

Accord Cadre ZABR- Agence de l'Eau Fiche résumé

Titre du projet : Caractérisation des échanges entre Karst et Rivière. Cas d'un affluent du Rhône, la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap (Année 2015 et 2016).

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 et David Salze (EMA, LGEI) ;
Véronique Lavastre (UJM) et Hélène Celle-jeanton (LMV) ;

Equipes de recherche « ZABR » concernées :

Cinq UMR dont six équipes de recherche sont principalement impliquées dans cette action de recherche :
- l'UMR 5023 LENAHA (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) de l'EMSE (Ecole des Mines de Saint-Etienne) ;
- l'UMR 7300 ESPACE avec l'Université Sophia Antipolis ;
- l'EMA (Ecole des Mines d'Alès) ;
- l'UMR 6524 (Magmas et Volcans) avec l'Université Jean-Monnet et l'Université Blaise Pascal.

Actions de recherche ZABR en lien avec le projet :

Fiche thermie pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piegay) ;
Fiche sur l'utilisation de méthodes par radioéléments sur la Cèze Adriano Mayer (Univ. Avignon) et Olivier Radakovitch (CEREGE) de l'UMR 1114 EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes).

Autres partenaires :

- Recherche :
 - Hydrosciences Montpellier, suivi de la thèse associée à l'action ;
- Institutionnel :
 - Syndicat ABCèze : F. Cazin Définition des enjeux socio-économiques et territoriaux (fourniture de données et suivi du projet).

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 : Rivières cévenoles

I - Récapitulatif des attentes et objectifs du projet

- I.1 - Finalités et attendus opérationnels :

Dans ce projet, il s'agit d'établir une méthodologie adaptée à la localisation et à la quantification des 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).

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' ZABR-AE). 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.

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.

En concertation avec l'Agence de l'eau, un site d'étude a été retenu pour tester la méthodologie d'évaluation des échanges karst – rivière : le canyon de la Cèze incluant le plateau karstique de Méjannes-Le-Clap. Le projet de recherche a fait l'objet d'une fiche action en 2013 dans laquelle il était indiqué que la durée du projet initialement prévue était de 3 ans.

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 :

- un manque d'eau en situation d'étiage entraînant des conflits d'usages ;
- 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 ;
- Le 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.

La gestion de la ressource en eau pourrait donc être améliorée grâce à une meilleure connaissance de l'hydrosystème. 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 références) ;
- Aux conditions d'utilisation d'une telle méthodologie à d'autres contextes karstiques.

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.

- I.2 - Objectifs et méthodologie :

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.

II - Contenu sommaire des actions à conduire sur l'intégralité du projet (2013 – 2016) et bilan sur l'avancement des actions (2013 et 2014) :

II.1. 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).

II.2. Résumé des actions menées en 2013 et engagées en 2014 :

- Actions 2013 :

- **Synthèse des données et connaissances** disponibles sur le terrain d'étude (*EMSE*). Bibliographie sur la moyenne vallée de la Cèze au niveau du plateau karstique et collecte de données SIG, hydrométéorologiques, hydrologiques, qualité des eaux. 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 thermique** par Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée : Localisation des apports souterrains par contraste thermique entre eaux superficielles (Cèze) et eaux souterraines (sources karstiques). Cette approche a été développée en cohérence avec l'action ZABR thermie (*pilotée par l'ENS (V. Wawrzyniak et H. Piegay)*). La première campagne a été réalisée le 13-04-13 (voir carte en annexe) 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 (*EMSE*) : Réalisation de prélèvements d'eaux pour analyses chimiques en différents points de la Cèze et au niveau des sources karstiques connues afin de déterminer l'origine des eaux et d'estimer des proportions de mélanges ainsi que des phénomènes de recyclage des eaux. L'échantillonnage des sources et de la rivière (voir carte en annexe) 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.

- **Campagne de jaugeages** des sources et de la rivière Cèze (*EMSE et UMR ESPACE*) : 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.

- **Prélèvements biologiques** par échantillonnage des invertébrés interstitiels (*LEHNA Univ. Lyon*) : 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 géologique** (*EMSE*) : 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 (thèse en cours H. Chapuis EMSE). Les reconnaissances géologiques doivent être poursuivies en 2014 (repérage d'un niveau marqueur stratigraphique des paraséquences urgoniennes).

Les actions engagées en 2013 ont démontré leurs pertinences et leurs complémentarités. Les limites soulevées lors de cette phase de test montrent qu'il faut une améliorer le protocole de mesure pour les années 2014 et 2015 (notamment pour la géochimie et la thermie).

Un rapport d'avancement décrivant plus précisément les actions engagées en 2013 a été rédigé et envoyé à la ZABR et à l'AE fin juin 2014.

- Actions 2014 :

- **Démarrage des traçages artificiels** (*EMSE et UMR ESPACE*) : 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 Gardon au sud et Cèze et Ardèche au nord. Il s'agit également de mieux connaître les propriétés hydrodynamiques du système karstique (réactivité, dispersion et relation des conduits karstiques, taux de restitution, etc.). Un traçage colorimétrique à la fluorescéine (10 kg injecté) a été réalisé en mars au niveau de la grotte Flandin (injection à - 120 m de profondeur par rapport à la surface du sol) située entre la Cèze (rive gauche) et l'Ardèche (rive droite) à la bordure Nord du synclinal d'Issirac. Un 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. Le traceur n'est, à l'heure actuelle (04/09/14), pas encore ressorti de manière probante. Seulement quelques traces ont été décelées (mais non confirmées) côté Ardéchois.

Un traçage des pertes du Roméjac, un affluent de la Cèze, a été réalisé en mai 2014. 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. C'est un résultat inédit et assez inattendu dévoilant une plus grande complexité des écoulements souterrains.

Par ailleurs, un dernier traçage pour l'année 2014 avait été prévu en situation d'étiage au niveau des pertes de la Cèze, mais au 1^{er} septembre les niveaux d'eau de la rivière étaient encore trop hautes pour pouvoir réaliser ce traçage vu les précipitations de fin juillet et les conditions météorologiques du mois d'août plus au nord à l'amont du site d'étude. Il sera donc reporté en 2015. Ce traçage a pour objectif d'identifier l'ensemble des sources impactées par le recyclage des eaux de la Cèze mais aussi de quantifier dans quelles proportions et au bout de combien de temps ces sources sont impactées (bilan de masse).

- **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.

- **Identification des prélèvements biologiques** (suite) : Les prélèvements réalisés en 2013 ont été suivis par le tri et le dénombrement des individus en 2014.

- **Suivi des débits** et de la **pluviométrie** locale (*EMSE et UMR ESPACE*) : 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.

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

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

- **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 prévues entre mars et septembre. 5 campagnes de jaugeages ont été réalisées entre mars et juillet. Ces mesures de débits lors de la décrue 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. En parallèle de ces interprétations (disponibles dans le rapport d'avancement), 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.

- **Démarrage de l'approche mathématique par modélisation Pluies/Débits (EMA)** : Modélisation des échanges entre la Cèze et les aquifères karstiques qui l'entourent. Cette étape est destinée à mettre en place un modèle de reconstitution des débits à l'exutoire des arrivées karstiques dans la Cèze en fonction des variables de forçages climatiques (pluie, ETP, températures). Pour cela le travail s'est orienté vers une modélisation statistique de type réseau neuronal (RN). Le travail actuellement engagé par le LGEI (stage de Master 2 de Michaël Savary) a permis de constituer une base des données à partir de nombreuses sources d'informations (SPC Grand Delta, OHMCV, DREAL, ...). Malheureusement les données pluviométriques des années 2001 et 2002 sont manquantes, ce qui a empêché de mener à bien l'analyse multirésolution et donc d'estimer les tendances. Également, la mise en œuvre de modélisations avec les réseaux de neurones n'a pas, pour l'instant conduit à un modèle suffisamment efficace pour combler les lacunes de la base de données ; ces travaux sont encore en cours.

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

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

Deux communications, sur la méthodologie mise en œuvre au cours de ce projet, ont été acceptées au colloque international E3D (Eau, Déchets et Développement Durable) en juillet 2014 avec deux articles joints aux actes du colloque ; un poster sur l'approche générale du projet sera présenté à la conférence FRIEND à Montpellier en octobre.

III - Description précise des actions restant à mener pour les années 2015 et 2016 :

La valorisation des données acquises en 2013 et 2014 à partir des 13 sondes installées sur le terrain, des 75 jaugeages réalisés et des 2 traçages effectués, nécessite de poursuivre sur 2015 et 2016 les investigations engagées et non terminées et de réaliser de nouvelles actions en particulier pour la mesure des isotopes (UMR 6524) et du Radon (autre fiche action sur les radioéléments proposée par l'UMR 1114 EMMAH dont le terrain d'étude est la Cèze).

Tâches engagées depuis le début du projet et non terminées :

- **traçages artificiels** (suite) : Les traçages réalisés en 2014 ont dévoilé une complexité inattendue en rive gauche de la Cèze. Cette complexité mérite d'être mieux caractérisée par la mise en œuvre d'autres traçages en rive gauche notamment au niveau des dolines situées au sud de la commune d'Issirac.

En rive droite sur le plateau de Méjannes, deux traçages sont envisagés :

- l'un à l'aven des Cartouses situé le plus au sud, cette cavité joue le rôle de perte du ruisseau qui le borde. Il s'agira de vérifier si une diffuence 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).

- l'autre au niveau des pertes du ruisseau du Pâtis sur la partie occidentale du plateau. Si aucun exutoire n'est apparent sur cette zone, il existe des puits artificiels 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. Les résultats de ces traçages seront confrontés aux informations déduites de l'analyse fine du contexte géologique.

- Approche **biologique** (suite) : Les prélèvements réalisés en 2013 ont été suivis par le tri et le dénombrement des individus en 2014. L'identification de l'ensemble des espèces présentes dans les échantillons se déroulera pour l'année 2015 et sera suivi de l'analyse des résultats.

- Approche mathématique par **modélisation Pluies/Débits** (suite) : En 2015 et 2016, un effort particulier sera consacré aux modélisations pluies - débits. Il sera notamment question de finaliser l'étude des débits de la Cèze à ses différentes stations :

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

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

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

- Prélèvements **géochimiques** (suite) : Des échantillons d'eaux de sources et de rivière seront collectés et analysés pour la situation de hautes eaux en même temps que les prélèvements pour analyses isotopiques. Cet échantillonnage complétera le panel déjà acquis en 2013.

- **Hydrologie et métrologie** (suite) : Des mesures de débits des sources en hautes eaux (environ deux séries de mesures sur 12 sources) seront réalisées afin de disposer de chroniques de débits complètes et de pouvoir estimer des bilans annuels d'eaux écoulées. Des relevés et la maintenance des sondes CTD seront assurés sur la période 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.

- **Thermie** (suite) : Traitement des clichés acquis en 2014 et essais de corrélations par comparaison des anomalies de températures par rapports aux débits mesurés (sources et rivière).

Nouvelles tâches :

- Approche par caractérisation **isotopique** (*UJM*) : L'approche hydrogéochimique, par analyses en ions majeurs et éléments traces, réalisée en 2013, a permis de définir une typologie chimique des sources. Cependant, pour les sources dites « sulfatées », il n'a pas été possible de discriminer l'origine de ce sulfate (formations du Trias, de l'Oligocène, du socle cristallin, des formations marneuses ?). A fortiori, il subsiste des incertitudes sur l'origine des eaux. Pour pallier les limitations liées à l'analyse en ions majeurs seule, les outils isotopiques sont envisageables pour lever certaines incertitudes.

Pour ce faire, nous proposons d'utiliser les isotopes du soufre (^{34}S et ^{32}S). Des prélèvements de roche et d'eau seront effectués :

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

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

En parallèle de cela, nous réaliserons un suivi de l'alimentation de la Cèze à l'aide des isotopes de l'eau ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et D/H), cet outil est susceptible de fournir des informations sur les 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. Le nombre d'échantillons visé est de 50.

Les valeurs des paramètres physico-chimiques (pH, T, EC, alcalinité) des échantillons d'eau prélevés seront évalués sur le terrain et les teneurs en éléments majeurs seront déterminées en laboratoire par chromatographie ionique afin d'obtenir un jeu de données complet et exploitable. Les analyses isotopiques du soufre, des ions sulfates et de l'hydrogène de l'eau seront réalisées sur un appareillage de type AE Vario MicroCube couplé à un spectromètre de masse ISOPRIME. Les analyses isotopiques de l'oxygène des eaux seront réalisées à l'aide de la méthode d'équilibration avec du CO₂ puis analyse des rapports isotopiques sur un spectromètre de masse ISOPRIME.

- 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.