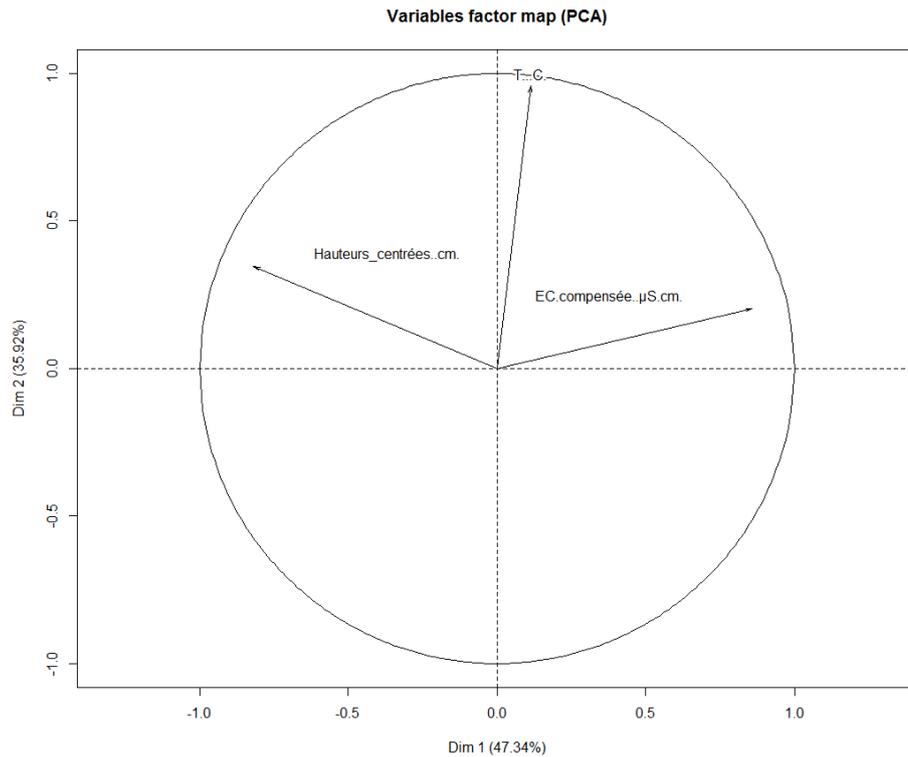


Figure 17 : Graphique des variables pour une ACP réalisée sur les chroniques de mars 2014 à mai 2015 de la station de Monteil.

III.2.4.iii. Analyses fréquentielles

Méthode d'analyse de la fréquence en tant que probabilité de distribution. Cela permet de classer les systèmes en fonction de leur écoulement à partir des courbes de distribution des paramètres hydrogéochimiques. Une distribution uni-modale indiquerait un aquifère qui s'homogénéise avec un écoulement matriciel ou fissuré tandis qu'une distribution multimodale indiquerait un aquifère hétérogène avec des écoulements dominés par le karst.

Cette méthode permet d'avoir un aperçu de l'impact de la karstification sur les écoulements et d'avoir une image de l'ensemble des variations des sources.

Cela a permis à Fournillon [2012] d'identifier des aquifères indépendamment de leur type d'écoulement, d'identifier des typologies d'écoulement et de mettre en évidence une partition des eaux au sein de l'aquifère.

Les figures suivantes présentent une distribution fréquentielle de la température (Figure 18) et de la conductivité électrique (Figure 19) réalisées à partir des chroniques CTD (de juillet 2013 à décembre 2014) des stations étudiées.

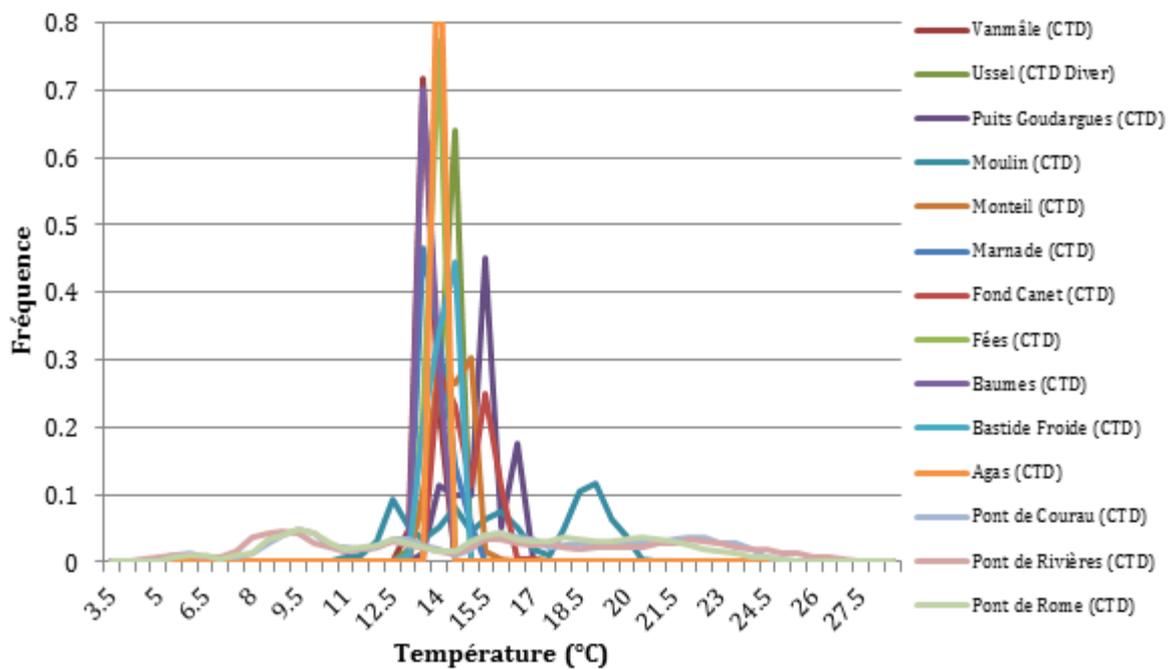


Figure 18 : Distribution fréquentielle de la température des stations étudiées, pour les données CTD jusqu'à décembre 2014.

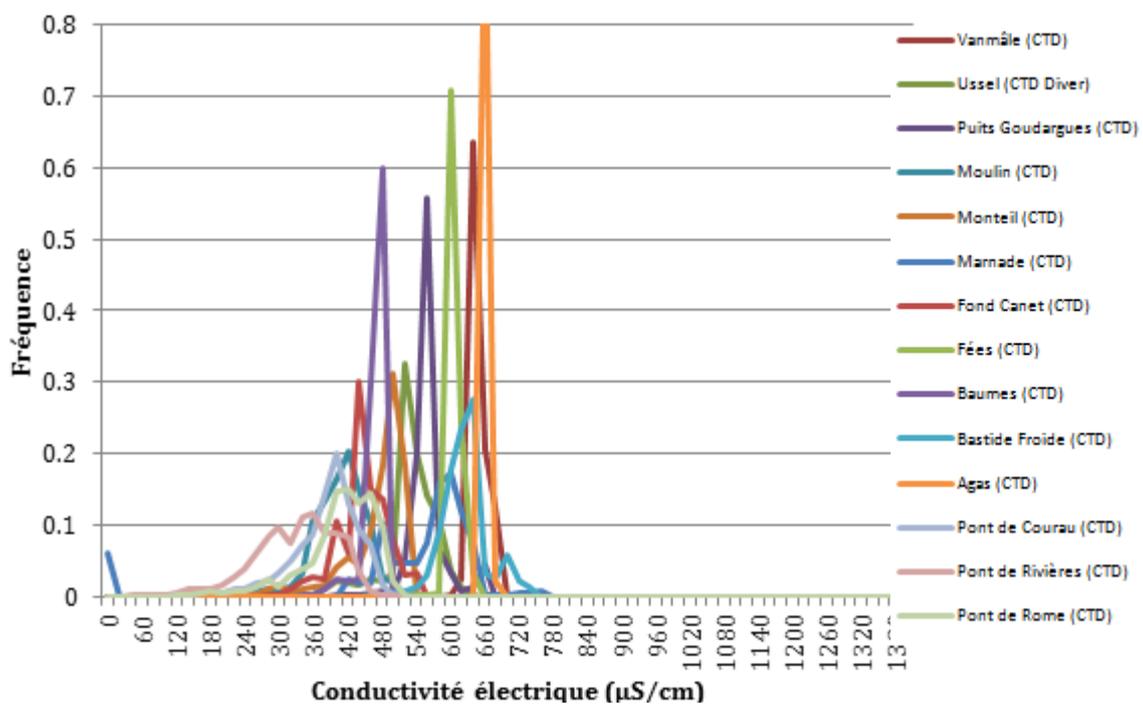


Figure 19 : Distribution fréquentielle de la conductivité électrique des stations étudiées, pour les données CTD jusqu'à décembre 2014.

III.2.4.iv. Analyses Corrélatoires et Spectrales (ACS)

- **Etude systémique du Karst**

Les analyses corrélatoires et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche systémique du karst (Figure 20). L'aquifère karstique est assimilé à un système de type « boîte noire » dont la pluie et le débit à l'exutoire représentent respectivement l'entrée et la sortie [Schoen et al, 1999]. L'analyse des signaux en sortie du système traduit les propriétés physiques du système.

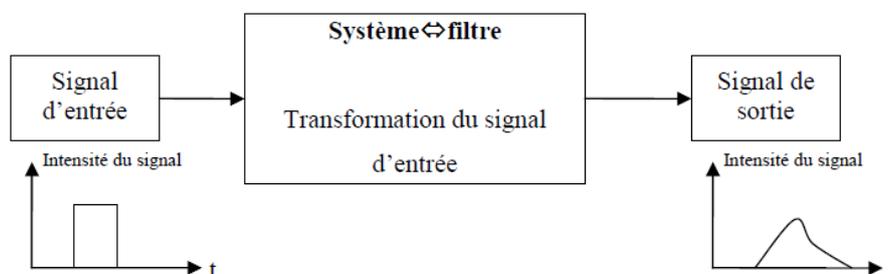


Figure 20 : Transformation d'un signal par un système [Bailly-Comte, 2008].

Les analyses corrélatoires et spectrales fournissent des informations sur les tendances du système à plus ou moins long terme, sur les phénomènes périodiques et sur les capacités de stockage du système [Bailly-Compte, 2008].

- **Coefficient de corrélation**

En considérant le signal comme une série chronologique, le coefficient de corrélation r_k est défini suivant la formule proposée par Jenkins et Watts [1968] :

$$r_k = \frac{C_k}{C_0} \quad \text{avec} \quad C_k = \frac{1}{n} \sum_i^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (\text{Eq 1})$$

Où :

- k : Retard/décalage temporel (nombre de pas de temps) avec $k = 0, 1, 2 \dots m$.
- n : Nombre de jours que comporte la chronique.
- x_i : Valeur de la variable x .
- \bar{x} : Moyenne de la variable x .
- y_i : Valeur de la variable y .
- \bar{y} : Moyenne de la variable y .

L'étude du corrélogramme se concentre sur des temps compris entre 0 et m avec $m = n/3$. Dans la littérature, la valeur de la troncature m a été déterminée empiriquement et pour $m \geq n/3$ les résultats peuvent subir une altération [Mangin, 1984].

- **Autocorrélation**

L'autocorrélogramme permet de déterminer l'effet mémoire (ou inertie) d'un système qui s'apparente à la capacité de stockage d'un volume d'eau par le système lors de précipitations subites [Mangin, 1975]. L'effet mémoire est le temps nécessaire pour atteindre le minimum d'autocorrélation permettant de considérer que celle-ci est négligeable. Par souci de simplification, il est défini par le temps que met le système à atteindre une autocorrélation à 0,2 (Figure 21) [Kong A Siou, 2011].

Dans le cas d'une autocorrélation, on utilisera cette forme de la formule de Jenkins et Watts [1968] :

$$r_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_i^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{Var x}$$

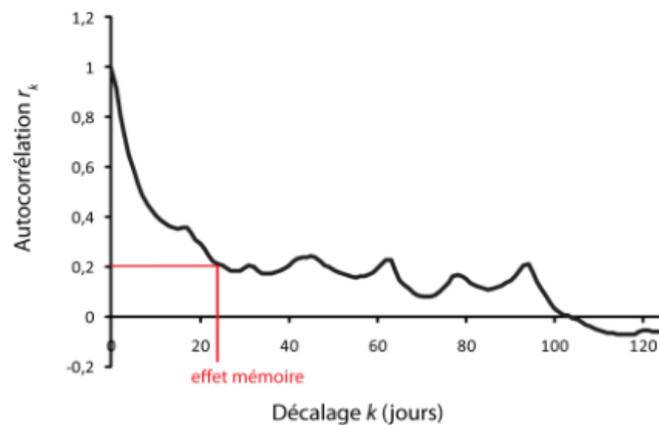


Figure 21 : Exemple de corrélogramme simple/autocorrélogramme [Kong A Siou, 2011].

L'autocorrélogramme illustre la dépendance d'évènements entre eux pour des intervalles de temps k de plus en plus importants. La décroissance lente d'un corrélogramme souligne qu'un évènement a une influence sur le long terme.

Ex : Un autocorrélogramme qui décroît lentement indique que le système possède une forte capacité de stockage, inversement un effet mémoire court signifie que le système réagit rapidement à la pluie et que ses capacités de stockage sont limitées.

- **Corrélogramme croisé**

La corrélation croisée représente la corrélation entre deux séries x et y en fonction de leur décalage temporel k (Figure 22). La corrélation croisée se prête bien à l'analyse des corrélations entre pluies et débits par exemple. Le corrélogramme croisé n'est représenté que pour des k positifs car on s'inscrit dans un système causal (la pluie influençant les débits). À partir d'un corrélogramme croisé il est possible d'identifier un temps de réponse, défini par le temps écoulé pour observer le pic de corrélation (corrélation maximale entre les deux séries). Ici l'effet mémoire détermine le moment à partir duquel les séries sont indépendantes et donc de déterminer la taille de l'historique de pluviométrie influençant le débit [Kong A Siou, 2011].

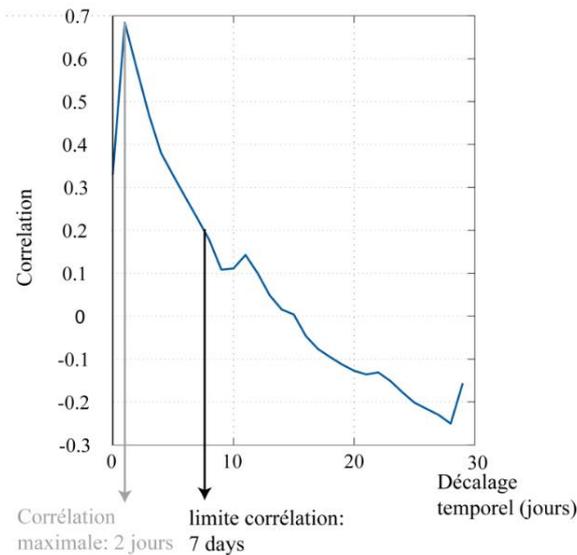


Figure 22 : Exemple de corrélogramme croisé [Kong A Siou, 2011].

- **Analyse spectrale simple**

Transformée de Fourier d'un signal x en fonction de la fréquence f ($f=\omega/2\pi$ en Hz) :

$$X(f) = TF[x(t)] = \int_R x(t). e^{-i2\pi f t} dt$$

Le théorème de Wiener-Kinchine montre que la densité spectrale énergétique d'une fonction aléatoire stationnaire peut se traduire comme la transformée de Fourier S_f de l'autocorrélation de cette même fonction (Mangin, 1984) :

$$S_f = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{k=m} D_k r_k \cos 2\pi F k \right]$$

Où :

- D_k : Fonction de pondération.
- F : Fréquence considérée. Soit j le pas de temps, $F = j/2 m$.

La fonction de pondération D_k permet d'éviter que la valeur estimée S_f soit biaisée. Mangin (1984) privilégie le filtre de Tukey avec $D_k = (1 + \cos \pi k/m)/2$. L'emploi du filtre de Turkey surestime la variance totale à hauteur de 8 % [Mangin, 1984].

La transformée de Fourier permet d'isoler les différentes composantes constituant le signal (signal complexe), en fonction de leur fréquence (signaux sinusoidaux). Graphiquement le signal est représenté par l'intensité en fonction de la fréquence de chaque composante (spectre).

Notion de temps de régulation (largeur de bande passante) : durée d'influence du signal. Fournit une information sur la longueur de la réponse impulsionnelle [Mangin, 1984].

Il est possible d'identifier l'influence du signal d'entrée sur le système en comparant leurs spectres respectifs. L'altération du spectre du signal d'entrée par le système renseigne sur l'état de karstification de ce dernier [Mangin, 1984].

Ex : Le spectre d'un signal d'entrée peu altéré illustre la forte densité du réseau de drainage. Les drains permettant un transit rapide des apports pluvieux, l'information des épisodes pluvieux est donc conservée.

- **Analyse spectrale croisée**

Le spectre croisé est la transformée de Fourier du corrélogramme croisé pour deux signaux différents (ex : signal pluie et débit) et s'écrit de la façon suivante :

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f)$$

Avec :

$$h_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \cos(2\pi f k) \right]$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \sin(2\pi f k) \right]$$

Où :

- k est le décalage introduit pour l'analyse corrélatrice,
- r_{xy} et r_{yx} sont les coefficients de corrélation concernant l'analyse corrélatrice croisée,
- f est la fréquence,
- D est la fenêtre de pondération introduite au paragraphe précédent.
- m est la troncature et doit être inférieure au nombre de mesures du signal analysé divisé par trois [Mangin, 1984].

Le déphasage entre le signal d'entrée et le signal de sortie est calculé ainsi :

$$\theta_{xy}(f) = \arctan\left(\frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)}\right)$$

La fonction de gain donnée ci-après permet de déterminer si, pour l'harmonique considérée, la puissance a été amplifiée ($g > 1$) ou atténuée ($g < 1$) par le système.

$$g_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_x(f)}$$

Dans le cas d'un système karstique, le gain peut être relié au stockage de l'eau en hautes-eaux, puis à son écoulement en basses-eaux [Larocque *et al.* 1998]. Par exemple la composante basse fréquence de l'écoulement correspondant au débit d'étiage est beaucoup plus importante dans le signal de débit que dans le signal de pluie qui est un signal très variable.

III.2.4.v. Méthode des débits classés

La méthode des débits classés consiste à ranger les débits par classe d'amplitudes en fonction de la probabilité de chaque classe de ne pas dépasser un certain débit. Le traçage sur une échelle double logarithmique permet d'identifier des segments de droite dont les ruptures de pente se traduisent par des événements particuliers (Figure 23) [Kong A Siou, 2011].

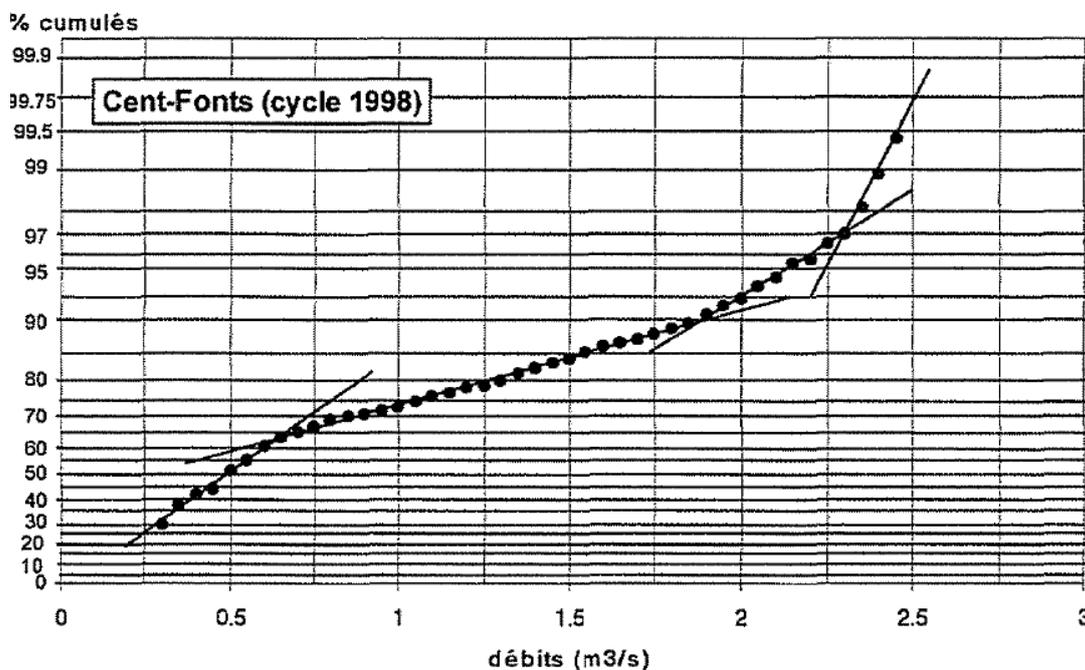


Figure 23 : Débit classés pour la source de Cent-Fonts pour les données du cycle 1998 [Schoen et al, 1999].

Une augmentation de la pente peut se traduire par la mise en fonctionnement d'un trop-plein tandis qu'une diminution de la pente peut se traduire par un soutient du débit, un apport d'eau au système [Schoen et al, 1999]. Marsaud [1997] détaille dans sa thèse les différentes interprétations possibles en fonction de ces variations (Tableau 8).

Tableau 8 : Interprétation des ruptures de pente dans les courbes de débits classés [Marsaud 1997].

Pente des droites	Position de la rupture	Interprétation
$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	- Mise en fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes-eaux
$\alpha_2 < \alpha_1$		- Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
$\alpha_2 > \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Constitution d'une réserve
$\alpha_2 < \alpha_1$		- Apport d'une réserve issue d'un cycle antérieur
$\alpha_3 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Avec α_1 , α_2 et α_3 les dénominations des pentes des segments de droites.

III.2.4.vi. Analyse en ondelettes

Les signaux hydrologiques étant sensibles aux variations saisonnières et climatiques, on peut donc les considérer comme des signaux non-stationnaires. L'analyse en ondelette permet de mener des analyses sur ce type de signaux non-stationnaires [Kong A Siou, 2011].

Une ondelette est une fonction oscillante de moyenne nulle. La transformée en ondelettes décompose le signal en une famille d'ondelette transformées et dilatées dans le temps selon la formule suivante :

$$\psi_{(u,s)} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right)$$

Où :

- ψ : L'ondelette.
- u : Le paramètre translation.
- s : Le paramètre dilatation ou échelle.

La transformée en ondelettes d'une fonction $x(t)$ au temps u et à l'échelle s s'écrit :

$$W_{x(u,s)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

• Ondelettes discrètes

La transformation d'un signal peut également se faire en temps discret. Dans le cas discret, la dilatation et la translation de l'ondelette mère se fait de la façon suivante en considérant que les échelles varient également de manière discrète par puissance de 2 (échelle dyadique):

$$\psi_{(j,q)}(k) = a_0^{\frac{j}{2}} \psi(a_0^j k - q)$$

Où :

- k : Le temps discret.
- q : Le paramètre translation/paramètre de retard.
- j : Le paramètre dilatation/puissance des variations dyadiques.
- $a_0 = 2$. Constante correspondant à la plus petite échelle.

Le signal est décomposé en deux composantes : l'allure générale du signal (basses fréquences), est appelée approximation tandis que le résidu du signal (hautes fréquences), est appelé détail [Labat *et al.* 2000]. L'orthogonalité des ondelettes discrètes permet d'écrire de manière exacte la transformée en ondelettes inverse. Lors de la transformée inverse, le signal $x(k)$ est exprimé comme une somme pondérée sur la base d'ondelettes, ceci permettant d'effectuer une analyse multirésolutions [Labat *et al.* 2000].

• Graphique et interprétation

Les transformées en ondelettes sont représentées sur des graphiques avec le temps en abscisse et l'échelle (ou fréquence) en ordonnées (Figure 24). Un code couleur permet de donner les valeurs de la transformée en ondelette : une teinte bleu indique des valeurs faibles (événements peu pluvieux et des teintes rouges des valeurs élevées (événements pluvieux). Les processus périodiques sont identifiés par des lignes horizontales, alors que les processus ponctuels sont identifiés par des lignes verticales. Par ailleurs, les zones verticales sombres, localisée durant l'été, signifient que le débit est constant car généré par les réserves [Kong A Siou, 2011].

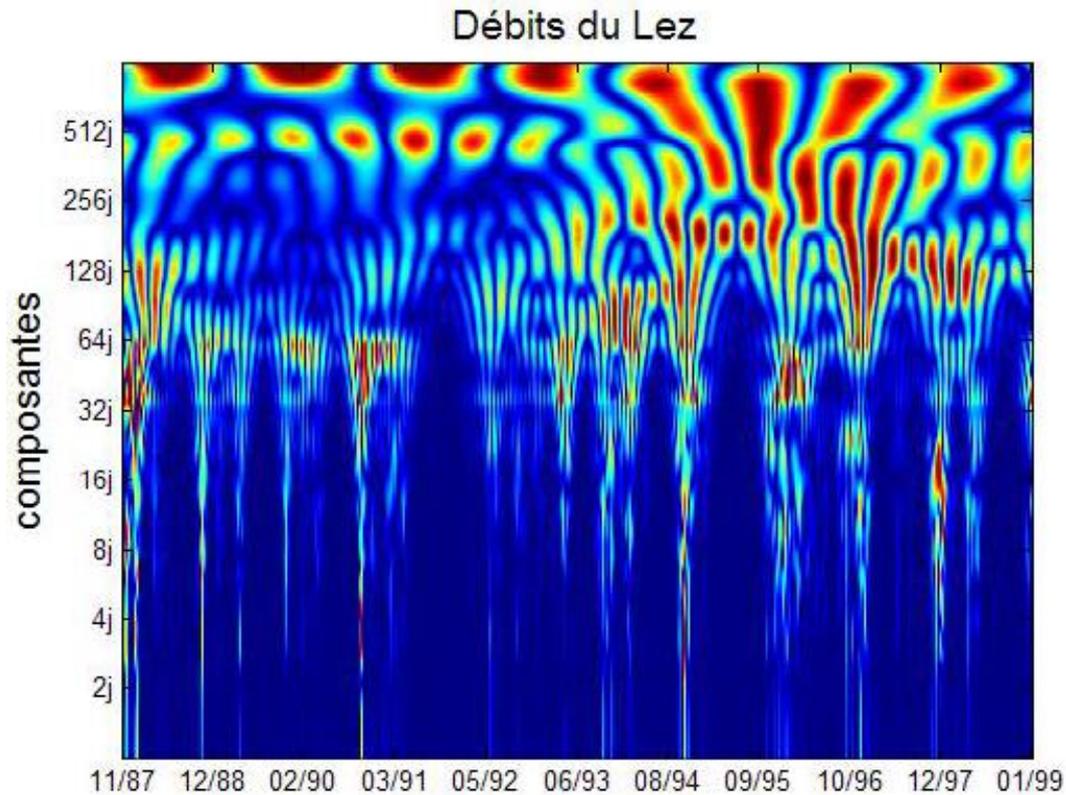


Figure 24 : Spectre en ondelettes du signal du débit de la source du Lez entre 1987 et 1999 [Kong A Siou, 2011].

III.2.5. Bilan et perspectives

Après avoir obtenu une base de données et des relations hauteurs/débits fiables, il sera question d'appliquer les méthodes d'analyses et de traitement du signal évoquées précédemment aux données acquises au cours du projet. Toutes les méthodes abordées ne seront pas nécessairement pertinentes ou même possibles à appliquer à l'ensemble des chroniques. L'objectif étant de mieux cerner le comportement chimique, thermique et hydrodynamique des sources, notamment en mettant en évidence des ruptures de comportement, des relations avec des données de précipitations, hauteur de rivière ou encore d'état de saturation du karst.

PARTIE IV

—

Utilisation des invertébrés interstitiels pour localiser les zones d'échange rivière-nappe

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Pierre Marmonier, Michel Creuzé des Châtelliers, Marie-José Olivier, Margot Jacquy, Martin Lawniczak et Mathilde Novel (UMR 5023 LEHNA, CNRS-Université Lyon 1, Equipe Ecologie, Evolution, Ecosystèmes Souterrains).

IV.1. Objectif de l'étude

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

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

Dans les zones de remontées d'eau souterraine vers la surface, appelées **upwellings**, les eaux des interstices sont souvent moins bien oxygénées et la quantité de matière organique plus faible. Là, on trouvera un peu moins d'organismes benthiques qui sont désavantagés par ces contraintes, mais une proportion plus forte de stygobies, qui ne craignent pas ces limitations des ressources et apprécient la stabilité thermique et hydrologique des milieux alimentés en eau souterraine. Les stygobies fréquentant les upwellings sont souvent des animaux vivant en profondeur dans la nappe, très sensibles aux perturbations (e.g. *Niphargus kochianus* dans le Rhône). La composition de cette faune stygobie des zones de upwelling permet d'évaluer l'importance et parfois l'origine des eaux remontant vers la surface : eau de surface ayant transité sur quelques dizaines ou centaines de mètres dans les sédiments ou eau d'origine profonde.

L'objectif de cette étude était d'**appliquer cette méthode à la Cèze de manière à localiser les zones d'apport d'eau souterraine dans une rivière non aménagée coulant dans une zone karstique**. En effet cette méthode de localisation des zones d'échange rivière-nappe a été jusque-là uniquement appliquée à des cours d'eau en milieu alluvionnaire ; il convenait donc de la tester au sein d'un massif karstique où **les apports d'eau souterraine sont beaucoup plus ponctuels** et possiblement plus compliqués à localiser. Nous avons échantillonné l'eau interstitielle et de la faune hyporhéique dans des zones de upwelling (le long de bancs de graviers latéraux) et utilisé leurs caractéristiques pour diagnostiquer le sens des échanges hydrologiques entre la rivière, les interstices des galets et la nappe.

IV.2. Echantillonnage des communautés interstitielles

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

- Un total de 18 bancs de galets a été échantillonné, sur les 34 bancs présents entre Tharoux et la Source de Monteil (Figure 25), le banc 1 étant situé juste en amont de l'entrée des gorges, le 34 au niveau de la Source de Monteil elle-même.
- Chaque station a été échantillonnée en trois points (réplicats de mesure) distant d'une dizaine de mètres, sur un secteur d'apparence homogène (même granulométrie de surface, même pente...).
- A chacun des trois points, 10 L d'un mélange d'eau et de sédiment ont été pompés puis filtrés pour récupérer la faune, des analyses physico-chimiques de terrain ont été effectuées et 40 ml d'eau ont été filtrés pour analyse au laboratoire.
- Des échantillons d'eau supplémentaires ont été réalisés dans la Cèze en surface (à chaque station) et dans 4 sources (Source des Fées, source près du banc 6, Source des Travers, Source de Monteil), dans l'eau de surface de la source et dans l'eau interstitielle.
- Des échantillons supplémentaires de faune ont été réalisés dans ces mêmes sources (filet Surber pour le benthos et pompages Bou-Rouch pour l'interstitiel), ainsi qu'en 4 stations pour le benthos de la Cèze (filet Surber 200 µm de vide de maille, 8 micro-habitats cumulés).
- Un total de 66 échantillons de faune et de 80 échantillons d'eau a donc été réalisé.



Figure 25 : Localisation des 18 bancs de galets échantillonnés en juillet 2013 pour l'étude des eaux et de la faune interstitielle de la Cèze. Les numéros correspondent au code des stations.

Physico-chimie de l'eau : la température, la conductivité électrique, le pH et les teneurs en Oxygène dissous ont été mesurés sur le terrain, sur les eaux de surface et les eaux interstitielles (Thermo-Conducti-Oxymètre HACH-Lange).

La différence de hauteur entre l'eau interstitielle dans le piézomètre et l'eau de la rivière (ou Gradient Hydraulique Vertical, Lee & Cherry, 1978) a été mesurée à chaque point. Un échantillon de 40ml d'eau a été filtré sur le terrain à 0,7 μ m (filtre Whatmann GF-F) et ramené au laboratoire pour la mesure des teneurs en nitrate et en sulfate (analyses colorimétriques standard), en Calcium, Magnésium, Sodium et Potassium (par chromatographie ionique).

Pour cette année 2, la totalité des échantillons de faune interstitielle ont été triés et identifiés, soit 54 échantillons (18bancs x 3 réplicats). Les identifications de la faune a été menée à l'espèce (Oligochètes, Cladocères, Ostracodes, Amphipodes, Isopodes), au genre ou au groupe d'espèces (Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères, Coléoptères) ou à la famille (autres groupes).

IV.3. Résultats

IV.3.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles

La mesure des gradients hydrauliques verticaux entre les eaux interstitielles et les eaux de surface (Figure 26) mettent clairement en évidence que l'ensemble des échantillons ont été réalisées en zone de upwelling (tous les VHG sont positifs), mais avec deux types de variations :

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

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

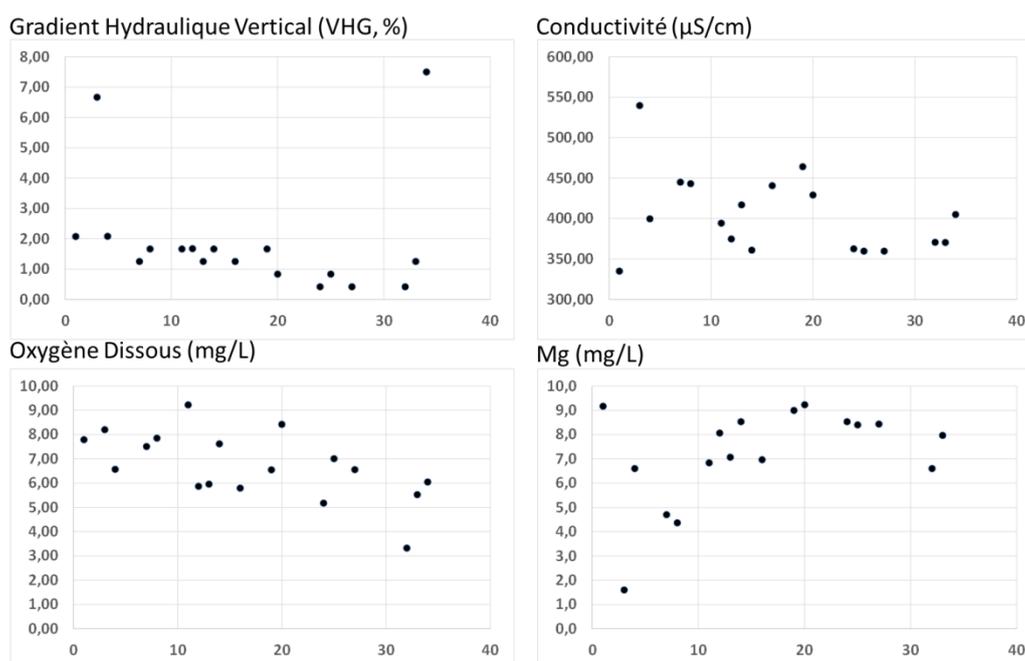


Figure 26 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles de la Cèze mesurées dans les 18 bancs de galets étudiés en 2013 (en abscisse : n° des bancs).

Les mesures réalisées sur les autres paramètres physico-chimiques traduisent eux aussi une forte hétérogénéité spatiale des eaux interstitielles de la Cèze (Figure 26) :

- Les teneurs en Oxygène dissous diminuent progressivement d'amont en aval, traduisant bien la diminution progressive des échanges d'eau entre la rivière, sa nappe et les interstices des sédiments. Ces teneurs en Oxygène restent toujours supérieures à 3 mg/L (minimum au banc 32, avec 3,3 mg/L) et ne semblent donc pas limitants pour la faune souterraine adaptée à des hypoxies sévères, mais pourraient limiter l'accès aux sédiments à de nombreuses espèces benthiques résistant mal à l'hypoxie (Ephéméroptères ou Plécoptères exigeants).
- La Conductivité des eaux interstitielles en amont des gorges (banc 1) est la plus faible (autour de 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$). A partir de la Source des Fées (banc 3) la conductivité électrique des eaux interstitielles est plus forte que celle de l'eau de la rivière (pouvant aller jusqu'à 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et elle reste élevée jusqu'au milieu des gorges (banc 20). Plus en aval, elle diminue pour se stabiliser à des valeurs proches de celle mesurées dans les eaux de surface de la rivière (autour de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les valeurs mesurées au droit de la Source de Monteil (banc 34, valeur moyenne de 405 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont à peine supérieures à celles mesurées juste en amont (dans les bancs 24 à 33).
- Les teneurs en Ca (non présentées ici) montrent des similitudes avec la conductivité. Dans les eaux interstitielles du banc 1 (amont des gorges) et des bancs de la zone médiane (bancs 19 à 27), elles sont similaires à celles mesurées dans les eaux de surface. En revanche, elles augmentent progressivement dans les bancs de la première partie des gorges (maximum de 66 mgCa/L aux bancs 11 et 13) et sont les plus fortes à la dernière station (69.1 mgCa/L au banc 34 près de la source Monteil).
- Les teneurs en Mg, Na, SO₄ et K montrent une tendance exactement opposée. Nous commenterons ici le Mg qui est représentatif de ce groupe de paramètres : les teneurs en Mg sont fortes avant de pénétrer dans les gorges (9,2 mgMg/L au banc 1) et en aval des gorges (des bancs 24 à 34, plus de 8 mgMg/L), elles sont proches de celles mesurées dans les eaux de surface de la rivière (8,7 mgMg/L en moyenne). Inversement, ces teneurs sont plus faibles dans la partie amont des gorges (des bancs 3 à 11, valeurs moyennes variant de 1,6 à 7 mgMg/L) et proches de celles mesurées dans les eaux souterraines du secteur, comme dans la Source des Fées (1,5 mgMg/L), la source du banc 6 (4,4 mgMg/L) ou la Source des Travers (1,0 mgMg/L). Comme pour la conductivité, les valeurs de Mg, Na, SO₄ ou de K mesurées au droit de la Source de Monteil (banc 34, valeur moyenne de 7,2 mgMg/L) sont à peine inférieures à celles mesurées juste en amont (des bancs 24 à 33).

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

- En amont des gorges, les interstices des sédiments sont alimentés par de l'eau de surface de la rivière.
- A partir de la Source des Fées et jusqu'au banc 16, les interstices sont alimentés par une part plus ou moins forte d'eau souterraine. Cette contribution souterraine est forte dans les bancs 3, 7, 8, 11, 13 et 16, plus faible dans les bancs 4, 12, 14.
- En aval des gorges, les interstices des sédiments sont alimentés par des eaux de la Cèze (bancs 19 à 33) avec parfois une tendance au colmatage, bien visible sur les teneurs en oxygène dissous parfois très faibles (banc 32).
- Au droit de la Source de Monteil (banc 34) les apports d'eau souterraine se font de nouveau fortement sentir.

IV.3.2. Caractéristiques des communautés interstitielles

Un total de 114 taxons a été récolté dans les 54 échantillons, dont près de la moitié sont des Crustacés. Cette forte diversité taxonomique démontre la qualité de la communauté d'invertébrés de la Cèze. Certains organismes benthiques sont des animaux exigeants (comme les Plécoptères du genre *Leuctra*, ou les Ephéméroptères Habrophlebiidae du genre *Choroterpes*)

Au sein de cette faune, 15 espèces stygobies ont été identifiées (Tableau 9), dont 3 espèces d'Ostracodes, 4 Amphipodes et 4 taxons d'Oligochètes. Cette diversité est importante et illustre bien la position biogéographique de la Cèze : située en bordure de la zone méditerranéenne et épargnée par les dernières glaciations, la faune stygobie y est bien diversifiée.

Tableau 9 : Liste taxonomique des invertébrés stygobies et station où ont été collectés ces organismes dans les bancs de galets de la rivière Cèze en juillet 2013.

Oligochètes : Lombriculidae sp., *Rhyacodrilus amphigenus*, *Giarius aquaedulcis*, Phallo-drilinae sp.

Mollusques : Gastéropode hypogé juvénile (proche *Islamia* sp.)

Copépodes Harpacticides : *Parastenocaris* sp.

Ostracodes : *Pseudocandona zschokkei*, *Schellencadona triquetra*, *Cryptocandona kieferi*,

Amphipodes : *Niphargus* cf *kochianus*, *Niphargus fontanus*, *Niphargus virei*,

Niphargus (*Niphargopsis*) *casparyi*.

Isopodes : *Proasellus walteri*

	1	3	4	7	8	11	12	13	14	16	19	20	24	25	27	32	33	34
Lombriculidae sp.		*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*
<i>R. amphigenus</i>													*				*	
<i>G. aquaedulcis</i>	*	*			*	*	*	*					*	*	*			*
Phallo-drilinae sp.	*							*		*		*		*	*		*	*
Gastéropode indet	*	*															*	*
<i>Parastenocaris</i> sp.	*	*	*		*		*	*		*		*	*	*	*		*	*
<i>P. pbreatica</i>	*		*	*			*	*	*				*	*	*		*	
<i>Ps. zschokkei</i>			*				*		*									
<i>S. triquetra</i>			*															
<i>C. kieferi</i>	*		*	*	*	*		*	*							*		
<i>N. casparyi</i>		*				*			*								*	
<i>N. cf kochianus</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		*	*		*	*
<i>N. fontanus</i>	*	*		*			*		*			*	*		*		*	*
<i>N. virei</i>																	*	
<i>P. walteri</i>	*	*	*	*	*		*		*			*	*	*	*		*	*
	9	8	8	6	6	5	8	7	8	4	0	6	7	7	8	2	11	8

Lorsque l'on considère la distribution spatiale de cette faune dans les 18 stations échantillonnées (Tableau 9), on peut constater que la faune stygobie est bien répartie tout au long de la zone d'étude (la Cèze est globalement riche en faune aquatique souterraine) mais que le nombre d'espèces présentes est très peu informatif. Pour interpréter ces données en termes d'échanges, il faut faire appel aux abondances des différentes espèces. Dans ce cas, des différences fortes entre stations apparaissent :

- les organismes stygobies appréciant les apports d'eau venant de la profondeur (Figure 27) sont principalement localisés dans la première partie des gorges (du banc 3 à 14) et à la fin de la zone étudiée près la source Monteil (bancs 33 et 34). Parmi ces espèces, deux sont fréquemment trouvées en milieu karstique (*N. fontanus* et *N. virei*) et pourraient donc indiquer des apports des karsts riverains.
- Les espèces stygobies préférant les apports d'eau peu profonde (échanges hyporhéiques) comme *Phreatalona phreatica* ou *Pseudocandona zschokkei* (Figure 28) sont plus abondantes dans la partie centrale des gorges, en particulier dans les bacs entre 11 et 14. L'Amphipode *Niphargus (Niphargopsis) casparyi* est trouvé en très grand nombre dans le banc 3, près de la source des Fées.

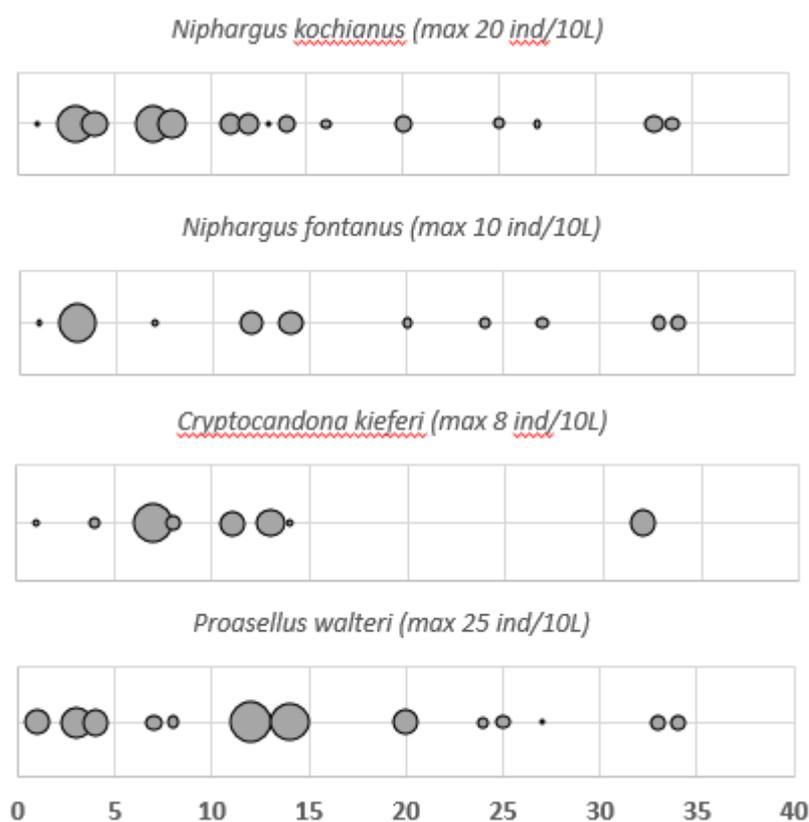


Figure 27 : Distribution spatiale des espèces stygobies préférant les apports d'eau profonde. La taille des cercles est proportionnelle à l'abondance de l'organisme. Les stations sont notées de 1 à 34 d'amont en aval.

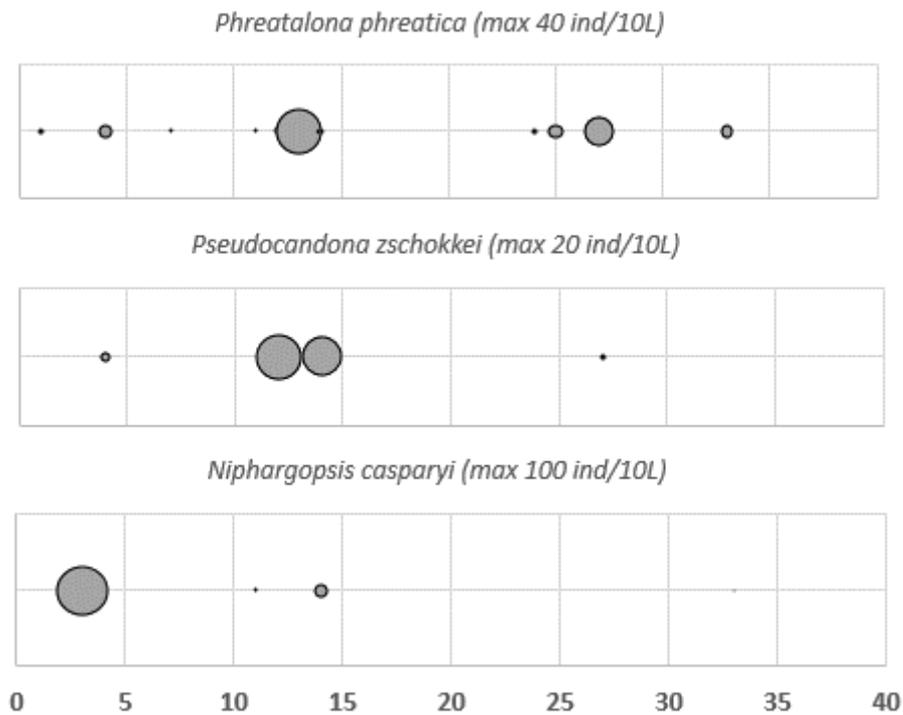


Figure 28 : Distributions spatiale des espèces stygobies préférant les apports d'eau peu profonde (échanges hyporhéiques). La taille des cercles est proportionnelle à l'abondance de l'organisme. Les stations sont notées de 1 à 34 d'amont en aval.

Pour aller au-delà de ces distributions, il est possible de calculer un indice d'échange rivière-nappe. Cet indice est basé sur les abondances des espèces stygobies combinées avec leurs traits biologiques :

$$IE = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

Où

N1 : abondances des organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments dans une grande diversité d'habitats souterrains (ubiquistes) ;

N2 : abondances des organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéique du fleuve à faible profondeur ;

N3 : abondances des organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe et les karsts ;

N4 : abondances des organismes phréatobies présents uniquement à forte profondeur dans la nappe alluviale ou des espèces strictement karstiques.

Dans le secteur étudié, la valeur de l'indice (Figure 29) varie fortement d'amont en aval des gorges : les échanges entre la Cèze et les eaux souterraines semblent plus importants dans la première moitié des gorges (des bancs 3 à 14) et dans la partie la plus en aval de la zone étudiée (bancs 33 et 34). La faible présence d'organismes stygobies en amont des gorges (banc 1) et dans la partie centrale (bancs 20 à 27) n'est pas associée à des peuplements appauvris, les abondances totales dans les échantillons peuvent être très fortes (plus de 5700 ind./10L à la station 24, Figure 29). Seules les stations 16, 19 et 32 sont très peu peuplées. C'est à cette dernière station (banc 32) où les abondances et richesses totales les plus faibles ont été mesurées, les assemblages sont très pauvres et semblent soumis à des conditions très difficiles.

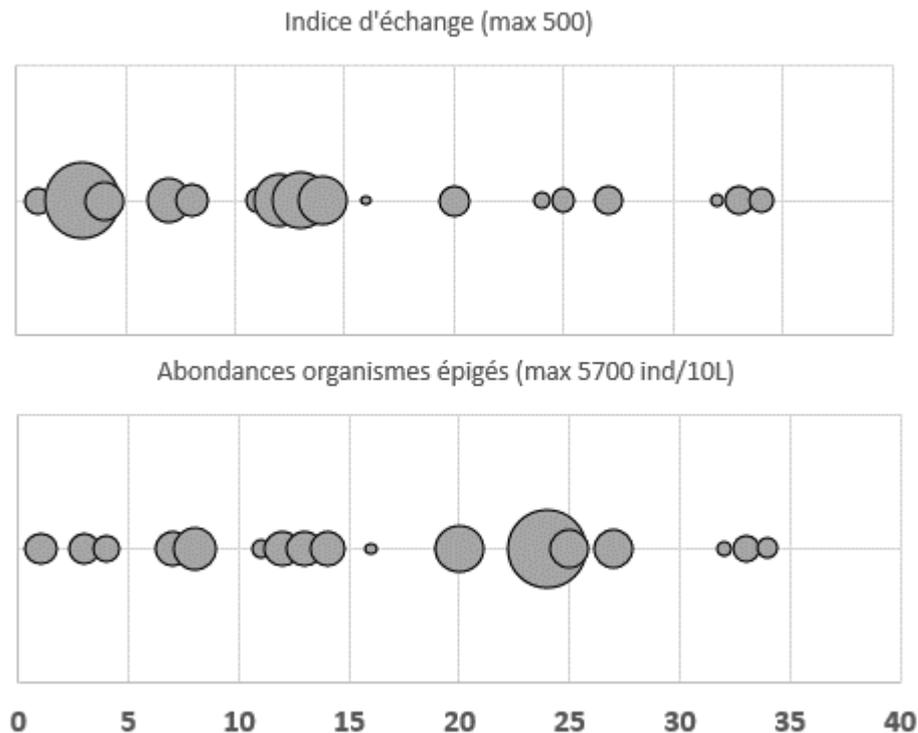


Figure 29 : Valeur de l'indice d'échange rivière-nappe et abondance totale de faune dans l'échantillon de 10 litres. La taille des cercles est proportionnelle à l'indice et à l'abondance totale. Les stations sont notées de 1 à 34 d'amont en aval.

IV.4. Discussion et perspectives

Ces travaux ont permis un échantillonnage extensif (18 stations en triplicats) de la Cèze dans la zone des gorges karstiques en aval de Tharoux. Les informations apportées par les analyses physico-chimiques des eaux interstitielles et par les organismes hyporhéiques semblent très cohérentes (Figure 30) :

- Avant l'entrée de la Cèze dans les gorges (au banc 1), les sédiments semblent alimentés par des flux d'eau allant de la surface vers les interstices, la Cèze serait donc en situation de perte d'eau superficielle. Les communautés d'invertébrés confirmeront ou infirmeront ce diagnostic.
- Dans la partie en amont des gorges, du banc 3 aux bancs 14, les sédiments de la rivière semblent alimentés par des apports d'eau souterraine profonde. Ces apports sont particulièrement sensibles au droit de la Source des Fées (banc 3) et dans les bancs 7, 8, 11, 12 et 14.
- Dans ce même secteur en amont des gorges, les bancs 4 et 13 semblent caractérisés par des échanges hyporhéiques sur de faibles distances.
- Dans la partie centrale des gorges (du banc 16 à 24), c'est la rivière qui semble alimenté les sédiments de son lit, avec parfois des recyclages de l'eau sur de courtes distances (bancs 25 et 27).
- Dans la partie en aval des gorges, les bancs 33 et 34, les sédiments sont alimentés en eau souterraine profonde, sans doute liée à la Source de Monteil pour le banc 34. Les communautés d'invertébrés sont marquées par des organismes karstiques.
- Enfin, le banc 32 semble partiellement colmaté : les communautés interstitielles sont très peu abondantes (seulement 263 individus/10L en moyenne) et les teneurs en oxygène dissous sont faibles (3,3 mg/L en moyenne).

La suite des travaux permettra de progresser sur 2 principaux points :

- La faune du compartiment benthique de la rivière est en cours de tri et d'identification de manière à savoir si elle est modifiée d'amont en aval des gorges (effet du tourisme entre les bancs 19 à 24 par exemple), ce qui permettra de mieux analyser les informations apportées par la fraction épigée des organismes dans les communautés interstitielles en aval des gorges.
- De même, la faune karstique des sources et de certaines grottes sera échantillonnée, triée et identifiée, de manière à mieux connaître la composition spécifique de cette faune profonde dans ce secteur géographique peu connu, en particulier pour les organismes vivant dans les aquifères karstiques.

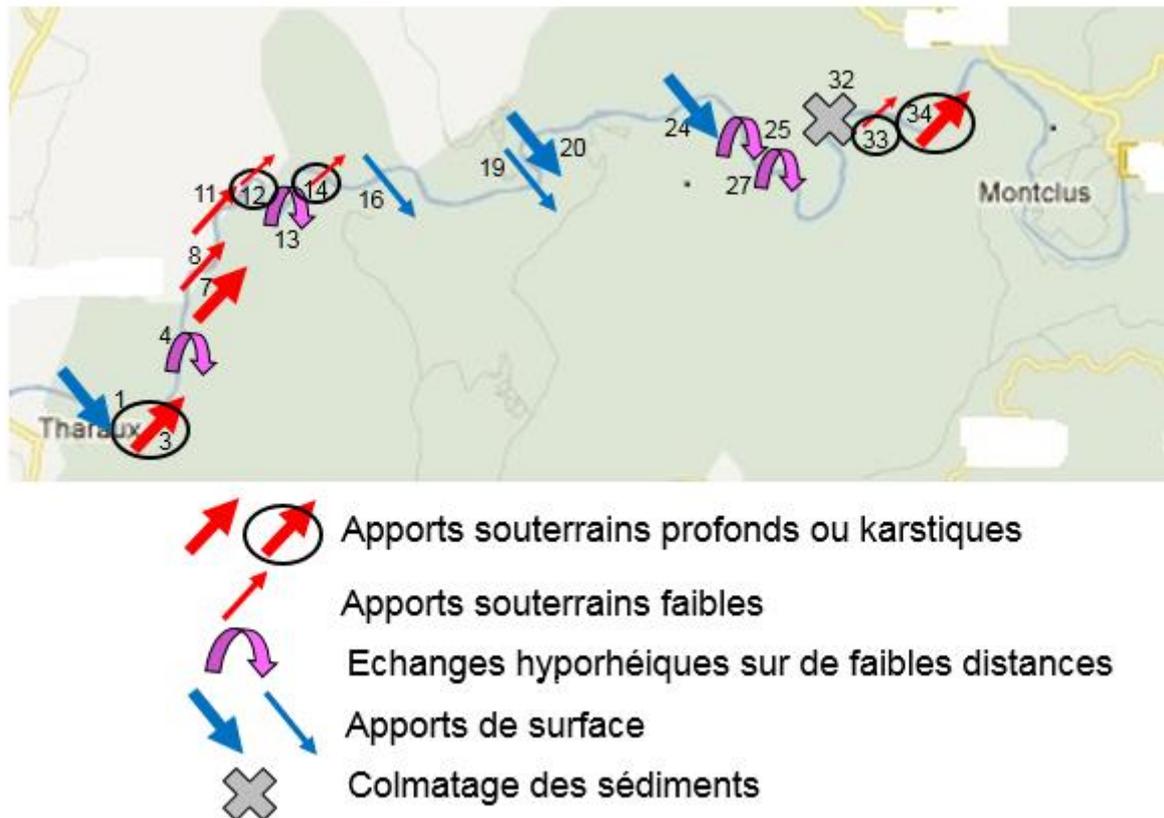


Figure 30 : Cartographie des zones d'échange rivière-nappe dans les gorges de la Cèze. Hypothèses de circulation des eaux obtenues à partir des mesures de juillet 2013 en combinant faune interstitielle et chimie des eaux.

PARTIE V

—

Approches de modélisation « pluies - débits » par réseaux neuronaux

Personnes directement impliquées dans cette action :

→ Anne Johannet, Michaël Savary, David Salze et Bernard Vayssade
(UMR 7300 ESPACE, EMA)

V.1. Rappel de la position du problème

Le livrable principal du projet consiste à identifier les outils pertinents pour évaluer les contributions du karst à la rivière et réciproquement (approches hydrologique, thermique, biologique, géochimique, traçage et modélisation), la façon de les mettre en œuvre et de s'en servir. Dans ce cadre, cette partie présente les premiers travaux menés pour modéliser les apports des cours d'eau et identifier leurs circulations. On tentera dans un deuxième temps d'identifier les circulations entre les différentes stations de la Cèze ; cette approche est limitée par le fait que nous ne disposons dans ce premier travail que des hauteurs d'eau, après validation de la courbe de tarage pour les faibles niveaux nous pourrions envisager de travailler sur les débits.

V.2. Méthodes et travaux envisagés

Comme le système Cèze-aquifère de Méjannes-le-Clap est mal connu (géométrie des drains, étendue des réservoirs, porosité fine, ...), il est décidé de mener à bien une approche statistique qui a comme finalité l'analyse du système à partir de ses entrées et sorties. Le cadre conceptuel est donc celui des méthodes statistiques de type boîtes noires.

Dans ce cadre, la première des tâches est de constituer une base de données des variables hydrologiques disponibles. Puis, à partir de cette base, plusieurs méthodes vont être appliquées : les analyses corrélatoires et spectrales qui nous renseignent sur la complexité de la relation pluie-débit ou pluie-hauteur, le temps de réponse du système à un forçage de pluie, l'effet mémoire du système. Avec l'analyse spectrale on pourra rechercher à identifier la fonction de transfert du système qui nous donnera des informations sur son caractère intégratif (par sa pente), sur la bande passante (fréquence de coupure).

Enfin nous réaliserons une modélisation pluie-hauteur à l'aide des réseaux de neurones, modèles statistiques non linéaire, utilisés en hydrologie pour la prévision, ou la modélisation des aquifères complexes.

Ces modèles pourront être utilisés comme modèle prédictifs en fonction de différents scénarios de précipitations. On pourra aussi les utiliser pour évaluer les pertes/apports entre les stations amont et aval de la zone des gorges, dans le cas où les données mesurées sont manquantes. En effet les données de hauteur ne semblent plus être enregistrées à la station de Laroque sur Cèze à partir de l'année 2000.

V.3. Méthodes d'analyse du signal et modélisation

V.3.1. Analyses corrélatoires

V.3.1.i. Définition

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

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

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

Équation 1

Avec k le décalage temporel (en nombre de pas de temps), C_k le coefficient de corrélation pour le décalage k , et n le nombre de jours que comporte la chronique considérée. Deux limites peuvent être soulignées par rapport à cette utilisation : d'une part les corrélations sont utilisées pour identifier des causalités alors que le simple calcul de coïncidence n'est pas une preuve de causalité ; d'autre part, l'approche utilisée est celle de la corrélation linéaire, qui ne peut donc prendre en compte le fonctionnement non linéaire des processus considérés. Néanmoins ces approches s'étant révélées très utiles nous les présentons dans ce qui suit.

La fonction de corrélation peut être calculée sur une seule série temporelle, on parle alors de corrélogramme simple ou d'autocorrélation, ou entre deux séries différentes ; on parle alors de corrélation croisée.

On distingue principalement deux types de corrélations : La corrélation simple et la corrélation croisée.

V.3.1.ii. Corrélation simple

Lorsque l'on s'intéresse à trouver des structures au sein d'un signal, on peut utiliser la fonction d'autocorrélation qui est définie telle que par l'Équation 1 en remplaçant \mathbf{y} par \mathbf{x} . On peut tracer cette fonction graphiquement en fonction du décalage k (Figure 31). Comme la fonction est, par construction, symétrique par rapport à l'axe des ordonnées, seules les valeurs pour les décalages positifs sont représentées. Lorsque l'on effectue cette analyse sur des hauteurs d'eau ou les débits d'un système hydrologique, le corrélogramme simple nous permet de déterminer l'*effet mémoire* du système étudié. A. Mangin (Mangin, 1975), l'a défini comme étant la durée nécessaire pour atteindre la valeur d'autocorrélation au-delà de laquelle on considère par un test statistique que la série temporelle n'est plus corrélée à elle-même. L'effet mémoire représente l'inertie du système. Ce dernier est défini comme étant la durée nécessaire pour que l'autocorrélation passe en dessous de la valeur de 0,2 [Mangin, 1981]. C'est donc cette valeur seuil de 0,2 qui sera utilisée pour les interprétations. Si l'on considère la Figure 31 représentant l'autocorrélation des hauteurs d'eau à La Roque-sur-Cèze de 1992 à 2000, on peut en déduire que l'effet mémoire est de 32 ou 33 jours selon que l'on a considéré la moyenne ou la médiane des corrélogrammes simples sur les années considérées. Cette valeur est assez élevée, elle signifie que le bassin d'alimentation de la station comporte un réservoir important.

Fonction d'autocorrélation des hauteurs d'eau à La Roque-sur-Cèze

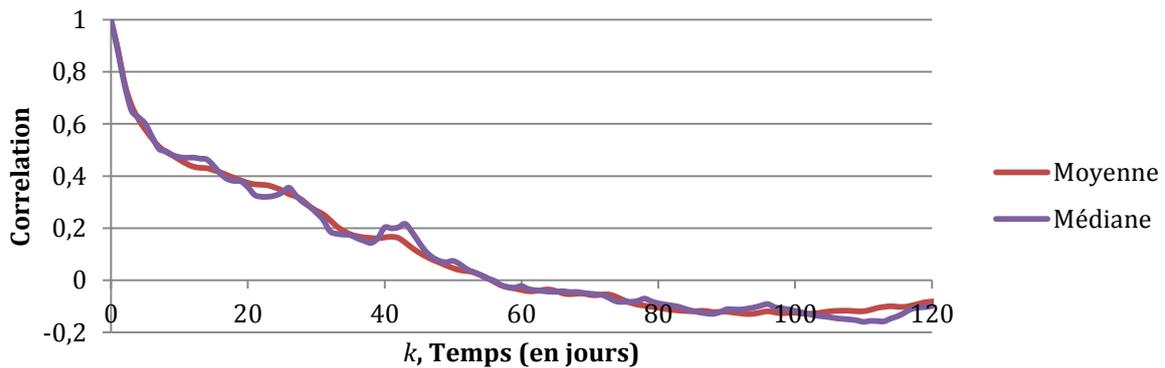


Figure 31 : Corrélogramme simple de la hauteur à Laroque sur Cèze. Cette figure représente la moyenne et la médiane des corrélogrammes simples annuels de 1992 à 2000. Comme la moyenne est proche de la médiane on en déduit qu'il n'y a pas d'année très particulière dans cette population en dépit de la variabilité interannuelle des précipitations.

En considérant la station de Laroque-sur-Cèze, il apparaît que l'effet mémoire est de 32-33 jours.

V.3.1.iii. Corrélation croisée

La corrélation croisée est utilisée sur deux séries chronologiques différentes, par exemple la pluie et la hauteur d'eau ou deux hauteurs d'eau entre elles.

Ainsi, en utilisant l'Équation 1, on calcule le corrélogramme croisé représentant la corrélation entre les deux signaux x et y en fonction du décalage temporel entre les deux séries. Un exemple de représentation graphique du corrélogramme entre des pluies et une hauteur d'eau est donné dans la Figure 32. On note qu'il y a deux parties dans ce graphe, pour les k positifs et les k négatifs. La partie droite, représentée pour les k positifs correspond à la partie causale de la relation : les pluies créent les débits. Ainsi, en observant l'effet mémoire dans le cas d'un corrélogramme croisé, il est possible de déterminer la durée pour laquelle les deux séries sont dépendantes, c'est-à-dire l'historique de pluie influençant la hauteur d'eau. Le seuil de corrélation défini précédemment (0,2) est également applicable pour les corrélogrammes croisés (Figure 32).

Corrélation croisée : hauteur d'eau à Tharoux vs hauteur d'eau à La Roque-sur-Cèze

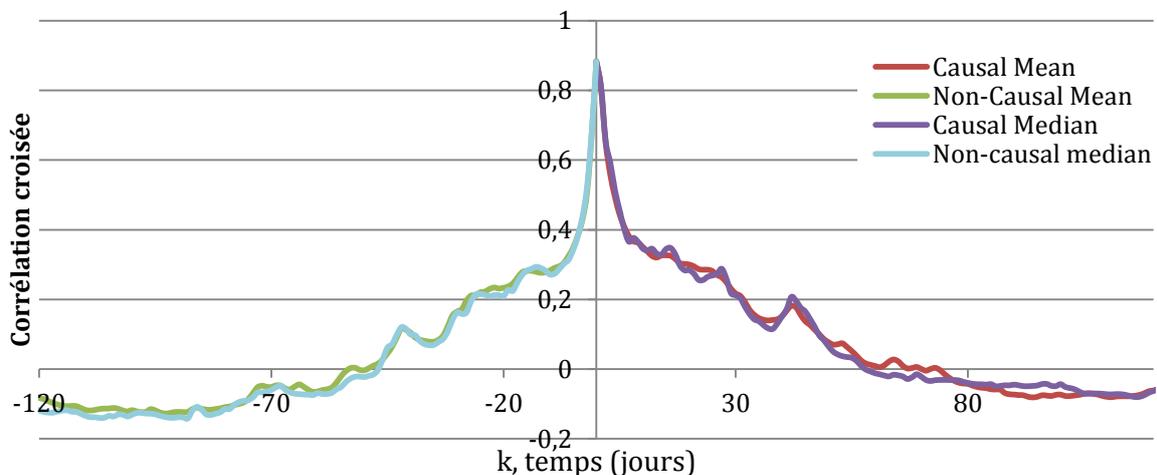


Figure 32 : Corrélogramme croisé de la hauteur à La Roque-sur-Cèze avec la hauteur d'eau à Tharoux. Cette figure représente la moyenne ou la médiane des corrélations croisées annuelles de 1992 à 2000. Les hauteurs d'eau aux deux

stations sont statistiquement liées jusqu'à une durée de 30 jours. De même que précédemment, comme la moyenne est proche de la médiane on en déduit qu'il n'y a pas d'année très particulière dans cette population en dépit de la variabilité interannuelle des précipitations.

En pratique, pour limiter les effets de bord, on ne calcule les corrélations que pour un certain nombre de valeurs de k , ce nombre étant appelé la troncature. En général la troncature vaut au maximum le nombre d'échantillons disponibles divisé par 3 [Mangin, 1984].

V.3.2. Analyses spectrales

La représentation spectrale d'un signal fournit la puissance qui est comprise dans le signal en fonction des fréquences présentes de manière permanente dans ce signal. Cette représentation est obtenue par la transformée de Fourier. Dans ce cadre, la transformée de Fourier opère une détection, fréquence par fréquence, de chacune des fréquences contenues dans le signal. La représentation nous donne donc une puissance en ordonnée en fonction d'une fréquence en abscisse. En utilisant le théorème de Wiener-Khinchine, il est possible de calculer la densité spectrale de puissance d'un signal en effectuant la transformée de Fourier de l'autocorrélation du signal comme suit [Mangin, 1984] :

$$S_t = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{k=m} D_k C_k \cos 2\pi f k \right]$$

Équation 2

Comme pour l'analyse corrélatrice, k correspond au décalage, f est la fréquence, C_k est le coefficient de corrélation du signal à analyser défini au paragraphe précédent et D_k est une fenêtre de pondération qui limite l'impact sur le calcul du fait que l'observation du signal est d'une durée finie, m est la troncature.

La comparaison des spectres d'entrée et de sortie d'un système, c'est-à-dire de pluie et de débit pour un système hydrologique, permet d'obtenir des informations sur la façon dont le système filtre le signal d'entrée. En particulier, si l'on considère la relation qui lie l'entrée $X(f)$ à la sortie $Y(f)$, toutes deux exprimées dans le domaine fréquentiel (respectivement transformées de Fourier de $x(t)$ et $y(t)$), via la fonction de transfert (transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle), on a :

$$Y(f) = H(f)X(f)$$

Si l'on considère que l'entrée est un signal aléatoire de type bruit blanc (approximation souvent réalisée pour les pluies), alors on a : $X(f)$; il vient :

$$Y(f) = H(f)$$

Ce qui signifie que le spectre de la sortie n'est rien d'autre que la réponse impulsionnelle du système ; cette relation est utile pour mieux comprendre l'opération de filtrage opérée par le système hydrologique. Néanmoins dans le cadre de cette étude elle atteint rapidement ses limites car la rivière Cèze possède des pluies variables le long de son cours d'eau que l'on ne peut représenter par une seule valeur. Nous avons donc affaire à un système à plusieurs entrées.

Par ailleurs, lorsque l'on représente le spectre d'une variable sur un graphique à double échelle logarithmique, les pentes comprises entre 0 et 1 en valeur absolue correspondent à un phénomène de bruit blanc [Hausdorff et al. 1996]. C'est ce que l'on observe en général pour les précipitations, comme illustré sur la Figure 33.

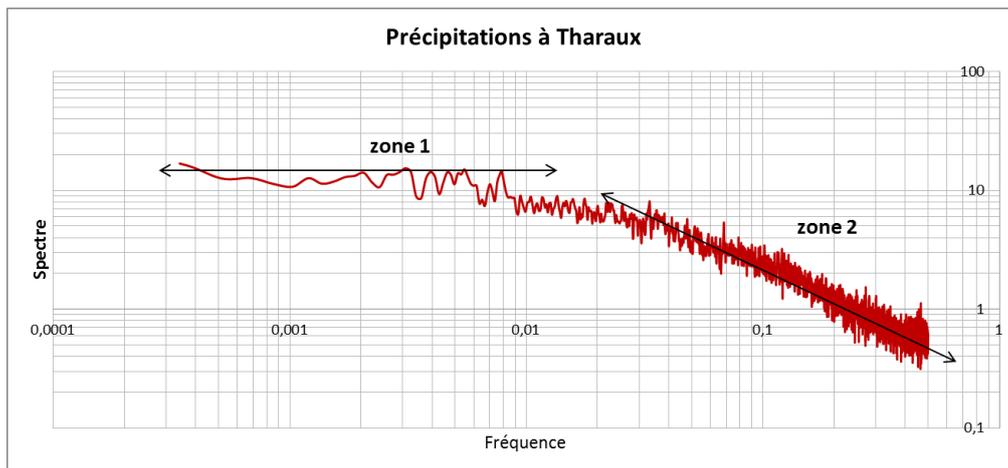


Figure 33 : Densité spectrale des précipitations mesurées à Tharoux représentée avec une double échelle logarithmique. On peut y distinguer 2 zones ; la première correspond à la zone où le spectre est globalement horizontal, il est alors assimilable à un bruit blanc. On a dans cette partie affaire aux épisodes pluvieux espacés de plus de 100 heures (4 jours environ), et qui interviennent de manière aléatoire. En revanche dans la zone 2, pour les périodes de 50h à 2heures, le bruit est plus structuré et la densité spectrale décroît avec une pente de presque -1, ce qui signifie qu'il s'agit d'un bruit quasi brownien [Hausdorff J.M. et al. 1996].

Les spectres possèdent également une partie très bruitée de pente horizontale pour les hautes fréquences ; ceci est interprété comme représentant le bruit présent dans le signal (le signal de haute fréquence est tellement atténué que seul le bruit reste visible).

V.3.3. Modélisation par réseaux de neurones

Les réseaux de neurones constituent une famille de modèles conçus par apprentissage statistique. Leur fonction est calculée au moyen d'un apprentissage. L'apprentissage consiste à estimer le vecteur θ des paramètres des fonctions paramétrées (appelées neurones) du réseau de neurones afin de minimiser un critère préalablement défini. Ce critère, encore appelé *fonction de coût*, est généralement l'erreur quadratique moyenne. Comme le modèle neuronal est non linéaire en ses paramètres, la fonction de coût n'est pas quadratique en ses paramètres et la méthode des moindres carrés n'est donc pas applicable. Des méthodes de minimisation itératives de la fonction de coût sont donc utilisées. Les méthodes de calcul itératives des paramètres sont appelées *règles d'apprentissage* ; il suffit d'indiquer ici que la règle la plus efficace est actuellement la règle de Levenberg-Marquardt, que nous avons utilisée dans nos travaux présents, qui est une règle du second ordre faisant appel à l'inversion d'une matrice approchée de la matrice Hessienne.

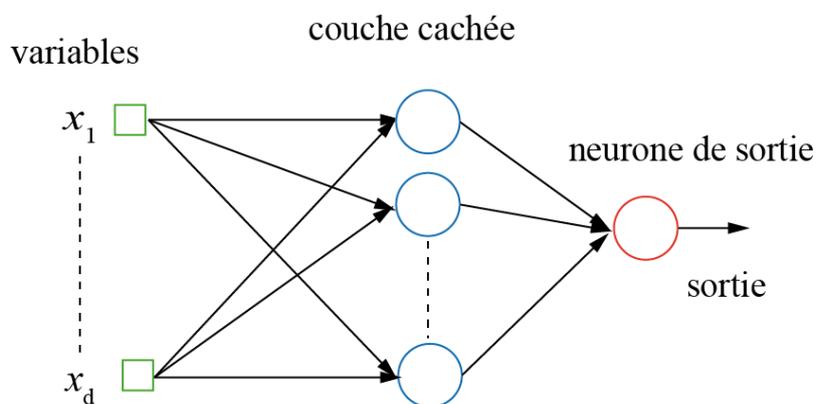


Figure 34 : Réseau de neurones (perceptron multicouche). Les ronds représentent les neurones, les carrés les variables, les flèches correspondent aux paramètres.

V.3.3.i. Modèle de neurones et architectures

La base de la non linéarité des modèles neuronaux est la fonction *neurone*, cette dernière est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée et à valeur bornée de ses variables d'entrées, le vecteur \mathbf{x} : $y=f(\mathbf{x},\boldsymbol{\theta})$, où \mathbf{x} et $\boldsymbol{\theta}$ sont respectivement les vecteurs des variables et des paramètres de la fonction neurone.

Le neurone formel effectue deux actions :

- le calcul de son *potentiel* v , ou somme pondérée de ses variables d'entrée par ses paramètres : $v=\mathbf{x}'\boldsymbol{\theta}$,
- le calcul de sa sortie y par une fonction d'évaluation qui est non linéaire ou parfois linéaire : $f(\cdot)$.

La fonction d'évaluation est généralement une fonction à seuil qui peut être continue et dérivable comme la fonction tangente hyperbolique, ou discontinue dans le cas de la fonction de Heaviside (fonction seuil).

Grâce aux modèles de neurones précédemment définis, un réseau de neurones peut être conçu en connectant les neurones les uns aux autres grâce à une *architecture*. Parmi toutes les architectures proposées, le réseau appelé *perceptron multicouche* sera particulièrement utilisé ; nous l'appellerons dans la suite plus simplement réseau. Ce réseau est composé d'une couche de neurones non linéaires de type sigmoïde, dite *couche cachée* car il n'y a pas de grandeur observée correspondant aux sorties de ces neurones, et d'une couche de sortie composée dans nos études d'un seul neurone.

Notons que le réseau tel que représenté en Figure 34 ne possède pas de rétroaction (bouclage) de sa sortie vers ses entrées il est donc appelé *réseau statique* ou *non-récurrent*.

V.3.3.ii. Identification universelle et parcimonie

Le perceptron multicouche possède la propriété d'approximation universelle. C'est-à-dire que toute fonction $g(\mathbf{x})$, à valeurs bornées dans un domaine défini, peut être approchée à la précision ε près dans ce domaine par un réseau de type multicouche possédant un nombre fini de neurones cachés. C'est sur cette propriété que nous fondons le choix d'utiliser le perceptron multicouche pour identifier les relations non linéaires des systèmes karstiques que nous étudions. Bien entendu, la capacité à trouver la solution dépendra tout autant de la base des informations disponibles que de la méthode de calcul des paramètres.

Mais le modèle, si certaines précautions ne sont pas prises, peut être *surajusté* et tellement spécialisé par rapport à l'ensemble d'apprentissage qu'il apprendrait même la réalisation particulière du bruit dans cet ensemble et serait alors incapable de généraliser à d'autres ensembles. C'est ce que l'on appelle le dilemme biais-variance. Compte tenu de ce dilemme, et afin d'optimiser la complexité du modèle, on utilise des méthodes de régularisation : arrêt précoce et validation croisée.

V.3.3.iii. Sélection de variables pour optimiser la complexité

La méthodologie de conception d'un modèle neuronal doit permettre de proposer un modèle de complexité suffisante pour que la fonction souhaitée puisse être approchée, mais également de complexité minimale afin d'éviter le sur-ajustement. Il est pour cela nécessaire de diviser la base de données en plusieurs sous-ensembles : (i) l'ensemble d'apprentissage qui sert à calculer les paramètres du modèle et à dimensionner le modèle pour obtenir la complexité optimale, (ii) l'ensemble d'arrêt qui sert à arrêter l'apprentissage avant que le réseau ne se spécialise à outrance sur le bruit contenu dans les données, et (iii) l'ensemble de test, indépendant des deux précédents qui sert à valider le modèle ainsi obtenu. Plus d'explications sur les méthodes de sélection de la complexité peuvent être trouvées dans [Dreyfus, 2008] et de manière plus précise celle adoptée dans cette études dans [Kong-A-Siou, 2011].

V.4. Elaboration de la base de données

V.4.1. Acquisition des données

Pour les besoins de l'étude, la première étape a consisté à créer une base de données. Cette base de données regroupe deux types différents de données ; des données pluviométriques et des données de hauteurs d'eau.

Ce sont les hauteurs d'eau qui ont été choisies plutôt que les débits car les valeurs de débits sont la plupart du temps calculées via la conversion des hauteurs d'eau mesurées, à l'aide de courbes de tarage. Cependant, la plupart des stations étudiées ont été implantées afin d'étudier les phénomènes de crues. Par conséquent, les courbes de tarage en période de basses eaux ne possèdent pas une bonne précision et peuvent amener une incertitude dans les données.

La base de données a été créée en utilisant les données recueillies par 7 stations pluviométriques et 9 stations limnimétriques (hauteurs d'eau) dont les coordonnées sont reportées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Récapitulatif des stations utilisées dans la base de données (1 = mesure effectué par la station, 0 = mesure non effectué par la station).

N°	Commune	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Pluviomètre	Limnimètre
1	Malons	777 795,7	6 370 302,3	1	0
2	La Croix-de-Berthel	766 387,9	6 358 161,1	1	0
3	Sénéchas	783 593,5	6 358 364,8	1	1
4	Bessèges	787 252,1	6 355 796,2	1	1
5	Banne (sur La Ganière)	788 759,6	6 359 559,7	0	1
6	Les Mages (l'Auzonnet)	79 3772	6 347 269,3	0	1
7	Tharoux	803 844,8	6 350 300,4	1	1
8	Montclus	814 204,8	6 352 819,5	1	1
9	La Roque-sur-Cèze	822 032,7	6 344 581	0	1
10	Bagnols-sur-Cèze	829 605,2	6 342 708,4	1	1

Les informations regroupées dans la base de données proviennent de trois fournisseurs : SPC-Grand Delta, DREAL et l'OHMCV.

V.4.2. Correction des données

- SPC-GD

Les données fournies par le SPC-GD sont à un pas de temps horaire. Deux sources ont été sollicitées : la banque Hydro (dont le SPC-GD est le principal fournisseur), le SPC-GD directement. On peut estimer que les données acquise sur la banque hydro sont plus fiables car ont été au préalable critiquées tandis que les données du SPC-GD sont des données brutes. Les traitements effectués sur les données SPC-GD ont principalement eu pour objet de combler des lacunes par interpolation avec les stations proches.

- *DREAL*

Afin d'économiser de la mémoire, les données fournies par la DREAL n'ont pas de pas de temps régulier ; elles sont effectuées lorsque la variation du signal mesuré est notable. Le pas de temps minimum ne peut pas être inférieur au pas de temps horaire.

Ces données ont donc été ré-échantillonnées au pas de temps horaire, puis une interpolation linéaire a été appliquée pour combler les intervalles sans mesures. Dans certains cas particuliers (observation d'un arrêt anormal de la prise de mesure), l'interpolation des hauteurs d'eau avec les données issues des stations proches a été nécessaire. De même, l'interpolation linéaire s'avérant non causale et de ce fait gênante dans certaines situations (période au début de la montée du niveau d'eau lors d'une crue), une autre méthode plus adaptée a été appliquée ([Savary, 2014] ; pour plus de détail).

- *OHMCV*

Les données fournies par l'OHMCV sont à un pas de temps horaire. Cependant la finalité de l'OHMCV est la crue ; pour cette raison les données en période d'étiage sont régulièrement absentes, on ne les a donc considérées que lorsqu'aucune autre donnée n'était disponible. Ces dernières n'ont cependant pas nécessité de traitement important excepté un étalonnage pour certaines périodes afin de coïncider avec les données des autres fournisseurs. Notons que pour les crues les données de l'OHMCV sont réputées d'excellente qualité.

V.4.3. Traitement des données (procédure de ré-échantillonnage)

Les données que nous avons tirées de toutes les stations présentées précédemment étaient au pas de temps horaire. Ce choix semble bien adapté à l'étude des crues. Cependant, les étiages étant un processus lent contrairement aux crues, il nous a semblé intéressant et approprié de passer du pas de temps horaire au pas de temps journalier. En effet, ceci nous permet de travailler avec une base de données moins volumineuse et ainsi de minimiser le temps de calcul de certaines manipulations.

- Pour les données pluviométriques, la méthode utilisée pour passer du pas de temps horaire au pas de temps journalier correspond simplement au cumul des pluies précipitées au cours de la journée.
- Pour les données de hauteurs d'eau, plusieurs solutions étaient envisageables : on peut effectuer la moyenne des hauteurs d'eau mesurées durant une journée, ou prendre la valeur de hauteur d'eau à heure fixe (dans notre cas à chaque fin de journée) ou bien le maximum de la hauteur d'eau mesurée au cours de la journée (Figure 35).

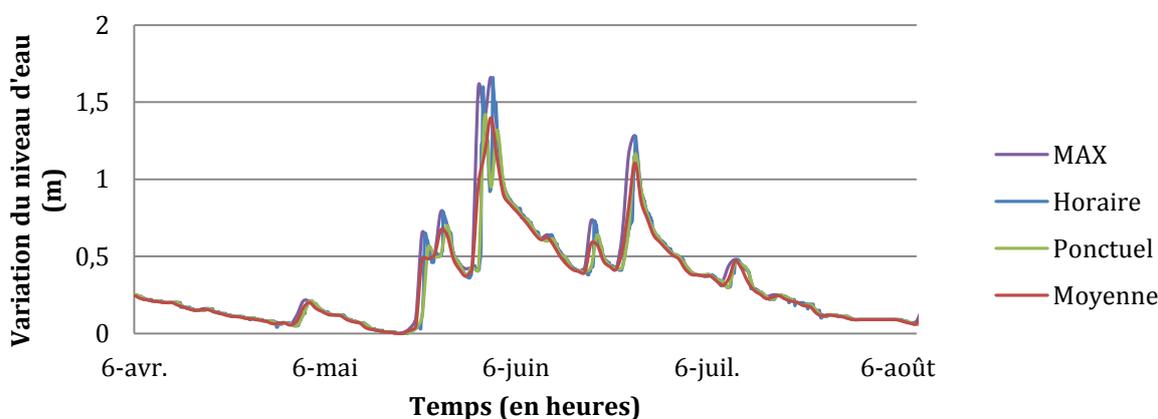


Figure 35 : Illustration des effets des différents traitements utilisés pour le passage du pas de temps horaire au pas de temps journalier. On note que les différences apparaissent essentiellement pour les phénomènes rapides de hautes eaux.

Pour que la base de données puisse à la fois être utilisée pour les crues et les étiages, c'est donc la méthode utilisant la valeur maximale mesurée dans la journée qui sera utilisée.

V.5. Travaux réalisés

V.5.1. Analyses corrélatoires et spectrales

V.5.1.i. Bassin versant complet : Corrélations simples

Les analyses corrélatoires sont appliquées pour chaque série chronologique que nous avons constituée dans la base de données pour les différentes années disponibles (Tableau 11).

On observe sur le Tableau 11 que certaines stations ne peuvent pas être corrélées entre elles car ces dernières ne possèdent pas d'années de mesures en commun. Par exemple, les mesures de pluviométrie de la station de Bessèges, ne peuvent pas être corrélées avec les mesures de hauteurs d'eau effectuées à la Roque-sur-Cèze. Dans les données présentées dans cette partie, cette impossibilité de traitement sera représentée par une croix.

Si l'on effectue le calcul des corrélations sur une trop grande chronique, on met en évidence la périodicité du cycle annuel. Il est donc recommandé [Kong-A-Siou, 2011] de réaliser les calculs de corrélation sur une durée qui dépend de l'information qui est recherchée.

Comme notre travail porte sur l'évolution de la hauteur d'eau au cours de l'année nous avons donc réalisé les calculs de corrélation sur une année complète, pour chaque année de la base de données. Classiquement, l'effet mémoire est obtenu en utilisant la moyenne des effets mémoires obtenus pour chaque année. Cependant, pour les signaux hydrologiques qui ne correspondent pas à une répartition gaussienne ([Johannet, 2011], p17), il est connu que la moyenne ne constitue pas un bon estimateur de l'espérance mathématique. Nous avons donc proposé d'utiliser un autre estimateur de l'espérance mathématique plus robuste que la moyenne : la médiane.

Tableau 11 : Récapitulatif des données disponibles par stations et par années (1 : données disponibles ; 0 : données indisponibles ; 0,5 données incomplètes).

Années		1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Pluviométries	La Croix de Berthel	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	
	Malons	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	0,5	1	1	
	Sénéchas	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	
	Bessèges	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1	0,5	1	1
	Tharoux	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
	Montclus	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
	Bagnols sur Cèze	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
Hauteurs d'eau	Sénéchas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Banne	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Les Mages	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bessèges	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1	0,5	1	1
	Tharoux	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
	Montclus	0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
	La Roque sur Cèze	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bagnols sur Cèze	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1
	Chusclan	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les autocorrélations des hauteurs d'eau de toutes les stations disponibles sur le bassin sont effectuées et les résultats obtenus par l'interprétation des courbes sont regroupés dans le Tableau 12. On peut noter sur ce tableau que dans le cas de l'autocorrélation des pluviométries, le fait d'utiliser la médiane ou la moyenne n'entraîne pas de différence notable de l'effet mémoire.

En revanche, pour l'autocorrélation de la hauteur d'eau, la valeur de l'effet mémoire estimée par la médiane ou la moyenne peut atteindre une différence maximale de 8 jours pour la station de Les Mages. Nous choisirons d'utiliser les médianes pour l'analyse des effets mémoire présentée ci-dessous. On peut noter que cette observation est étonnante : habituellement les pluies sont irrégulières, particulièrement sur le pourtour méditerranéen, mais leur variabilité est « lissée » par le bassin versant qui a un rôle intégrateur. Pour l'hydrosystème de la Cèze, il semble qu'au contraire, le fonctionnement du bassin introduise des irrégularités indépendamment des précipitations.

Tableau 12 : Tableaux récapitulatif des informations obtenues par autocorrélation

Effet mémoire (en jours)			Superficie du bassin (en km ²)	
	Pluviométries	Hauteurs d'eau		
		Moyenne/Médiane	Moyenne/Médiane	
Affluents de la Cèze	La croix-de-Berthel	1 / 1	X	x
	Malons	1 / 1	X	x
	Sénéchas	1 / 1	44 / 44	113
	Bessèges	1 / 1	26 / 28	184
	Banne (La Gagnière)	X	7 / 6	55
	LesMages (L'Auzonnet)	X	28 / 20	49
	Tharoux	1 / 1	18 / 16	665
	Montclus	1 / 1	22 / 19	834
	La Roque sur Cèze	X	33 / 32	1 060
	Bagnols sur Cèze	1 / 1	19 / 18	1 120
	Chusclan	X	10 / 5	1 350

- Interprétation

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

Pour les hauteurs d'eau, habituellement les effets mémoire augmentent depuis l'amont vers l'aval. En effet, les débits grossissent et se moyennent, rendant le cours d'eau plus stable et donc plus corrélé à lui-même à l'aval qu'à l'amont.

Or nous n'obtenons pas du tout ce type de comportement sur le bassin de la Cèze : excepté pour la station de Sénéchas fortement affectée par le barrage du même nom, on note que les effets mémoire sont globalement plus commandés par les caractéristiques locales du bassin, d'ailleurs pas toujours explicables.

Tout d'abord, les hauteurs à la station de **Bessèges** possèdent un effet mémoire de 28 jours. Ceci s'explique par la présence du barrage de Sénéchas en amont qui va influencer les niveaux d'eau à Bessèges en les rendant réguliers.

La station de **Banne** elle, présente un effet mémoire beaucoup moins important (6 jours). Cette faible valeur est liée au fait que la station constitue l'exutoire d'un bassin de plus faible superficie (55 km²)

mais surtout avec une forte densité de drainage. Ainsi, l'eau précipitée atteint rapidement un cours d'eau et n'est pas stockée en profondeur pendant une longue période.

La station de **Les Mages** présente quant à elle un fort effet mémoire (20 jours) en comparaison de la faible superficie du bassin versant la concernant (49 km²) mais ceci pourrait s'expliquer par une circulation/stockage importante en souterrain.

Pour **Tharoux**, on observe un effet mémoire plus faible que la station de Bessèges (16 jours). Nous pensons que cette diminution est due (i) à l'agrandissement du bassin versant avec des apports naturels qui contrebalancent ceux du barrage venant de Bessèges et (ii) à la présence des pertes en amont de Tharoux. Une partie de l'eau s'infiltrerait directement dans le cours d'eau et disparaît.

On observe ensuite une augmentation de l'effet mémoire lorsque l'on se dirige vers la station de **Montclus** (19 jours pour un bassin versant de 834 km²), puis de **la-Roque-sur-Cèze** (32 jours pour un bassin versant de 1 060 km²). Cette forte augmentation transcrit autant l'augmentation du bassin d'alimentation que le stockage des eaux dû au parcours important des eaux souterraines dans le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap (exurgences nombreuses situées entre Montclus et la-Roque-sur-Cèze).

Par la suite la rivière s'écoule sur une zone alluvionnaire où la présence de l'agriculture est plus importante. On assiste alors au niveau de la station de **Bagnols-sur-Cèze** à une diminution de l'effet mémoire (18 jours pour un bassin versant de 1 120 km²) pouvant être causée par l'influence de l'activité humaine puisant dans la nappe pour les besoins importants en eau de l'agriculture. Cet effet est amplifié pour la station de **Chusclan** dont l'effet mémoire diminue également (5 jours pour un bassin versant de 1 350 km²).

V.5.1.ii. Bassin versant complet : Corrélations croisées

Après avoir effectué les corrélations croisées comme décrit précédemment, les informations obtenues (corrélation maximale, temps de réponse et durée de corrélation) sont répertoriées dans les Tableau 12, Tableau 13 et Tableau 14.

Tableau 13 : Maximums de corrélation obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau. Les maximums indiqués correspondent à la valeur de la corrélation croisée au pic le plus grand. Le maximum est habituellement associé au temps de réponse de l'hydrosystème. Ces valeurs sont inscrites en rouge.

Corrélations maximales entre pluviométrie et hauteur d'eau (d'amont en aval)							
	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharoux P	Montclus P	Bagnols P
Sénéchas H	0,04	0,04	0,06				
Bessèges H	0,54	0,55	0,51	0,49			
Banne H	0,55	0,62	0,66	X			
Les Mages H	0,53	0,53	0,63	X			
Tharoux H	0,59	0,62	0,54	0,58	0,51		
Montclus H	0,54	0,53	0,56	0,57	0,52	0,48	
Roque H	0,50	0,53	0,48	X	0,49	0,43	
Bagnols H	0,54	0,62	0,59	0,59	0,54	0,48	0,29
Chusclan H	0,55	0,67	0,67	X	0,59	0,47	0,41

Dans l'ensemble, la valeur maximale des corrélations croisées varie entre 0,5 et 0,6 ce qui est assez faible ; le bassin a donc une relation hydrologique assez complexe, comportant un grand stockage. Qui plus est, les maximums de corrélation sont parfois obtenus pour les précipitations corrélées avec la hauteur d'eau mesurée à Chusclan, ce qui est surprenant compte-tenu de la variabilité des précipitations

(on note ici une interrogation ; est-ce dû au caractère très aléatoire des précipitations ?) Si l'on met en relation ces corrélations avec l'effet mémoire obtenu par autocorrélation pour chaque station de hauteur d'eau, on note que les variations sont opposées. Lorsque l'effet mémoire augmente, la corrélation diminue et inversement. L'interprétation est la suivante : plus le stockage est important, plus les hauteurs d'eau sont influencées de manière complexe par les pluies. Par conséquent un pic de pluie ne correspond pas forcément à un pic de hauteur significatif et induit donc une corrélation plus faible que lorsque cette relation est simple et directe.

Tableau 14 : Résumé des temps de réponse obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.

Temps de réponses (en jours)							
Hauteur/pluie	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharaux P	Montclus P	Bagnols P
Bessèges H	1	0	0	0			
Banne H	0	0	0	X			
Les Mages H	0	0	0	X			
Tharaux H	1	1	1	1	1		
Montclus H	1	1	1	1	1	1	
Roque H	1	1	1	X	1	1	
Bagnols H	1	1	1	1	1	1	1
Chusclan H	1	1	1	X	1	1	1

On voit que globalement, les temps de réponse se divisent en deux parties. Les stations se trouvant dans les parties amont et médiane du bassin versant (entre La Croix-de-Berthel et Tharaux) présentent un décalage temporel de 0 jour. Pour la partie aval (de Tharaux jusqu'à la confluence avec le Rhône), le décalage temporel atteint 1 jour. Il existe une exception au niveau de la corrélation entre les pluviométries relevées à La Croix-de-Berthel et les hauteurs d'eau mesurées à Bessèges (où le temps de réponse atteint 1 jour). Cette différence s'explique par l'éloignement important entre ces deux stations. Pour finir, les temps de corrélation pluie-débit (équivalent de l'effet mémoire des corrélations simples) sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Temps de corrélations obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau ; ne sont corrélés que les pluviomètres avec les stations à l'aval de ces pluviomètres.

Temps de corrélation (en jours)							
	Berthel P	Malons P	Sénéchas P	Bessèges P	Tharaux P	Montclus P	Bagnols P
Bessèges H	5	4	5	4			
Banne H	3	4	4	X			
Les Mages H	3	3	4	X			
Tharaux H	4	4	4	4	3		
Montclus H	5	4	4	4	4	3	
Roque H	6	5	5	X	5	4	
Bagnols H	5	4	4	4	4	3	3
Chusclan H	4	4	4	X	3	3	2

On observe ici un fonctionnement semblable au fonctionnement décrit dans le paragraphe traitant des corrélations simples. On peut penser que le temps de corrélation diminue lorsque l'on passe de Bessèges à Tharoux à cause de l'influence des pertes. Ensuite on observe une ré-augmentation de ce dernier en arrivant à la station de La Roque-sur-Cèze dû à l'apport d'eau en provenance du karst de Méjannes-le-Clap via les résurgences et exurgences, cet apport vient d'un système à fort stockage qui garde donc la mémoire des événements pluvieux plus longtemps. Puis, on observe une diminution pour les deux stations situées sur la partie finale de la Cèze. On peut penser que cette diminution est causée par deux effets : (i) les prélèvements pour l'activité agricole de la zone, (i) le fait que le débit dépend plus des apports de débit amont que de la pluie locale.

V.5.1.iii. Bassin versant complet : Analyses spectrales

Les analyses spectrales ont été réalisées à partir des pas de temps horaires et journaliers pour toutes les années et toutes les stations. Puis, le spectre médian a été calculé pour chaque station.

Si l'on considère les stations extrêmes du cours d'eau : en amont Bessèges et en aval Chusclan, il apparaît que leurs spectres médians ont une allure semblable, mais différent cependant un peu. Ces spectres ont tous les deux une allure classique avec une première pente négative pour les basses fréquences (partie gauche du graphe). Cette pente négative correspond à un phénomène d'intégration qui peut s'interpréter comme la simple addition des pluies pour former le cours d'eau. A l'inverse une pente positive signifie que l'on a un phénomène de dérivation, ou de soustraction d'une partie du débit. On pourrait l'interpréter physiquement comme un phénomène de perte. Si l'on revient aux spectres de Chusclan et Bessèges, vers les périodes 100 heures et 40 heures, on note une rupture avec une seconde pente négative de pente plus importante. Ceci signifie que les fréquences rapides (pluies rapides), sont plus moyennées que les fréquences faibles. Ce fonctionnement est logique pour un bassin versant : les fréquences faibles sont peu modifiées, tandis que les fréquences fortes sont très « moyennées ».

A la lumière de ces éléments, il apparaît sur les Figure 36 et Figure 37 que le spectre de Chusclan fait apparaître une pente moins intégratrice que celle de Bessèges pour la partie basse fréquence que celle de Bessèges, ce qui est surprenant.

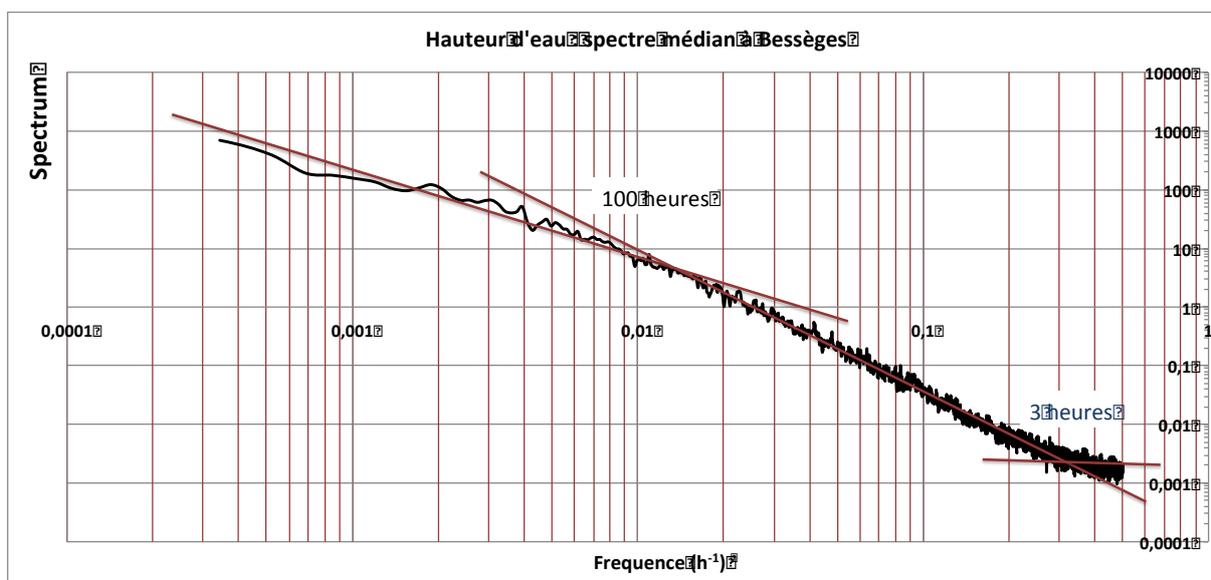


Figure 36 : Spectre médian des hauteurs d'eau (période horaire) à Bessèges.

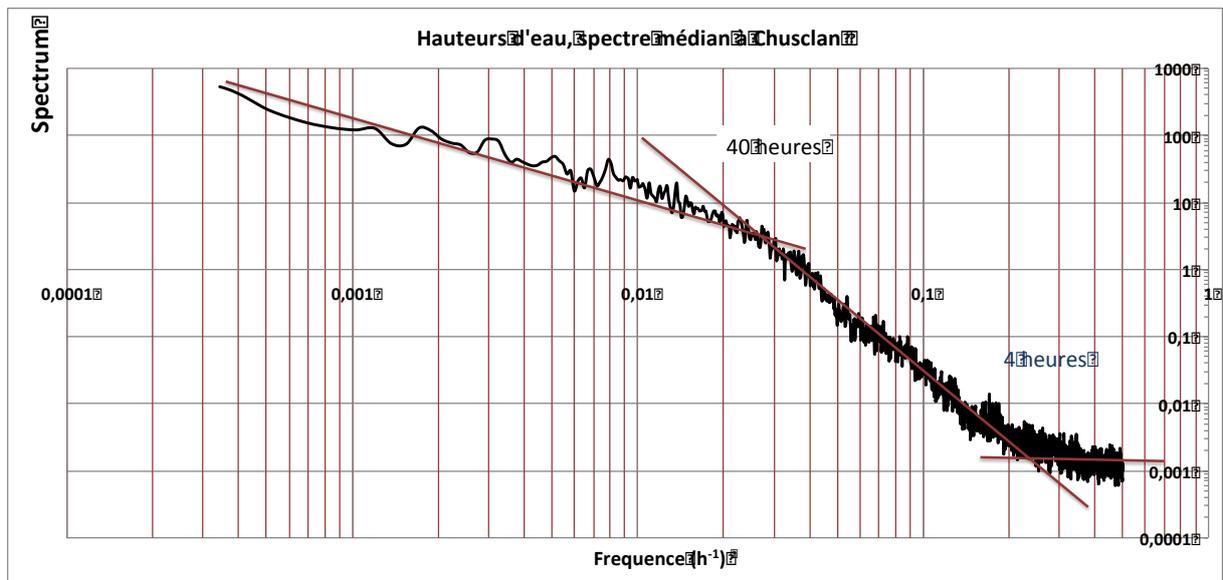


Figure 37 : Spectre médian des hauteurs d'eau (période horaire) à Chusclan.

L'analyse comparée de ces deux spectres fait apparaître un élément surprenant : la pente de décroissance en basse fréquence à Chusclan est plus faible que celle de Bessèges, alors que normalement l'aval du bassin est plus intégrateur que l'amont.

Pour vérifier ce fait, nous avons alors calculé le ratio (Spectre Chusclan)/(Spectre Bessèges), qui doit nous indiquer les transformations effectuées depuis l'amont vers l'aval, décomposées en fréquences. Attention, la limite de cet exercice est que l'on travaille sur des hauteurs d'eau, or les stations ont des hauteurs qui dépendent de la section du cours d'eau, et qui ne sont donc pas comparables d'une station à une autre. Cependant, les pentes doivent être moins affectées par ce phénomène.

Le tracé obtenu est reproduit en Figure 38. Il fait nettement apparaître une pente positive pour les basses fréquences, que nous interprétons comme des pertes prélevées au cours d'eau, entre l'amont et l'aval.

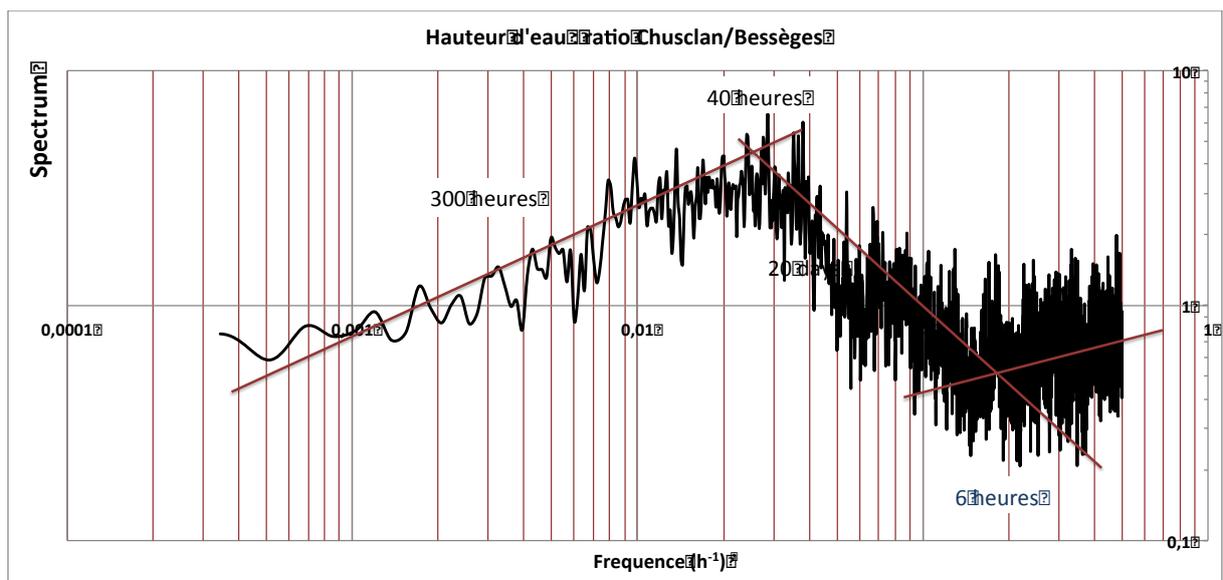


Figure 38 : Ratio des spectres de hauteur d'eau entre les stations de Chusclan et de Bessèges. On note dans la partie basses fréquences qu'il y a une pente positive, manifestant des prélèvements d'eau (pertes, pompages, évapotranspiration, évaporation). Puis à partir d'environ $(40h)^{-1}$, on observe une pente négative qui indique que le bassin « moyenne » plus les pluies à l'aval qu'à l'amont, ce qui est compréhensible ; enfin pour les fréquences les plus

rapides, on note à nouveau une légère remontée, difficile à expliquer qui peut être due aux courbes de tarage difficiles à caler pour les hauts débits des fortes crues rapides.

L'analyse précédente a été réalisée pour toutes les stations du bassin, mais ne propose pas d'interprétation très claire, en particulier pour déduire le devenir des pertes se produisant entre Tharoux et La Roque-sur-Cèze. Nous proposons de poursuivre cette étude en reprenant tout le travail avec des valeurs de débits, après validation des courbes de tarage, dans un prochain travail.

V.5.2. Simulations des hauteurs d'eau à Tharoux

Suite à l'étude effectuée sur les données disponibles, il a été choisi de créer un réseau de neurones formels visant à modéliser les hauteurs d'eau au niveau de Tharoux afin d'une part de compléter les chroniques de données comportant des lacunes sur cette station, et d'autre part de contribuer à l'étude des circulations d'eau entre le karst de Méjannes et la rivière.

L'architecture du réseau utilisé correspond à un réseau de neurones bouclé non dirigé. Les stations utilisées en entrées sont les stations pluviométriques de Malons, La Croix-de-Berthel, Sénéchas et Tharoux. Il aurait été intéressant d'utiliser la station pluviométrique de Bessèges malheureusement, son utilisation aurait entraîné une diminution importante du nombre d'années utilisable lors de l'apprentissage (le nombre d'années disponibles serait passé de 10 à 3 années ; voir le Tableau 11). Une courbe retraçant l'évolution de l'ETP a également été utilisée car sans cette dernière, des modélisations préalables ont montré que le réseau n'arrivait pas à se caler en période d'étiage [Johannet, 2012].

Le réseau n'est pas un perceptron multicouche mais un modèle inspiré de ce dernier. Le principe a été proposé par Johannet [2008], il est de réaliser la relation pluie débit par une branche directe comportant un perceptron multicouche, puis d'estimer l'évapotranspiration par une branche calculée en parallèle, également selon le principe du perceptron multicouche, et qui vient moduler la branche pluie-débit précédemment cité. Ses caractéristiques sont les suivantes (Figure 39) :

- La fenêtre temporelle d'historique des pluies utilisée pour chaque station a été fixée en fonction des résultats obtenus par corrélations croisées.
- La relation pluie débit comporte une première couche de 3 neurones (Aval_1) qui reçoivent les entrées de pluies. Les sorties de cette couche sont reliées à une couche cachée (Aval_2), comportant 3 neurones, elle-même connectée au neurone de sortie
- L'estimation de l'évapotranspiration se fait par une branche parallèle comportant une couche de cinq neurones cachés, connectés à un neurone sigmoïde dont la sortie vient influencer la relation pluie-débit citée précédemment.
- La couche de sortie est constituée d'un seul neurone avec une fonction identité.
- Sur chaque couche de neurones cachés, une entrée constante (fixée à 0,1) est appliquée pour assurer une hauteur d'eau non nulle même si les entrées sont nulles.

Une fois cette architecture définie, un plan d'expérience est lancé. Le plan d'expérience va permettre de faire une série de modélisations avec des paramètres changeant chacun leur tour. L'année définie comme ensemble de test est l'année 1995 (année présentant des étiages important) et l'ensemble d'arrêt 1996 (choisi après une étape de validation croisée).

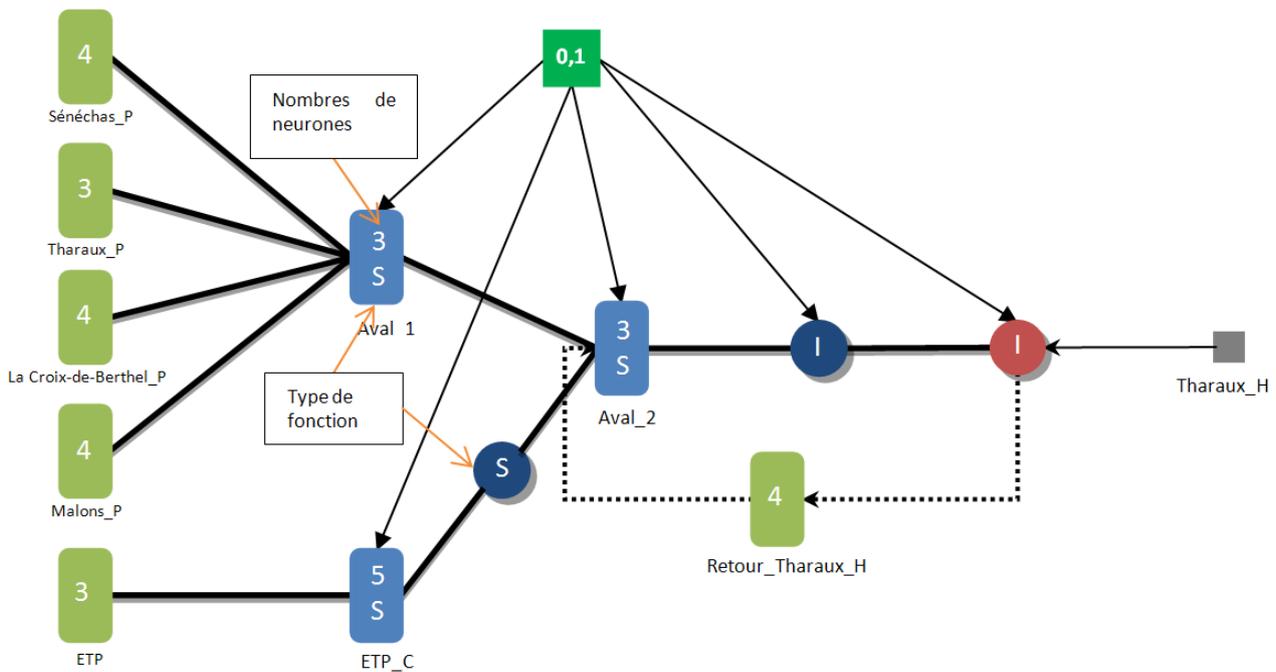


Figure 39 : Architecture utilisée pour la modélisation des hauteurs d'eau à Tharaux.

Une fois le plan d'expérience lancé et les simulations terminées, le réseau de neurones nous donne les valeurs de scores de validation croisée pour lesquelles il est visible que l'architecture offrant le meilleur score n'est pas totalement identique à l'architecture de départ.

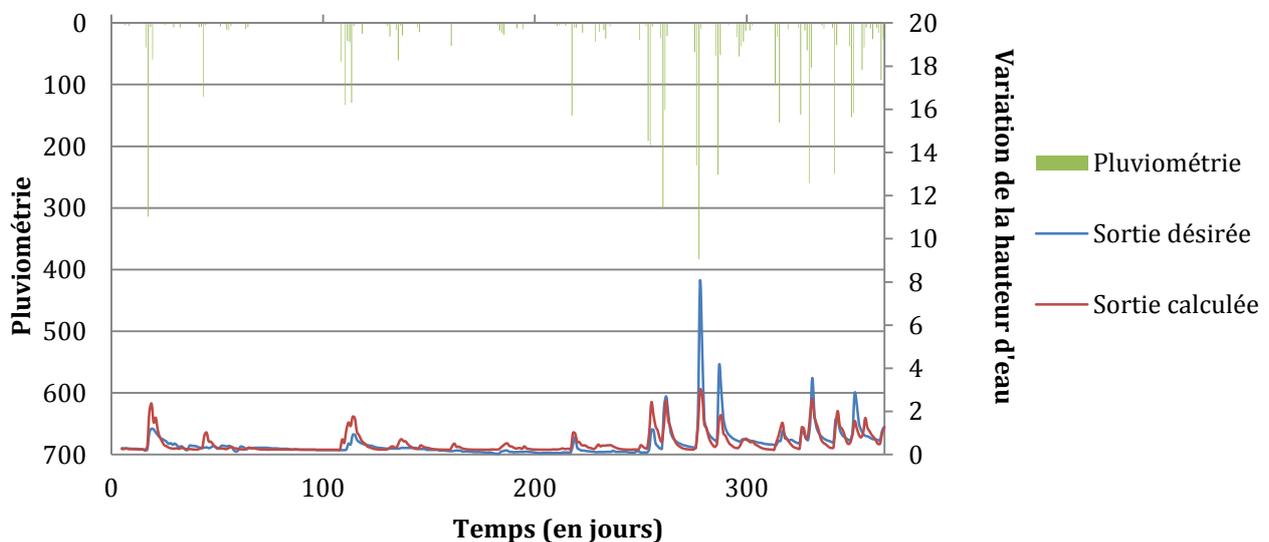


Figure 40 : Simulations des hauteurs d'eau à Tharaux pour l'année 1996.

Une fois l'architecture du modèle choisie, le résultat obtenu en test sur l'année 1996 est présenté sur la Figure 40. Ce résultat n'est pas satisfaisant car d'une part les pics de crue sont très sous-estimés et d'autre part, les étiages ne sont pas très bien représentés non plus. Le score de Nash de cette simulation n'est pas bon : 0,64.

Il apparaît que le modèle réalise un modèle moyen, bon ni pour les étiages ni pour les hautes eaux. Malgré la prise en compte de l'évolution de l'ETP, le réseau n'a pas été capable d'engendrer des évolutions du niveau d'eau très différentes pour ces deux périodes. Il est donc souhaitable de tenter

d'améliorer les simulations avant d'utiliser les réseaux de neurones pour combler les lacunes présentes dans les données.

Pour ce faire, il serait possible de concevoir deux modèles différents : un pour les hautes eaux ; l'autre pour les basses eaux. Une autre approche utilisant l'analyse multirésolution qui décompose le signal de hauteur en différentes échelles temporelles pourrait être utilisée.

V.6. Conclusions et travaux futurs

L'essentiel du travail de cette première étape de modélisation a été de réaliser l'acquisition des données, de les analyser et de les traiter. Compte des incertitudes supposées sur les courbes de tarage il a été décidé de travailler sur les hauteurs d'eau. Ce choix nous a permis de réaliser l'ensemble des corrélations croisées entre les stations limnimétriques et pluviographiques aux pas de temps horaire et journalier, ainsi que les tracés de spectres. Cependant ce choix nous a empêché de bien analyser les représentations spectrales de « gains » entre deux stations, représentation nouvelle mais qui nous paraît pouvoir apporter beaucoup d'informations sur les pertes au sein de l'hydrosystème.

Enfin, nous avons pu mener à bien une première simulation de la hauteur d'eau à la station de Tharoux grâce à un modèle à réseau de neurones. Malheureusement, le modèle par réseau de neurones n'a pas permis d'effectuer des simulations de suffisamment bonne qualité pour pouvoir nous permettre de combler les lacunes de la base de données. Un travail plus approfondi, devrait permettre 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.

Conclusions et perspectives

Les conclusions du travail réalisé en 2014 – 2015 porte essentiellement sur l’articulation méthodologique des différents volets (traçages, suivi hydrologique, géologie, biologie, IRT, modélisation). Elles reprennent en grande partie celles du précédent rapport (années 2013 – 2014) et sont contenues dans le bilan général ci-dessous.

Bilan général

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

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

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

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

Le Tableau 16 ci-dessous, présente succinctement les principaux résultats des différentes approches, en termes de caractérisation des relations karst - rivière. De plus, ce tableau illustre les relations (comparaison et/ou complémentarité) qui peuvent exister entre ces différentes approches.

Le paragraphe suivant, propose une explication détaillée du Tableau 16 et traite, sous forme d’exemples, des liens qui peuvent exister entre les différentes approches pour tendre vers une meilleure compréhension des hydrosystèmes karstiques complexes.

Tableau 16 : Ebauche du principe de la méthodologie *EVEREST – K2* (Evaluation des Volumes Echangés entre Rivières et Eaux SouTerraines en milieu *Kartsique* et *pseudoKarsitique*).

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

Vers une caractérisation des hydrosystèmes karstiques complexes :

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

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

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

La géochimie, par l'analyse en ions majeurs des eaux de sources, rivière et affluents, a permis, d'une part, d'identifier l'origine géologique des eaux (aires d'alimentation des sources et aires de drainages de la rivière), d'autre part, de confirmer la localisation et la proportion des apports karstiques par effet de mélange. La géochimie a aussi et surtout permis d'apporter d'avantages de précision sur les phénomènes de recyclage des eaux de pertes de la rivière vers les sources (Foulatier, Fond Canet, Monteil, les Baumes et Moulin) en estimant la proportion d'alimentation de certaines sources par la rivière. Le traçage des pertes de la rivière, prévu cet été 2015, devrait permettre de préciser de manière plus quantitative (temps de transfert et bilan de masse) les résultats obtenus par la géochimie sur le recyclage des eaux de la Cèze par les sources.

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

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

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

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

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

Perspectives pour 2015-2016

Le paragraphe proposé précédemment n'est qu'une ébauche de réflexion sur les relations entre les résultats existants et les résultats en devenir.

- **Synthèse, interprétation et valorisation des résultats :**

Il sera nécessaire d'engager un travail avec les différents partenaires, sur une manière plus structurée d'envisager les liens entre les approches constituant la méthodologie. En effet, l'intérêt de la démarche ne se fonde pas uniquement sur les résultats issus des différentes approches utilisées séparément mais réside aussi dans la prise en compte de la complémentarité et de l'analyse croisée de ces approches (thermique, hydrogéochimique, biologique, métrologique, géologique, hydrologique, traçages artificiels, radioéléments, isotopes et modélisation mathématique). Il conviendra par ailleurs, d'analyser les points de convergence et de divergence des résultats issus des différentes approches. Du point de vue méthodologique, il faudra formaliser l'ordonnancement des approches pour optimiser l'effort de terrain vis-à-vis de la compréhension de l'hydrosystème. Cette dernière étape permettra de mieux cerner le fonctionnement du système karstique et les relations karst-rivière. Cette meilleure connaissance de l'hydrosystème permettra de tendre vers une gestion durable et équilibrée de la ressource en eau. Enfin, une réflexion sera engagée sur la manière de généraliser la méthodologie de caractérisation des échanges karst-rivière à d'autres bassins versants en domaine karstique.

Il sera également question de poursuivre des tâches engagées :

- **Prospections par traçages artificiels :**

Si les conditions hydrométéorologiques le permettent, un traçage des pertes de la rivière Cèze en amont des gorges sera effectué. Ce traçage n'a jamais été réalisé en condition de rupture de continuité du flux d'eau. Il aura pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de quantifier dans quelles proportions et au bout de combien de temps ces sources sont impactées (bilan de masse). En situation de hautes eaux (automne 2015 et/ou hiver 2015-2016), plusieurs points d'injection sur le plateau karstique de Méjannes-le-Clap sont à l'étude.

- En bordure méridionale, à l'aven des Cartouses, une cavité joue le rôle de perte du ruisseau qui le borde. Il s'agira de vérifier si une diffluence endokarstique se produit entre les circulations souterraines de la rivière de Camélié (moins 125 mètres) et de l'aven de l'Agas (moins 160 mètres). Ces circulations seront à mettre en relation avec leurs cotes NGF respectives. Les eaux de ces deux avens feront l'objet de surveillance (fluocapteurs) ainsi que les principales résurgences en rive droite côté Cèze et au niveau de la source temporaire des Soudans (ou Issoudans) située sur la commune de Verfeuil (le suivi par fluorimètre sur ces sources, dans la mesure du possible, sera privilégié).
- En bordure occidentale, au niveau des pertes du ruisseau du Pâtis. Si aucun exutoire n'est apparent sur cette zone, il existe des puits artificiels au niveau du fossé d'Alès, qui permettront de vérifier s'il existe une relation entre les roches carbonatées de la bordure du plateau urgonien et les terrains priaboniens du fossé d'Alès.
- En bordure septentrionale, l'aven Rouge qui délimite deux bassins d'alimentation de surface, l'un orienté vers le N-O, l'autre vers le N-E.

- **Investigation biologique :**

Pour l'année 2015, deux tâches principales sont encore à réaliser. Tout d'abord, le tri et d'identification de la faune du compartiment benthique de la rivière permettra de savoir si elle évolue d'amont en aval des gorges. Ensuite, afin de mieux connaître la composition spécifique de la faune karstique, des échantillons de l'endokarst seront prélevés, triés et identifiés.

- **Suivi hydrologique :**

- Mesures de débits ponctuels : La constitution des 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 de jaugeages par les crues de la Cèze et de la difficulté à jauger certaines sources. D'avantage de mesures de débits de sources sont réalisées afin de compléter et d'améliorer la robustesse des relations hauteurs/débits. Une réflexion sur la manière d'apprécier la qualité des mesures est actuellement menée afin de mieux qualifier la confiance que l'on peut accorder aux données. Concernant les jaugeages différentiels (entre 6 et 8 tronçons jaugés) réalisés en rivière, ils sont beaucoup moins soumis aux incertitudes et donnent les résultats les 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 vice versa. Ces bilans par tronçons sont comparés aux mesures réalisées au niveau des sources et dévoilent des différences notables qu'il conviendra de critiquer d'avantage.
- Suivi hydrologique : Après avoir obtenu une base de données et des relations hauteurs/débits fiables, il sera question d'appliquer les méthodes d'analyses et de traitement du signal évoquées précédemment aux données acquises au cours du projet. Toutes les méthodes abordées ne seront pas nécessairement pertinentes ou même possibles à appliquer à l'ensemble des chroniques. L'objectif étant de mieux cerner le comportement chimique, thermique et hydrodynamique des sources, notamment en mettant en évidence des ruptures de comportement, des relations avec des données de précipitations, hauteur de rivière ou encore d'état de saturation du karst.

- **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 températures par rapports aux débits mesurés (sources et rivière).

- **Comparaison des profils altimétriques Cèze/Ardèche :**

Le profil altimétrique de la Cèze avait été réalisé en 2013, il est comparé à celui de l'Ardèche qui a été réalisé le 20 mai 2015. Les deux profils d'altitudes côté Cèze et Ardèche présentent des pentes générales d'amont en aval des gorges assez similaires d'environ 1 ‰. Au niveau du massif urgonnien incluant la Cèze et l'Ardèche, le profil de la Cèze est en moyenne plus élevé que celui de l'Ardèche. La pente moyenne entre les lignes d'eau des deux bassins versants (Cèze et Ardèche) est comprise entre de 1 à 2 ‰. Cette comparaison de profil altimétrique permet d'alimenter la réflexion sur l'évolution géomorphologie des deux rivières mais également sur les potentielles relations hydrauliques entre Cèze et Ardèche.

- **Modélisation :**

Pour l'année 2015-2016, un effort particulier sera alloué aux modélisations pluies - débits. Il sera notamment question de finaliser l'étude des débits de la Cèze à ses différentes stations :

- travailler sur les chroniques de débits acquises au cours de ce projet ;
- réfléchir à la manière de concaténer les données de débits du projet et les données publiques ;
- d'appliquer la méthode neuronale au niveau de la station aval de la Roque-sur-Cèze et se servir des multiples variables explicatives en entrées que sont, les précipitations sur le plateau karstique, de la pris en compte de l'évapotranspiration via un bilan hydrique, des hauteurs d'eau de la Cèze à l'entrée des gorges (représentatives du bassin versant amont) et d'un indice de l'état de saturation du karst (par exemple les hauteurs d'eau d'une source).

- **Caractérisation isotopique :**

Un test a été réalisé en juillet 2014 comprenant une quinzaine d'échantillons. Ces échantillons comprennent des 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).

Les premiers résultats montrent :

- Il existe des contrastes dans le fractionnement isotopique du soufre entre les eaux des sources et de la rivière. Il va de soi qu'en l'état, l'échantillonnage n'est pas suffisamment exhaustif pour tirer des conclusions définitives. Il est notamment impératif d'isoler/identifier les caractéristiques chimiques et isotopiques des différents pôles participant aux mélanges des eaux et d'assurer un suivi temporel au cours d'un cycle hydrologique.
- Les échantillons prélevés sur les roches (marnes et argiles au niveau du plateau karstique), quant à eux, contiennent que très faibles quantités de soufre et il est donc peu probable que ces roches participent significativement à l'apport en sulfate des eaux. Dans ces conditions, les sulfates proviennent du fossé d'Alès et/ou de l'amont du bassin versant de la Cèze (notamment les formations Triasiques). Un échantillonnage plus exhaustif des roches à l'origine des sulfates pourra être réalisé.

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 déjà été réalisée en juin 2015. Les échantillons sont en cours d'analyse.

Un autre traceur naturel des eaux a été envisagé, il s'agit des isotopes du Strontium. 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) étant particulièrement onéreuses, un essai sur quelques points (moins de 10) sera réalisé en période de basses eaux de l'été 2015.

- **Caractérisation par des échanges karst/rivière par radioéléments**

Cette action est directement liée à ce projet mais fait l'objet d'une fiche ZABR à part entière (*action pilotée par l'Univ. D'Avignon (A. Mayer) et le CEREGE d'Aix (O. Radakovitch)*).

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 prévus. Les premiers tests ont également pu déterminer que la navigation était envisageable, rendant la mesure en continu au fil de l'eau possible.

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. Il s'accompagne du 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}S , ^{18}O , ^2H , ^{13}C), un échantillonnage exhaustif des sources, de la rivière et des affluents a été réalisé.

Toutes les données collectées au cours de cette campagne sont en cours de traitement, une réunion de travail sur les résultats de la campagne Radon est prévue en septembre 2015. Il sera également question de confronter ces résultats à ceux des jaugeages et de l'échantillonnage hydrochimique et isotopique réalisé en parallèle.

Bibliographie

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. *Geometrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation. Tectonophysics* 25, 139–171. doi:10.1016/0040-1951(75)90014-1.

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

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

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

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

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

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

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

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.

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., Clauzon G., Crumeyrolle P., Dexcoté Y., Fiet N., Iaccarino S., Jiménez-Moreno G., Laporte-Galaa C., Michaux J., von Salis K., Suc J.-P., Reynaud J.-Y., Wernli R., 2005 - Un réseau fluvial d'âge Burdigalien terminal dans le Sud-Est de la France : remplissage, extension, âge, implications. Comptes Rendus Geoscience 337, 1045–1054. doi:10.1016/j.crte.2005.05.009

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

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

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

BRGM, 1978 - Carte géologique de la France 1/50^{ième} - Alès,

BRGM, 1989 - Carte géologique de la France 1/50^{ième} - Bourg-Saint-Andéol.

BRGM, 2005 - Carte géologique de la France 1/50^{ième} - Pont-Saint-Esprit.

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

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

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

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

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

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

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.
- Chapuis H., Jolivet J., Paran F., Ré-Bahuaud J., Guy B., Graillot D., 2014 - Méthodologie pluridisciplinaire pour l'étude des interactions karst/rivière - Cas de la Cèze. Colloque E3D, Ecole des Mines d'Alès, p. 8.
- Clauzon G., 1978 - The Messinian Var canyon (Provence, Southern France)—paleogeographic implications. *Marine Geology* 27, 231–246.
- Clauzon G., 1996 – Limites de séquences et évolution géodynamique. *Géomorphologie*, n°1, p. 3-22.
- 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., Graillot 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.
- 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*.
- Fabre G., 1972 - Les Garrigues Septentrionales du Gard. Étude de géomorphologie karstique. Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Montpellier, 198 p.
- Fabre G., 1980 - Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques. Mémoires AFK n°2, 446p. + 15 planches et 6 cartes HT.
- 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 (⁸⁷Sr, ³⁴S-SO₄) 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^{ième} journée technique du Comité Français de l'AIF, Carcassone, p 97 – 104.
- 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.

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 Céze Basin (Gard - France), in: Elleithy, K. (Ed.), Advances and Innovations in Systems, Computing Sciences and Software Engineering. Springer Netherlands, pp. 53-58.

Johannet A., 2011. Modélisation par apprentissage statistique des systèmes naturels, ou en interaction avec un environnement naturel. Applications aux karsts, crues éclair et en robotique. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Université Pierre et Marie Curie.

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 miopliocène. 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.

Khomsi, S., Bédir, 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.

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.

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.

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.

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

MARNADE, 2009 - Source de Marnade.

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

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.

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.

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.

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-Alais (Gard). *Mémoire de la Société Géologique de France, Paléontologie* 37, 5–42.

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

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.

(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 Mejanès-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. Graillet, 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 Méjeannes-le-Clap (France, Gard). Communication sous forme de poster à la 7^{ième} Conférence internationale FRIEND-WATER 2014.

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.

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.

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 Méjeannes-le-Clap. Édité. Société Cévenole de Spéléologie et de Préhistoire d'Alès (SCSP), 2 tomes, 96 et 144 p.

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

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

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 : Rosaces de directions des failles du plateau karstique de Méjannes-le-Clap et du bassin versant de la Cèze, à partir de l'étude des cartes 1/50 000 du BRGM et de l'analyse in-situ.....	31
Figure 2 : Calendrier tectonique [Bastide, 2014].	32
Figure 3 : Corrélations des coupes du Nord du Gard et de l'Ardèche [Bastide, 2014].....	35
Figure 4 : Corrélation de plusieurs coupes et puits du secteur du Gard. Les rectangles gris représentent les failles d'orientation N110E délimitant les blocs basculés [Bastide, 2014].	36
Figure 5 : Profil sismique longitudinal au fossé d'Alès dans les formations du Crétacé, sur un transect partant non loin de Saint-Privas-de-Champclos et terminant vers Lézan (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).	37
Figure 6 : Coupe géologique correspondant au profil sismique de la Figure 5 (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).	38
Figure 7 : Représentation d'une coupe géologique en fonction du profil sismique, perpendiculaire au fossé d'Alès (modifié depuis [Sanchis et Séranne, 2000]).	40
Figure 8 : Interprétation géologique schématique du plateau karstique de Méjannes-le-Clap.	42
Figure 9 : Coupe schématique de l'interfluve Cèze / Ardèche, essai d'interprétation des écoulements souterrains. En fonctionnement hydrologique moyennes eaux et basses eaux, possibilité de circulation vers le bassin versant ardéchois. En hautes eaux, la mise en charge induit la recirculation dans des paléo-conduits karstiques.	52
Figure 10 : Schéma de principe des jaugeages différentiels pour l'estimation des échanges entre karst et rivière.....	66
Figure 11 : Résultats de jaugeages des principales sources durant la décrue de 2014.	69
Figure 12 : Ajustement de courbes de régression de type exponentielle décroissante durant la période de tarissement de 2014 pour les sources.....	69
Figure 13 : Résultats de jaugeages de 4 tronçons de la Cèze durant la décrue de 2014.	70
Figure 14 : Evolution des débits entrants et sortants et des débits des sources amont et des sources aval en 2014.	71
Figure 15 : Répartition dans le temps des données récoltées.	74
Figure 16 : Graphique des individus pour une ACP réalisée sur les chroniques de mars 2014 à mai 2015 de la station de Monteil.....	76
Figure 17 : Graphique des variables pour une ACP réalisée sur les chroniques de mars 2014 à mai 2015 de la station de Monteil.	77
Figure 18 : Distribution fréquentielle de la température des stations étudiées, pour les données CTD jusqu'à décembre 2014.....	78
Figure 19 : Distribution fréquentielle de la conductivité électrique des stations étudiées, pour les données CTD jusqu'à décembre 2014.....	78
Figure 20 : Transformation d'un signal par un système [Bailly-Comte, 2008].	79
Figure 21 : Exemple de corrélogramme simple/autocorrélogramme [Kong A Siou, 2011].	80

Figure 22 : Exemple de corrélogramme croisé [Kong A Siou, 2011].	81
Figure 23 : Débit classés pour la source de Cent-Fonts pour les données du cycle 1998 [Schoen et al, 1999].	83
Figure 24 : Spectre en ondelettes du signal du débit de la source du Lez entre 1987 et 1999 [Kong A Siou, 2011].	85
Figure 25 : Localisation des 18 bancs de galets échantillonnés en juillet 2013 pour l'étude des eaux et de la faune interstitielle de la Cèze. Les numéros correspondent au code des stations.	88
Figure 26 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles de la Cèze mesurées dans les 18 bancs de galets étudiés en 2013 (en abscisse : n° des bancs).	89
Figure 27 : Distribution spatiale des espèces stygobies préférant les apports d'eau profonde. La taille des cercles est proportionnelle à l'abondance de l'organisme. Les stations sont notées de 1 à 34 d'amont en aval.	92
Figure 28 : Distributions spatiale des espèces stygobies préférant les apports d'eau peu profonde (échanges hyporhéiques). La taille des cercles est proportionnelle à l'abondance de l'organisme. Les stations sont notées de 1 à 34 d'amont en aval.	93
Figure 29 : Valeur de l'indice d'échange rivière-nappe et abondance totale de faune dans l'échantillon de 10 litres.	94
Figure 30 : Cartographie des zones d'échange rivière-nappe dans les gorges de la Cèze. Hypothèses de circulation des eaux obtenues à partir des mesures de juillet 2013 en combinant faune interstitielle et chimie des eaux.	95
Figure 31 : Corrélogramme simple de la hauteur à Laroque sur Cèze.	99
Figure 32 : Corrélogramme croisé de la hauteur à La Roque-sur-Cèze avec la hauteur d'eau à Tharoux	99
Figure 33 : Densité spectrale des précipitations mesurées à Tharoux représentée avec une double échelle logarithmique.	101
Figure 34 : Réseau de neurones (perceptron multicouches). Les ronds représentent les neurones, les carrés les variables, les flèches correspondent aux paramètres.	101
Figure 35 : Illustration des effets des différents traitements utilisés pour le passage du pas de temps horaire au pas de temps journalier.	104
Figure 36 : Spectre médian des hauteurs d'eau (période horaire) à Bessèges.	109
Figure 37 : Spectre médian des hauteurs d'eau (période horaire) à Chusclan.	110
Figure 38 : Ratio des spectres de hauteur d'eau entre les stations de Chusclan et de Bessèges.	110
Figure 39 : Architecture utilisée pour la modélisation des hauteurs d'eau à Tharoux.	112
Figure 40 : Simulations des hauteurs d'eau à Tharoux pour l'année 1996.	112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des injections de traceurs réalisées en 2014.....	50
Tableau 2 : Quantité d'eau précipitée lors des traçages de l'année 2014	51
Tableau 3 : Coloration Grotte Flandin : Injection de 10 kg d'Uranine le 29/03/14 (N : Négatif ; T : Traces ; P : Positif).....	53
Tableau 4 : Coloration Aven d'Orgnac : Injection de 10 kg de Rhodamine le 14/11/14 (N : Négatif ; T : Traces ; P : Positif).....	57
Tableau 5 : Coloration pertes Roméjac : Injection de 3 kg d'Eosine le 06/05/14 (N : Négatif ; T : Traces ; P : Positif).....	60
Tableau 6 : Mesures de débits réalisées entre juillet 2013 et juin 2015.....	67
Tableau 7 : Bilan (pertes et gains) des jaugeages différentiels entre 2013 et 2015.	71
Tableau 8 : Interprétation des ruptures de pente dans les courbes de débits classés [Marsaud 1997].	83
Tableau 9 : Liste taxonomique des invertébrés stygobies et station où ont été collectés ces organismes dans les bancs de galets de la rivière Cèze en juillet 2013.	91
Tableau 10 : Récapitulatif des stations utilisées dans la base de données (1 = mesure effectué par la station, 0 = mesure non effectué par la station).	103
Tableau 11 : Récapitulatif des données disponibles par stations et par années (1 : données disponibles ; 0 : données indisponibles ; 0,5 données incomplètes).	105
Tableau 12 : Tableaux récapitulatif des informations obtenues par autocorrélation	106
Tableau 13 : Maximums de corrélation obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.....	107
Tableau 14 : Résumé des temps de réponse obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau.....	108
Tableau 15 : Temps de corrélations obtenus par corrélation croisée des pluviométries avec les hauteurs d'eau ; ne sont corrélés que les pluviomètres avec les stations à l'aval de ces pluviomètres.....	108
Tableau 16 : Ebauche du principe de la méthodologie EVEREST – K2 (Evaluation des V olumes E changés entre R ivières et E aux S ou T erraines en milieu K artsique et pseudo K arstique).....	116

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].....	10
Carte 2 : Géologie régionale simplifiée du bassin versant de la Cèze.	27
Carte 3 : Contexte géologique de la zone d'étude, les gorges de la Cèze et le plateau karstique de Méjannes-le-Clap.	29
Carte 4 : Carte représentant l'organisation de l'Urgonien du Gard et de l'Ardèche.....	34
Carte 5 : Représentation du fossé d'Alès par la carte géologique 1/50 000 d'Alès du BRGM.	39
Carte 6 : Synthèse cartographique des résultats des traçages historiques.	46
Carte 7 : Points d'injection des traceurs au niveau de l'interfluve Cèze / Ardèche.	49
Carte 8 : Synthèse des résultats des traçages réalisés en 2014.	61
Carte 9 : Traçages envisagés pour l'étiage de l'été 2015 et pour les années 2015 et 2016.	64
Carte 10 : Localisation des points de suivi (Fond IGN au 1/50 000 ^{ème}).	73

TABLE DES MATIERES DES ANNEXES

Annexes	136
Annexe 1 : Compte rendu de 2 nd comité de pilotage du 05/05/2015.....	136
Annexe 2 : Dispositifs permettant d'assurer le suivi de la restitution du traceur ou des traceurs.	142
Annexe 3 : Traçages colorimétriques - Résultats brutes du laboratoire	143
Annexe 4 : Description technique des traçages réalisés en 2014.....	208
Annexe 5 : Comparaison des profils altimétriques de la Cèze et de l'Ardèche selon une même référence longitudinale	213
Annexe 6 : Mesures et calculs de débits – méthode, principe et difficultés	214
Annexe 7 : Correction des vitesses du micromoulinet par comparaison avec le courantomètre EM	217
Annexe 8 : Exemples d'ajustement de fonctions polynomiales pour l'établissement de relations hauteurs / débits pour les sondes CTD disposées en rivière.	218
Annexe 9 : Suivi hydrologique des sources et de la rivière.....	219

Annexes

Annexe 1 : Compte rendu de 2nd comité de pilotage du 05/05/2015

Auteur du CR : Jordan Ré-Bahuaud (EMSE) et Adrien Coutuis (stage M2 EMA)

Révision : Laurent Cadilhac (AERMC)

Auteurs ppt : Jordan Ré-Bahuaud (EMSE), Hervé Chapuis (EMSE), Joël Jolivet (UMR Espace), Pierre Marmonier (UCBL), Anne Johannet (EMA), Jocelyn Faroux (stage M2 EMA)

Objet : Compte-rendu et support de présentation de la réunion du 2nd comité de pilotage du 05/05/2015.

Personnes présentes à cette réunion :

Nom	Organisme	@	Fonction	Participation
A. Pappalardo	BET Eau & Geo Environnement	eau.geo@wanadoo.fr	Consultant	Présent
J.P. Faillat	CERGA	yjpf@free.fr	Prof.	Présent
R. Ingouf	CR Languedoc	ingouf.regis@cr-languedocroussillon.fr	Chargé d'études "Ressources en eau"	Présent
R. Buchet	DDTM Gard	richard.buchet@gard.gouv.fr		Présent
A. Coutuis	Mines Alès		Stagiaire M2	Présent
J. Faroux	Mines Alès		Stagiaire M2	Présent
A. Johannet	Mines Alès	Anne.Johannet@mines-ales.fr	MCF	Présente
A. Laurent	syndicat mixte ABCèze	alaurent@abceze.fr	Chargé de mission "milieux aquatiques"	Présent
P. Marmonier	UCBL	pierre.marmonier@univ-lyon1.fr	Prof.	Présent
Da Silva Nicolas	Univ. Avignon		Stagiaire L3	Présent
Cadrinal Alizée	Univ. Avignon		Stagiaire L3	Présent
N. Mazzilli	Univ. Avignon	naomi.mazzilli@univ-avignon.fr	MCF	Présente
P. Martin	Univ. Avignon UMR ESPACE	philippe.martin@univ-avignon.fr	Prof.	Présent
S. Pistre	Univ. Montpellier	severin.pistre@univ-montp2.fr	Prof.	Présent
J. Jolivet	Univ. Nice	joel.jolivet2@wanadoo.fr	TS	Présent
D. Graillot	Mines Saint-Etienne	graillot@emse.fr	DR	Présent
F. Paran	Mines Saint-Etienne	paran@emse.fr	IR	Présent
J. Ré-Bahuaud	Mines Saint-Etienne	re-bahuaud@emse.fr	Post-Doc / IR	Présent
L. Cadilhac	AE RMC	Laurent.CADILHAC@eaurmc.fr	Hydrogéologue	Présent
E. Lacombe	AE RMC (Del. Montpellier)	Evelyne.LACOMBE@eaurmc.fr	Chargée d'études "Eaux souterraines"	Présente
J.M. François	Maire de Lussan	j-m.francois-bergasud@wanadoo.fr	Maire	Présent

Nom	Organisme	@	Fonction	Participation
J.M. Veaute	ARS 30	jean-michel.veaute@sante.gouv.fr		Excusé
O. Radakovitch	CEREGE Aix	radakovitch@cerege.fr	Prof. Associé	Excusé
C. Gressot	CG 30	gressot_c@cg30.fr		Excusé
P. Thomas	CG 30	patrice.thomas@gard.fr		Excusé
P. Chemin	Conseil Régional Languedoc	paul.chemin@developpement-durable.gouv.fr		Excusé
P. Berard	Hydrogéologue Agréé 30	pierre.berard34@orange.fr	Consultant	Excusé
Mairie de Méjannes	Mairie de Méjannes	mejannesclap@orange.fr		Excusé
B. Vayssade	Mines Alès	Bernard.Vayssade@ema.fr	Prof.	Excusé
D. Salze	Mines Alès	david.salze@mines-ales.fr	MCF	Excusé
B. Guy	Mines Saint-Etienne	bguy@emse.fr	Prof.	Excusé
H. Chapuis	Mines Saint-Etienne	rv.chapuis@gmail.com	Doctorant	Excusé
M. Clavel	syndicat mixte ABCèze	mclavel@abceze.fr		Excusée
A. Mayer	Univ. Avignon	adriano.mayer@univ-avignon.fr	MCF	Excusé
S. Jaillet	Univ. Chambéry	Stephane.Jaillet@univ-savoie.fr	IR	Excusé
H. Jourde	Univ. Montpellier	herve.jourde@univ-montp2.fr	MCF	Excusé
V. Lavastre	Univ. Saint-Etienne	veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr	MCF	Excusée
A. Clemens	ZABR	anne.clemens@zabr.org	Directrice ZABR	Excusée

Ordre du jour de la réunion :

I- Présentation du projet → L. Cadilhac, D. Graillot

II- Singularités du site d'étude :

Présentation du site d'étude → J. Ré-Bahuaud

Problématiques et objectifs → J. Ré-Bahuaud

Synthèse géologique → D. Graillot

III- Caractérisation des échanges karst/rivière :

Résultats des traçages colorimétriques (2014) → J. Jolivet

Jaugeages des sources et de la rivière (2013 – 2015) → J. Ré-Bahuaud

Suivi hydrologique des sources et de la rivière (2013 – 2014) → J. Faroux

Résultats des investigations biologiques (2013) → P. Marmonier

Chimie des eaux (2013 – 2014) → J. Ré-Bahuaud

Imagerie aéroportée IRT (2013 – 2014) → J. Ré-Bahuaud

Modélisation RN (2014) → A. Johannet

IV- Programme (2015 et 2016) → J. Ré-Bahuaud

Poursuite des tâches engagées

Nouvelles tâches

V- Intégration dans le site ZABR Rivières Cévenoles → P. Martin, A. Johannet, F. Paran

Le support de présentation étant joint à ce document, ce présent compte rendu a pour objectif de relever les principales suggestions et les questions soulevées lors de la réunion du 05/05/15. Les questions sont séparées par disciplines.

Contexte géologique (Didier Graillot EMSE) :

La géologie du terrain d'étude fait l'objet de nouvelles investigations liées à la thèse d'Hervé Chapuis (Directeur de thèse : Bernard Guy et Didier Graillot). Ces nouvelles investigations concernent notamment, l'observation macroscopique et en lame mince des différents faciès carbonatés, l'analyse de la fracturation et des réseaux souterrains explorés par les spéléologues. Les objectifs de ces nouvelles investigations sont 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 2014 F. Bastide : 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.

Question (J-P. Faillat) : Quelle est la méthodologie pour l'analyse de la fracturation ?

Réponse (D. Graillot) : Repérage terrain, mesures de pendages, estimation du rejet des failles, analyse de photos aériennes (stéréoscopie), exploitation des infos structurales des cartes géologiques.

Suggestion (L. Cadilbac) : Récupérer l'étude de l'Andra avec les profils géophysiques dans la vallée du Rhône afin de visualiser la potentielle « fenêtre messinienne ».

Traçages colorimétriques (Joël Jolivet UMR Espace) :

Réalisation de 3 traçages dans l'interfluve Cèze-Ardèche afin de voir l'influence du synclinal d'Issirac. 2 méthodes de récupération des données : fluorimètres et méthode des charbons activés. Sur les 4 fluorimètres installés, (2 sur la Cèze et 2 sur l'Ardèche), 3 ont été endommagés par les castors, le 4^{ème} a donc été retiré. Les seuls résultats obtenus proviennent donc des charbons activés.

Traçage 1 : 10 Kg de Fluoresceïne le 29/03/14 à la grotte de Flandin. Récupération du traceur en avril pour l'Ardèche. Sur la Cèze, le traceur a été récupéré à Monteil à de faibles concentrations en Novembre et aucune restitution aux Baumes.

Traçage 2 : 3 Kg d'éosine injectées dans les pertes de Romejac le 06/05/14. Restitution rapide sur la Cèze à Monteil et aux Baumes le 10/06/14. Aucune restitution sur l'Ardèche.

Traçage 3 : 10 Kg de Rhodamine à l'Aven d'Orgnac le 14/11/14. Récupération du traceur en un seul point sur l'Ardèche.

Question 1 (L. Cadilbac) : Interrogations sur la méthode de suivi de la restitution des traceurs.

Réponse 1 (J. Jolivet) : 2 Fluocapteurs par sources et prélèvements d'échantillons ponctuels d'eau pour analyses spectro lors du ramassage des fluocapteurs. Les échantillons (charbons et eaux) sont aux préalables analysés grossièrement avec un fluorimètre de terrain (aquafluor®) et sont analysés envoyés finement par un laboratoire (Sciences Environnement).

Remarque (J-M. François) : Les transferts hydrauliques entre les formations Oligocènes (synclinal Issirac) et les formations urgoniennes sont possibles.

Question 2 (L. Cadilhac) : Interrogations sur le résultat du traçage de la grotte Flandin avec une restitution côté Cèze et Ardèche supposant une circulation souterraine particulière. Est-il opportun de refaire ce traçage avec un dispositif de suivi plus précis ?

Réponse 2 (J. Jolivet) : Nouveau traçage possible mais difficile du fait de la détérioration du matériel par les castors, du temps de suivi long et de l'accessibilité difficile des sources côté ardéchois.

Investigations biologiques (Pierre Marmonier Lyon I) :

Ces travaux ont permis un échantillonnage extensif (18 stations en triplicats) de la Cèze dans la zone des gorges karstiques en aval de Tharoux. Les informations apportées par les analyses physico-chimiques des eaux interstitielles et par les organismes hyporhéiques semblent très cohérentes (cf présentation ppt) :

Avant l'entrée de la Cèze dans les gorges (au banc 1), les sédiments semblent alimentés par des flux d'eau allant de la surface vers les interstices, la Cèze serait donc en situation de perte d'eau superficielle. Les communautés d'invertébrés confirmeront ou infirmeront ce diagnostic.

Dans la partie en amont des gorges, du banc 3 aux bancs 14, les sédiments de la rivière semblent alimentés par des apports d'eau souterraine profonde. Ces apports sont particulièrement sensibles au droit de la Source des Fées (banc 3) et dans les bancs 7, 8, 11, 12 et 14.

Dans ce même secteur en amont des gorges, les bancs 4 et 13 semblent caractérisés par des échanges hyporhéiques sur de faibles distances.

Dans la partie centrale des gorges (du banc 16 à 24), c'est la rivière qui semble alimenter les sédiments de son lit, avec parfois des recyclages de l'eau sur de courtes distances (bancs 25 et 27).

Dans la partie en aval des gorges, les bancs 33 et 34, les sédiments sont alimentés en eau souterraine profonde, sans doute liée à la Source de Monteil pour le banc 34. Les communautés d'invertébrés sont marquées par des organismes karstiques.

Enfin, le banc 32 semble partiellement colmaté : les communautés interstitielles sont très peu abondantes (seulement 263 individus/10L en moyenne) et les teneurs en oxygène dissous sont faibles (3,3 mg/L en moyenne).

Des prélèvements d'invertébrés vont être prochainement réalisés dans l'endokarst par des spéléologues. Les précisions sur le protocole d'échantillonnage à respecter seront apportées au préalable par P. Marmonier.

Profil longitudinal altimétrique et de conductivité de la Cèze (Jordan Ré-Bahuaud EMSE) :

La mesure de conductivité le long de la Cèze permet de repérer des contrastes eau de surface/eau souterraine. Cette méthode renseigne également sur le caractère ponctuel ou diffus de la source.

Des améliorations du suivi des propriétés de l'eau de la Cèze sont prévues : turbidité, pH, potentiel redox, signal Radon, oxygène dissous sur la Cèze en juin prochain.

Suggestion (P. Martin) : Mieux exploiter le profil altimétrique de la Cèze en mobilisant d'avantage de connaissances géomorphologiques. Mettre notamment en relation le profil avec l'altitude des sources et leurs fonctionnements hydrodynamiques.

Post réunion

Pour établir une comparaison des profils Cèze et Ardèche, une descente de l'Ardèche a été réalisée le 20 mai dernier. Le profil d'altitude est d'excellente précision (90% des points avec une incertitude < 10 cm). Les deux profils d'altitudes côté Cèze et Ardèche ont été comparés, ils présentent des pentes générales d'amont en aval des gorges assez similaires d'environ 1 ‰. La pente entre les lignes d'eau des deux bassins versants (Cèze et Ardèche) est légèrement plus forte et est comprise entre de 1 à 2 ‰. Le profil des propriétés de l'eau de l'Ardèche (EC, pH, T°, potentiel redox, Turbidité) est assez intéressant. Le suivi du pH et du potentiel redox sont des bons compléments à l'information donnée

par la conductivité et la température. Le seul bémol de cette campagne de mesure est le débit de l'Ardèche qui était en régime perturbé du fait des lâchés de barrage durant la descente.

Imagerie infrarouge aéroportée (Jordan Ré-Bahuaud) :

L'IRT a pour but de repérer les différences de température entre la source et la rivière (source plus froide en été et plus chaude en hiver). Il faut que le mélange entre les eaux soit rapide et complet, et la méthode n'est utilisable que pour les échanges dans le sens du karst vers la rivière.

La campagne d'acquisition de septembre 2014 est en cours de traitement. Il faut réfléchir à l'opportunité d'en réaliser une dernière en période hivernale ?

Suggestion (J-P. Faillat) : Privilégier des couleurs plus conventionnelles pour représenter les différences de température (bleu = froid et rouge = chaud).

Approche géochimique (Jordan Ré-Bahuaud) :

Analyse ACP des différents échantillons. Différenciation de 3 groupes de sources :

Un groupe de sources sulfatées correspondant au recyclage des eaux de la Cèze

Un groupe de sources carbonatées calciques

Un pôle intermédiaire à l'aval.

Les analyses réalisées sur des échantillons prélevés en moyennes eaux et basses eaux (respectivement en juillet et septembre 2013) laissent entrevoir une certaine variabilité chimique de l'eau des sources. C'est pourquoi une campagne d'acquisition complémentaire en hautes eaux a été réalisée en décembre 2014.

Question (J-P. Faillat) : Précision des kits alcalinité ?

Réponse (J. Ré-Bahuaud) : La référence du kit (alkalinity kit Hach®) est couramment utilisée dans les publications récentes. De plus, sur certains prélèvements, les mesures d'ions hydrogencarbonates ont été doublées et donnent des résultats semblables.

Suggestion (S. Pistre et J-P. Faillat) : Faire des tests sur les isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) pour mieux discriminer l'origine des eaux. J-P. Faillat a, à ce titre, proposé deux articles pour illustrer l'intérêt de l'analyse du Sr dans un tel contexte.

Réponse (J. Ré-Bahuaud et V. Lavastre) : La possibilité d'utiliser les isotopes du Sr est à l'étude, des tests seront réalisés dès 2015 et poursuivis en 2016 si les résultats sont probants. A l'heure actuelle, deux laboratoires sont pressentis pour réaliser de telles analyses (Clermont Ferrand ou Nîmes).

Jaugeage des débits apparents sur les sources et rivières (Jordan Ré-Bahuaud) :

Les jaugeages différentiels réalisés sur 6 tronçons de la Cèze permettent de mieux cerner et quantifier les pertes et la contribution des eaux souterraines aux débits de la Cèze. Les bilans d'entrées/sorties incluant le débit des sources est plus difficile à interpréter compte tenu des incertitudes importantes sur le débit des sources.

Suggestion (S. Pistre) : Des mesures de débits complémentaires (hautes eaux) peuvent être réalisées avec le matériel (ADCP) de l'université de Montpellier.

Sonde CTD (Jocelyn Faroux EMA) :

Les sondes CTD permettent de mesurer en continu la hauteur d'eau, la conductivité et la température avec un pas de temps de 15 minutes. Les données d'ores et déjà acquises sont en train d'être corrigées et traitées de manière à réaliser des analyses statistiques (logiciel R). Les données disponibles ne couvrent pas encore une année hydrologique, ce qui sera le cas courant mai.

Les données enregistrées par les sondes CTD ont été relevées sur le terrain la semaine du 18 au 22 mai. Les sondes semblent avoir bien fonctionnées, elles ont été recalibrées pour l'occasion.

Approche de modélisation (Anne Johannet EMA) :

Deux méthodes systémiques sont utilisées : hauteurs classées et réseaux de neurones.

Les données ont été rassemblées et traitées en 2014 par Michael Savary (stagiaire de M2 ayant soutenu et encadré par Anne Johannet à l'EMA) afin de constituer une base de données.

Les hauteurs classées doivent permettre de déterminer le sens et le volume des échanges. Ce classement a été fait avec des données horaires et journalières selon les saisons, les années ou encore en crue et décrue. Il y a des comportements similaires entre les années, en revanche des comportements différents sont observés selon les saisons.

La modélisation par réseau de neurones de l'hydrologie au niveau de la station du pont de Tharoux a été testé sur plusieurs architectures avec un modèle récurrent indique des résultats bons pour l'étiage mais il y a des difficultés à modéliser les crues. Le meilleur coefficient de Nash obtenue est de 0,83.

Travaux futurs : vérification de la validité des données. Réalisations de modèles et de débits classés sur d'autres stations en aval (La-Roque-sur-Cèze, Montclus). Transformation des chroniques de hauteurs en chroniques de débits via des courbes de tarages. Réalisation de modèles multirésolutions. En perspective on peut proposer de reconstituer les données de pluie ou de débits manquantes.

Suggestion (L. Cadilhac) : Dans la mesure où le projet vise en particulier à approcher les apports du karst à la Cèze et le débit de fuite masqué éventuel vers l'Est et la vallée du Rhône, dans la suite du projet la modélisation devra impérativement s'attacher à modéliser les débits en sortie sur les stations hydrologiques plus à l'aval des gorges (la-Roque-sur-Cèze, Montclus) et s'intéresser aux différences entre les débits en entrée et sortie des gorges.

La fiabilité des hauteurs enregistrées par la station SPC de Tharoux a été remise en cause. Une sonde CTD a été installée le 22 mai dernier pour comparer les hauteurs enregistrées par les deux sondes.

Rapport d'avancement 2014 :

La date du 29 juin a été proposée pour la restitution du rapport d'avancement des actions engagées en 2014. Les différents contributeurs aux rapports (P. Marmonier, Anne Johannet, Joël Jolivet et Hervé Chapuis) doivent envoyer leurs parties avant le 15 juin à Jordan Ré-Bahuaud.

La date de la prochaine réunion reste à planifier.

Annexe 2 : Dispositifs permettant d'assurer le suivi de la restitution du traceur ou des traceurs.

- **Suivi quantitatif (courbe de restitution de la quantité de traceur) :**

- Préleveur automatique :

- + Permet le choix du pas de temps
- Dispose seulement de 24 flacons d'échantillonnage avant remplacement
- + Les flacons sont analysés et peuvent permettre de séparer les spectres de plusieurs traceurs compatibles.
- Le dispositif est encombrant et difficile à mettre en œuvre.

- Fluorimètre de terrain :

- + Analyse en continu de la concentration en colorant (choix du pas de temps d'enregistrement) sans prélever de l'eau
- + Pas de coût d'analyse en laboratoire
- + Peu encombrant, étanche et facile à mettre en œuvre
- = Peut analyser au max 3 traceurs compatibles simultanément
- Risque de saturation du signal de restitution si la concentration du traceur est mal dosée (rare)

- **Suivi qualitatif (réponse binaire et encadrement du temps de restitution) :**

- Fluocapteur (charbon actif) :

- + Capte les molécules colorantes et permet d'en analyser plusieurs à la fois
- Pas de concentration calculable
- Temps de restitution dépend de la fréquence de renouvellement des fluocapteurs

Annexe 3 : 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

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

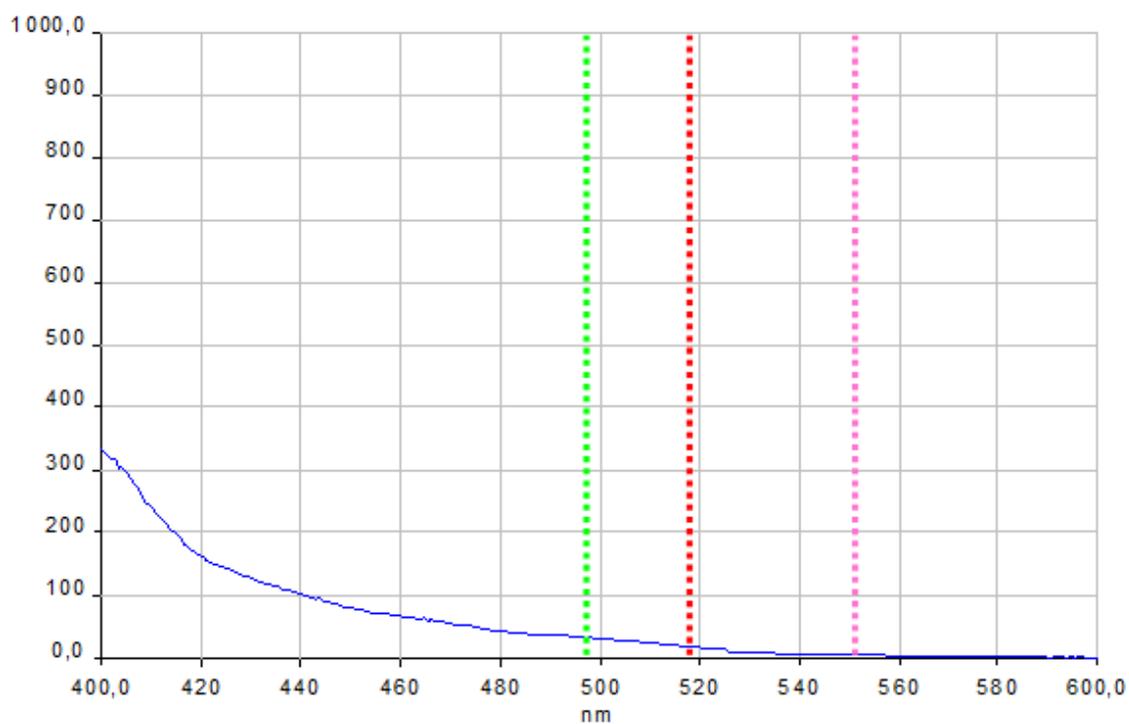
- Bassin versant de l'Ardèche

- Source « la Fare »

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « LA FARE 31/07/2014 »



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « LA FARE » du :

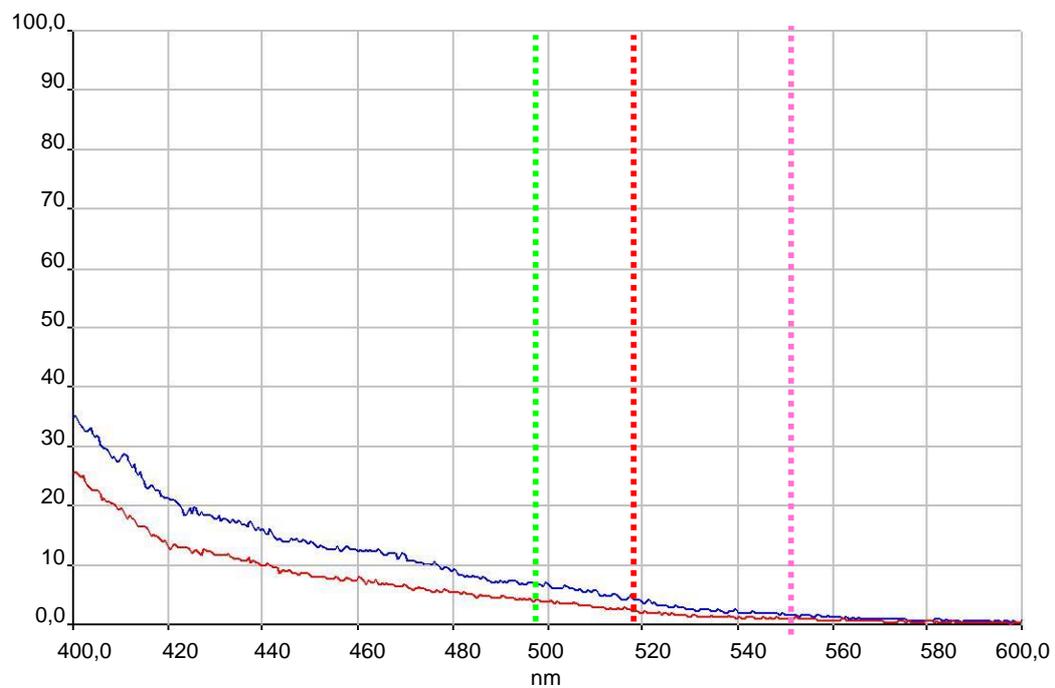
11/04/14



31/07/14



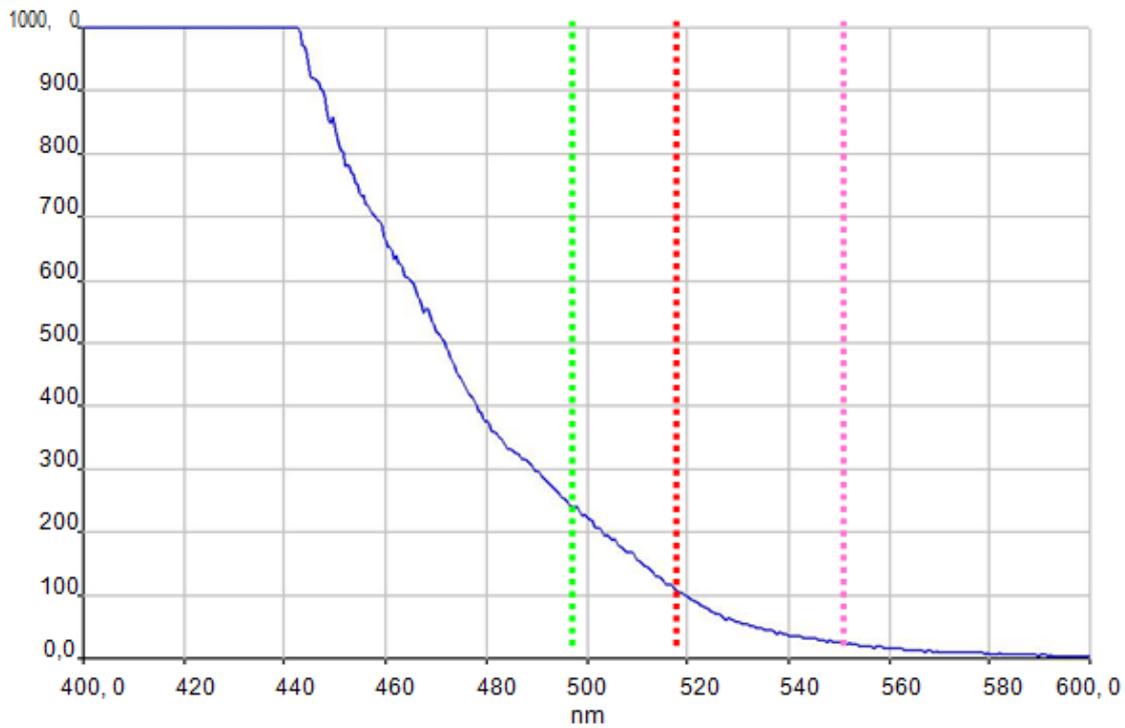
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



○ Source « Dragonnière »

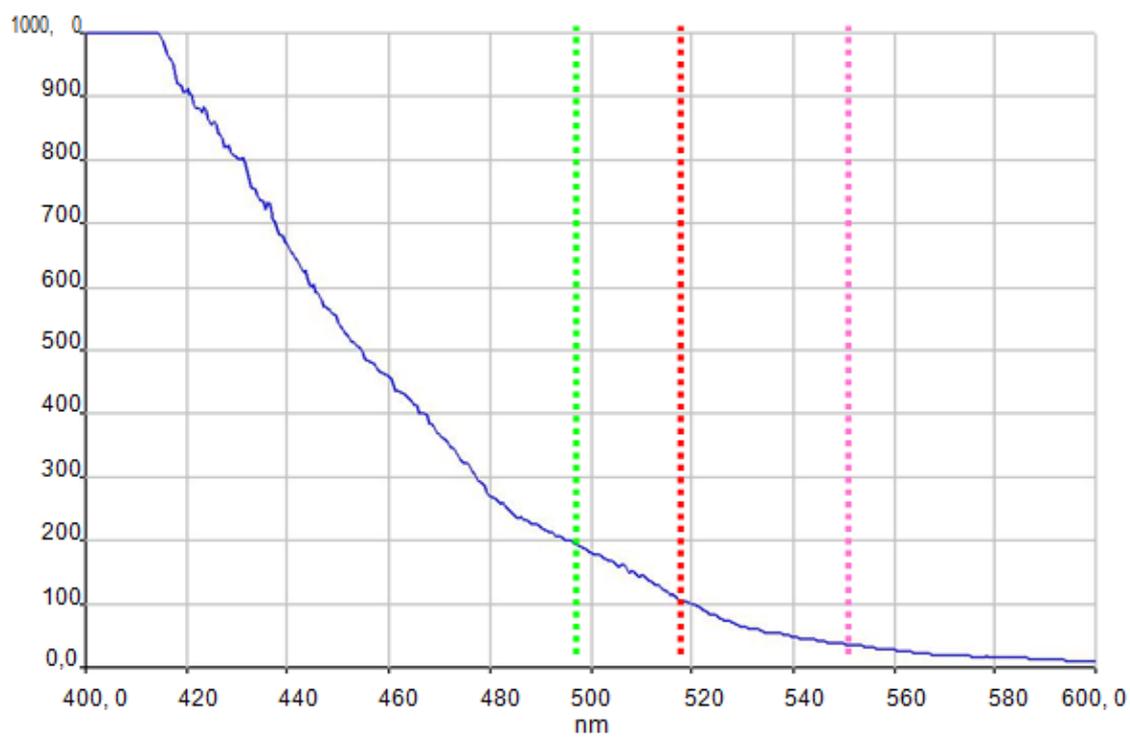
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Dragonnière » du 18/02/15

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Dragonnière** » du 18/02/15

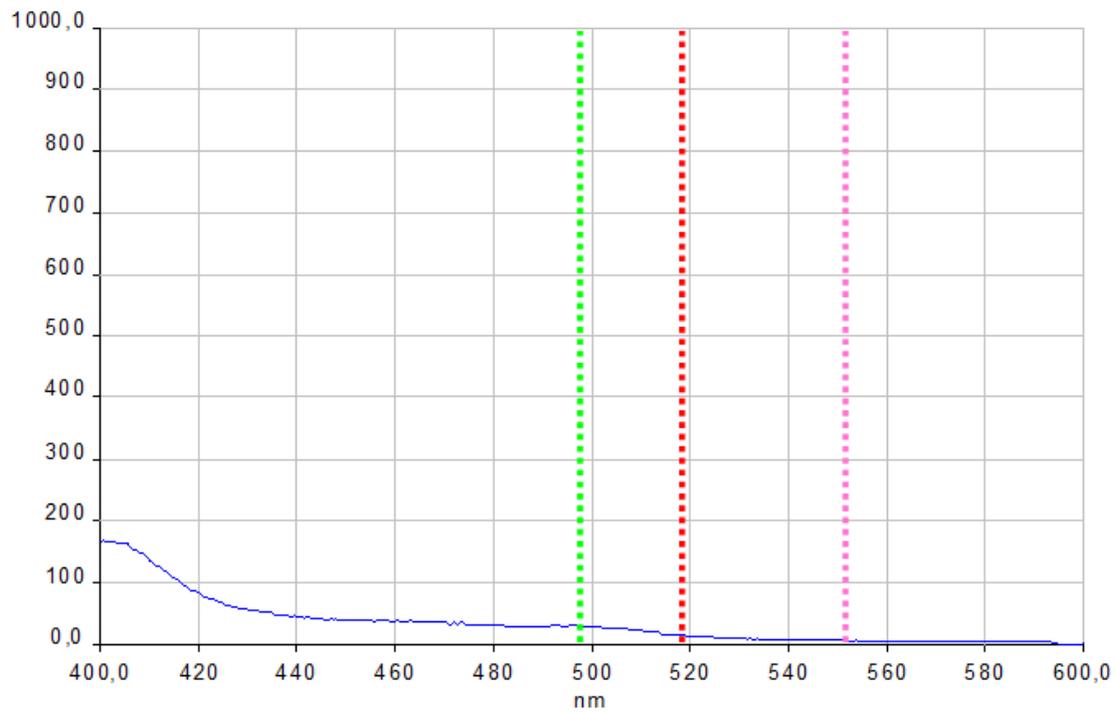
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « DRAGONNIERE du 23/03 au 11/04 »

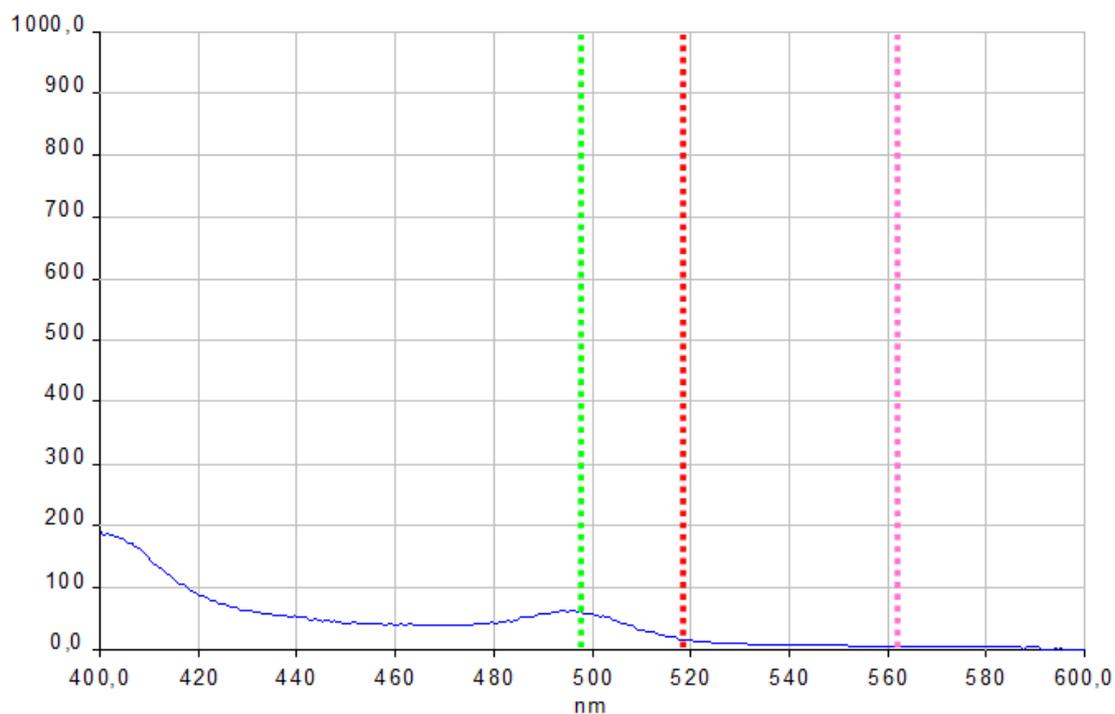


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



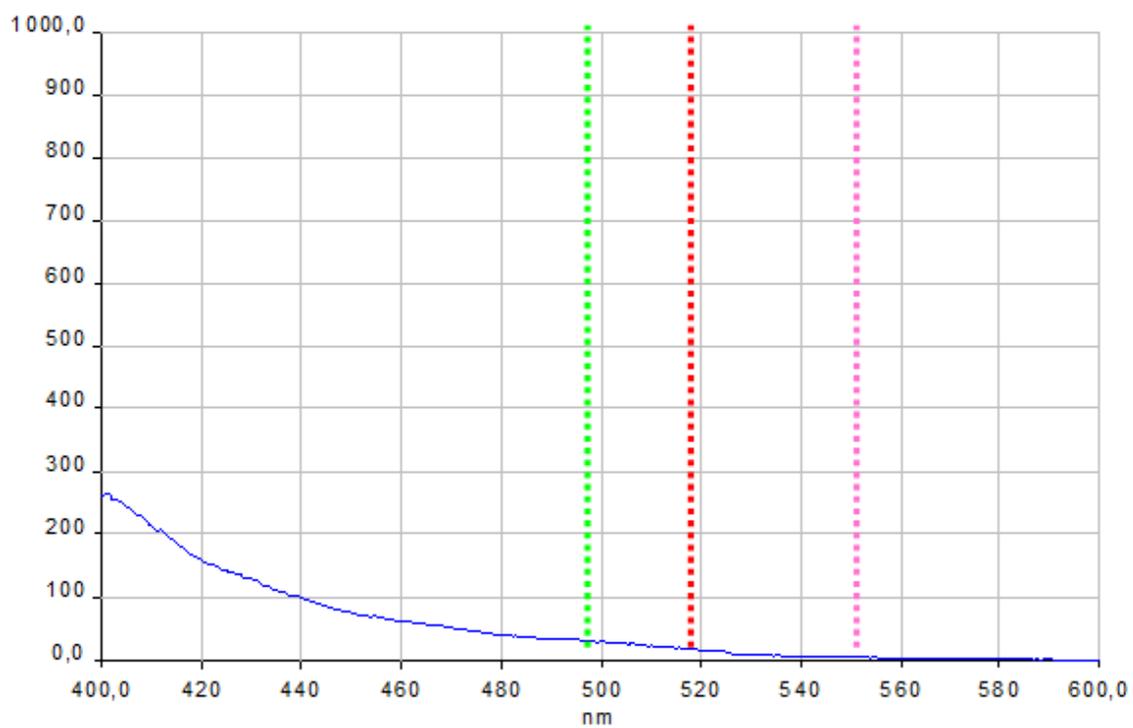
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « DRAGONNIERE du 23/03 au 11/04 »

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

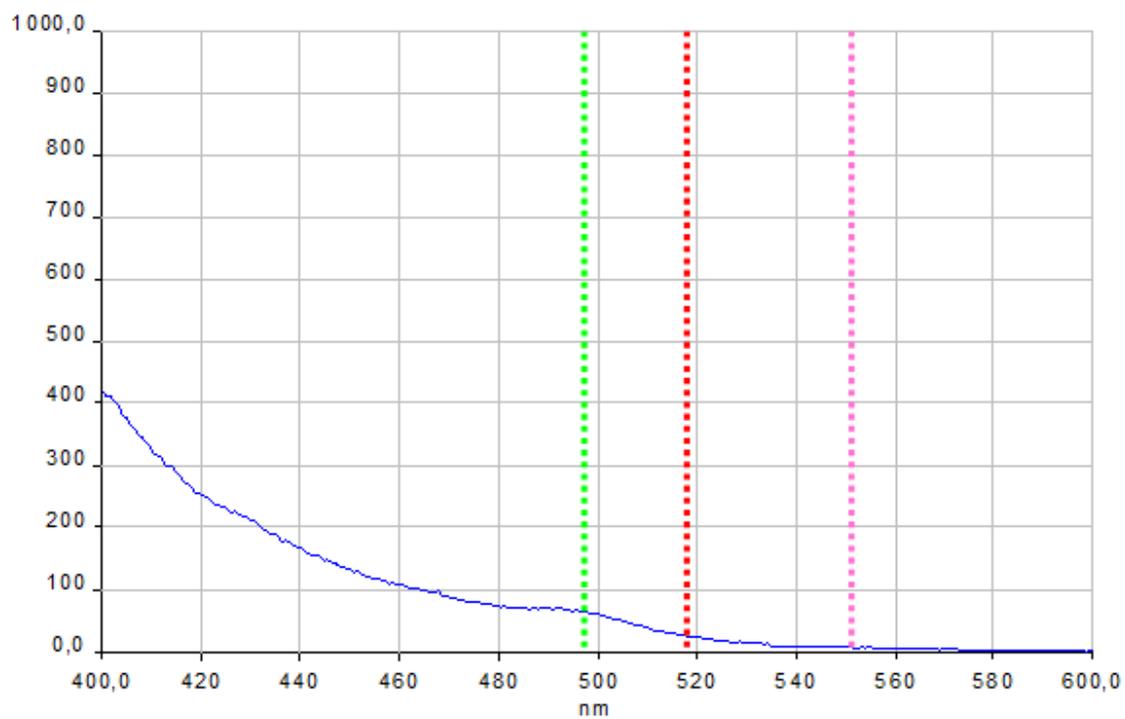


→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « DRAGONNIERE 31/07/2014 »

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



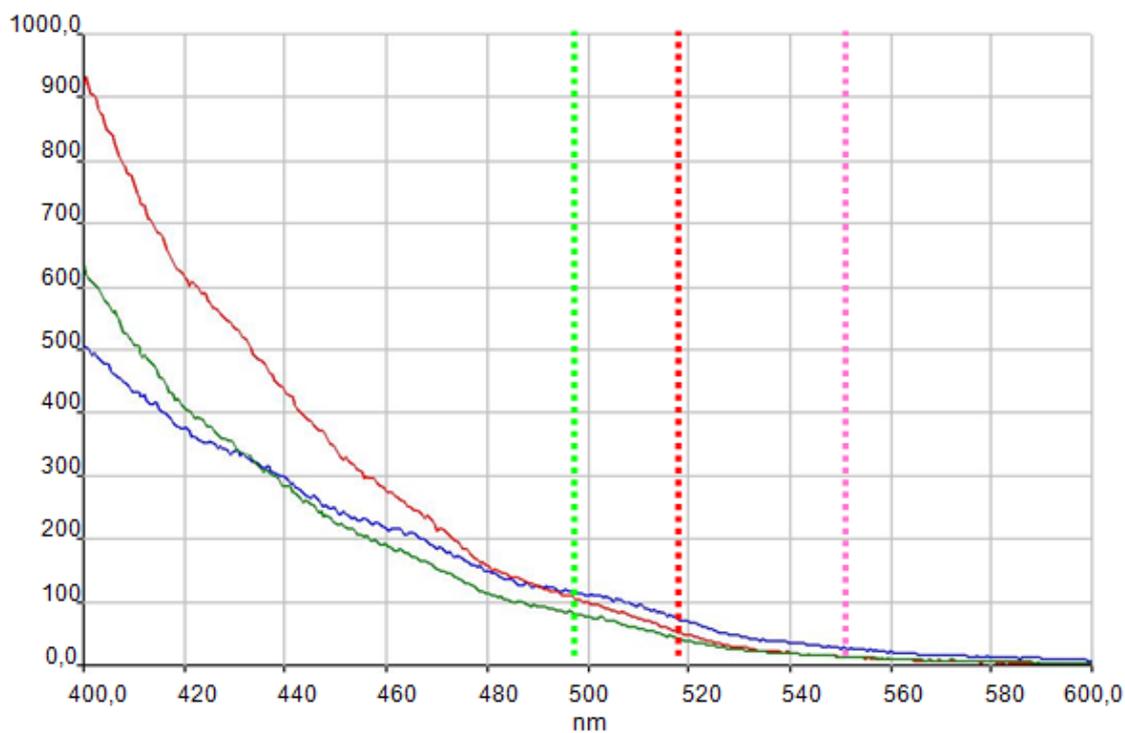
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur les fluocapteurs de « DRAGONNIERE » du :

- 22/10/14 —
- 10/12/14 (1) —
- 10/12/14 (2) —

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « DRAGONNIERE » du :

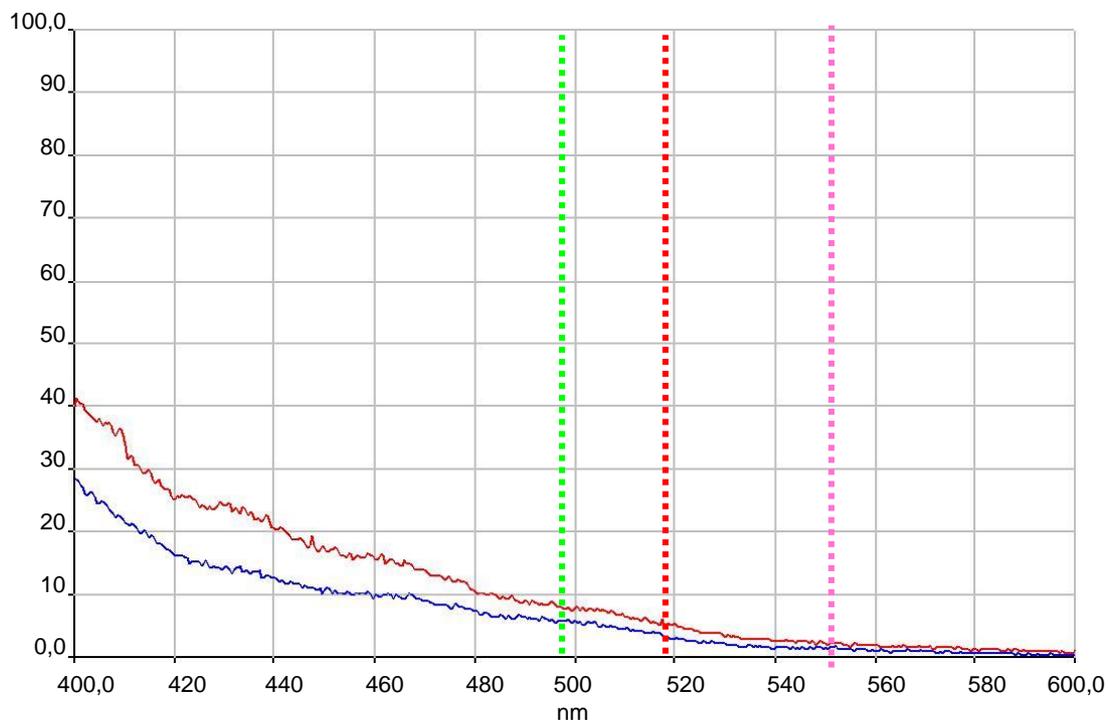
11/04/14



31/07/14



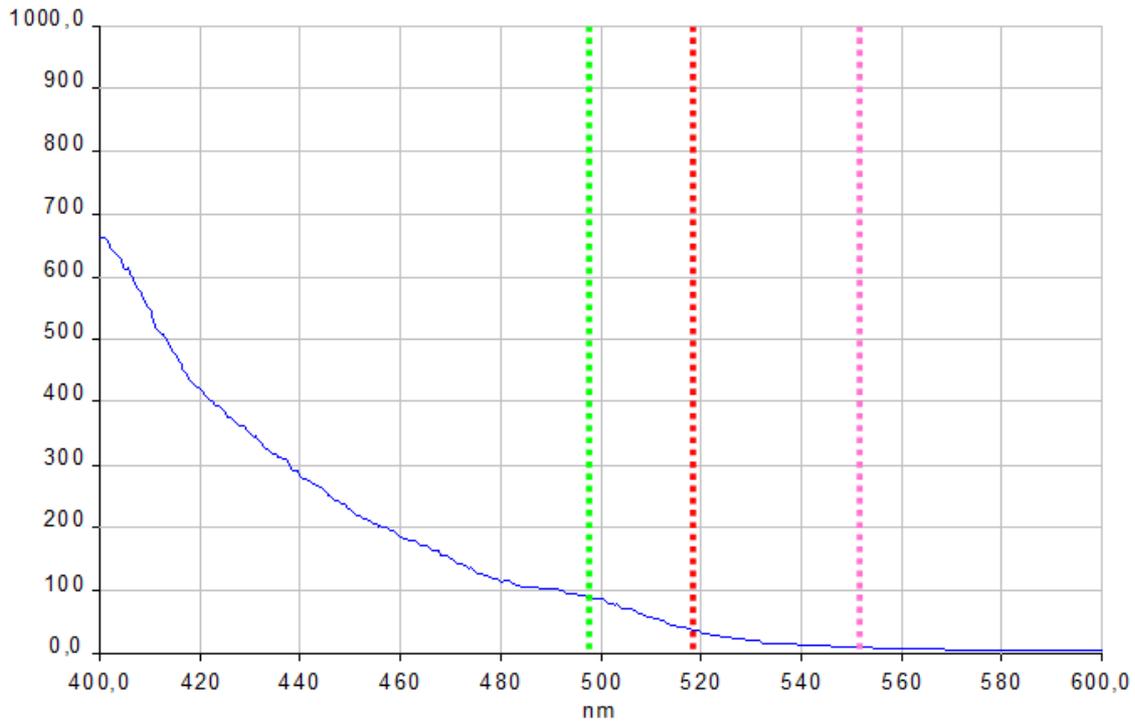
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



- Source « Esclapayre »

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « 'ESCLAPAYRE du 23/03 au 11/04 »

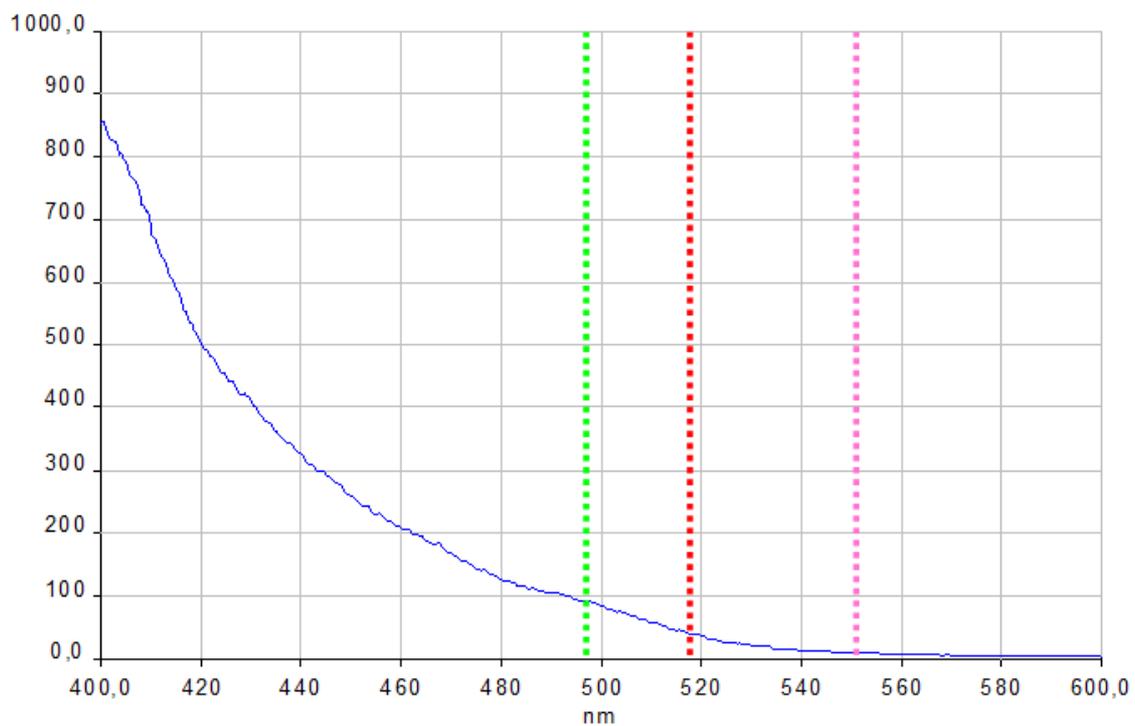
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « ESCLAPAYRE du 23/03 au 11/04/2014 »

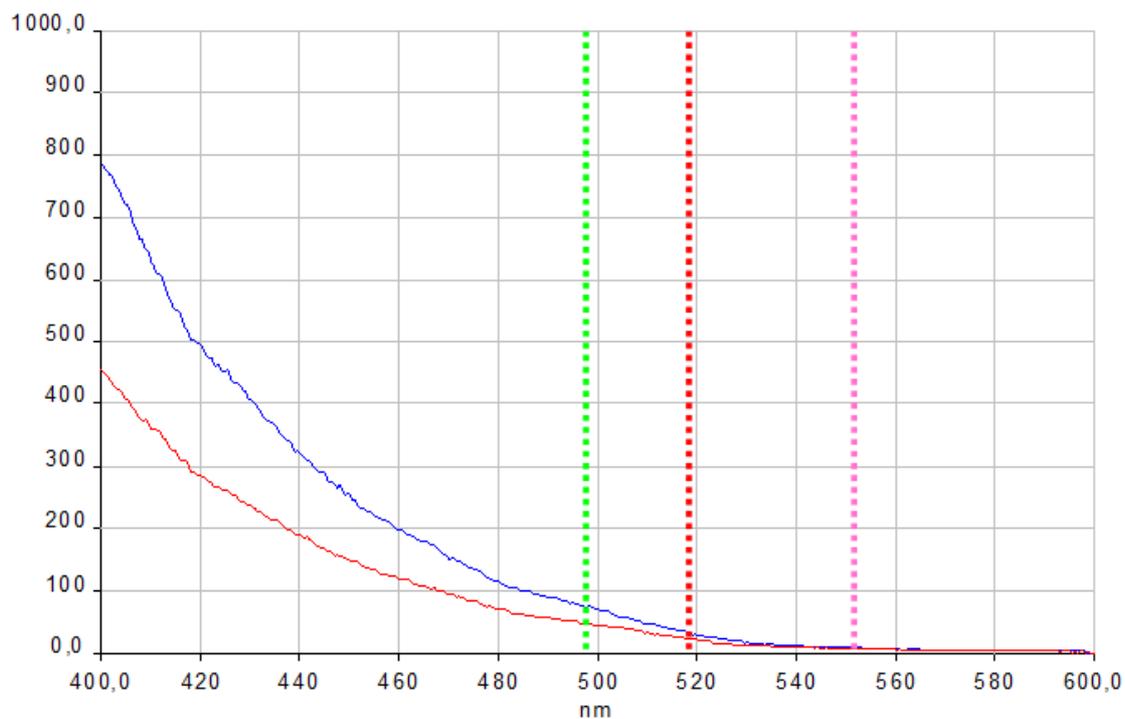


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



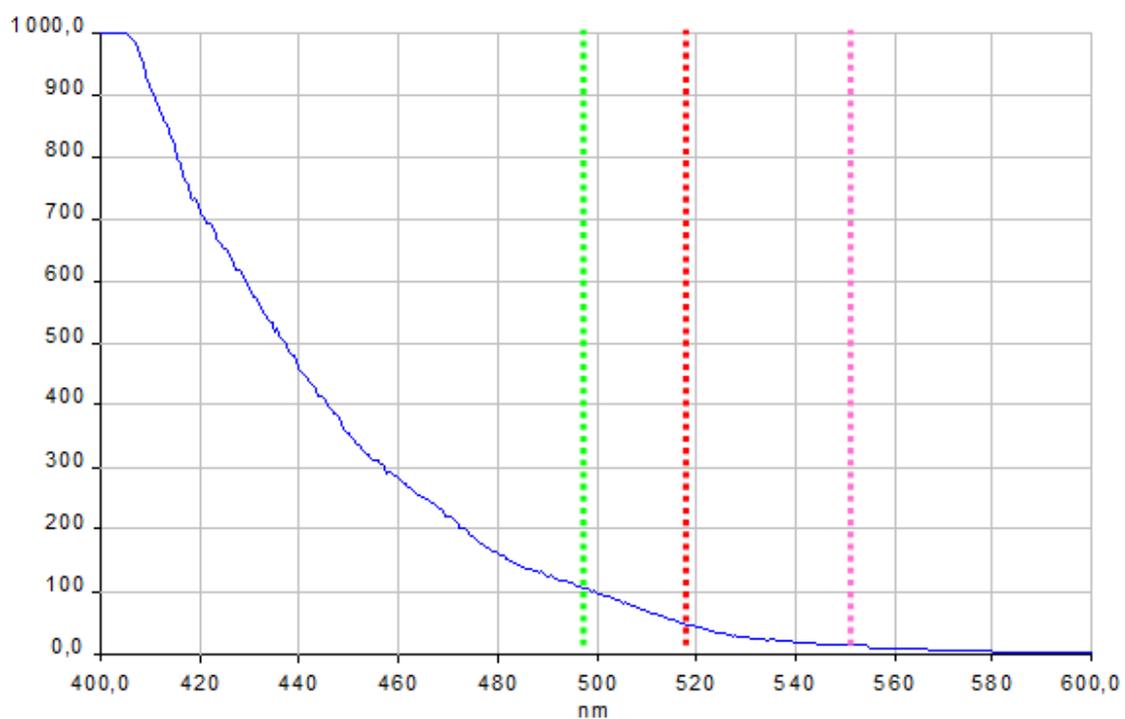
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur les fluocapteurs de « ESCLAPAIRE du 11/04 au 27/04/14 »

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





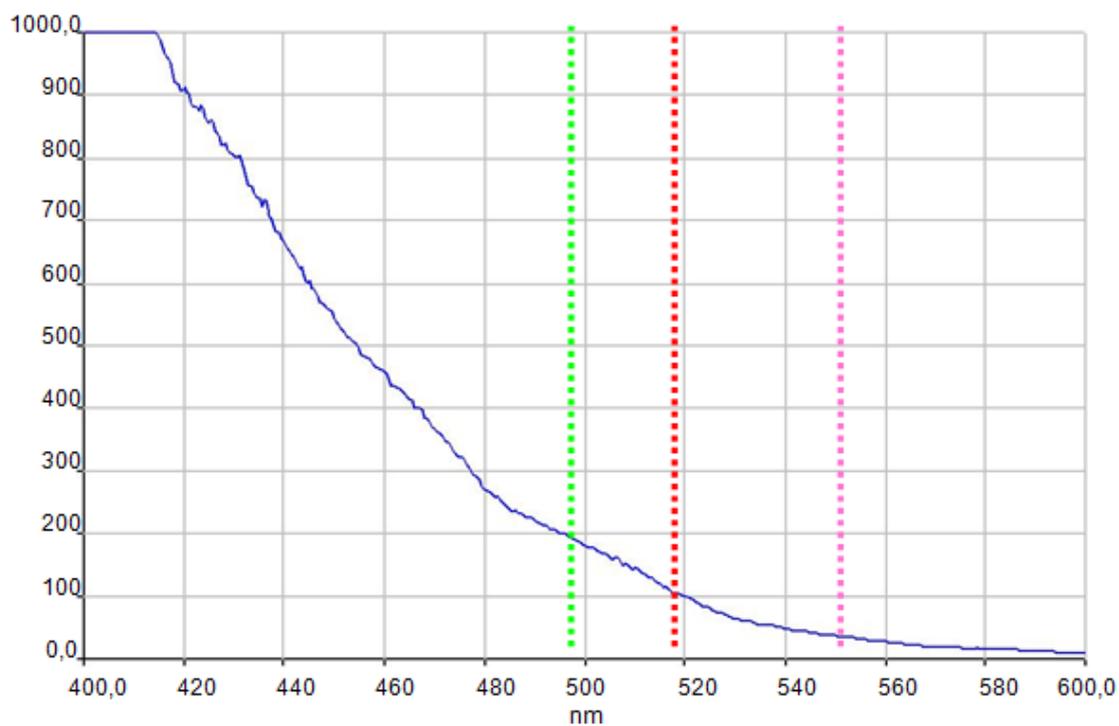
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « ESCLAPAYRE » du 20/11/14
12h00



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « ESCLAPAYRE » du :

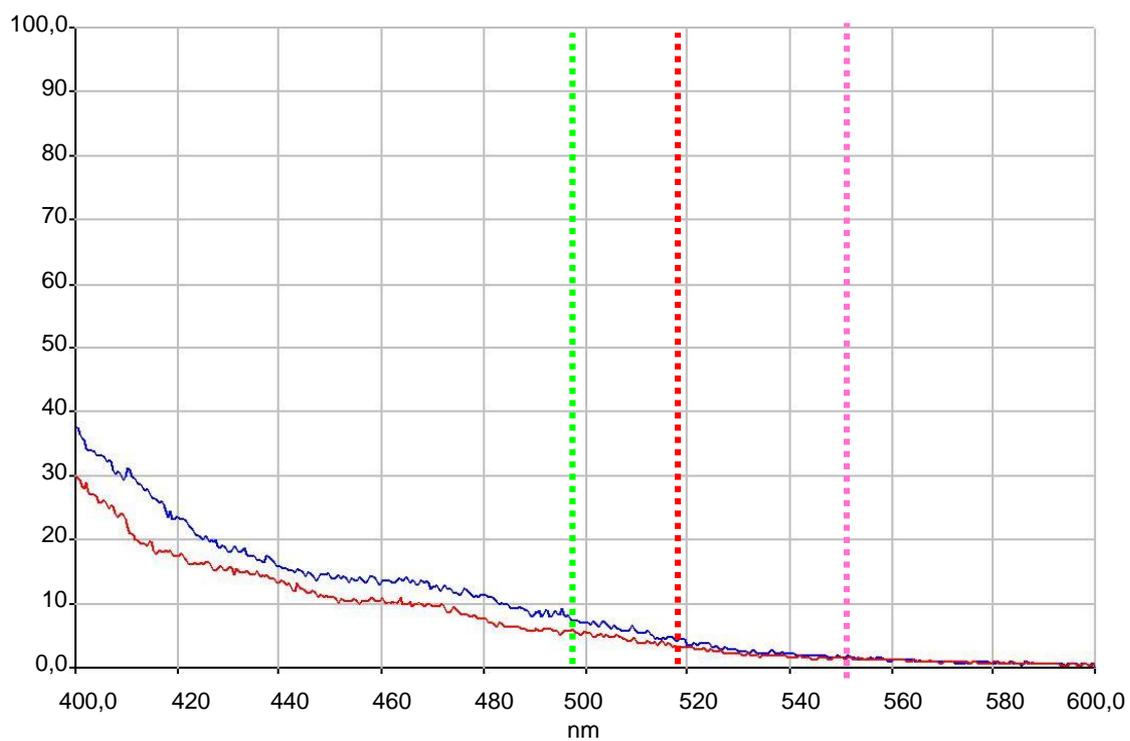
11/04/14



31/07/14



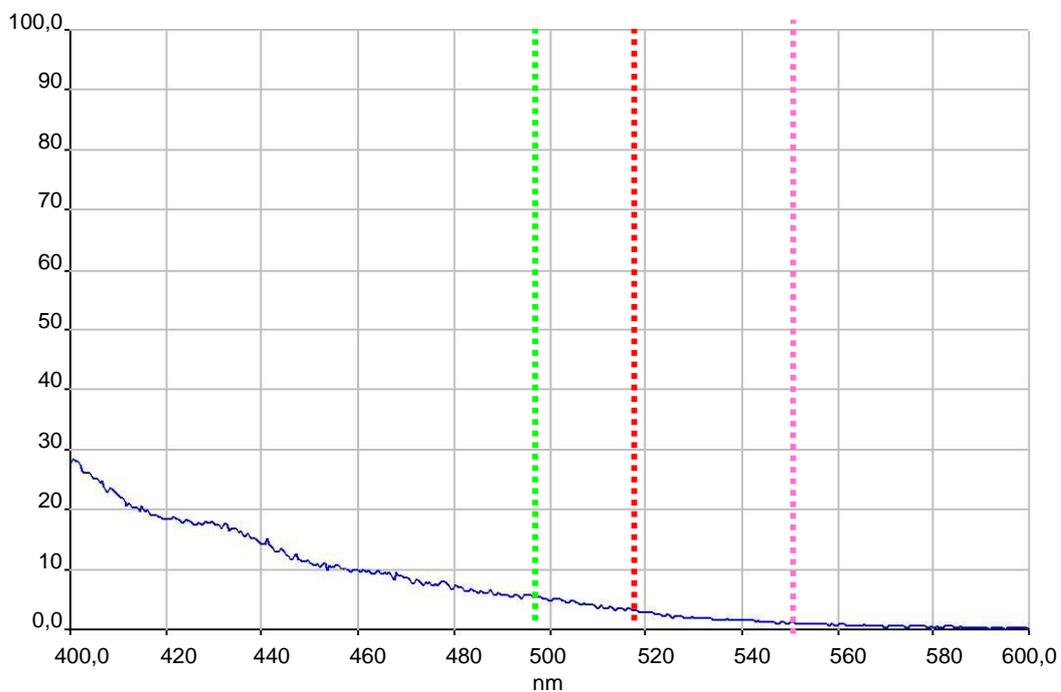
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ → EAU : Analyse réalisée sur l'échantillon d'eau de « ESCLAPAYRE » du :

11/04/14 au 27/04/14

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

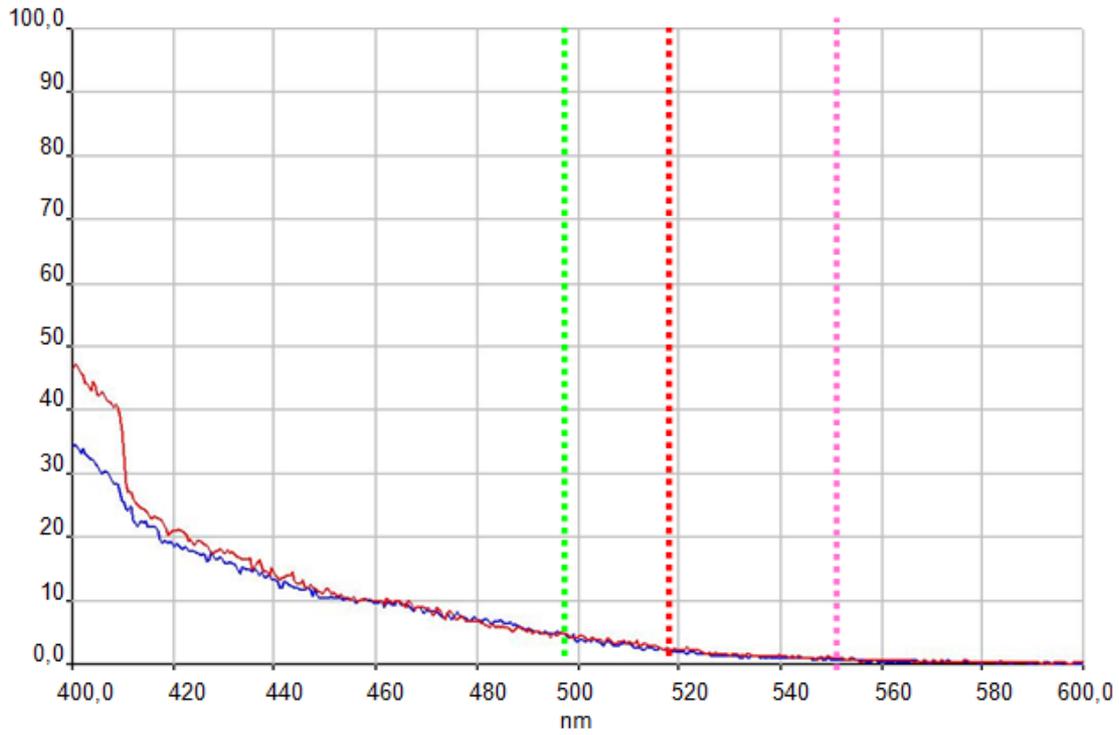


EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « ESCLAPAYRE » du :

20/11/14 12h00
01/12/14



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyse réalisée sur les échantillons d'eau de « **ESCLAPAYRE** » :

CONCENTRATION EN COLORANT

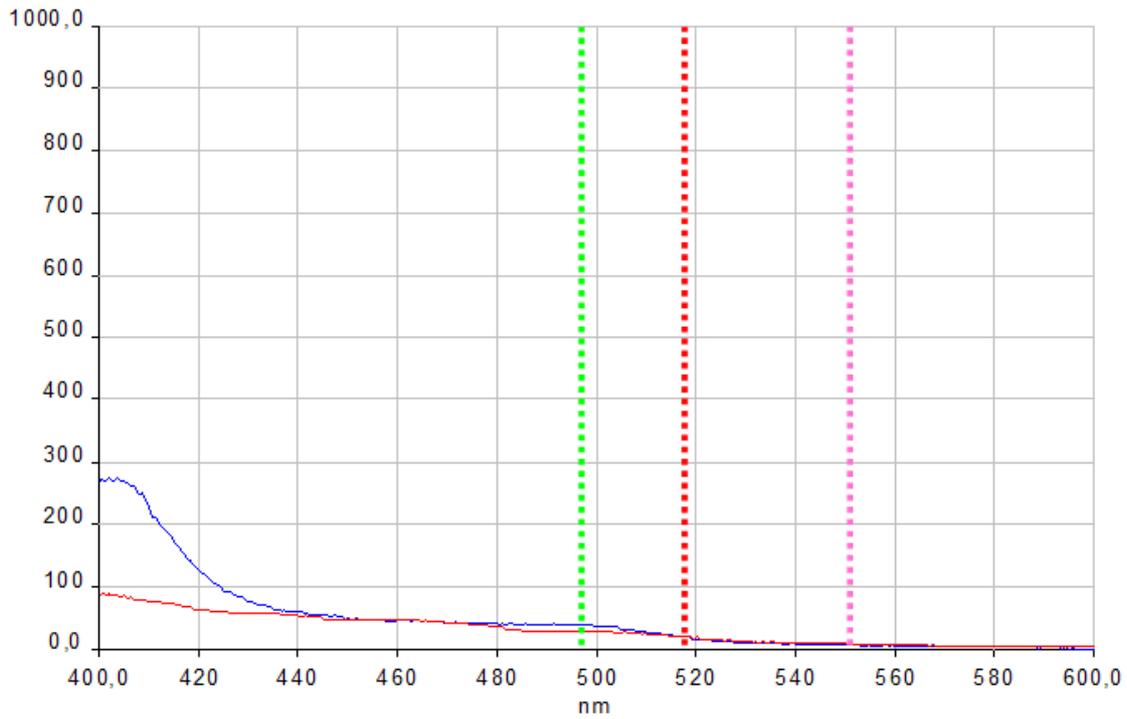
Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
20/11/2014	12h00	OUI	NON	∅	∅	∅
01/12/2014	11h00	OUI	NON	∅	∅	∅

∅ Absence de colorant

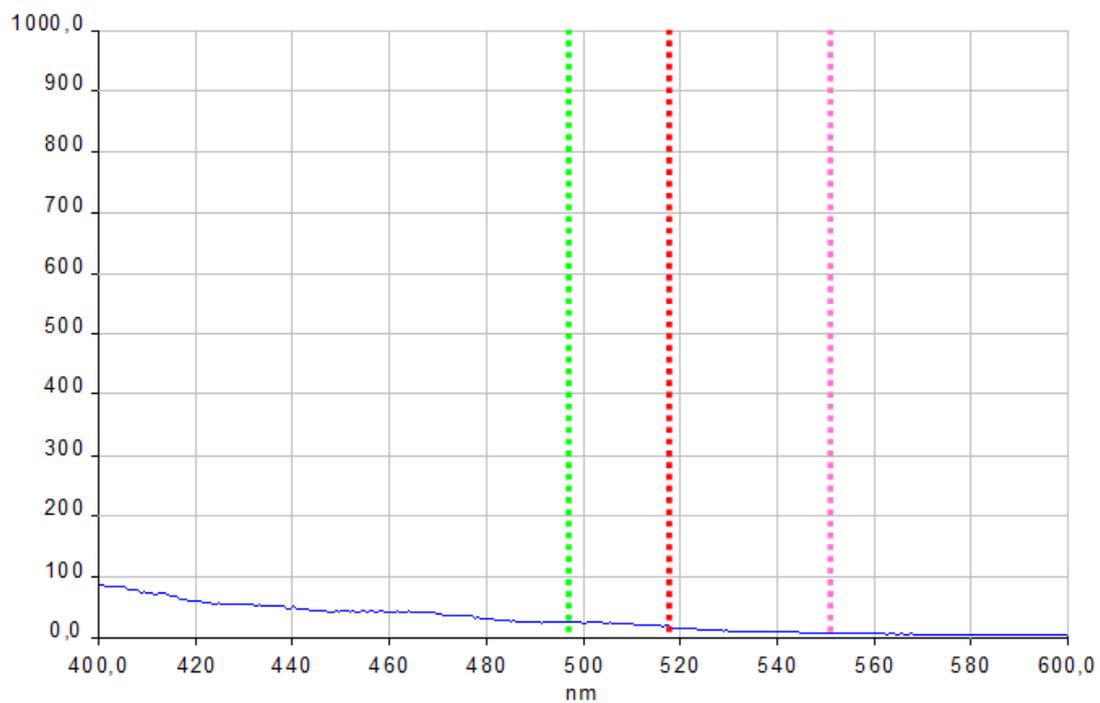
○ **Source « Gournier »**

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur les fluocapteurs de « **GOURNIER 14/04/14** »

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

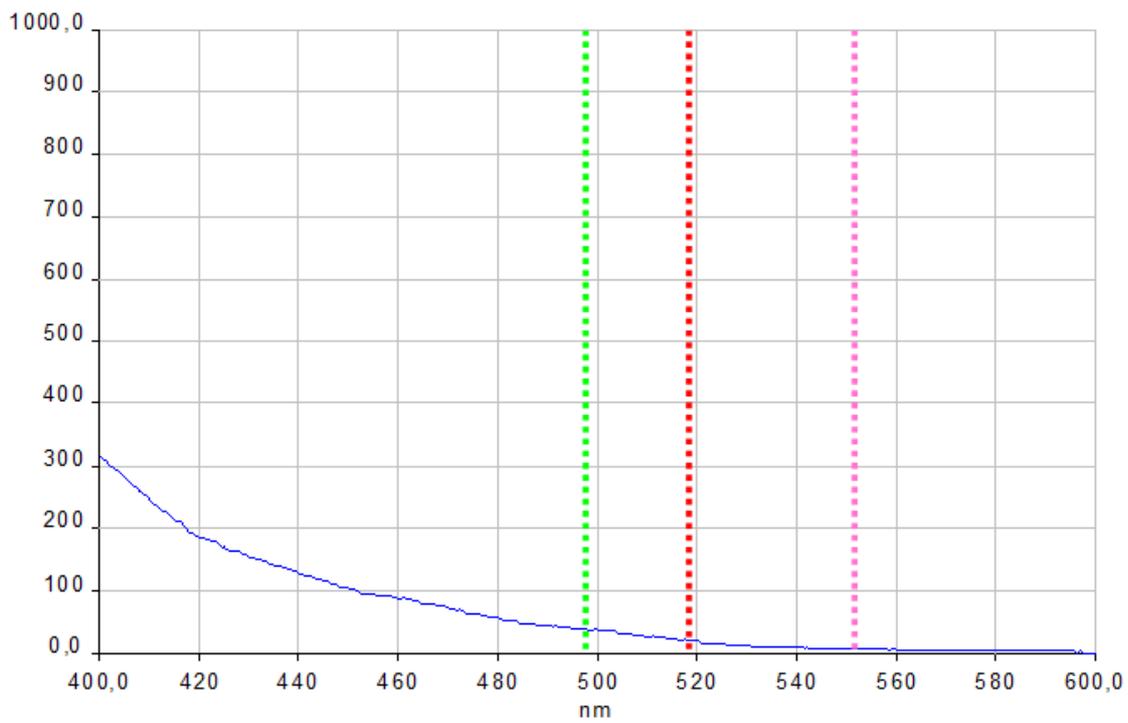


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

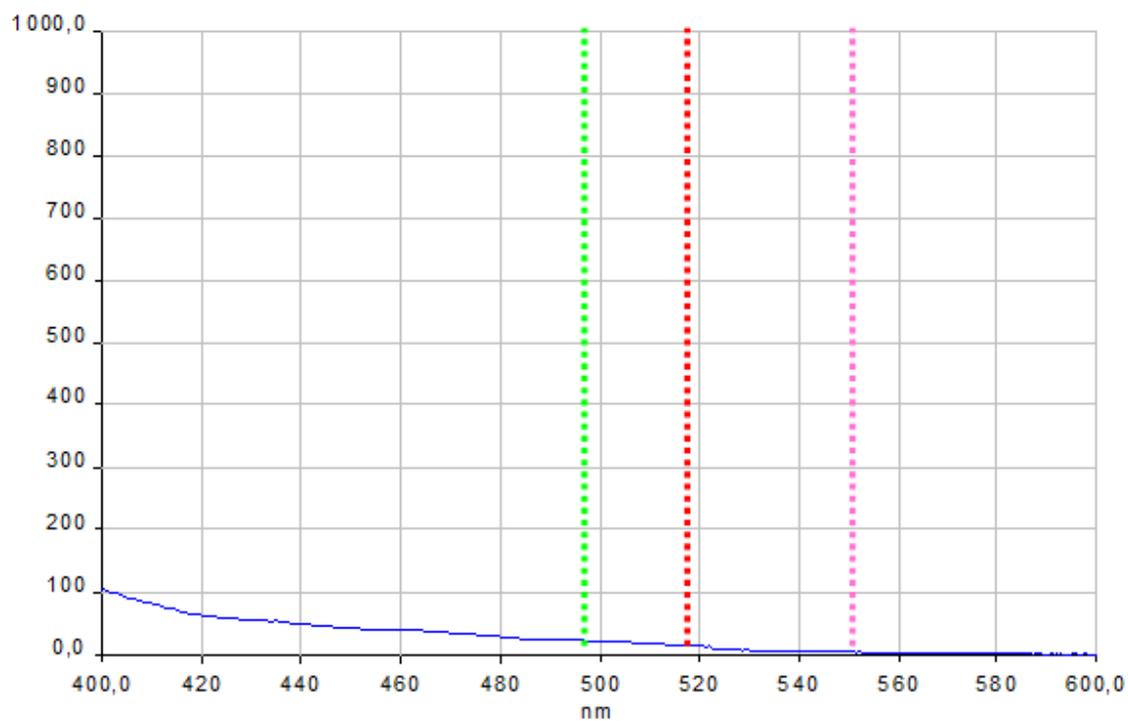




RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

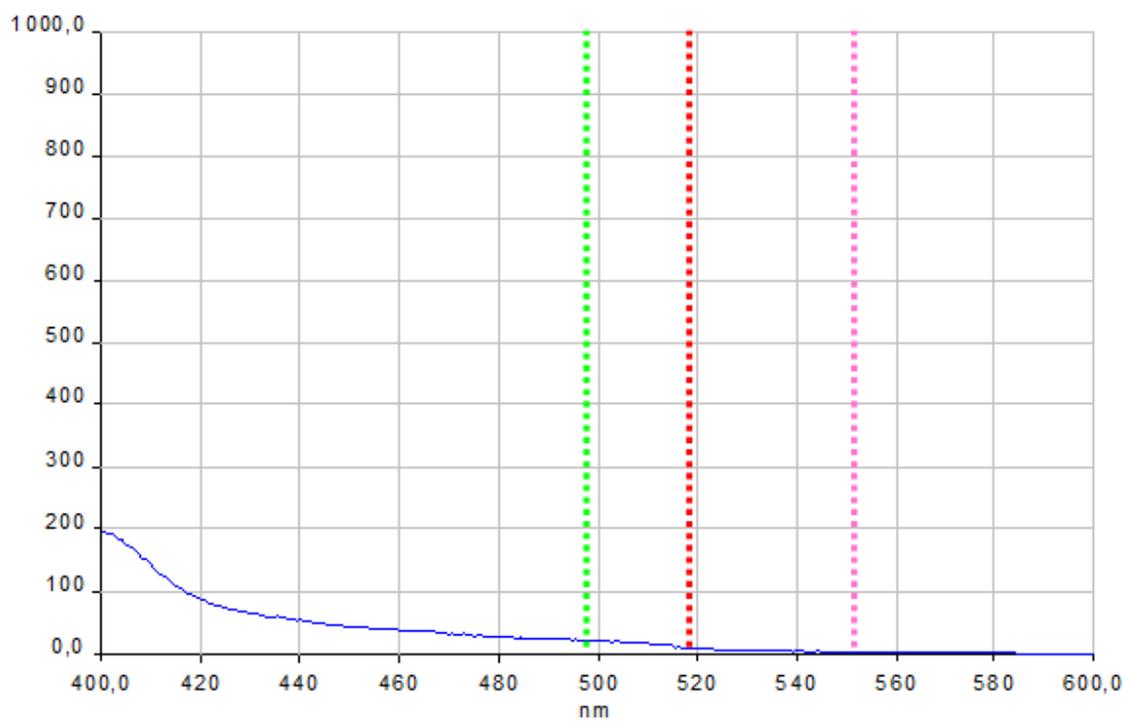


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





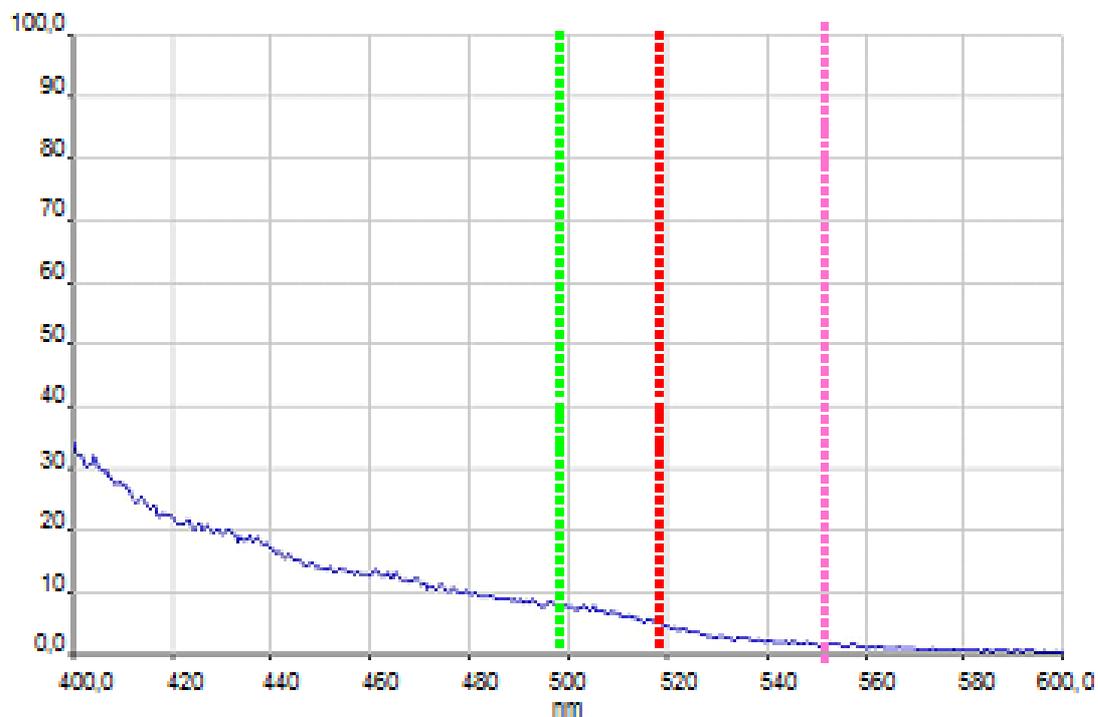
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyse réalisée sur l'échantillon d'eau de « GOURNIER » du :

14/04/14

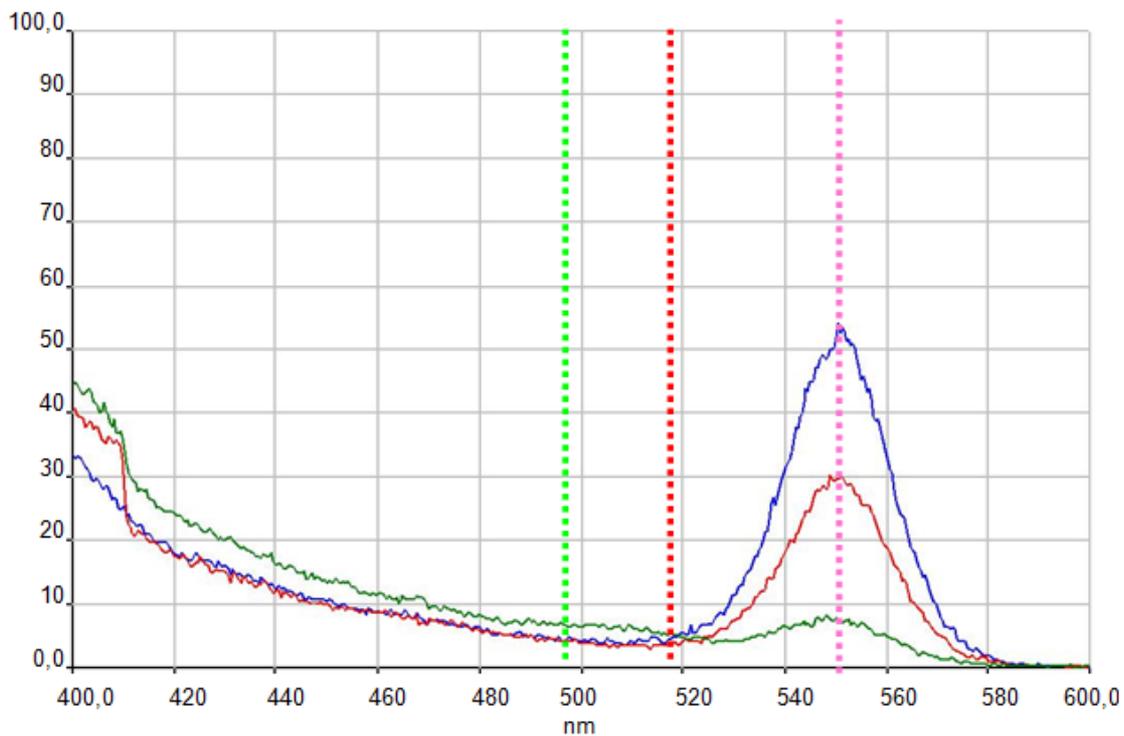
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « GOURNIER » du :

20/11/14 ————
 24/11/14 11h00 ————
 01/12/14 ————

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
20/11/2014		OUI	NON	∅	∅	1,60
24/11/2014	11h00	OUI	NON	∅	∅	0,91
01/12/2014		OUI	NON	∅	∅	0,21

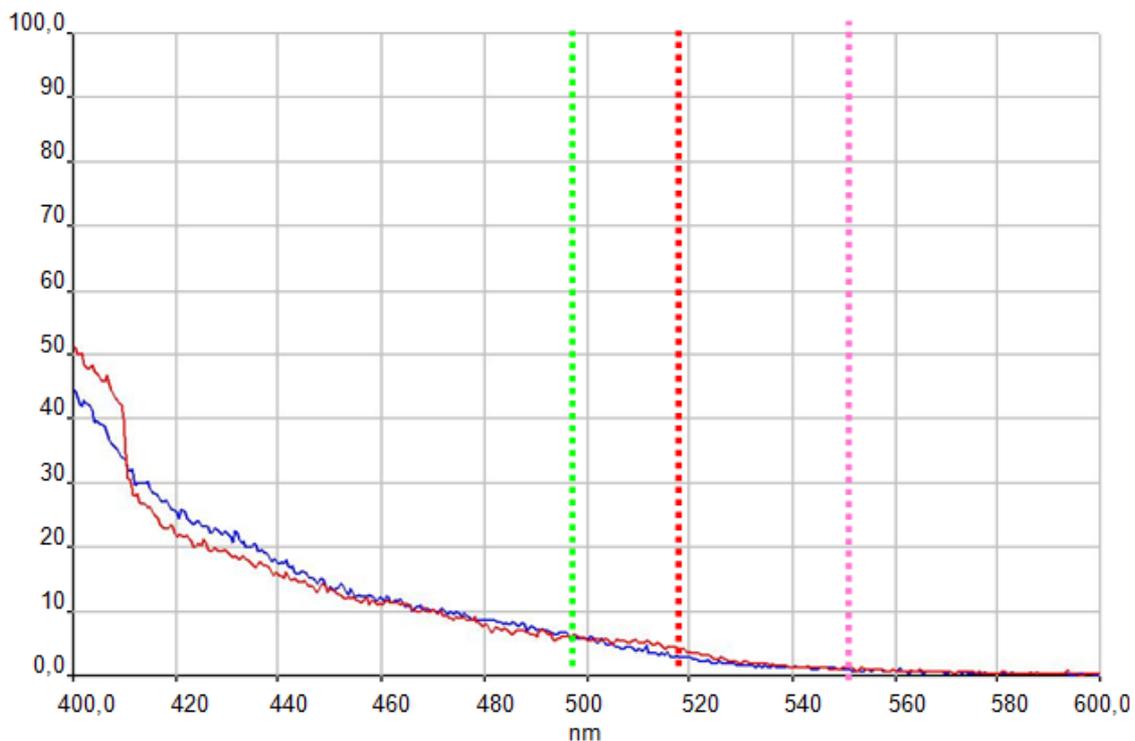
○ **Source « Ufoval »**

➔ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « **UFOVAL** » du :

20/11/14 10h00
01/12/14



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

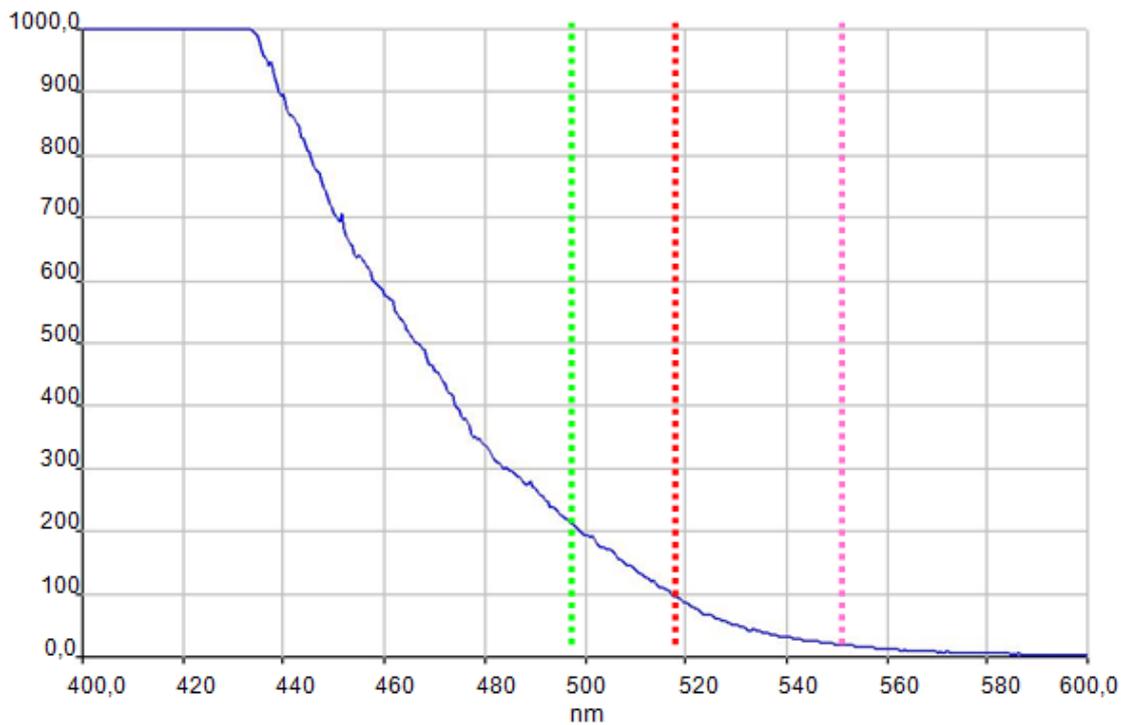


Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
20/11/2014	10h00	OUI	NON	∅	∅	∅
01/12/2014		OUI	NON	∅	∅	∅

○ **Source « Castors »**

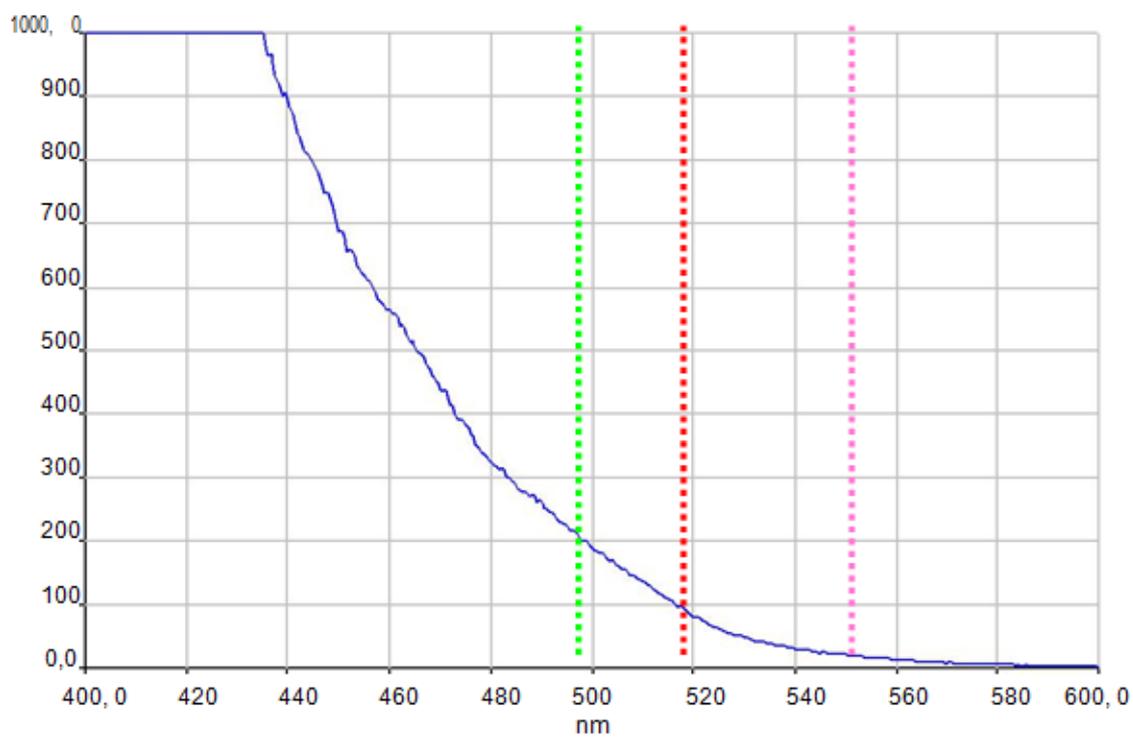
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Siphon castors Ardèche » du 07/02/15

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



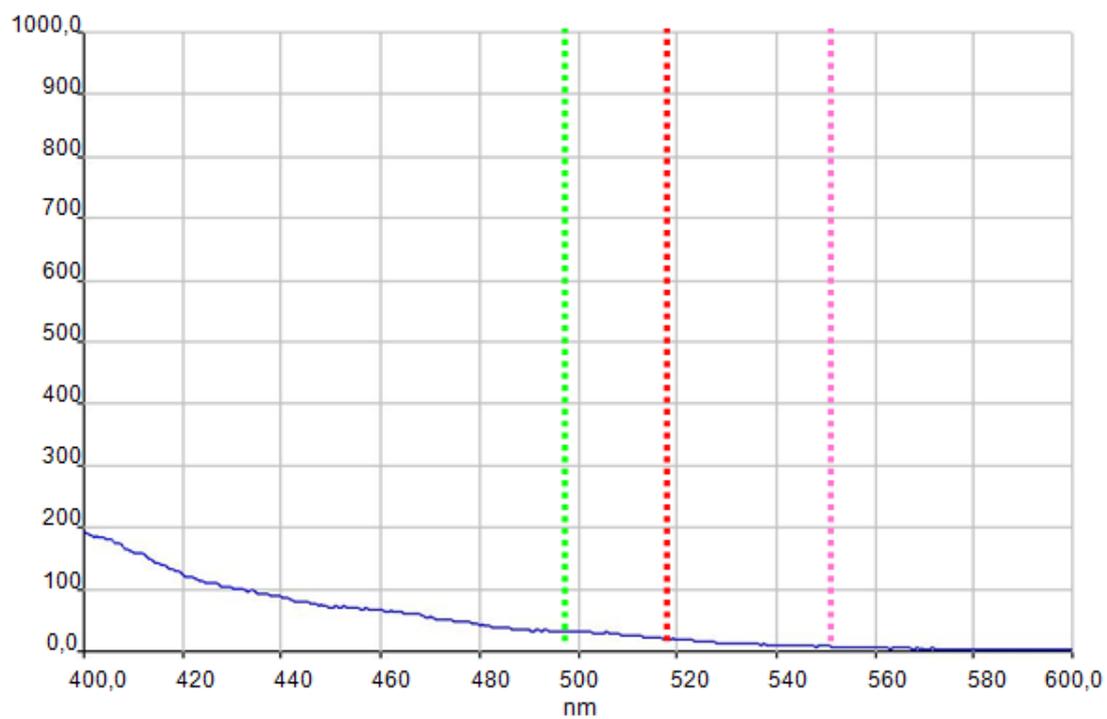
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Siphon castors Ardèche » du 07/02/15

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

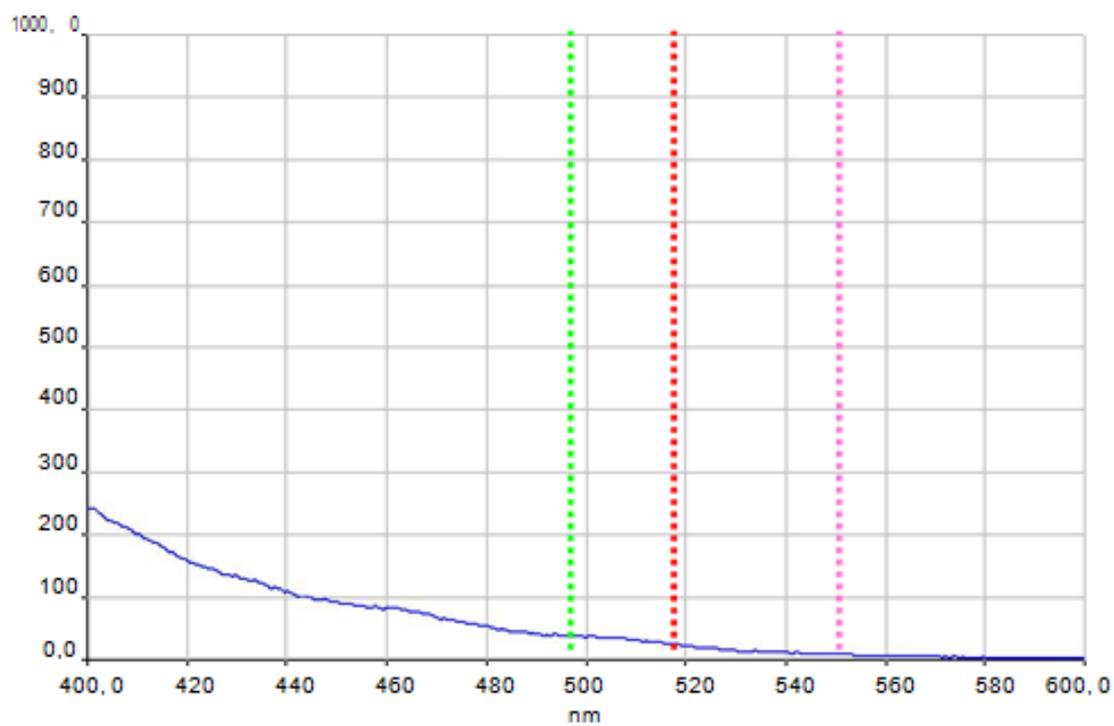


→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Castors » du 28/03/15

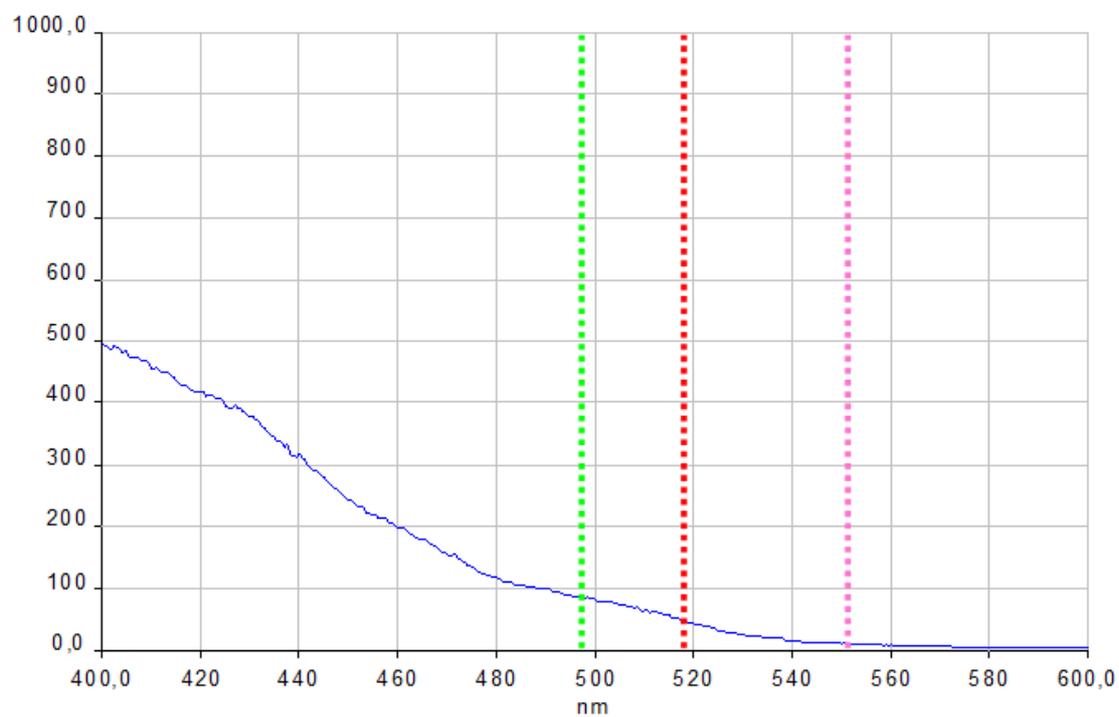
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



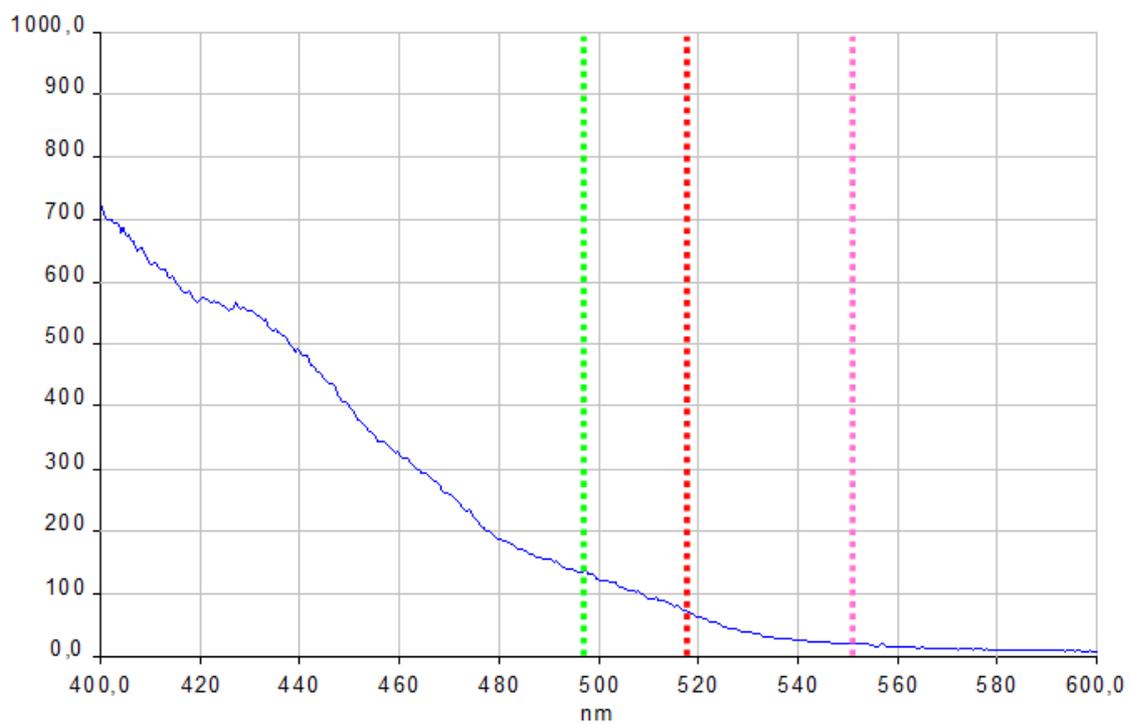
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



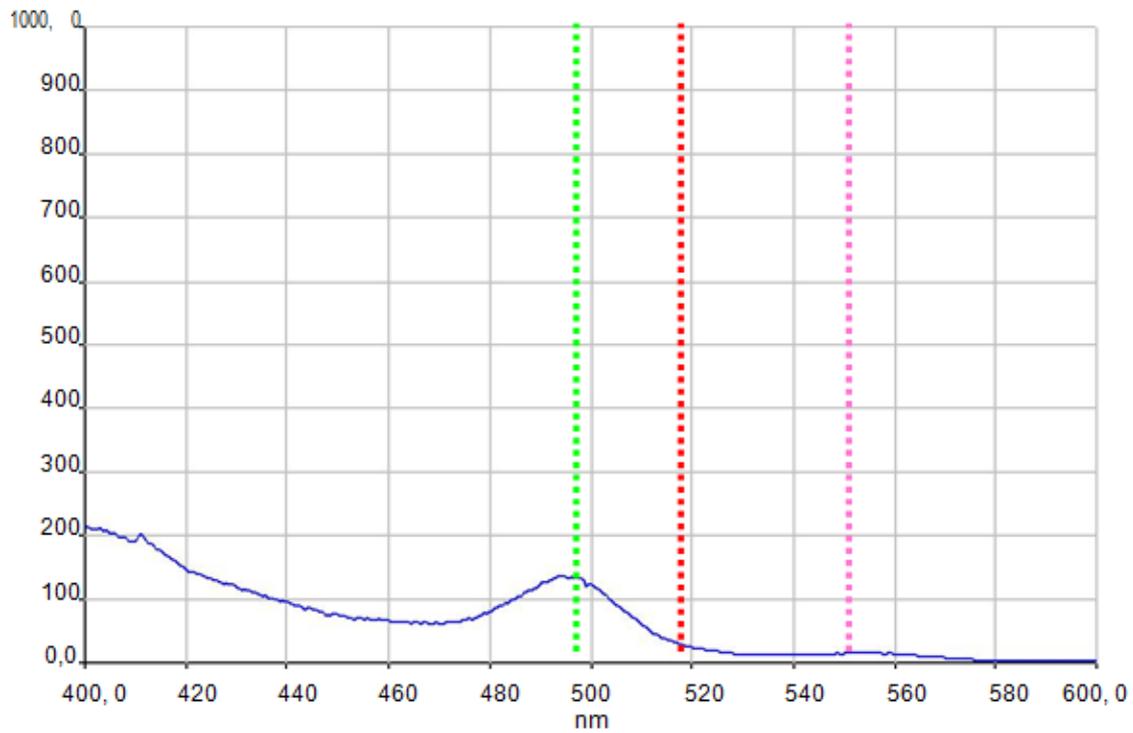
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



○ Forage « Pavillon »

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Forage pavillon » du 11/12/14 au 18/02/15

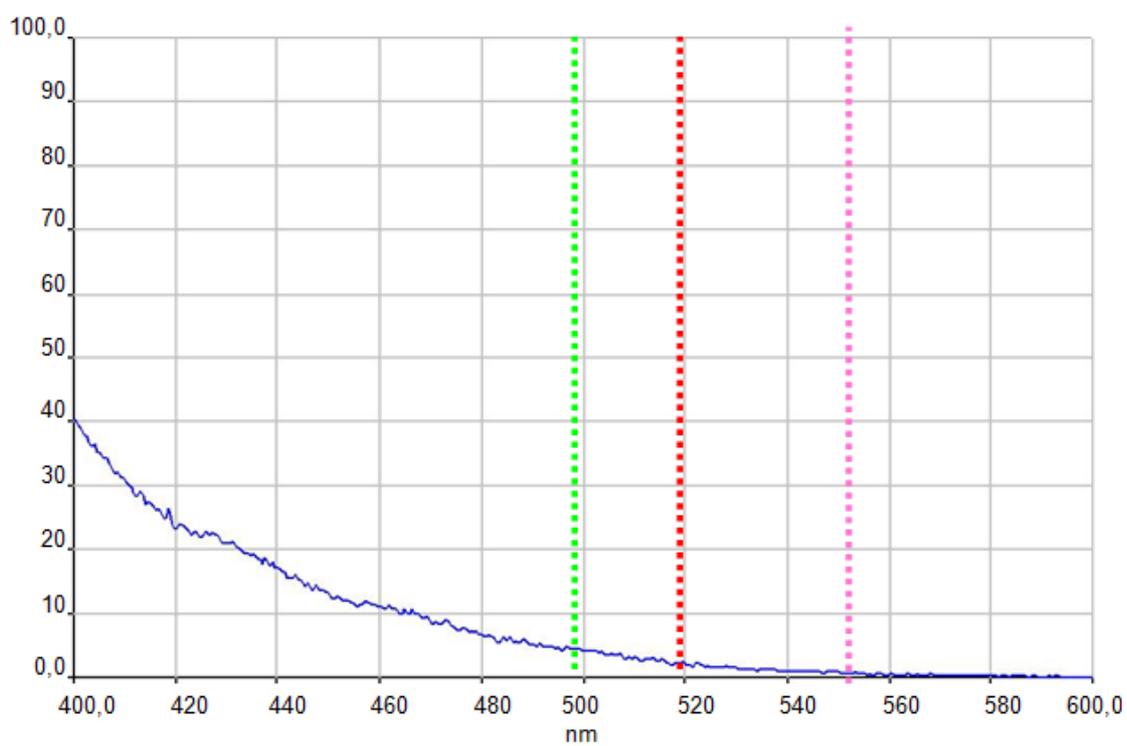
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyse réalisée sur l'échantillon d'eau de « FORAGE DU PAVILLON » :



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyse réalisée sur les échantillons d'eau de « **FORAGE DU PAVILLON** »

CONCENTRATION EN COLORANT

Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
		OUI	NON	∅	∅	∅

∅ Absence de colorant

→ EAU : Analyse réalisée sur les échantillons d'eau de :

CONCENTRATION EN COLORANT

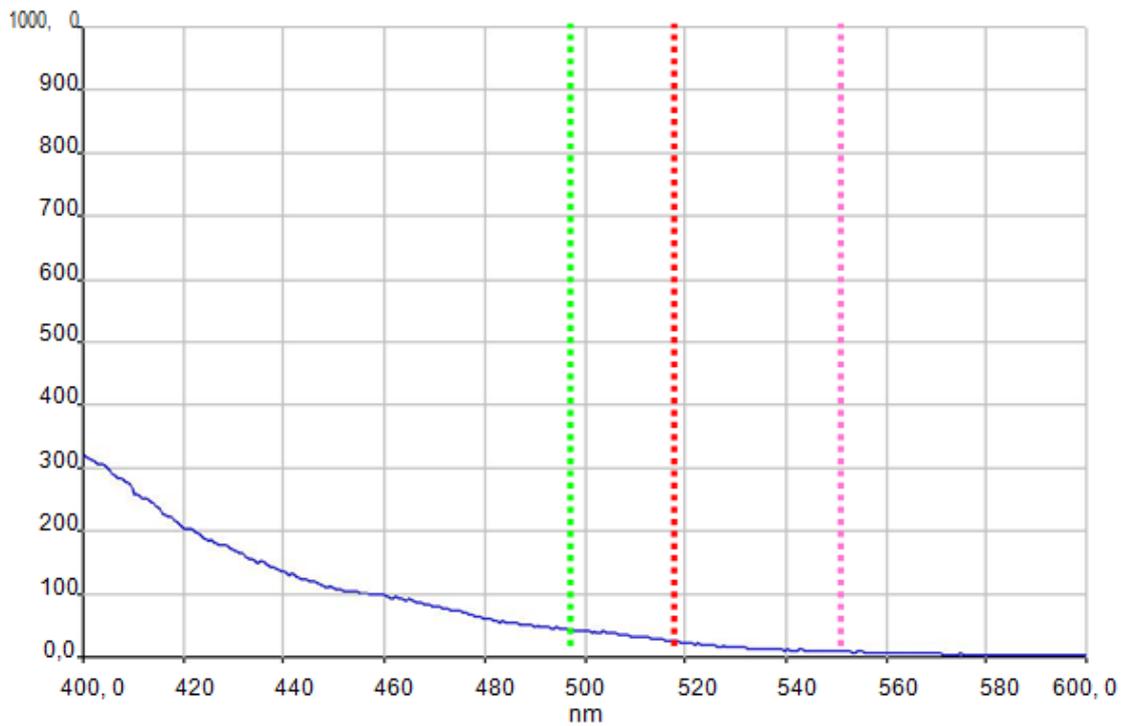
Dénomination	Date	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
Forage du pavillon	11/12/2014	OUI	NON	∅	∅	∅

∅ Absence de colorant

○ **Rivière « Ardèche »**

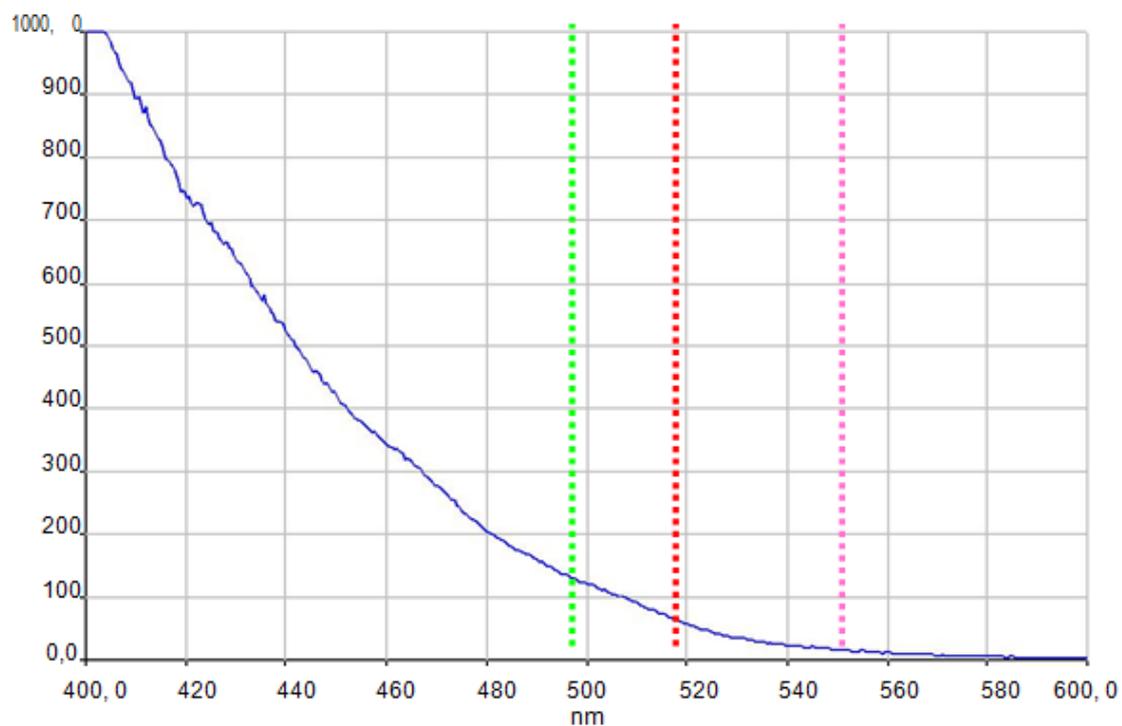
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **Tourne goul du pont** » du 03/01/15

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « Tourne goul de la tannerie »
du 03/01/15

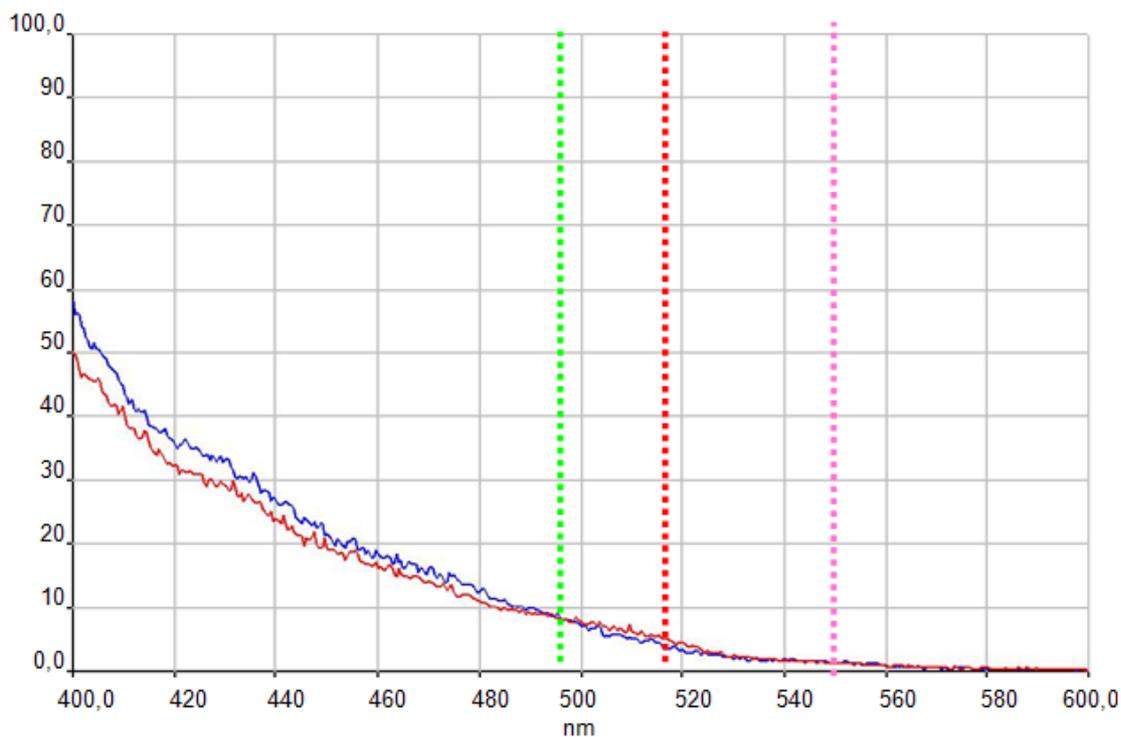
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « SAUZE ARDECHE » du :

21/11/14 ————
 24/11/14 ————

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
21/11/2014		OUI	NON	∅	∅	∅
24/11/2014		OUI	NON	∅	∅	∅

→ EAU : Analyse réalisée sur les échantillons d'eau de :

CONCENTRATION EN COLORANT

Dénomination	Date	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
Goule du pont / pont (tourne) (noir)	03/01/2015	OUI	NON	∅	∅	∅
Tannerie (tourne) Goule de la Tannerie blanc	03/01/2015	OUI	NON	∅	∅	∅

∅ Absence de colorant

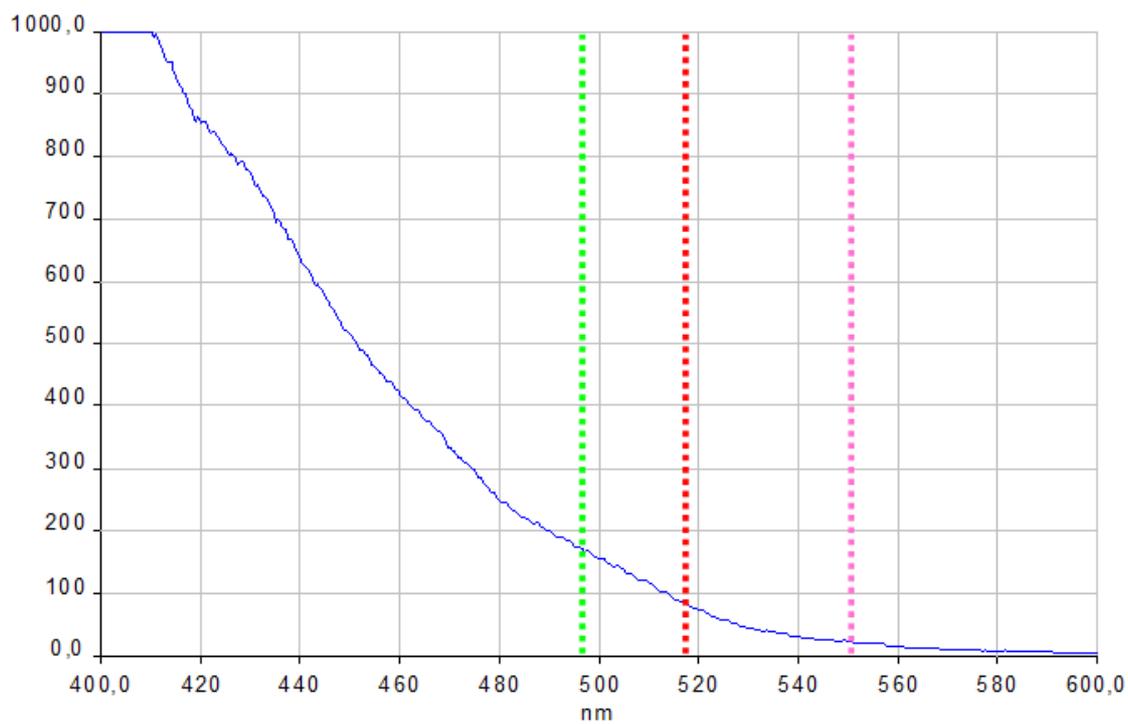
- Bassin versant de la Cèze

- Source « Foulatier »

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « FOULATIER 19/06/14 »

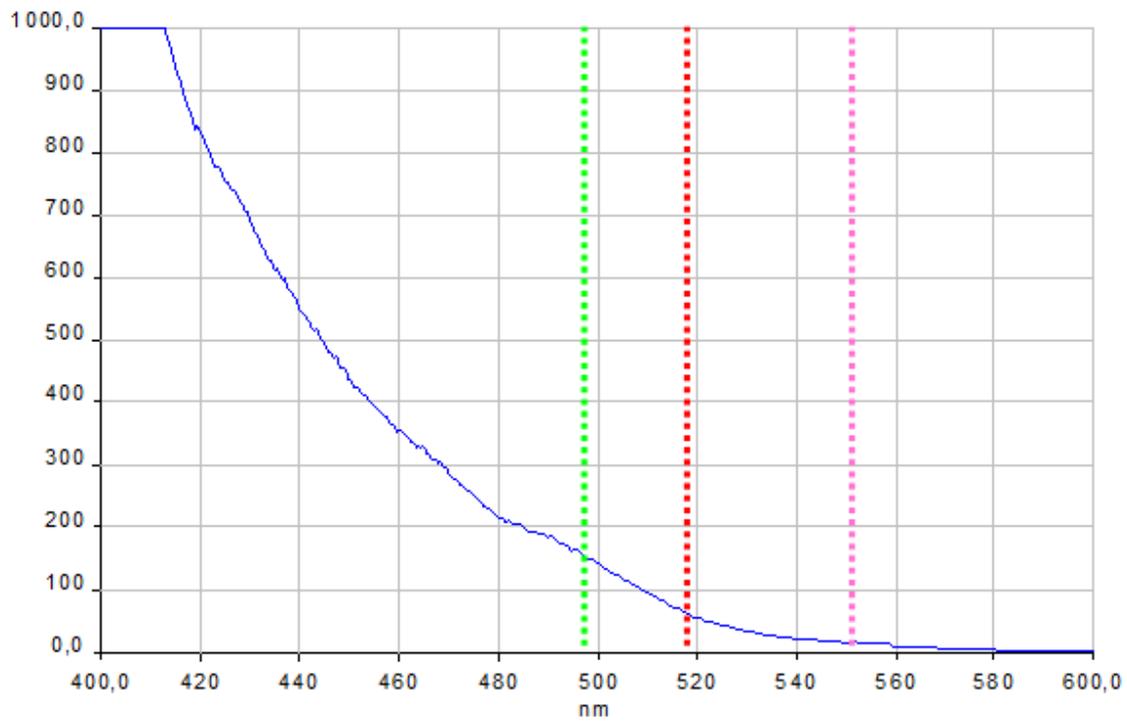


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

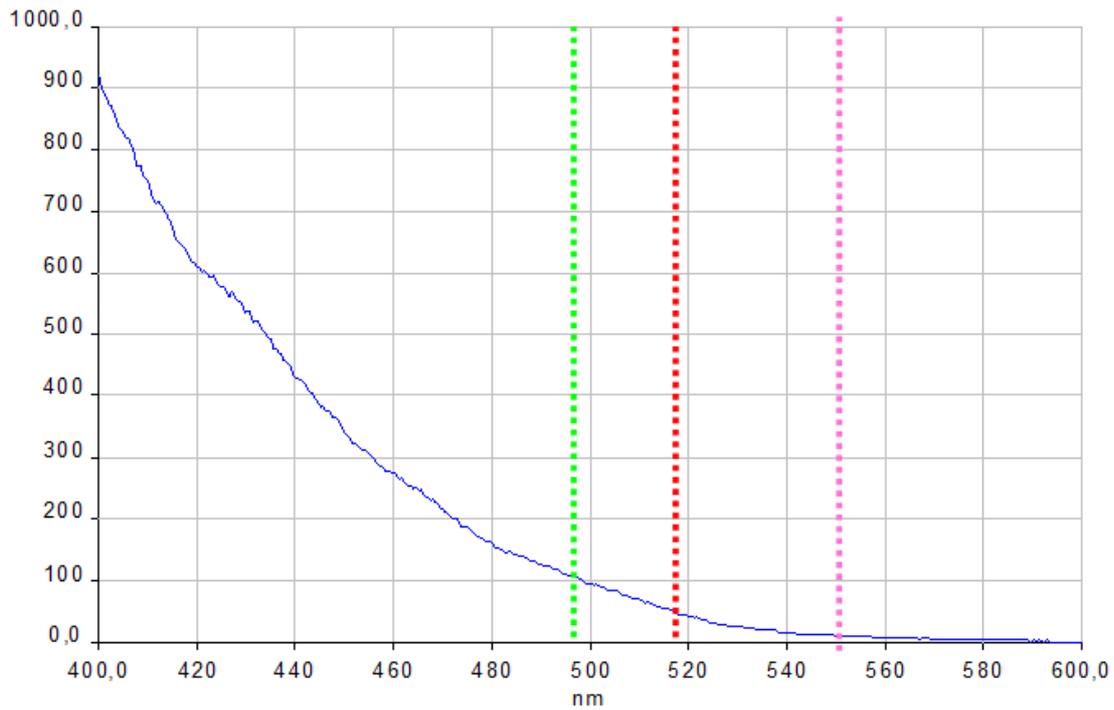


○ Source « Font Canet »

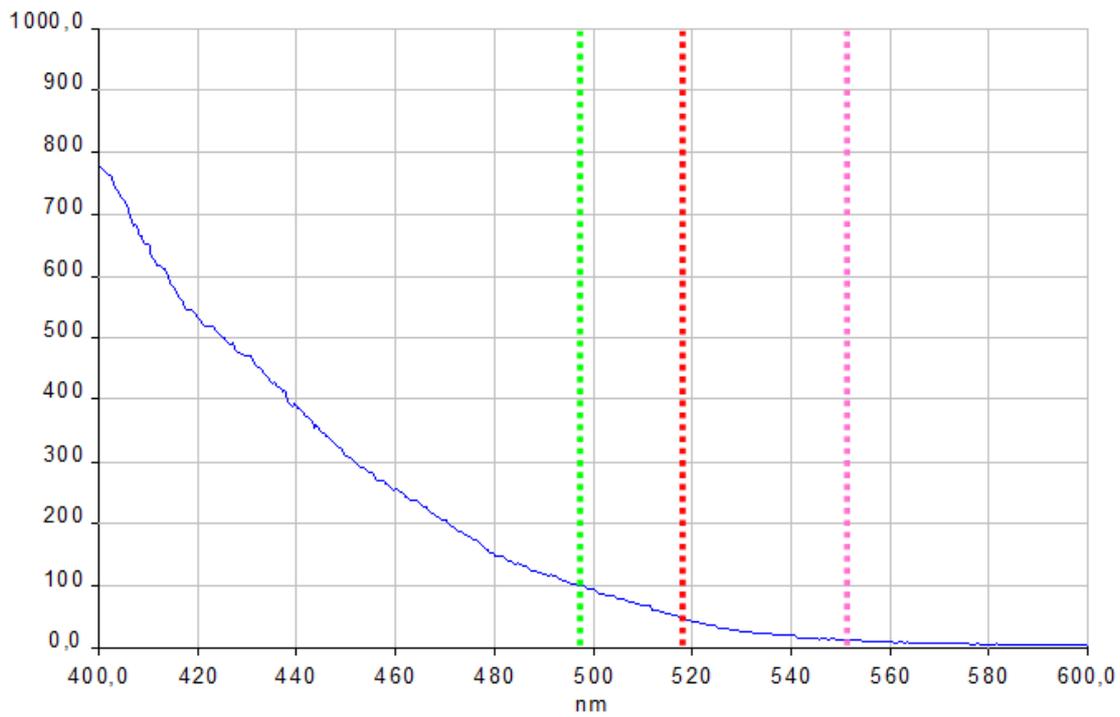
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « CANET 06/06/2014 »



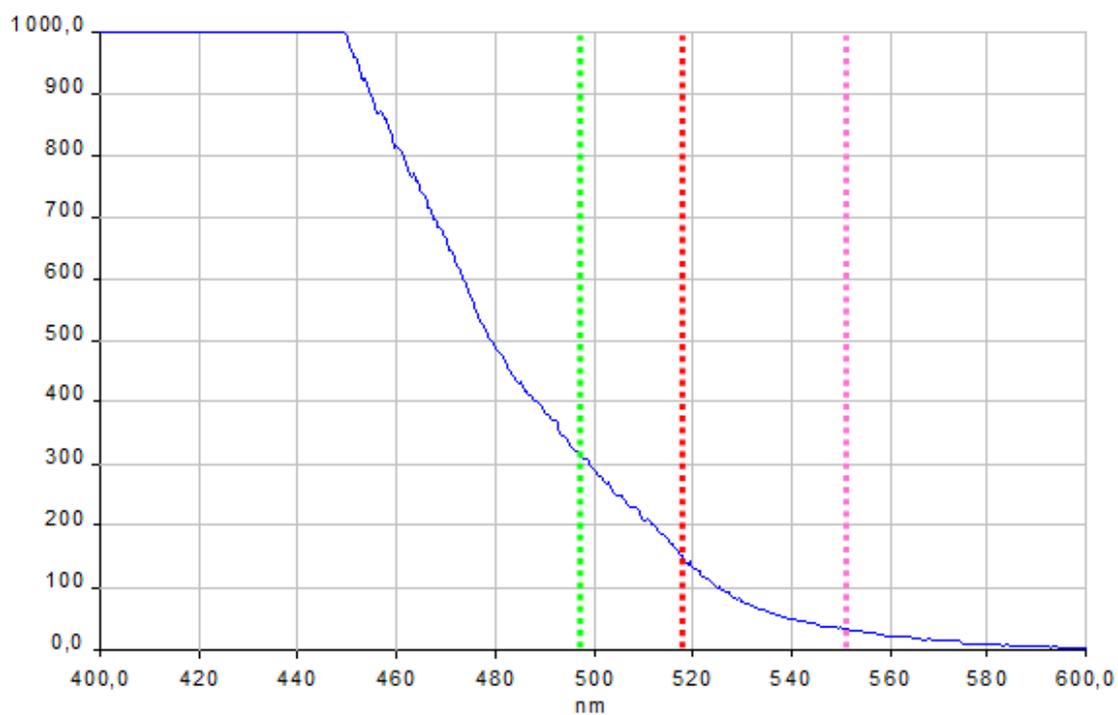
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



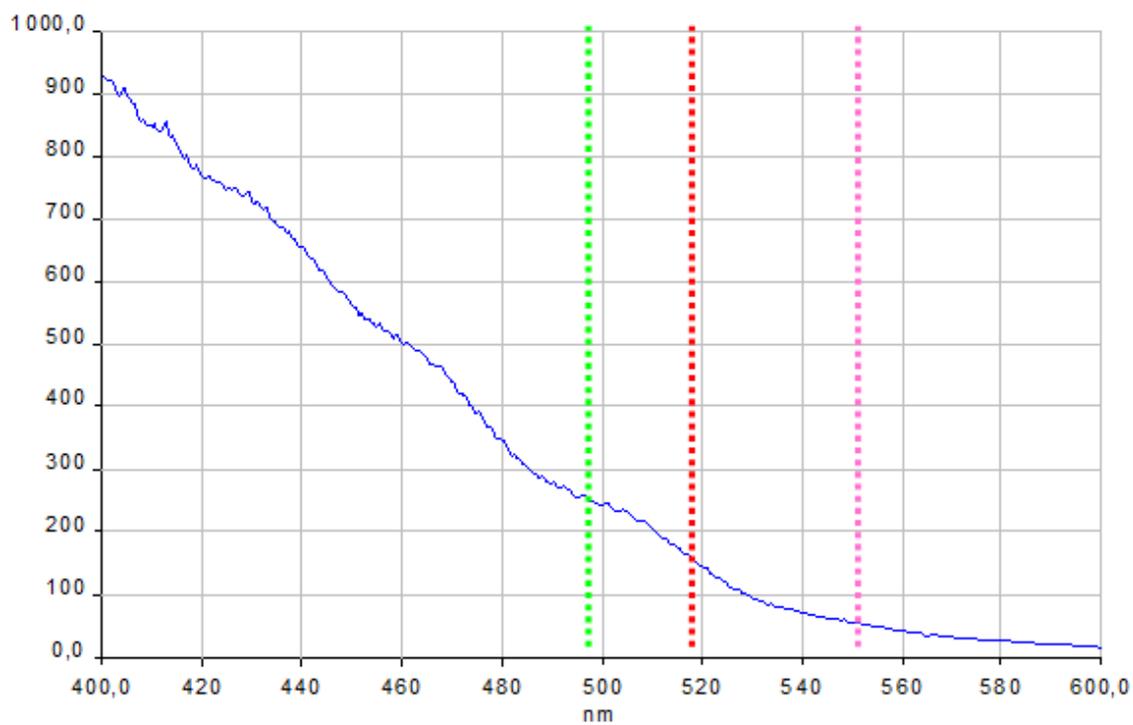
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

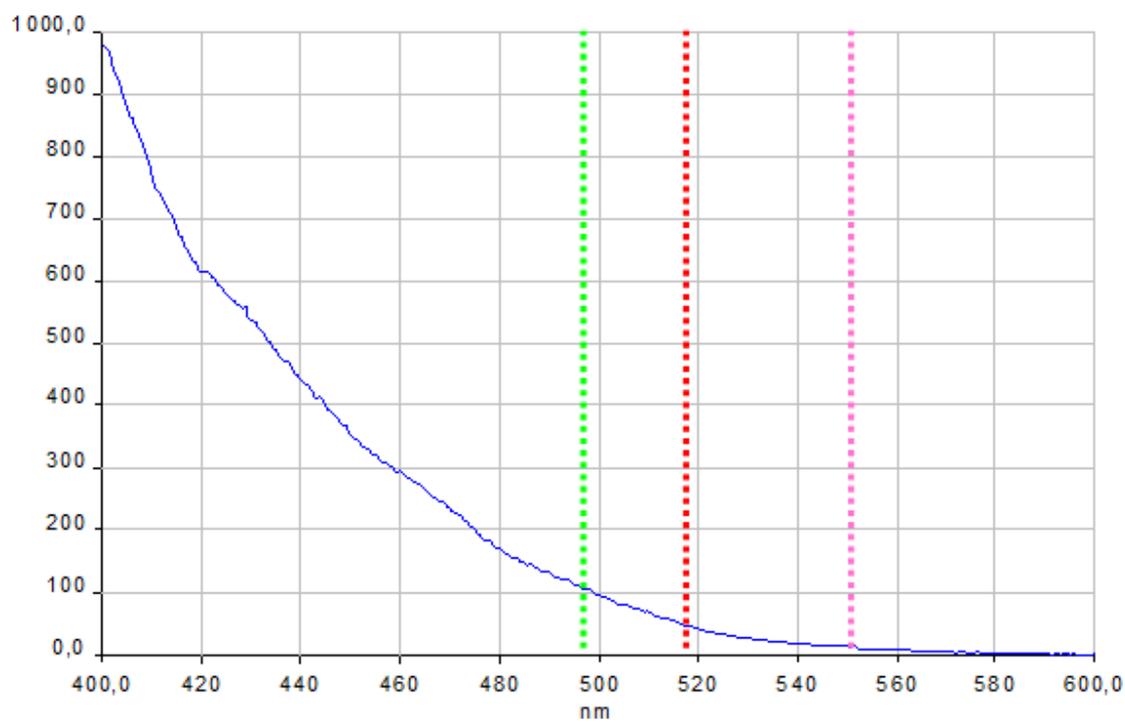


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





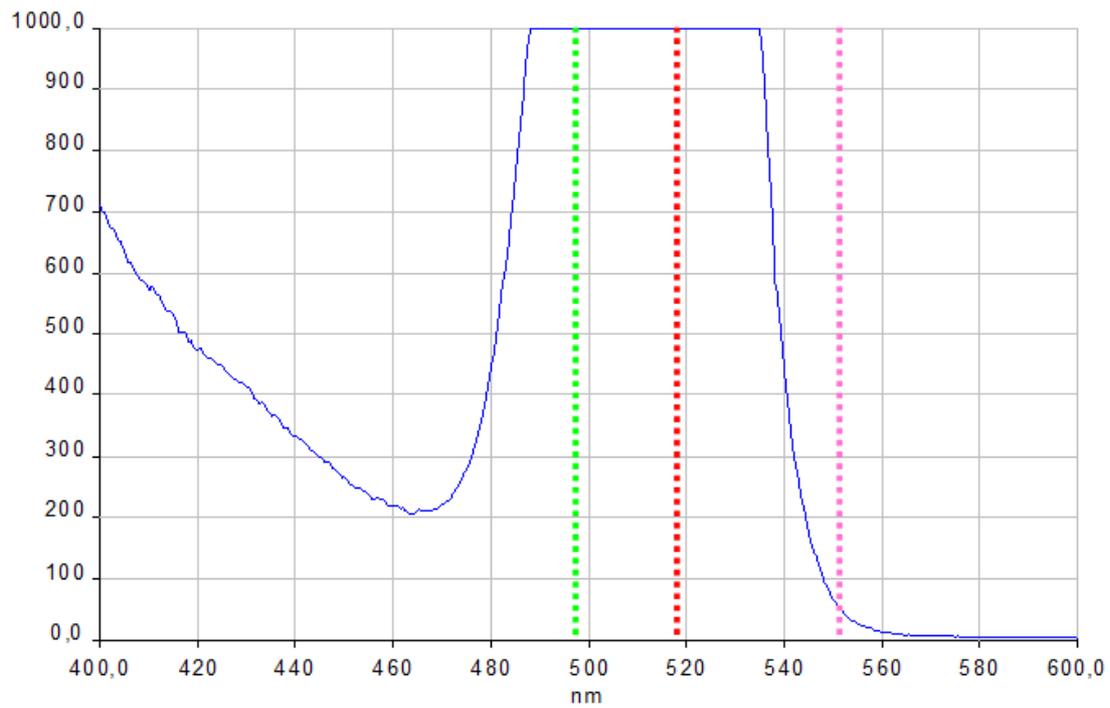
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



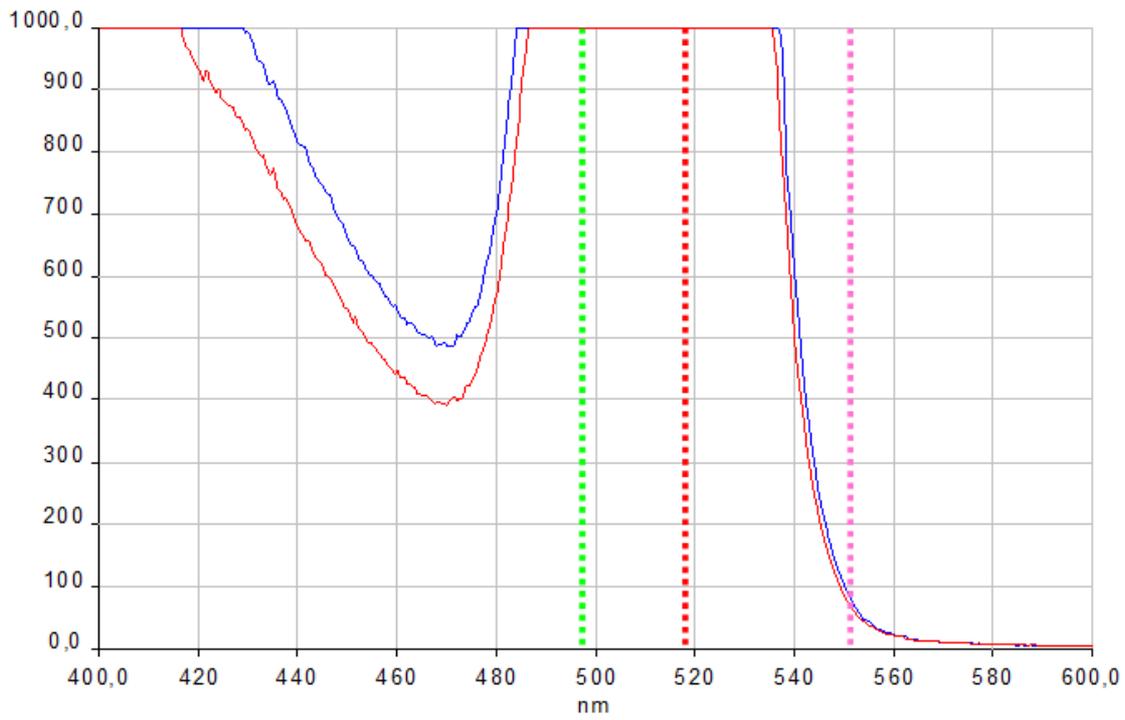
○ **Source « Monteil »**

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **MONTEIL 10/06/14** »

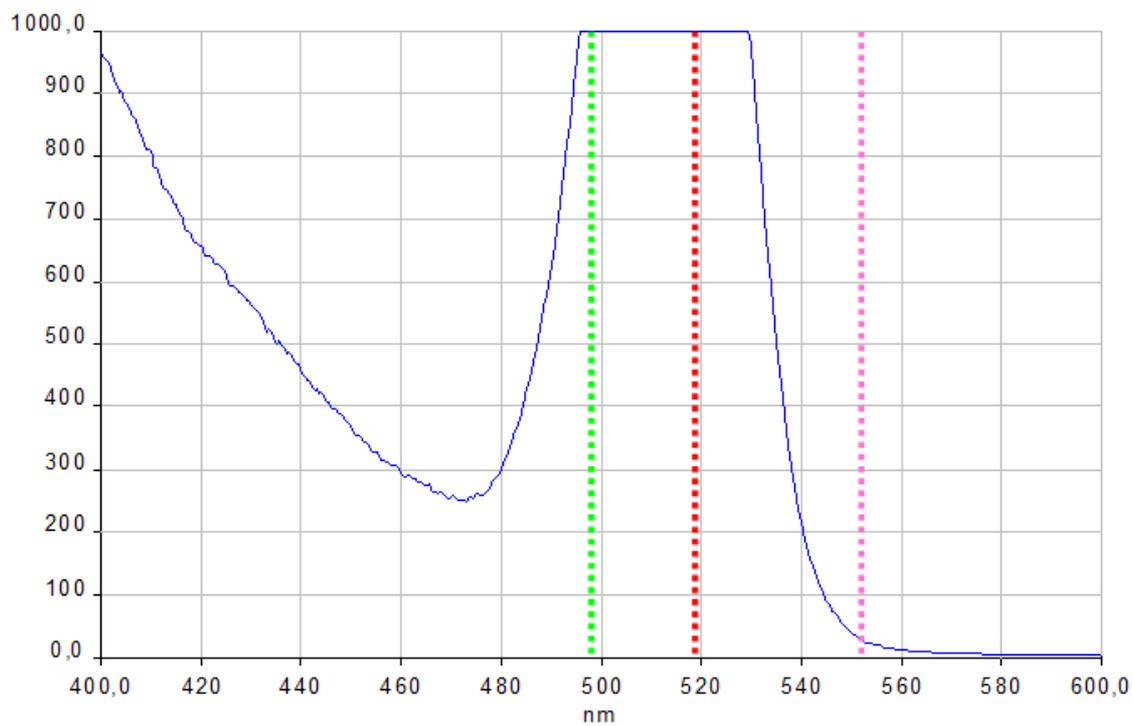
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

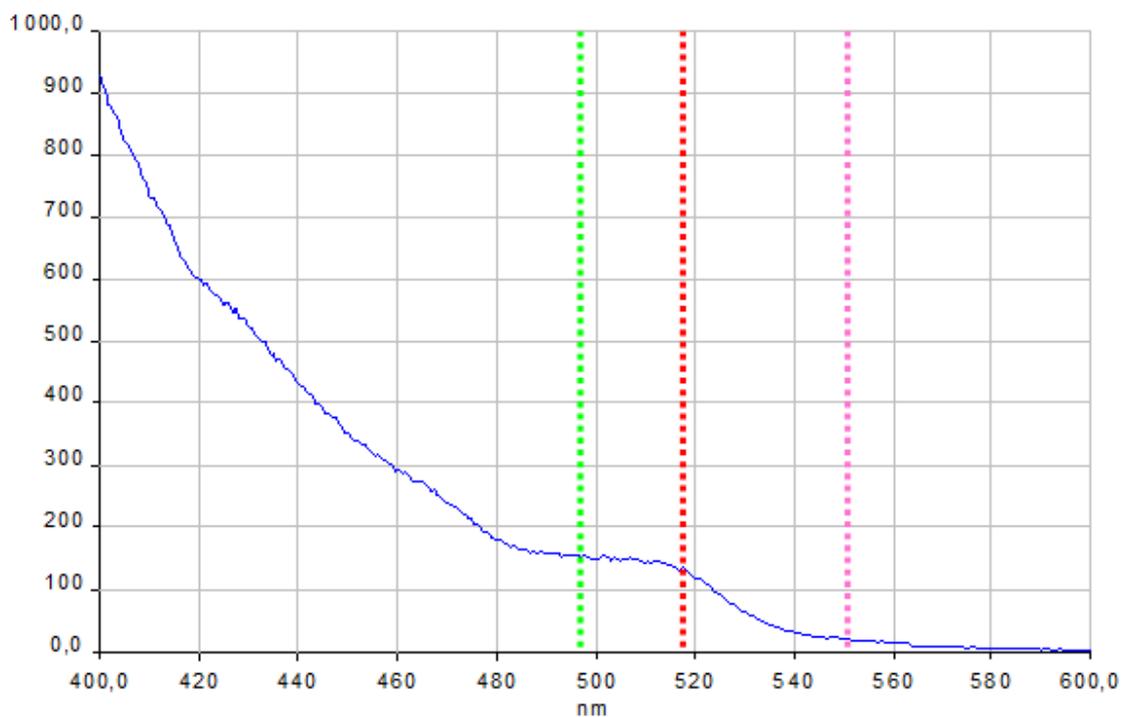


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





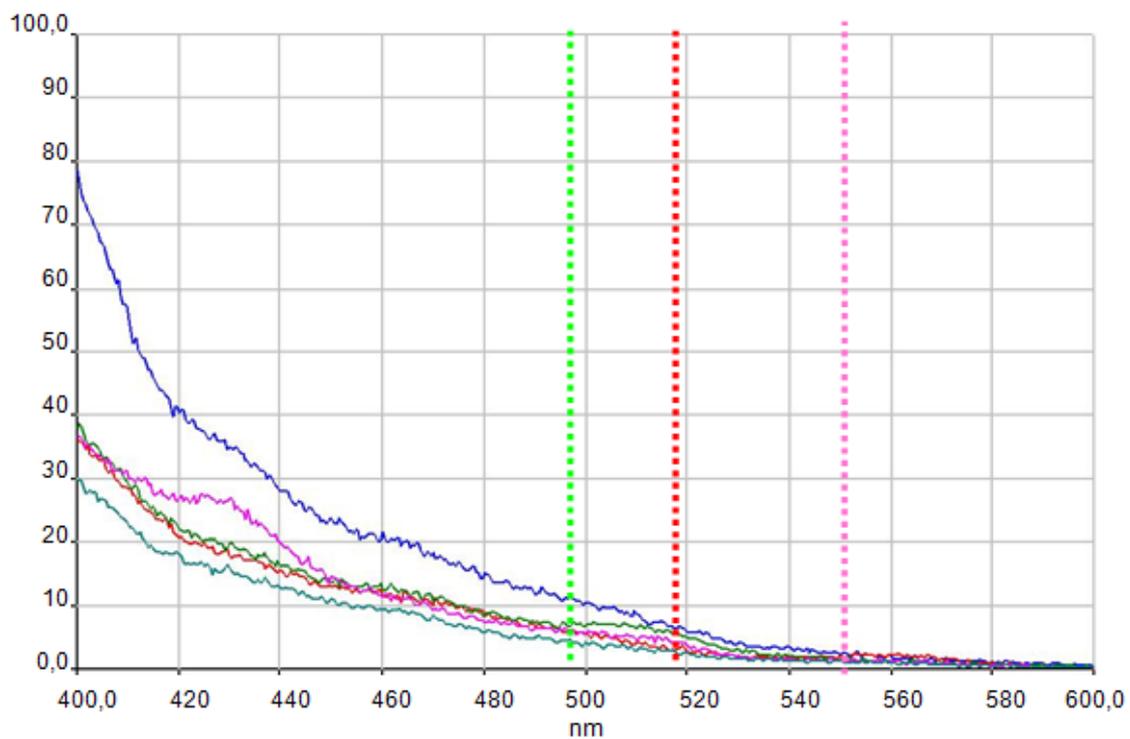
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « MONTEIL » du :

03/04/14	—
13/04/14	—
16/06/14	—
22/06/14	—
08/07/14	—

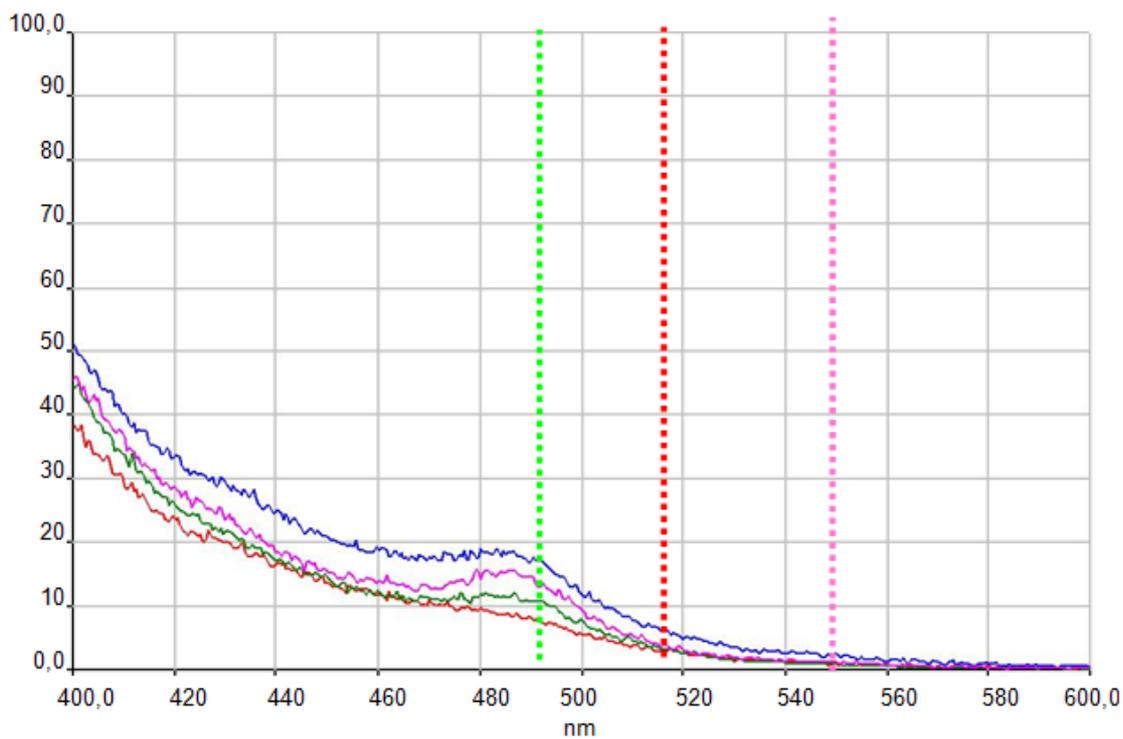
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « MONTEIL » du :

18/11/14 14h00 —
 21/11/14 10h00 —
 26/11/14 —
 05/12/14 —

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



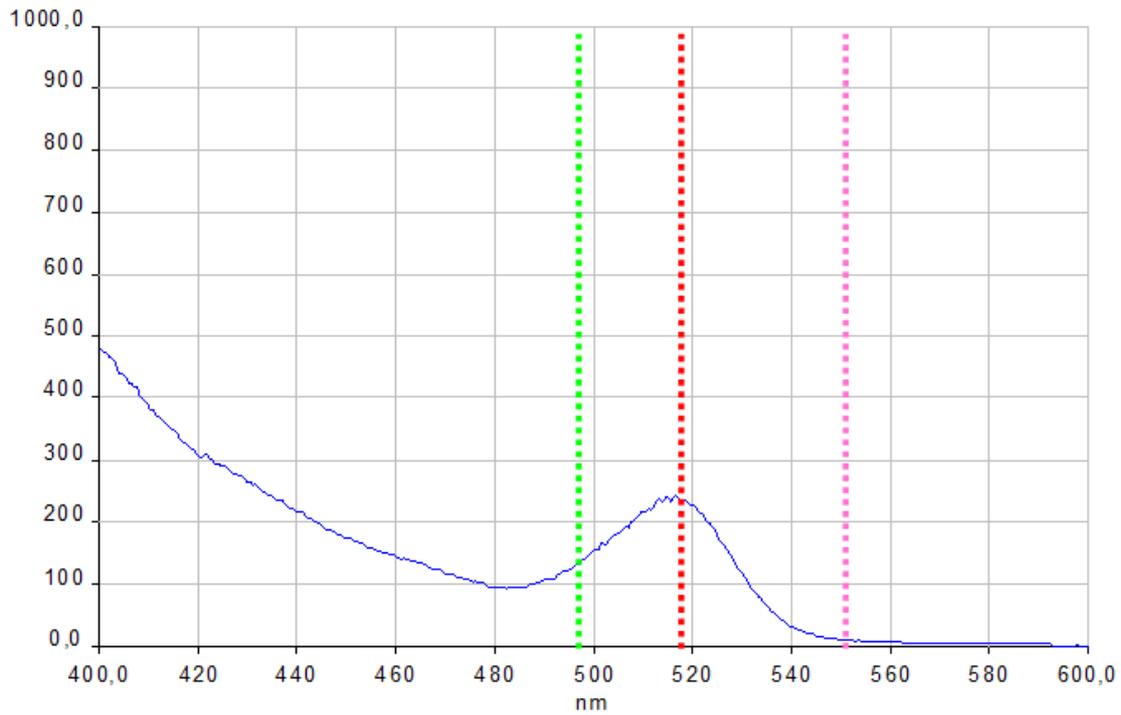
Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
18/11/2014	14h00	OUI	NON	0,09	∅	∅
21/11/2014	10h00	OUI	NON	∅	∅	∅
26/11/2014		OUI	NON	0,06	∅	∅
05/12/2014		OUI	NON	0,08	∅	∅

○ Source « Baumes »

→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « BAUMES 16/06/14 »

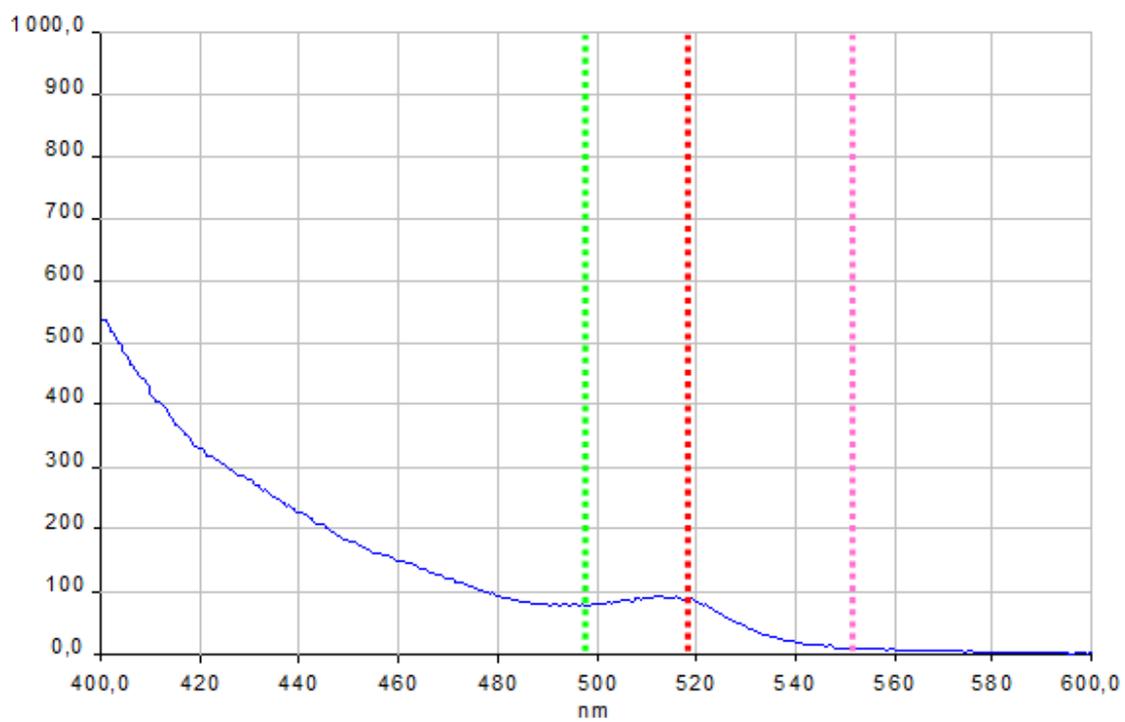


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

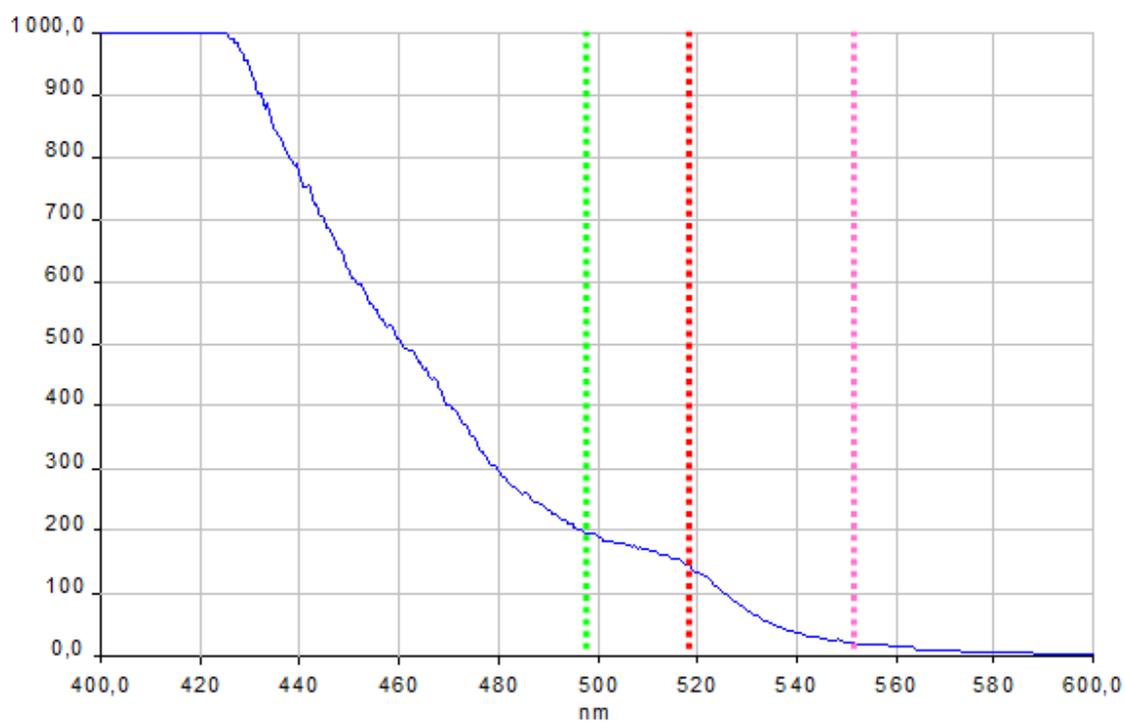


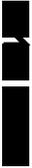


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

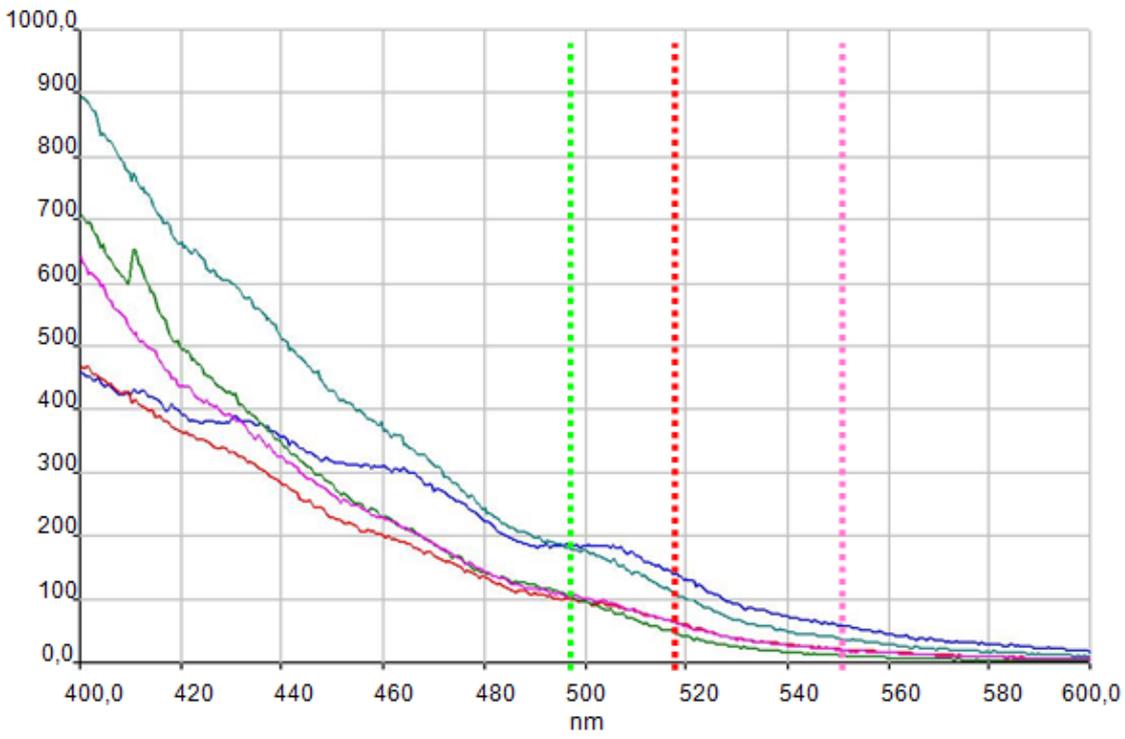




FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur les fluocapteurs de « BAUMES » du :

22/09/14 17h00 21/11/14 11h00 26/11/14 05/12/14 11/12/14

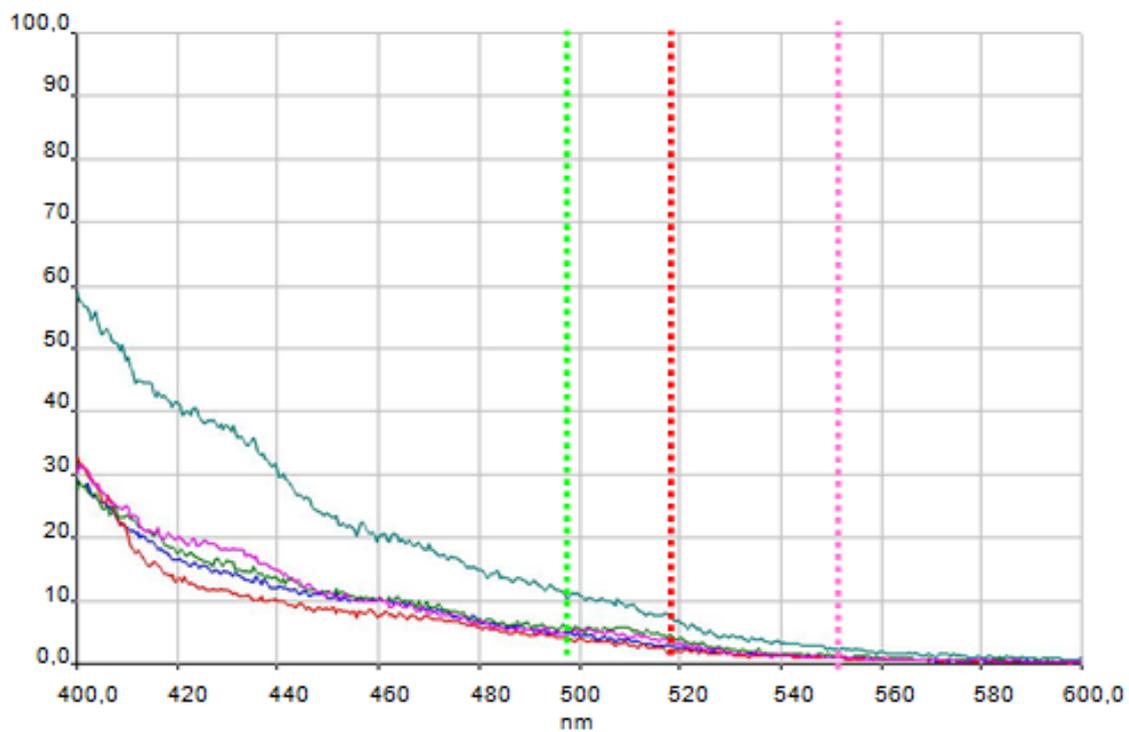
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « BAUMES » du :

03/04/14	—
13/04/14	—
16/06/14	—
22/06/14	—
26/06/14	—

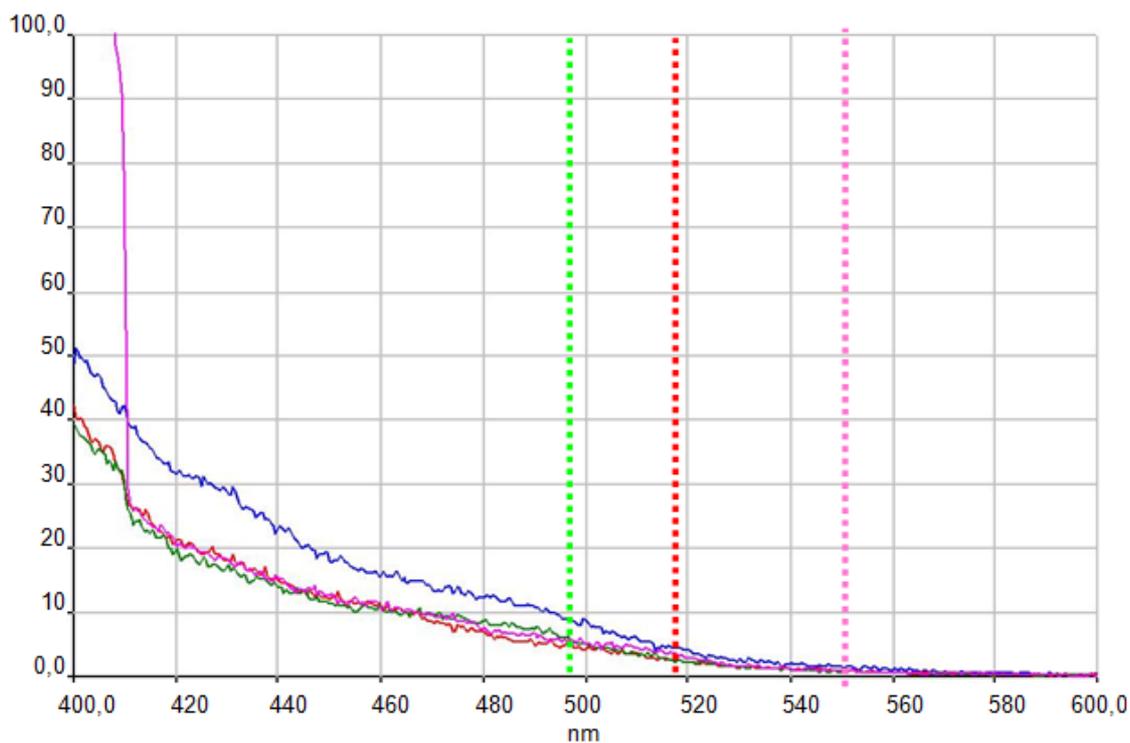
RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



→ EAU : Analyses réalisées sur les échantillons d'eaux de « BAUMES » du :

18/11/14 ————
 21/11/14 ————
 26/11/14 ————
 05/12/14 ————

RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
18/11/2014	15h00	OUI	NON	∅	∅	∅
21/11/2014	11h00	OUI	NON	∅	∅	∅
26/11/2014		OUI	NON	∅	∅	∅
05/12/2014		OUI	NON	∅	∅	∅
08/07/2014		OUI	NON	∅	∅	∅

→ EAU : Analyse réalisée sur les échantillons d'eau de « BAUMES »

CONCENTRATION EN COLORANT

Date	Heure	Analysé	Dilué	Concentration en Fluorescéine (µg/L)	Concentration en Eosine (µg/L)	Concentration en Rhodamine (µg/L)
18/11/2014	15h00	OUI	NON	∅	∅	∅
21/11/2014	11h00	OUI	NON	∅	∅	∅
26/11/2014		OUI	NON	∅	∅	∅
05/12/2014		OUI	NON	∅	∅	∅
08/07/2014		OUI	NON	∅	∅	∅

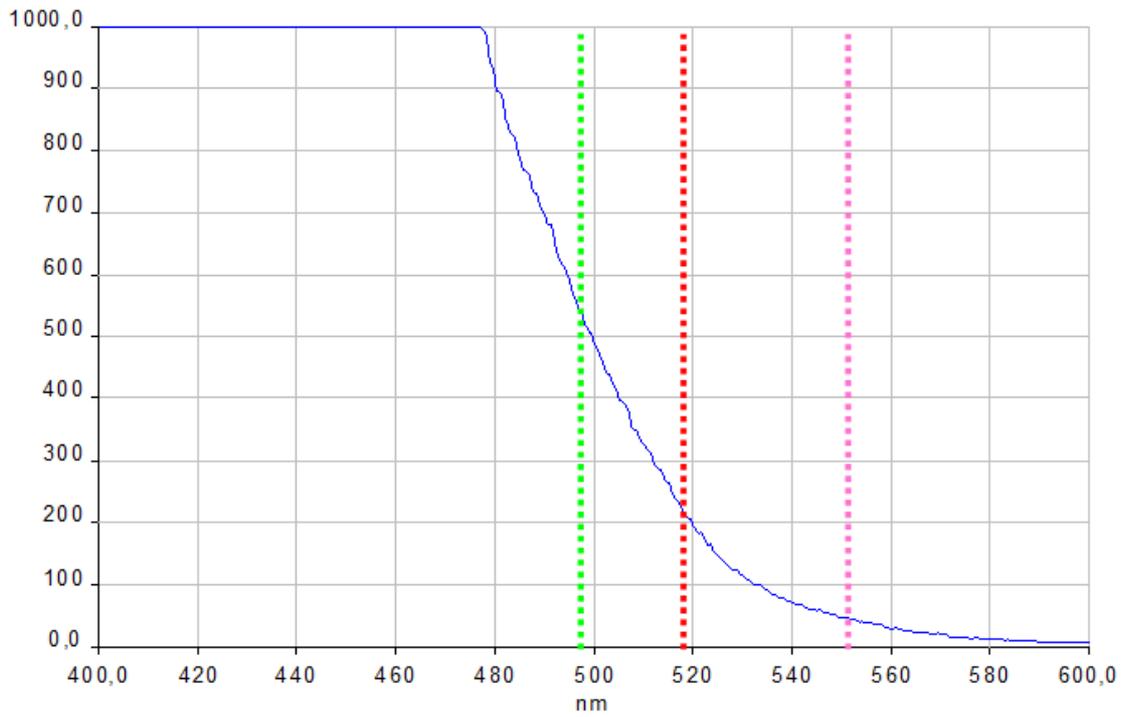
∅ Absence de colorant

○ **Affluent « Claysse »**

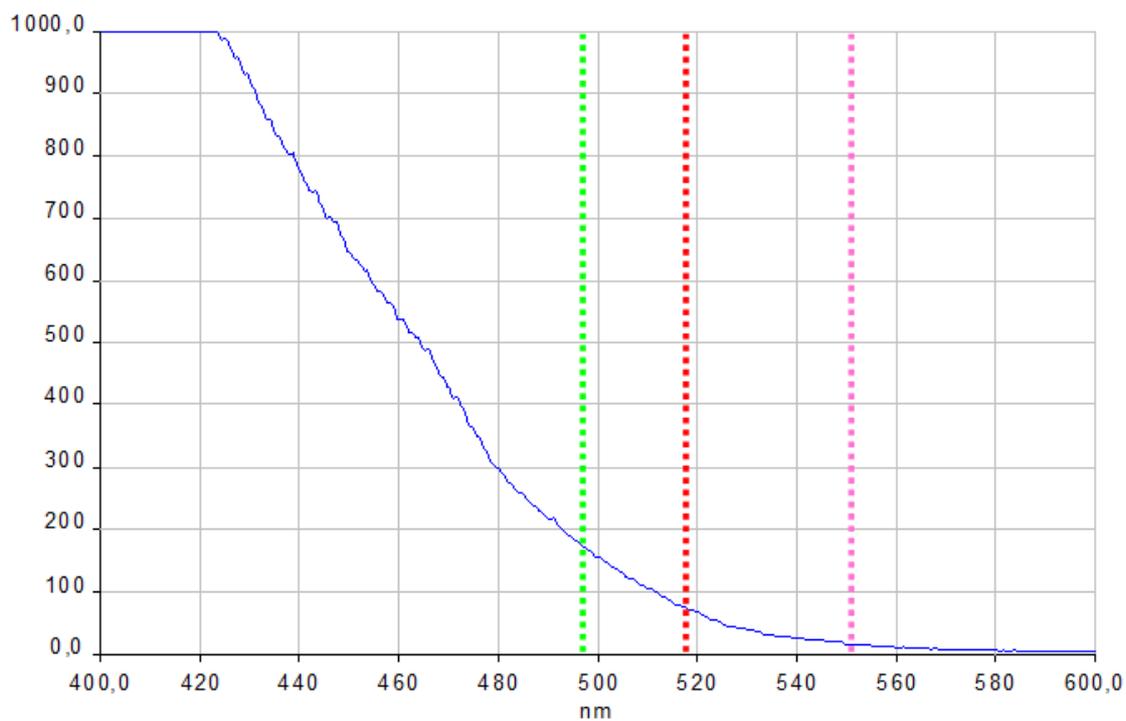
→ FLUOCAPTEUR : Analyse réalisée sur le fluocapteur de « **CLAYSSE 17/06/14** »



RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE

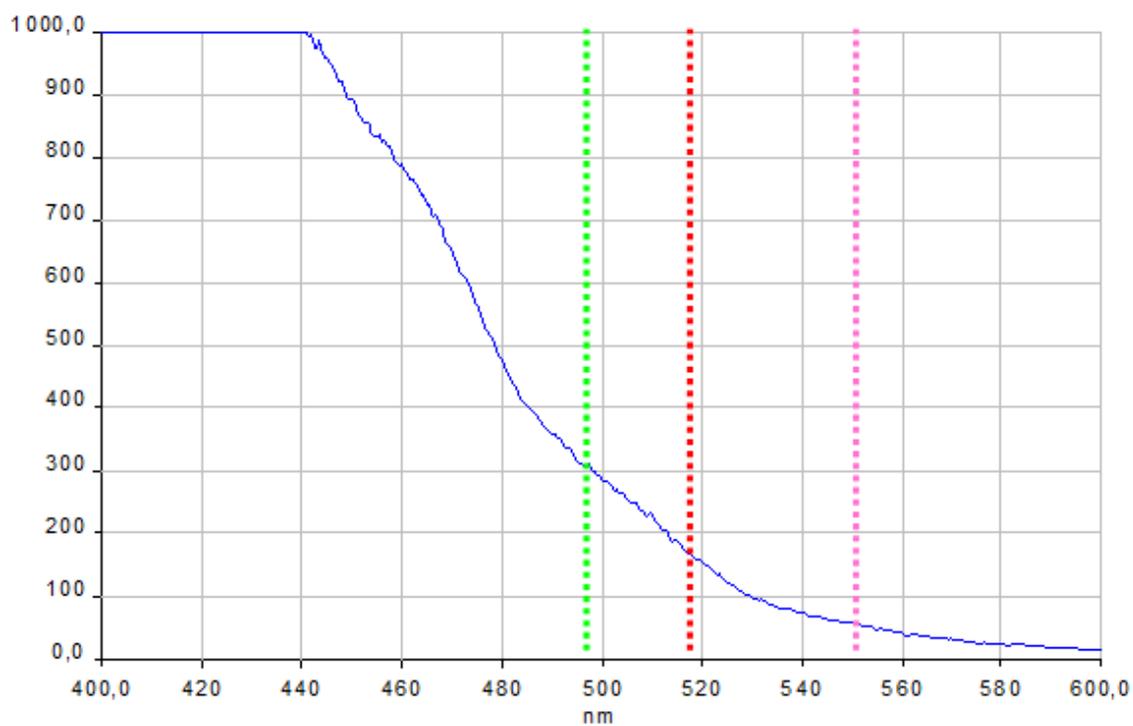


RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE





RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



Annexe 4 : Description technique des traçages réalisés en 2014

- **Grotte Flandin - Aven de la Fourchette**

Commune d' Orgnac-l'Aven – Ardèche

Situation :

La cavité se situe dans l'interfluve Cèze - Ardèche à la limite des calcaires du Bédoulien basal à faciès urgonien et des calcaires marneux du Ludien inférieur à moyen.

Coordonnées Lambert III : X= 0764,882 Y= 3224,686 Z= 232

Date de l'injection : 29/03/2014 à 14h30

Quantité de traceur : 10 kg d'urarine

Injection à la profondeur de moins 123 mètres

Débit de la perte : 10L/mn estimé

Captation du colorant : fluocapteurs à charbons activés et prélèvement d'eau

Moyen de détection :

Fluorimètre de terrain G-GUN FL24, fluorimètre portable Aquafluor et spectromètre de luminescence Perkin Elmer - LS 50 B

Auteurs de la coloration : - UMR Espace 7300 Nice

- EM St Etienne

- Groupement Associatif des Spéléos d'Orgnac-Issirac-La Bastide de Virac.

Réapparitions du colorant:

Le 24/04/2014 à la source de Gournier (Ardèche)

Le 18/11/2014 à la source de Monteil (Cèze) charbons et échantillon d'eau (0.09 µg/L)

Le 26/11/2014 source de Monteil (Cèze) échantillon d'eau (0.06 µg/L)

Le 05/12/2014 source de Monteil (Cèze) échantillon d'eau (0.08 µg/L)

Le 07/02/2015 à la source des Castors (Ardèche)

Le 18/02/2015 au forage du Pavillon (Ardèche):

Forage coordonnées Lambert III: X= 0767.379 Y= 3223.483 Z= 170 . Profondeur= 106 m.

Remarques sur l'expérience:

Sur les 4 fluorimètres de terrain G-GUN FL24 (Dragonnière et La Farre pour l'Ardèche, Monteil et les Baumes pour la Cèze), 3 ont été détériorés par des rongeurs aquatiques de type castor ou ragondin privant ainsi les appareils de tout signal.

Si les accès aux exutoires qui jalonnent la Cèze sont relativement aisés, il n'en est pas de même pour ceux de l'Ardèche.

Les parcours pour les atteindre sont longs et peu faciles, surtout quand la rivière est en crue. Beaucoup de sources ne sont accessibles que par voie navigable et demandent donc un fort potentiel humain et disponible (kayakistes, plongeurs, spéléologues).

Dans ces conditions, la régularité des prélèvements n'a pas pu être assurée.

Plusieurs fluocapteurs n'ont pas été opérants au cours de l'expérience : volés ou mis au sec.

Conditions pluviométriques (pluie brute):

De janvier à fin mars 2014 : 469 mm.

De mai à juin 2014: 99 mm.

De mi-octobre 2014 à mi-février 2015 : 570 mm

Historique des fluocapteurs coté Ardèche:

Source de La Farre : un capteur disparu - remise d'un nouveau: négatif en fin d'expérience.

Source du Colombier : disparition des capteurs et source à sec en cours d'expérience.

Source du Figuier : source à sec en cours d'expérience. Capteur négatifs.

Source de la Langue de Boeuf : source à sec en cours d'expérience. Capteurs négatifs

Source de la Dragonnière: disparition des capteurs - remise de nouveaux capteurs : résultat négatif.

Source des Castors : mise à sec des capteurs par des inconnus.

Positionnement des capteurs à 200 mètres à l'intérieur de la source par les plongeurs afin d'éviter le contact avec les eaux de la rivière: résultat positif.

Source de Cayrebelou: résultat négatif.

Historique des résultats coté Cèze:

Source de Monteil : résultat positif

Source des Baumes : résultat négatif

Source d'Ussel : résultat négatif

Source de Goudargues : résultat négatif

- **Aven d'Orgnac - Salle Rouge**

Commune d'Orgnac-l'Aven - Ardèche

Situation :

La cavité se situe dans l'interfluve Cèze - Ardèche.

Géologie: Bédoulien basal- Barrémien terminal

Coordonnées Lambert III : X= 0765,524 Y= 3226,529 Z= 307 m

Date de l'injection : 14/11/2014 à 16h00

Quantité de traceur : 10 kg de rhodamine

Injection à la profondeur de moins 150 mètres.

Débit de la perte : par pompage du siphon : 60 m³ d'eau accompagnent l'injection.

Captation du colorant : fluocapteurs à charbons activés et prélèvement d'eau

Moyen de détection :

Fluorimètre de terrain G-GUN FL24, fluorimètre portable Aquafluor et spectromètre de luminescence Perkin Elmer - LS 50 B

Auteurs de la coloration : - EM St Etienne

- UMR Espace 7300 Nice

- Groupement Associatif des Spéléos d'Orgnac-Issirac-La Bastide de Virac.

Réapparitions du colorant:

Le 20/11/2014 à la source de Gournier (Ardèche) : charbons et échantillon d'eau (1.60 µg/L)

Le 24/11/2014 à la source de Gournier (Ardèche) : charbons et échantillon d'eau (0.91 µg/L)

Le 01/12/2014 à la source de Gournier (Ardèche) : charbons et échantillon d'eau (0.21 µg/L)

Le 18/02/2015, trace de rhodamine au forage du Pavillon (Ardèche)

Pas de traces à ce jour pour la source des Castors (Ardèche)

Sources de Monteil et les Baumes (Cèze): négatif

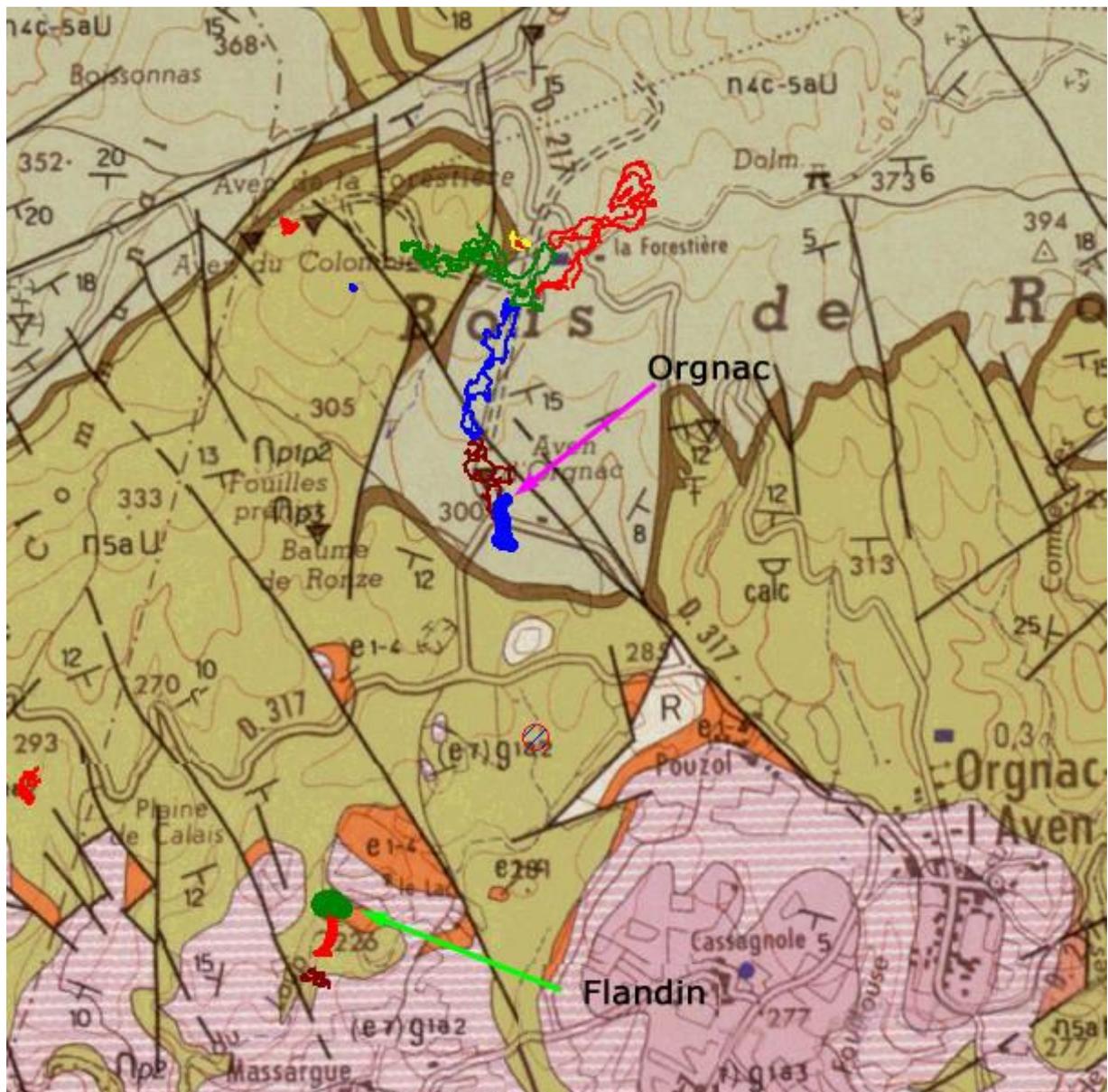
Remarques sur l'expérience:

Seuls les charbons activés ont été employés.

Rencontre des mêmes difficultés d'accès et de disponibilité que pour le traçage précédent.

Conditions pluviométriques (pluie brute):

De mi-octobre 2014 à mi-février 2015 : 570 mm



Report sur carte géologique des cavités citées (Erik VandenBroek - G.A.S.O.I.L.)

- **Pertes du Roméjac**

Commune de Barjac - Gard

Situation :

Pertes diffuses dans le lit du ruisseau.

Géologie: calcaires du Ludien supérieur, marnes à lignite de Barjac.

Coordonnées Lambert III : X= 0758,794 Y= 3222,997 Z= 130 m

Date de l'injection : 06/05/2014 à 16h00

Quantité de traceur : 3 kg d'éosine

Flux interrompu 500 mètres en amont avant confluence avec le ruisseau du Cantabre.

Débit de la perte : 5L/s estimé

Captation du colorant : fluocapteurs à charbons activés et prélèvement d'eau

Moyen de détection : spectromètre de luminescence Perkin Elmer - LS 50 B

Auteurs de la coloration : - EM St Etienne

- UMR Espace 7300 Nice

Réapparitions du colorant:

Sources de Monteil (Cèze): 10/06/2014

Sources de Baumes : 16/06/2014

Sources de Canet et Foulatier : négatif

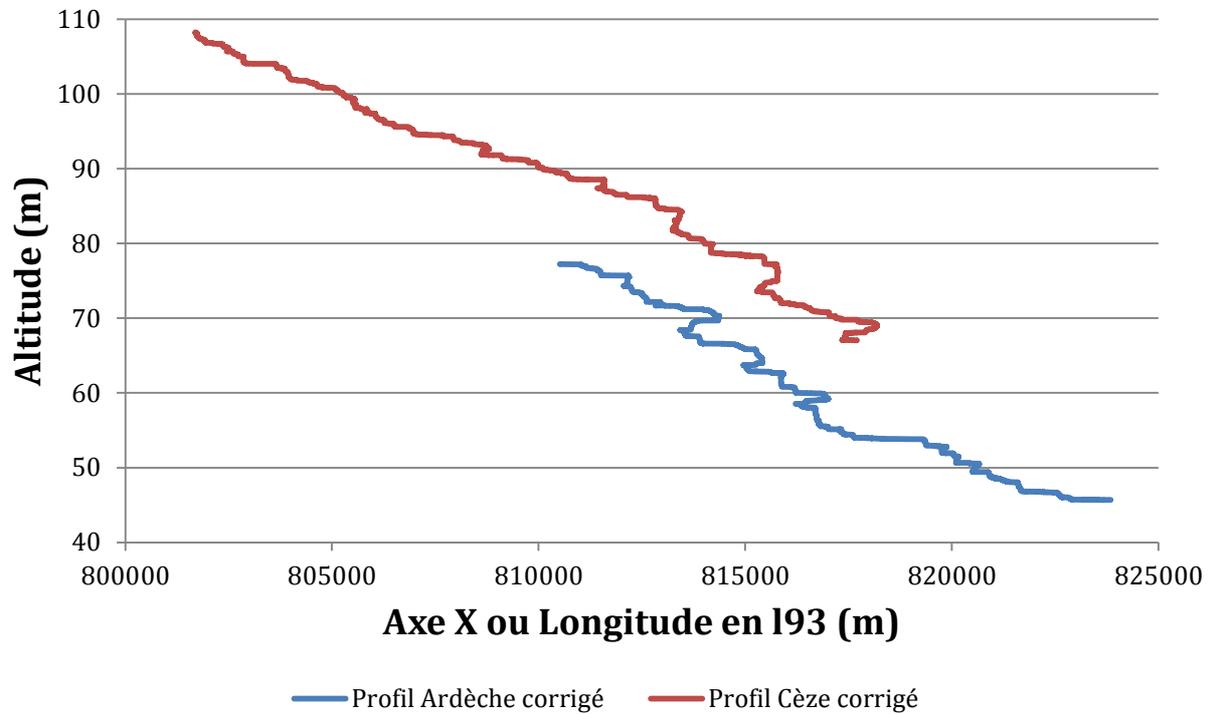
Remarques sur l'expérience:

Seuls les charbons activés ont été employés

Conditions pluviométriques (pluie brute):

De mai à juin 2014: 99 mm.

Annexe 5 : Comparaison des profils altimétriques de la Cèze et de l'Ardèche selon une même référence longitudinale



Annexe 6 : Mesures et calculs de débits – méthode, principe et difficultés

- Principe du calcul de débit par analyse du profil de vitesses

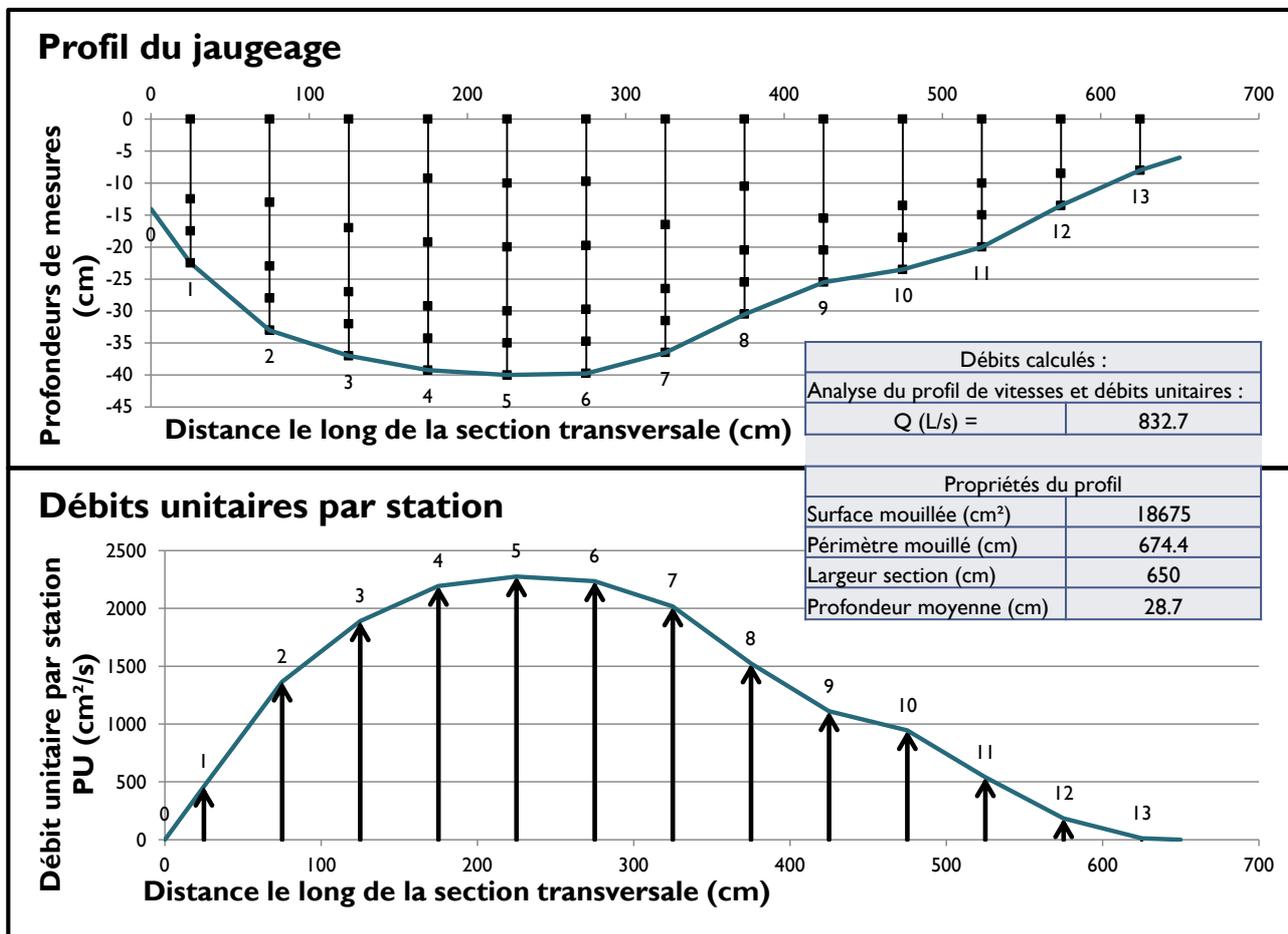


Illustration issue d'une feuille de calcul créée pour les besoins du projet.

Il s'agit de mesurer le champ de vitesse du courant sur une section transversale de rivière à différentes hauteurs. L'intégration de ce champ de vitesse sur l'ensemble de la section mouillée considérée donne le débit instantané au niveau de cette section [Arfib, 2013].

- Exemple d'une mesure de débit au micromoulinet dans des conditions optimales par exploration des profils de vitesses



Photo : Ré-Bahuaud Jordan

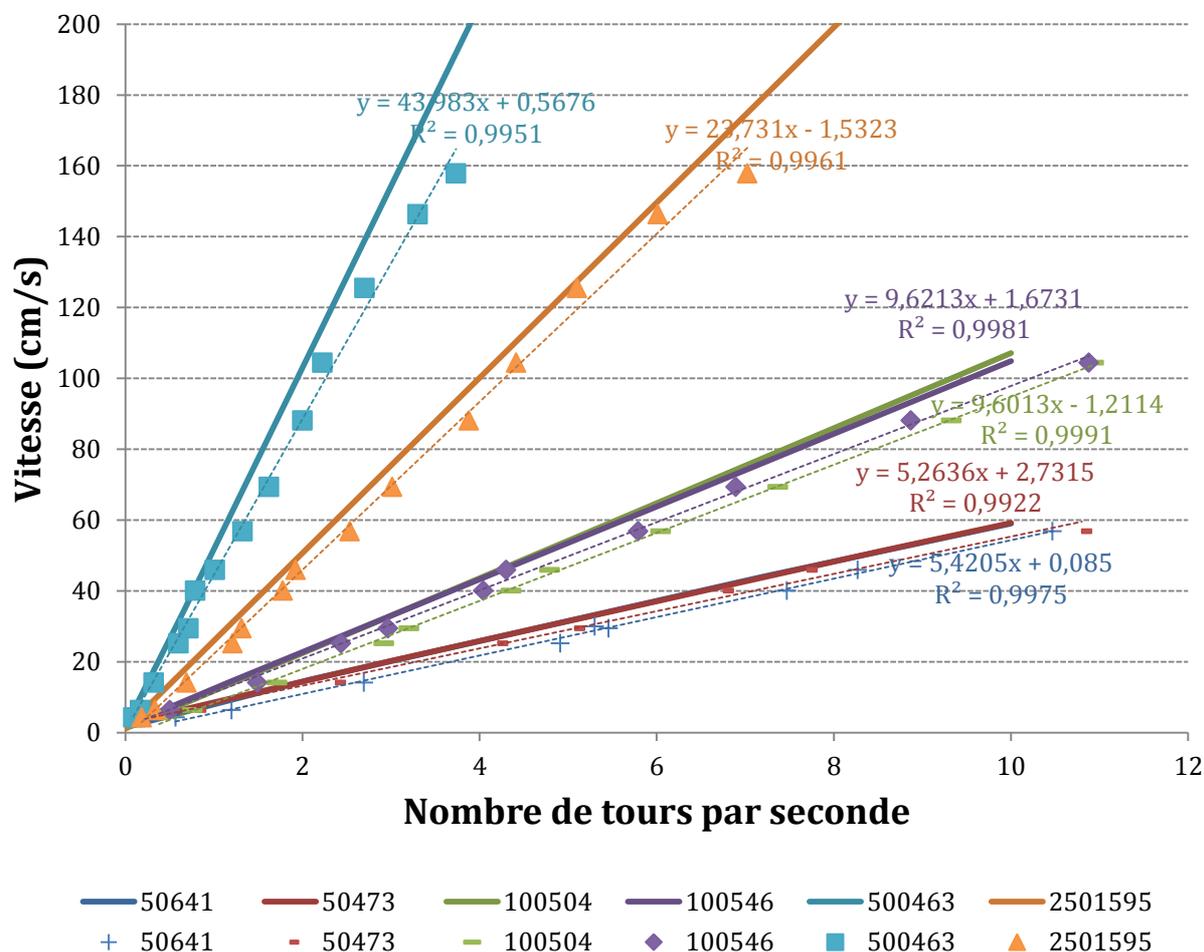
Les meilleures conditions d'application sont lorsque l'on a un écoulement à filets parallèles (non turbulent) c'est à dire dans un chenal sensiblement rectiligne, de section et de rugosité régulière. Lors de la mesure de la vitesse à l'aide du micromoulinet, l'axe du micromoulinet doit être parallèle aux filets liquides sous peine de la sous-évaluation de la vitesse réelle. On mesure la vitesse en plusieurs points de chaque verticale depuis le fond jusqu'à la surface au moyen du micromoulinet. Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur [Arfib, 2013].

- Exemple de la source des Baumes dont les sorties sont diffuses et les débits difficiles à estimer par les méthodes conventionnelles



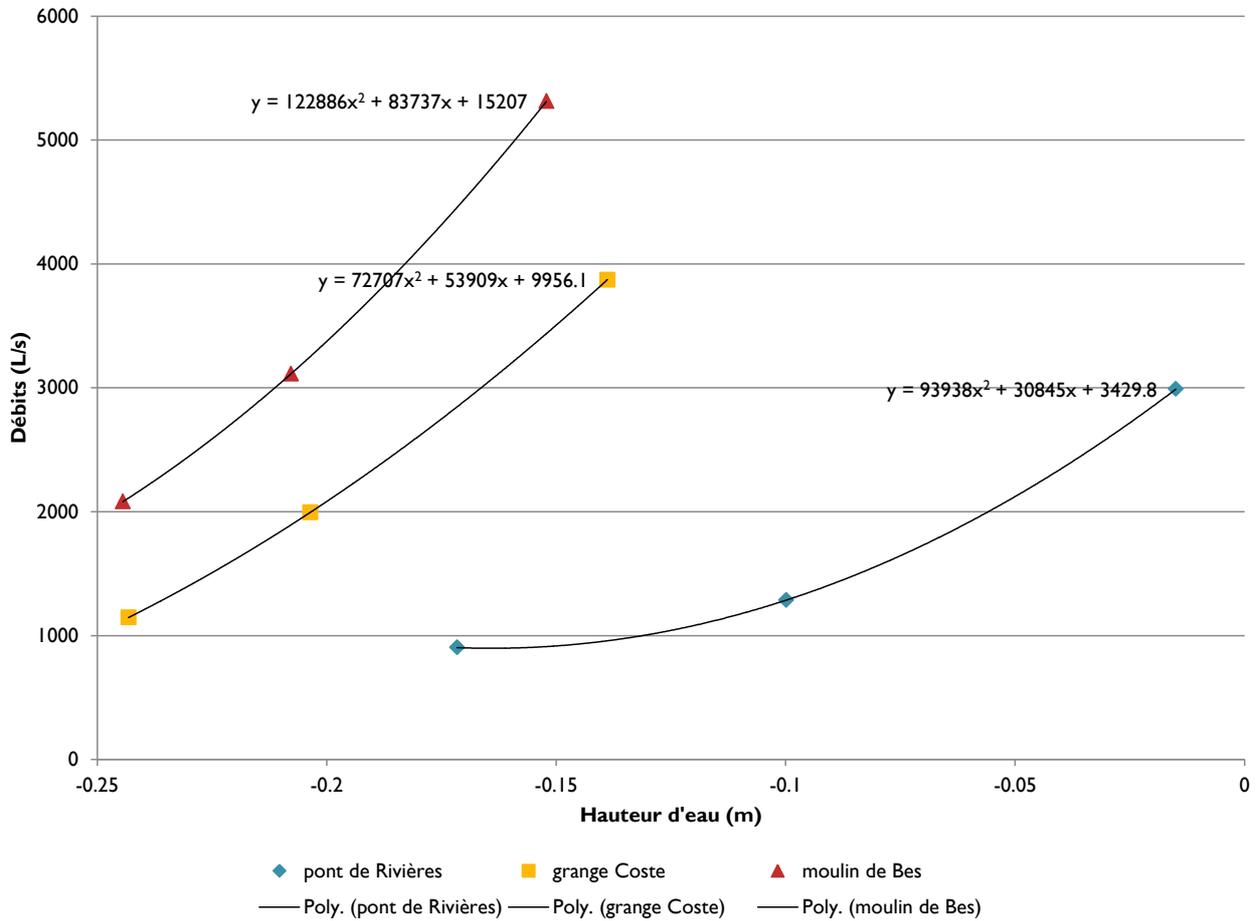
Photo : Jolivet Joël

Annexe 7 : Correction des vitesses du micromoulinet par comparaison avec le courantomètre EM



NB : Chaque couleur représente une hélice du micromoulinet. Les courbes en trait plein représentent les fonctions affines originales qui permettent de relier le nombre de tours par minute et la vitesse du courant. Les points correspondent à la vitesse du courant estimée avec le courantomètre par rapport au nombre de tours par minute estimé avec le micromoulinet. Les traits en pointillés représentent la nouvelle régression linéaire permettant de passer d'un nombre de tours par minute à une vitesse. Ces nouvelles relations linéaires ont permis de corriger les mesures de débits réalisées avec le micromoulinet en 2013 et 2014.

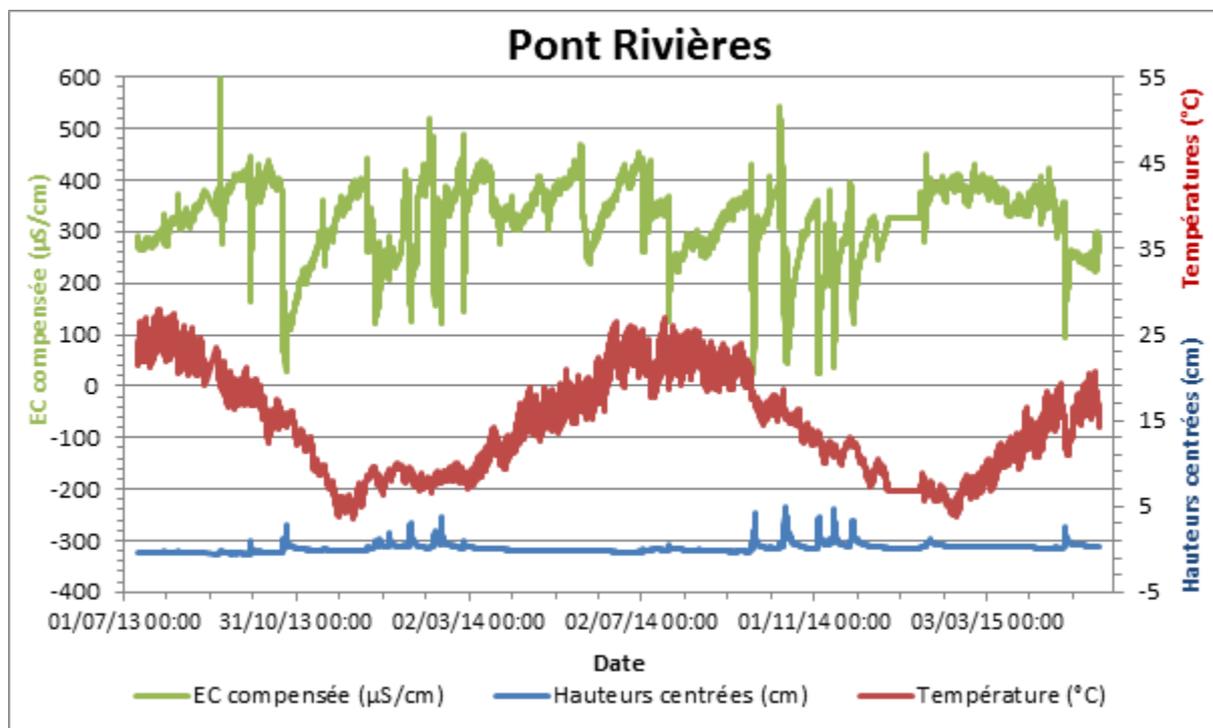
Annexe 8 : Exemples d'ajustement de fonctions polynomiales pour l'établissement de relations hauteurs / débits pour les sondes CTD disposées en rivière.



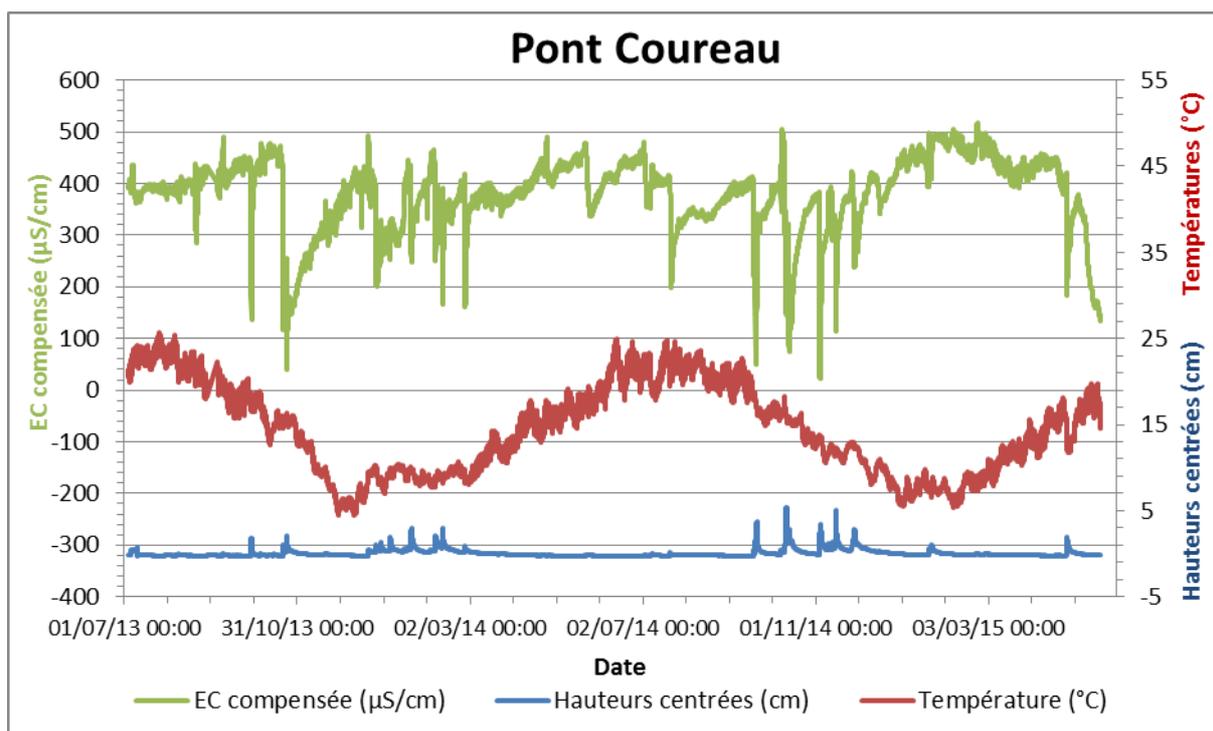
Annexe 9 : Suivi hydrologique des sources et de la rivière

- Rivière Cèze

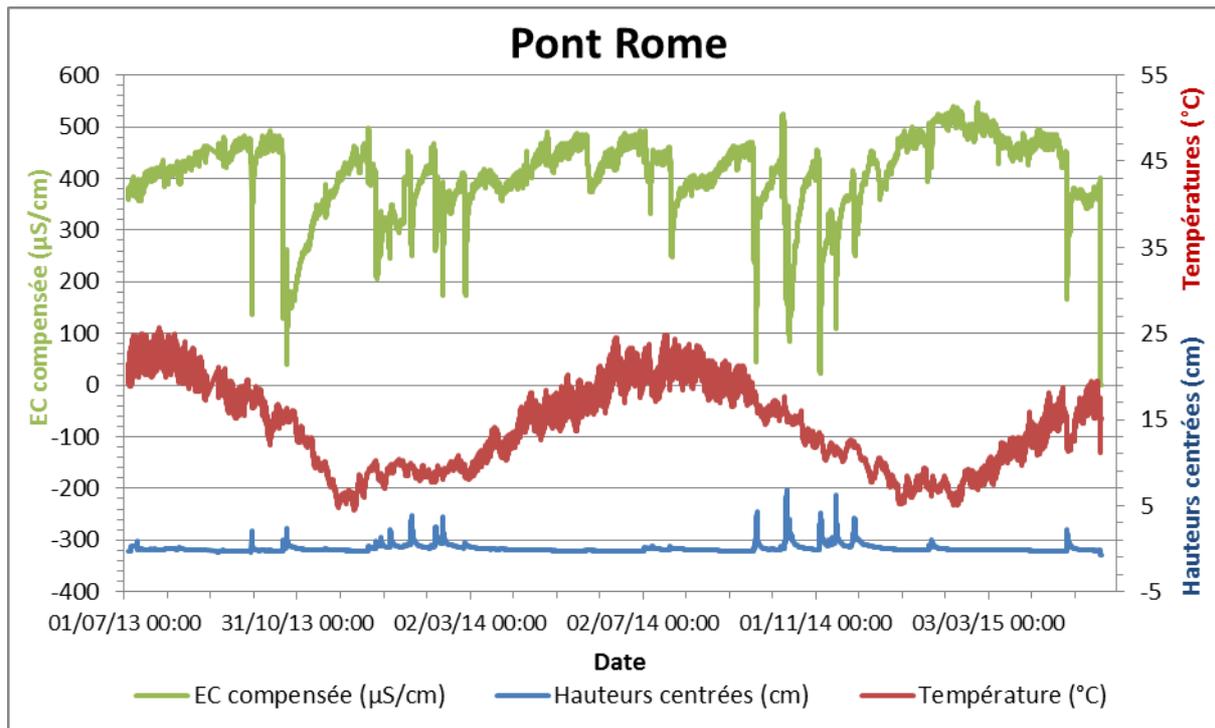
- Pont de Rivières



- Pont de Courau

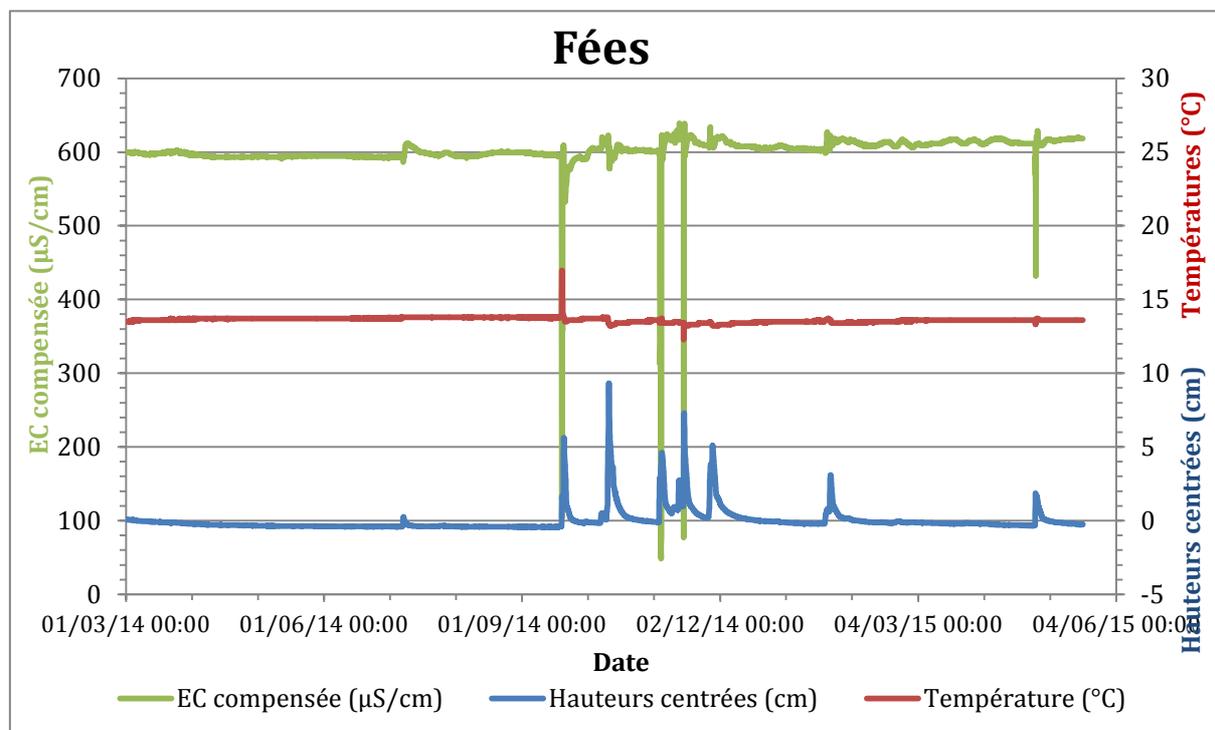


- Pont de Rome

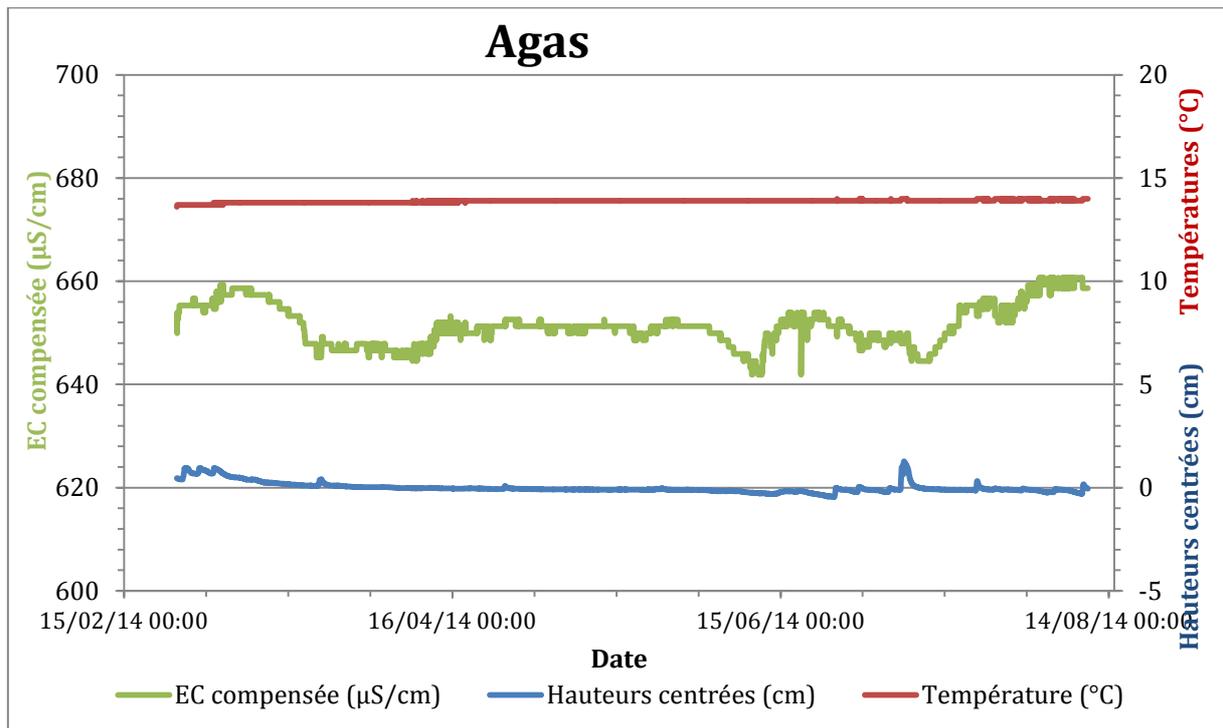


- Sources BV Cèze

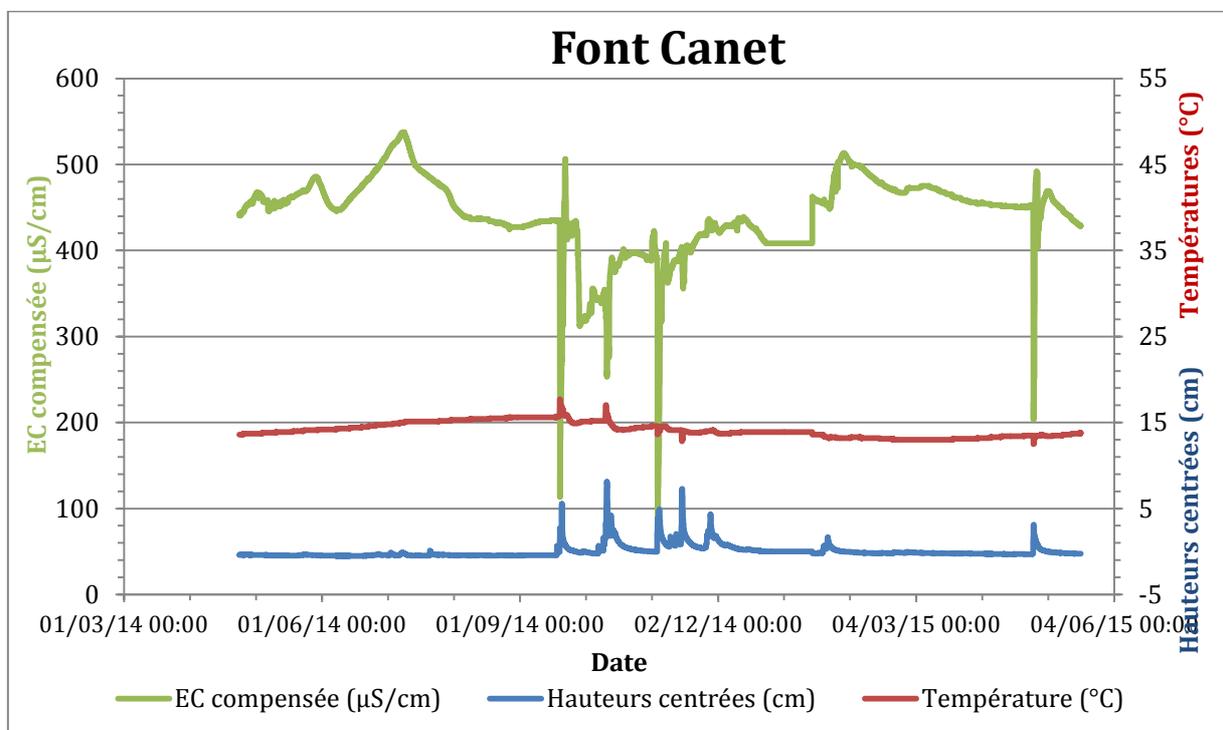
- Fées



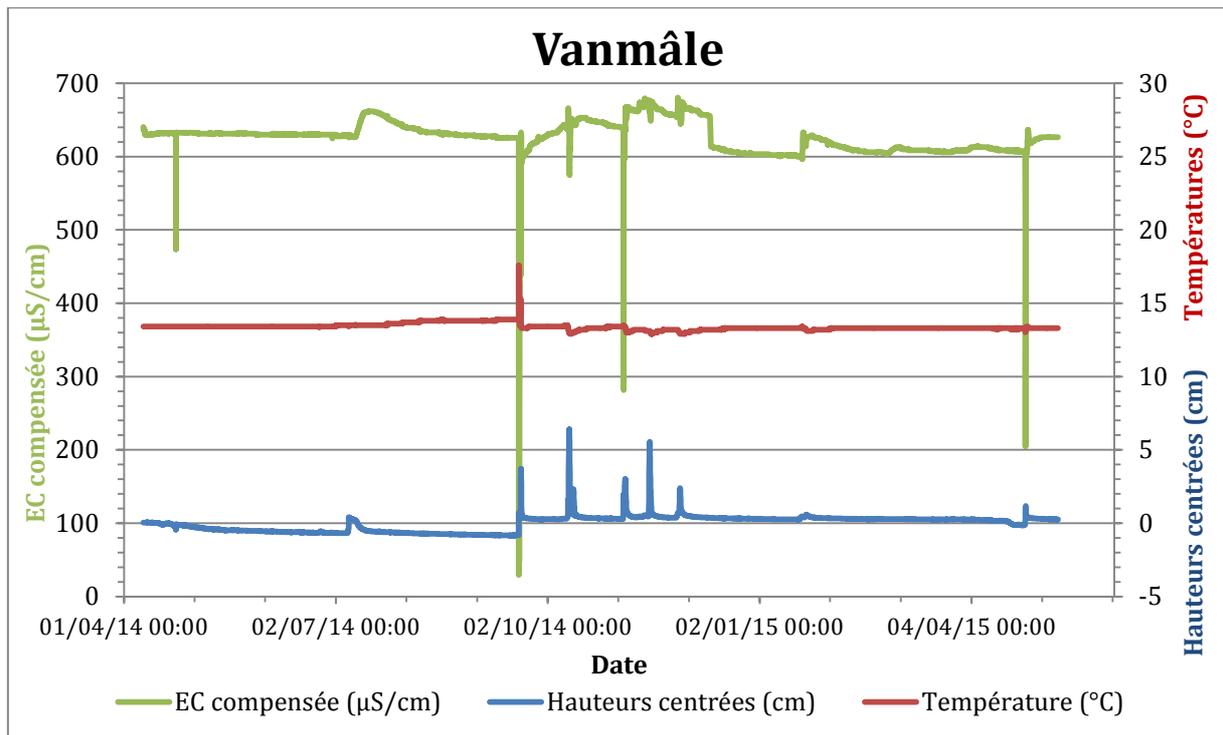
○ **Agas**



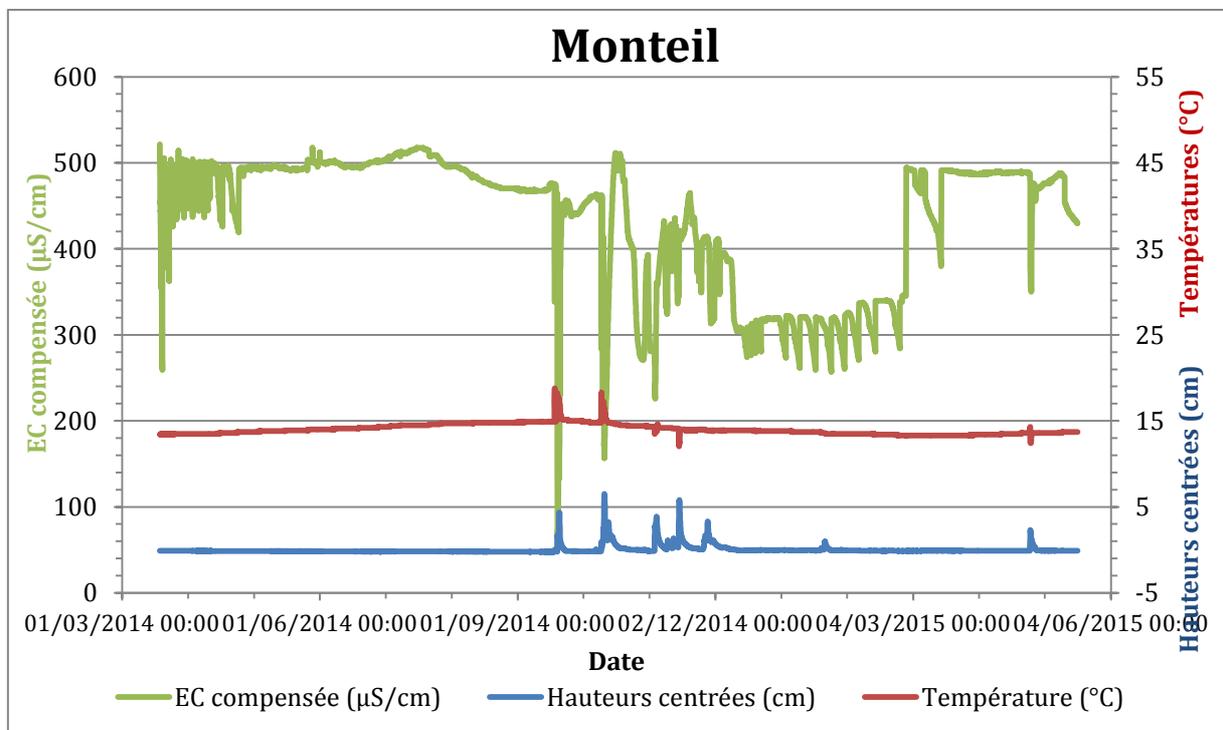
○ **Font Canet**



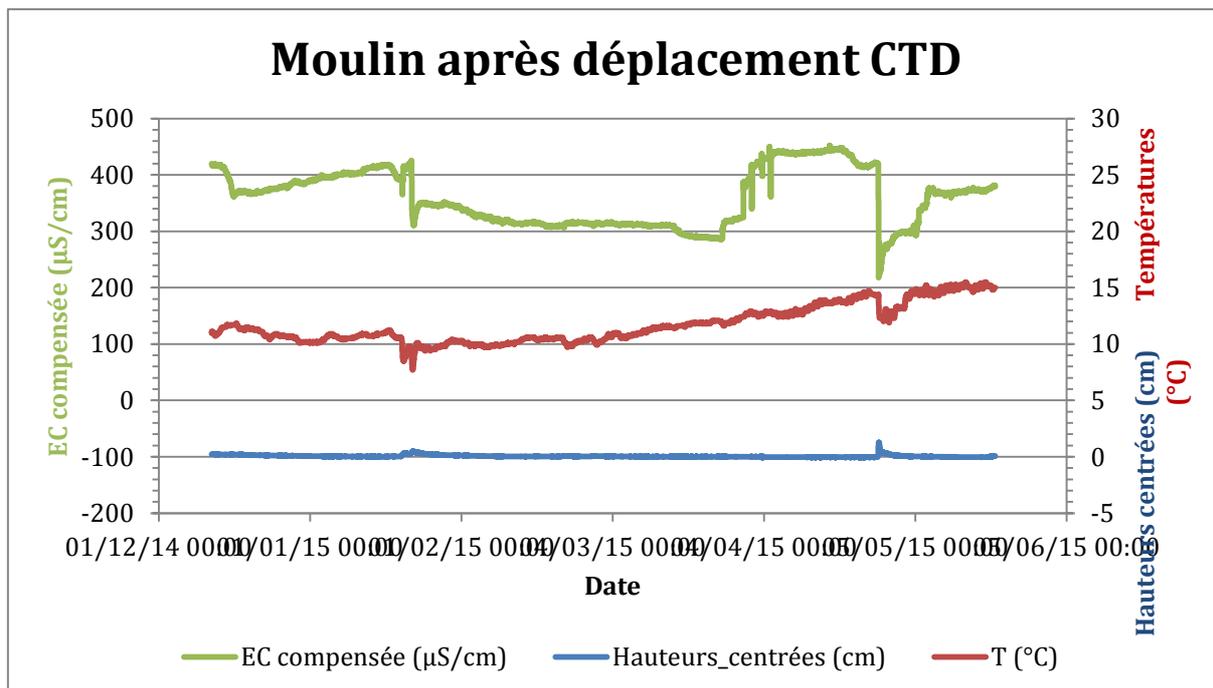
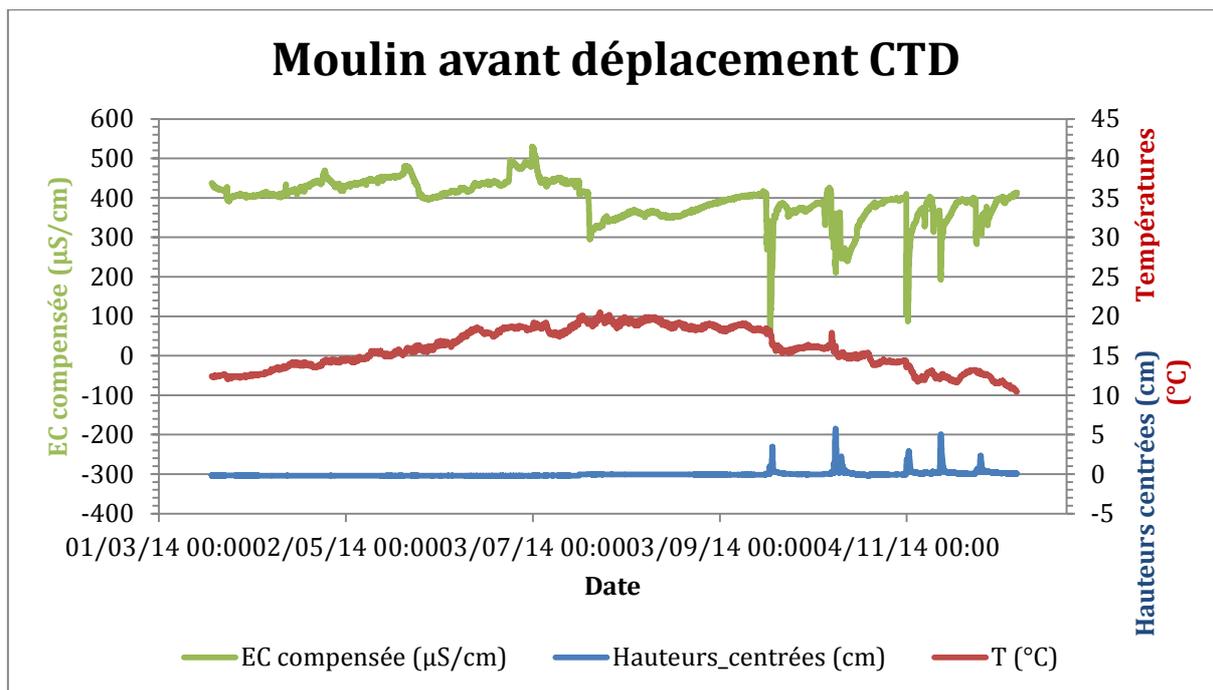
○ **Vanmâle**



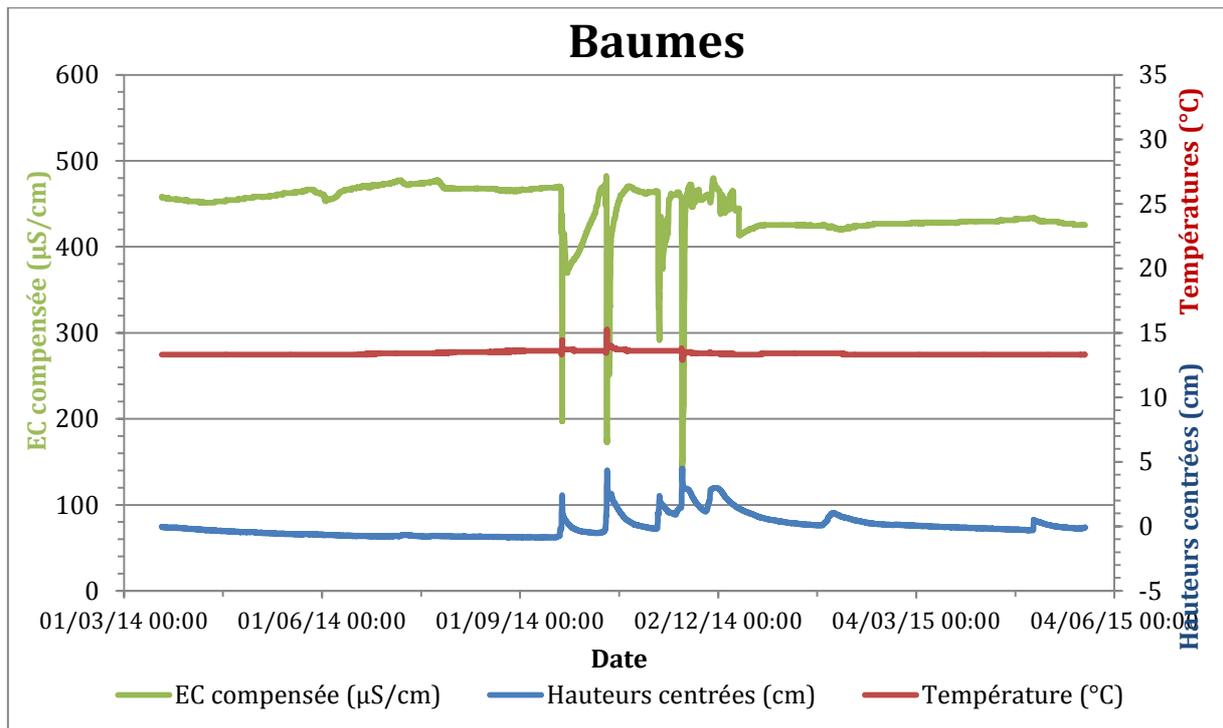
○ **Monteil**



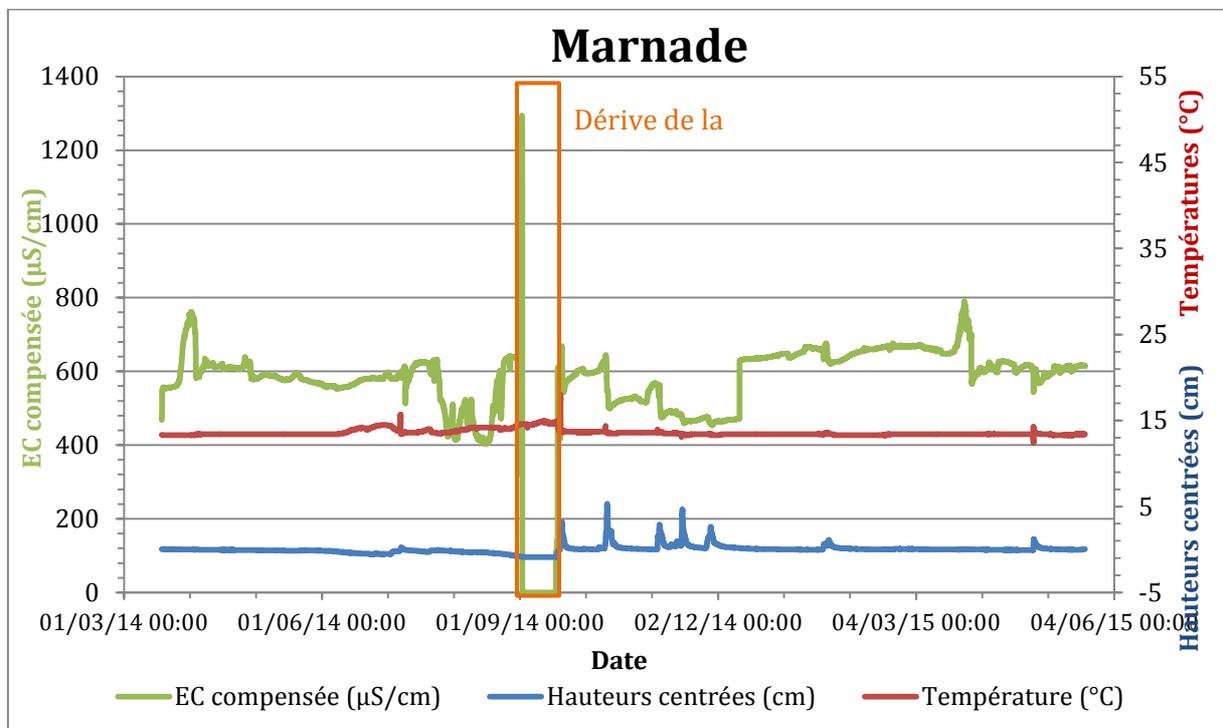
○ Moulin

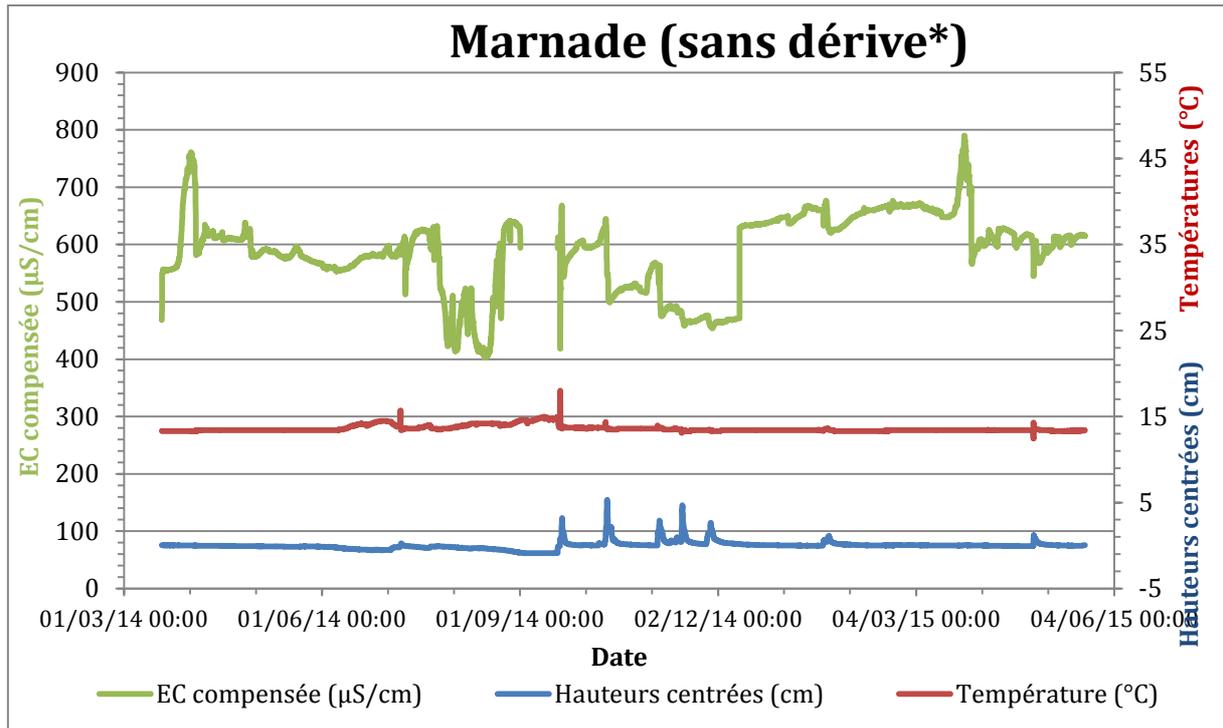


○ Baumes

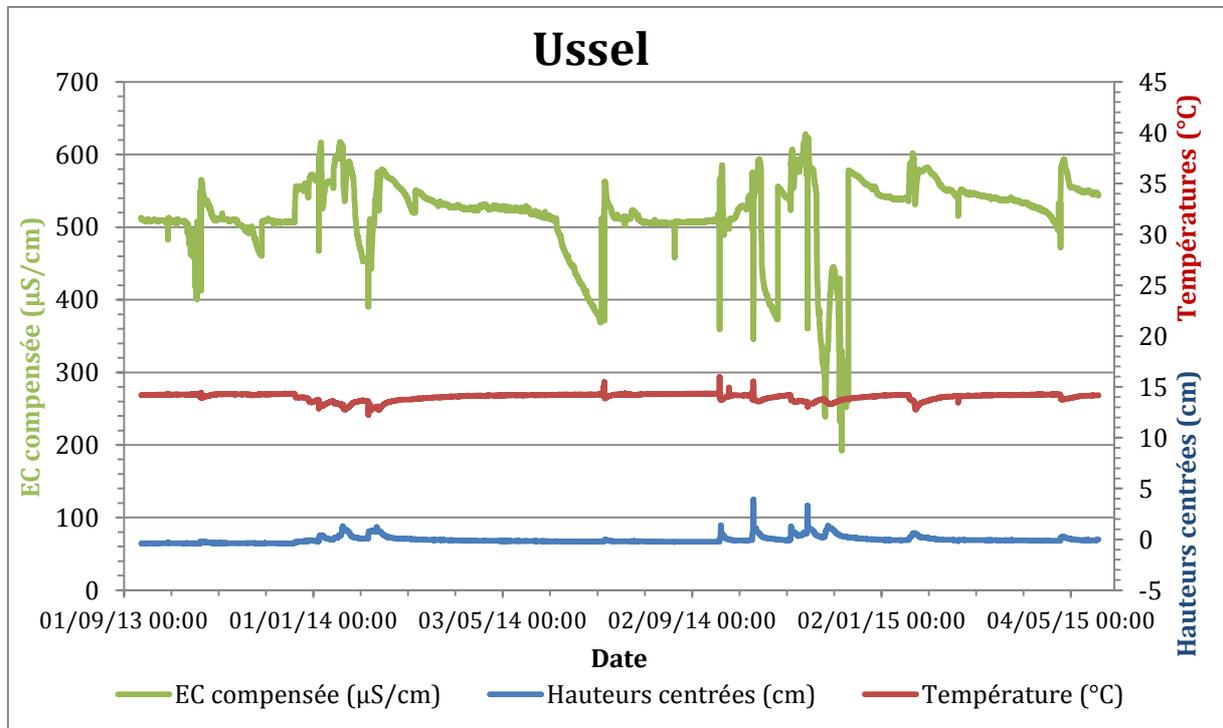


○ Marnade

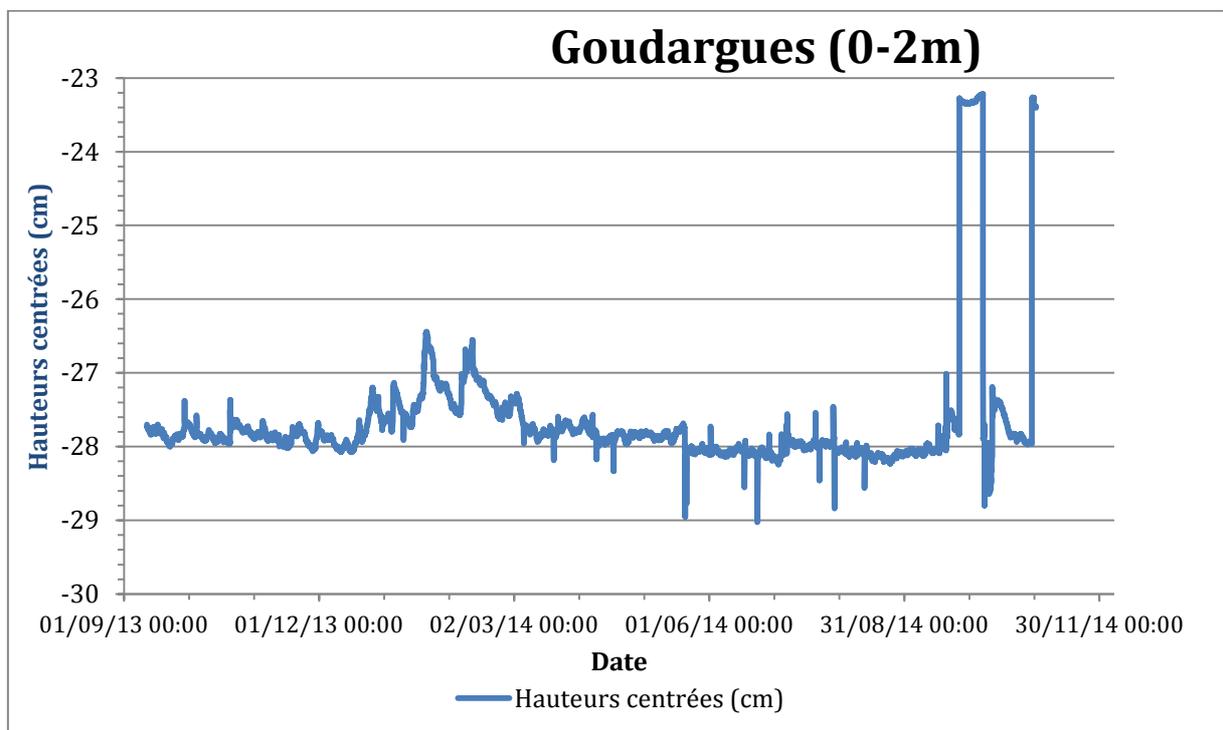
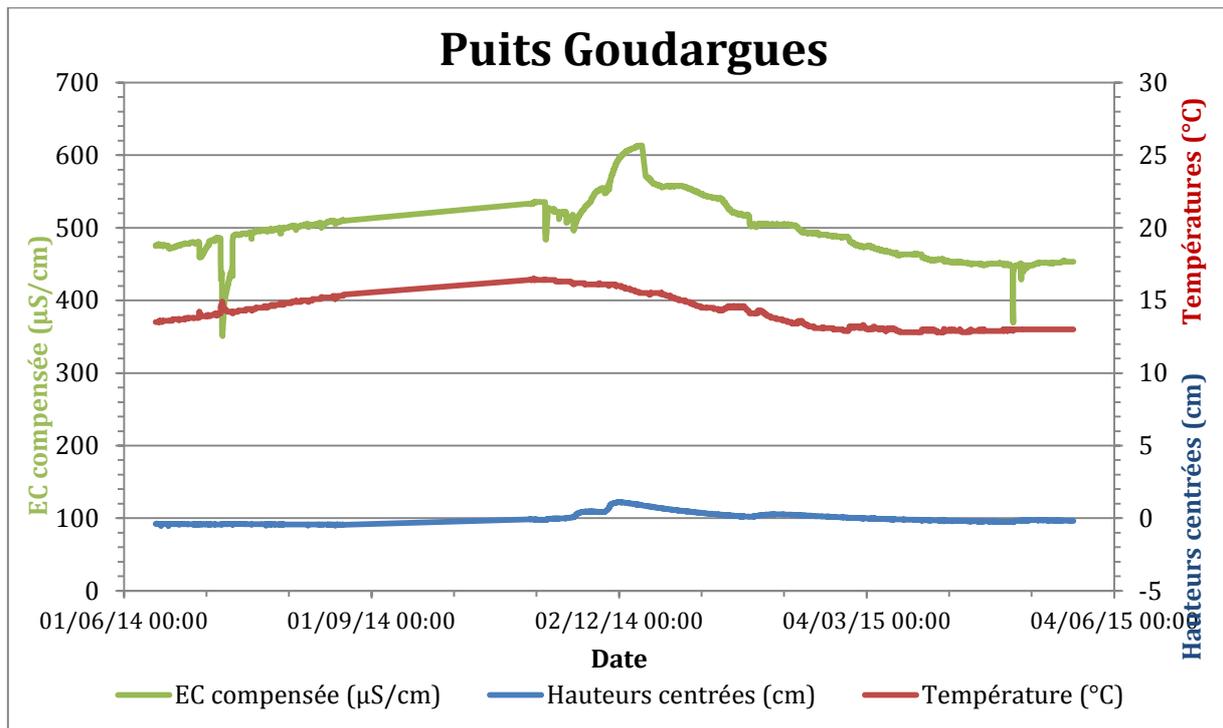


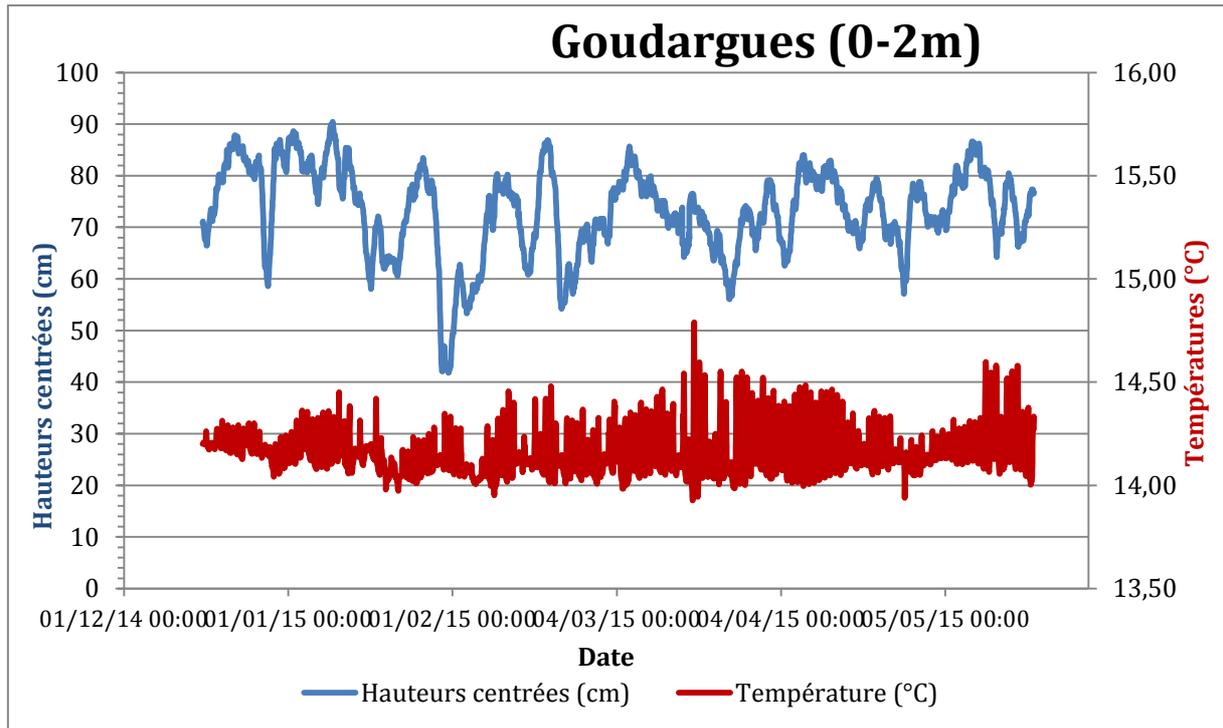


○ **Ussel**



○ Goudargues





○ **Bastide Froide**

