

Impacts du Changement Climatique sur les ressources en eaux souterraines et les échanges nappes rivières du Bassin Versant de l'Ardèche 2020-2025

*Rapport intermédiaire – Phase 2
2022-2024*



Mots clés : Changements climatiques (CC), Ardèche karstique et triasique, modélisation spatiale (SIG), ressources en eaux souterraines (ESO), vulnérabilité, risques de sécheresse, bassin versant, thermie de l'eau, simulations numériques.

Acronymes techniques utilisés : CC - Changements climatiques, ESO - Eaux souterraines, ESU – Eaux superficielles, AEP - Alimentation en Eau Potable



Décembre 2024

Fiche signalétique

Destinataire du document : AE-RMC, EPTB, Région Rhône-Alpes Auvergne

Coordonnées complètes :

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC) 2-4, Allée de Lodz 69 363 Lyon Cedex 07
- EPTP du bassin versant de l'Ardèche, 4, allée du Château - 07200 Vogüé

Interlocuteurs : Laurent Cadilhac, Julie Jeanpert, Géraldine Sénacq, Simon Lalauze

Date : Avril 2024

Impacts du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines et les échanges nappes
rivières du Bassin Versant de l'Ardèche
2020-2025

Rapport intermédiaire – Phase 2
2022-2024

Statut du rapport :	Version provisoire	○
	Version travail	○
	Version complète	○
	Version finale	😊

Auteurs principaux :

- UMR 5600 EVS – Mines Saint-Etienne – Département PEG (Frédéric Paran, Steve Peuble, Frédéric Galice et Didier Graillot)
- Association Nature Témoin (Joël Jolivet et Éric Van den Broeck)

Collaborateurs :

- Université Jean Monnet, CNRS, LGL-TPE UMR 5276, Saint Etienne (Véronique Lavastre)

Partenaires Plongeurs Bénévoles :

J.P. Baudu, F. Vasseur, J.C. Dufaud et R. Bénini.

Sommaire

Sommaire.....	3
1. Rappel des objectifs du projet	5
1.1. Moyens techniques	5
1.2. Personnes ressources et compétences	5
2. Planning de la phase 2 (2022-2024)	6
2.1. Rappel des tâches de la phase 1 (2020-2021)	6
2.2. Livrables prévus à la fin de la phase 2.....	6
3. Spécificité des bassins versants étudiés (Ardèche aval, Beaume, Chassezac).....	7
4. Rappel de la synthèse bibliographique	8
4.1. Éléments de base de la synthèse bibliographique	8
4.2. Apports de l'étude bibliographique	8
5. Rappel sur les données existantes.....	8
5.1. Données météorologiques	8
5.2. Données hydrologiques du SPC	8
5.3. Données hydrologiques et hydrogéologiques	9
6. Acquisition de données pour le suivi hydrologique	11
6.1. Analyse des données du SPC pour la Beaume et le Chassezac	11
6.2. Acquisition de nouvelles données pour le suivi hydrologique et la caractérisation des masses d'eau 13	
6.2.1. Données hydrologiques relevées aux sondes installées sur le Chassezac	17
6.2.1.1. Chassezac amont	17
6.2.1.2. Chassezac intermédiaire	19
6.2.1.3. Chassezac aval	21
6.2.2. Données hydrologiques relevées aux sondes installées sur la Beaume.....	24
6.2.2.1. Sonde Beaume amont.....	24
6.2.2.2. Sonde Beaume intermédiaire	26
6.2.2.3. Sonde Beaume aval	28
6.3. Courbes de tarage hauteur/débit par modélisation BaRatin	30
6.3.1. Rappel de la méthode	30
6.3.2. Exemple : premiers résultats pour la station de la Beaume amont	30
6.4. Premières investigations en matière de scénarios climatiques avec le système KarstMod ..	37
6.4.1. Principe général du fonctionnement de KarstMod	37
6.4.2. Application aux objectifs du projet sur l'Ardèche	38
7. Focus sur les gorges de l'Ardèche – Urgonien	41
7.1. Données hydrologiques relevées aux sondes SPC à Vallon-Pont-d'Arc et à Sauze	41
7.2. Instrumentation des sources	43
7.3. Interprétation croisée (pluie, source, rivière)	44
7.4. Les traçages artificiels	45

8. Nouvelles investigations géochimiques	47
8.1. Rappel du Contexte de l'étude géochimique	47
8.2. Campagnes de terrain et échantillons.....	48
8.2.1. Zone d'étude et sites d'échantillonnage.....	48
8.2.2. Campagnes d'échantillonnage.....	51
8.3. Méthodes.....	52
8.3.1. Paramètres Physico-Chimiques et Alcalinité Totale Des Eaux.....	52
8.3.2. Prélèvement et Conditionnement des échantillons d'eau	52
8.3.3. Espèces dissoutes Majeures.....	53
8.3.4. Isotopes de l'eau	53
8.4. Résultats et Discussion	53
8.4.1. Variation du Ph Et de la Conductivité des Eaux au Travers du Bassin Versant	53
8.4.2. Composition Chimique des Eaux	57
8.4.3. Composition Isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et δD des Eaux.....	59
8.5. Conclusion.....	61
9. Conclusion et perspectives 2025.....	63
10.Bibliographie	64
10.1. Références bibliographiques générales.....	64
10.2. Références bibliographiques de la partie hydrologie	64
10.3. Références bibliographiques de la partie géochimie	64
Listes des figures et tableaux	65
Annexes	69
A1 : Fiche « Outil Opérationnel » ZABR. BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes. INRAE.....	71
A2 : Page de présentation du tutoriel de KarstMod	75

1. Rappel des objectifs du projet

Il s'agit d'un projet de recherche sur le devenir et la gestion des réserves souterraines karstiques et triasiques du bassin versant de l'Ardèche dans la perspective du changement climatique. L'objectif est de mieux comprendre le rôle des eaux souterraines sur l'hydrologie du bassin, notamment à l'étiage, les impacts du changement climatique sur ces ressources et l'intérêt qu'elles pourraient représenter pour l'alimentation en eau future.

Cette approche de la vulnérabilité aux changements climatiques des différents aquifères et ressources stratégiques pour l'AEP requiert d'établir tout d'abord l'état du fonctionnement hydrodynamique actuel et le rôle des eaux souterraines (ESO) dans l'alimentation des cours d'eau du secteur d'étude

Deux échelles spatiales ont été retenues pour permettre de s'intéresser à 4 catégories principales de formations aquifères présentes sur ces bassins :

- 1) les bassins versants de la Beaume et du Chassezac avec des formations de socle à l'amont, gréseuses du Trias dans la partie médiane du cours de ces 2 rivières et calcaires du Jurassique à leur l'aval. À cette échelle, il s'agit dans un premier temps d'évaluer la contribution de ces 3 formations géologiques au débit (d'étiage) des cours d'eau, d'en déduire le fonctionnement actuel et d'évaluer l'impact des modifications climatiques à venir. À partir des résultats obtenus, il s'agit de produire des cartes de sensibilité et de vulnérabilité au changement climatique à l'échelle de ces sous-bassins et des recommandations pour la gestion de la ressource.
- 2) la portion du cours de l'Ardèche s'écoulant dans les calcaires du Crétacé inférieur à faciès Urgonien. Il s'agit de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère karstique, ses relations avec l'Ardèche et son influence dans le stockage et la restitution de l'eau et sur la thermie du cours d'eau. On pourra envisager la mise en place, au-delà du projet, d'une instrumentation pérenne pour suivre les effets du changement climatique.

Ce projet est financé par l'Agence de l'eau RMC et la région Aura dans le cadre de l'AMI « Stratégie d'adaptation et Résilience des Territoires » de la région Aura qui s'inscrit dans le Plan d'Adaptation aux Changements Climatiques (CC) du bassin RMC. Il est porté par l'École des Mines de Saint-Étienne [Mines Saint-Etienne : MSE] (Centre SPIN : Sciences des Processus Industriels et Naturels – UMR CNRS EVS Environnement Ville et Société) en partenariat avec l'Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels (ARMINES¹).

1.1. Moyens techniques

Le projet utilise les moyens techniques disponibles à Mines Saint Etienne (Matériel de terrain, Plateformes d'analyse et de caractérisation, Stations de travail SIG, Modélisation...).

1.2. Personnes ressources et compétences

L'équipe SPIN (MSE/ARMINES) a déjà piloté une démarche similaire sur le bassin versant de la Cèze (2016 – 2020) dans sa partie karstique et sera en charge de la coordination du projet.

Les personnes ressources et les compétences mobilisées sont les suivantes :

- Steve Peuble (Docteur en Géochimie) et Frédéric Paran (Docteur en hydrogéologie et SIG), tous deux porteurs du projet respectivement pour Mines Saint-Etienne et ARMINES,

1. ARMINES est une structure de recherche contractuelle, de statut associatif (loi de juillet 1901), partenaire de grandes Écoles d'Ingénieurs. Elle a pour objet la recherche orientée vers l'industrie. ARMINES a, au travers d'une convention signée avec l'État en 1972 (Ministère de l'Industrie) puis de conventions bilatérales signées avec chacune des Écoles partenaires, placées sous la tutelle du Ministère de l'Industrie, mis en place les moyens humains et matériels au sein de Centres de recherche communs avec chaque École dont notamment au sein du Centre SPIN, centre de recherche commun à ARMINES et à l'École des Mines de Saint-Étienne.

- Florence Dujardin (Ingénieur instrumentation),
- Didier Graillot (Professeur émérite, Docteur en hydrogéologie et sciences de l'eau),
- Bernard Allirand (Tourneur, Atelier MSE)

L'équipe a bénéficié de l'appui de l'EPTB pour la réalisation des jaugeages et du soutien de plusieurs plongeurs bénévoles pour l'implantation des sondes de mesure de débit (courantomètre) et d'un fluorimètre dans le karst noyé (J.P. Baudu, F. Vasseur, J.C. Dufaud et R. Bénini) et des gestionnaires des campings de l'Ile (Vallon Pont d'Arc) et du Pequelet (Salavas). Nous tenons à la remercier.

2. Planning de la phase 2 (2022-2024)

2.1. Rappel des tâches de la phase 1 (2020-2021)

Pour rappel, les principales tâches de la phase 1 étaient les suivantes :

- Coordination avec les acteurs impliqués dans le projet et constitution d'un comité de pilotage,
- Synthèse bibliographique sur le sujet et bilan des études déjà réalisées sur les différentes masses d'eau souterraine du bassin versant sud de l'Ardèche comportant : des données hydrologiques sur la base des jaugeages, profils en long déjà réalisés et disponibles, traçages déjà effectués,
- Premières investigations géochimiques sur la base des prélèvements d'eau effectués en rivière et aux sources : éléments traces, mineurs et majeurs, isotopes.

2.2. Livrables prévus à la fin de la phase 2

Les livrables prévus à la fin de la phase 2 sont les suivants :

- Rapport intermédiaire contenant les mesures et jaugeages effectués de 2021 à 2023, les nouvelles investigations géochimiques et les résultats des nouveaux traçages,
- Éléments de préparation pour l'élaboration ultérieure d'un document synthétique (ex : cartes et chroniques simplifiées) destination des opérationnels (syndicat des eaux, syndicat des gorges de l'Ardèche, EPTB),
- Carte de répartition des apports karstiques en rive gauche et droite des gorges de l'Ardèche.
- En préalable aux tâches de modélisation envisagées dans le projet, modélisation des relations niveaux des eaux de surfaces/débits pour ultérieurement déterminer des indicateurs hydrologiques pertinents pour les différentes unités aquifères selon les différentes périodes (hautes eaux, basses eaux) scénarios d'utilisation de la ressource / climat / développement touristique.

Rappelons que ces différents livrables devraient permettre d'établir à la fin du projet des cartes de vulnérabilité adaptées aux différents enjeux de quantité et de qualité de la ressource en eau superficielle et souterraine. Ce travail sur la vulnérabilité des Eso et Esu constitue un complément au projet « Ardèche 2050 » et aux travaux menés pour la plan d'adaptation au changement climatique du bassin RMC².

La phase 2 du présent projet fera aussi l'objet d'une valorisation/communication des résultats obtenus, ceci dans le cadre du dernier comité de Pilotage du projet au printemps 2025.

Les tâches à réaliser par la suite à partir de 2024 sont indiquées dans la figure 1 du rapport de la phase 1. Elles concernent la modélisation simplifiée multiréservoirs des unités aquifères en relation avec la rivière pour aboutir à des préconisations de gestion compte tenu des tendances climatiques déjà observées et à venir.

3. Spécificité des bassins versants étudiés (Ardèche aval, Beaume, Chassezac)

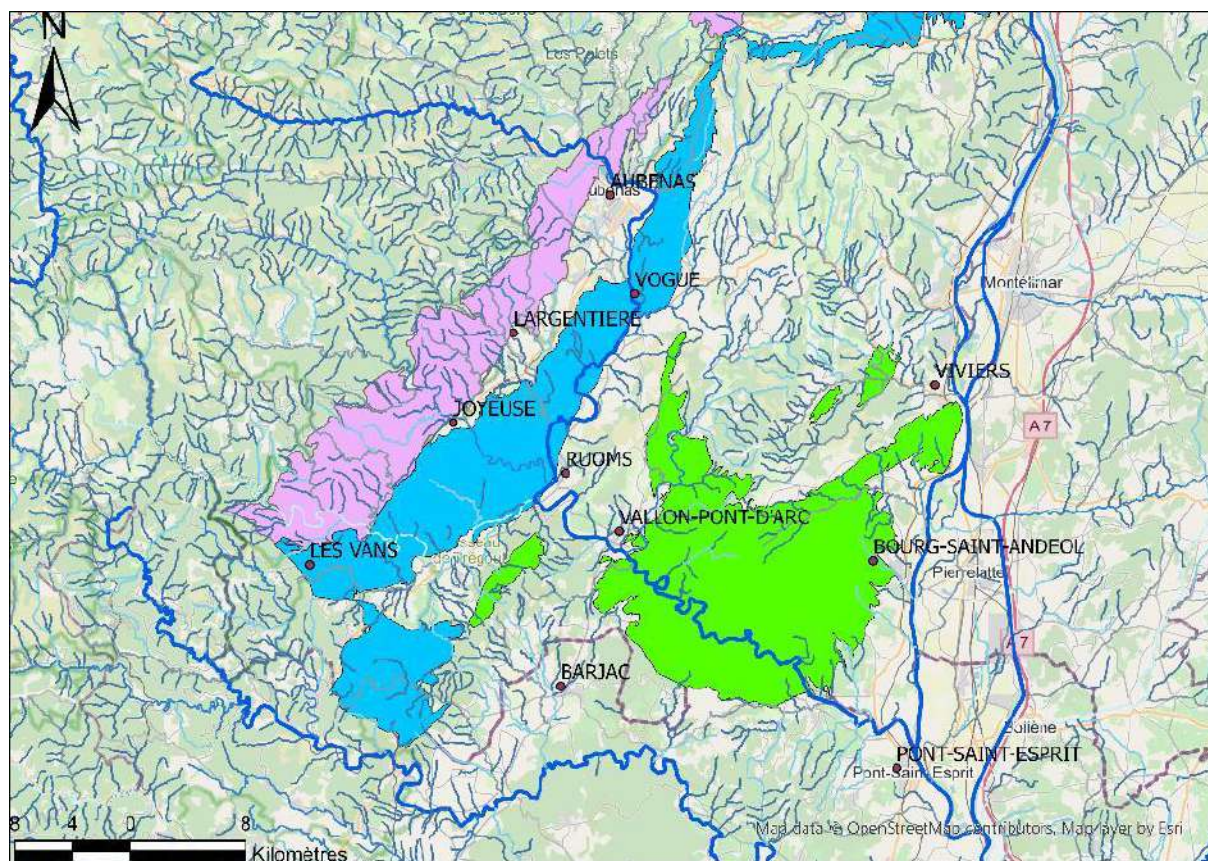
À l'issue de la phase 1, le choix a été fait de travailler sur le bassin versant aval de l'Ardèche qui est composé de deux unités principales :

- à l'amont, des bassins versant et sous-bassins versant de la Beaume et du Chassezac
- à l'aval des gorges de l'Ardèche (Urgonien)

Le rapport de phase 1 comporte la description et la caractérisation des différentes unités aquifères (Urgonien, Jurassique et Trias) avec :

- les modalités d'infiltration des eaux superficielles (ESU) ;
- l'organisation et les caractéristiques des écoulements ;
- la chimie des eaux ;
- le degré de fonctionnalité (pour le karst) ;
- les volumes d'eau mis en jeu ;
- les réserves renouvelables.

L'ensemble de ces données est cartographié dans la figure 2 du rapport phase 1.



Masses d'eau souterraines étudiées :

- FRDG 118 → Jurassique
- FRDG 161 → Urgonien
- FRDG 245 → Trias

Figure 1. Grandes masses d'eau souterraine du bassin versant de l'Ardèche

4. Rappel de la synthèse bibliographique

4.1. Éléments de base de la synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique a été établie à partir des nombreux travaux antérieurs réalisés depuis 1970 sur ces secteurs d'étude avec plusieurs travaux de thèse, des rapports de bureaux d'étude et de l'EPTB. Ces sources bibliographiques ont été répertoriées dans le §4 du rapport de phase1.

4.2. Apports de l'étude bibliographique

Nous reprenons ici les conclusions de cette étude bibliographique contenues dans le §4 du rapport de phase1.

Depuis les années 70, les études consacrées au bassin versant de l'Ardèche sont nombreuses que ce soit sous-forme de thèses de publications ou de rapports d'étude. Ces différents éléments nous ont apporté des connaissances de base sur la structure des massifs karstiques de la basse Ardèche, la chronologie des événements géologiques et tectoniques ayant conduit à leur formation, sur les conséquences en termes d'hydrodynamique souterraine et de relation avec les eaux superficielles. Elles restent néanmoins insuffisantes pour la caractérisation des masses d'eau pour quantifier les contributions des écoulements souterrains issus des différentes formations géologiques aux débits des rivières et en particulier ceux de l'Ardèche, ceci restant l'objectif principal du présent projet. Ces connaissances ont toutefois permis d'orienter le choix des sous-bassins versants et les investigations à réaliser dans la deuxième phase de ce projet : instrumentation et suivi hydrologique des écoulements en rivière aux interfaces des différents compartiments géologiques, instrumentation et suivi des émergences en rivière, analyse géochimique pour préciser l'origine des eaux, traçages complémentaires pour affiner les aires de drainage des sources. Rappelons que l'objectif de la phase 2, vise à caractériser les fonctionnements actuels des interactions Eso/Esu et d'évaluer la contribution des Eso aux débits d'étiage des cours d'eau. Ultérieurement, cela permettra de simuler l'évolution des échanges karst/ rivière en fonction de scénarios climatiques à venir.

5. Rappel sur les données existantes

5.1. Données météorologiques

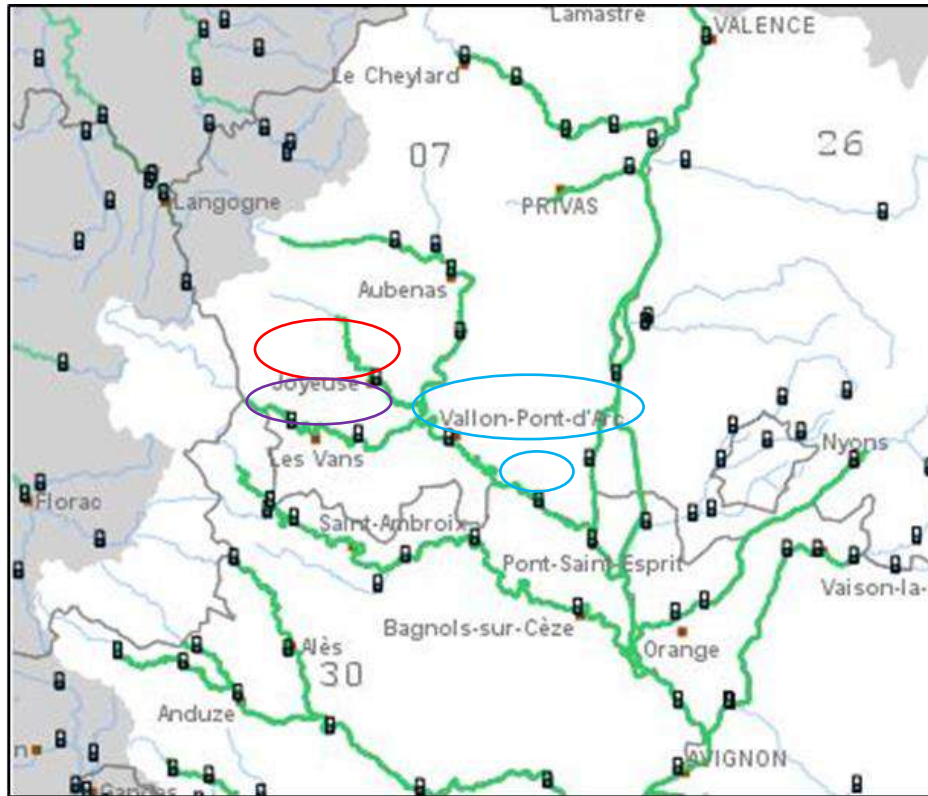
Il s'agit des données météorologiques de Météofrance (pluie évapotranspiration). Elles ont été répertoriées et cartographiées dans le §5 du rapport de phase 1 (figure 3). L'EPTB dispose des données MétéoFrance SAFRAN (8x8 km) au pas de temps journalier depuis 1958. Ces données seront utilisées, entre autres, pour le travail de modélisation.

5.2. Données hydrologiques du SPC

Les données hydrologiques disponibles et récupérées en 2023 sont essentiellement des niveaux d'eau (et de débits) enregistrés aux stations du Service de Prévention des Crues (SPC) et en provenance de la Banque Hydro. Au total les données de 9 stations ont été récupérées sur le Chassezac (2 stations), la Baume (2 stations : Rosière et Peyroche), la Volane (2 stations) et l'Ardèche (5 stations). Leur implantation, leur situation sur le réseau hydrographique sont intéressantes car ces stations se situent soit à des confluences des cours d'eau situés sur le site d'étude avec l'Ardèche soit à des interfaces entre les différentes masses d'eau. Une réunion de travail a été organisée en 2023 avec le responsable du SPC (DDT 07 à Privas) pour échanger sur la pertinence des données des différentes stations à l'étiage (incertitudes, courbes de tarage...).

Pour chaque station, la fiche d'identité issue de l'Hydro portail, donne des informations sur la finalité des mesures de la station calée soit pour les crues soit pour l'étiage. Ces informations seront prises en compte dans l'interprétation des données.

La localisation de ces stations est rappelée en Figure 2.



Stations du SPC sur l'Ardèche et ses affluents

Chassezac :

- Gravières
- Berrias-et-Casteljau

Baume :

- Rosières

Volane :

- Vals-les-Bains

Ardèche :

- Pont-de-Labeaume
- Pont-d'Ucel
- Vogüé
- Vallon-Pont-d'Arc
- Sauze

Figure 2 : Localisation des stations du SPC (Échelle Vigie Crue), entourées en rouge les stations a priori les plus pertinentes pour la Baume, en bleu pour l'Ardèche, en violet pour le Chassezac

5.3. Données hydrologiques et hydrogéologiques

Les données hydrogéologiques qui étaient disponibles au début du projet sont des niveaux piézométriques de nappe issus de la banque ADES et de la Banque de Données du Sous-Sol du BRGM. Elles ont été cartographiées dans les figures 5 à 8 du rapport de phase 1.

L'ensemble de ces données existantes a été utilisé pour guider les investigations de 2023 en matière de surveillance des niveaux d'eau et des débits sur des secteurs jusqu'à présent non couverts en particulier aux interfaces entre les différentes masses d'eau (Socle, Trias, Jurassique, Urgonien).

Rappelons que les sondes du SPC pouvant être dénoyées en cas d'étiage, deux autres sondes CTD ont été installées à l'amont des gorges et à l'aval à Sauze (St Martin d'Ardèche) sous l'eau pour enregistrer les niveaux d'eaux très bas.

Les traçages existants dont les résultats sont issus des travaux de compilation réalisés par l'AERMC puis le BE Idées Eaux pour le compte de l'EPTB Ardèche et complétés à partir des travaux réalisés sur l'interfluve Cèze-Ardèche. Deux traçages complémentaires ont été réalisés dans le cadre de ce projet pour mieux cerner les aires de drainage de 2 sources karstiques situées dans les gorges de l'Ardèche. Les fluorimètres et les sondes CTD installés en zone karstique noyée en 2022 et 2023 devraient permettre de préciser les échanges hydrauliques et leurs fluctuations dans le temps entre le réservoir karstique et l'Ardèche selon les variations du régime hydrologique du cours d'eau et de l'état de recharge du karst. Une carte (Figure 33, §7.4) des traçages complémentaires qui ont été effectués a été intégrée dans ce rapport

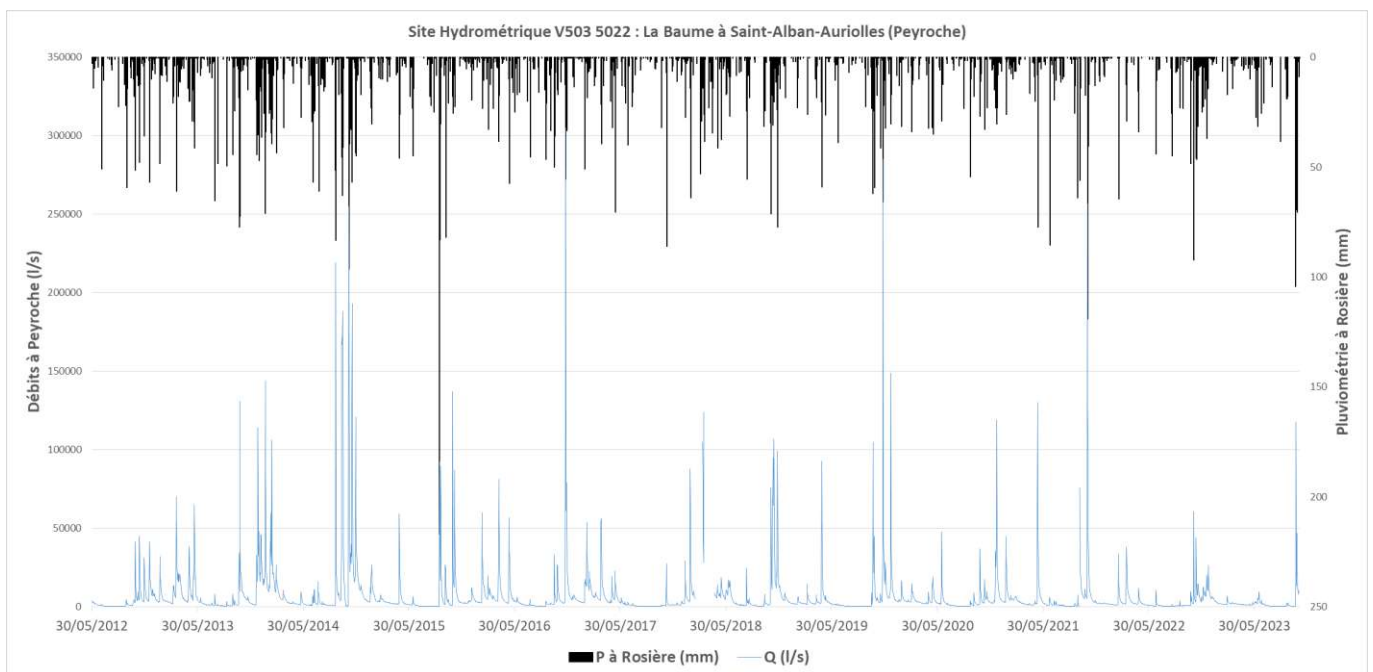
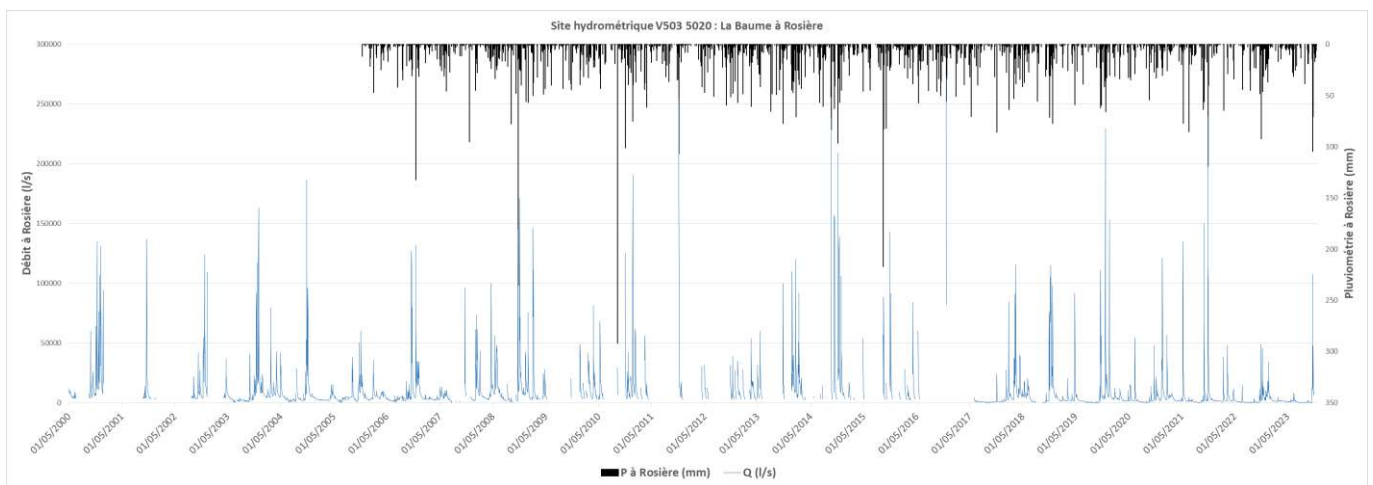
Tout comme l'a montré l'analyse bibliographique, les données déjà acquises sont nombreuses et variées. Issus des bases de données existantes (MétéoFrance, Hydro Portail, ADES, BRGM), les quelques points de surveillance sélectionnés pour lesquels on dispose de chroniques suffisamment longues aux interfaces entre les différentes masses d'eau souterraine, à l'amont, ainsi qu'à l'entrée et à la sortie des gorges karstiques, à l'aval, complètent ainsi les données acquises à partir des sondes installées pour ce projet.

6. Acquisition de données pour le suivi hydrologique

6.1. Analyse des données du SPC pour la Beaume et le Chassezac

Ces données du SPC, sous forme de chroniques (débits en l/s et pluviométrie en mm) sont les suivantes :

- site hydrométrique V503 5020 - La Beaume à Rosières de mai 2000 à novembre 2023 pour les débits et de novembre 2005 à novembre 2023 pour la pluviométrie (Figure 3). On note que les données de débits sont continues (à quelques exceptions près) à partir de juin 2017.
- site hydrométrique V503 5022 - La Beaume à Saint-Alban-Auriolles (Peyroche) de mai 2012 à novembre 2023 pour les débits (Figure 4). La chronique de pluie est celle de Rosières pour la même période. On note qu'il existe des données pluviométriques à l'amont des 2 stations au site météorologique 07202003 – Sablières.



- Site hydrométrique V504 5030 - Le Chassezac à Gravières de mai 2000 à novembre 2023 pour les débits et de novembre 2005 à février 2023 (Figure 5). Il existe plusieurs lacunes jusqu'en 2007.
- site hydrométrique V504 8813 - Le Chassezac à Berrias-et-Casteljau (Chalet) de juillet 2014 à novembre 2023 pour les débits et de janvier 2017 à novembre 2023 pour la pluviométrie (Figure 6). Les données sont assez complètes pour cette station.

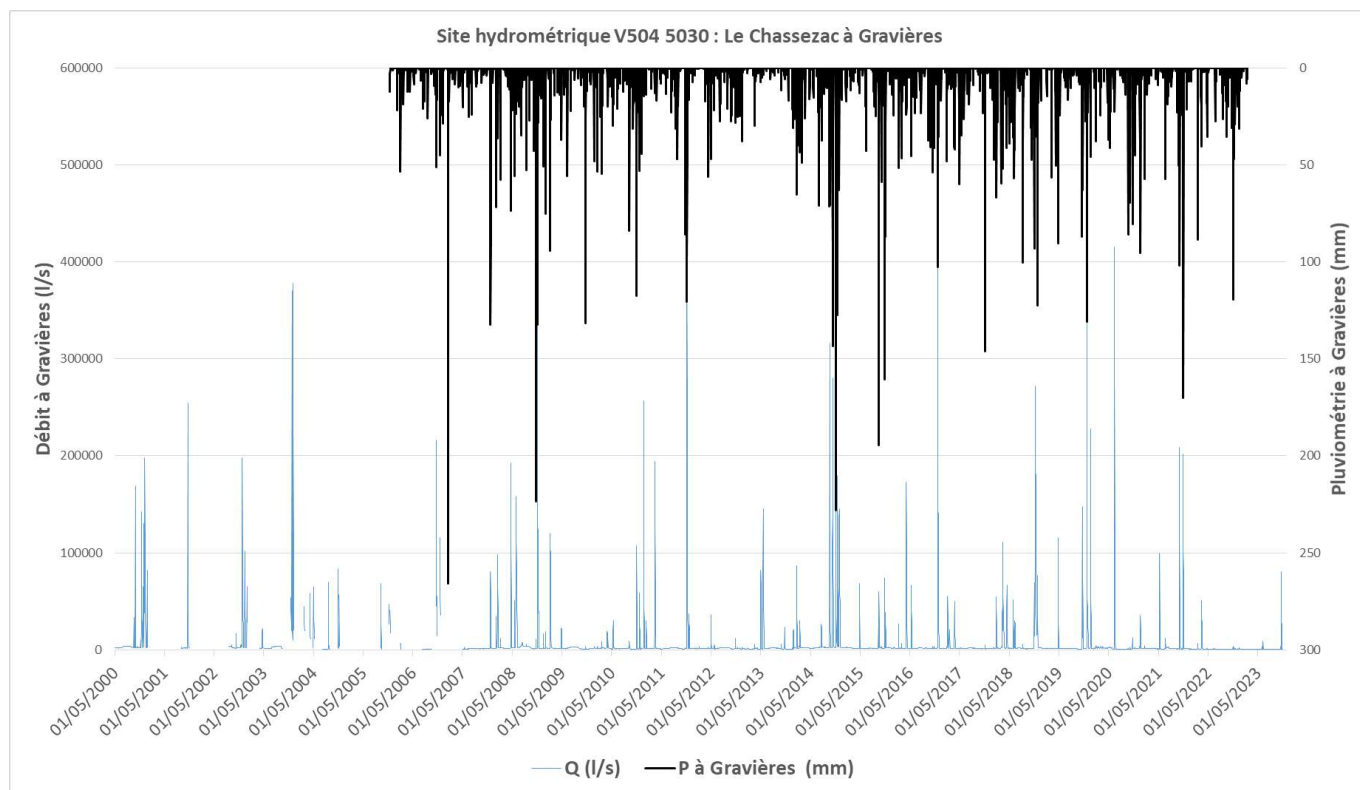


Figure 5 : Chronique de données du Site hydrométrique V504 5030 : Le Chassezac à Gravières

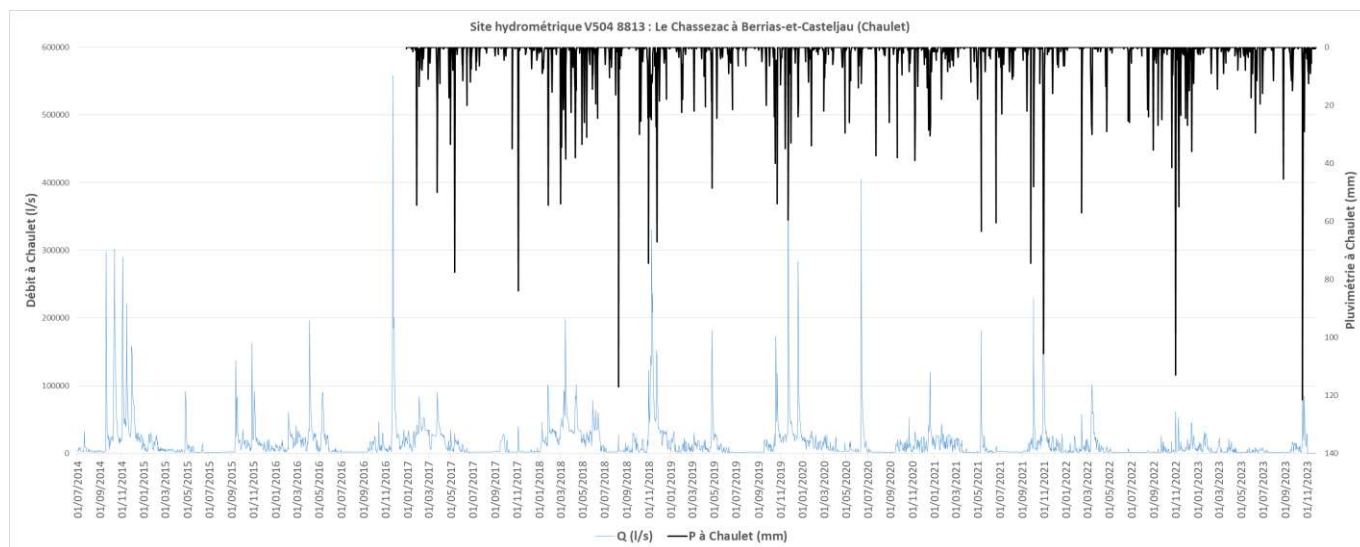


Figure 6 : Chroniques de données du site hydrométrique V504 8813 : Le Chassezac à Berrias-et-Casteljau (Chalet)

Ces mesures sont intéressantes d'un point de vue profondeur temporelle malgré quelques lacunes. Elles serviront à reconstituer le fonctionnement hydrologique actuel et à alimenter par la suite les modèles de prévision prévus dans la dernière phase du projet (simulations KarstMod ; Mazilli et al., 2019).

Cependant ces stations ne sont pas toujours situées aux interfaces entre les 3 grandes formations aquifères : socle, grès du Trias et calcaire du Jurassique (il n'y a pas de calcaire du Crétacé comme pour

les gorges de l'Ardèche – voir §7). En plus, ces stations sont généralement conçues pour enregistrer surtout les hauts niveaux d'eau avec des lacunes pour les périodes d'étiage. Pour ces différentes raisons il était nécessaire de compléter le dispositif de suivi avec des stations plus adaptées aux objectifs du projet. L'ensemble de ces données permettra de calculer des bilans d'apports ou de pertes sur différents tronçons de l'Ardèche et de ces 2 principaux affluents.

6.2. Acquisition de nouvelles données pour le suivi hydrologique et la caractérisation des masses d'eau

La section 8 du rapport de phase 1 contient les premiers éléments de caractérisation des masses d'eau souterraine (Meso) à partir des missions de terrain pour la reconnaissance du site d'étude, de la bibliographie, de l'installation de sondes et des premières mesures de conductivité effectuées à plusieurs endroits de la zone d'étude.

Le matériel et les protocoles des mesures hydrologiques que ce soit pour les niveaux, les températures, les conductivités ou les débits sont décrits en section 6 du rapport de phase 1 (figure 12).

Les cours d'eau principaux concernés par l'étude (Ardèche, Baume, Chassezac) ont donc été équipés en sondes automatiques de mesures CTD (T, P, EC). L'analyse des premières mesures de conductivité ont permis de confirmer le rôle des différentes masses d'eau qui sont en relation avec l'Ardèche et ses affluents dans l'emprise du secteur d'étude (Socle, Trias, Jurassique, Crétacé). Les jaugeages différentiels réalisés sur des tronçons de rivière à l'intérieur de chaque Meso ont permis de préciser ces apports et plus généralement les interactions ESO-ESU en cas de phénomènes de pertes de la rivière.

Pour analyser les données récupérées depuis 2021 sur les différents sites, on procédera par bassins versants d'amont en aval, tout d'abord sur le Chassezac (§6.2.1), ensuite sur la Baume (§6.2.2) puis sur l'Ardèche dans la partie aval du bassin dans les gorges karstiques (§7). Rappelons qu'une sonde Barologger destinée à enregistrer les variations de la pression atmosphérique ont été installées à Joyeuse (07) pour corriger les données des sondes en rivière. Des courbes de tarage ont pu être établies au droit des sondes pour transformer les hauteurs d'eau acquises en continu en valeurs de débit. Ces courbes restent à améliorer par modélisation à l'aide de la méthode BaRatin (§6.3) et du logiciel BaRatinAGE³.

Un traitement préliminaire a d'abord été réalisé sous SIG pour délimiter les contours des différents sous-bassins versants avec calcul de leurs surfaces et de la longueur du cours d'eau les traversant (Figure 7).

Ce traitement réalisé sous ArcGIS pro comporte 2 étapes principales :

- calcul du réseau hydrographique théorique à partir du MNT (RGEALTI 5m de l'IGN) ;
- calcul de la surface des sous bassins versants à partir des points définis comme exutoire.

Le Tableau 1 présente pour chaque bassin versant (Baume, Chassezac, Ardèche) les surfaces topographiques en km² et le linéaire de cours d'eau en km traversant les différentes formations : le socle, les grès du Trias, le Jurassique, l'Urgonien. La surface S et le linéaire L sont précisés aux interfaces entre ces formations ainsi qu'à l'amont des sondes de mesure qui ont été installées. Le rapport S/L est intéressant et peut correspondre au drainage potentiel de la surface par la rivière. Ce rapport peut également être utile pour déterminer une valeur unitaire des contributions d'eau souterraine vers les eaux de surface et réciproquement.

³ <https://riverhydraulics.inrae.fr/outils/logiciels/baratin-2/>

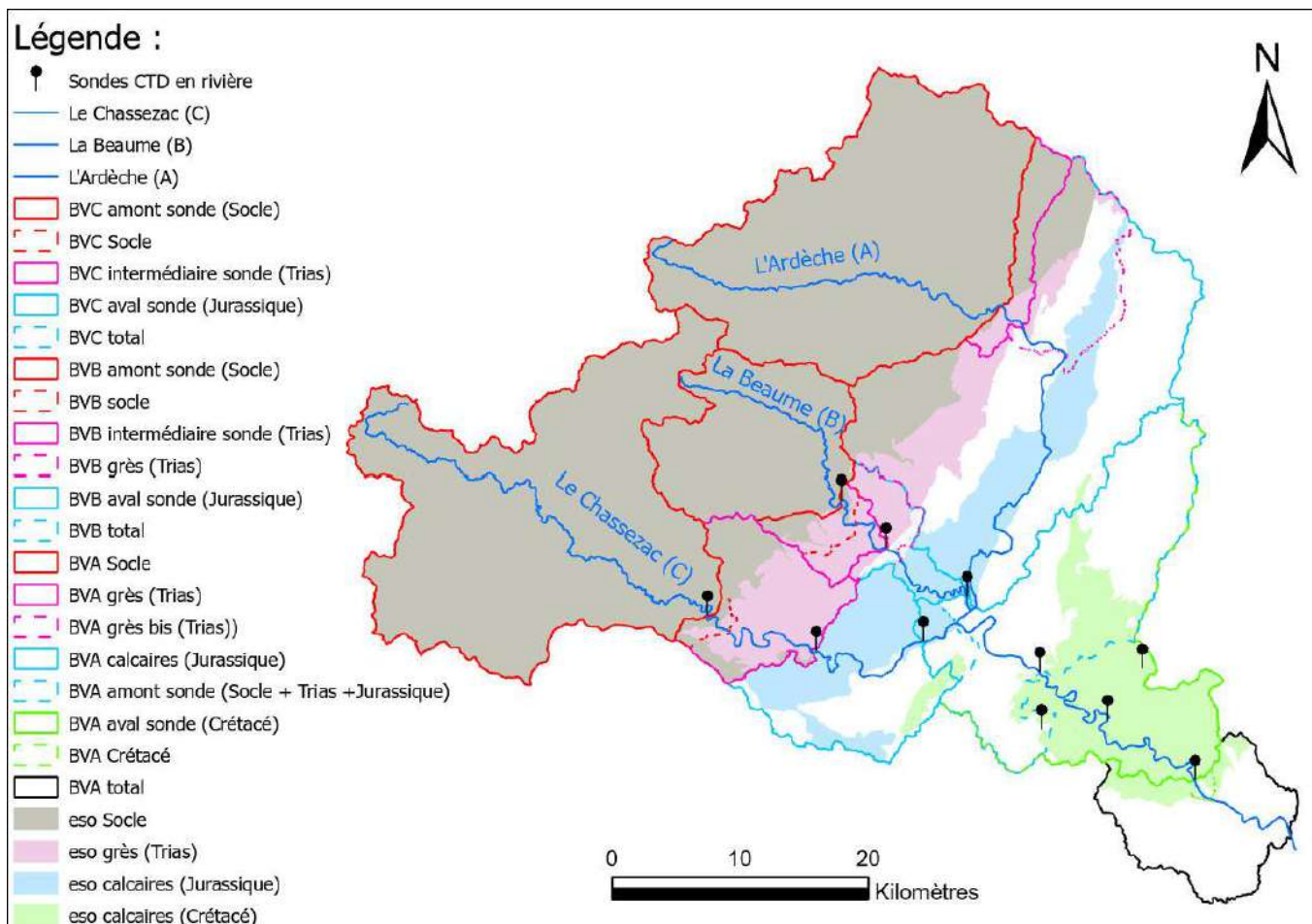


Figure 7 : Délimitation des sous-bassins de la zone d'étude

	Baume			Chassezac			Ardèche			Total		
Surface du bassin versant topographique (km ²) / Linéaire de cours d'eau (km)	Surface (S)	Linéaire (L)	S/L	Surface	Linéaire	S/L	Surface	Linéaire	S/L	Surface	Linéaire	S/L
sur socle	173,2	26,1	6,6	526,1	54,8	9,6	538,0	36,3	14,8	1237,4	117,2	10,6
sur grès du Trias	45,8	4,8	9,5	62,1	11,7	5,3	70,3	2,8	24,9	178,2	19,3	9,2
sur Jurassique	15,6	10,7	1,5	92,5	18,5	5,0	97,1	28,3	3,4	205,2	57,5	3,6
sur Urgonien	0,0	0,0		9,6	0		181,7	29,4	6,2	191,3	29,4	6,5
autre	5,7	1,7	3,4	54,6	0		508,3	27,0	18,8	568,5	28,7	19,8
total(e)		43,8			84,5			125,0			253,4	
total (calcul BV sur ArcGis pro)	240,4	43,3	5,6	744,9	85,0	8,8	1395,4	123,9	11,3	2380,6	252,2	9,4

à la sortie des formations de socle/entrée dans les formations de grès du Trias	184,1	26,1	7,1	496,4	54,8	9,1	436,8	36,3	12,0	1117,3	117,2	9,5
à l'amont de la sonde amont (interface théorique socle/grès)	164,3	22,5	7,3	487,9	51,6	9,5						
à la sortie des formations de grès du Trias	200,4	30,9	6,5	589,5	66,5	8,9	473,8	39,1	12,1	1263,7	136,6	9,3
à l'amont de la sonde intermédiaire (interface théorique grès/Jurassique)	200,4	30,9	6,5	589,5	66,5	8,9						
à l'entrée dans les formations du Jurassique	225,3	32,6	6,9	589,5	66,5	8,9	564,4	43,6	12,9	1379,3	142,7	9,7
à l'amont de la sonde aval (exutoire)	240,1	42,6	5,6	725,7	81,1	8,9						
à la sortie des formations du Jurassique	240,4	43,3	5,6	744,9	85,0	8,8	930,9	72,0	12,9	1916,1	200,3	9,6
à l'amont de la sonde amont des gorges (entrée théorique de l'Urgonien)							1163,3	85,6	13,6			
à l'entrée dans les formations de l'Urgonien							1163,3	85,6	13,6	1163,3	85,6	13,6
à l'amont de la sonde aval des gorges (sortie théorique de l'Urgonien)							1276,7	112,8	11,3			
à la sortie des formations de l'Urgonien							1280,1	115,0	11,1	1280,1	115,0	11,1
à l'exutoire	240,4	43,3	5,6	744,9	85,0	8,8	1395,4	123,9	11,3	2380,6	252,2	9,4

Tableau 1 : Surfaces topographiques (en km²) et linéaire de cours d'eau (en Km) traversant les différentes formations géologiques de la zone d'étude pour chaque bassin versant

Les critères de description des chroniques de mesures qui ont été relevées aux sondes (Figure 8 à Figure 14) : température de l'eau (en rouge), sa conductivité électrique (en vert), niveau d'eau (en bleu), pluviométrie (en noir) et débits de jaugeage (triangle) sont :

- la situation / localisation de la sonde ;
- la cohérence globale de la station de mesure : fonctionnement de la sonde, cohérence avec les valeurs relevées manuellement sur le terrain ;
- la période de fonctionnement et le nombre de cycles hydrologiques couverts ;
- les pics de pluie (nombre et intensité) ;
- la concordance ou le décalage en temps entre la pluie et les valeurs de niveau d'eau enregistrées ;
- la confrontation des valeurs de niveaux d'eau à celles de conductivité ;
- l'interprétation des variations de débits de jaugeage de terrain.

Les valeurs de niveau d'eau ont été corrigées de la variation barométrique enregistrée à la sonde de Joyeuse (Hôtel des Cèdres). En complément, si besoin, l'EPTB dispose de 2 sondes barométriques à Vogué et à Vallon-Pont-d'Arc.

6.2.1. Données hydrologiques relevées aux sondes installées sur le Chassezac

Le fonctionnement hydrologique de ce bassin versant est complexe car il est lié à la présence de plusieurs aménagements hydroélectriques. Les stations de suivi implantées dans le cadre du projet sont localisées à l'aval de la partie cristalline (Figure 7). Ces trois sondes sont effectivement implantées à l'aval du barrage de Malarce, dernier ouvrage EDF⁴ à l'aval : 1) la plus à l'amont enregistre les hauteurs d'eau correspondant au flux relâché par ce barrage ; 2) la sonde intermédiaire mesure une hauteur intégrant en plus le flux turbiné à l'usine des Salelles ; 3) la sonde aval enregistre la hauteur correspondant au débit résultant.

Le fonctionnement du barrage de Malarce et de l'usine des Salelles est le suivant :

- de juin à septembre le débit est relativement stable et correspond majoritairement au soutien d'étiage (1 à 3 m³/s) ;
- de septembre à mars les turbinages pour la production d'hydroélectricité sont fréquents ;
- la période de mars à juin est consacrée au remplissage des réserves pour le soutien d'étiage avec moins de turbinage.

6.2.1.1. Chassezac amont

Cette sonde a été implantée à la sortie des formations de socle avant l'entrée de la rivière dans les grès du Trias (Figure 8) à l'exutoire d'une surface de bassin de 487,9 km². À ce niveau la longueur du cours d'eau est de 51,6 km avec un rapport S/L de 9,5 km (Tableau 1).

Globalement, la sonde n'a pas très bien fonctionné pour les différents paramètres. Les enregistrements ont été interrompus de fin septembre 2022 à mi-juillet 2023 (sonde dénoyée ou hors service). La période d'enregistrement est de 15 mois (octobre 2021 à septembre 2022 ; de mi-juillet 2023 à fin septembre 2023 les mesures ont été effectuées avec une sonde de secours fournie par l'EPTB qui ne mesure pas la conductivité. Une nouvelle sonde CTD a été installée en septembre) soit un peu plus d'un cycle hydrologique. Sur la période de bon fonctionnement de la sonde, on observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain de la température et des niveaux d'eau. Par contre les valeurs de conductivité sont ininterprétables d'octobre 2021 jusqu'à mai 2022 et très différentes de celles mesurées sur le terrain. Ceci est dû à la sensibilité de ce type de sondes vis-à-vis des valeurs inférieures à 50 µS/cm.

Les principaux pics de pluie enregistrés au pluviographe de Chaulet se situent fin 2021, l'hiver 2022, de juillet 2022 à fin décembre 2022 avec un pic en juin et septembre 2023. Le cumul et l'intensité de pluie ont été plus importants en 2022 (930 mm) qu'en 2023 (646 mm de janvier à septembre).

Les pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière ne coïncident pas toujours avec les pics de pluie. En effet le débit est contrôlé par le barrage de Malarce dont une partie est dévié à l'amont en conduite EDF. Cette eau est restituée au Chassezac à Salelles à l'aval de la sonde et de la station SPC de Gravières. L'impact des pluies sur le débit de la rivière dépend du fonctionnement du barrage. Le signal mesuré est souvent celui du débit réservé et celui des pics de crues importantes. Il faudrait récupérer les débits de dérivation auprès d'EDF.

Les valeurs de conductivité sont donc peu interprétables (Maximum à environ 70 µS/cm valeur due à une très faible minéralisation de l'eau dans cette partie amont du bassin versant).

On ne dispose que de deux valeurs de débits mesurés par jaugeage au courantomètre et au sel pendant l'été 2022, elles sont de 1,87 m³/s et de 2,5 m³/s. Là encore, il s'agit de données peu significatives puisque le débit est partiellement détourné en amont.

4. https://www.edf.fr/sites/groupe/files/Lot%203/HYDRAULIQUE/Loire%20Ard%C3%A8che/PDF/memoguide_chassezac.pdf

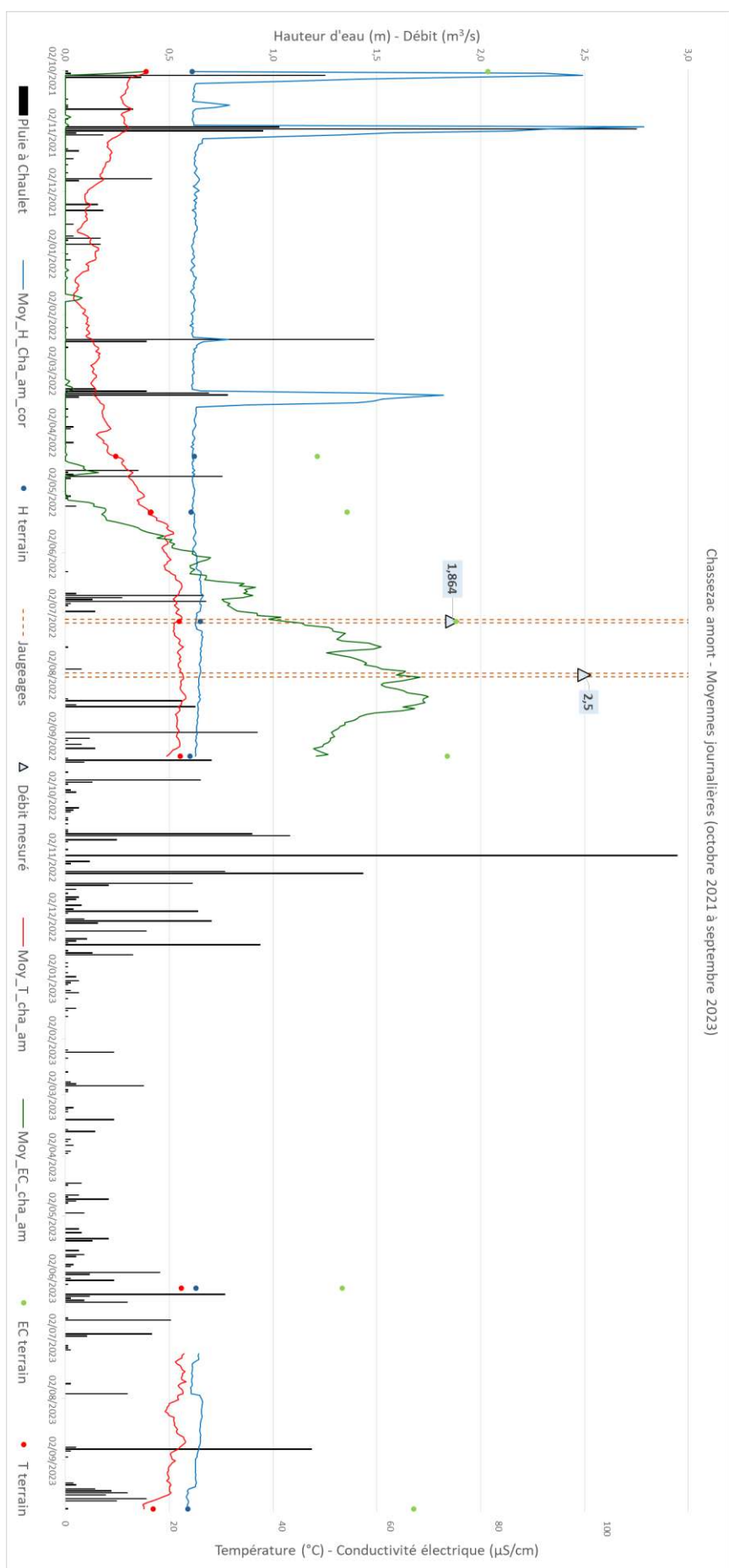


Figure 8 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac amont

6.2.1.2. Chassezac intermédiaire

La sonde a été implantée à la sortie de la rivière après sa traversée dans les grès du Trias avant de traverser la partie calcaire jurassique du bassin versant (Figure 9). À ce niveau la surface de bassin versant cumulée est de 589,5 km² et le linéaire du cours d'eau est de 66,5 km avec un rapport S/L de 8,9 km.

Globalement, la sonde a bien mieux fonctionné pour les différents paramètres par rapport à celle située en amont hormis quelques dénoyage temporaire jusqu'en avril 2022. Après cette date la sonde a été repositionnée et le problème de dénoyage réglé. On observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain pour les niveaux d'eau et la température. Par contre les valeurs de conductivité mesurées sur le terrain sont en général supérieures à celles enregistrées par la sonde (en moyenne 30 µs/cm), écart toujours lié au type de sonde malgré une conductivité globalement supérieure à celle de l'amont. La période d'enregistrement a commencé début octobre 2021 et s'est terminée fin septembre 2023. On dispose donc de 24 mois d'enregistrement soit environ deux cycles hydrologiques.

Les principaux pics de pluie enregistrés au pluviographe de Chaulet se situent à l'automne 2021 (début octobre et début novembre), en février et mars 2022 et surtout début novembre jusqu'à fin décembre 2022. Comme pour la partie amont du bassin versant, le cumul et l'intensité de pluie ont été plus importants en 2021 (847 mm) et 2022 (930 mm) qu'en 2023 (646 mm de janvier à septembre).

Le décalage des pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière par rapport aux pics de pluie sont relativement faibles et ne dépassent pas quelques jours sauf peut-être mi-mars 2023 (décalage d'une dizaine de jours). Le limnigramme est toujours influencé par le fonctionnement du barrage de Malarce et de l'usine hydroélectrique des Salelles. On observe un niveau de base (environ 0,5 m pour cette sonde) correspondant vraisemblablement au débit réservé et des pics de crues peu ou pas amortis par le barrage. Les variations (comprises entre 12 et 27 m³/s) observées en dehors des périodes estivales sont majoritairement liées aux turbines hydroélectriques (1 à 2 fois par jours pendant quelques heures).

Généralement les valeurs de conductivité sont assez sensibles mais ont globalement tendance à augmenter quand les niveaux d'eau baissent car la rivière draine davantage de minéraux potentiellement apportés par les eaux souterraines (Maximum à 190 µs/cm en novembre 2022). Début novembre 2022, les fortes valeurs de conductivités coïncident avec des niveaux hauts ce qui pourrait s'expliquer par des apports liés au lessivage des sols. Elles diminuent (Minimum à 10 µs/cm en mars 2022, valeur peu fiable étant donné le comportement erratique de la sonde à cette période) si les niveaux d'eau sont plus élevés.

Les débits mesurés par jaugeage au courantomètre varient de 2,39 m³/s début août 2022 à 1,43 m³/s mi-mai 2023. La valeur maximale est postérieure à une période d'un mois sans pluie ce qui laisserait supposer la présence d'apports souterrains ou de versant. Cependant cette valeur maximale semble surestimer le débit compte-tenu des 2 valeurs l'encadrant dans le temps.

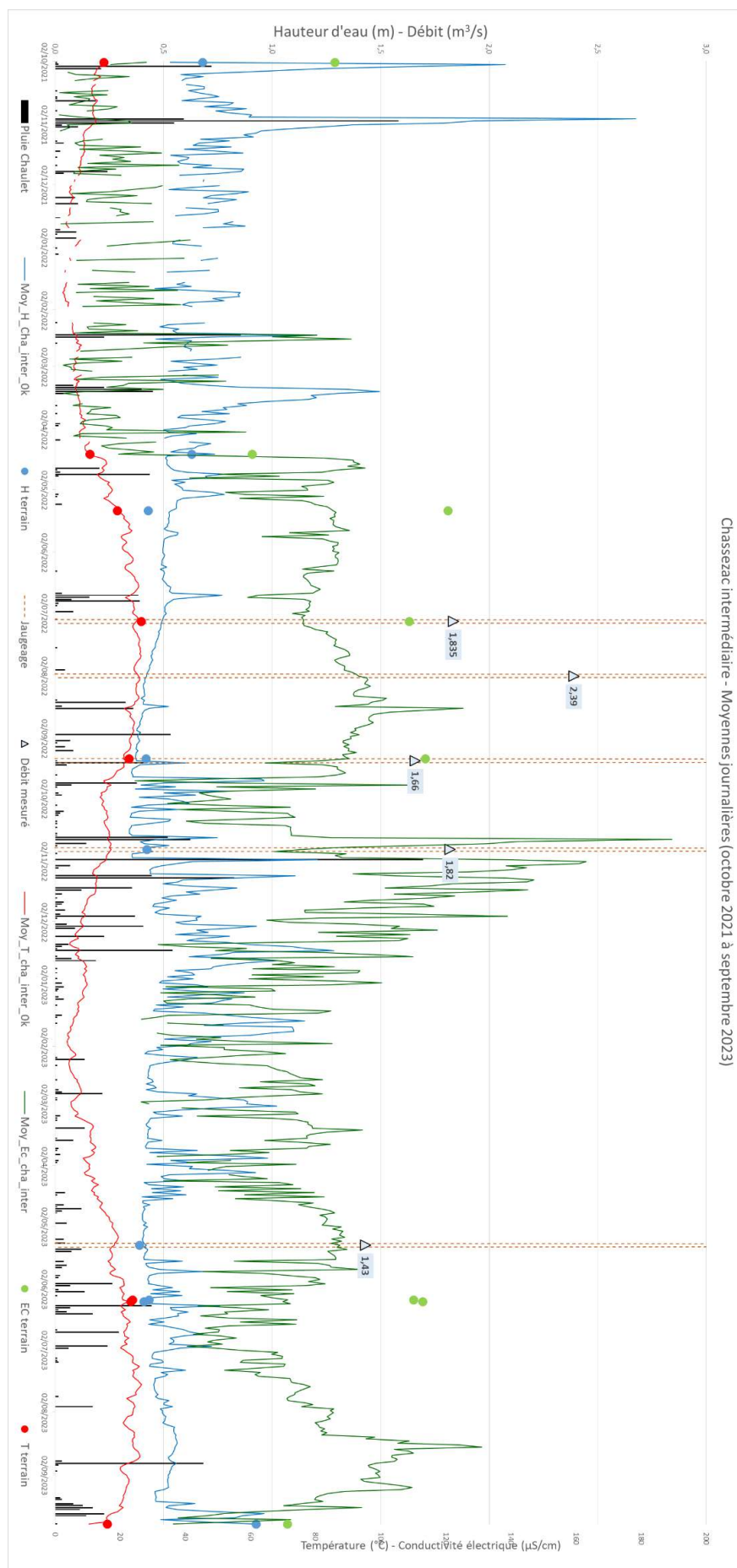


Figure 9 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac intermédiaire

6.2.1.3. Chassezac aval

La sonde a été implantée dans la rivière après avoir traversé les formations calcaires du Jurassique (Figure 11). À ce niveau la surface de bassin versant cumulée est de 725,7 km² et le linéaire du cours d'eau est de 81,1 km avec un rapport S/L de 8,9 km.

Sur la première partie de la chronique (octobre 2021 à avril 2022) la sonde est mal positionnée et n'enregistre pas les niveaux bas. Elle a été repositionnée ensuite mais malheureusement volée (trou dans la chronique d'avril à juin 2022). Une nouvelle sonde a finalement été installée en juillet 2022. À partir de ce moment, elle a bien mieux fonctionné pour les différents paramètres. Sur la période d'enregistrement, on observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain pour les niveaux d'eau, la température et la conductivité. La période d'enregistrement a commencé début octobre 2021 et s'est terminée fin septembre 2023. Étant donné l'interruption liée aux différents problèmes, on ne dispose donc d'environ 15 mois d'enregistrement soit environ un cycle hydrologique et demi.

Tout comme la sonde intermédiaire les principaux pics de pluie enregistrés au même pluviographe de Chalet se situent au même moment. Le décalage des pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière par rapport aux pics de pluie sont aussi relativement faibles et ne dépassent pas quelques jours au maximum. Généralement les valeurs de conductivité sont moins sensibles qu'à la sonde intermédiaire et augmentent quand les niveaux d'eau baissent (maximum à 370 µs/cm en novembre 2022 contre 190 à la sonde intermédiaire). Elles diminuent lorsque les niveaux d'eau sont plus élevés (minimum à 10 µs/cm fin décembre 2021, valeur également peu fiable étant donné le comportement erratique de la sonde à cette période).

Les débits mesurés par jaugeage au courantomètre varient de 3,08 m³/s en novembre 2022 (valeur supérieure au 2,39 m³/s de la sonde intermédiaire début août 2022) à 0,31 m³/s contre 1,43 m³/s mi-mai 2023. La valeur minimum de débit étant plus faible qu'à la sonde intermédiaire, cela laisse supposer l'existence de pertes dans le calcaire jurassique ou celle de prélèvements dans les alluvions du Chassezac. Toutefois, comme pour la station précédente le limnigramme semble resté influencé par le fonctionnement du barrage (le niveau de base est approximativement de l'ordre de 0,7 m pour cette sonde).

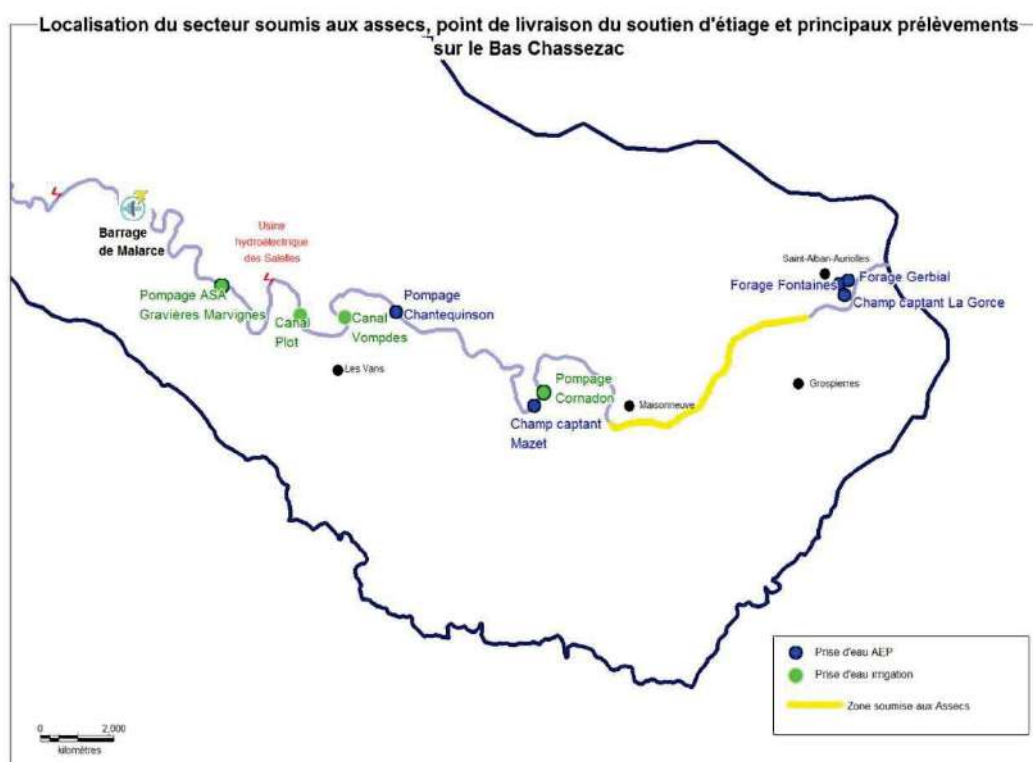


Figure 10. Principaux prélèvements d'eau, pompage (vert et bleu) et zone de perte (jaune) sur le Chassezac (Contrat de rivière Chassezac, septembre 2015)

Le fonctionnement hydrologique sur la partie aval du Chassezac⁵ comprend (Figure 10) :

- des prélèvements pour l'irrigation et l'AEP ;
- un soutien d'étiage de Malarce l'été ;
- une zone de pertes entre Maisonneuve et Saint-Alban ;
- une résurgence karstique à l'aval à Saint-Alban.

5. Rapport ressources stratégiques AEP Ardèche-Claire (Idées EAUX, 2016) - https://www.ardeche-eau.fr/documentation/documentation-du-sage/cat_view/73-documentation-du-sage/120-4-etudes-et-autres-documents/122-etude-ressources-souterraines-strategiques

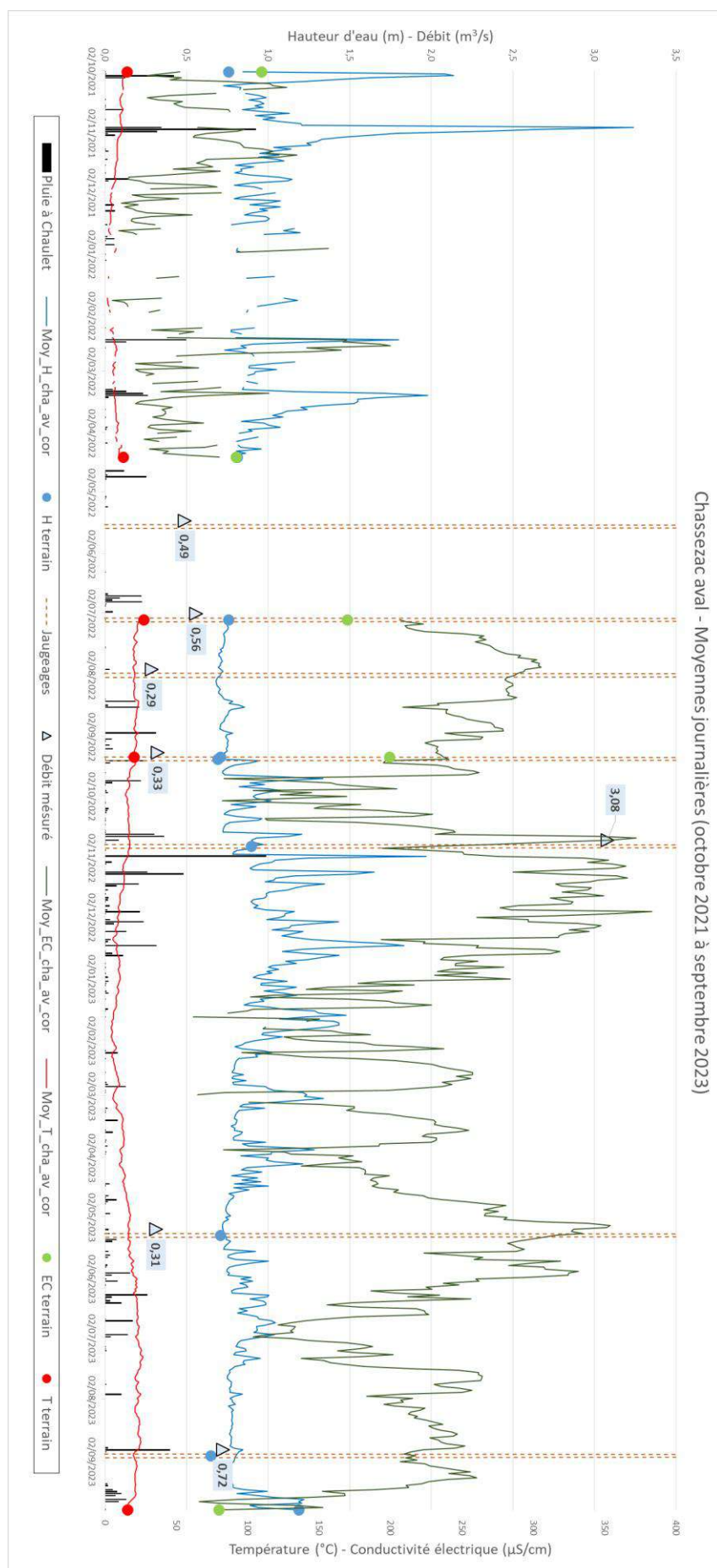


Figure 11 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac aval

6.2.2. Données hydrologiques relevées aux sondes installées sur la Beaume

6.2.2.1. Sonde Beaume amont

La sonde a été implantée à la sortie du socle au contact des grès du Trias (Figure 12) à l'exutoire d'une surface de 164,3 km². À ce niveau la longueur du cours d'eau est de 22,5 km avec un rapport S/L de 7,3 km.

Globalement, la sonde (nouvelle génération, version 5) a bien fonctionné pour les différents paramètres. On observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain. La période d'enregistrement est de 17 mois (avril 2022 à septembre 2023) soit un peu plus d'un cycle hydrologique et demi.

Les principaux pics de pluie enregistrés au pluviographe de La Sablière se situent fin avril 2022, mi-juin 2022, mi-septembre 2022, fin octobre à décembre 2022, mai/juin 2023, fin août et mi-septembre 2023. Le cumul et l'intensité de pluie ont été plus importants en 2022 par rapport à 2023.

Le décalage des pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière par rapport aux pics de pluie sont peu importants et sont pratiquement synchrones.

Généralement les valeurs de conductivité augmentent quand les niveaux d'eau baissent car la rivière draine davantage de minéraux (maximum à 180 µs/cm). Elles diminuent (minimum à 40 µs/cm) si les niveaux d'eau sont plus forts ce qui correspond à une dilution liée à une quantité d'eau plus importante (pluie). On observe toutefois une hausse brutale de la conductivité en août 2022 lors d'une petite crue (liée vraisemblablement à un orage localisé) qui pourrait être expliquée par un lessivage/érosion des sols.

Les débits mesurés par jaugeage au courantomètre varient de 1,87 m³/s mi-octobre 2022 à 0,17 m³/s à la fin de l'étiage mi-septembre 2022 et voisin de celui de 2023 à 0,19 m³.

Par rapport au Chassezac, le limnigramme n'est pas influencé par un barrage. On observe de belles courbes de récession.

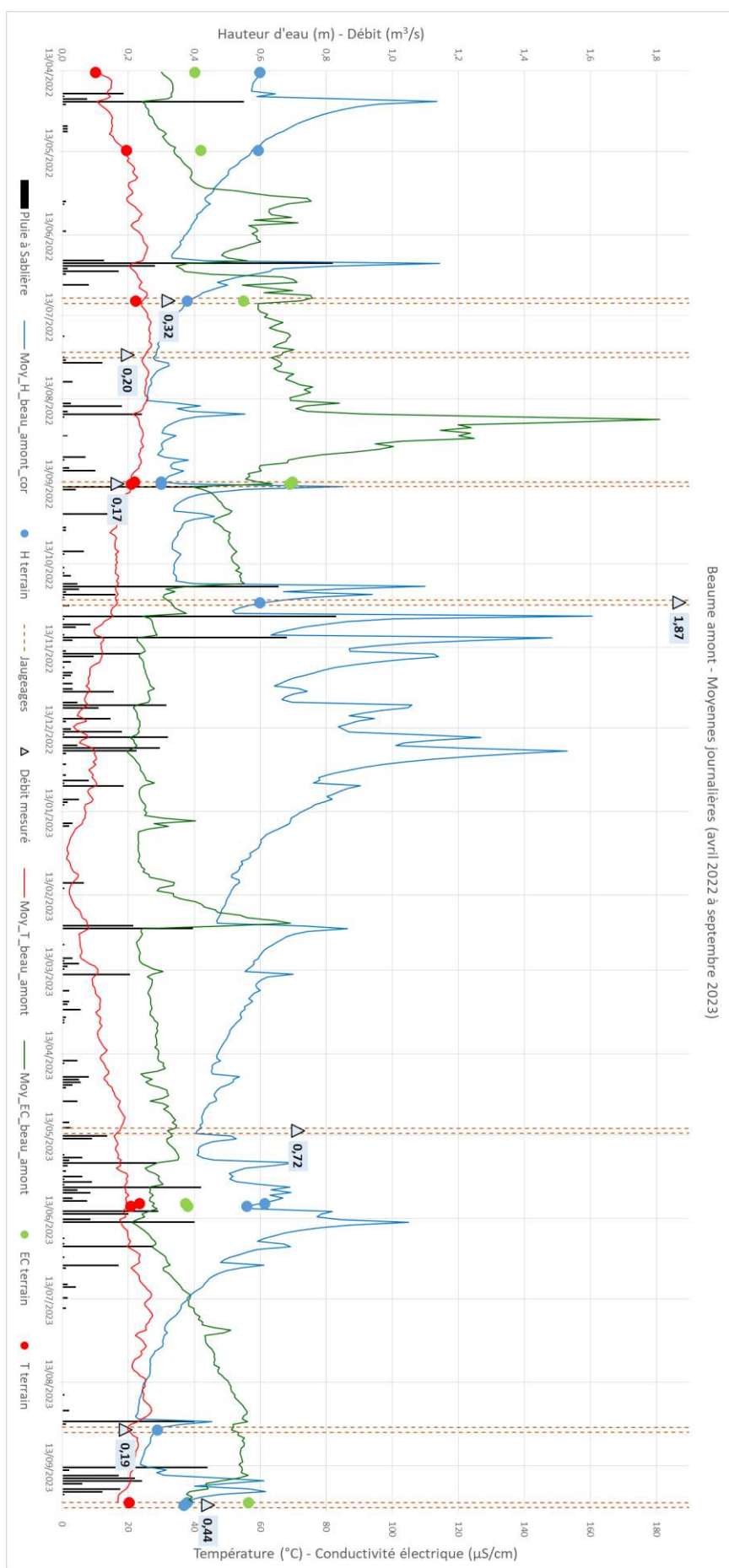


Figure 12 : Chronique de mesures de la sonde Beaume amont

6.2.2.2. Sonde Beaume intermédiaire

La sonde a été implantée à la sortie des formations de grès du Trias à l'interface avec les formations jurassiques (Figure 13) à l'exutoire d'une surface de 200,4 km². À ce niveau la longueur du cours d'eau est de 30,9 km avec un rapport S/L de 6,5 km.

Tout comme la sonde amont, globalement, cette sonde a bien fonctionné pour les différents paramètres. On observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain. La période d'enregistrement est de 17 mois (mi-avril 2022 à fin septembre 2023) soit plus d'un cycle hydrologique.

Les principaux pics de pluie enregistrés au pluviographe de Rosières se situent fin avril 2022, fin juin et mi-août 2022, mi-septembre 2022, de fin octobre à fin décembre 2022, juin/début juillet 2023, fin août et mi-septembre 2023. Le cumul et l'intensité de pluie ont été, là aussi, plus importants en 2022 (972 mm) par rapport à 2023 (731 de janvier à septembre).

Le décalage des pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière par rapport aux pics de pluie sont peu importants et ne dépassent pas quelques jours.

Généralement les valeurs de conductivité augmentent quand les niveaux d'eau baissent (maximum à 250 µs/cm). Elles diminuent (minimum à 30 µs/cm) si les niveaux d'eau sont plus élevés. Quelques exceptions toutefois où la conductivité augmente lorsqu'il a plu et que le niveau d'eau augmente (fin juin 2022, novembre/décembre 2022, juin 2023). Cela laisserait supposer des apports d'eau plus minéralisée comme l'eau souterraine à la rivière en provenance des grès du Trias par l'intermédiaire de la source de Chamandre qui s'y trouve. Concernant la pluviométrie, des précisions sur la distribution spatiale pourraient être apportées avec l'analyse des données Safran.

Les débits mesurés par jaugeage au courantomètre varient entre 2,11 m³/s début novembre 2022 (ce qui est un peu plus élevé qu'à Beaume amont à la même période) et 0,23 m³/s pendant l'été 2022. On note à l'été 2023 (mi-juillet) une dépression dans le limnigramme qu'on observe pour l'étiage 2022 où la récession est plus régulière, sans doute symptomatiques de prélèvements.

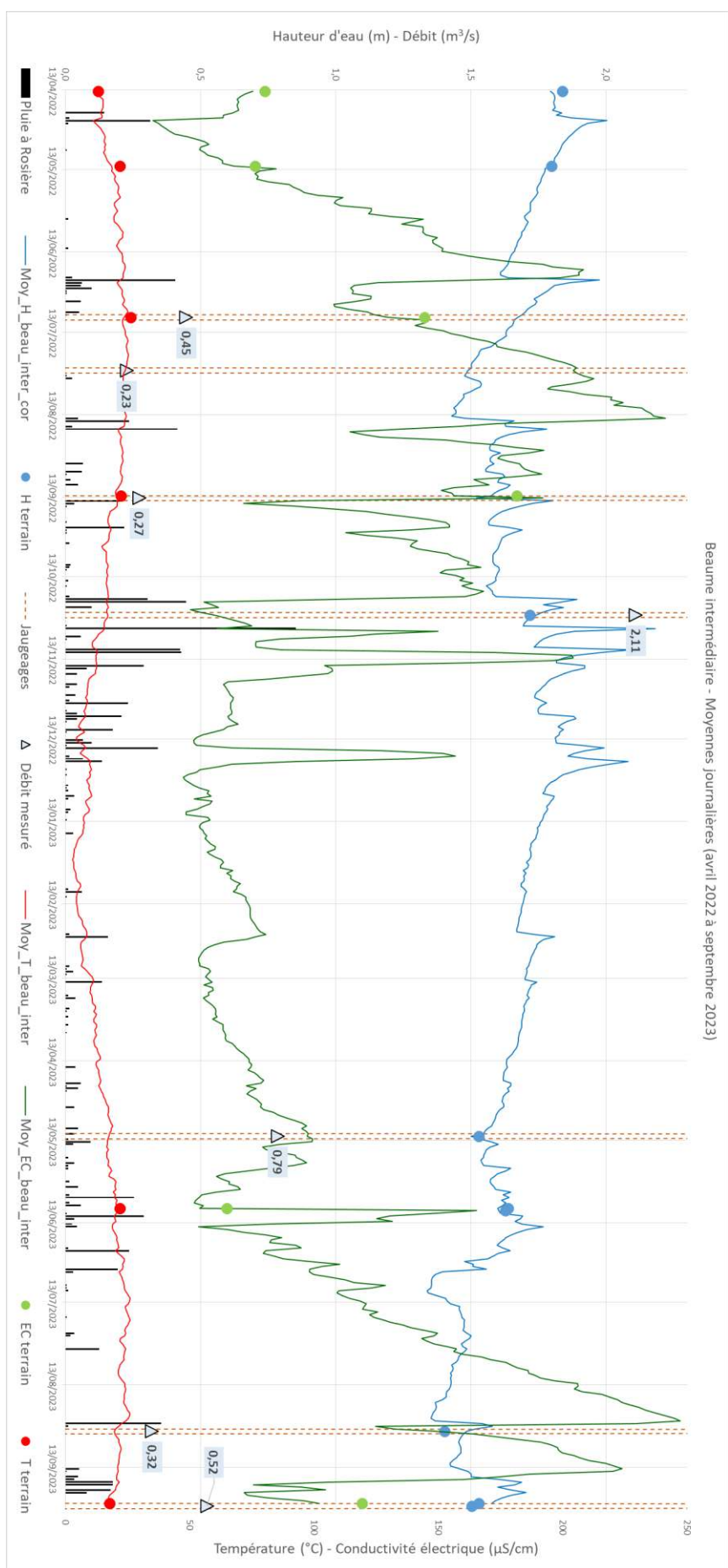


Figure 13 : Chronique de mesures de la sonde Beaume intermédiaire

6.2.2.3. Sonde Beaume aval

La sonde a été implantée à la sortie des formations jurassiques (Figure 14) à proximité de la confluence avec l'Ardèche. À ce niveau la surface de bassin versant cumulée est de 240,1 km². À ce niveau la longueur du cours d'eau est de 42,6 km avec un rapport S/L de 5,6 km.

Globalement, la sonde a bien fonctionné pour les niveaux d'eau et la température. On note toutefois quelques décrochements dans les valeurs de conductivité lors d'épisodes de crues significatifs. Ceci pourrait être lié à un excédent de matière en suspension qui neutralise le capteur de conductivité dans la sonde. À la fin de l'été 2023, la sonde est dénoyée et les niveaux d'eau ne sont pas enregistrés pendant plusieurs jours.

On observe une bonne cohérence avec les mesures de terrain (niveaux d'eau et conductivités). La période d'enregistrement est de presque 2 ans (octobre 2021 à fin septembre 2023) soit environ pendant pratiquement deux cycles hydrologiques.

Les principaux pics de pluie enregistrés au pluviographe de Rosières se situent début novembre 2021, mi-février et mars 2022, novembre/décembre 2022, début juillet 2023, septembre 2023. Le cumul et l'intensité de pluie ont été également plus importants en 2022 qu'en 2023.

Il n'y a pratiquement pas de décalage entre les pics de niveaux d'eau enregistrés dans la rivière par rapport aux pics de pluie.

Généralement les variations de conductivité sont normales et réagissent en sens inverse des niveaux d'eau (maximum à 300 µs/cm et minimum autour de 50 µs/cm). Il y a environ +50 points d'écart avec les valeurs de la sonde intermédiaire.

Les débits mesurés par jaugeage au courantomètre varient entre 2,31 m³/s début novembre 2022 (ce qui est un peu plus élevé qu'à Beaume amont et Beaume intermédiaire à la même période) et 0,05 m³/s pendant l'été 2022 ce qui est beaucoup plus faible qu'à Beaume amont (0,20 m³/s) et Beaume intermédiaire (0,23 m³/s) à la même période. Ceci signifie qu'il y a sans doute des pertes de la rivière dues à la proximité de prélèvements ou à la baisse du niveau d'eau souterraine.

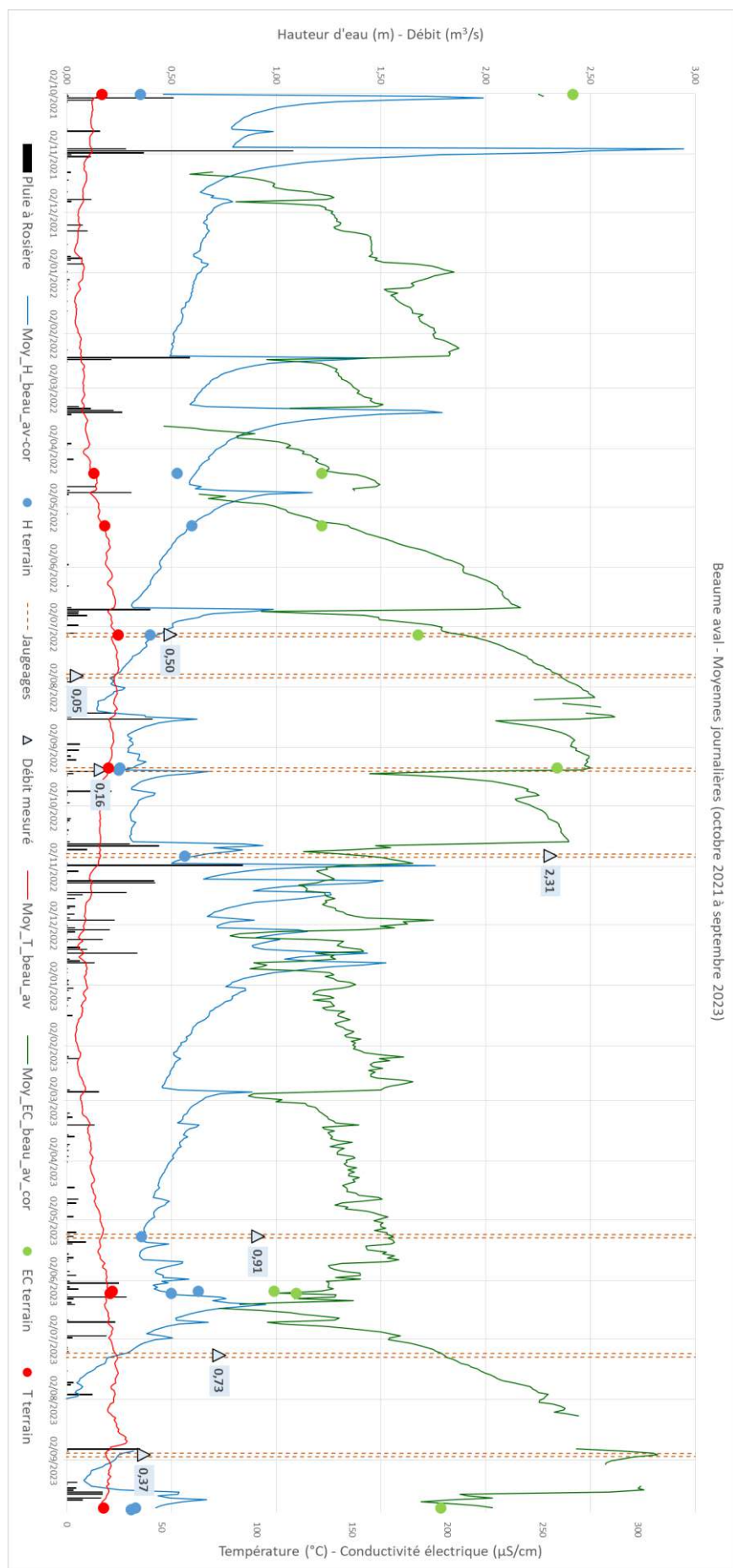


Figure 14 : Chronique de mesures de la sonde Beaume aval

Ces chroniques seront par la suite concaténées à celles relevées en 2024 aux mêmes stations avec une interprétation sur le même modèle que précédemment et portant sur 3 étiages (2022 à 2024). Les chroniques sont parfois incomplètes en raison de la disparition de certaines sondes ou à valider (hiver 2023-2024) en raison de l'ensablement voire du colmatage des fourreaux de protection des sondes.

6.3. Courbes de tarage hauteur/débit par modélisation BaRatin

Pour préciser les courbes de tarage nécessaires à l'interprétation des mesures nouvellement acquises pour les étiages nous avons utilisé une méthode de construction des courbes de tarage adaptées : la méthode BaRatin.

6.3.1. Rappel de la méthode

Si l'on reprend la fiche « Outil Opérationnel » ZABR d'Août 2023 intitulé « BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes » élaborée par J. Le Coz et B. Renard de l'INRAE, les objectifs et les principes de la méthode sont les suivants :

- Construire et caler des courbes de tarage hauteur-débit univoques avec une base hydraulique et en estimant les incertitudes associées.
- Disposer d'un outil permettant d'améliorer l'interprétation des contrôles hydrauliques ainsi que la prise en compte des incertitudes individuelles des jaugeages. Calculer des séries temporelles de débit (hydrogrammes) avec quantification des incertitudes (également possible avec le logiciel, à partir d'une série de hauteurs d'eau).

La méthode BaRatin associée à son interface BaRatinAGE permet d'estimer des courbes de tarage hauteur-débit les plus probables et leurs enveloppes d'incertitude.

La démarche se décompose en 2 étapes principales.

Premièrement, l'équation de la courbe de tarage est dérivée de la combinaison de fonctions puissance représentant chacun des contrôles supposés de la station hydrométrique. Les distributions « a priori », c'est-à-dire avant d'avoir utilisé les jaugeages comme données de calage, des paramètres de cette équation sont établis à partir d'informations sur les contrôles hydrauliques que l'utilisateur renseigne.

$$Q(h)=a(h-b)^c \quad (h>k)$$

Équation d'une courbe de tarage donnant le débit Q en fonction de la hauteur d'eau h ; a , b , c sont les coefficients et k la hauteur d'activation du contrôle hydraulique

Deuxièmement, les données de jaugeages sont importées avec leurs incertitudes individuelles précisées. Troisièmement, le logiciel applique le théorème de Bayes pour calculer la distribution « a posteriori » des paramètres (a , k , c) de la courbe de tarage. Cette distribution est ensuite échantillonnée par simulations Monte-Carlo à chaînes de Markov (MCMC), qui conduit à générer un ensemble de courbes de tarage plausibles au vu des jaugeages et des connaissances hydrauliques « a priori », ce qui constitue l'enveloppe d'incertitude paramétrique. Une incertitude « restante » est estimée et ajoutée pour obtenir l'incertitude « totale » : cette incertitude restante est celle qui doit être ajoutée à l'incertitude des jaugeages et à l'incertitude paramétrique de la courbe de tarage pour expliquer la dispersion des jaugeages autour de la courbe de tarage.

6.3.2. Exemple : premiers résultats pour la station de la Beaume amont

La méthode qui donne des résultats satisfaisants pour la Beaume amont sera utilisée pour les autres stations de ce cours d'eau.

La conversion des hauteurs en débits à l'aide de l'outil Baratin passe par plusieurs étapes.

- **Étape 1 : détermination de la configuration hydraulique et des sections de contrôle pour calcul de la courbe de tarage a priori**

La détermination du profil en travers et de la géométrie de la section de jaugeage a été effectuée à partir d'observation de terrain et des données Lidar HD IGN datées du 11 au 20 mai 2022 (Figure 15). Pour information, le niveau d'eau moyen dans la Beaume amont enregistrée par notre sonde pour cette période est de l'ordre de 36,2 cm. La sonde est positionnée à l'amont du pont matérialisé par des points gris en travers du cours d'eau (points bleus) sur la Figure 15. La sonde est localisée par un drapeau sur la Figure 16.

Les données ont été traitées et converties en MNT à l'aide du logiciel ArcGIS pro (Figure 16). Cet outil a aussi permis de créer le profil en travers à partir de ce MNT pour cette section de jaugeage. Pour les besoins du logiciel Baratin, la géométrie a été interprétée comme 3 sections de contrôle de type chenal rectangulaire (Figure 17 et Figure 18).

Les caractéristiques de ces 3 sections de contrôle sont données dans le Tableau 2. La pente moyenne a été calculée à partir du Lidar HD de l'IGN. Elle est de l'ordre de $0,32\% \pm 0,5$. Pour définir la géométrie des sections, il est nécessaire de renseigner : la largeur du chenal, la hauteur d'activation et le coefficient de Strickler.

	Largeur du chenal (m)	Hauteur d'activation (m)	Hauteur d'eau moyenne (m)	Coefficient de Strickler (Ks)
Section 1	19,2±10	0±0,5	1,2	20±6
Section 2	37,4±10	1,2±1	2,7	20±10
Section 3	100,2±20	2,7±1	7	21±1

Tableau 2. Caractéristiques de sections de contrôle de type chenal pour Baratin

La section 1 est définie à partir du type cours d'eau de montagne (pas de végétation dans le lit, berges abruptes). Le fond est pavé avec de gros rochers. Le coefficient de Strickler est compris entre 25 et 14 avec une valeur typique de 20.

La section 2 est définie à partir du type lit majeur « broussailles aérées et arbres ». Le coefficient de Strickler est compris entre 29 et 13 avec une valeur typique de 20.

La section 3 est définie à partir du type lit majeur « saules denses, présence de bois couchés ». Le coefficient de Strickler est compris entre 20 et 22 avec une valeur typique de 21.

Cette première étape permet de définir la configuration hydraulique et la courbe de tarage a priori (Figure 19).

- **Étape 2 : jaugeages en rivière**

Les jaugeages réalisés sur la Beaume amont par nos soins et l'équipe du Sage Ardèche sont intégrés dans l'outil Baratin. Nous avons effectué 12 jaugeages entre juillet 2022 et août 2024 pour des hauteurs d'eau comprises entre 0,3 m et 0,6 m. Les débits mesurés sont compris quant à eux entre 167 l/s et 1 870 l/s. La Figure 20 présente les jaugeages effectués.

- **Étape 3 : calcul de la courbe de tarage a posteriori**

À partir de la configuration hydraulique et des jaugeages, l'outil Baratin calcule la courbe de tarage a posteriori (Figure 21). Celle-ci est située approximativement dans la même enveloppe que la courbe de tarage a priori (Figure 22) ce qui permet de la valider.

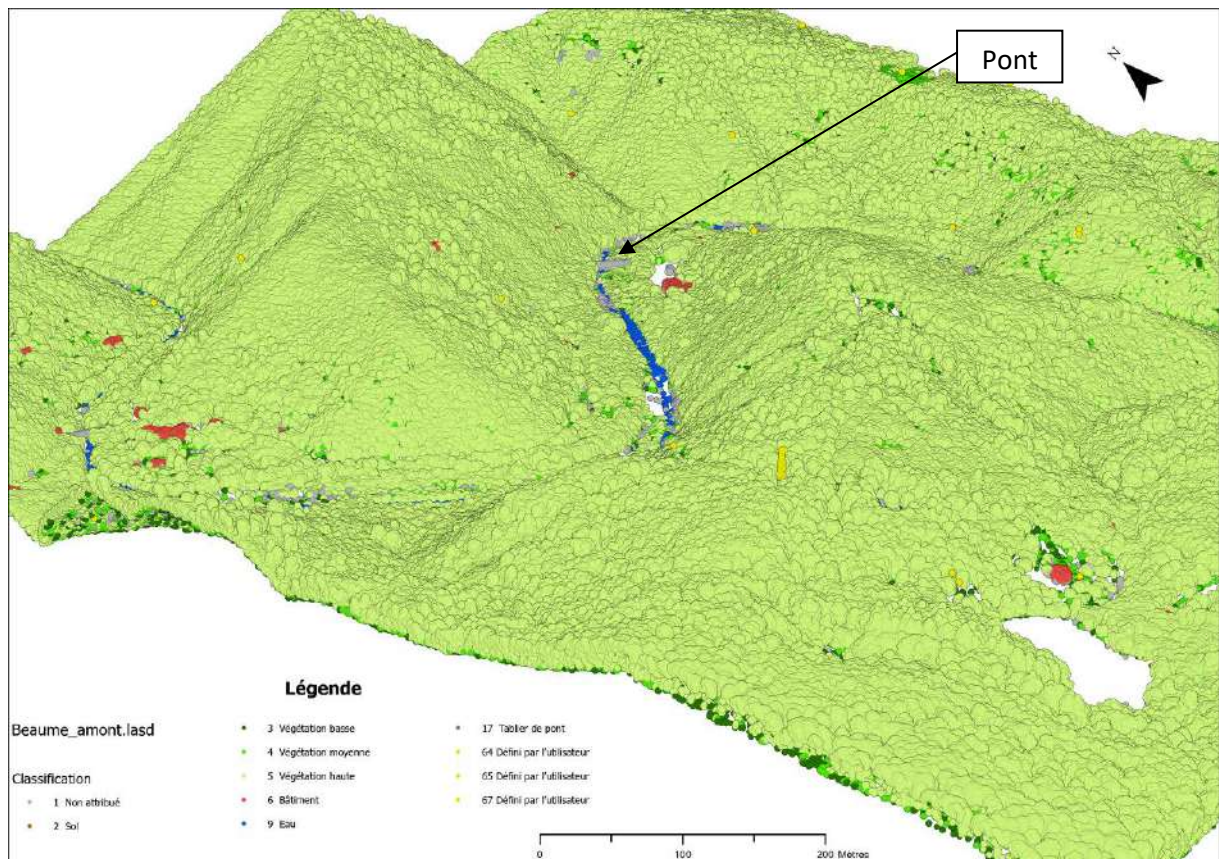


Figure 15. Lidar HD IGN de la station de jaugeage de Beaume Amont (Chassournet) – La sonde est positionnée à l'amont du pont (voir flèche noir). L'écoulement de la Beaume se fait de la gauche de la figure vers la droite

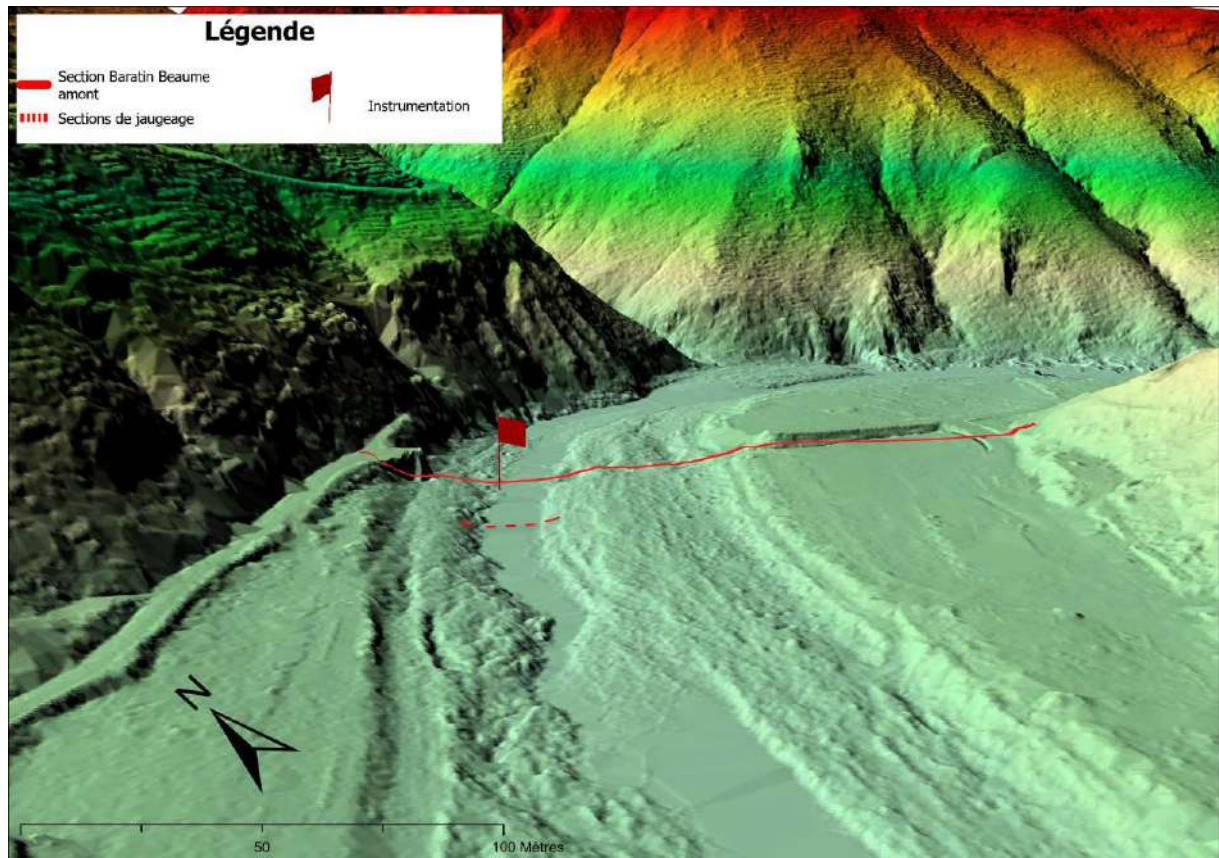


Figure 16. Profil en travers (trait rouge) utilisé dans Baratin pour la station de jaugeage de Beaume Amont. Ce profil est construit à partir du MNT issu du Lidar HD IGN. La sonde est localisée avec un drapeau rouge.

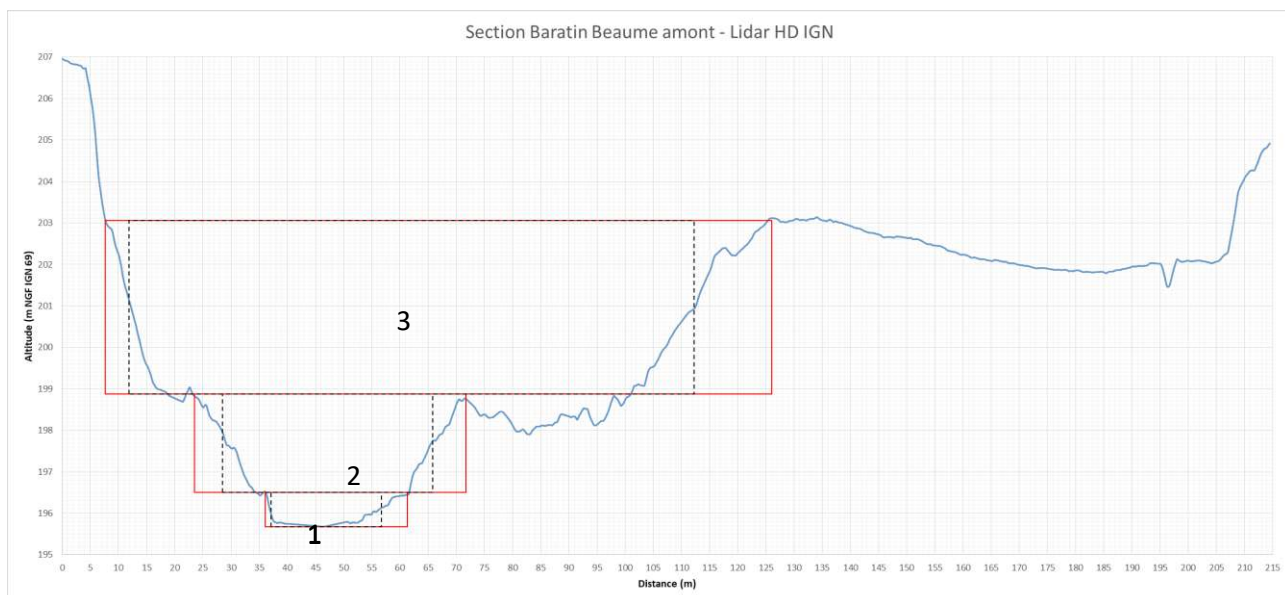


Figure 17. Sections de contrôles de type « Chenal » utilisées dans Baratin



Figure 18. Section de contrôle de la Beaume Amont vue depuis l'amont du pont de Chassournet

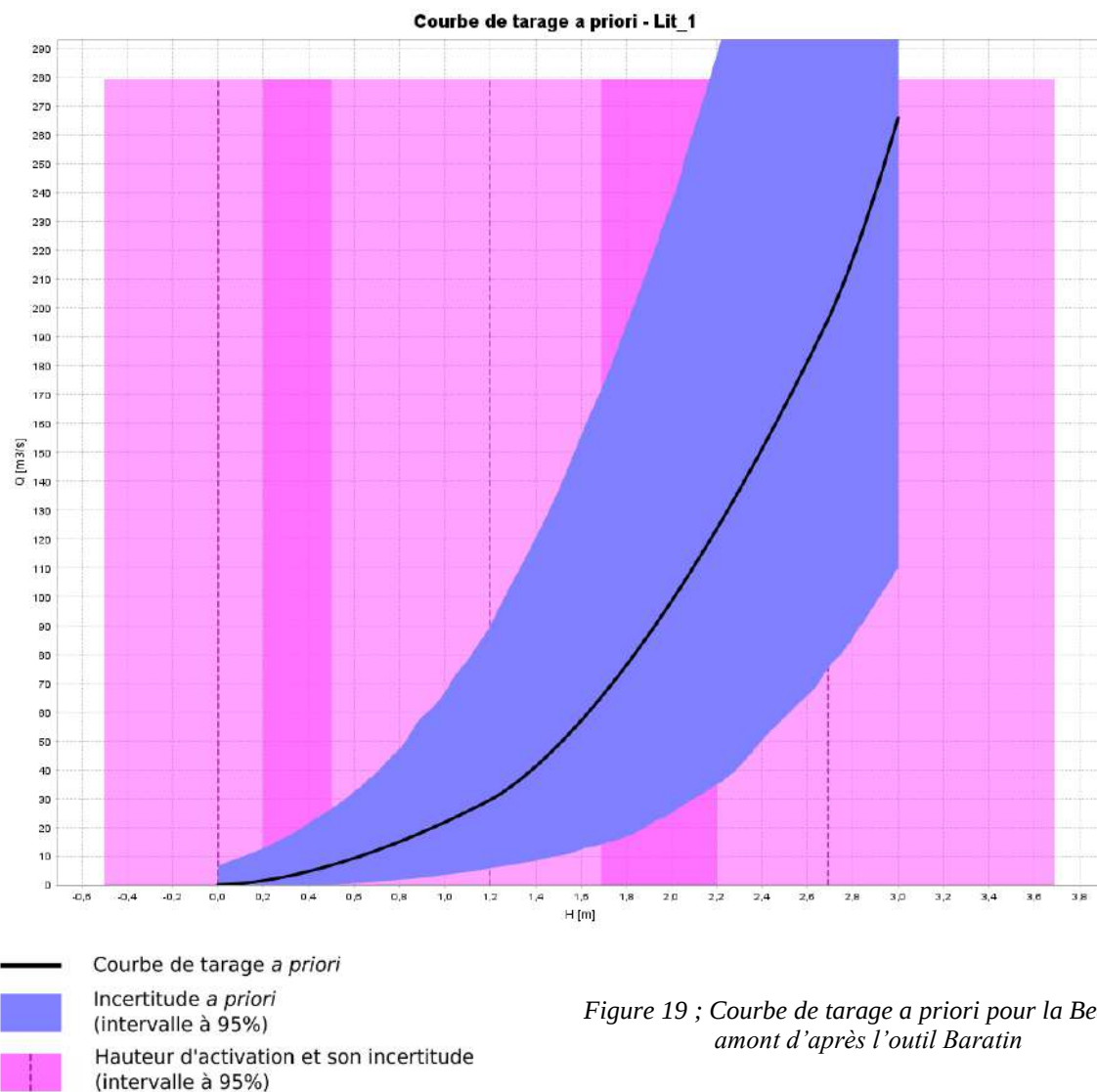


Figure 19 ; Courbe de tarage a priori pour la Beaume amont d'après l'outil Baratin

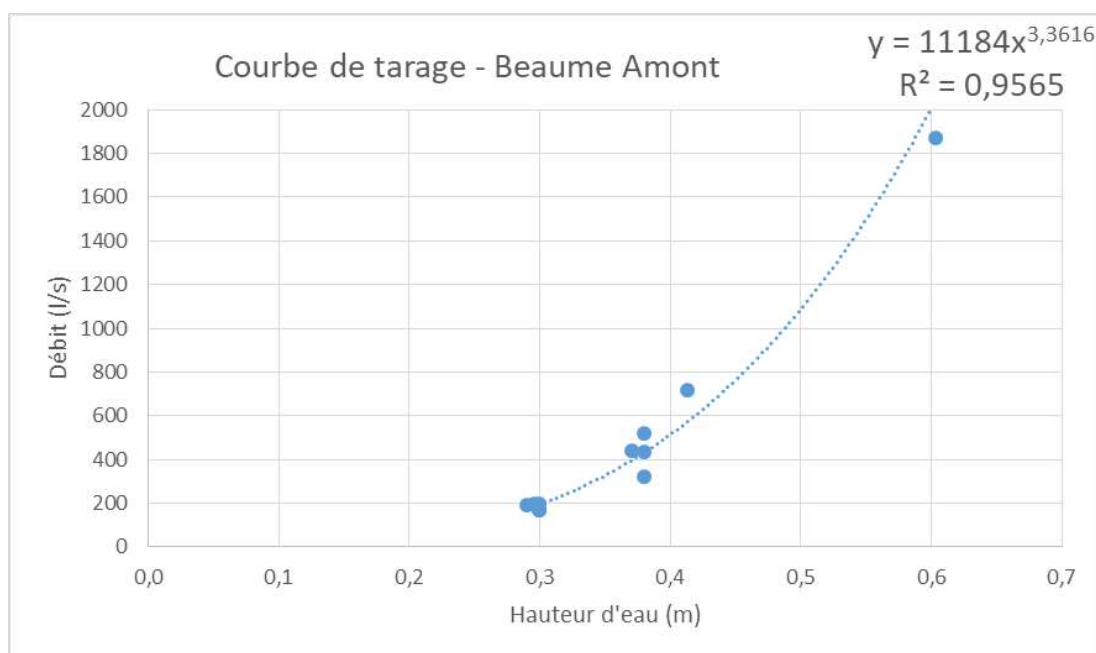


Figure 20. Jaugeages utilisés dans Baratin. Les mesures de débit sont réalisées sur la section de jaugeage (pointillés rouges) de la Figure 16

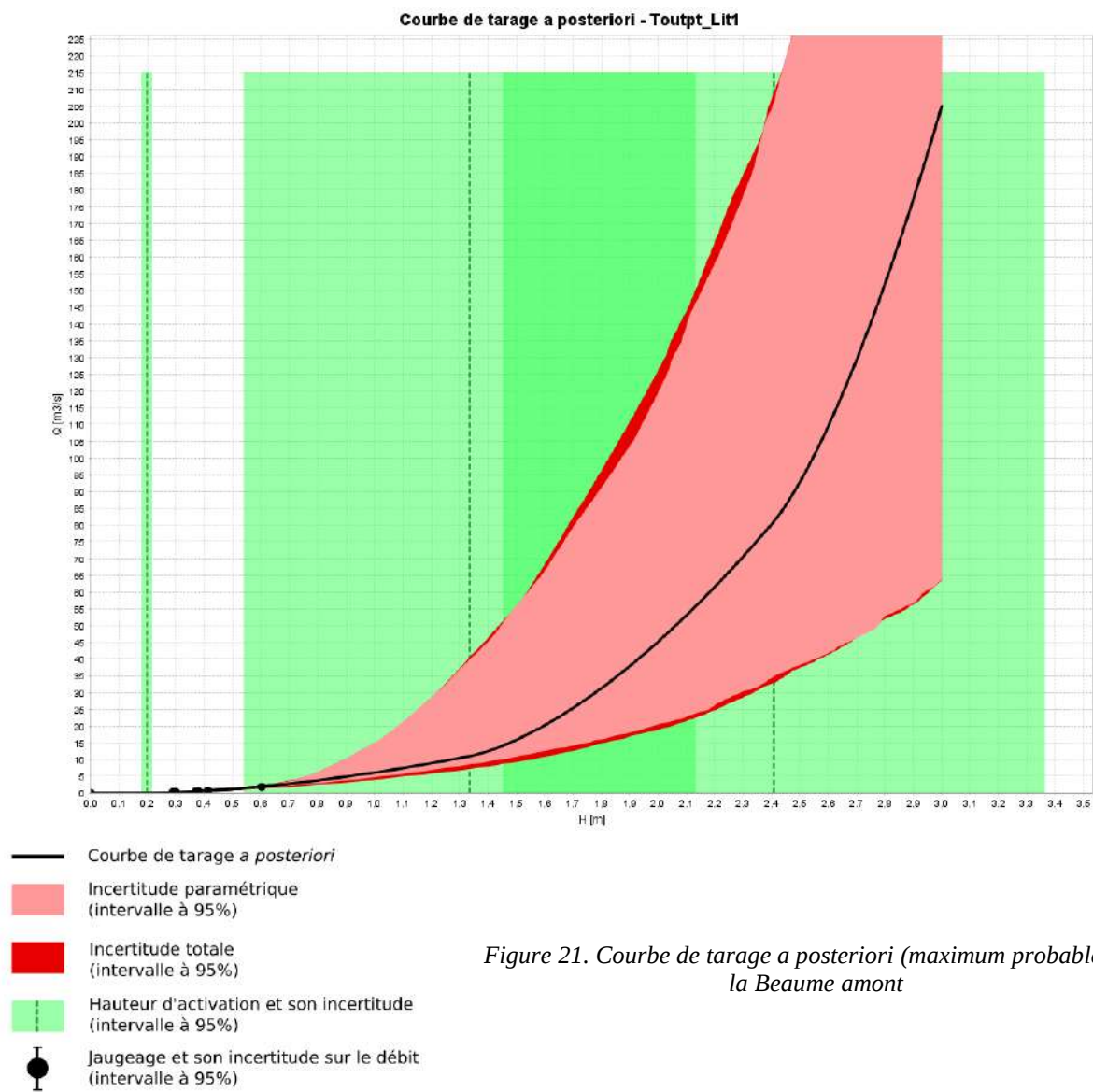


Figure 21. Courbe de tarage *a posteriori* (maximum probable) sur la Beume amont

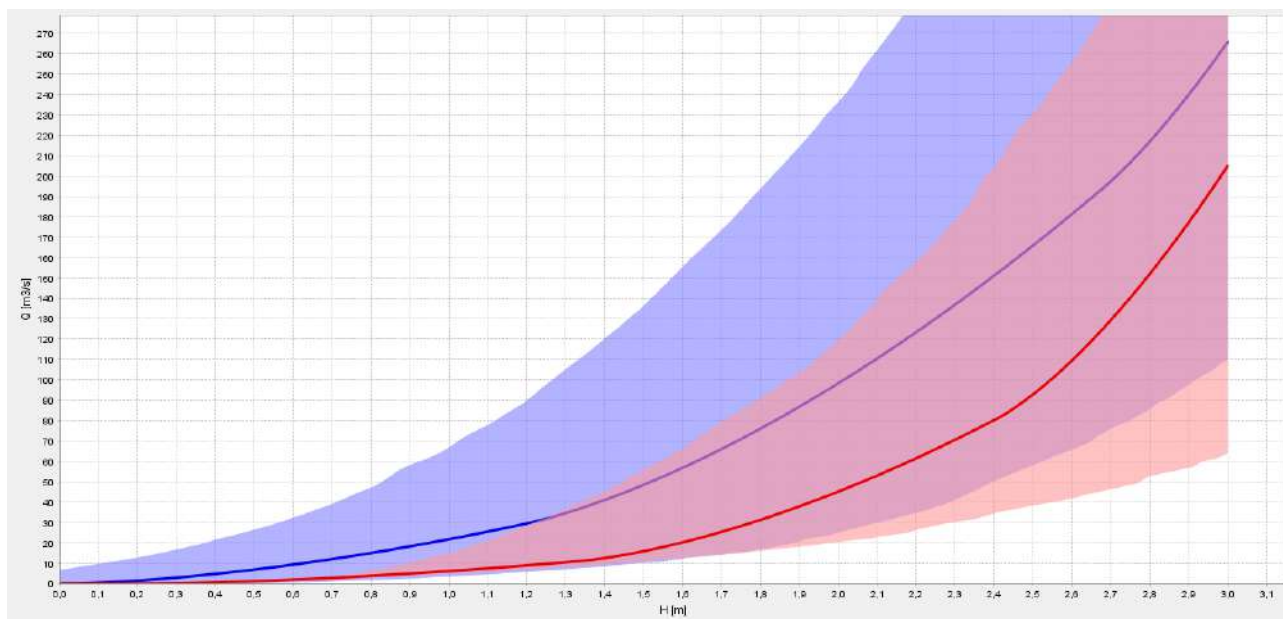


Figure 22. Comparaison des courbes de tarage *a priori* et *a posteriori* pour la Beume amont

- **Étape 4 : calcul de l'hydrogramme**

Au final, l'hydrogramme (Figure 23) est calculé à partir des équations suivantes qui lient hauteur d'eau (h) et débit (Q) pour chacune des 3 sections :

- Pour $h < 0,198$ m

--> $Q = 0$

- Pour $0,198 \text{ m} < h < 1,336$ m

--> $Q = 8,85856 \cdot (h - 0,198682)^{1,67791}$

- Pour $1,336 \text{ m} < h < 2,408$ m

--> $Q = 8,85856 \cdot (h - 0,198682)^{1,67791} + 42,2912 \cdot (h - 1,33617)^{1,66946}$

- Pour $h > 2,408$

--> $Q = 8,85856 \cdot (h - 0,198682)^{1,67791} + 42,2912 \cdot (h - 1,33617)^{1,66946} + 135,983 \cdot (h - 2,40809)^{1,68605}$

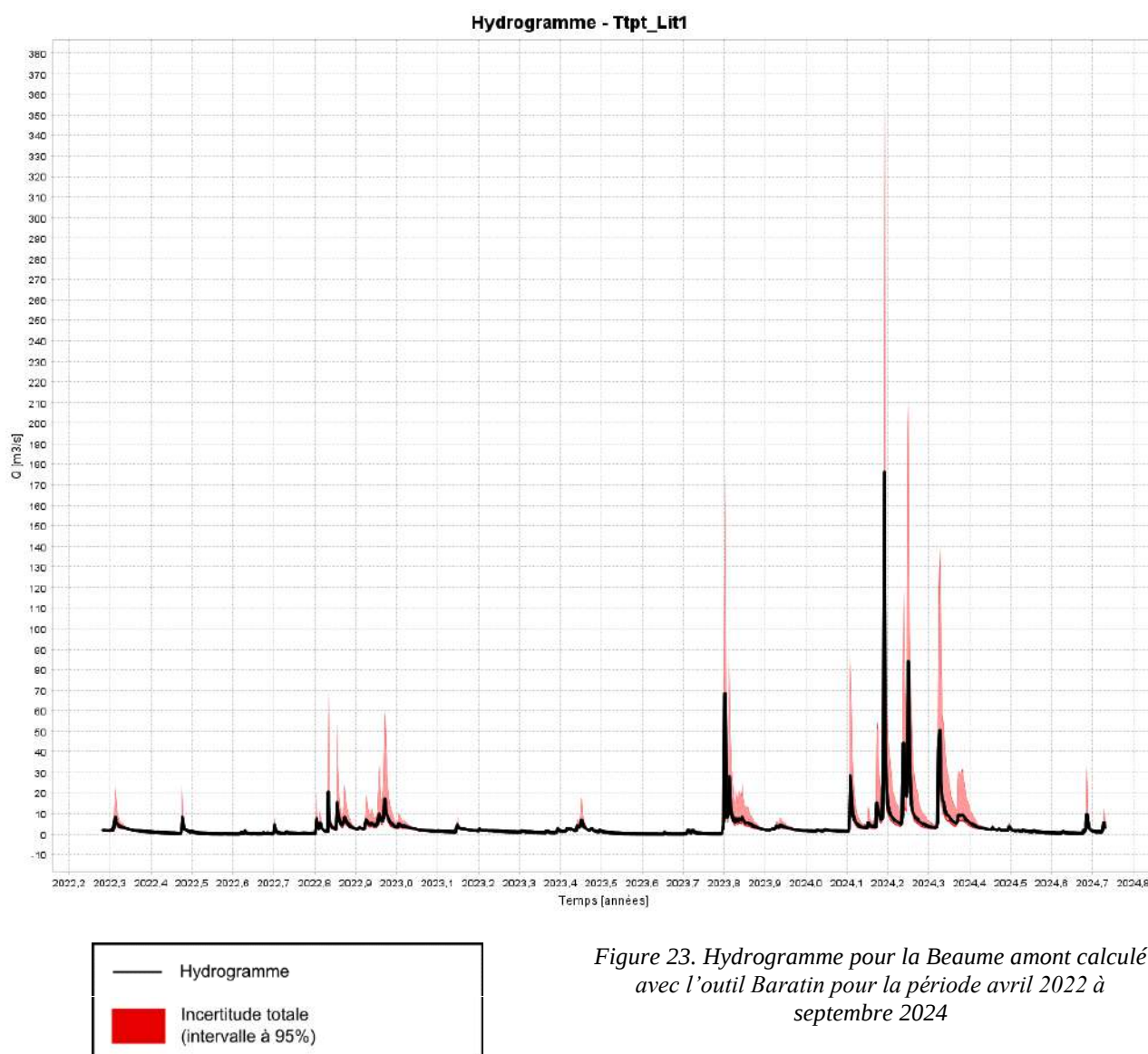


Figure 23. Hydrogramme pour la Beaume amont calculé avec l'outil Baratin pour la période avril 2022 à septembre 2024

Pour la période avril 2022 à septembre 2024 les valeurs marquantes sont les suivantes :

- le débit journalier maximum calculé est de l'ordre de $176 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau de 2,9 m ;
- le débit journalier minimum calculé est de l'ordre de $0,016 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau de 0,22 m ;
- le débit moyen journalier est d'environ $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau de 0,63 m ;
- le débit médian journalier est d'environ $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau de 0,56 m.

La courbe de tarage ainsi établie pour la Beaume amont avec la méthode Baratin servira donc aussi à déterminer les débits correspondant à d'autres hauteurs d'eau mesurées à l'aval (Beaume intermédiaire et aval). L'application aux autres stations aura la même utilité.

En conclusion, les chroniques enregistrées à ces stations et les jaugeages différentiels réalisés entre chacune d'elles permettront d'estimer les contributions des apports souterrains au cours d'eau ou les pertes.

6.4. Premières investigations en matière de scénarios climatiques avec le système KarstMod

6.4.1. Principe général du fonctionnement de KarstMod

KarstMod (Mazilli et al., 2019) est un environnement de simulation développé par le SNO Karst français⁶ de l'INSU/CNRS. Il est particulièrement adapté au traitement des systèmes karstiques par rapport à la simulation dynamique des systèmes multi-réservoirs interconnectés comme Vensim⁷ telle qu'envisagée dans la proposition initiale de ce projet.

La plateforme KarstMod est une plateforme de modélisation modulable à partir d'équations de bilan hydrologique permettant à la fois de simuler les débits aux exutoires karstiques et d'analyser l'hydrodynamique des compartiments considérés dans le modèle : hydrogramme, précipitations liquides et solides, ETP (calculée à partir de la température de l'air).

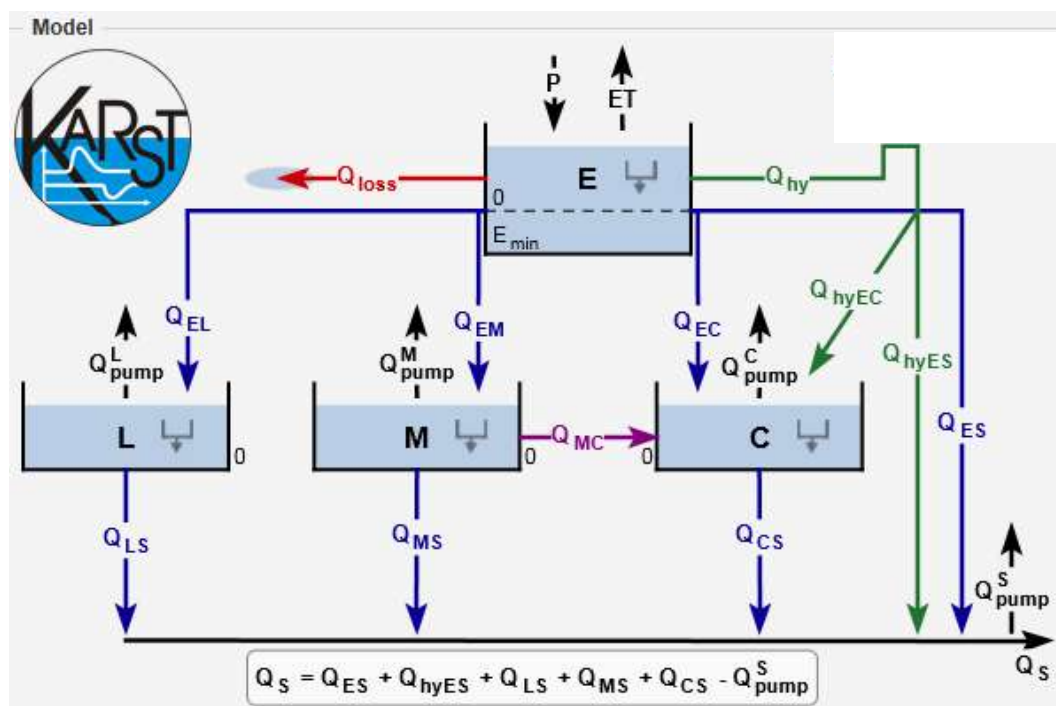


Figure 24. Schéma de principe de fonctionnement de KarstMod (Mazilli et al., 2019)

6. <http://www.sokarst.org/>

7. <https://vensim.com/>

Pour cela, il est nécessaire, après la construction du modèle, de disposer d'un volume de données hydrométéorologiques mesurées suffisant pour réaliser les différentes étapes permettant les simulations : 1) initialisation et mise en route du modèle pour réduire la sensibilité aux conditions initiales ; 2) calibration pour optimiser les paramètres de modélisation ; 3) validation pour reconstituer le fonctionnement actuel fondé sur le calcul d'un coefficient de Nash entre débit observé et simulé. Pour la phase de simulation des débits, il est nécessaire de disposer de données météorologiques issues de scénarios climatiques futurs accessibles à partir du portail Drias⁸ de MétéoFrance. Ce portail, mis en œuvre par MétéoFrance en lien avec la communauté scientifique nationale du climat (IPSL, CERFACS, CNRM) a pour vocation de mettre à disposition les projections climatiques régionalisées de référence. Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques selon la Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC).

6.4.2. Application aux objectifs du projet sur l'Ardèche

Dans le projet, l'objectif visé n'est pas de connaître le comportement hydraulique en tout point de l'hydrosystème et des cours d'eau comme peuvent le permettre des modèles hydrologiques discrets (ex : HEC-RAS, Mike SHE) fondés par exemple sur les équations de Barré-Saint-Venant. Il s'agit plutôt d'utiliser des modèles globaux entrées/sorties pour réaliser une transformation entre paramètres hydroclimatiques et débits.

Pour l'instant, avant d'exploiter les données relevées dans le cadre du projet, un premier test est réalisé à partir des données de débits SPC de la station de Rosières (Beaume intermédiaire) présentées et décrites (en page 11 de ce rapport) sur la période 2018-2024 et à partir des données météorologiques Safran⁹ (pluviométrie, température de l'air, ETP...) selon une grille de 8 x 8 km. Ces données sont publiques mais très volumineuses (ex : 5 Go pour la période 2010-2019) et nécessitent une extraction sous R pour se limiter aux mailles à traiter.

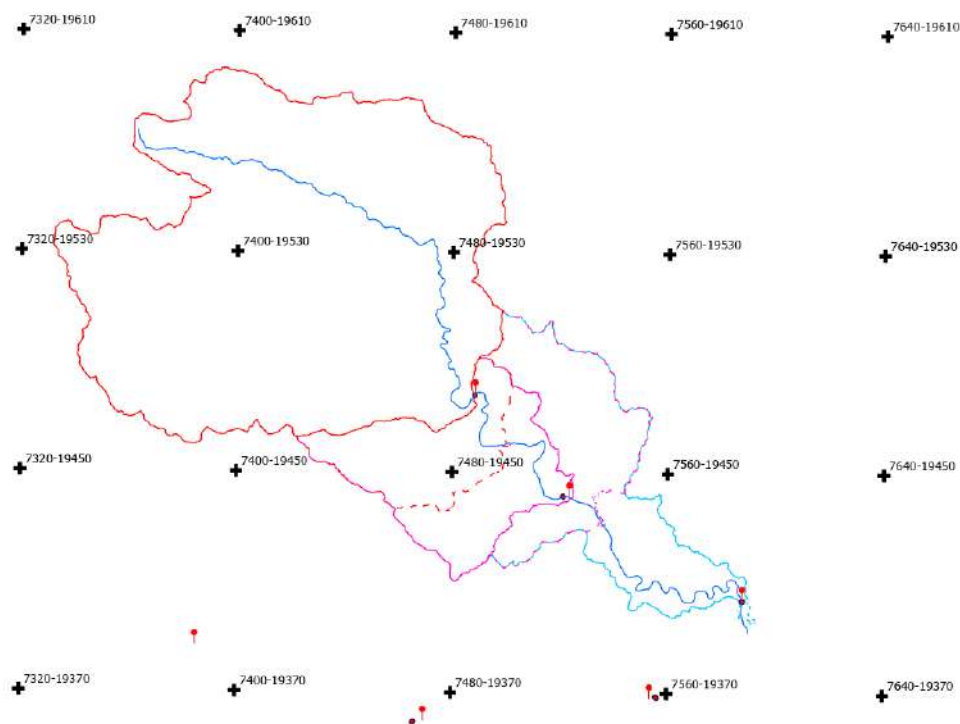


Figure 25. Localisation et numéro des maille Safran sur le bassin versant de la Beaume (Croix noires : centre de la maille ; trait bleu : La Beaume ; en rouge, rose et bleu : limite des sous-bassins versants)

8. <https://www.drias-climat.fr/>

9. <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-changement-climatique-sim-quotidienne/>

Les données du SPC (station de Rosières) et Safran serviront à la construction du modèle avec KarstMod, ainsi qu'aux 3 étapes : mise en route, calibration et validation. Pour la phase de simulation (par exemple horizon 2050), les débits seront modélisés à partir de données météorologiques du futur (Drias) correspondant à des scénarios climatiques contrastés ; par exemple les scénarios RCP (*Representative Concentration Pathway*) ou SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) ou encore SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*).

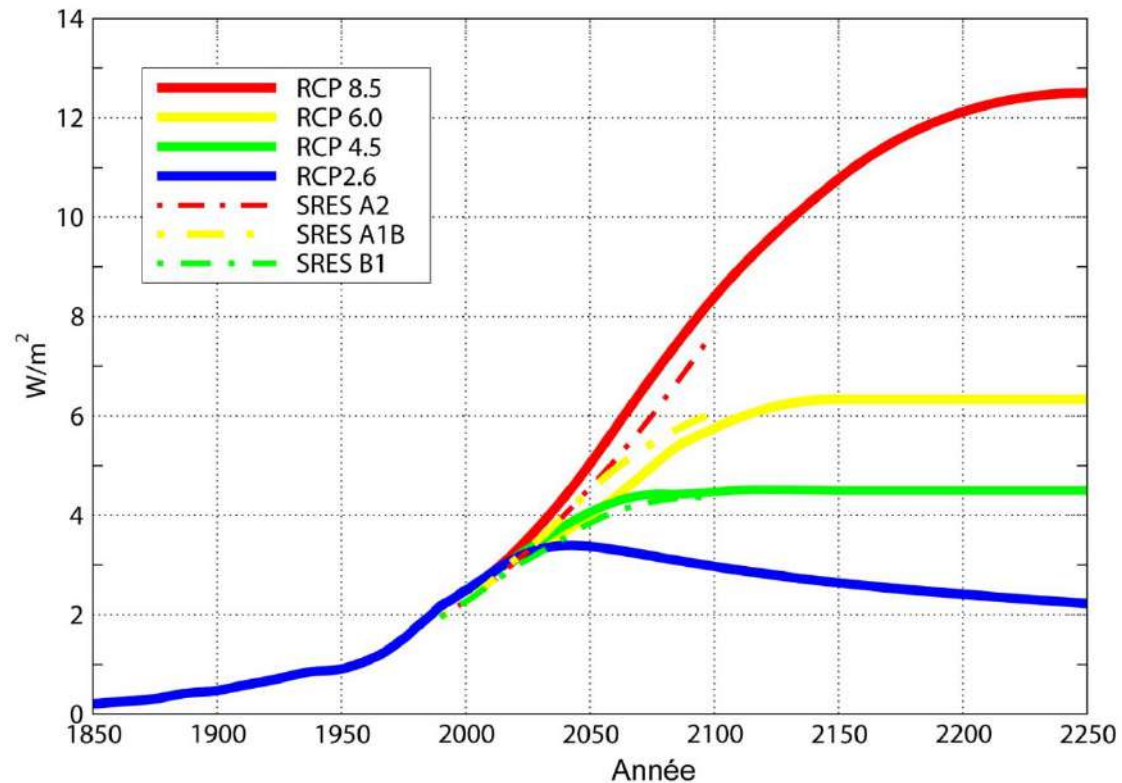


Figure 26. Comparaison des scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets)

Ce travail de simulation est en cours sur la station de la Beaume intermédiaire (Rosière), pour laquelle la chronique de débits mesurés du SPC est suffisamment consistante. Il sera développé en 2025 pour d'autres stations à sélectionner en fonction de la nature des données disponibles.

7. Focus sur les gorges de l'Ardèche – Urgonien¹⁰

Rappelons que sur ce secteur du site d'étude, 2 sondes barométriques et 2 pluviographes ont été installés l'un à Labastide de Virac et l'autre à Saint-Remèze respectivement en rive droite à l'amont et en rive gauche à l'aval.

Dans les étapes précédentes du projet, les relations karst rivière ont été caractérisées à la source du Platane instrumentée (mesures de conductivité, hauteurs d'eau) et située en rive gauche de l'Ardèche. Cette source est largement influencée par les hauteurs-débits de la rivière avec peu d'impact des pluies sur la hauteur d'eau du drain karstique. Les analyses hydrochimiques effectuées sur les échantillons d'eau prélevés dans la rivière et à la source indiquent des apports d'eau karstique qui varient entre 15 et 31%.

7.1. Données hydrologiques relevées aux sondes SPC à Vallon-Pont-d'Arc et à Sauze

Les sondes installées en amont et en aval des gorges de l'Ardèche par l'association Nature-Témoin ont bien fonctionné. Les relevés des données ne peuvent se réaliser qu'une fois par an avec l'intervention d'un plongeur en raison du positionnement des sondes CTD à moins 3 mètres sous le niveau de l'eau afin d'éviter les vols ou les dégradations.

Les mesures enregistrées (Figure 27, Figure 28 et Figure 29) sont en cours de vérification et de validation avec celles du SPC.

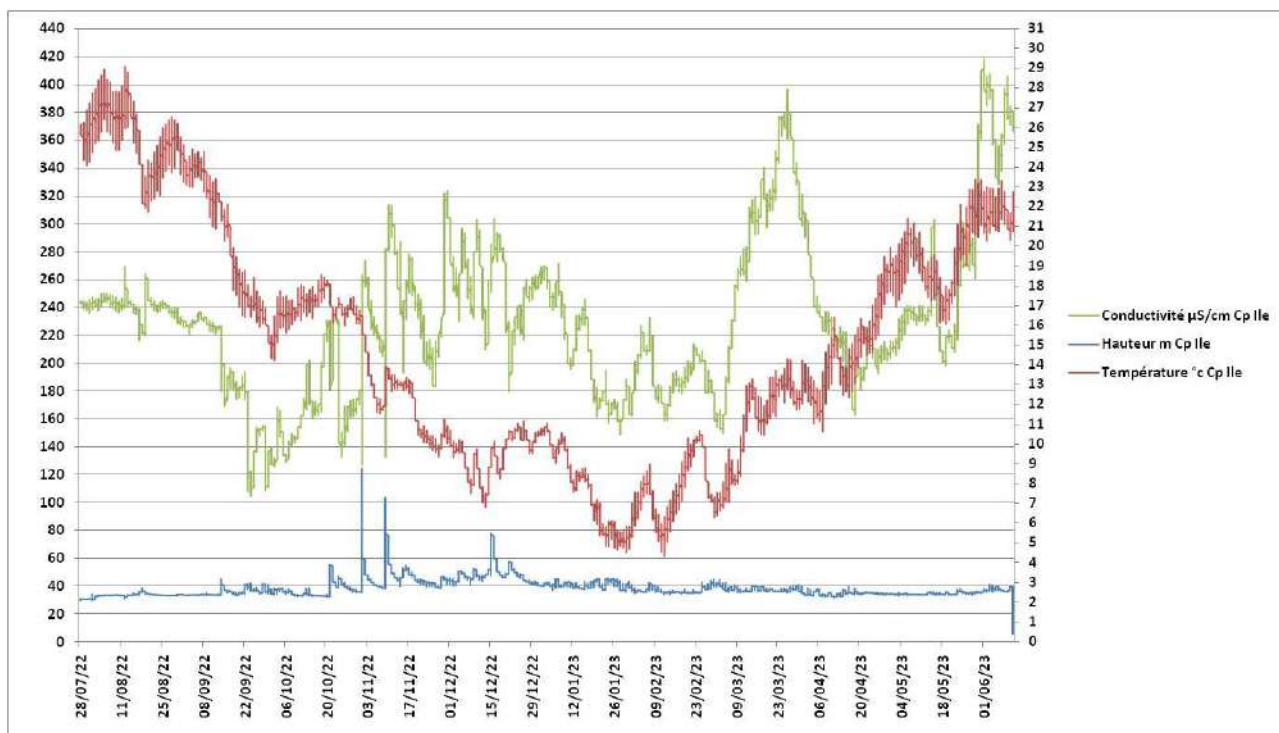


Figure 27 : Chronique de mesures de la sonde du camping de l'Île (amont des gorges de l'Ardèche) entre fin juillet 2022 et début septembre 2023

10. Le projet sur ce secteur de l'étude a été présenté à la 31ème Rencontre d'Octobre 2021 sur l'instrumentation en milieu karstique (congrès scientifique concernant le milieu karstique)

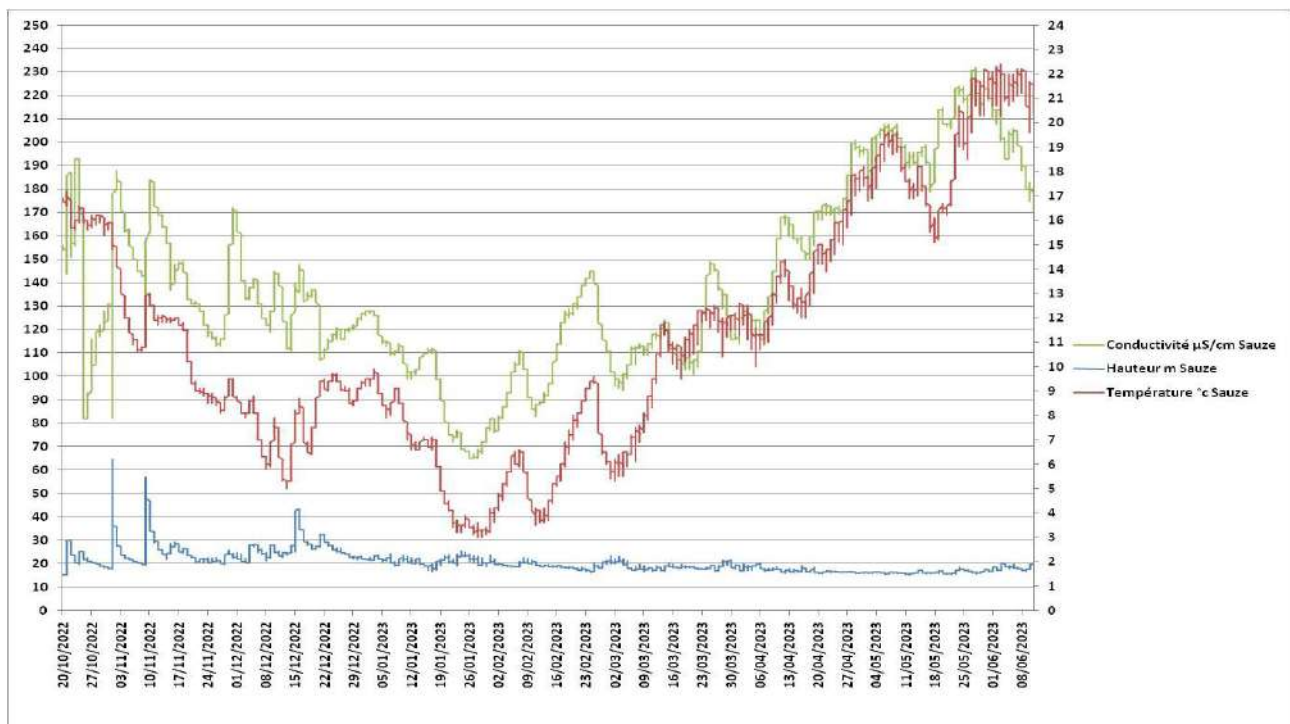


Figure 28 : Chronique de mesures de la sonde de Sauze (aval des gorges de l'Ardèche) entre fin septembre 2022 et début juin 2023

Les 2 pluviographes installés de part et d'autre du canyon de l'Ardèche permettent des mesures plus locales et précises des intensités pluvieuses tombées sur les plateaux des rives gauche et droite encadrant les gorges de l'Ardèche.

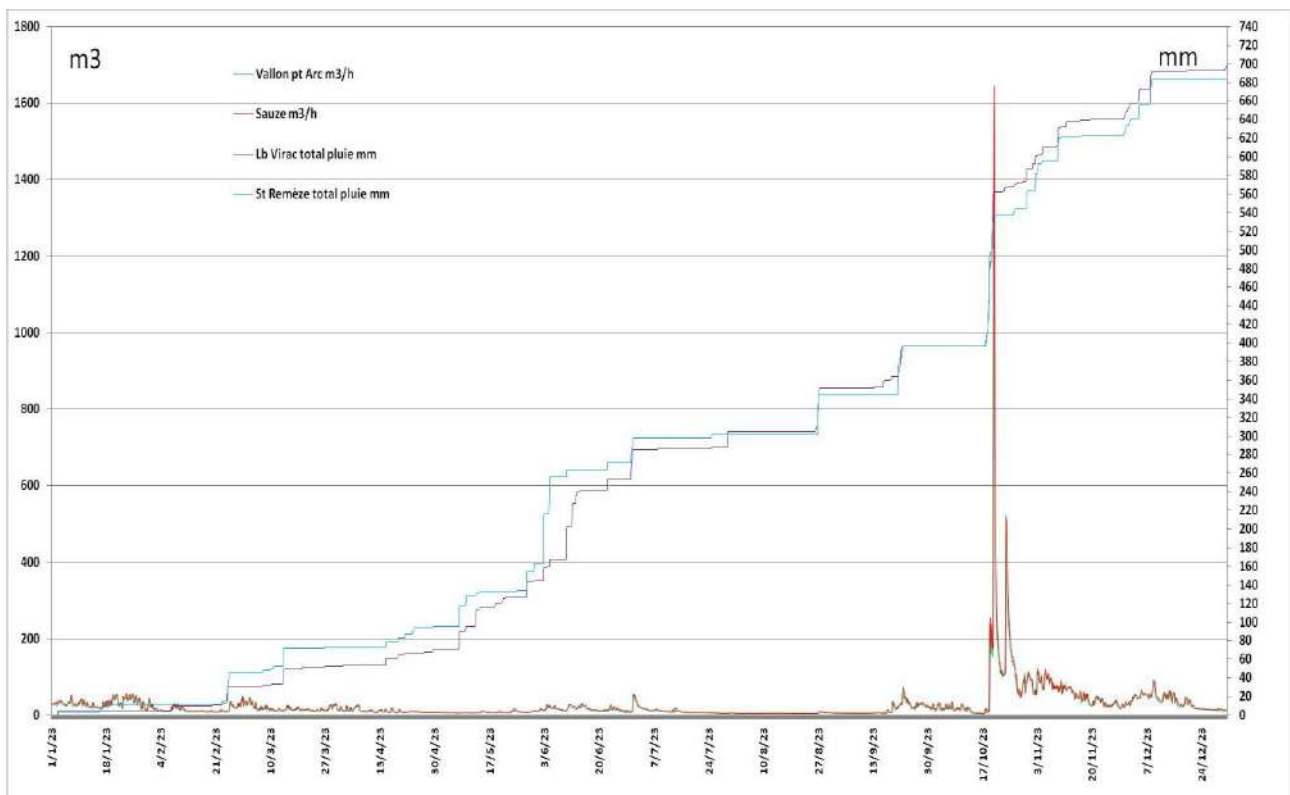


Figure 29 : Chronique des mesures des débits (SPC) au pas d'une heure et cumul des pluies de l'année 2023 au niveau des 2 pluviographes des gorges de l'Ardèche.

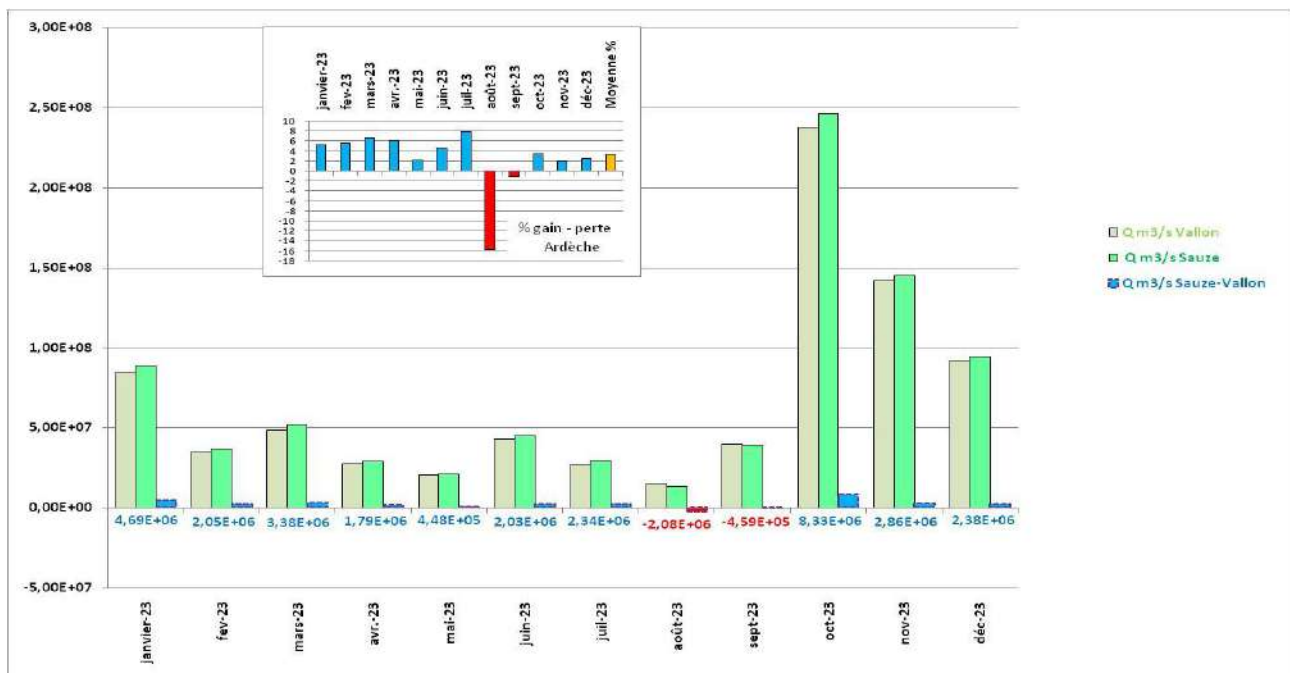


Figure 30 : Chronique mensuelle pour l'année 2023 des débits cumulés de Vallon-Pont-d'Arc et de Sauze (d'après les données du SPC)

7.2. Instrumentation des sources

L'instrumentation des sources du Platane, Bateau-Écluse et Guigonne s'est poursuivie avec le concours des plongeurs J.P. Baudu, F. Vasseur, J.C. Duffaud et R. Bénini assistés par une équipe logistique.

Les analyses hydrochimiques effectuées sur les échantillons d'eau prélevés par les plongeurs montrent de fortes variations dans le mélange eau du karst/eau de rivière (hypothèse de mélange fondée sur les variations de conductivité). Cela confirme bien que la source du Platane (Figure 31) est grandement influencée par les hauteurs/débits de l'Ardèche.

Les trois sources sont équipées de dispositifs de surveillance à intervalle pour détecter l'intensité des traceurs hydrologiques artificiels injectés sur le plateau Saint-Remèze. Ces dispositifs sont installés à -68 m dans la source du Platane, vers -15 m dans l'évent de Guigonne vers -50 m dans la source du Bateau-Écluse.

Ces dispositifs comportent des appareils Fluo-vKing (en test permanent) ont évolué d'un Fluo-vKing modèle 3 pour la détection de fluorescéine à un modèle Fluo-vKing 4 à 2 canaux pour la détection de l'uranine/rhodamine. Le dernier prototype (modèle Fluo-vKing 5) permet de séparer le spectre de détection en 18 bandes de longueurs d'ondes de l'ultraviolet jusqu'à dans les infrarouges. Les essais préliminaires ont révélé qu'il est possible de distinguer l'uranine de l'éosine, et les différents traceurs à rhodamine entre eux (signatures différentes dans les émissions infrarouges).

Le modèle Fluo-vKing 5, long de 450 mm et de diamètre 80 mm, est équipé de deux systèmes expérimentaux de courantmètre, basés sur l'induction et un accéléromètre, ainsi que de sondes pour la mesure de la turbidité et de la salinité minérale avec dispositif anti-oxydation. Cet appareil a été en grande partie imprimé en 3D, sa coque de 5 mm calculée pour être immergée jusqu'à une profondeur de 100 m. Une sonde de pression peut aussi enregistrer la hauteur de colonne d'eau jusqu'à 5 ou 12 bars selon le capteur utilisé.

L'autonomie des batteries est prévue pour un temps de séjour sous l'eau de plusieurs années. Le rechargement des batteries se fait à l'aide d'un chargeur inductif et pourra se faire in-situ sous l'eau en phase ultérieure de développement. Il est envisageable de développer un protocole de récupération des données, actuellement stockées en mémoire interne, afin que celles-ci puissent être récupérées sur place et sans ouvrir l'appareil. L'option sans contact permettra la calibration de l'instrument, le transfert des données enregistrées et la configuration de l'appareil (réglage des plages de sensibilité x60 ou x16, de l'intervalle

des mesures, de l'intensité et des longueurs d'onde d'excitation, de la synchronisation de l'heure avec un serveur UTC si une connexion internet disponible, sinon avec l'heure interne de l'appareil Android).

La récupération du matériel installé dans les sources et l'Ardèche sera faite en 2025 quand les conditions hydrologiques (trop forts débits, forte turbidité de l'eau, ensablement de l'entrée sources...) et administratives (autorisation Réserve Naturelle Nationale des Gorges de l'Ardèche) le permettront ce qui n'a pas été le cas en 2024.

7.3. Interprétation croisée (pluie, source, rivière)

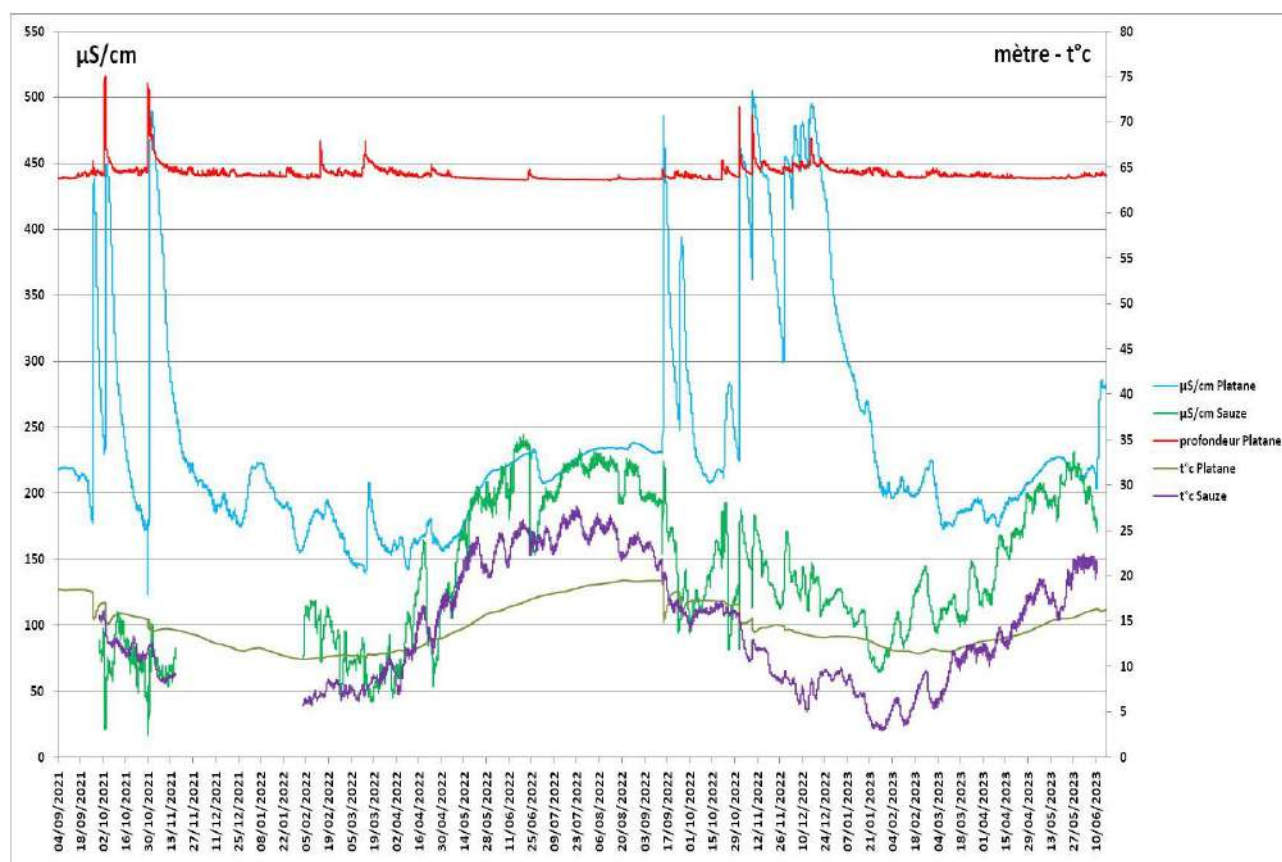
L'interprétation croisée des données de conductivité électrique et des niveaux d'eau enregistrés entre septembre 2021 et juin 2022 dans la source (Platane) et la rivière (Ardèche) conduit aux constatations suivantes :

- un effet différé et amorti de la conductivité électrique (EC) et de la hauteur d'eau du phréatique karstique par rapport à l'EC et au débit de la rivière,
- pas ou peu d'impact des pluies sur la hauteur d'eau du drain karstique avec un déficit hydrique de la masse carbonatée pendant cette période,
- une hausse progressive de la température de l'eau du drain karstique de mars à septembre.

Pour la source de l'Écluse, une sonde CTD 0-100 m ainsi qu'un fluorimètre de type VKing® doublé de fluocapteurs à charbons activés ont été positionnés respectivement à -56 m et -20 m dans le drain principal du système noyé.

Seuls 2 prélèvements d'eau ont été faits aux mêmes profondeurs révélant une charge minérale d'environ 30% supérieure à celle de la source du Platane. Cela permet de supposer des apports d'eau du karst plus importants pour la source de l'Écluse par rapport à celle du Platane.

Cette instrumentation a été réalisée par les plongeurs qui interviennent à la source du Platane.



En l'état, il n'est pas possible d'aller plus loin en termes d'interprétation et d'amélioration des connaissances du fonctionnement de ce système. Il existe très peu de travaux et de connaissances concernant les relations des sources du Platane et de l'Écluse avec la rivière Ardèche. Nous pouvons nous appuyer sur les données acquises par les plongeurs lors des plongées de reconnaissances dans ces 2 cavités inondées, c'est-à-dire quelques profils de température et de conductivité électrique. De plus, il existe quelques données et interprétations sur le fonctionnement hydrologique de Saint-Marcel (Cailhol, 2014 et 2016).

Il sera possible d'aller plus loin dans l'interprétation du fonctionnement hydrologique des sources du Platane et de l'Écluse en interaction avec la rivière Ardèche lorsque les instruments auront été récupérés par les plongeurs (sondes CTD et fluorimètres). L'analyse et l'interprétation de ces données devraient permettre d'apporter des éléments nouveaux.

7.4. Les traçages artificiels

Les colorations ont été réalisées le 11/02/2023 dans deux cavités du plateau de St Remèze situées en rive gauche de la rivière Ardèche dans les avens de la Cabane et de la Rainette (Figure 33. Des fluorimètres et fluocapteurs ont été installés aux sources du Platane, de Guigonne et de l'Écluse. Ils n'ont pas été encore récupérés. Les données techniques du traçage sont les suivantes :

Aven de la Cabane (Figure 32)

Propriété privée

Lambert III X = 0773.422 Y = 3232.052

Z entrée = 350 m NGF Z de l'injection = 300 m NGF

Injection : le 11/02/2023 à 11h00

Colorant : 11kg d'Éosine accompagné de 8 m³ d'eau

Aven de la Rainette

Lambert III X= 0771.045 Y = 3233.066

Z entrée = 370 m NGF Z de l'injection = Z = 340 m NGF

Injection : le 11/02/2023 à 15h00

Colorant : 12 kg de Fluorescéine accompagné de 8 m³ d'eau



Figure 32 : Dispositif et matériel mis en place pour l'injection de colorant à l'aven de la Cabane (07)

Ces manipulations ont demandé un investissement humain et matériel important. Elles ont pu être réalisées grâce aux agriculteurs et spéléologues locaux sans qui rien n'aurait pu être accompli.

Liste des participants : BENINI Christel, BENINI Raphael, DUMAS Christian, ETIENNE Hugo, GRAILLOT Didier, JANIN Tristan, JOLIVET Joël, VAN DEN BROECK Erik.

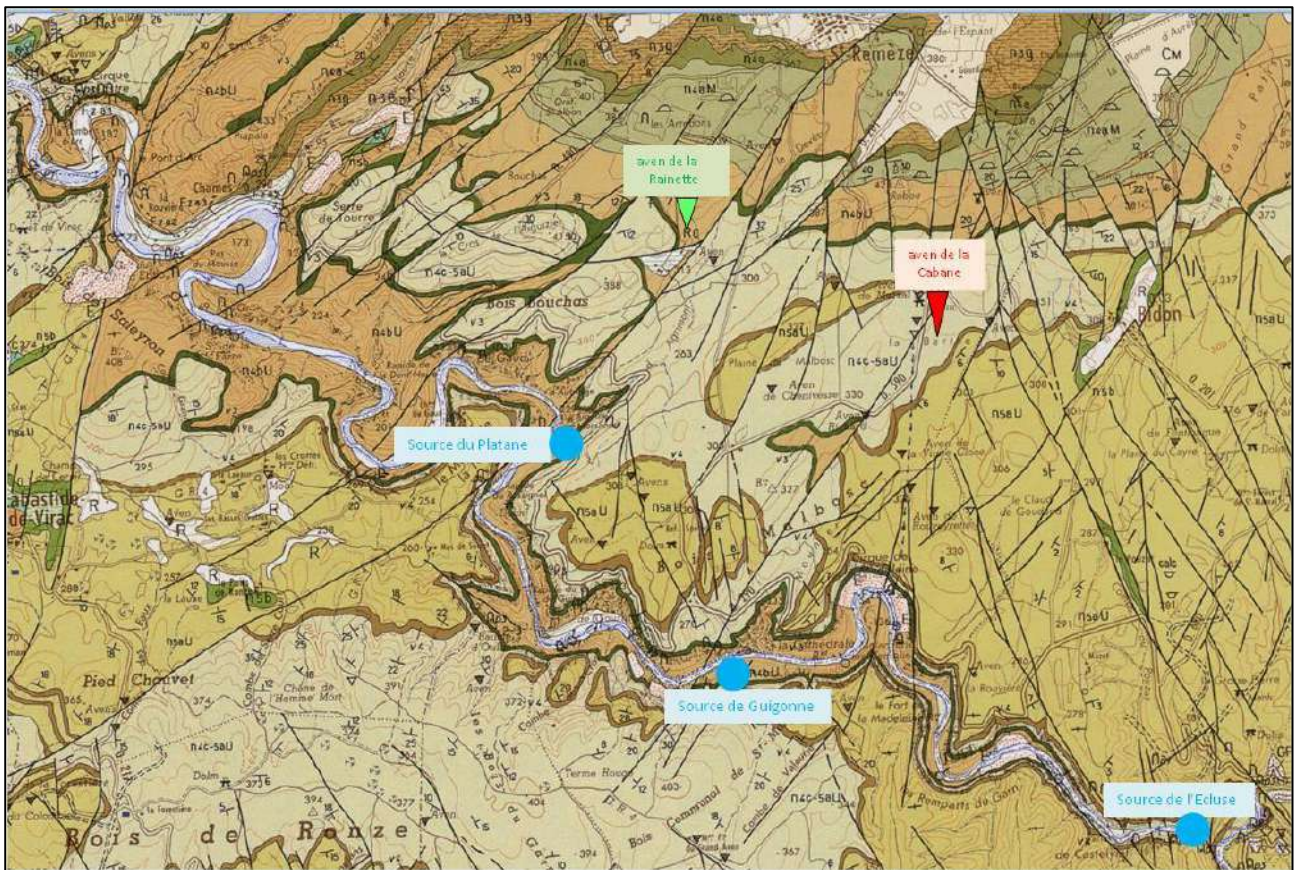


Figure 33 : Localisation des 2 lieux d'injection par rapport aux sources étudiées (d'après la carte géologique au 1/50 000°)

Environ 14 mois après le traçage (du 11/02/2023), aucune restitution de colorant n'a été observée ni aux sources ni dans la rivière. La récupération du matériel installé (fluorimètres et courantmètres) en zone noyée devrait apporter des informations complémentaires sur ces potentielles restitutions.

8. Nouvelles investigations géochimiques

8.1. Rappel du Contexte de l'étude géochimique

Dans le cadre de ce projet, l'Université Jean Monnet a effectué la caractérisation géochimique des eaux du bassin de l'Ardèche. Ces travaux se sont déroulés du 1er septembre 2020 au 30 octobre 2023 et ont été menés par l'équipe du laboratoire LGL-TPE en collaboration étroite avec les membres de l'école des Mines. Les tâches mentionnées ci-dessous ont été réalisées :

Tâche 1. Travaux de reconnaissance

- Tâche 1.1. Participation à la mise au point du plan initial et des protocoles d'échantillonnage des eaux de surface, des eaux souterraines et des roches pour analyses
- Tâche 1.2. Analyses de 10 échantillons d'eau issus des campagnes de reconnaissance de juin, juillet et septembre 2021
 - . Sous-Tâche 1.2.1. Analyses des espèces dissoutes majeures Na, Ca, Mg, K, (Li, NH₄)³, Cl, SO₄, NO₃, (NO₂, F, Br)¹¹) par chromatographie ionique
 - . Sous-Tâche 1.2.2. Analyses des isotopes de l'eau par spectrométrie de masse sous flux continu couplée à un banc d'équilibration
- Tâche 1.3. Traitement et interprétation des résultats d'analyses des tâches 1.2 et 1.3

Tâche 2. Participation à la redéfinition des plan et protocole d'échantillonnage initiaux des eaux de surface, des eaux souterraines ainsi que des analyses chimiques/géochimiques pertinentes à réaliser pour la suite de l'étude

Tâches 3 et 4. Deux campagnes de prélèvements à basses eaux contraintes par le contexte hydrologique. Réalisation de l'échantillonnage de 10 prélèvements d'eau. Mesures de terrain (paramètres physico-chimiques et alcalinité).

Tâche 4. Campagne de prélèvements à basses eaux (2 jours). Participation à l'échantillonnage avec un maximum de 42 prélèvements d'eau (contre un maximum de 20 échantillons prévus dans les termes du contrat). Mesures de terrain (paramètres physico-chimiques et alcalinité).

Tâche 5. Analyses de laboratoire

- Tâche 5.1. Analyses des espèces dissoutes majeures Na, Ca, Mg, K (Li, NH₄)³, Cl, SO₄, NO₃, (NO₂, F, Br)^{*}) des échantillons d'eau issus des campagnes de basses eaux
- Tâche 5.2. Analyses des isotopes de l'eau par spectrométrie de masse sous flux continu couplée à un banc d'équilibration des échantillons d'eau issus des campagnes hautes/moyennes eaux et basses eaux

Tâche 6 - Interprétation des résultats d'analyses et rédaction d'un rapport

Tâche 7 « Participation et co-animation au comité de pilotage de fin d'année » Des réunions d'échanges ont été réalisées à différentes étapes du déroulé du programme.

11 Dosage de ces espèces dissoutes contraint par leur faible concentration dans les eaux naturelles et la limite de détection de l'instrument de mesure (0.1 mg/L).

Les différentes tâches mentionnées ci-dessus ont été réalisées selon le calendrier ci-dessous :

		2021	2022					2023				
		Trim 4	Trim1	Trim 2	Trim3	Trim 4	Trim1	Trim 2	Trim3	Trim 4		
Tâche 1	Reconnaissance	■										
Tâche 2	Redéfinition protocole	■										
Tâche 3	Campagne basses eaux 1				■							
Tâche 4	Campagne basses eaux 2			■	■							
Tâche 5	Analyses de laboratoire				■	■	■	■	■			
Tâche 6	Interprétation et Rapport						■	■	■	■	■	■
Tâche 7	Réunion	■		■			■			■		

Tableau 3 : Calendrier des tâches réalisées par le LGL-TPE@UJM pour la caractérisation géochimique des eaux du bassin de l'Ardèche.

8.2. Campagnes de terrain et échantillons

8.2.1. Zone d'étude et sites d'échantillonnage

La zone d'étude couvre le linéaire du cours d'eau Ardèche depuis sa source à proximité du Col de la Chavade (Alt. 1467 m ; département de l'Ardèche) jusqu'au niveau de la commune de Sauze (Alt. 50 m ; département de l'Ardèche) située 125 km à l'aval. La zone d'étude s'étend aux deux principaux affluents qui se trouvent en rive droite de l'Ardèche : le Chassezac (longueur 85 km) et la Baume (longueur 44 km). La confluence de la Baume avec l'Ardèche se situe à 72 km de l'amont du cours d'eau principal et à une altitude d'environ 110 m. La confluence du Chassezac se situe à 74 km de l'amont du cours d'eau principal et à une altitude d'environ 100 m. Ces trois cours d'eau ont des domaines d'extension géographique différents et traversent des formations géologiques variées. L'Ardèche, le Chassezac et la Baume prennent leur source sur les formations granitiques et métamorphiques des Cévennes avant de traverser les formations sédimentaires du Trias (grès) et du Jurassique (calcaires). La rivière Ardèche poursuit ensuite son cheminement sur les calcaires du Crétacé.

Trois affluents de moindre importance ont également fait l'objet d'étude :

- la Fontolière en rive gauche de l'Ardèche, elle draine les formations magmatiques et métamorphiques des Cévennes
- la Louyre située en rive gauche et drainant essentiellement les calcaires du Jurassique
- l'Auzon situé en rive droite, il prend sa source sur les formations triasiques en limite des formations métamorphiques des Cévennes. Seule sa partie amont a fait l'objet de prélèvements.

En complément des prélèvements réalisés sur ces cours d'eau, des sources situées sur différentes entités géologiques ont fait l'objet de prélèvements :

- source Pradel (Alt. 507m)- alternances calcaires/marnes Jurassique moyen -sous bassin versant du Luol (rive gauche de l'Ardèche)
- fontaine d'Auriolles (Alt. 500m) – alternances calcaires/marnes Jurassique moyen -sous bassin versant du Luol (rive gauche de l'Ardèche)
- source Pontet (Alt. 179m ; Commune de Vogüé)- calcaires Jurassique supérieur – rive gauche de l'Ardèche
- source Chamandre (Alt. 202m) – grès-dolomie triasiques – sous bassin versant de la Baume
- fontaine Méjanne (Alt. 137m) – calcaires Jurassique supérieur– sous-bassin versant du Chassezac

- la grotte des Celtes (Alt. $\approx 208\text{m}$)- calcaires Crétacé - Gorges de l'Ardèche (rive gauche)
- la source du Platane (Alt. 62mètres)-calcaires Crétacé - Gorges de l'Ardèche (rive gauche).

Les points d'échantillonnage ont été définis afin de couvrir d'une part les contrastes géologiques observés à l'échelle de la zone d'étude et d'autre part le linéaire de l'Ardèche et de ses principaux affluents. Il a ainsi été défini 24 sites de prélèvement dont les caractéristiques sont reportées dans le Tableau 4 et la localisation sur la Figure 34.

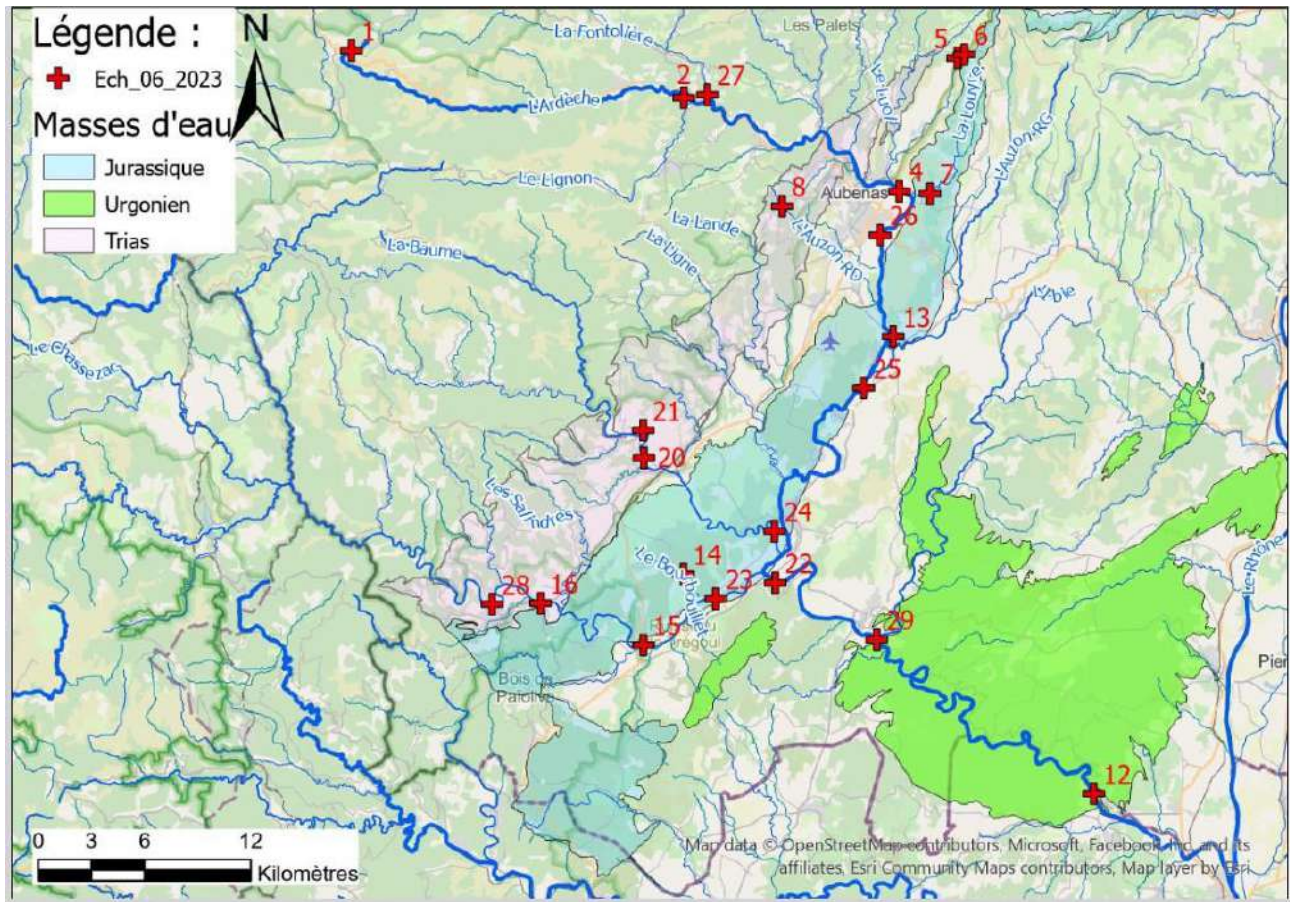


Figure 34 : Carte reportant le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ardèche, les masses d'eau du Trias (rose), du Jurassique (bleu) et de l'Urgonien (Crétacé ; vert) et les sites d'échantillonnage (Source Paran 2023)

8.2.2. Campagnes d'échantillonnage

Les débits de l'Ardèche sont suivis en différents points de son linéaire et les données sont accessibles sur Hydro Portail (EauFrance, 2023). La station de suivi de Saint Martin d'Ardèche (V5064010) permet de suivre l'évolution des paramètres hydrologiques de l'Ardèche dans sa partie aval. La superficie du bassin versant topographique considéré est de 2258km² et englobe l'ensemble des affluents et sources précédemment sélectionnés pour étude. Le débit moyen mesurés sur la période 1912-2023 est de 66.8m³/s avec des moyennes mensuelles variant entre 12.2m³/s pour le mois d'août à 118m³/s pour le mois de novembre (Figure 35). L'ordre de grandeur des débits en période d'étiage peut être donné par le débit mensuel minimal quinquennal sec (QMNA5), celui-ci est de 4,7 m³/s.

Sur la période de janvier 2021 à septembre 2023 les débits mesurés à la station de Saint Martin d'Ardèche sont très inférieurs aux valeurs ci-dessus avec un débit moyen sur 35 mois de 32.4m³/s et des débits moyens mensuels variant de 4.06m³/s en juillet 2022 à 95.3m³/s en novembre 2021.

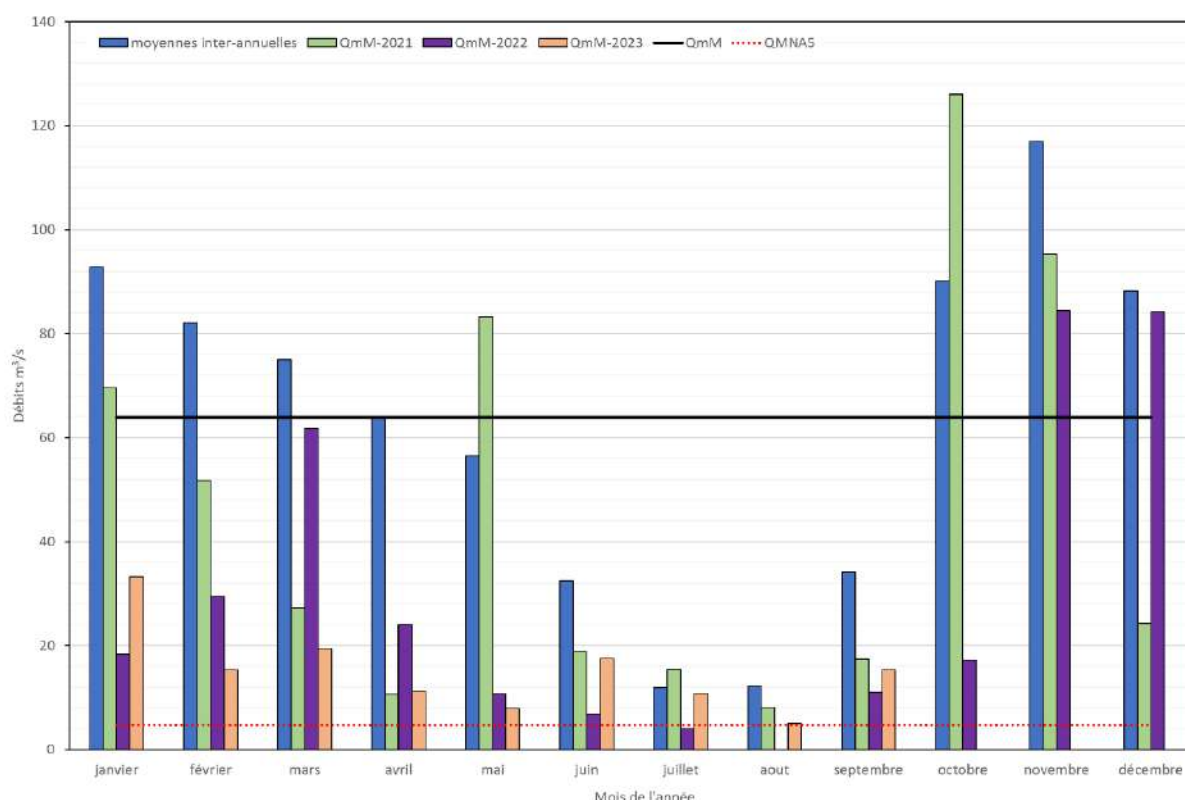


Figure 35 : Débit mensuels moyens interannuels (bleu) de l'Ardèche à Saint Martin d'Ardèche (station V5064010 ; EauFrance, 2023). Débits mensuels moyens pour 2021 (vert), 2022 (violet) et 2023 (rose). La ligne noire indique le débit moyen interannuel, et la ligne rouge en pointillés indique le débit mensuel minimal quinquennal.

Une première campagne de reconnaissance a été réalisée en juin et juillet 2021 en contexte de très basses eaux avec des débits mensuels moyens de 18.8m³/s en juin et de 15.4m³/s en juillet. Elle a donné lieu à l'échantillonnage des eaux de l'Ardèche à l'amont (site de prélèvement 29 ; Tableau 4 et Figure 34) et à l'aval des Gorges (site de prélèvement 12 ; Tableau 4 et Figure 34), de la grotte des Celtes et de la source du platane située en partie intermédiaire des gorges. En complément les sources Méjanne (site de prélèvement 14 ; Tableau 4 et Figure 34) et du Ranc d'Aven, toutes les deux situées sur le sous-bassin versant du Chassezac et émergeant respectivement sur les calcaires du Jurassique supérieur (Tithonique) et du Crétacé inférieur (Berriasien) ont été collectées.

Deux campagnes à l'échelle du bassin versant ont été réalisées les 5 et 6 juillet 2022 et les 12 et 13 septembre 2022. Ces deux campagnes interviennent sur une période de 80 jours, encadrée par les derniers épisodes pluvieux du printemps se produisant autour du 20 juin et par les premiers épisodes pluvieux de

l'automne se produisant dès le 13/09/2022. Ces campagnes permettent donc d'encadrer la période d'étiage sur laquelle les débits moyens journaliers observés sont de $4.7 \pm 2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (valeur similaire à celle du QMNA5). Les sites de prélèvements ciblés lors de ces campagnes sont référencés sur le Tableau 5.

Cours d'eau Principal - Ardèche			Sous-bassin versant			Sources		Campagnes de prélèvements					
	ID	Distance amont aval (m)		ID	Nom Cours d'eau	Distance amont aval (m)	ID	Nom	juin-21	juil-21	5 & 6 Juil 2022	12 & 13 Sept 2022	
Amont													
	1	1076											
	2	24883									X	X	
		25766 - Confluence Fontolière	Sous bassin versant de la Fontolière	27	Fontolière							X	X
		42165 - Confluence Luol	Sous bassin versant du Luol				6	Source du Pradel				X	X
							5	Fontaine d'Auriolles				X	X
	4	42772									X	X	
		43375 - Confluence - Louyre	Sous bassin versant de la Louyre	7	Louyre							X	X
	26	46648										X	X
		51071 - Confluence Auzon RD	Sous bassin versant de l'Auzon RD	8	Auzon RD							X	X
		52880										X	X
	25	56309					13	Source Pontet					X
												X	X
		72572 - Confluence La Baume	Sous bassin versant de la Baume	20	Baume	27647						X	X
						29273	21	Source Chamandre				X	X
				24	Baume	42306						X	X
						43829 - Confluence Ardèche							
				28	Chassezac	60229						X	X
				16	Chassezac	64799						X	X
				15	Chassezac	75575						X	X
								14	Source Méjanne	X		X	X
									Source du Ranc d'Aven	X			
				23	Chassezac	81094						X	X
						84567 - Confluence Ardèche							
		22	74908									X	X
		29	85418							X	X	X	X
							32	Grotte des Celles	X				
							30	Source du Platane	X	X (2 niveaux)			
Aval	12	125057								X	X	X	

Tableau 5 : Liste des échantillonnages réalisés courant juin et juillet 2021 et juillet et septembre 2022.

8.3. Méthodes

Les analyses des paramètres physico-chimiques (pH, T, EC, O₂ dissous), de l'alcalinité, des espèces dissoutes majeures et des isotopes de l'eau ont été acquises sur les eaux superficielles et les eaux souterraines.

8.3.1. Paramètres Physico-Chimiques et Alcalinité Totale Des Eaux

Le pH, la température, la conductivité et le taux d'oxygène dissous ont été mesurés sur le terrain pour les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces données ont été acquises avec un multiparamètre WTW 3650 équipé d'une sonde pH Sentix 940, d'une sonde de conductivité TetraCon 925 et d'une sonde oxygène dissous FDO925. Les données sont reportées sur le Tableau 6.

L'alcalinité totale a été déterminée sur le terrain par titrage à l'acide sulfurique suivant la Méthode Hach 8203.

8.3.2. Prélèvement et Conditionnement des échantillons d'eau

Pour chaque point d'échantillonnage 2 prélèvements ont été effectués en vue des analyses futures. Les eaux destinées à la mesure des concentrations en espèces majeures dissoutes ont été conditionnées dans des flacons HDPE de 100mL. Un prélèvement de 20mL a été réalisé en flacon de verre ambré pour la mesure des compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD sur la molécule d'eau.

Les échantillons ont été entreposés dans des glacières et acheminés au laboratoire le jour même où le lendemain de l'échantillonnage puis stockés à 4°C à l'abri de la lumière jusqu'à la réalisation des analyses.

8.3.3. *Espèces dissoutes Majeures*

Les échantillons d'eau ont été filtrés à 0,45µm avec des membranes en nitrates de cellulose. Les espèces dissoutes majeures ont été déterminées à l'Université Jean Monnet de Saint Etienne sur l'appareillage de chromatographie ionique du Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL-TPE). L'instrument utilisé est une double chaîne d'analyse Metrohm ECO IC, le module d'analyse des anions est équipé d'un suppresseur chimique. L'éluant utilisé pour l'analyse des anions (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , SO_4^{2-} et PO_4^{3-}) est un mélange 3.2 mM Na_2CO_3 et 1 mM $NaHCO_3$. 2mM ; le modèle de la colonne chromatographique utilisée est Metrosep A Supp5 Guard/4.0. L'éluant utilisé pour l'analyse des cations (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) est une solution 1,7mM HNO_3 , le modèle de la colonne chromatographique est Metrosep C4 250/4.0. L'incertitude sur les concentrations mesurées est de 5%.

8.3.4. *Isotopes de l'eau*

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule d'eau ont été déterminées par GB-IRMS (Gas Bench – Isotope Ratio Mass Spectrométrie) Delta V Plus Thermo Scientific à l'Université Jean Monnet de Saint Etienne, LGL-TPE. La méthode utilisée pour la détermination des $\delta^{18}O$ des eaux suit l'approche d'équilibration $CO_{2(g)}$ - eau proposée par Epstein et Mayeda (1953). Le temps d'équilibration est de 20h à 24°C sous atmosphère d'hélium. Le δD est déterminé par équilibration à 28°C pendant 1 heure de la vapeur d'eau avec du dihydrogène sous atmosphère d'hélium et en présence d'un barreau de platine qui sert de catalyseur (Miyamoti et al., 1988). Les rapports isotopiques $^{18}O/^{16}O$ et D/H sont exprimés en pour mil (‰) par rapport au standard VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) avec la notation $\delta^{18}O$ et δD respectivement avec :

$$\delta = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] * 1000$$

R est le rapport d'abondance de l'isotope lourd sur l'isotope léger)

Les standards internationaux GRESP, SLAP et SMOW sont utilisés pour la calibration des mesures. La reproductibilité est meilleure que $\pm 0,1\text{‰}$ pour les $\delta^{18}O$ et que $\pm 1\text{‰}$ pour les δD .

8.4. Résultats et Discussion

Les principaux résultats obtenus pour les eaux superficielles et souterraines sont présentés dans le Tableau 6 et discutés ci-après.

8.4.1. *Variation du Ph Et de la Conductivité des Eaux au Travers du Bassin Versant*

Le pH des eaux de la zone d'étude varie entre 7.3 et 9.6. Ces extrêmes sont observés respectivement pour les eaux des sources situées dans le domaine des calcaires Crétacé à l'aval du bassin versant de l'Ardèche et pour les eaux de l'Ardèche sur le tronçon drainant les formations calcaires du Jurassique (exemple : site 26 ; Tableau 3 ; Figure 34). Aucune tendance d'évolution de ce paramètre au cours du temps ne peut être discutée à partir du jeu de données disponibles.

Les eaux les moins minéralisées de la zone d'étude sont observées au niveau des zones amont des cours d'eau la Fontolière (68µS/cm), l'Ardèche (76µS/cm), la Baume (86µS/cm) et le Chassezac (71µS/cm). Ces conductivités caractérisent l'influence des terrains granitiques et métamorphiques sur les eaux superficielles.

Les conductivités les plus élevées sont observées pour les eaux de la grotte des Celtes dans le domaine des gorges de l'Ardèche avec une valeur de 675µS/cm mesurée en juin 2021. Les eaux de la Louyre (site 7 ; Tableau 3 ; Figure 34), de la source Méjanne, de la source du Ranc d'Aven et de la source du Pontet (site 13 ; Tableau 3 ; Figure 34) présentent également des conductivités supérieures à 500µS/cm avec des valeurs de 512 et 617µS/cm. Les conductivités élevées des eaux de ces sources et affluents sont favorisées par leur localisation en domaine calcaire, les calcaires du Jurassique supérieur pour la Louyre, la source

Méjanne et la source du Pontet et les calcaires Crétacé pour la source du Ranc d'Aven et la grotte des Celtes.

Les eaux de l'Auzon rive droite et de la source de Chamandre drainant les formations triasiques présentent des conductivités comprises entre 318 et 366 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de la fontaine d'Auriolles et de la source du Pradel émergeant au niveau des formations marno-calcaires du Jurassique moyen présentent des conductivités comprises entre 391 et 451 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La source du platane située au niveau des gorges de l'Ardèche se différencie de l'ensemble des sources mentionnées précédemment, malgré le contexte calcaire de cette source, les eaux présentent une conductivité comprise entre 266 et 284 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs sont proches de celles mesurées pour les eaux de l'Ardèche dans sa partie aval. Ces premières observations suggèrent une influence du cours d'eau sur l'alimentation de la source.

Du fait des apports successifs depuis les différentes sources et différents affluents, la conductivité des eaux de l'Ardèche évolue de 76 à 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de l'amont à l'aval avec un saut d'environ 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au travers du tronçon drainant les formations Jurassique et collectant les eaux des deux principaux affluents La Baume et le Chassezac (Figure 36). De la même manière une augmentation de la conductivité est observée de l'amont à l'aval du Chassezac au travers des formations triasiques et jurassiques (Figure 37 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

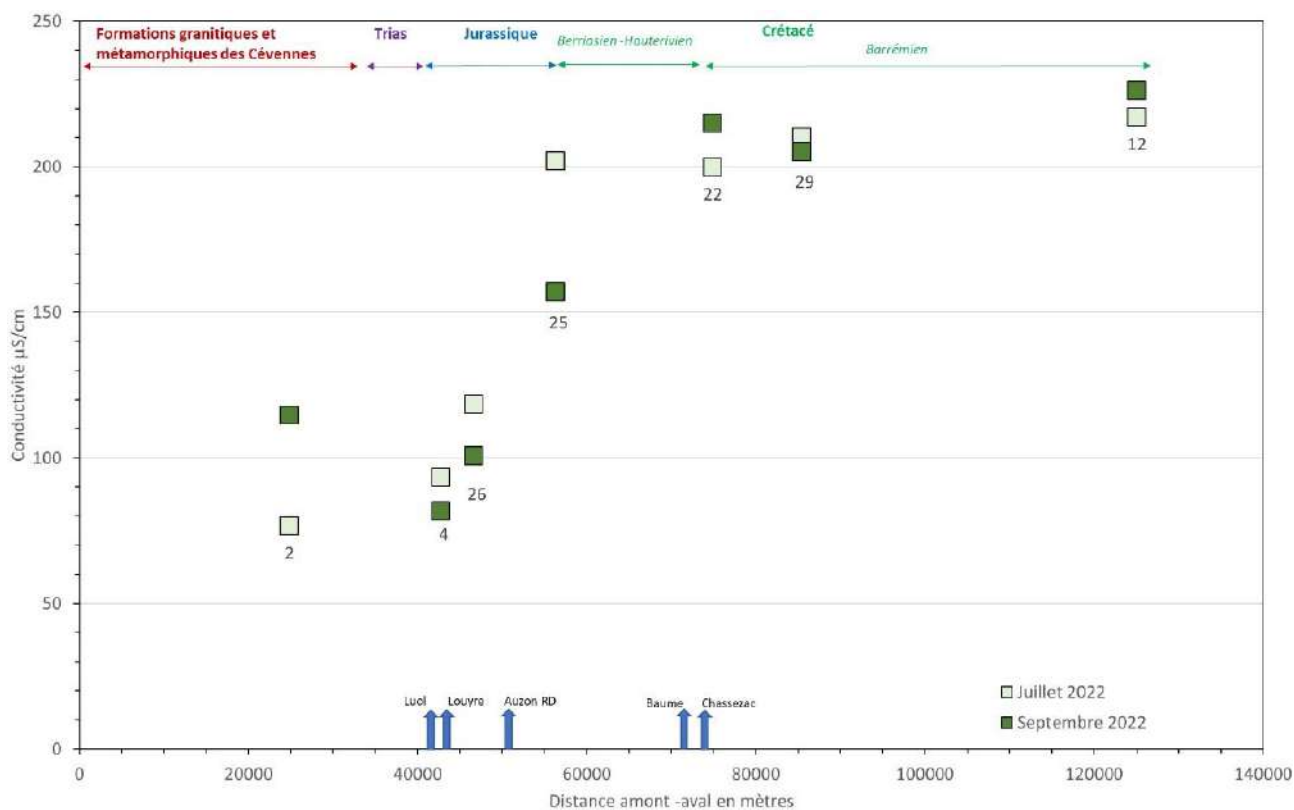


Figure 36 : Évolution de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux de l'Ardèche de l'amont à l'aval du cours d'eau pour les campagnes de juillet (carrés vert clair) et septembre 2022 (carrés vert foncé). L'étendue des domaines géologiques et les points de confluence des affluents étudiés sont reportés à titre indicatif. Les numéros des échantillons sont reportés sous les points et peuvent être retrouvés dans le Tableau 3 et le Tableau 4)

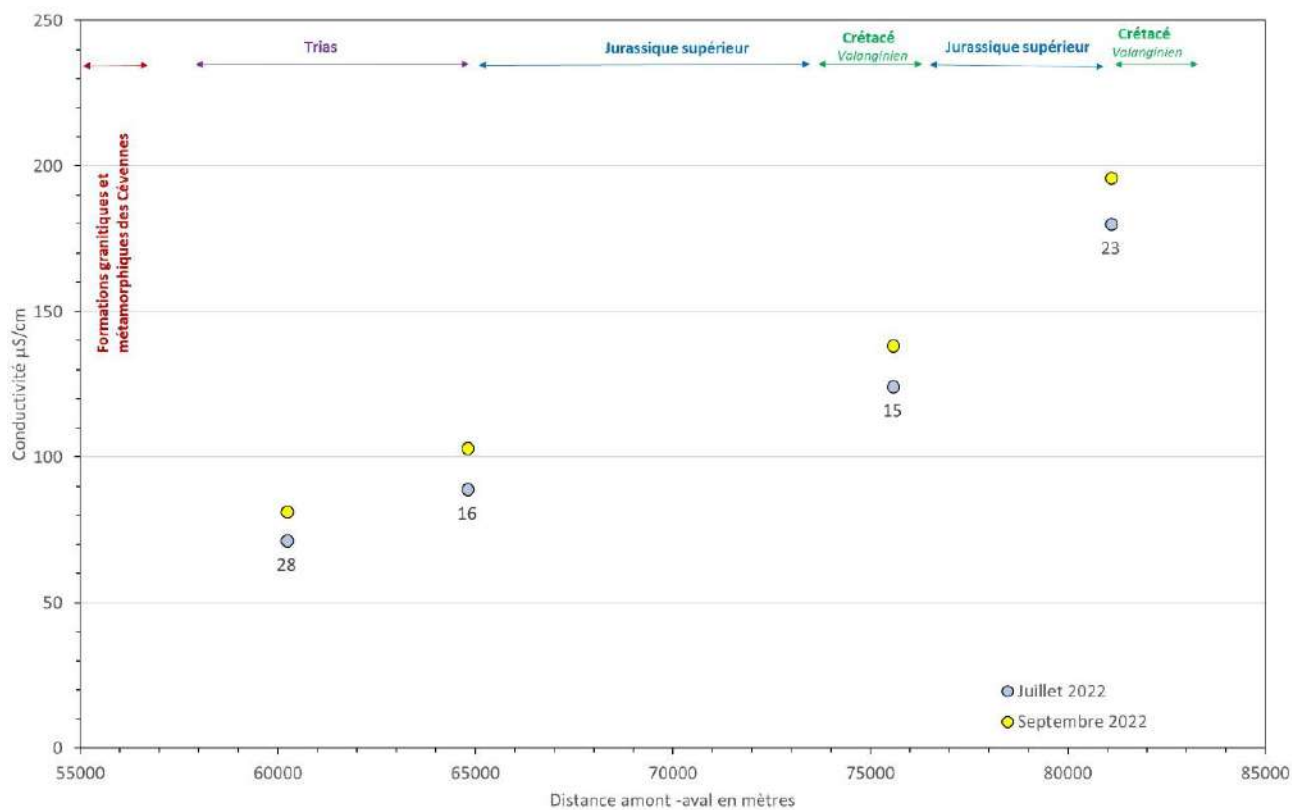


Figure 37 : Évolution de la conductivité ($\mu\text{S/cm}$) des eaux du Chassezac de l'amont à l'aval du cours d'eau pour les campagnes de juillet (ronds bleus) et septembre 2022 (ronds jaunes). L'étendue des domaines géologiques est reportée à titre indicatif. Les numéros des échantillons sont reportés sous les points et peuvent être retrouvés dans le Tableau 3 et le Tableau 4)

ID	Cours d'eau (distance amont aval m)		T°C	pH	EC µS/cm	O ₂ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	F mg/l	Cl ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	Br ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	δ ¹⁸ O ‰/SMOW	δD ‰/SMOW	
14	Source - Bassin versant du Chassezac - Méjanne	01/06/2021	Source-Jurassique	13,6	7,3	587	302,0	0,2	3,0		1,1	0,0	2,2	12,4	1,9		0,9	0,6	63,2	-5,9	-36,0	
	Source - Bassin versant du Chassezac - Ranc d'Aven	01/06/2021	Sources - Crétacé	13,8	7,3	534	281,0	0,2	2,8		1,0	1,3		4,8	1,7	0,1	0,8	0,4	51,1	-5,9	-40,5	
29	Ardèche - 85418m	01/06/2021	Ardèche	19,3	8,2	193	63,0	0,3	4,7		0,3	1,7		11,5	4,7		1,5	2,9	29,9	-6,5	-40,8	
32	Source - Bassin versant de l'Ardèche -Grotte des Celtes	01/06/2021	Source- Crétacé	24,1		675	351,0		7,2			7,5		7,7	2,1		0,8	0,0	57,8	-6,8	-41,4	
30	Source - Bassin versant de l'ArdècheSource du Platane(-65m)	01/06/2021	Source- Crétacé	14	7,3	284	110,0	0,2	4,2		0,5	2,4		10,1	3,9		1,2	3,1	50,9	-6,2	-39,3	
12	Ardèche - 125057m	01/06/2021	Ardèche	19,6	7,8	208	83,0	0,2	4,4		0,3	1,1		11,6	4,5		1,2	3,0	32,6	-6,4	-39,4	
29	Ardèche - 85418m	01/07/2021	Ardèche	22,7		212	87,0	0,2	5,0		0,3	1,8		12,0	4,8	0,3	1,5	3,2	34,6	-6,2	-37,6	
30	Source - Bassin versant de l'Ardèche - Source du Platane (-65m)	01/07/2021	Source- Crétacé	25,5		278	120,0	0,2	5,4		0,5	2,7		10,8	4,7	0,4	1,9	3,5	48,6	-6,1	-41,6	
30	Source - Bassin versant de l'Ardèche - Source du Platane (-21m)	01/07/2021	Source- Crétacé	26,1		266	117,0	0,2	4,5		0,5	2,1		10,8	4,3	0,5	1,3	3,3	46,4	-6,2	-39,0	
12	Ardèche - 125057m	01/07/2021	Ardèche	22,9		217	92,0	0,2	6,5		0,4	1,4		11,7	4,5	0,3	1,5	3,1	34,9	-6,1	-41,1	
2	Ardèche - 24883 m	01/07/2022	Ardèche	23,1	8,9	76,6	9,88	26,2	0,1	5,0		1,1		3,0	6,6	0,0	1,3	1,9	5,9	-5,8	-35,7	
27	Affluent-Fontolière	01/07/2022	Fontolière	21,4	7,9	78,3	9,52	28,5		3,0		1,4		3,3	5,9	0,1	1,4	1,8	6,6	-6,2	-37,3	
6	Bassin versant du Luol -Source du Pradel	01/07/2022	Source-Jurassique	15,2	8,4	391	9,7	244,0		2,7		0,1	0,6	6,3	2,6	1,9	0,3	3,9	28,7	-7,0	-43,7	
5	Bassin versant du Luol - Fontaine d'Auriolles	01/07/2022	Source-Jurassique	16,2	7,4	420	8,75	257,0		2,7		0,0	1,2	9,3	2,9	0,5	0,7	4,4	64,3	-7,0	-42,3	
4	Ardèche - 42772m	01/07/2022	Ardèche	24,3	8,5	93,2	9,42	40,5	0,1	4,0		0,3		4,2	6,1	0,1	1,4	2,0	9,1	-5,6	-34,3	
7	Affluent- Louyre	01/07/2022	Louyre	15,4	7,5	617	8,75	276,0		3,8		0,2	0,3	6,3	2,2	0,1	0,3	3,0	134,6	-6,3	-38,9	
26	Ard-che -46648m	01/07/2022	Ardèche	24,2	9,3	118,4	11,93	49,9		4,9		0,1		4,8	6,7	0,1	1,6	2,2	13,8	-5,5	-33,3	
8	Affluent - Auzon RD	01/07/2022	Auzon RD	19,3	8,2	348	8,16	207,0		7,3		0,0	1,0	13,4	4,3	0,0	2,6	13,3	50,1	-5,7	-35,5	
25	Ardèche -56309m	01/07/2022	Ardèche	22,9	8,3	202	7,51	73,5		7,0		0,0	0,8	10,0	7,7	0,0	2,0	3,1	27,5	-5,5	-33,6	
20	Affluent - Baume - 27647m	01/07/2022	Baume	28	9,0	85,8	10,82	26,6		2,9		0,3		7,4	4,3	0,1	1,1	2,5	8,3	-4,8	-29,0	
21	Source - Bassin versant de la Baume - Chamandre- 29273	01/07/2022	Source-Trias	15,6	8,4	300	10,76	120,0		3,9		1,5		8,6	2,4	0,1	2,0	16,9	35,8	-5,8	-34,7	
24	Affluent Baume - 423306	01/07/2022	Baume	26,9	8,9	180,6	10,36	117,0		4,5		0,1	0,6	10,7	4,7	0,0	1,3	3,9	25,6	-4,6	-27,0	
28	Affluent Chassezac -60229m	01/07/2022	Chassezac	26,7	8,1	71,3	9,26	48,0		2,7		1,5		4,0	3,0	0,1	0,9	2,1	7,5	-5,5	-34,2	
16	Affluent - Chassezac -64799m	01/07/2022	Chassezac	27,6	9,0	88,9	10,21	27,2		3,0		1,5		5,5	3,2	0,1	1,0	2,8	10,0	-5,4	-33,0	
15	Affluent Chassezac - 75575	01/07/2022	Chassezac	29,3	9,2	124,2	10,67	41,0		3,2		1,0		8,7	3,2	0,1	1,1	3,4	15,9	-5,2	-31,6	
14	Source - Bassin versant du Chassezac - Méjanne	01/07/2022	Source-Jurassique	14,1	7,6	568	4,01	313,0		2,9		0,1	1,9	0,1	5,0	1,9	0,0	0,5	1,4	31,8	-5,5	-32,9
23	Chassezac - 81094m	01/07/2022	Chassezac	27,5	8,6	180	8,9	152,0		4,0		0,0	0,9	8,9	3,5	0,1	1,1	3,3	26,8	-5,0	-32,0	
22	Ardèche -74908m	01/07/2022	Ardèche	25,5	8,9	199,8	10,75	99,0		5,3		0,1	0,6	12,8	5,5	0,1	1,5	3,3	29,2	-5,2	-29,6	
29	Ardèche - 85418m	01/07/2022	Ardèche	25,1	8,6	210	9,35	90,6		5,9		0,1	0,3	12,8	5,8	0,1	1,6	3,4	30,9	-5,2	-31,5	
12	Ardèche - 125057m	01/07/2022	Ardèche	25,3	8,5	217	9	89,0		5,3		0,0	0,4	12,8	5,3	0,0	1,5	3,3	33,3	-5,1	-31,5	
2	Ardèche - 24883 m	01/09/2022	Ardèche	18,7	8,4	114,7	9,81	42,7	0,1	7,1		3,1		3,5	10,3		1,8	2,6	8,1	-5,6	-35,1	
27	Affluent-Fontolière	01/09/2022	Fontolière	10,8	7,5	57,6	11,26	21,8	0,1	3,0	0,0	1,9		2,4	3,9		0,9	1,2	4,4	-7,6	-48,7	
6	Bassin versant du Luol -Source du Pradel	01/09/2022	Sources-Jurassique	14,9	8,3	420	9,74	206,0	0,1	2,7	0,0	3,0		6,6	2,8	0,1	0,2	4,0	40,7	-7,0	-45,4	
5	Bassin versant du Luol - Fontaine d'Auriolles	01/09/2022	Sources-Jurassique	19,7	7,3	451	7,81	212,0	0,1	2,8		1,3		9,2	2,2	0,1	0,2	4,3	87,5	-7,0	-44,8	
4	Ardèche - 42772m	01/09/2022	Ardèche	22,3	9,4	81,6	11,58	48,4	0,1	3,9	0,0	0,9		3,4	5,4	0,0	1,3	1,6	7,0	-6,9		
7	Affluent- Louyre	01/09/2022	Louyre	18,6	8,1	512	8,59	322,0	0,1	5,1	0,0	0,1		15,0	2,6	0,0	0,1	3,1	31,2	-4,9	-32,7	
26	Ardèche -46648m	01/09/2022	Ardèche	22,8	9,6	100,6	11,75	41,3	0,1	4,5	0,0	0,5		4,0	6,0	0,1	1,3	1,7	9,9	-6,6	-43,7	
8	Affluent - Auzon RD	01/09/2022	Auzon RD	17	8,2	366	8,82	127,0	0,1	7,3	0,0	1,5		14,9	4,4	0,1	2,8	13,7	27,3	-5,9	-35,6	
13	Source - Bassin versant de l'Ardèche - Pontet	01/09/2022	Source-Jurassique	16,2	7,3	614	8,45	265,0	0,1	13,3	0,0	0,1	10,2	39,2	9,4		1,7	10,0	105,4	-6,1	-43,2	
25	Ardèche -56309m	01/09/2022	Ardèche	23,9	9,2	157	11,8	60,2	0,1	6,5	0,0	1,2		7,6	7,5		1,7	2,4	20,5	-6,4	-42,9	
20	Affluent - Baume - 27647m	01/09/2022	Baume	23,8	8,4	138,1	9,18	43,5	0,1	3,8		0,1	0,6	15,0	6,1	0,0	1,2	4,2	14,2	-4,6	-28,2	
21	Source - Bassin versant de la Baume - Chamandre- 29273	01/09/2022	Source-Trias	14,8	8,4	318	10,22	135,0	0,2	3,7		4,6		8,4	1,6		1,6	17,2	38,8	-6,2	-38,7	
24	Affluent Baume - 423306	01/09/2022	Baume	22,3	8,4	255	9,52	99,0	0,1	7,4		0,1	0,5	20,2	7,0		1,5	5,8	36,9	-4,6	-29,6	
28	Affluent Chassezac -60229m	01/09/2022	Chassezac	21,6	7,9	81,3	8,28	30,1	0,2	2,8	0,0	1,7		3,8	3,1		0,7	2,3	8,5	-5,8	-35,6	
16	Affluent - Chassezac -64799m	01/09/2022	Chassezac	21,5	7,8	103	7,93	42,9	0,2	3,0	0,0	1,6		5,9	3,2		0,8	3,3	11,5	-5,8	-39,9	
15	Affluent Chassezac - 75575	01/09/2022	Chassezac	22,1	8,0	138,2	6,48	55,1	0,2	3,2		1,2		9,4	3,2		1,0	4,1	17,6	-5,7	-38,8	
14	Source - Bassin versant du Chassezac - Méjanne	01/09/2022	Source-Jurassique	16,5	7,7	549	4,35	285,0	0,1	1,9	0,0	2,1		2,0	1,0	0,0	0,0	0,5	108,5	-5,3	-29,6	
23	Chassezac - 81094m	01/09/2022	Chassezac	21,3	8,1	196	7,57	84,7	0,2	3,7	0,0	0,1	1,1	9,5	3,3		0,8	3,6	31,0	-5,6	-28,6	
22	Ardèche -74908m	01/09/2022	Ardèche	21,5	8,5	215	10,04	88,1	0,1	6,4		0,6		15,0	6,7		1,5	3,4	32,0	-5,8	-37,7	
29	Ardèche - 85418m	01/09/2022	Ardèche	23,7	8,8	205	10,6	82,5	0,1	6,8		0,1	0,3	14,6	6,6	0,1	1,6	3,5	31,5	-5,6	-38,0	
12	Ardèche - 125057m	01/09/2022	Ardèche	22,7	8,4	226	10,36	92,9	0,1	6,7	0,0	0,1	0,3	14,8	6,3	0,1	1,5	3,6	35,3	-5,6	-31,8	

Tableau 6 : Données de terrain (température T°C, pH, conductivité EC, HCO₃⁻), concentrations en espèces dissoutes majeures et compositions isotopiques de l'oxygène-δ¹⁸O et de l'hydrogène-δD obtenues sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche lors des campagnes de juin et juillet 2021 et de juillet et septembre 2022.

8.4.2. Composition Chimique des Eaux

Les eaux collectées sur le bassin versant de l'Ardèche appartiennent au faciès bicarbonaté calcique. Des différences apparaissent sur les proportions des espèces cationiques dissoutes avec les eaux des sources Jurassique et Crétacé très riches en calcium et la source de Chamandre et l'Auzon RD marqué par des apports en magnésium plus importants que sur le reste du bassin.

Les tendances de distributions relatives des espèces dissoutes cationiques (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) sont mises en évidence sur la Figure 38. On identifie ainsi les eaux de l'Ardèche amont et de la Fontolière qui présentent des rapports Mg/Na et Ca/Na similaires à celui connu pour des eaux circulant sur des formations granitiques. Les eaux de la source de Chamandre et de l'Auzon RD, tous deux situés sur les formations triasiques présentent un enrichissement relatif en magnésium qui pourrait s'expliquer par les encroutements dolomitiques observés par endroits dans les formations du Trias (BRGM, 2023). Les eaux des sources du Jurassique moyen (Pradelles et Auriolles) et du Jurassique supérieur (Pontet), les eaux de la Louyre et les eaux de la source du Platane présentent un enrichissement en calcium. Les eaux des sources de Méjanne et du Ranc d'Aven sortent des tendances précédentes et nécessiterons une confirmation analytique des données avant une exploitation plus approfondie.

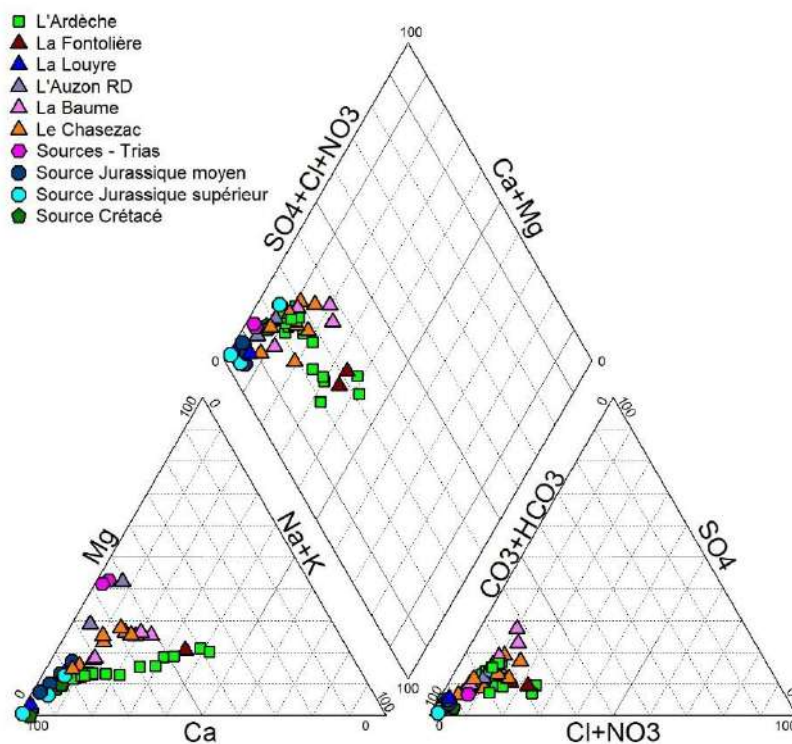


Figure 38 : Distribution sur le diagramme de Piper des eaux collectées sur le bassin versant de l'Ardèche en juin et juillet 2021 et en juillet et septembre 2022.

Les eaux de l'Ardèche se répartissent de l'amont à l'aval entre un pôle « silicates » et un pôle « carbonates » défini par les sources Jurassique et Crétacé. Une tendance similaire est observée pour les eaux de la Baume et du Chassezac avec cependant un enrichissement relatif en magnésium par rapport aux eaux de l'Ardèche (Figure 39). L'augmentation du rapport Mg/Na des eaux de l'Ardèche, de l'amont à l'aval du cours d'eau est à mettre en parallèle des rapports Mg/Na des sources des différents domaines géologiques et des eaux des affluents. Sur le domaine granitique et métamorphique des Cévennes, les eaux de l'Ardèche présentent un rapport inférieur à 0.3. Ce rapport évolue vers une valeur d'environ 0.6 lors de la traversée des terrains Jurassique et Crétacé inférieur dont la nature limite les apports en sodium mais peu favoriser les apports en magnésium notamment à partir de formations contenant de la dolomite (Figure 40). Ceci est à corréliser avec les apports sur ce tronçon des eaux drainant le Trias (Auzon RD, $\text{Mg}/\text{Na} \approx 2.9$), les apports depuis les formations du Jurassique (Sources de Pradel, Fontaine d'Auriolle,

Louyre, Source du Pontet ; $Mg/Na \approx 1.2-1.4$) et les apports de la Baume ($Mg/Na \approx 0.69$) et du Chassezac ($Mg/Na \approx 1$). Sur la partie aval, aucune variation significative du rapport Mg/Na n'est observée au travers du domaine Crétacé des gorges de l'Ardèche suggérant un apport négligeable de ces deux éléments.

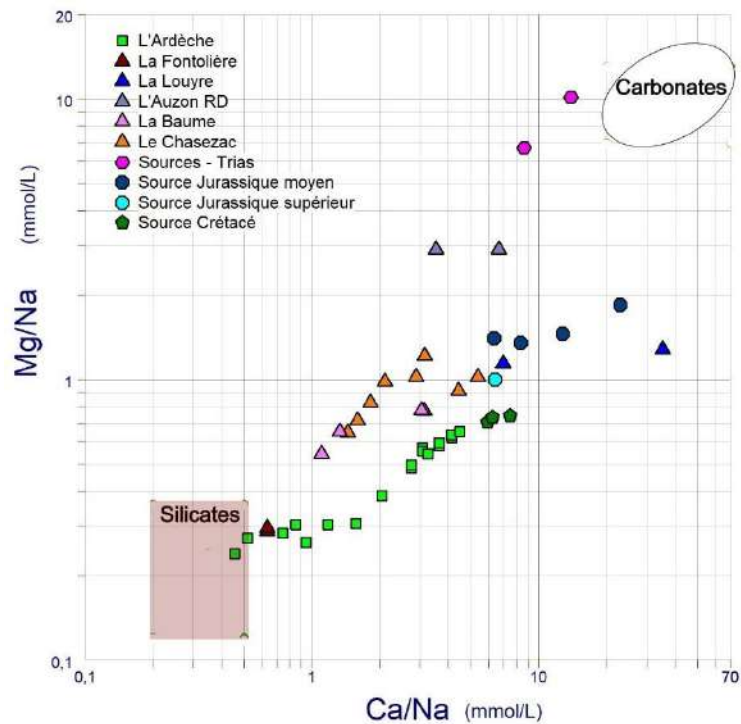


Figure 39 : Diagramme Mg/Na en fonction de Ca/Na . La plage "Carbonates" représente le domaine des rapports observés pour les eaux de rivières drainant des formations carbonatées, la plage « silicates » représente le domaine des rapports observés pour les eaux des rivières drainant des formations de type granitique (Gaillardet et al. ; 1999).

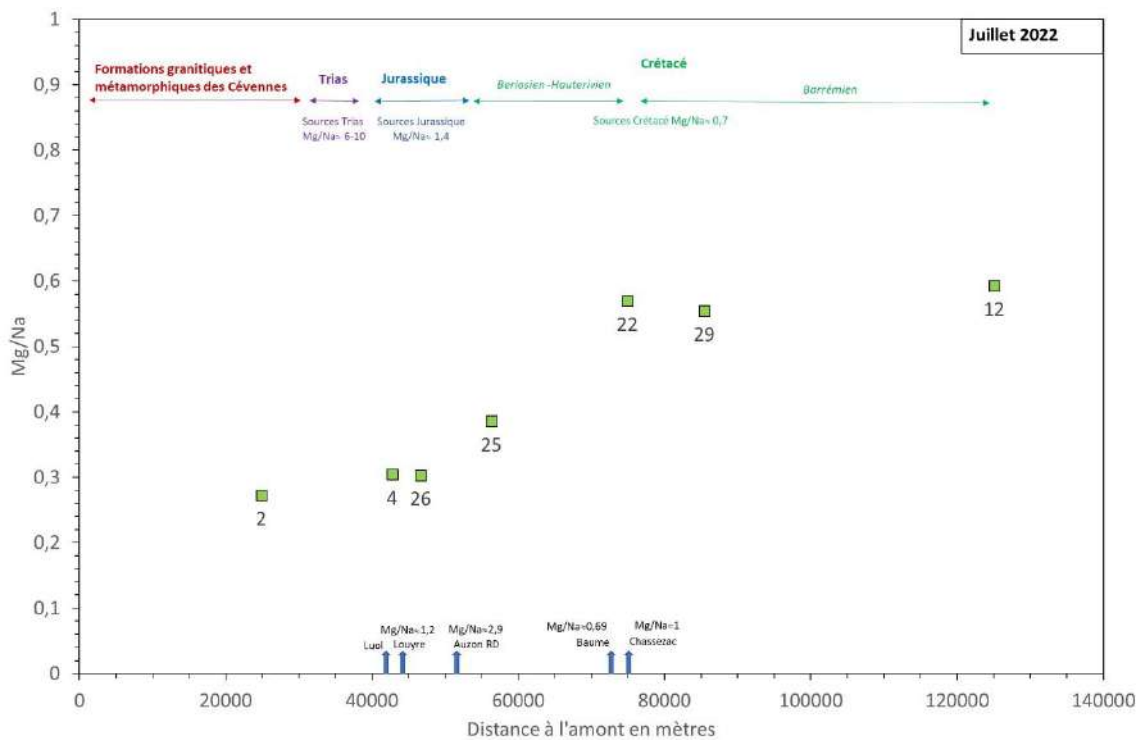


Figure 40 : Évolution du rapport Mg/Na dans les eaux de l'Ardèche de l'amont à l'aval du cours d'eau. L'étendue des différents domaines géologiques traversés est reportée à titre indicatif. Les rapports Mg/Na pour les sources des domaines triasique, jurassique et crétacé ainsi que ceux des affluents sont reportés.

8.4.3. Composition Isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et δD des Eaux

Les eaux du bassin versant de l'Ardèche présentent des $\delta^{18}\text{O}$ et δD variant respectivement de -7.7 à -4.4‰ et de -49 à -26‰ (Figure 41 et Figure 43). Les eaux se répartissent globalement le long de la droite des eaux météoriques mondiale (Craig ; 1961) et de la droite des eaux météoriques obtenue pour le département du Gard voisin de l'Ardèche (Ladouche et al., 2009).

La campagne de juin/juillet 2021 se concentrant principalement sur le domaine des gorges de l'Ardèche met en évidence de faibles variations des compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux de l'Ardèche entre l'amont et l'aval. Les eaux des sources du Crétacé donnent également des compositions isotopiques similaires (Figure 41).

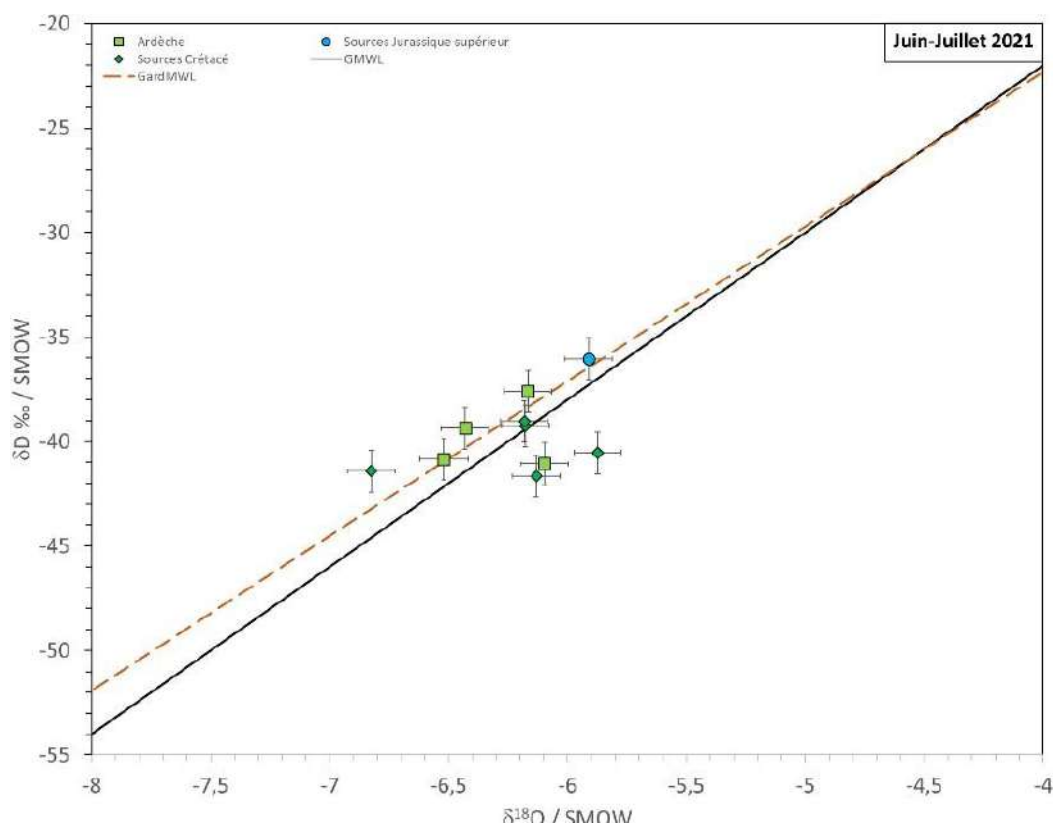


Figure 41 : Diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$, distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de juin/juillet 2021. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées.

La campagne de juillet 2022 qui s'intéresse à un domaine plus vaste du bassin versant de l'Ardèche met en évidence des contrastes très significatifs entre les eaux des sources du Jurassiques qui présentent des compositions isotopiques très négatives et les eaux de la Baume qui présentent les compositions isotopiques les plus élevées observées pour cette période (Figure 42). Les eaux de l'Ardèche, de la Fontolière, de la Louyre, de l'Auzon RD et du Chassezac ainsi que les eaux des sources du Trias et du Jurassique se placent en intermédiaire. Pour les cours, d'eau on observe une augmentation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de δD de l'amont à l'aval (Figure 43). Ces contrastes pourront être discutés au regard des différentes altitudes de recharge des sources et d'alimentation des cours d'eau et des différentes saisons de recharge. Pour cela il est nécessaire de replacer ces données en fonction de l'évolution des compositions isotopiques des eaux de précipitations du secteur. En parallèle de la présente étude des données ont été acquises sur les précipitations collectées dans le secteur des gorges de l'Ardèche, le déficit en précipitation sur la période 2021-2023 ne permet pas pour l'instant d'avoir un jeu de données représentatif des variations saisonnières. Ce point pourra être approfondi par la suite.

Une tendance similaire est observée pour la campagne de septembre 2022 (Figure 44), ceci peut être expliqué par la continuité durant l'été de la contribution des différentes masses d'eau au débit de l'Ardèche et l'homogénéité de chacun des réservoirs en jeu.

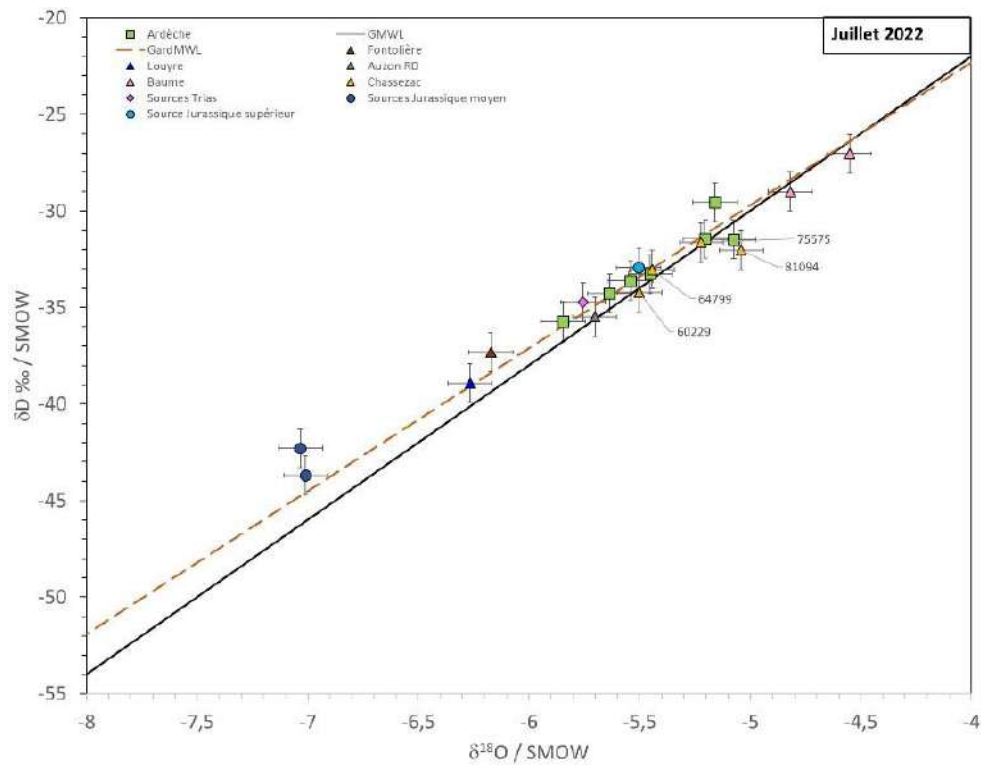


Figure 42 : Diagramme δD vs $\delta^{18}O$ distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de juillet 2022. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées

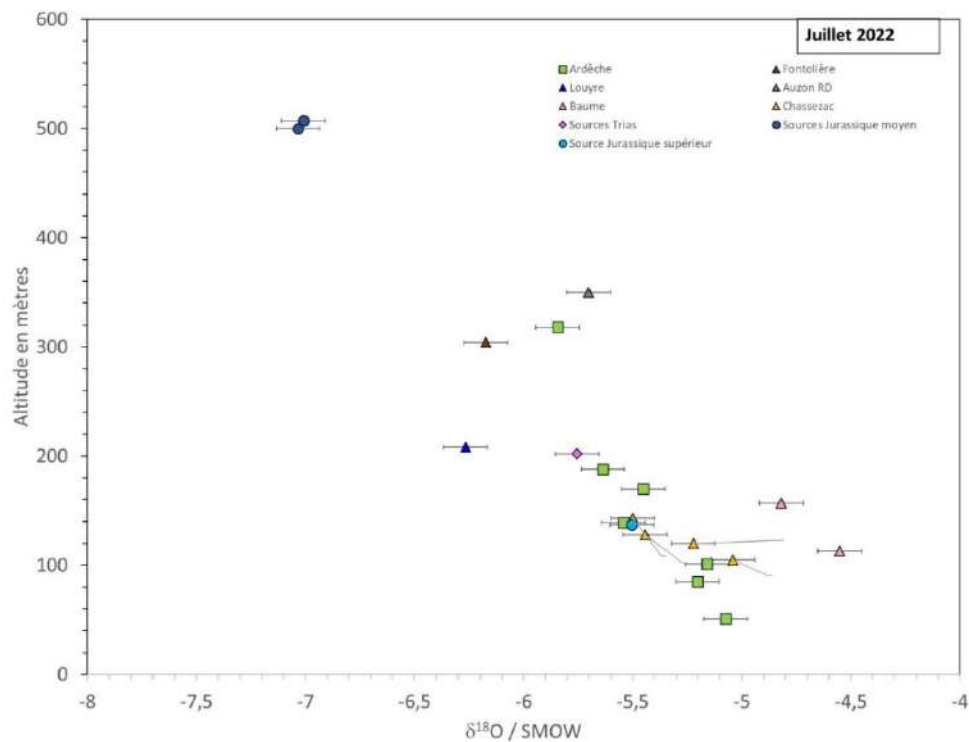


Figure 43 : Évolution du $\delta^{18}O$ des eaux des eaux superficielles et souterraines du bassin versant de l'Ardèche en fonction de l'altitude

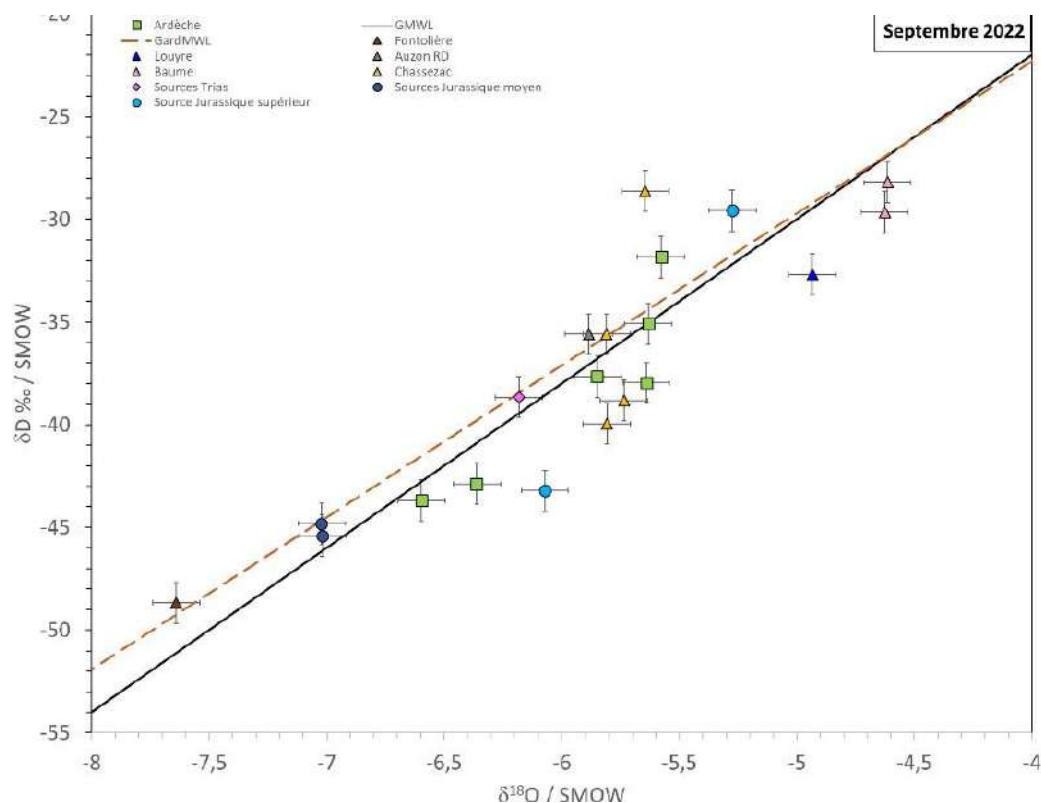


Figure 44 : Diagramme δD vs $\delta^{18}O$ distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de septembre 2022. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées

8.5. Conclusion

L'étude des paramètres physico-chimiques et isotopiques des eaux du bassin versant de l'Ardèche permet de mettre en évidence des caractéristiques différentes pour chacune des masses d'eau en jeu. Ainsi les eaux souterraines et superficielles drainant les formations granitiques et métamorphiques des Cévennes présentent des conductivités inférieures à $100\mu S/cm$, des rapports Mg/Na et Ca/Na faibles et des compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et δD très négatives. Les eaux de la source de Chamandre située dans le domaine géologique du Trias ainsi que les eaux du cours d'eau Auzon RD prenant sa source dans le même contexte géologique présentent des conductivités comprises entre 300 et $400\mu S/cm$ et des rapports Mg/Na élevés. Les eaux de sources et de la Louyre situés dans le domaine Jurassique présentent des conductivités entre 400 et $620\mu S/cm$ suivant la prédominance des formations calcaires ou marno-calcaires. Les rapports Mg/Na sont de l'ordre de 1.2-1.4. Enfin dans le domaine Crétacé supérieur des gorges de l'Ardèche on retrouve des conductivités plus ou moins élevées suivant la source considérée. Les eaux de la grotte des Celtes avec des conductivités supérieures à $500\mu S/cm$ sont représentatives d'un pôle karstique alors que les eaux de la source du platane qui présentent des conductivités et des compositions isotopiques similaires à celles des eaux de l'Ardèche sont probablement issues du recyclage des eaux de la rivière.

Les données géochimiques acquises permettent de caractériser les différentes masses d'eau en jeu à l'échelle du bassin versant de l'Ardèche et fournissent des éléments d'intérêt pour la discussion des mélanges de masses d'eau et des zones de recharge des réservoirs souterrains.

9. Conclusion et perspectives 2025

Conformément au planning initial mais avec un retard dû à la disparition ou au dysfonctionnement de plusieurs sondes de mesures entre 2021 et 2024, 2025 sera principalement consacrée aux tâches suivantes :

- Transformation hauteur/débit avec la méthode Baratin pour ajuster les courbes de tarage sur la Beaume, voire le Chassezac si les données sont exploitables ;
- Traitement des données hydrologiques et calcul des différentiels de débits pour estimer la contribution des 3 unités aquifères à la rivière (pour la Beaume : socle, Trias, Jurassique) ou bien les volumes de pertes ;
- Travail de modélisation (fonctionnement actuel) et simulations selon des scénarios climatiques et quantification des contributions futures des masses d'eau aquifères aux rivières.
- Interprétation des traçages complémentaires réalisés en 2023 à partir des fluocapteurs dans les sources situées dans les gorges de l'Ardèche et récupération du matériel placé en zone noyée.

A priori, il est actuellement difficile de statuer sur la contribution respective des formations aquifères au soutien du débit des rivières sans avoir procédé à un traitement plus complet des données hydrologiques compte-tenu des caractéristiques géochimiques de ces contributions et des résultats des traçages.

Ce rapport constitue un point d'étape dans l'avancement du projet. Le travail de traitement et d'interprétation des données sera poursuivi sur l'année 2025 pour aboutir à une caractérisation la plus précise possible du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique actuel sur les deux secteurs retenus ; cela avant de poursuivre les investigations sur le comportement futur de l'hydrosystème sous l'influence des modifications climatiques.

Toutefois, pour l'Ardèche lors de sa traversée des « gorges urgoniennes », il semble a priori que ce soit la rivière qui alimenterait le karst dans ce secteur. Il s'agit d'une hypothèse à vérifier car elle n'est en phase avec les travaux antérieurs de Belleville et Gombert qui datent respectivement de 1985 et 1988. Toutefois, ces travaux restent trop fragmentaires et parfois imprécis, notamment sur la localisation de certaines sources, pour fournir un appui solide. Pour aller plus loin, il faudra attendre que les plongeurs récupèrent les instruments positionnés dans les sources du Platane et de l'Écluse. L'analyse des résultats des sondes CTD et des fluorimètres permettra vraisemblablement de mieux cerner le fonctionnement de ce système et des interactions sources/Ardèche. L'analyse des résultats des traçages devrait permettre de mieux cerner les aires d'alimentation des sources du Platane et de l'Écluse.

L'élaboration d'un rapport final est prévue fin 2025 avec un dernier Comité de restitution début 2026.

10. Bibliographie

10.1. Références bibliographiques générales

Le rapport de phase 1 contient toutes les références bibliographiques relatives à la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie de la zone d'étude identifiées avant le début du projet.

Impacts du Changement Climatique sur les ressources en eaux souterraines et les échanges nappes rivières du Bassin Versant de l'Ardèche. 2022 Paran F., Peuble S., Jolivet J., Chapuis H., Lavastre V., Graillot D., Rapport intermédiaire de phase 1, p., 5 annexes.

Jolivet J., Paran F., Peuble S., Van der Broek., Graillot D., 2023. Évolution karstique du canyon de l'Ardèche par analogie avec celle de l'endokarst de sa plateforme urgonienne périphérique durant le Néogène (Ardèche - France). Comparaison avec les vallées du Rhône et de la Cèze. 12p. HAL n°.

10.2. Références bibliographiques de la partie hydrologie

Cailhol Didier (2014) Documentation du fonctionnement des différents aquifères karstique des Gorges de l'Ardèche - suivi hydrologique 2012-2013 - Comité Départemental de Spéléologie de l'Ardèche.

Cailhol Didier (2016) Le fonctionnement hydrologique du réseau de saint Marcel - Exploration, documentation et suivi des variations de hauteur et température de l'eau - Comité Départemental de Spéléologie de l'Ardèche (19/05/2016).

Le Coz J. et Renard B. (2023) Fiche « Outil Opérationnel » ZABR. BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes. INRAE.

Mazzilli, N., Guinot, V., Jourde, H., Lecoq, N., Labat, D., Arfib, B., Baudement, C., Danquigny, C., Dal Soglio, L., & Bertin, D. (2019). KarstMod : A modelling platform for rainfall – discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environmental Modelling & Software*, 122, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>

10.3. Références bibliographiques de la partie géochimie

BRGM – Infoterre. Accessible par le lien
[<https://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>]. Consulté le 15/10/2023.

Craig H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 133, 3465, 1702-10703. EauFrance, 2023. Hydroportail. Accessible au lien
[<https://hydro.eaufrance.fr/sitehydro/V5064010/fiche>]. Consulté le 15/10/2023.

Epstein S., Mayeda T., 1953. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Géochimica Cosmochimica Acta*, 4,5, 213-224.

Gaillardet J., Dupré B, Louvat B, C.J. Allègre, 1999. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduces from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* 159, 3-30.

Ladouche B., Aquilina L., Dörfliger N. 2009. Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996-2002) : potential use as input signal for karst functioning investigation. *Journal of Hydrology*, 367, 15-164

Miyamoto S-I, Sakka T., Iwasaki M., 1988. Hydrogen isotope exchange between D^2 and H_2O catalyzed by platinum plate. *Can. J. Chem.* Vol 67 p857-861.

Paran 2023. Carte du réseau hydrographique et de la répartition des échantillons sur le bassin versant de l'Ardèche. Non publié.

Listes des figures et tableaux

Figure 1. Grandes masses d'eau souterraine du bassin versant de l'Ardèche.....	7
Figure 2 : Localisation des stations du SPC (Échelle Vigie Crue), entourées en rouge les stations a priori les plus pertinentes pour la Baume, en bleu pour l'Ardèche, en violet pour le Chassezac.....	9
Figure 3 : Chroniques du site hydrométrique V503 5020 : La Baume à Rosières	11
Figure 4 : Chronique de données du site hydrométrique V503 5022 : La Baume à Saint-Alban-Auriolles (Peyroche).....	11
Figure 5 : Chronique de données du Site hydrométrique V504 5030 : Le Chassezac à Gravières.....	12
Figure 6 : Chroniques de données du site hydrométrique V504 8813 : Le Chassezac à Berrias-et-Casteljau (Chalet)	12
Figure 7 : Délimitation des sous-bassins de la zone d'étude.....	14
Figure 8 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac amont	18
Figure 9 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac intermédiaire.....	20
Figure 10. Principaux prélèvements d'eau, pompage (vert et bleu) et zone de perte (jaune) sur le Chassezac (Contrat de rivière Chassezac, septembre 2015)	21
Figure 11 : Chronique de mesures de la sonde Chassezac aval	23
Figure 12 : Chronique de mesures de la sonde Beaume amont	25
Figure 13 : Chronique de mesures de la sonde Beaume intermédiaire	27
Figure 14 : Chronique de mesures de la sonde Beaume aval	29
Figure 15. Lidar HD IGN de la station de jaugeage de Beaume Amont (Chassournet) – La sonde est positionnée à l'amont du pont (voir flèche noir). L'écoulement de la Beaume se fait de la gauche de la figure vers la droite.....	32
Figure 16. Profil en travers (trait rouge) utilisé dans Baratin pour la station de jaugeage de Beaume Amont. Ce profil est construit à partir du MNT issu du Lidar HD IGN. La sonde est localisée avec un drapeau rouge.....	32
Figure 17. Sections de contrôles de type « Chenal » utilisées dans Baratin	33
Figure 18. Section de contrôle de la Beaume Amont vue depuis l'amont du pont de Chassournet	33
Figure 19 ; Courbe de tarage a priori pour la Beaume amont d'après l'outil Baratin.....	34
Figure 20. Jaugeages utilisés dans Baratin. Les mesures de débit sont réalisées sur la section de jaugeage (pointillés rouges) de la Figure 16	34
Figure 21. Courbe de tarage a posteriori (maximum probable) sur la Beaume amont	35
Figure 22. Comparaison des courbes de tarage a priori et a posteriori pour la Beaume amont.....	35
Figure 23. Hydrogramme pour la Beaume amont calculé avec l'outil Baratin pour la période avril 2022 à septembre 2024.....	36
Figure 24. Schéma de principe de fonctionnement de KarstMod (Mazilli et al, 2019).....	37
Figure 25. Localisation et numéro des maille Safran sur le bassin versant de la Beaume (Croix noires : centre de la maille ; trait bleu : La Baume ; en rouge, rose et bleu : limite des sous-bassins versants)	38
Figure 26. Comparaison des scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets)	39

Figure 27 : Chronique de mesures de la sonde du camping de l'Île (amont des gorges de l'Ardèche) entre fin juillet 2022 et début septembre 2023.....	41
Figure 28 : Chronique de mesures de la sonde de Sauze (aval des gorges de l'Ardèche) entre fin septembre 2022 et début juin 2023	42
Figure 29 : Chronique des mesures des débits (SPC) au pas d'une heure et cumul des pluies de l'année 2023 au niveau des 2 pluviographes des gorges de l'Ardèche.....	42
Figure 30 : Chronique mensuelle pour l'année 2023 des débits cumulés de Vallon-Pont-d'Arc et de Sauze (d'après les données du SPC).....	43
Figure 31 : Chroniques des variations de profondeur de la source du Platane et de conductivités et températures de la résurgence et de la rivière.	44
Figure 32 : Dispositif et matériel mis en place pour l'injection de colorant à l'aven de la Cabane (07)	45
Figure 33 : Localisation des 2 lieux d'injection par rapport aux sources étudiées (d'après la carte géologique au 1/50 000°)	46
Figure 34 : Carte reportant le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ardèche, les masses d'eau du Trias (rose), du Jurassique (bleu) et de l'Urgonien (Crétacé ; vert) et les sites d'échantillonnage (Source Paran 2023).....	49
Figure 35 : Débit mensuels moyens interannuels (bleu) de l'Ardèche à Saint Martin d'Ardèche (station V5064010 ; EauFrance, 2023). Débits mensuels moyens pour 2021 (vert), 2022 (violet) et 2023 (rose). La ligne noire indique le débit moyen interannuel, et la ligne rouge en pointillés indique le débit mensuel minimal quinquennal.	51
Figure 36 : Évolution de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux de l'Ardèche de l'amont à l'aval du cours d'eau pour les campagnes de juillet (carrés vert clair) et septembre 2022 (carrés vert foncé). L'étendue des domaines géologiques et les points de confluence des affluents étudiés sont reportés à titre indicatif. Les numéros des échantillons sont reportés sous les points et peuvent être retrouvés dans le Tableau 3 et le Tableau 4)	54
Figure 37 : Évolution de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux du Chassezac de l'amont à l'aval du cours d'eau pour les campagnes de juillet (ronds bleus) et septembre 2022 (ronds jaunes). L'étendue des domaines géologiques est reportée à titre indicatif. Les numéros des échantillons sont reportés sous les points et peuvent être retrouvés dans le Tableau 3 et le Tableau 4)	55
Figure 38 : Distribution sur le diagramme de Piper des eaux collectées sur le bassin versant de l'Ardèche en juin et juillet 2021 et en juillet et septembre 2022.....	57
Figure 39 : Diagramme Mg/Na en fonction de Ca/Na. La plage "Carbonates" représente le domaine des rapports observés pour les eaux de rivières drainant des formations carbonatées, la plage « silicates » représente le domaine des rapports observés pour les eaux des rivières drainant des formations de type granitique (Gaillardet et al. ; 1999).....	58
Figure 40 : Évolution du rapport Mg/Na dans les eaux de l'Ardèche de l'amont à l'aval du cours d'eau. L'étendue des différents domaines géologiques traversés est reportée à titre indicatif. Les rapports Mg/Na pour les sources des domaines triasique, jurassique et crétacé ainsi que ceux des affluents sont reportés.	58
Figure 41 : Diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$, distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de juin/juillet 2021. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées.	59
Figure 42 : Diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de juillet 2022. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées.....	60

Figure 43 : Évolution du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux des eaux superficielles et souterraines du bassin versant de l'Ardèche en fonction de l'altitude	60
Figure 44 : Diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ distribution des données acquises sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche pour les campagnes de septembre 2022. Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL ; Craig 1961) et des eaux météoriques du département du Gard (GardMWL ; Ladouche et al., 2009) sont reportées	61
Tableau 1 : Surfaces topographiques (en km^2) et linéaire de cours d'eau (en Km) traversant les différentes formations géologiques de la zone d'étude pour chaque bassin versant.....	14
Tableau 2. Caractéristiques de sections de contrôle de type chenal pour Baratin.....	31
Tableau 3 : Calendrier des tâches réalisées par le LGL-TPE@UJM pour la caractérisation géochimique des eaux du bassin de l'Ardèche.....	48
Tableau 4 : Identifiants, localisation (distance amont-aval, coordonnées géographiques, terrains géologiques) et nature des sites de prélèvements (cours d'eau principal Ardèche, affluents, sources). Les distances le long des linéaires Ardèche, Baume et Chassezac ont été déterminées à l'aide de QGIS (Paran, 2023). Les lithologies ont été définies à partir de la carte géologique au 1/50000 vecteur harmonisé (BRGM, 2023).....	50
Tableau 5 : Liste des échantillonnages réalisés courant juin et juillet 2021 et juillet et septembre 2022.	52
Tableau 6 : Données de terrain (température $T^\circ\text{C}$, pH, conductivité EC, HCO_3^-), concentrations en espèces dissoutes majeures et compositions isotopiques de l'oxygène- $\delta^{18}\text{O}$ et de l'hydrogène- δD obtenues sur les eaux du bassin versant de l'Ardèche lors des campagnes de juin et juillet 2021 et de juillet et septembre 2022.	56

Annexes

A1 : Fiche « Outil Opérationnel » ZABR. BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes. INRAE

A2 : Page de présentation du tutoriel de KarstMod

A1 : Fiche « Outil Opérationnel » ZABR. BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes. INRAE

OUTIL OPERATIONNEL - AOÛT 2023



BaRatin : une méthode pour estimer les courbes de tarage hauteur-débit et leurs incertitudes

Mots-clés : modèle, courbe de tarage, débit, incertitude, hydrométrie

Type d'outil	Milieux étudiés	Disciplines mobilisées	Destinataires
Logiciel gratuit open-source	Milieux aquatiques	Hydrologie, hydraulique, hydrométrie	Gestionnaires, agents de services d'hydrométrie, bureaux d'études, étudiants, chercheurs

OBJECTIFS

Construire et caler des courbes de tarage hauteur-débit univoques avec une base hydraulique et en estimant les incertitudes associées.

Disposer d'un outil permettant d'améliorer l'interprétation des contrôles hydrauliques ainsi que la prise en compte des incertitudes individuelles des jaugeages. Calculer des séries temporelles de débit (hydrogrammes) avec quantification des incertitudes (également possible avec le logiciel, à partir d'une série de hauteurs d'eau)

L'ESSENTIEL

BaRatin est une méthode de quantification des incertitudes des courbes de tarage hauteur-débit simples et univoques. *BaRatinAGE*, l'interface associée, permet de construire la courbe la plus vraisemblable ainsi que son enveloppe d'incertitude.

CONTENU DE L'OUTIL

BaRatin (*Bayesian Rating curve*) est une méthode d'estimation des courbes de tarage univoques (hypothèse de stabilité de la relation hauteur-débit sur la période considérée) et des incertitudes associées à l'aide d'un formalisme bayésien. Développée depuis 2010, elle est accessible notamment par le biais de son interface graphique *BaRatinAGE*, sous Windows et Linux, et est disponible librement sur un [site dédié](#).

Elle permet d'estimer la courbe de tarage hauteur-débit la plus probable et son enveloppe d'incertitude. Pour cela, elle établit tout d'abord l'équation de la courbe de tarage à partir des contrôles hydrauliques (caractéristiques physiques du cours d'eau déterminant la relation hauteur-débit à la station de mesure). Les distributions « a priori » des paramètres de cette équation sont spécifiées à partir des connaissances plus ou moins incertaines de l'utilisateur. L'incertitude individuelle des observations (jaugages) est prise en compte. Finalement, le simulateur bayésien *BaRatin* simule un faisceau de courbes de tarage vraisemblables dont on peut extraire la courbe de tarage la plus probable et l'incertitude associée, au niveau de confiance requis (en général 95 %), sur la base d'une approche Monte-Carlo par chaînes de Markov (MCMC). En outre, une série de débit (hydrogramme) avec incertitudes peut être calculée à partir d'une série de hauteurs d'eau (limnigramme) et d'une courbe de tarage.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
+ Logiciel gratuit et open source + Interface intuitive, nombreuses sorties graphiques et exports + Outil évolutif et collaboratif à l'international : hydromètres, bureaux d'études, gestionnaires et chercheurs + Base hydraulique et prise en compte des incertitudes (cadre probabiliste)	- Ne permet pas la construction de courbes de tarage complexes et variables dans le temps - Besoin d'une expertise minimale pour renseigner les paramètres et interpréter les résultats - Analyse individuelle de chaque station hydrométrique (pas d'analyse en masse)

MISE EN ŒUVRE

Temps	Moyens humains	Compétences	Matériel	Coût
- 2h de prise en main - puis quelques heures par station	- 1 personne	- Guide d'utilisation - Documentation, support de formation, tutoriels, webinaires	- Ordinateur et logiciel	- Logiciel disponible gratuitement

CONTEXTE

Le débit (en m³/s) des rivières est le volume d'eau transitant à travers une section de rivière par unité de temps. C'est l'une des variables les plus importantes en hydrologie car ses valeurs et évolutions temporelles conduisent à la prise de décisions pour la gestion des ressources en eau et des milieux aquatiques.

Les courbes de tarage hauteur-débit sont des outils opérationnels fournissant le débit sur la base soit de la hauteur d'eau seule (courbes simples), soit de la hauteur d'eau et d'autres paramètres également mesurés en continu (courbes complexes). Cette relation est déterminée par des contrôles hydrauliques, c'est-à-dire des caractéristiques physiques (géométrie, rugosité, pente, pertes de charge...) du tronçon de cours d'eau autour de la station hydrométrique. Ces contrôles peuvent se succéder et/ou s'ajouter selon le débit, déterminant la forme de cette relation. Estimer l'incertitude des courbes de tarage est nécessaire pour fournir l'incertitude des données hydrologiques.

PRINCIPES

La méthode *BaRatin* associée à son interface *BaRatinAGE* permet d'estimer des courbes de tarage hauteur-débit les plus probables et leurs enveloppes d'incertitude.

La démarche se décompose en quatre étapes.

Premièrement, l'équation de la courbe de tarage est dérivée de la combinaison de fonctions puissance représentant chacun des contrôles supposés de la station hydrométrique. Les distributions « a priori », c'est-à-dire avant d'avoir utilisé les jaugeages comme données de calage, des paramètres de cette équation sont établis à partir d'informations sur les contrôles hydrauliques que l'utilisateur renseigne.

$$Q(h)=a(h-b)^c \quad (h>k)$$

*Equation d'une courbe de tarage donnant le débit Q en fonction de la hauteur d'eau h ;
a, b, c sont les coefficients et k la hauteur d'activation du contrôle hydraulique*

Deuxièmement, les données de jaugeages sont importées avec leurs incertitudes individuelles précisées. Troisièmement, le logiciel applique le théorème de Bayes pour calculer la distribution « a posteriori » des paramètres (a, k, c) de la courbe de tarage. Cette distribution est ensuite échantillonnée par simulations Monte-Carlo à chaînes de Markov (MCMC), qui conduit à générer un ensemble de courbes de tarage plausibles au vu des jaugeages et des connaissances hydrauliques « a priori », ce qui constitue l'enveloppe d'incertitude paramétrique (Figure 1). Une incertitude « restante » est estimée et ajoutée pour obtenir l'incertitude « totale » : cette incertitude restante est celle qui doit être ajoutée à l'incertitude des jaugeages et à l'incertitude paramétrique de la courbe de tarage pour expliquer la dispersion des jaugeages autour de la courbe de tarage.

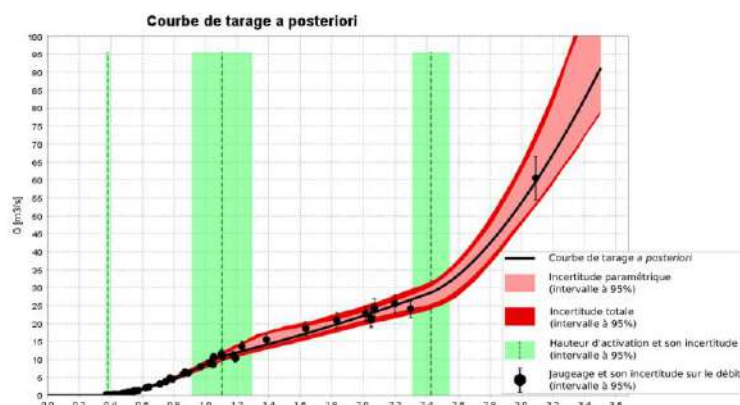


Figure 1 - Exemple de visualisation d'une courbe de tarage avec évaluation de son incertitude par la méthode BaRatin

Finalement, les éventuels conflits entre les résultats « a posteriori » et « a priori » doivent être vérifiés (Figure 2). Ils peuvent conduire à la remise en question du modèle de courbe de tarage et/ou de l'estimation des incertitudes des jaugeages, et nécessiter de revoir les hypothèses sur les contrôles hydrauliques.

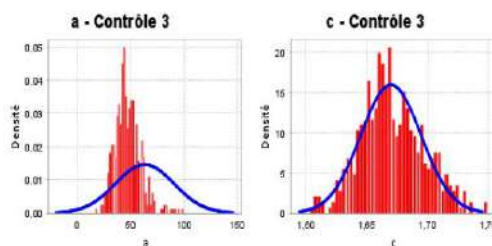


Figure 2 - Exemple d'une comparaison satisfaisante de la distribution « a priori » (bleu) et « a posteriori » (rouge) des paramètres 'a' et 'c' d'une équation de courbe de tarage : l'estimation du paramètre 'a' a été améliorée grâce à l'information contenue dans les jaugeages, tandis que l'estimation a priori de 'c' (déjà très précise) n'a pas été améliorée.

PERSPECTIVES ET PRECONISATIONS

D'autres modèles que BaRatin pour les courbes de tarage complexes et variables dans le temps ont été développés et implémentés dans le logiciel plus générique BaM! (Bayesian Models) : stations à double échelle soumises à influence aval variable, traitement de l'hystérésis due aux écoulements transitoires, traitement des détarages successifs dus à l'évolution du lit. A terme, le logiciel BaRatinAGE devrait proposer certains de ces modèles.

PERSONNES RESSOURCES

Jérôme LE COZ
INRAE, UR RiverLy, Lyon
jerome.lecoz@inrae.fr
Tel : 04 72 20 87 86

Benjamin RENARD
INRAE, UR RECOVER, Aix-en-Provence
baratin.dev@inrae.fr

DOCUMENT(S) SOURCE

Liens internet : [présentation](#), [téléchargement](#) et [webinaires en replay](#).

AUTEUR(S)

Jérôme LE COZ (INRAE), Benjamin RENARD (INRAE)

STRUCTURE(S) PORTEUSE(S) DU PROJET

Institut National de recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)

SITES ET OBSERVATOIRES DE LA ZABR MOBILISÉS

La méthode est appliquée au niveau national (Ministère en charge de l'Environnement, Compagnie nationale du Rhône) et international (réseau NEON USA, Acumar Argentine). Elle est notamment utilisée par les sites et observatoires ZABR suivants : Arc-Isère, Ardières-Morcille, OSR, OTHU (BV Yzeron).

THEMATIQUES ZABR ABORDEES

Flux Formes Habitats et Biocénoses (FFHB)

PROJET

La méthode bayésienne BaRatin a été développée par INRAE depuis 2010 et soutenue par le SCHAPI, la CNR, l'OMM, l'ANR (projet FloodScale sur la modélisation multi-échelle des crues cévenoles).

BIBLIOGRAPHIE

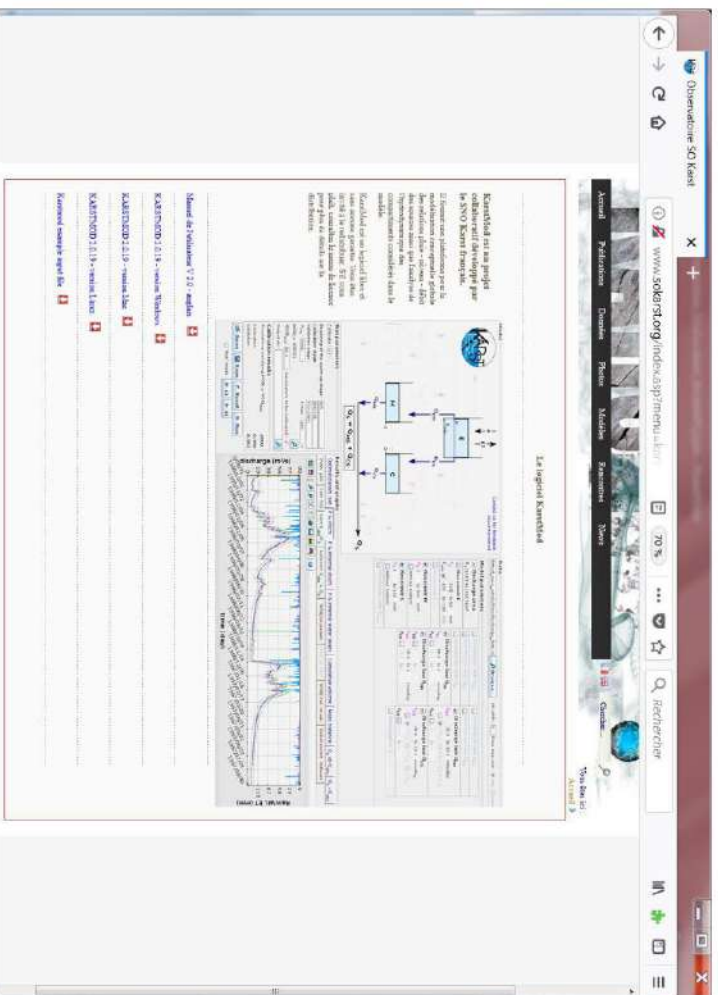
- Le Coz J., Renard B., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Branger F., et al, (2014). *Guide pratique de la méthode BaRatin pour l'analyse des courbes de tarage et de leurs incertitudes*. IRSTEA, pp.94, hal-02601038
- Renard B., Le Coz J., Blanquart B., Bonnifait L., (2015). *Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en hydrologie. Applications à la prédétermination et à l'hydrométrie*. Irstea, pp.116
- Le Coz J., Renard B., Bonnifait L., Branger F., Le Boursicaud R., (2014). *Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach*. Journal of Hydrology, 509, p.573-587
- Horner I., Renard B., Le Coz J., Branger F., McMillan H.K., Pierrefeu G., (2018). *Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty*. Water Resources Research, 54, p.1952-1976.
- Le Coz J., Chaléon C., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Renard B., Branger F., Diribarne, J., Valente, M. 2013. *Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin*. La Houille Blanche, 6, 31-41, doi:10.1051/lhb/2013048



Rainfall-Discharge modeling

KarstMod: a free tool proposed by the Karst National Observation Service (SNO Karst)

<http://www.sokarst.org/index.asp?menu=karstmod>



25/06/2018

Tutorial, proposed by [Bruno Artib](#) & [Naomi Mazzilli](#)

See also the [KarstMod](#) user guide (Mazzilli & Bertin)

