

Université de Montpellier
Master Sciences de l'eau
Parcours Eau Ressource
Hydrologie Hydrogéologie Risques Environnement
Année 2024 2025

Mémoire de stage de 2^{ème} année

Etude d'un phénomène de diffluence : cas du Causse du Larzac

Réalisation d'une opération de traçage

Rosalie Boune

Sous la Direction de :

Laurent DANNEVILLE – Directeur du Pôle Ressources Naturelles et Biodiversité au Parc
Naturel Régional des Grands Causses

Christophe APOLIT – Hydrogéologue au Parc Naturel Régional des Grands Causses

Hervé JOURDE – Enseignant chercheur HydroSciences Montpellier



REMERCIEMENTS

Avant tout, je souhaiterais remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce stage.

Je tiens à remercier Laurent Danneville de m'avoir ouvert les portes du pôle Ressources Naturelles et Biodiversité du Parc et de m'avoir fait confiance pour ce travail.

Un grand merci à Christophe Apolit, un maître de stage investi, toujours disponible mais aussi amateur de bonne musique et de très bons podcasts. Merci de m'avoir accompagné et transmis bon nombre de connaissances pendant cette riche expérience.

A Jacques Ricard, hydrogéologue, j'adresse mes remerciements pour le temps qu'il m'a accordé, ses conseils expérimentés ainsi que pour le prêt de documents.

Je tiens également à remercier Hervé Jourde, mon tuteur pédagogique d'avoir pris le temps d'échanger sur l'hydrogéologie du causse du Larzac ainsi que Véronique Léonardi, enseignante chercheuse à HydroSciences Montpellier (HSM) sans qui je n'aurais pas eu la chance de réaliser les analyses en laboratoire. Merci à Mylène Marie de m'avoir aidé à prendre en main le spectrofluorimètre et à Nesrine Djebbar pour le quatre mains en blouse blanche.

Je remercie Jean-Louis Rocher, spéléologue, fin connaisseur des réseaux caussenards, de m'avoir permis de faire ma première sortie spéléologique, je ne pouvais pas être mieux accompagnée.

Je remercie également Vincent Bailly-Comte, hydrogéologue au BRGM, pour les informations qu'il a pu tirer des données du fluorimètre et qui m'ont aidé dans l'exploitation des résultats.

Merci à Jean-Louis Polycarpe pour l'acheminement et l'installation des stations hydrométriques.

Aux propriétaires du moulin de Laumet (ainsi que leurs fidèles compagnons) je leur adresse un grand merci pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude, nous permettant de venir chaque semaine faire des mesures sur leur source.

Je remercie aussi mes collègues stagiaires et toute l'équipe du Parc pour leur bienveillance et tous ces bons moments partagés pendant et après les heures de bureau. Je remercie plus particulièrement le deuxième étage pour les pauses café de 10h accompagnées de gourmandises et de discussions en tout genre.

Clara, Baptiste, mes colocataires de bureau merci pour les coups de pouces, les conseils et les moments un peu moins sérieux.

Enfin je remercie mes amis de promotion et mes parents pour le soutien lors de ces deux années de Master.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	1
2	LE PARC NATUREL REGIONAL DES GRANDS CAUSSES.....	2
2.1	Les PNR.....	2
2.2	Le PNRGC.....	2
3	GENERALITES ET CONTEXTE DE L'ETUDE.....	3
3.1	Histoire géologique.....	3
3.2	Hydrogéologie et karstification caussenarde.....	4
3.3	Concepts de karstogénèse.....	5
3.4	Le Causse du Larzac.....	5
3.4.1	Hydrogéologie locale.....	5
3.4.2	Occupation du sol.....	7
3.4.3	Traçages artificiels.....	9
3.4.4	Hydrochimie.....	10
4	OPERATIONS DE TRACAGE.....	13
4.1	Protocole de traçage et mesures complémentaires.....	13
4.1.1	Choix du point d'injection.....	13
4.1.2	Choix des points de suivi.....	14
4.1.3	Choix des traceurs utilisés et méthode d'injection.....	16
4.1.4	Méthode de suivi de la restitution.....	17
4.1.5	Analyses fluorimétriques et chimiques des échantillons.....	18
4.1.6	Pluviométrie.....	18
4.1.7	Débits des sources.....	19
4.2	Résultats.....	21
4.2.1	Traçage bassin A36.....	21
4.2.2	Traçage de l'aven de la Tonne.....	27
4.2.3	Traçage bassin A35.....	31

4.2.4	Chimie	31
5	Exploitation des données de traçage	34
5.1	Bassin d'alimentation	34
5.2	Simulation d'une pollution (cas de la source de l'Espérelle).....	38
6	INTERPRETATIONS ET DISCUSSION	39
7	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	43
8	REFERENCES.....	45
9	ANNEXES	49
10	RESUME.....	61

LISTES FIGURES

Figure 1 Carte géologique simplifiée du Causse du Larzac nord (RB)	6
Figure 2 Coupe géologique traversant le Causse Noir où les structures du Causse du Larzac nord s'y prolongent (adapté de (GEOTER, 2019))	7
Figure 3 Principaux aménagements du Causse de Larzac nord (RB)	8
Figure 4 Résultats des traçages positifs sur le secteur d'intérêt (RB).....	10
Figure 5 Diagramme binaire calcium – magnésium (RB)	12
Figure 6 Diagramme binaire nitrate – chlorure (production personnelle adapté de (Plagnes, 1997))	13
Figure 7 Métaux intégrés aux analyses chimiques des sources (RB).....	13
Figure 8 Points d'injection et de suivi du multi-traçage (RB)	14
Figure 9 (a) Profil de la Dourbie tiré de (Ricard & Bakalowicz, 1996) et (b) zoom sur la partie d'intérêt (RB).....	16
Figure 10 Pluviométrie enregistrée sur le Larzac lors de l'opération de traçage (RB).....	19
Figure 11 Chronique de débits de la source de l'Espérelle (RB).....	20
Figure 12 Débits aux exutoires (RB).....	21
Figure 13 Restitution en fluorescéine à la source de l'Espérelle (RB)	22
Figure 14 Restitution en fluorescéine à la source du moulin de Laumet (RB)	23
Figure 15 Restitution en fluorescéine à Riou Ferrand amont et aval (RB)	24
Figure 16 Comparaison des DTS issues du traçage de 2025 – fluorescéine (RB).....	25
Figure 17 Comparaison des DTS en hautes et basses eaux pour la source d'Espérelle (RB) ..	26
Figure 18 Restitution en sulforhodamine B à la source du moulin de Laumet (RB).....	27
Figure 19 Restitution en sulforhodamine B à Riou Ferrand amont et aval (RB).....	28
Figure 20 Restitution en sulforhodamine B à la source de l'Espérelle (RB).....	29
Figure 21 Comparaison des DTS issues du traçage de 2025 – sulforhodamine B.....	31
Figure 22 Diagramme de Schoëller-Berkaloff	32
Figure 23 Teneurs en métaux (RB)	34
Figure 24 Nouveaux bassins d'alimentation (RB).....	36
Figure 25 Formations affleurantes au sein de la zone d'alimentation commune (RB).....	39
Figure 26 Modèle conceptuel (RB).....	42
Figure 27 Spectrofluorimètre (a) et cuve en quartz (b).....	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Log simplifié de la géologie des Grands Causses (adapté de (Ricard & Bakalowicz, 1996).....	4
Tableau 2 Données hydrochimiques disponibles	11
Tableau 3 Caractéristiques des points de suivi	15
Tableau 4 Planning du suivi de restitution	17
Tableau 5 Résultats des analyses hydrochimiques	33
Tableau 6 Débits moyens et aires d'alimentation des sources d'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand	35
Tableau 7 Paramètres de restitution permettant de simuler une pollution	38

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 PNRGC	49
Annexe 2 Plan et coupe du réseau exploré de la source de l'Espérelle (Ricard, 1996)	50
Annexe 3 Plan du réseau exploré de la source du moulin de Laumet.....	51
Annexe 4 Traçages artificiels réalisés sur le causse du Larzac au nord de La Cavalerie.....	52
Annexe 5 Plan et coupe de l'aven de la Tonne	53
Annexe 6 Analyses par spectrofluorimétrie	55
Annexe 7 Détails sur l'installation des stations hydrométriques temporaires	58
Annexe 8 Récapitulatif des résultats du multi-traçage.....	58
Annexe 9 Courbes de restitution en fluorescéine de quatre exutoires	59
Annexe 10 Courbes de restitution en sulforhodamine B de quatre exutoires	59
Annexe 11 Variations des paramètres physico-chimiques sur les sources de Laumet et de Riou Ferrand	60

1 INTRODUCTION

La région des Grands Causses, « berceau de la spéléologie française » (Corbel, 1954), est caractérisée par de vastes plateaux karstifiés. Sa morphologie typique, à l'origine de la karstologie en France, est le résultat d'une histoire géologique complexe qui a façonnée, entre autres, les formations du Jurassique leur conférant un rôle de réservoir majeur (Bruxelles & Cailhol, 2022). Les aquifères développés dans les épaisses formations carbonatées des causses constituent la principale ressource en eau potable du territoire (PNRGC, 2015). Un aquifère karstique se compose d'un épikarst en surface, d'une zone d'infiltration et d'une zone noyée, à l'intérieur de celui-ci un réseau de vides de tailles variables permet l'écoulement de l'eau. La zone noyée est drainée par une exsurgence souvent unique à l'issue d'un réseau de conduits saturés (SNO KARST, s. d.). Lorsque le système karstique est fortement développé, le débit à la source peut atteindre des valeurs importantes et donc la possibilité de fournir un volume d'eau suffisant pour alimenter une commune en eau potable (Maréchal & Rouillard, 2020). Cependant ces aquifères sont caractérisés par une forte vulnérabilité aux pollutions due à des vitesses d'écoulements rapides.

En septembre 2022, dans le cadre d'une collaboration entre le Parc Naturel Régional des Grands Causses et la Direction Interdépartementale des Routes du Massif Central (DIRMC), une opération de traçage est menée sur le causse du Larzac septentrional. Le traceur fluorescent injecté depuis le plateau est retrouvé sur quatre exutoires dans la vallée de la Dourbie. Parmi ces exutoires, la source de l'Espérelle est concernée. C'est l'une des ressources majeures du territoire puisqu'elle alimente l'agglomération de Millau en eau potable (Ricard & Bakalowicz, 1996). Depuis les premières études hydrogéologiques sur le causse du Larzac septentrional dans les années 90, une vingtaine de traçages artificiels ont été réalisés mais aucun n'avait révélé un lien hydrogéologique entre un lieu d'injection et quatre exurgences karstiques.

C'est pourquoi, le PNRGC, en tant qu'acteur de la gestion de la ressource en eau, souhaite réitérer cette opération de traçage afin d'approfondir ses connaissances sur ce phénomène dit de « diffluence » qui remet en cause le bassin d'alimentation de la source de l'Espérelle.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un stage de Master 2 en hydrogéologie proposé par l'Université de Montpellier. Elle se décompose en trois parties, la présentation du contexte de l'étude, les résultats de l'opération traçage et les hypothèses émises sur le fonctionnement hydrogéologique de ces aquifères.

2 LE PARC NATUREL REGIONAL DES GRANDS CAUSSES

2.1 Les PNR

Le 1^{er} mars 1967, est signé le décret instituant le modèle des Parcs Naturels Régionaux (PNR). D'après le texte de loi chaque "territoire [...] lorsqu'il présente un intérêt particulier par la qualité de son patrimoine naturel et culturel, pour la détente, le repos des hommes et le tourisme, qu'il importe de protéger et d'organiser" est éligible au titre de PNR (Décret n°67-158, 1962). De cette initiative naît un réseau de parcs représentant aujourd'hui 16 % du territoire français avec 59 parcs (Fédération des parcs naturels régionaux de France, 2024). Derrière le précepte « Une autre vie s'invente ici » découle une volonté de protection de l'environnement, d'aménagement du territoire, de développement économique et social et d'éducation et de formation du public (Cerema, 2025). La gestion des parcs est assurée par un syndicat mixte ouvert (Fédération des Parcs naturels régionaux de France, 2023). Les collectivités territoriales en sont les principaux financeurs bien que la politique des PNR soit majoritairement portée par les élus des communes (Fédération des parcs naturels régionaux de France, s. d.). Les projets de développement sont décrits dans une charte, ce document fixe les grands objectifs pour une dizaine d'années sans qu'ils puissent être modifiés.

2.2 Le PNRGC

A cheval sur les départements de l'Aveyron et de l'Hérault s'étend le Parc Naturel Régional des Grands Causses (PNRGC). Voisin des parcs de l'Aubrac et du Haut-Languedoc, le PNRGC s'inscrit au cœur du réseau des parcs régionaux (Annexe 1). Le PNRGC a été fondé en 1995 et recouvre aujourd'hui un territoire de 3 807 km², il est le troisième plus grand PNR. Il est composé de 119 communes regroupées en 10 communautés de communes, en tout un peu plus de 86 000 habitants occupent ce territoire rural. Au même titre que ses homologues, le PNRGC est un outil de coordination locale privilégiant la préservation des paysages, la défense de l'environnement et la valorisation du patrimoine culturel et agropastoral. Depuis 2024 une nouvelle charte est entrée en vigueur qui s'articule autour de six défis transversaux parmi lesquels « la résilience au changement climatique » qui vise entre autres à impulser une réflexion sur la ressource en eau en intégrant l'ensemble des acteurs du territoire (PNRGC, 2024a).

Le PNRGC possède un réseau composé d'une cinquantaine de stations dont 39 sont destinées au suivi quantitatif et 14 au suivi qualitatif. 22 stations sont intégrées au suivi national de la ressource en eau souterraine qui est mandaté, sur le territoire, par l'agence de l'eau Adour-

Garonne. Le réseau de surveillance permet également de dresser un bilan hydrologique régulier sur l'état de la ressource en eau à l'échelle du PNRGC (PNRGC, 2024b).

En parallèle, le Parc est prestataire de la DIRMC pour réaliser un suivi qualitatif des sources dont le bassin est concerné par le tracé de l'autoroute A75. Ce partenariat a également permis de réaliser plusieurs opérations de traçage à partir des bassins de rétention des eaux pluviales le long de l'A75. Ces études fournissent des informations essentielles pour protéger la ressource en eau.

3 GENERALITES ET CONTEXTE DE L'ETUDE

3.1 Histoire géologique

La géomorphologie particulière des Grands Causses (GC) est l'héritage d'une histoire géologique longue de 250 millions d'années. Le bassin des GC est créé au Lias lorsque la mer s'installe sur le socle. La transgression marine permet les dépôts argilo-calcaires d'épaisseur importante jusqu'à la régression définitive à la fin du Crétacé inférieur (Ricard & Bakalowicz, 1996). Il en résulte une série sédimentaire qui peut être résumée comme : Lias calcaire – Epaisse série marneuse liasique – Dogger dolomitique/calcaire et Malm calcaire le tout formant un ensemble tabulaire subhorizontal qui réagit solidairement avec le soubassement hercynien aux phases tectoniques. Au Crétacé, survient une évolution continentale longue à l'origine de la morphogénèse caussenarde (Bruxelles, 2001).

Plus tard, à l'Oligocène, le rifting donnant naissance au bassin Algéro-provençale occasionne un effondrement du Golfe du Lion et du Languedoc amorçant un soulèvement compensatif de la bordure sud est des GC. La dynamique régionale se poursuit au Miocène avec un soulèvement régional. En parallèle un réseau hydrographique se développe à la surface des GC et s'enfonce à mesure que la région se soulève. L'aspect actuel des GC est atteint au Plio-Quaternaire.

En somme, de cette histoire géologique, rythmée par plusieurs transgressions marines entrecoupées de périodes continentales, naît une structure sub-horizontale composée de formations calcaires et dolomitiques épaisses de plusieurs milliers de mètres (Bruxelles & Camus, 2010). Ces formations sont découpées en vastes plateaux surélevés par le réseau hydrographique le tout entouré par des massifs cristallins qui font partie du substratum de cette structure (Ricard & Bakalowicz, 1996).

3.2 Hydrogéologie et karstification caussenarde

De façon générale les GC sont caractérisés par 2 aquifères régionaux ; les calcaires et dolomies du Lias (aquifère inférieur) et les formations du Jurassique (aquifère supérieur). Les deux entités sont séparées par une couche imperméable et épaisse de marnes liasiques (Tableau 1) (Ricard & Bakalowicz, 1996).

Tableau 1 Log simplifié de la géologie des Grands Causses (adapté de (Ricard & Bakalowicz, 1996)

MALM	j6-7	Kimméridgien Oxfordien supérieur	Calcaires et dolomies	Aquifère supérieur
	j3-5	Oxfordien inférieur Callovien	Calcaires et dolomies	
DOGGER	j2b	Bathonien supérieur	Dolomies ruiniformes	
	j2a	Bathonien inférieur	Calcaires et dolomies	
	j1b	Bajocien supérieur	Calcaires et dolomies	
	j1a	Bajocien inférieur	Calcaires à chailles	
	L9b	Aalénien supérieur	Calcaires	
LIAS	L8- 7	Aalénien inférieur Toarcien Domérien	Calcaires et marnes	Imperméable

Dès l'émersion à la fin du Jurassique, les formations carbonatées se trouvent exposées à l'altération et à la karstification (Bruxelles & Camus, 2010). Le Miocène représente une phase de karstification majeure (Ambert & Ambert, 1995). Le niveau de base des bassins versants atlantique et méditerranéen contraint les vastes systèmes karstiques en développement. L'évolution karstique est guidée par les vallées qui se forment et s'encaissent en canyons le long des axes drainants majeurs.

Les circulations souterraines et les couvertures karstiques sont modifiées avec la surrection des GC (Bruxelles, 2001). Jusque-là les parties des formations carbonatées en proie aux phénomènes d'altération se voient alors évidées de leurs altérites résiduelles sous l'effet d'un gradient hydraulique croissant et le réseau souterrain se hiérarchise. Les dépôts superficiels ont également joué un rôle dans l'évolution de la karstogénèse caussenarde en impactant significativement les modalités d'infiltrations dans le domaine souterrain (Quinif & Bruxelles, 2011).

Les réseaux souterrains des causses témoignent d'un processus de karstification long et complexe qui représentent la principale ressource en eau sur le territoire des GC. La plupart des

résurgences karstiques sont exploitées pour l'eau potable ou autre activité anthropique telle que la pisciculture. De surcroît, elles soutiennent jusqu'à 90% du débits d'étiage des cours d'eau (PNRGC, 2015).

3.3 Concepts de karstogénèse

Le karst désigne une géomorphologie communément décrite comme le résultat de la dissolution d'une roche sous l'action de l'eau (BRGM, 2016). L'altération de la roche se fait de façon hétérogène suivant les discontinuités de l'encaissant qui au fur et à mesure s'élargissent. La circulation souterraine y est alors favorisée jusqu'à former un drain transmissif et des réservoirs annexes (Quinif & Bruxelles, 2011). En domaine carbonaté la karstification regroupe 3 types d'altération qui précèdent la formation du réseau karstique développé : la corrosion, la crypto-altération et la fantômisiation (BRGM, 2016). Cette dernière est une altération *in situ* qui agit lorsque le potentiel hydrodynamique est très faible (en zone noyée) le long des discontinuités. La roche altérée reste en place (dissolution isovolume) mais sa porosité est fortement accentuée. Dès l'imposition d'un potentiel élevé le fantôme de roche composé d'altérites résiduelles est érodé mécaniquement par l'eau mise en circulation. L'eau interstitielle qui exerçait une contre-pression n'est plus là pour maintenir le fantôme en place. Les circulations érodent régressivement les conduits en les évidant. Du fait de l'érosion régressive, un système karstique peut révéler une « dynamique conquérante », autrement dit, le réseau de cavités s'étend jusqu'à prendre le pas sur un bassin hydrogéologique voisin (Quinif & Bruxelles, 2011).

3.4 Le Causse du Larzac

3.4.1 Hydrogéologie locale

Le causse du Larzac est le plus vaste de l'ensemble des grands causses. Sa partie nord, le causse du Larzac septentrional, constitue un territoire de 400 km² compris entre 912 et 705 m d'altitude drainé par plusieurs affluents du Tarn, dont la Dourbie. D'un point de vue géologique et hydrogéologique, il contient les mêmes caractéristiques que celles décrites précédemment. Des accidents majeurs est-ouest et deux aquifères principaux séparés par une épaisse couche de marnes qui pend vers le nord d'environ 2% (Bakalowicz & Ricard, 1994).

Le Dogger est prédominant dans cette partie du Larzac même si à l'extrémité nord-est il est surmonté de formations du Malm (Figure 1).

En surface la couverture superficielle est majoritairement représentée par des argiles à chailles et des sables dolomitiques. Les argiles à chailles sont issues des calcaires à chailles du Bajocien inférieur. Accumulés dans les dépressions, ils colmatent les réseaux favorisant la

crypto-altération, cependant leur faible perméabilité étanchéifie en partie le karst. En même temps la couverture d'argile aplanié davantage la dépression et concentre les eaux météoriques créant *in fine* un point d'infiltration concentrée rapide au cœur d'une zone affaissée (Bruxelles, 2001) . A l'inverse, le grésou qui provient de la dissolution de la dolomie protège la roche de la dissolution et a tendance à stocker l'eau en subsurface, l'infiltration y est moins efficace (Ricard & Bakalowicz, 1996).

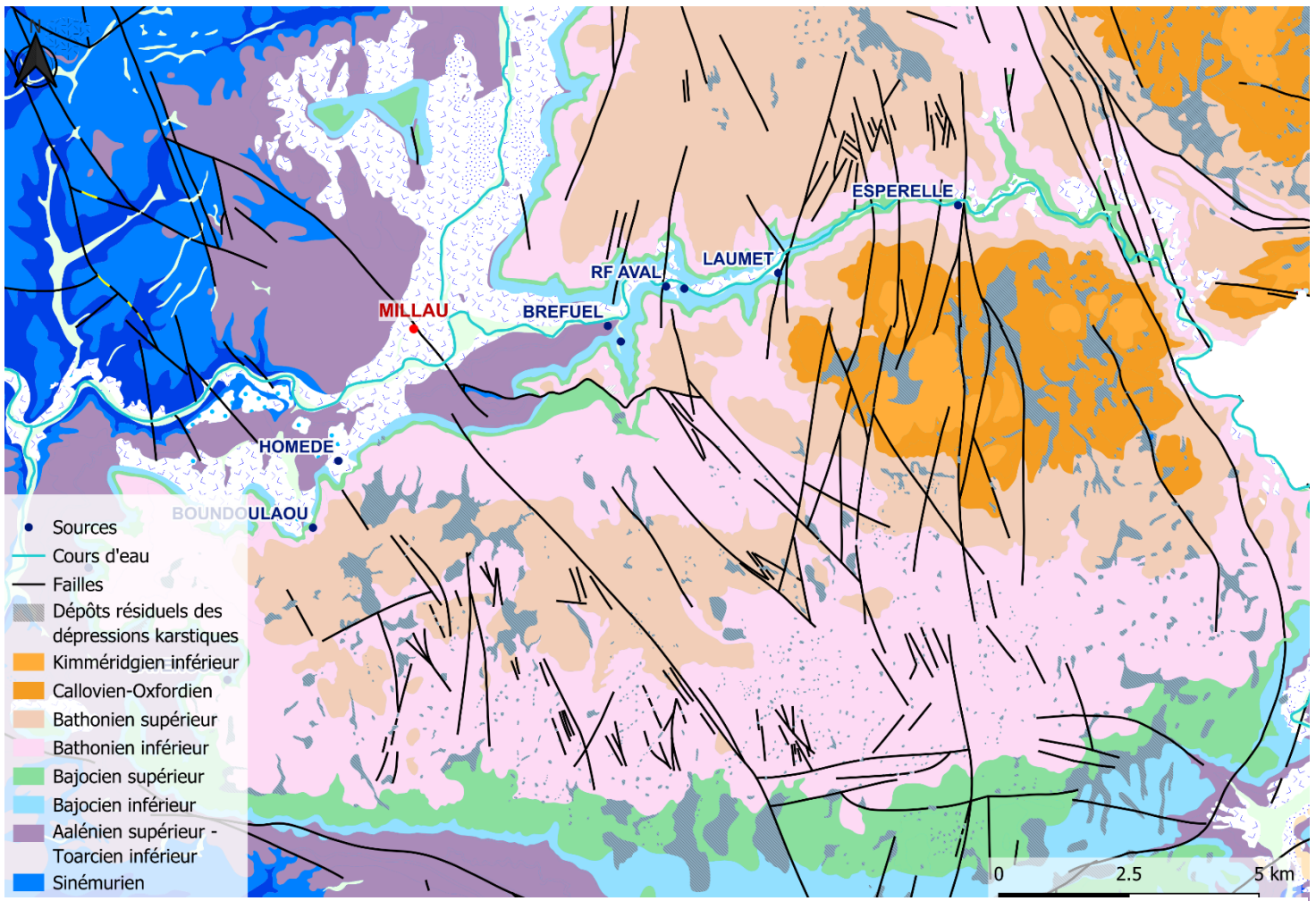


Figure 1 Carte géologique simplifiée du Causse du Larzac nord (RB)

La structure géologique du Larzac nord est également marquée par un vaste synclinal d'axe nord-sud et des familles de failles sud-ouest/nord-est. De la karstification de ce massif résulte 400 avens dont la plupart ne dépasse pas 50 m de profondeur pour une zone d'infiltration allant de 300 à 400 m (Ricard & Bakalowicz, 1996).

Les réseaux karstiques du Larzac septentrional alimentent une dizaine de sources majeures en partie utilisées pour l'alimentation en eau potable (Figure 1). Toutes sources confondues, le stockage des systèmes karstiques de cette partie du causse était estimé en 1996 à 65 hm³, le tout étant rechargé par les précipitations (karst unaire) qui d'une part sont drainées

rapidement par une karstification bien développée et d'autre part son amorties par des zones capacitatives (réponse bimodale).

Au nord de La Cavalerie, les plans de drainage dominants sont issus des failles orientées N-S/N030. Ainsi, pour les sources situées au nord du causse dans les vallées de la Dourbie et du Tarn, plans de drainage et direction principale d'écoulement sont confondus suggérant des systèmes karstiques développés linéairement (Ricard & Bakalowicz, 1996).

La source de l'Espérelle, dans la vallée de la Dourbie, est l'une des sources les plus stratégique du secteur puisqu'elle fournit la commune de Millau en eau potable, c'est-à-dire environ 22 000 habitants (INSEE, s. d.). Elle se situe au cœur du synclinal local et dans l'alignement d'une importante structure méridienne proche du faisceau de failles de Peyreleau (Figure 2). C'est une source vaclusienne qui possède un effet mémoire de 64 jours et dont le conduit karstique noyé est subvertical et pénétrable. Les spéléologues plongeurs ont enregistré une profondeur maximale de 70 m (Annexe 2) (Ricard & Bakalowicz, 1996). Le suivi de cette source depuis 1999 indique un débit moyen qui s'élève à plus de 1 000 l/s et des extrêmes allant de 100 l/s à 18 000 l/s pour un bassin d'alimentation qui s'étend sur 90km².

Les exutoires de Laumet et Riou Ferrand sont également situés au niveau de zones de fractures parallèles à celle de l'Espérelle mais de moindre importance. Le réseau de Laumet, aussi exploré, se poursuit dans le causse selon un axe nord-sud (Annexe 3).

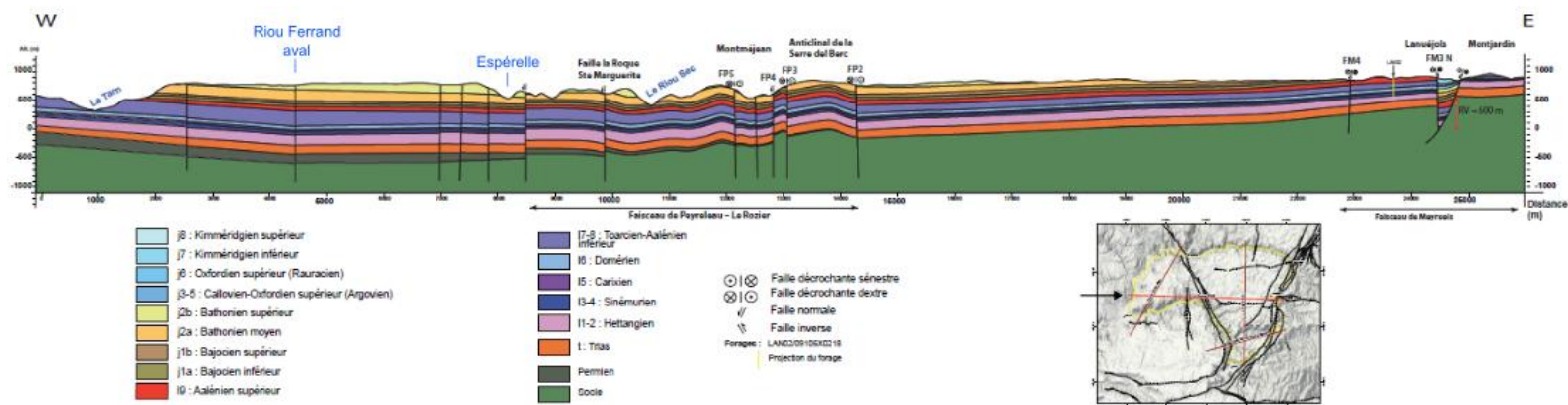


Figure 2 Coupe géologique traversant le Causse Noir où les structures du Causse du Larzac nord s'y prolongent (adapté de (GEOTER, 2019))

3.4.2 Occupation du sol

Bien que le Larzac septentrional soit un territoire rural avec peu d'impact sur le milieu naturel, il demeure certaines zones qui demandent de la vigilance. La majorité des aménagements sont concentrés au sein de la commune de la Cavalerie (Figure 3). Cette commune héberge le camp militaire du Larzac sur plus de 3000 ha depuis 1902 dans lequel la

13^e demi-brigade de la Légion étrangère (DBLE) s'est installée en 2016 (Gagnebet, 2015). En doublant la démographie de la commune, avec 1 300 militaires et leurs familles, soit 2 600 personnes à minima (Centre Presse Aveyron, 2024).

Par ailleurs, deux zones industrielles sont implantées à La Cavalerie ; le parc d'activités Millau-Larzac et la zone artisanale Millau-Sud qui regroupent plusieurs industries laitières entre autre.

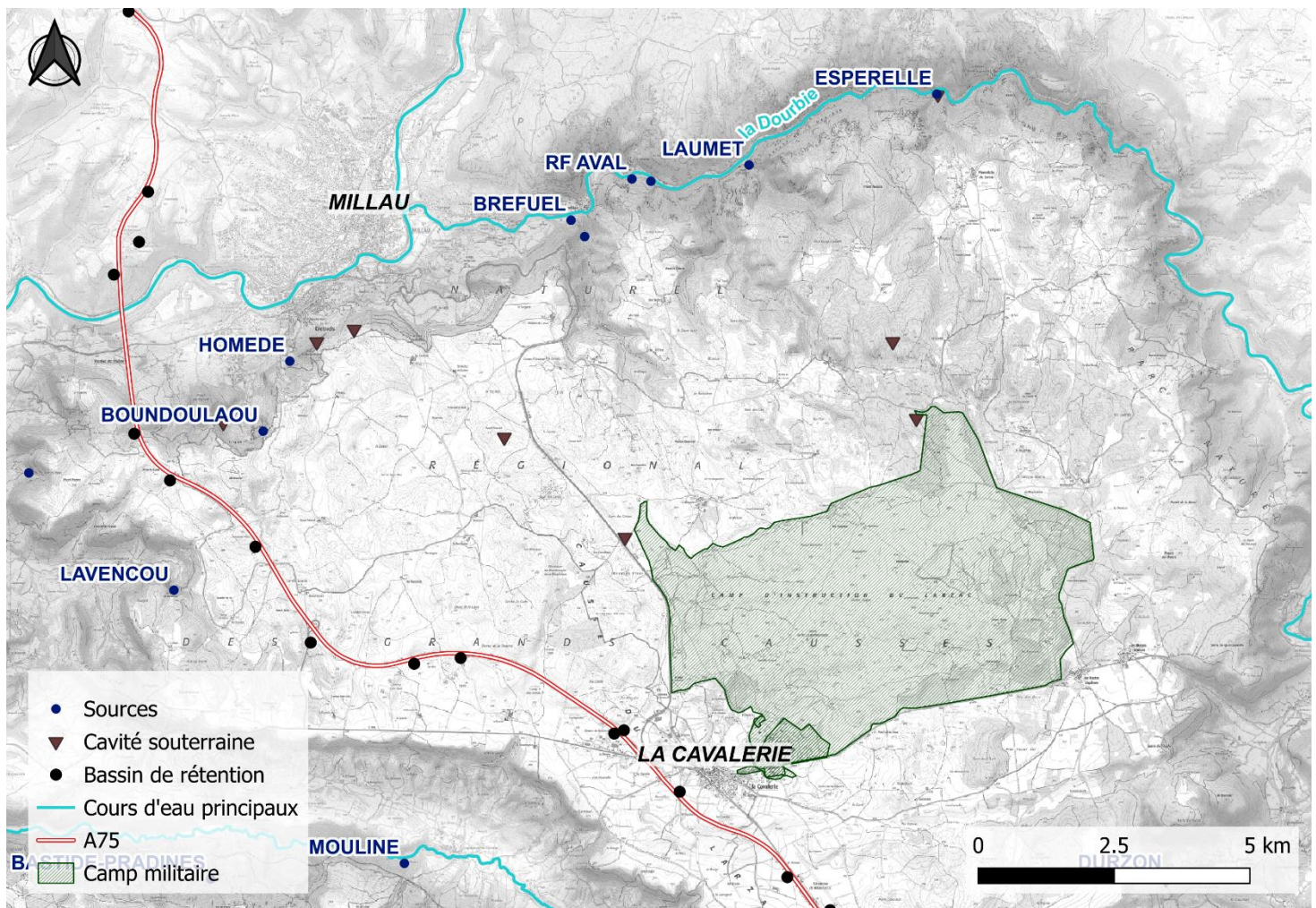


Figure 3 Principaux aménagements du Causse de Larzac nord (RB)

Sur l'A75, qui traverse le causse du Larzac et les bassins d'alimentation de plusieurs sources AEP, l'IGEDD estimait la fréquentation de la partie aveyronnaise de cette autoroute entre 20 et 30 000 véhicules par jour hors week-end et vacances (Taillé-Rousseau, 2024).

En bordure de causse se situe l'ancien centre d'enfouissement technique du Roubelier. En fonctionnement de 1964 à 2002, des travaux de réhabilitation ont été entrepris. Désormais les lixiviats sont collectés et traités *in situ* grâce à la mise en place d'un poste de traitement qui fonctionne quelques mois par an. Une fois traités les perméats sont rejetés dans le ravin du Roubelier (Durand, 2024).

Ces éléments représentent des pressions sur la ressource en eau. Ils peuvent être à l'origine de pollution accidentelle. C'est pourquoi de nombreux traçages ont été préconisés en aval de la réalisation de certains projets afin d'évaluer leur potentiel impact sur la ressource.

3.4.3 Traçages artificiels

Dans les années 90 s'initie sur le causse du Larzac la première étude hydrogéologique majeure des GC. Menée par le BRGM et le CNRS, cette étude s'appuie sur plusieurs disciplines pour permettre, entre autre, d'établir les bassins d'alimentation des principales sources alimentées par le causse (Ricard & Bakalowicz, 1996). Parmi l'ensemble des travaux entrepris sont compris les premiers traçages du secteur. Par la suite, des traçages artificiels supplémentaires ont été réalisés par le PNRGC et des bureaux d'études dans le cadre de projets d'aménagement ou de surveillance d'impact précisant le tracé des bassins au fur et à mesure.

En septembre 2022 lors d'un étiage marqué, le débit de la source de l'Espérelle était alors de 0.2 m³/s, soit cinq fois moins que la moyenne interannuelle. Un traçage a été réalisé par le PNRGC (Apolit, 2023). De la fluorescéine est injectée depuis l'un des bassins de décantation de l'A75 et en 5 jours elle atteint la source de Riou Ferrand aval, en 15 jours celle du moulin de Laumet et en 20 jours celle de l'Espérelle. Ce phénomène de diffifluence, c'est-à-dire plusieurs points de restitution pour un seul point d'injection, mis en évidence, touche quatre exutoires dont une source AEP cruciale, l'Espérelle.

A la lumière de ce constat, l'ensemble des archives des opérations de traçage effectuées sur la partie du Larzac située au nord de la Cavalerie a été étudié. En tout, dix-neuf traçages artificiels fiables sont répertoriés sur les bassins d'alimentation des sources d'Homède, Brefuel, Roubelier, Riou Ferrand, Laumet et Espérelle, (Figure 4) (Annexe 4).

Parmi ces dix-neuf traçages, trois possèdent deux points de restitution pour un point d'injection. Les trois études ont été mises en place dans le cadre de trois projets de construction à l'ouest de la commune de La Cavalerie ; une zone d'activité (Subias, 2006), un village de marques (Boyer, 2020) et un parc photovoltaïque (Boyer, 2020) (Annexe 4). Dans les trois cas l'injection mène à une restitution à Riou Ferrand et au moulin de Laumet qui jusqu'ici appartiennent au même bassin d'alimentation.

D'après les résultats du traçage depuis le bassin d'autoroute, les trois traçages évoqués ci-dessus pourraient également être les témoins de diffifluences. En s'appuyant sur cette reconsidération des connaissances hydrogéologiques du secteur, une zone restreinte à proximité de La Cavalerie qui contient les points d'injection de ces traçages donne lieu à des phénomènes

de diffiusion sur les sources d'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand et ce, en périodes de moyennes eaux et de basses eaux.

Par ailleurs, en 2020 un traçage injecté depuis la coopérative des Berges du Larzac avait

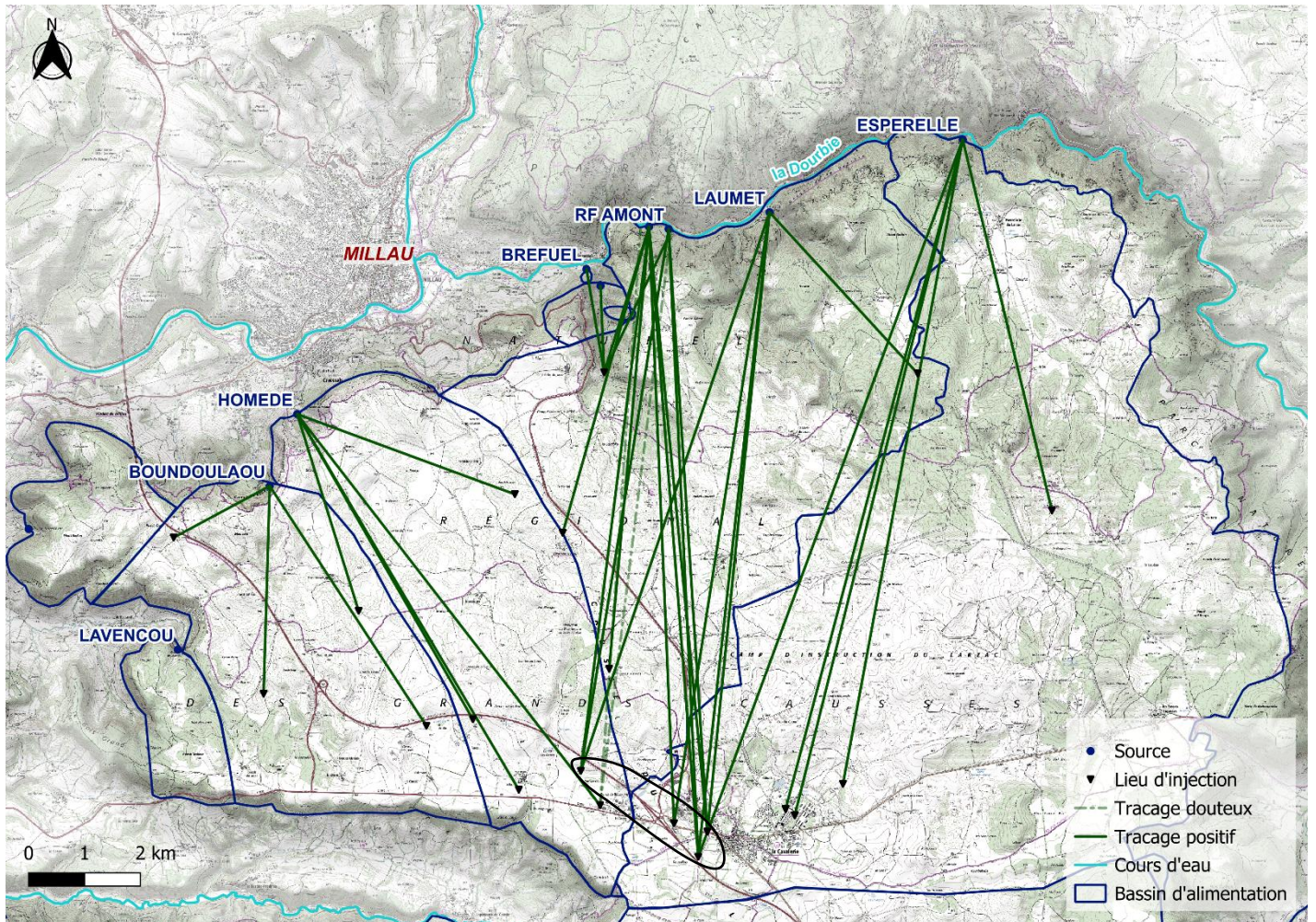


Figure 4 Résultats des traçages positifs sur le secteur d'intérêt (RB)

mis en lumière une potentielle diffiusion entre la source d'Homède et les exutoires de Riou Ferrand (Apolit, 2020). Cependant un seul prélèvement manuel a été effectué à Riou Ferrand et s'est révélé positif. Du fait du peu d'éléments, la restitution à Riou Ferrand n'a pu être confirmée et reste une interrogation.

Face à l'ensemble de ces informations les limites qui séparent les bassins hydrogéologiques évoquées sont remises en cause.

3.4.4 Hydrochimie

3.4.4.1 Informations tirées de la littérature

Les sources d'Espérelle, Riou Ferrand amont/aval et du moulin de Laumet sont caractérisées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Ce faciès hydrogéochimique est

typique d'un milieu karstique composé en partie de calcaires dolomitiques (Batiot-Guilhe, s. d.).

L'étude menée par le BRGM et le CNRS dans les années 90 décrit la chimie de l'eau des sources du causse du Larzac septentrional à partir de prélèvements hebdomadaires. Ces données apportent des informations complémentaires sur les réseaux des sources impliqués dans le phénomène de diffluence.

Ainsi l'hydrochimie de l'Espérelle est décrite comme stable avec des légères diminutions de sa minéralisation lors des épisodes de crue. Généralement la conductivité est toujours supérieure à 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les concentrations de magnésium et silice en solution augmentent en étiage traduisant un stockage important. Les chlorures et les nitrates sont notablement élevés (Ricard & Bakalowicz, 1996).

La source du moulin de Laumet présente une minéralisation proche de celle de l'Espérelle avec des variations similaires. L'hydrochimie de Laumet se distingue par un couple Cl^- et NO_3^- faible et une proportion de Mg^{2+} plus importante.

Les émergences de Riou Ferrand, du fait de leur accès compliqué, ont été suivies occasionnellement. De ces quelques analyses ressort une teneur en silice légèrement élevée. M.Ricard à l'époque explique cela par le contact de l'exutoire et de la zone noyée avec les marnes liasiques contenant de la silice (Ricard & Bakalowicz, 1996).

3.4.4.2 Exploitation des données hydrochimiques disponibles

L'ensemble des analyses disponibles dans l'étude du Larzac ainsi que les suivis réguliers effectués par le Parc constituent une base de données hydrochimiques exploitable et qui ont servi à construire les figures ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 Données hydrochimiques disponibles

Sources	Origine données	Date analyses	Echantillons Ca/Mg	Echantillons Cl/NO ₃
<i>Espérelle</i>	Etude BRGM-CNRS	1991 - 1995	66	64
	PNRGC	1997 - 2023	55	225
<i>Moulin de Laumet</i>	Etude BRGM-CNRS	1991 - 1993	93	97
<i>Riou Ferrand</i>	Etude BRGM-CNRS	1991 - 1995	5	7

Au vue de la nature des roches de l'aquifère, calcaires CaCO_3 et dolomies $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, le magnésium et le calcium sont des éléments intéressants à comparer (Figure 5).

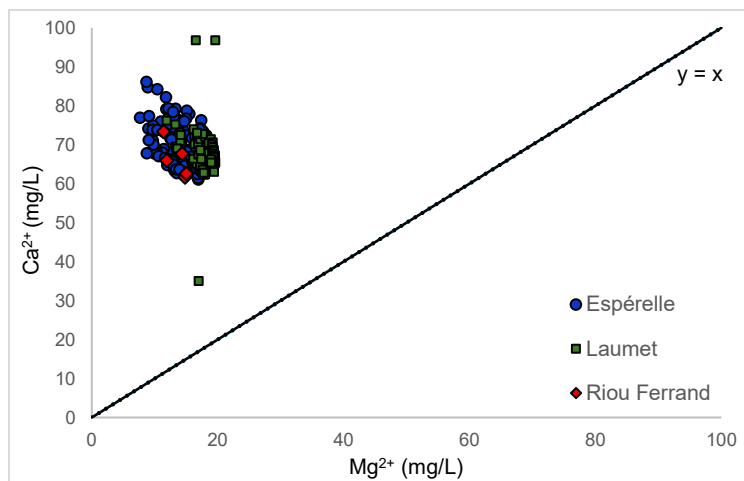


Figure 5 Diagramme binaire calcium – magnésium (RB)

Les teneurs de ces deux éléments dans les sources ne sont pas contrôlées par des équilibres dissolution/précipitation de la dolomie. L'enrichissement en calcium pourrait être hérité d'aquifères à dominante calcaire (Figure 5). Cependant les rapports Mg/Ca calculés sont compris entre 0.2 et 0.7 (0.5 pour l'Espérelle) indiquant tout de même une

abondance certaine en dolomies (Ricard & Bakalowicz, 1996).

Le magnésium est plus lent à passer en solution que le calcium, sa dissolution requiert un temps de séjour long. La raison serait alors hydrodynamique ; les circulations rapides notamment lors d'épisodes pluvieux justifieraient des concentrations plus fortes en Ca^{2+} qu'en Mg^{2+} . Comme il a été évoqué précédemment la source de Laumet possède les concentrations en Mg^{2+} les plus élevées donc potentiellement des circulations lentes.

Bien que le causse du Larzac septentrional ne soit pas abondamment aménagé l'impact des quelques infrastructures est notable sur l'hydrochimie des sources alimentées par celui-ci (Figure 6). Excepté la source du moulin de Laumet qui, d'après les concentrations relevées dans les années 90, ne semble pas affectée par les activités du plateau, les sources d'Espérelle et Riou Ferrand sont influencées par des apports anthropiques. En effet, ces émergences sont caractérisées par des concentrations en nitrate et en chlorure corrélées. Les teneurs en NO_3^- sont pour la plupart supérieures à 10 mg/l, limite à partir de laquelle l'origine est considérée comme anthropique (Commissariat Général au Développement Durable, 2019). Les teneurs en Cl^- sont, quant à elles, cohérentes avec la distance aux étendues d'eau salée (Blum et al., 2002). En revanche certaines eaux possèdent plus de chlorures que d'autres, c'est le cas de Riou Ferrand, sans doute issues du salage routier (Figure 6).

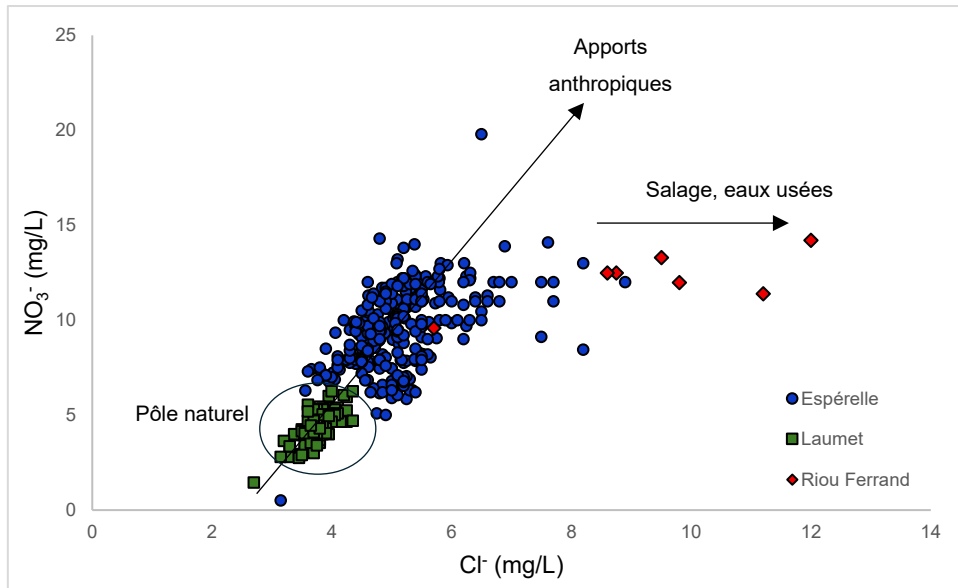


Figure 6 Diagramme binaire nitrate – chlorure (production personnelle adapté de (Plagnes, 1997))

D’après les analyses réalisées dans le cadre du partenariat avec la DIRMC, divers métaux ont été retrouvés dans les compositions chimiques des quatre sources en concentrations variables. Certains de ces éléments, sélectionnés pour leurs tendances discriminantes d’un bassin hydrogéologiques à un autre, seront intégrés au suivi chimique de cette étude (Figure 7).

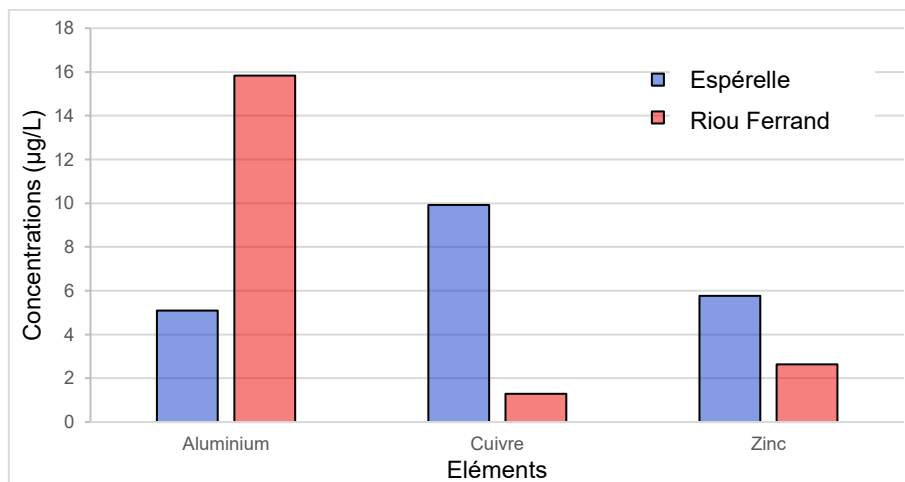


Figure 7 Métaux intégrés aux analyses chimiques des sources (RB)

L’aluminium, le cuivre et le zinc sont les métaux qui présentent les concentrations les plus contrastées entre les sources, c’est pourquoi ils sont retenus.

4 OPERATIONS DE TRACAGE

4.1 Protocole de traçage et mesures complémentaires

4.1.1 Choix du point d’injection

Le point d’injection est identique à celui choisi lors de l’opération de traçage réalisée en 2022, à savoir le bassin de décantation A36 de l’autoroute A75, situé sur la commune de La

Cavalerie. En reprenant le même point d'injection, les données recueillies préciseront les résultats obtenus en 2022, les débits des sources n'ayant pas tous été suivis régulièrement. De plus, ce traçage apporte des informations complémentaires sur la dynamique des systèmes tracés en période de hautes eaux.

Le bassin A36, conçu pour être étanche, permet le piégeage de pollution en provenance de l'axe routier. Précisément, l'injection s'effectue en amont de la vanne de vidange. Celle-ci donne sur le milieu naturel qui, ici, est marqué par une dépression qui constitue la zone d'infiltration.

A ce bassin s'ajoute un point d'injection supplémentaire, situé au cœur du système traçage préalablement identifié, l'aven de la Tonne. Formé au sein d'une zone de failles composée de grosses fractures, il a été retenu parmi quatre cavités pour sa situation géographique. L'aven de la Tonne se trouve à quelques kilomètres au nord de la zone d'injection qui conduit à des diffuences. Il permettra de peaufiner les limites de cette dernière. De plus, cette cavité est pénétrable jusqu'à 22m de profondeur où un passage étroit collecte les écoulements (Annexe 5). Ce mutli-traçage offre donc une injection en surface et une injection à quelques mètres de profondeur dans la zone d'infiltration.

Les injections se feront respectivement le 14 et 16 avril 2025.

4.1.2 Choix des points de suivi

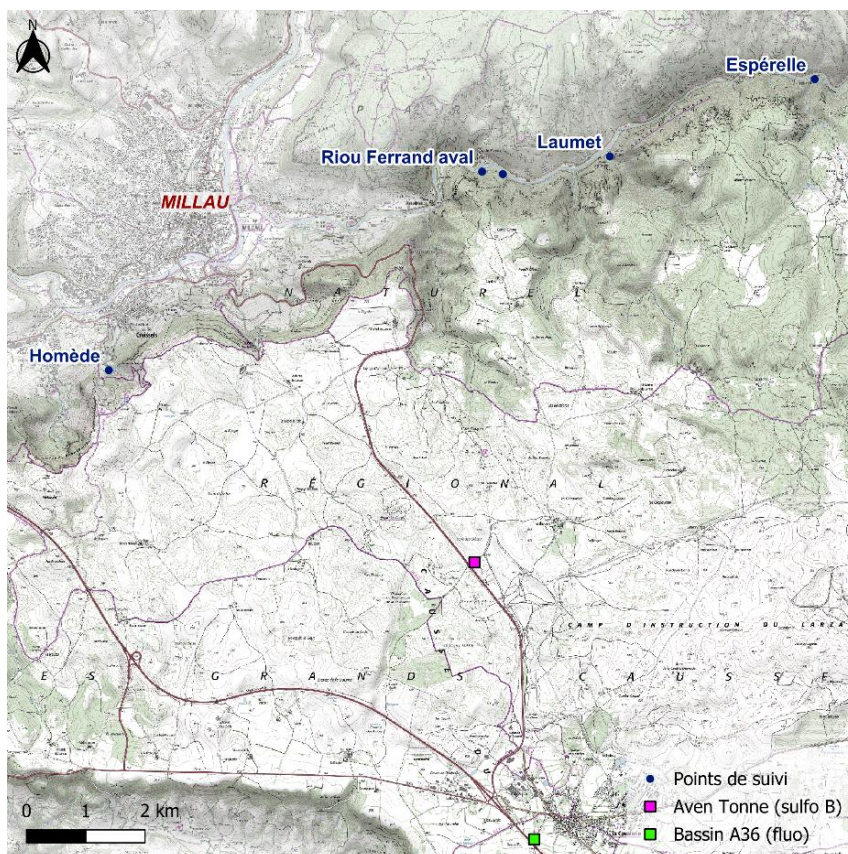


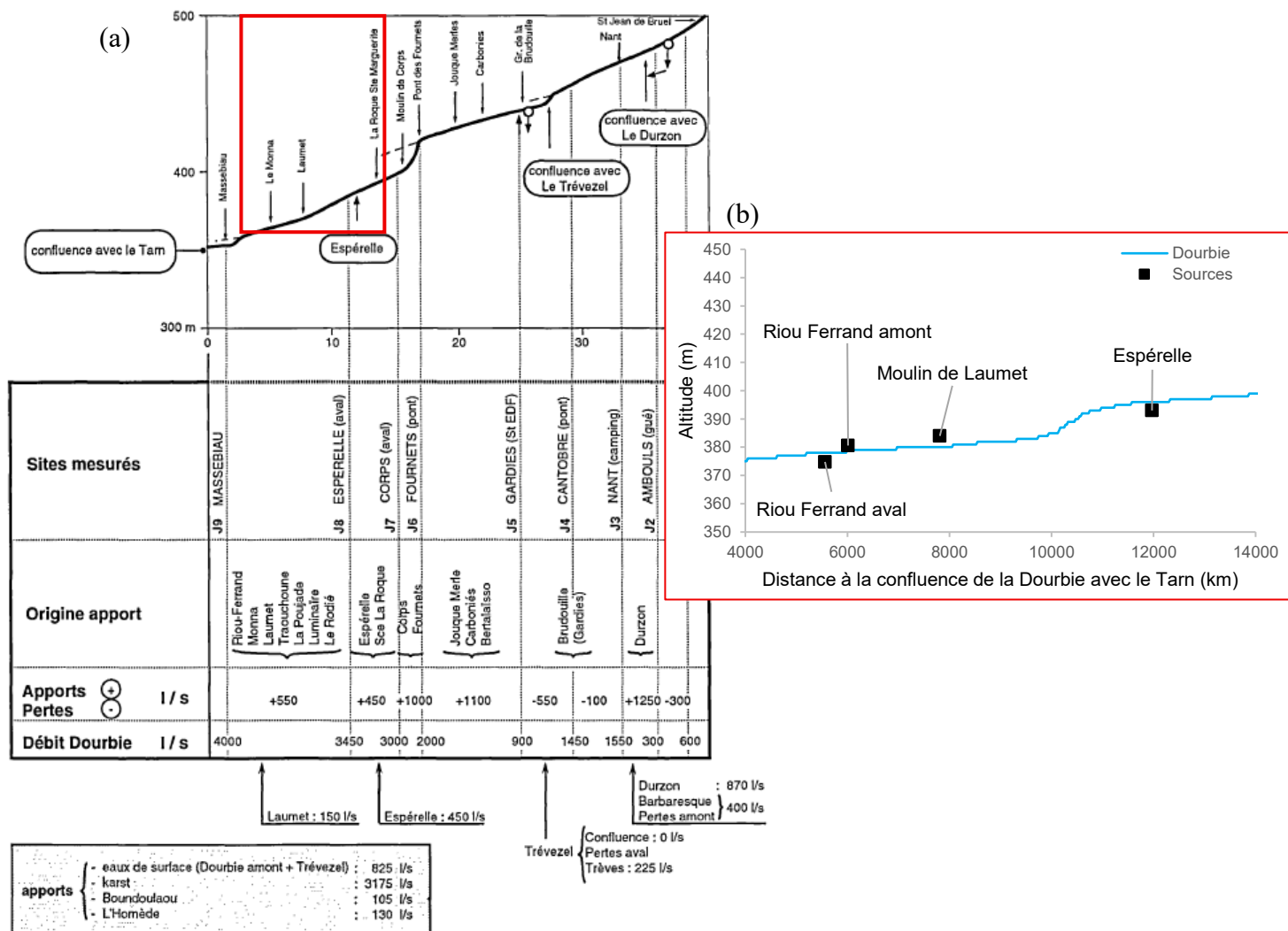
Figure 8 Points d'injection et de suivi du multi-traçage (RB)

Les points de suivi ont été retenus en considérant les traçages précédemment réalisés dans le secteur (Figure 8). En tout, 7 émergences karstiques sont surveillées dont la source de l'Espérelle et Homède qui alimentent les communes de Millau et Creissels en eau potable. L'eau du moulin de Laumet est également captée pour un usage unifamilial (Tableau 3).

Tableau 3 Caractéristiques des points de suivi

Points de suivi	X (L93)	Y (L93)	Z (mNGF)	Observations
Espérelle (source)	716 754.775	6 335 795.638	393	AEP Millau
Homède (source)	704 844.291	6 330 880.247	500	AEP Creissels
Moulin de Laumet (source)	713 297.927	6 334 490.882	384	AEP privé
Riou Ferrand amont (source)	711 492.694	6 334 191.192	383	Non captée
Riou Ferrand aval (source)	711 142.208	6 334 233.637	375	Non captée
Brefuel(source)	710 021.920	6 333 474.029	365	Non captée
Roubelier (ravin)	710 273.166	6 333 173.200	375	Ruisseau permanent

Les valeurs en Z sont tirées du MNT à 1m de précision, sauf pour le moulin de Laumet et Riou Ferrand amont/aval qui ont été mesurées avec un GPS Trimble constitué d'une antenne Catalyst DA2 et d'un terminal TDC600 dont la précision est pluricentimétrique. L'évolution des altitudes (Z) des sources concernées suit le niveau de la Dourbie, majoritairement alimentée par les apports souterrains (Figure 9(a)). D'amont en aval, les valeurs en Z des émergences diminuent progressivement. La source de l'Espérelle, de type vaclusien, surgit dans le bajocien supérieur contrairement aux autres qui se trouvent dans le Bajocien inférieur à proximité de la limite imperméable formée par les marnes (Figure 9).



Nota : Le profil en long de la Dourbie est extrait du rapport de P. Ambert et Ph. Martin ; 1992 .

Figure 9 (a) Profil de la Dourbie tiré de (Ricard & Bakalowicz, 1996) et (b) zoom sur la partie d'intérêt (RB)

4.1.3 Choix des traceurs utilisés et méthode d'injection

La fluorescéine et la sulforhodamine B sont les deux traceurs choisis pour ce multi-traçage. Ils représentent les traceurs artificiels les plus utilisés en hydrogéologie. La fluorescéine est un produit fluorescent intéressant. Solubilité élevée, limite de détection basse (0.001 ppb), prix contenu, et faibles interactions avec l'environnement font de ce traceur le premier choix. En présence de fluorescéine dans le milieu, la sulforhodamine B est privilégiée car ces deux traceurs n'interfèrent pas entre eux (BRGM, 2010).

Au regard de la distance entre les points d'injection et les points de suivi, des conditions hydrologiques au moment de l'injection, c'est-à-dire hautes eaux, et des quantités de traceurs injectées pour les opérations dans le secteur (de 0.3 à 15 kg), les quantités fixées pour le multi-tractages sont les suivantes :

- 9 kg de fluorescéine injectés en sortie du bassin A36 (doline)
- 10 kg de sulforhodamine B injectés dans l’aven de la Tonne

La fluorescéine a été introduite au niveau de la grille d’évacuation du bassin de rétention. Le volume d’eau contenu dans le bassin a permis de pousser la fluorescéine ; à ce moment il était estimé à 275 m³.

Concernant la sulforhodamine B, les spéléologues du Comité Départemental de Spéléologie de l’Aveyron, ont directement injecté le traceur dans l’écoulement de façon progressive pour ne pas augmenter le débit naturel.

4.1.4 Méthode de suivi de la restitution

Le suivi des potentiels points de restitution a été adapté au regard des connaissances du domaine souterrain acquis lors des précédentes opérations de traçage. Ainsi les sources d’Espérelle, Laumet et Riou Ferrand ont été équipées de préleveur automatique et de fluorimètre de terrain de type GGUN. Sur la source d’Homède, un préleveur a été installé. Enfin, les points de Brefuel et du Roubelier ont fait l’objet de prélèvements manuels.

Le pas de temps de mesures des fluorimètres de terrain est fixé à 15 minutes.

Le suivi a été mené sur un mois, du 14 avril au 14 mai 2025, durant lequel l’échantillonnage à l’aide des préleveurs automatiques s’est effectué avec un pas de temps variable entre 6 et 12 heures. En parallèle, les informations apportées par les fluorimètres ont conduit à l’arrêt des prélèvements sur certaines sources dont la restitution était terminée (Tableau 4).

Tableau 4 Planning du suivi de restitution

<i>SOURCES</i>	Passage 1 14/04/2025	Passage 2 22/04/2025	Passage 3 30/04/2025	Passage 4 06/05/2025	Passage 5 14/05/2025
Espérelle	Jour 0	Jour 8	Jour 16	Jour 22	Jour 30
Homède	Jour 0	Jour 8	Jour 16	Jour 22	Jour 30
Moulin de Laumet	Jour 0	Jour 8	Jour 16		
Riou Ferrand amont	Jour 0	Jour 8	Jour 16		
Riou Ferrand aval	Jour 0	Jour 8	Jour 16		

La source de Brefuel et le ravin du Roubelier ont été prélevés manuellement à chaque passage de maintenance des appareils de suivi, de même que les mesures des paramètres physico-chimiques sur les sources de Riou Ferrand et du moulin de Laumet.

La mise en place d’un suivi avec des préleveurs automatiques et des fluorimètres de terrain garantie une meilleure robustesse des résultats (Mondain & Muet, 2008).

4.1.5 Analyses fluorimétriques et chimiques des échantillons

Les échantillons prélevés ont été stockés dans des flacons en verre brun fumé puis analysés par spectrofluorimétrie au laboratoire Analyses Biogéochimiques et Isotopiques des Hydro-Systèmes de l'unité d'HydroSciences Montpellier (Annexe 6). En tout, 237 échantillons d'eau ont été sélectionnés puis passés dans le spectrofluorimètre pour être soumis au spectre d'émission du traceur recherché. Les valeurs de concentrations obtenues permettent d'ajuster la courbe de restitution issue du fluorimètre dont le pas de temps est plus fin. Les courbes corrigées sont ensuite utilisées pour construire les Distributions de Temps de Séjour (DTS). Une DTS illustre le flux de traceur normée par la masse restituée (BRGM, 2010).

En parallèle de ces analyses, des échantillons d'eau ont été prélevés aux sources d'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand aval et sont dédiés à des analyses de la chimie de l'eau. Les éléments majeurs de l'eau sont ciblés ainsi que certains métaux dont les teneurs semblent discriminantes d'une source à l'autre : aluminium, cuivre, plomb, zinc (Figure 7). Les teneurs en fer et en silice sont également mesurées. Le laboratoire AveyronLabo est en charge de ces analyses.

4.1.6 Pluviométrie

Située entre les communes de La Cavalerie et l'Hospitalet du Larzac, la station météorologique « Millau-Larzac SAPC » de l'aérodrome de Millau enregistre les données climatiques qui règnent sur le causse nord larzacien en continu, notamment la pluviométrie. La chronique de cumuls de précipitations journaliers mesurée par la station a permis de construire la Figure 10.

La veille de la date de la première injection, un épisode pluvieux d'une durée de 4 jours s'est déclaré avec un cumul maximum qui s'élève à 14.8 mm/j le lendemain de l'injection. La période de suivi, matérialisée par un rectangle bleu sur la Figure 10, est ponctuellement marquée par des précipitations notables avec un cumul journalier atteignant 43.1 mm le 19 avril 2025 respectivement 5 et 3 jours après l'injection dans le bassin A36 et dans l'aven de la Tonne.

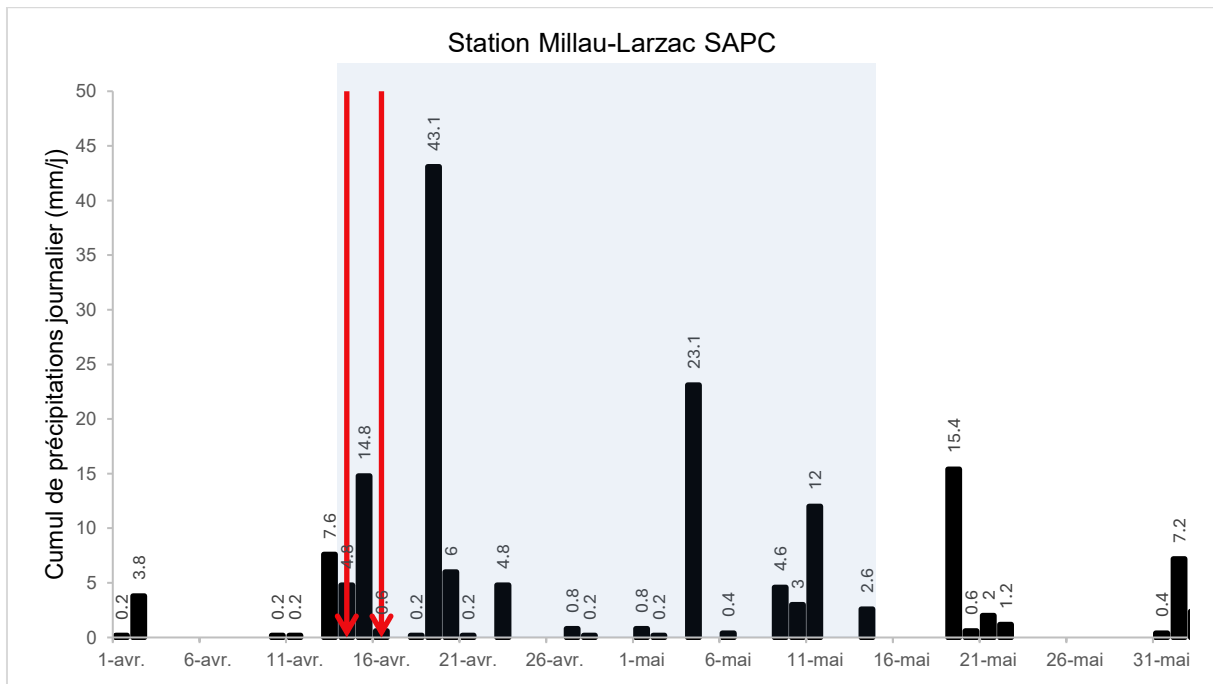


Figure 10 Pluviométrie enregistrée sur le Larzac lors de l'opération de traçage (RB)

4.1.7 Débits des sources

Les sources d'Espérelle et Homède sont équipées de stations hydrométriques gérées par le PNRGC. La source de l'Espérelle est suivie depuis 1999.

En 2022, l'opération de traçage indique que la source est impliquée au sein du système-traçage. L'étude de sa chronique de débits permet donc de définir les conditions hydrologiques de l'aquifère karstique tracé.

En septembre 2022, lors du traçage depuis le bassin A36, le débit à Espérelle était inférieur à 200 l/s, l'opération s'était déroulée en période de basses eaux. En avril 2025, le débit de la source est trois à quatre fois supérieur avec des valeurs comprises entre 600 et 800 l/s et situées entre deux épisodes de crue (Figure 11). Cette période est caractérisée par des conditions de hautes eaux.

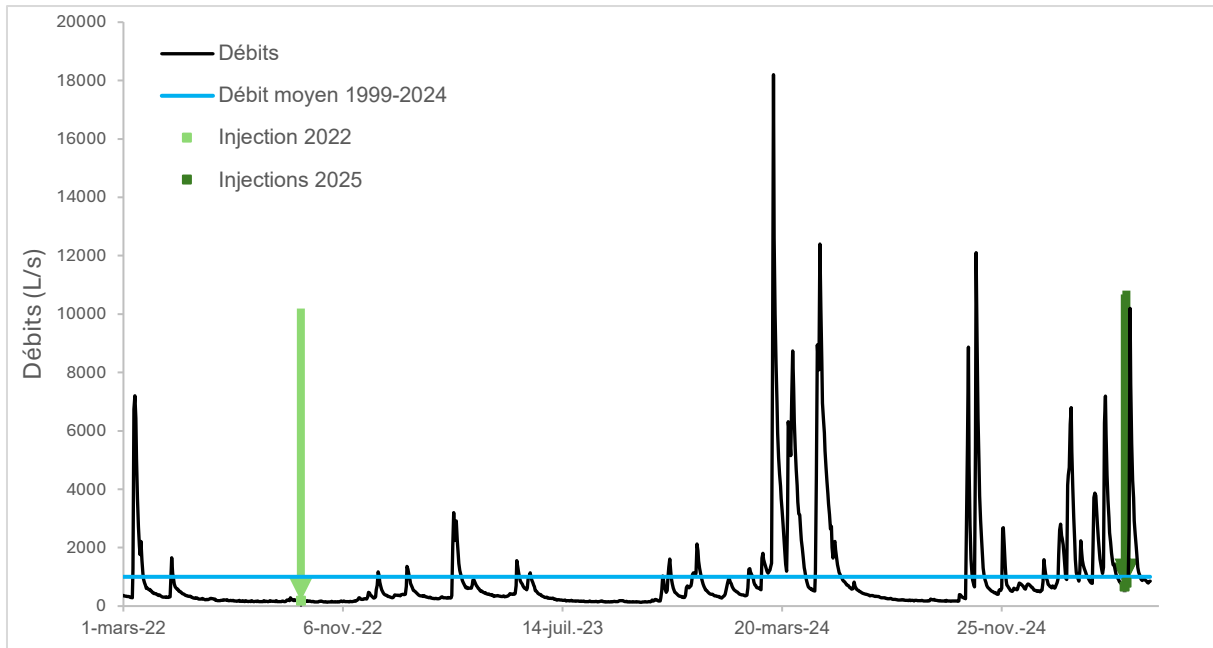


Figure 11 Chronique de débits de la source de l'Espérelle (RB)

A l'occasion de l'opération de traçage, les sources du moulin de Laumet et de Riou Ferrand ont été équipées de stations de mesure de hauteur d'eau temporaire (Annexe 7). 9 jaugeages au sel effectués de mars à juin 2025 ont permis d'établir une courbe de tarage sur la période de suivi du traçage. Une incertitude minima de $\pm 10\%$ est à considérer sur ces chroniques de débits du fait de la méthode de jaugeage utilisée et des caractéristiques des sites (INRAE, s. d.). Ces incertitudes sont à prendre en compte lors de l'interprétation des distributions de temps de séjour (DTS).

Les débits de Riou Ferrand aval sont compris entre 134 et 808 l/s contre 18 et 106 l/s pour Riou Ferrand amont. Les débits de Laumet se situent dans une gamme intermédiaire avec des valeurs qui varient entre 136 et 473 l/s.

Malgré ces disparités, les débits des trois émergences varient de façon similaire sur la période d'observation. Ce sont les mêmes tendances que celles relevées à la source de l'Espérelle. Les injections du multi-traçage ont eu lieu à la fin d'une période de décrue. A partir du 16 avril, une légère augmentation des débits est enregistrée, précédant une crue nette qui débute le 19 avril à 17h avant de décroître progressivement quelques jours après (Figure 12).

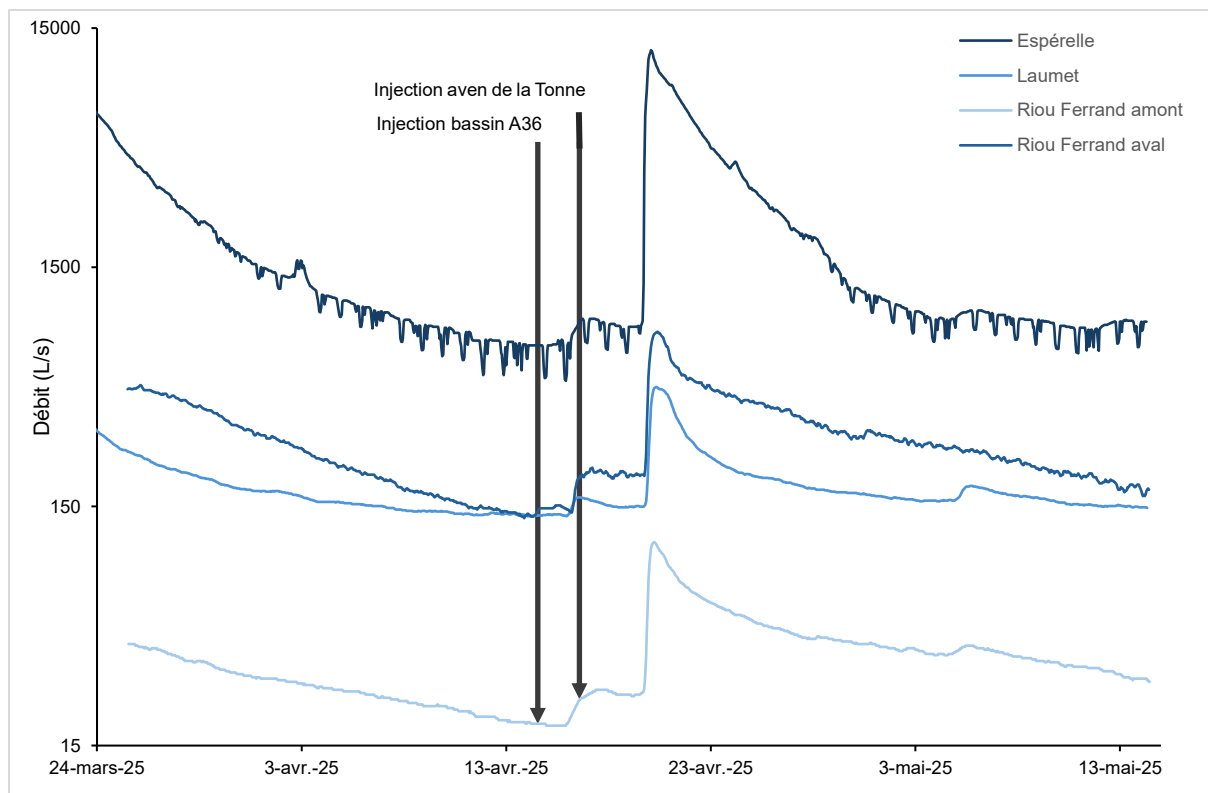


Figure 12 Débits aux exutoires (RB)

4.2 Résultats

4.2.1 Traçage bassin A36

Les analyses en laboratoire effectuées sur les prélèvements de la source d'Homède indiquent qu'aucune restitution en fluorescéine n'a eu lieu à cet exutoire. De même que les prélèvements manuels faits sur la source de Brefuel et dans le ravin du Roubelier.

4.2.1.1 Source de l'Espérelle

Une restitution en fluorescéine est enregistrée par le fluorimètre de terrain installé sur la source de l'Espérelle puis confirmée par les analyses des prélèvements par spectrofluorimétrie (Figure 13).

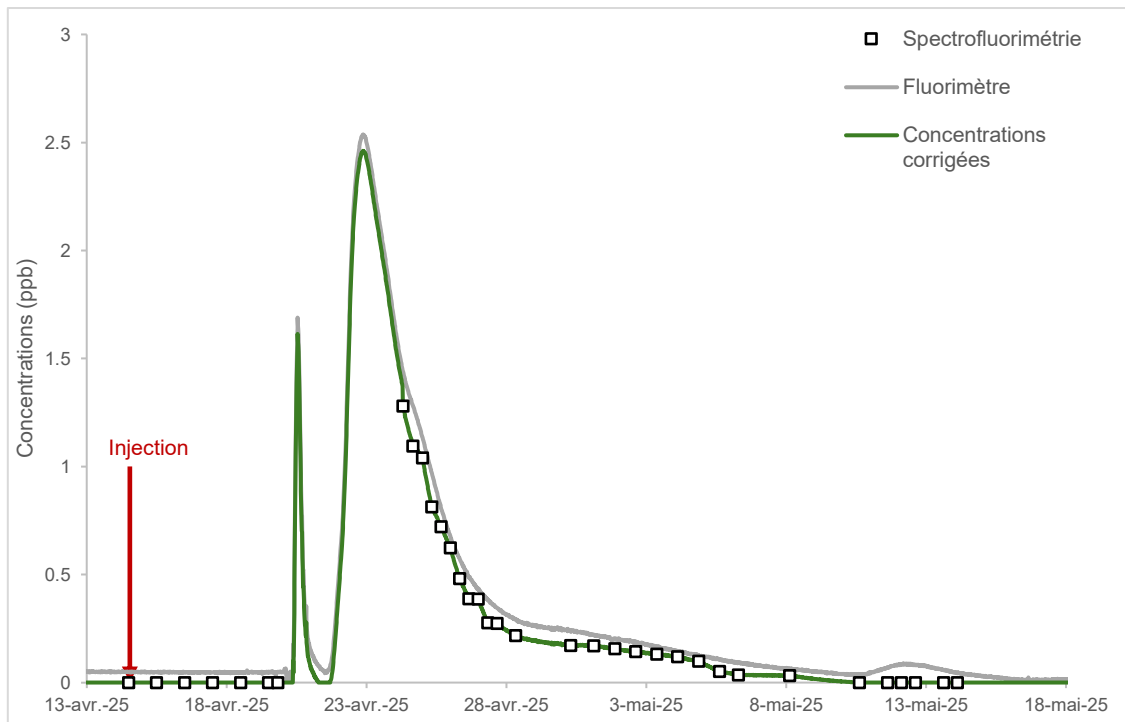


Figure 13 Restitution en fluorescéine à la source de l'Espérelle (RB)

L'allure de la courbe de restitution obtenue grâce au fluorimètre dessine deux pics. Lors du premier pic, contrairement au deuxième, la présence de fluorescéine n'a pas pu être vérifiée par l'analyse des prélèvements en laboratoire puisqu'un épisode de crue a poussé la crépine du préleveur automatique hors de l'eau (Figure 13).

Cependant, un post-traitement informatique des données du fluorimètre a été réalisé et ce dernier indique qu'il s'agit très probablement d'une première restitution. Cette hypothèse sera ainsi considérée dans l'interprétation des restitutions.

Les premières apparitions du traceur sont relevées le 20 avril à 9h soit 5 jours et 20 heures après l'injection. La vitesse maximale déduite s'élève à 95 m/h (Annexe 8).

Le premier pic est net et bref atteignant une concentration de 1.6 $\mu\text{g/L}$ en son sommet avant de diminuer rapidement jusqu'à revenir à des concentrations nulles le 21 avril à 6h (Figure 13). La durée de restitution de ce premier pic s'est déroulée en 21 heures.

Le 21 avril vers 17h survient le deuxième épisode de restitution, supérieur au premier et constitué d'une queue de restitution étalée. Sa plus forte concentration est égale à 2.5 $\mu\text{g/L}$, elle est rapidement atteinte puis s'en suit une décroissance marquée puis lente jusqu'au 10 mai (Figure 13).

Au total la restitution du traceur a duré 20 jours à la source de l'Espérelle conduisant à 2.8 kg de masse restituée ce qui représente une restitution de 31.1% (Annexe 8).

La restitution à Espérelle est également caractérisée par un taux de dilution unitaire maximal de l'ordre de $2.8.10^{-10} \text{ l}^{-1}$ (Annexe 8), ainsi, si 50 kg de substance polluante se déverse dans le milieu, dans les conditions d'injection identiques à celles du traçage, une concentration au plus de 13.9 $\mu\text{g/l}$ est attendue à la source de l'Espérelle.

4.2.1.2 Source du Moulin de Laumet

Au Moulin de Laumet, le fluorimètre ainsi que les analyses en laboratoire des prélèvements attestent d'une restitution à la source (Figure 14).

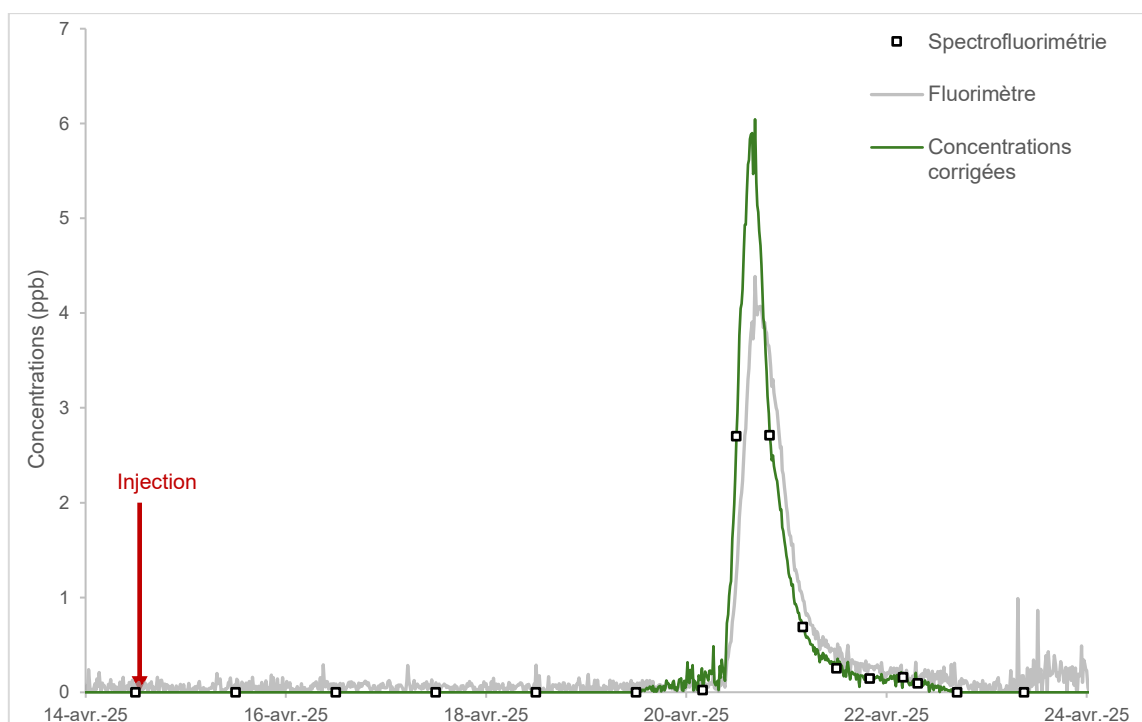


Figure 14 Restitution en fluorescéine à la source du moulin de Laumet (RB)

Les premières traces de fluorescéine apparaissent le 20 avril à 4h c'est-à-dire 5 jours et 14 heures après l'injection, quasiment en même temps que le premier pic de restitution enregistré à l'Espérelle (Figure 14). La vitesse de première apparition est égale à 85.6 m/h.

La fluorescéine ressort en 2.5 jours et l'évolution des concentrations suit un signal bruité dû à la turbidité. La courbe est marquée par un pic net suivi d'une queue de restitution courte jusqu'à revenir à des valeurs nulles le 22 avril à 17h. Les concentrations mesurées ont atteint au maximum 6 $\mu\text{g/L}$ (Figure 14).

Avec 1.1 %, la source de Laumet possède le taux de restitution le plus faible des émergences concernées par le traçage depuis le bassin A36 (Annexe 8).

Le taux de dilution unitaire de la source de Laumet est de $6.7.10^{-10} \text{ l}^{-1}$. Autrement dit, en cas d'accident causant le déversement de 50 kg de polluants solubles dans l'eau dans les mêmes

conditions que celles du traçage, les concentrations à la source de Laumet n'excéderaient pas 33.4 µg/l.

4.2.1.3 Source de Riou Ferrand

Les fluorimètres et les prélèvements attestent de la présence de fluorescéine à Riou Ferrand amont ainsi qu'à Riou Ferrand aval (Figure 15).

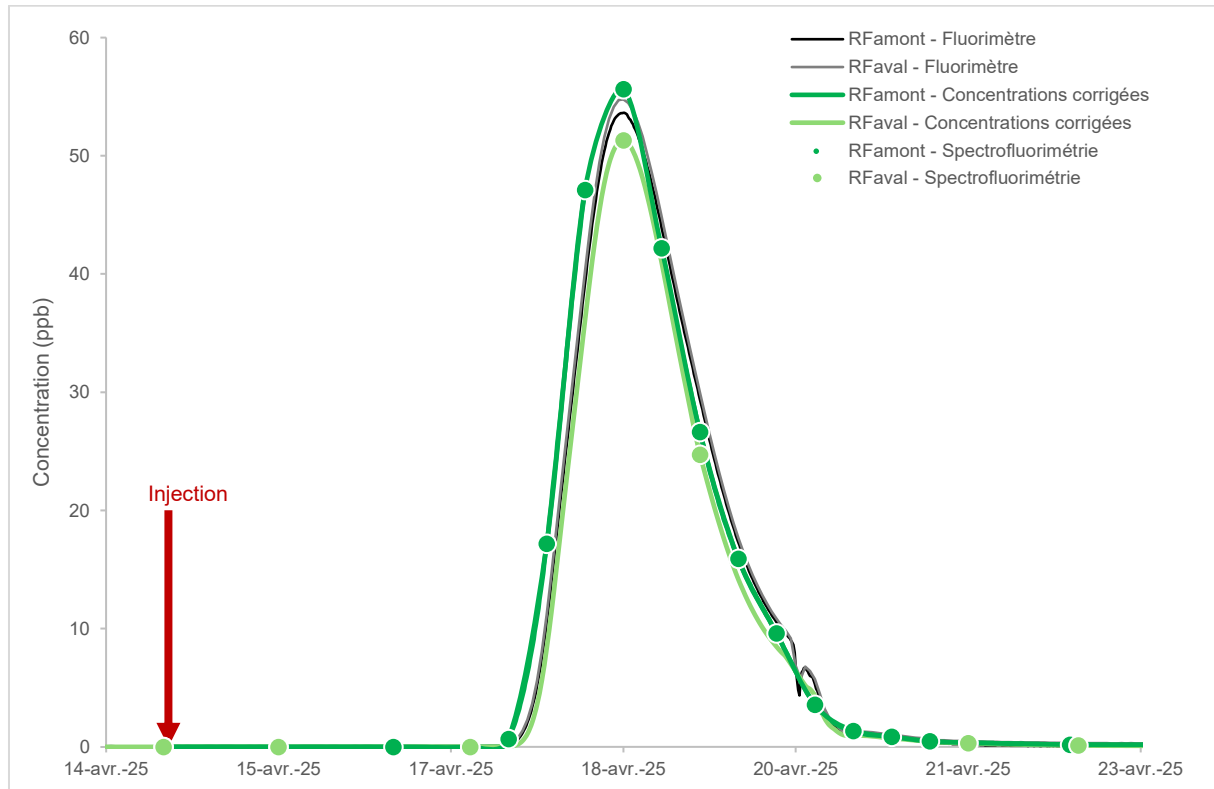


Figure 15 Restitution en fluorescéine à Riou Ferrand amont et aval (RB)

Les premières traces détectées remontent au 17 avril, soit 2 jours après l'injection. Le traceur survient d'abord à l'exurgence amont à 4h puis une heure plus tard à celle en aval (Figure 15). Les vitesses déduites des premières apparitions sont de 178 et 177 m/h (Annexe 8).

Les courbes de restitution des deux exutoires sont similaires, constituées d'un unique pic dont les maxima apparaissent le 18 avril à 12h avec des concentrations supérieures à 50 µg/l (Figure 15). Les restitutions s'étendent sur 5 jours environ, jusqu'au 20 avril et 21 avril. Cette similarité suggère que ces exutoires proviennent du même système. Riou Ferrand amont et aval ne seraient qu'une seule source.

Des taux de restitution de 2 et 14% sont respectivement retrouvés à Riou Ferrand amont et aval, ce qui fait 16% en cumulé. 1.2 kg sont ressortis à l'exutoire aval, contre 170 g en amont (Annexe 8). Cette différence s'explique par le débit qui est nettement supérieur à Riou Ferrand aval.

Les taux de dilution unitaire maximale s'élèvent à $6.2.10^{-10} \text{ l}^{-1}$ pour Riou Ferrand amont et à $5.7.10^{-9} \text{ l}^{-1}$ pour Riou Ferrand aval. De ce fait les concentrations conséquentes au déversement de 50kg de polluants solubles dans l'eau seraient respectivement égales à 309 et 285 $\mu\text{g/l}$ au maximum (Annexe 8).

4.2.1.4 Bilan de restitution

L'injection de fluorescéine dans le bassin de rétention A36 a aboutie à une multi-restitution décalée dans le temps. Les premières arrivées sont enregistrées à Riou Ferrand en moins de trois jours puis au Moulin de Laumet et enfin à l'Espérelle après quasiment cinq jours (Annexe 9). Pris séparément, les taux de restitution estimés sur chaque source sont inférieurs à 40%, voire à 10% ce qui est considéré comme faible à très faible. Néanmoins en cumulé, le taux de restitution pour le traçage atteint 48% attestant de la fiabilité du traçage (BRGM, 2010). Les quatre DTS tirées de l'opération de traçage sont présentées ci-dessous (Figure 16).

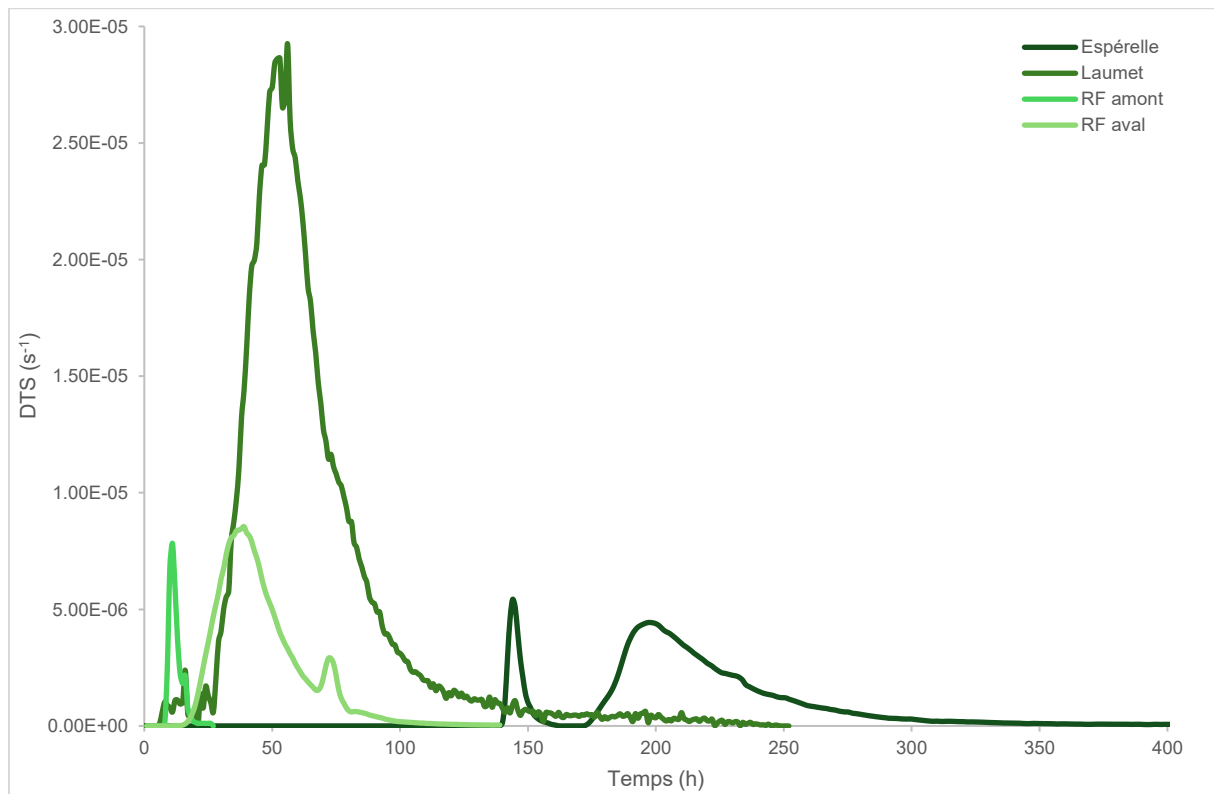


Figure 16 Comparaison des DTS issues du traçage de 2025 – fluorescéine (RB)

A l'exception de la source de l'Espérelle, les courbes des DTS suivent une forme unimodale. Ces dernières sont pointues, typiques d'un régime hydrologique en hautes eaux, et se trouvent plus étalées lorsque l'exutoire concerné est situé loin du point d'injection pouvant être dû à une mauvaise circulation du traceur dans la zone d'infiltration (BRGM, 2010).

A Riou Ferrand, les restitutions obtenues témoignent de vitesses supérieures à 100 m/h traduisant une organisation des circulations souterraines suffisamment développée tant dans la zone d'infiltration que dans la zone vadose.

Au moulin de Laumet et à Espérelle, les vitesses maximales, modales et apparentes sont homogènes et sont comprises entre 50 et 100 m/h ce qui est synonyme de systèmes traçages relativement mal organisés (BRGM, 2010).

La DTS de Laumet se distingue des autres par un maximum trois à cinq fois supérieur à celui des autres courbes. Cela est le résultat d'une restitution courte caractérisée par un flux massique de traceur élevé. Autrement dit, en peu de temps, l'ensemble de la masse restituée à cette émergence est ressorti.

La DTS attribuée de l'Espérelle suit une courbe plurimodale composée d'un premier pic étroit puis un second étalé (Figure 16). Cette restitution en deux temps implique deux cinétiques de circulation dans le système traçage, d'une part des écoulements organisés atténuant la dégradation du traceur et d'autre part un réseau souterrain complexe occasionnant un retard et une dispersion du traceur dans la zone d'infiltration (BRGM, 2010).

En outre, le système traçage d'Espérelle est caractérisé par un volume d'Allen nettement supérieur à celui de Laumet de Riou Ferrand (Annexe 8). Son réseau est donc le plus important avec des volumes considérables suivi de celui de Laumet et de Riou Ferrand.

En comparant avec l'opération de traçage menée en 2022 en période de basses eaux, la courbe de DTS construite pour la source d'Espérelle est de forme unimodale, son maximum est plus faible et elle est plus étalée dans le temps. Le régime hydrologique lors du traçage en 2022 a retardé et allongé la restitution, il a également engendré des flux massiques moins importants que ceux mesurés en hautes eaux (Figure 17).

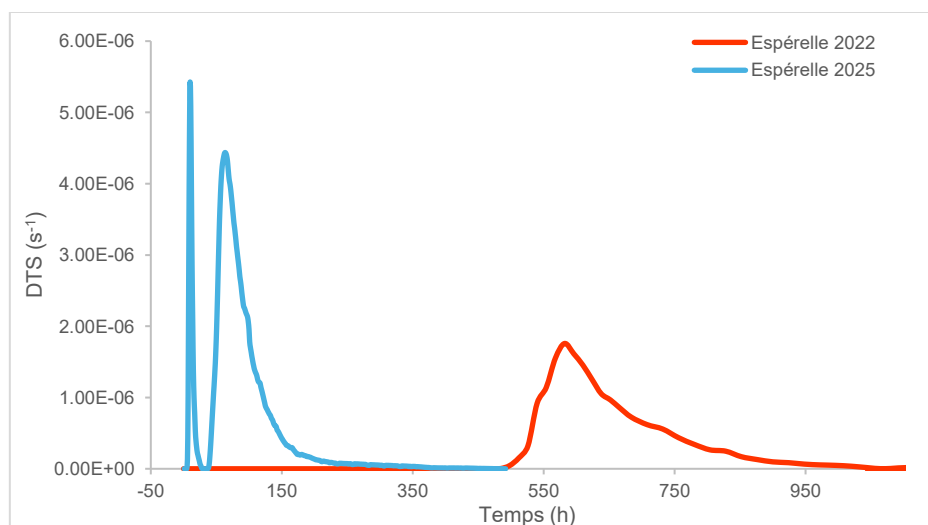


Figure 17 Comparaison des DTS en hautes et basses eaux pour la source d'Espérelle (RB)

Ces observations sont également visibles sur les courbes de concentrations en Annexe 9. D'autre part, le système traçage de Riou Ferrand répond de la même façon aux conditions hydrologiques que celui de l'Espérelle (Annexe 9).

4.2.2 Traçage de l'aven de la Tonne

4.2.2.1 Source du Moulin de Laumet

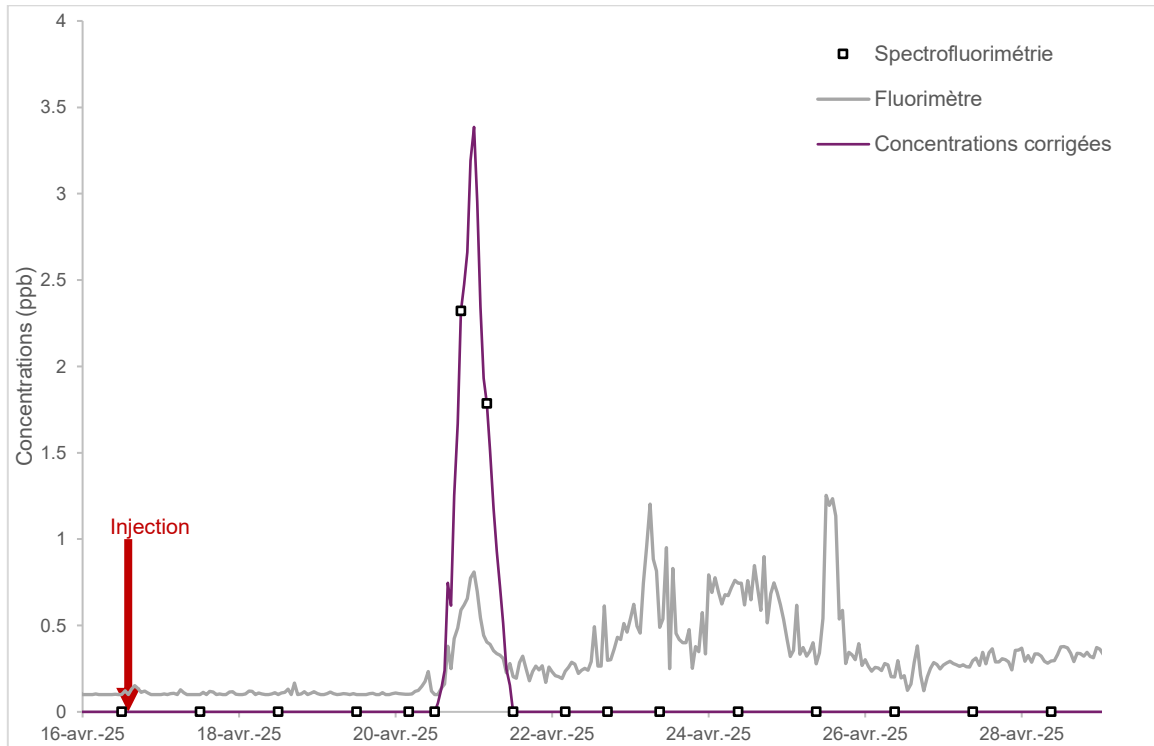


Figure 18 Restitution en sulforhodamine B à la source du moulin de Laumet (RB)

Le signal extrêmement bruité enregistré par le fluorimètre de terrain ne permet pas de confirmer la restitution en sulforhodamine B au moulin de Laumet. En revanche, deux échantillons d'eau se sont révélés positifs lors des analyses par spectrofluorimétrie (Figure 18). Prélevés à 8 heures d'intervalle, ils se trouvent de part et d'autre d'un pic de concentration mesuré par le fluorimètre. De ce fait, cette brève augmentation en concentration est considérée comme une restitution et non comme du bruit, ce qui est le cas du reste du signal, lié à la turbidité.

Les premières traces de sulforhodamine arrivent le 20 avril à 13h et atteignent une concentration maximale de 3.4 $\mu\text{g/L}$ avant de diminuer pour disparaître le 21 avril à 11h (Figure 18). Le pic aigu traduit une restitution rapide (22 heures) et faible avec un taux de restitution égal à 0.5% (Annexe 8).

En cas de pollution, si 50 kg sont injectés dans l'aquifère karstique dans les exactes conditions du traçage, une concentration en substance polluante de 17 µg/l pourrait être atteinte à la source du moulin de Laumet (dilution unitaire maximale = $3.4 \cdot 10^{-10} \text{ l}^{-1}$) (Annexe 8).

4.2.2.2 Source de Riou Ferrand

De la sulforhodamine B a été retrouvée aux sources de Riou Ferrand, en témoigne les variations de concentrations enregistrées par le fluorimètre de terrain et ajustées par les analyses des prélèvements en laboratoire (Figure 19).

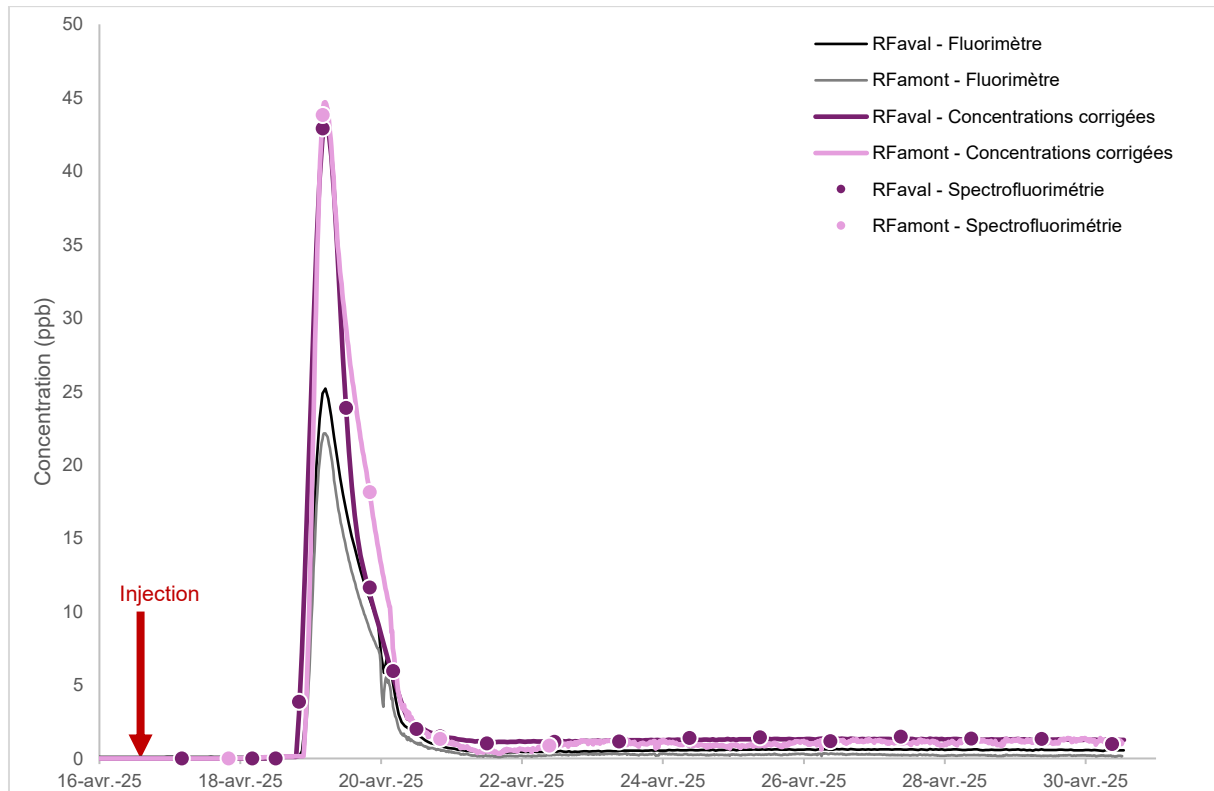


Figure 19 Restitution en sulforhodamine B à Riou Ferrand amont et aval (RB)

2 jours après l'injection dans l'aven de la Tonne les premières traces de sulforhodamine sont apparues à Riou Ferrand, le 18 avril à 8 heures d'intervalle entre les deux exutoires avec une vitesse moyenne de 128 m/h (Annexe 8).

La sortie se fait d'abord à Riou Ferrand aval à 13 h puis à Riou Ferrand amont à 21 h (Figure 19). Malgré ce décalage, les formes des courbes sont sensiblement les mêmes ce qui conforte l'idée que les exutoires de Riou Ferrand sont une même source.

En amont comme en aval, les restitutions de sulforhodamine B suivent un pic caractérisé par une augmentation brutale puis une diminution régulière. Les pics sont brefs et atteignent au maximum des concentrations supérieures à 40 µg/l. Les durées de restitution ne dépassent pas 3 jours. Bien que les mesures ne retombent pas à zéro, les restitutions sont considérées

terminées le 21 avril à 11h pour le calcul de la DTS, cependant elles se poursuivent encore à des concentrations inférieures, environ 1 µg/L (Figure 19).

D'après les estimations, 100 g et 750 g ont transité respectivement jusqu'à Riou Ferrand amont et Riou Ferrand aval, soit 1% et 7.5% de la masse de traceur injectée (Annexe 8).

Concernant la vulnérabilité de ce système tracé, un déversement accidentel de 50 kg de matières polluantes occasionnerait des concentrations de 216 et 223 µg/l au maximum sur les exutoires de Riou Ferrand.

4.2.2.3 Source de l'Espérelle

Le suivi d'une durée d'un mois mis en place pour le traçage dans l'aven de la Tonne n'a pas révélé la présence de traceur à la source de l'Espérelle d'après les mesures au fluorimètre et les analyses par spectrofluorimétrie (Figure 20).

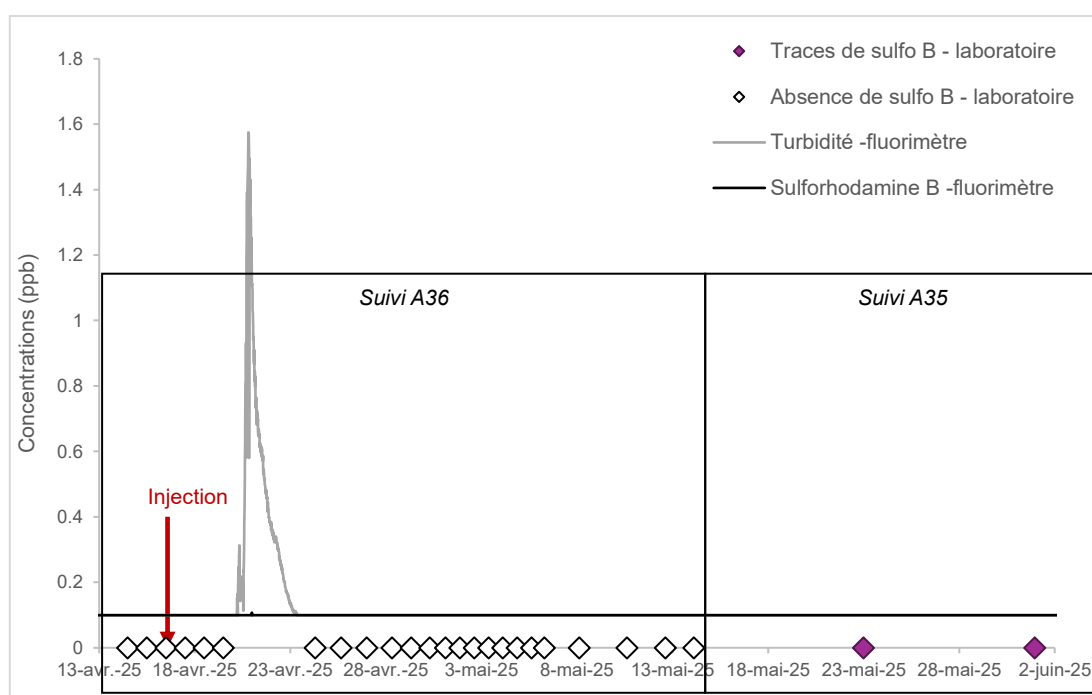


Figure 20 Restitution en sulforhodamine B à la source de l'Espérelle (RB)

Or, les analyses en laboratoire pour le suivi du traçage A35 ont mis en lumière des traces de sulforhodamine B dans 2 échantillons, le 23 mai à 23h et le 31 mai à 00h, soit un mois et une semaine après l'injection. A ce stade aucune mesure quantitative n'a été effectuée, la présence du traceur reste une hypothèse (Figure 20).

Au vue des restitutions obtenues pour le traçage injecté dans le bassin A36, une rapide estimation de la concentration maximale en sulforhodamine B à Espérelle peut être calculée. Concernant le traçage A36, entre Riou Ferrand et Espérelle, la concentration maximale diminue de 95% contre 58% entre le moulin de Laumet et Espérelle. En appliquant ces pourcentages de

diminution aux concentrations issues des restitutions dans le traçage de l'aven de la Tonne, la concentration maximale en sulforhodamine B à l'Espérelle serait comprise entre 1.4 et 2.1 µg/L.

4.2.2.4 Bilan de restitution

La sulforhodamine B injectée dans l'aven de la Tonne est ressorti sur plusieurs exurgences karstiques. Les premières traces apparaissent à Riou Ferrand puis à Laumet et plus tard il semblerait que la source d'Espérelle soit également touchée (Annexe 10). La multi-restitution est hiérarchisée similairement au traçage depuis le bassin A36. En tout 9% de la masse injectée a été retrouvée sur les points de suivi (Annexe 8). Ce taux ne comprend pas la masse restituée à Espérelle, ni les faibles concentrations résiduelles à Riou Ferrand dont le signal s'étend jusqu'au 6 juin, d'après le suivi du traçage A35. En supposant que la concentration résiduelle en sulforhodamine se stabilise à 1.1 µg/l, cela ferait augmenter d'environ 5% le taux de restitution.

Les DTS calculées à partir des restitutions en sulforhodamine B dessinent une réponse unimodale du système tracé à l'injection (Figure 21).

Les courbes de DTS de Riou Ferrand sont marquées par un second pic dû à un épisode de crue qui a peut-être remobilisé le traceur coincé dans la zone d'infiltration. Par ailleurs, celles-ci présentent des valeurs plus faibles et sont légèrement plus étalées dans le temps que celle de Laumet mais s'inscrivent avant cette dernière. Les vitesses d'apparition et modales associées à Riou Ferrand sont supérieures à 100 m/h. Bien que ces valeurs soient élevées, les vitesses apparentes sont quant à elles moins grandes, autour de 85 m/h. Les circulations souterraines sont donc plus établies que celui du système de Laumet (BRGM, 2010).

En effet, les vitesses qui caractérisent le système sont moyennement élevées, aux alentours de 70 m/h et l'homogénéité de ces dernières traduit une mauvaise organisation des écoulements souterrains. De surcroît, la durée de restitution extrêmement courte à Laumet explique la valeur élevée de son maximum de flux de traceur.

En outre, comme pour le traçage A36, le volume d'Allen estimé pour le système traçage de Laumet est supérieur à celui de Riou Ferrand, traduisant des volumes plus importants dans le réseau de Laumet.

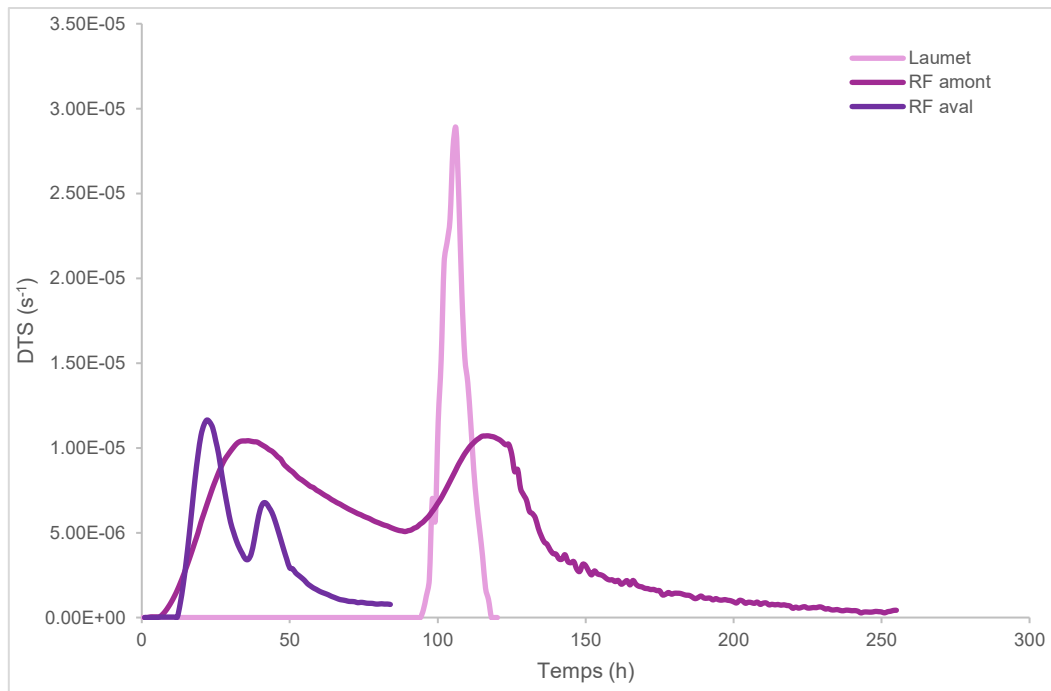


Figure 21 Comparaison des DTS issues du traçage de 2025 – sulforhodamine B

4.2.3 Traçage bassin A35

Un traçage artificiel a été réalisé le 16 mai 2025 depuis le bassin de rétention A35 de l'A75, situé à 1.5 km du bassin A36 sur la commune de La Cavalerie. Le suivi mis en place est le même que pour le multi-traçage A36-aven Tonne. Les résultats sont présentés succinctement ci-dessous.

Les 6 kg de fluorescéine injectés dans le bassin A35 sont ressortis sur les sources d'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand aval. Aucune trace n'a été enregistrée sur la source d'Homède.

Ces informations qualitatives seront prises en compte dans la délimitation des bassins d'alimentation des sources.

4.2.4 Chimie

4.2.4.1 Paramètres physico-chimiques

Le suivi des paramètres physico-chimiques sur les sources de Riou Ferrand et du moulin de Laumet ont permis d'observer les variations de température, pH, conductivité et oxygène dissous, de mars à juin 2025 avec une dizaine de mesures par paramètre et par exutoire.

Globalement les valeurs relevées sont typiques d'un domaine karstique. Le pH est compris entre 7.1 et 7.7, la température varie entre 11.5°C et 12°C et la conductivité est bornée entre 470 et 510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Batiot-Guilhe, s. d.) (Annexe 11).

Bien que ces mesures soient relativement homogènes, il semblerait que les ordres de grandeur et les variations des paramètres soit très similaires entre Riou Ferrand amont et aval alors que la source de Laumet se détache de ces dernières. La conductivité est le paramètre le plus révélateur. Les mesures faites sur les exutoires de Riou Ferrand coïncident sur l'ensemble de la série de données. Lors d'une crue enregistrée le 22 avril, la conductivité augmente à Riou Ferrand, passant de 485 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 503 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contrairement à Laumet où elle diminue à l'exact inverse (Annexe 11).

4.2.4.2 Majeurs de l'eau et éléments métalliques

L'analyse des ions majeurs de l'eau a été réalisée sur des prélèvements datant du 19 juin 2025. Les eaux des sources de l'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand appartiennent au faciès bicarbonaté calcique et magnésien avec une dominance des concentrations en ions HCO_3^- (Figure 22). Bien que leur faciès soit identique et hormis les concentrations en ion calcium qui sont proches (en moyenne 76 mg/l), de nombreuses disparités sont observées entre ces trois exutoires. Ces hétérogénéités ne suivent pas de tendance générale qui rapprocherait une source d'une autre d'un point de vue chimique.

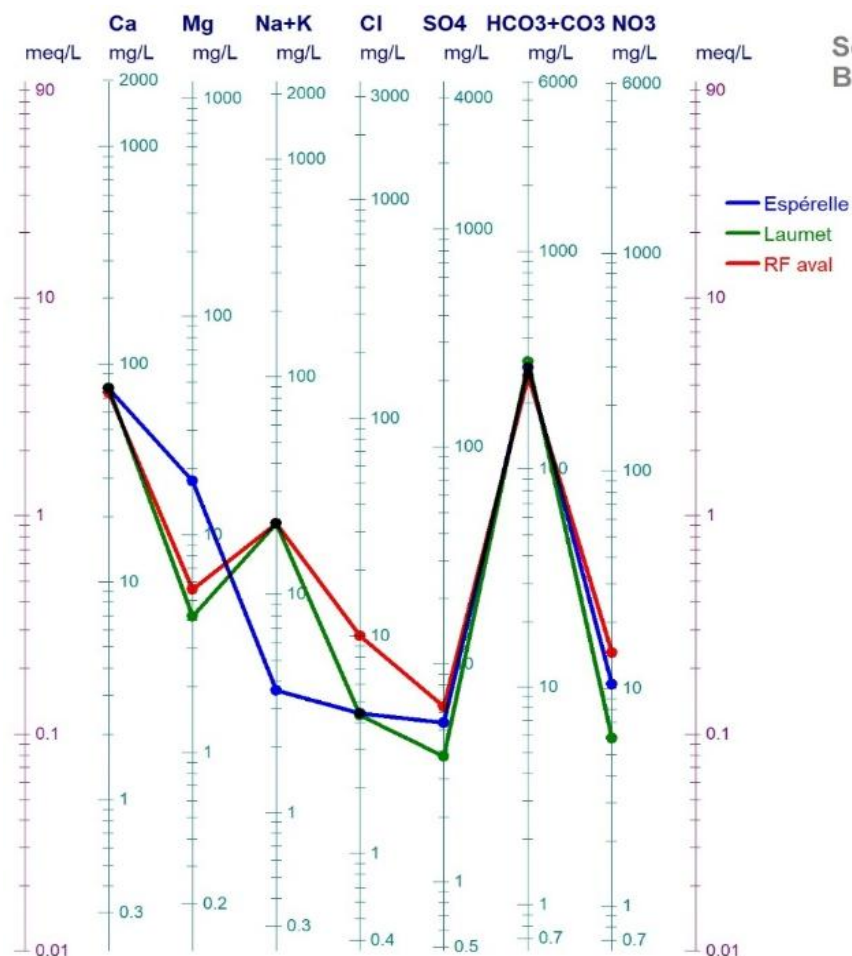


Figure 22 Diagramme de Schoëller-Berkaloff

La source de l’Espérelle est celle qui se trouve être la plus magnésienne avec 17.5 mg/l contre 4 à 5 mg/l pour les autres. Son eau est également bien plus pauvre en sodium avec seulement 3 mg/l. A l’inverse lorsqu’il s’agit des ions chlorure, nitrate et sulfate, c’est la source de Riou Ferrand qui présente des concentrations supérieures aux autres sources, particulièrement en Cl⁻ avec 10 mg/l contre 4 mg/l (Tableau 5 et Figure 22). A noter également que les teneurs en nitrates à Espérelle et à Riou Ferrand sont supérieures à 10 mg/l traduisant un apport anthropique (Tableau 5).

En parallèle, la silice est présente en faible quantité sur les trois sources avec une teneur maximale à l’Espérelle de 4.6 mg/l et une teneur minimale à Riou Ferrand égale à 1.3 mg/l (Tableau 5).

Tableau 5 Résultats des analyses hydrochimiques

<i>Eléments</i>		<i>Espérelle</i>	<i>Laumet</i>	<i>RF aval</i>
<i>CO₃</i>	mg/L	<6	<6	<6
<i>HCO₃</i>	mg/L	293	313	268
<i>Cl</i>	mg/L	4.4	4.3	10
<i>Ca</i>	mg/L	77	78	73.4
<i>Mg</i>	mg/L	17.5	4.2	5.61
<i>Na</i>	mg/L	3.04	20.7	15.6
<i>K</i>	mg/L	0.602	0.604	5.54
<i>SiO₂</i>	mg/L	4.64	2.44	1.33
<i>SO₄</i>	mg/L	5.4	3.8	6.4
<i>Fe</i>	µg/L	<1	<1	2.1
<i>NO₃</i>	mg/L	10.4	5.9	14.5
<i>PO₄</i>	mg/L	0.04	0.03	0.08
<i>Pb</i>	µg/L	<0.1	<0.1	<0.1
<i>Zn</i>	µg/L	1.8	2.2	2.1
<i>Al</i>	µg/L	5.8	4.4	7.1
<i>Cu</i>	µg/L	0.3	<0.2	0.6
<i>Mg/Ca</i>	-	0.23	0.05	0.08

Outre les éléments majeurs, des teneurs en éléments métalliques dissous dans l’eau ont également été analysés. Ces éléments sont le fer, le plomb, le zinc, l’aluminium et le cuivre. A première vue il semblerait que l’eau de la source de Riou Ferrand est légèrement plus riche en ces éléments puis celle de l’Espérelle et enfin Laumet (Figure 23). Cependant les teneurs en plomb, zinc et cuivre demeurent similaires d’une source à l’autre avec des valeurs respectivement équivalentes à 0.1 (au plus), 2 et 0.45 µg/l (Tableau 5). L’aluminium présente les plus fortes concentrations, supérieures à 4 µg/l. Malgré des teneurs distinctes, le pourcentage d’incertitude (40%) associé à la quantification de cet élément ne permet pas de différencier une source d’une autre (Figure 23).

En revanche, pour ce qui est du fer, la source de Riou Ferrand aval se détache des sources de l'Espérelle et de Laumet puisqu'elle contient 2.1 µg/l de fer dissous (Tableau 5). Les deux autres sources, quant à elles, sont caractérisées par des teneurs inférieures au seuil de quantification.

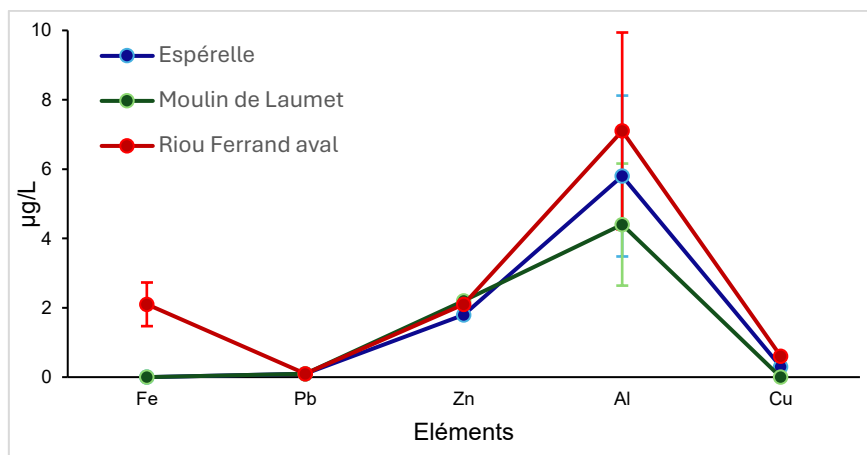


Figure 23 Teneurs en métaux (RB)

Pour l'ensemble de ces éléments métalliques, les teneurs sont largement inférieures aux normes de potabilité d'une eau (Arrêté relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, 2007).

En somme ces informations apportées par la chimie de l'eau suggèrent que les sources de l'Espérelle, du moulin de Laumet et de Riou Ferrand sont trois exurgences distinctes avec leur propre zone d'alimentation. Riou Ferrand amont et aval, du fait de leur proximité physico-chimique semble n'être qu'une seule source. Cette observation a déjà été mise en avant par les résultats des traçages et se confirme par l'hydrochimie.

Par ailleurs, au vue des teneurs de cette dernière en chlorures, nitrates et fer, la source de Riou Ferrand apparaît comme plus exposée à la pollution que les autres sources étudiées.

5 Exploitation des données de traçage

5.1 Bassin d'alimentation

Les résultats de l'opération de traçage remettent en cause les tracés des bassins d'alimentation des sources de l'Espérelle, du moulin de Laumet et de Riou Ferrand établis jusqu'à maintenant. Désormais doit figurer une zone d'alimentation commune à ces derniers. De nouvelles limites sont donc proposées grâce aux connaissances acquises lors de cette étude. La construction de ces nouveaux bassins hydrogéologiques prend en compte :

- Certaines limites de bassins déjà existantes
- Toutes les opérations de traçage fiables connues, dont celles réalisées en 2025 depuis les bassins de décantation A35 et A36 ainsi que l’aven de la Tonne
- Les débits des exutoires

La superficie des bassins est (ré)estimée à partir des débits en considérant un bilan hydrologique simplifié à l’échelle du bassin hydrogéologique tel que :

$$\text{PRECIPITATIONS} = \text{DEBITS} + \text{EVAPOTRANSPIRATION REELLE}$$

Ainsi à partir des mesures de précipitations, d’évapotranspiration et de débits la superficie est calculée comme suivant :

$$\text{Aire}_{\text{bassin}} = \frac{Q}{P - \text{ETR}}$$

Les données de précipitations sont issues de la station de Millau Larzac située au sud de La Cavalerie. D’après la chronique de précipitations disponible, la moyenne du cumul annuel de 1999 à 2024 est égale à 915 mm/an.

L’évapotranspiration réelle annuelle est estimée grâce à la formule de TURC (Turc, 1955) :

$$\text{ETR} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{(300 + 25T + 0.05T^3)^2}}}$$

avec P les précipitations annuelles (en mm) et T la température moyenne annuelle (en °C). La température est également tirée des données Météo France de la station du Larzac, plus précisément des valeurs moyennes quotidiennes de la température sous abri.

Pour ce qui est des débits moyens annuels, la chronique des débits de l’Espérelle a servi de référence. Son débit moyen interannuel s’élève à 1048 l/s contre 2087 l/s de mars à mai 2025 lors du fonctionnement des stations hydrométriques temporaires des sources de Laumet et Riou Ferrand. Un facteur 2 relie ces deux valeurs de débit, il est alors utilisé pour transformer les débits moyens mesurés de mars à mai 2025 à Laumet et Riou Ferrand en débits moyens interannuels et *in fine* obtenir une estimation des superficies équivalentes (Tableau 6).

Tableau 6 Débits moyens et aires d'alimentation des sources d'Espérelle, Laumet et Riou Ferrand

Sources	Espérelle	Laumet	Riou Ferrand
Q moyen interannuel (L/s)	1048	89	153
Aire bassin (km ²)	118	10	18

A noter que les débits de Riou Ferrand amont et aval ont été additionnés.

Les bassins d’alimentation des sources intégrant ces nouvelles superficies sont illustrés dans la Figure 24.

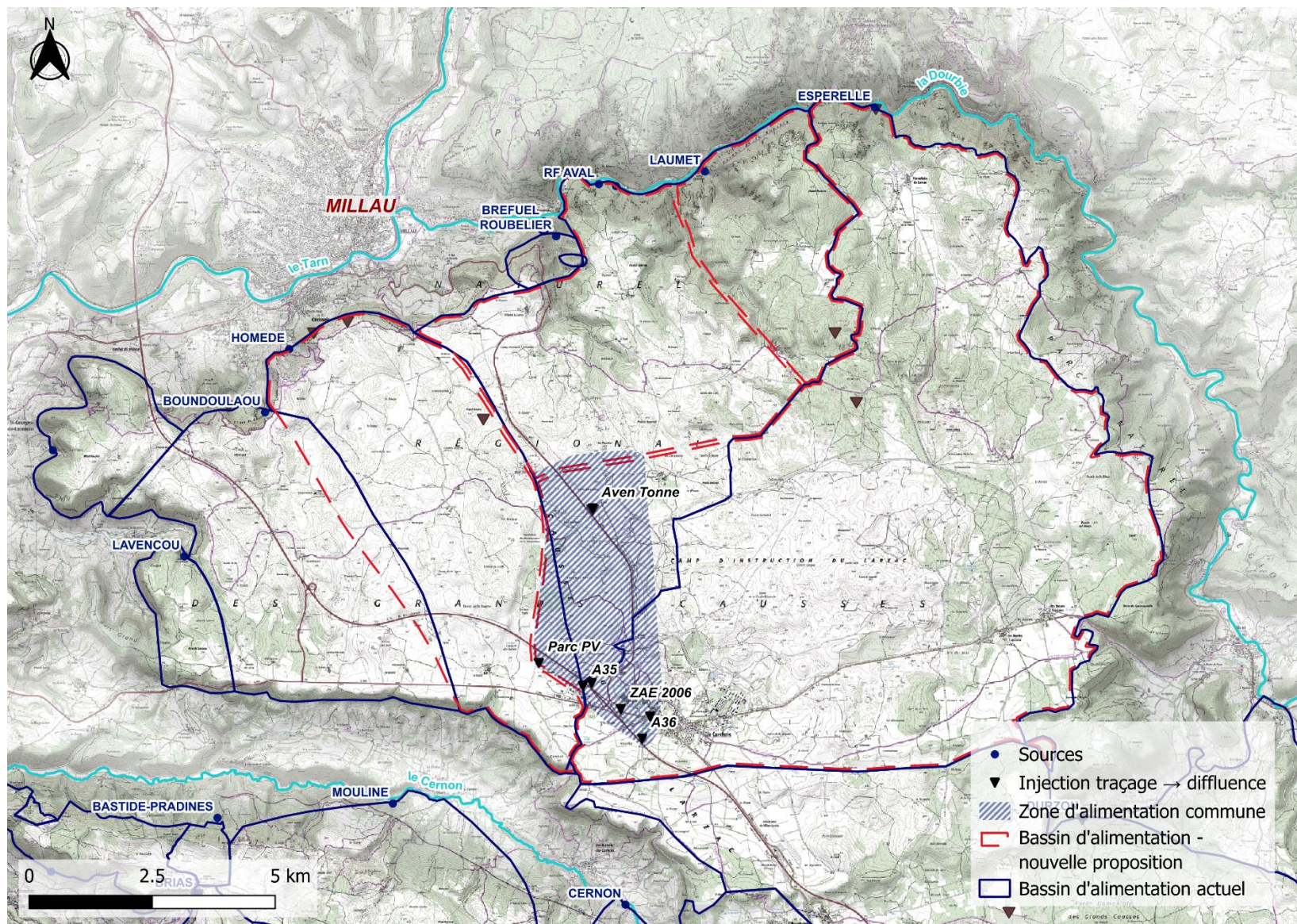


Figure 24 Nouveaux bassins d'alimentation (RB)

Afin d'établir la construction de ces nouveaux bassins, les résultats des traçages qui ont conduit à une restitution à Laumet et à Riou Ferrand ont été reconsidérés. Lors des opérations menées pour les projets du parc photovoltaïque et du village de marques, un suivi d'un mois à a été mis en place sur la source d'Espérelle.

Concernant le village de marques, de faibles concentrations de traceur ont été relevées à Espérelle mais interprétées comme des restes d'anciens traçages (Boyer, 2020). Pour le parc photovoltaïque, le signal du fluorimètre installé à Espérelle augmente mais ces variations ayant été attribuées à la turbidité, aucune analyse en laboratoire n'a donc été effectuée pour vérifier la présence du traceur (Boyer, 2022). Les informations dernièrement acquises laissent penser que lors de ces deux opérations de traçage, il y a bien eu une restitution à la source de l'Espérelle en plus de Laumet et Riou Ferrand.

De ce fait, le bassin d'alimentation de l'Espérelle a été étendu afin d'intégrer l'ensemble des points d'injection des traçages qui ont conduit à un phénomène de diffluence. Bien que la diffluence concerne également Laumet et Riou Ferrand, l'Espérelle est une ressource stratégique pour le territoire. Elle est donc prioritaire face aux enjeux de protection et possède, de surcroît, le système karstique principal c'est pourquoi les points d'injections ont été rattachés à son bassin.

Afin de ne pas omettre les connections hydrogéologiques entre ces points d'injections et les sources de Laumet et Riou Ferrand, une zone d'alimentation commune est symbolisée sur le bassin de l'Espérelle. La frontière avec le bassin de Riou Ferrand constitue sa limite nord et le bassin A36 matérialise sa limite sud (Figure 24).

D'un autre côté, les résultats du traçage réalisé depuis le bassin A35 ont permis de préciser les frontières du bassin d'alimentation de la source de l'Homède puisque le bassin A35 se trouve à moins d'un kilomètre de la coopérative des Bergers du Larzac qui est reliée hydrogéologiquement à la source d'Homède.

Ces nouveaux tracés sont une première hypothèse qui se base essentiellement sur les superficies de bassins estimées, ainsi que la zone d'alimentation commune délimitée à partir des opérations de traçage répertoriées, or ces données s'accompagnent de fortes incertitudes. La limite séparant les bassins de Laumet et de Riou Ferrand, auparavant confondus, devrait être confrontée à la géologie locale enfin d'en préciser le tracé.

5.2 Simulation d'une pollution (cas de la source de l'Espérelle)

Les deux opérations de traçage réalisées en hautes et basses eaux avec comme point d'injection le bassin de rétention A36 ont permis de construire deux DTS propre à ce système traçage pour des régimes hydrologiques en basses et hautes eaux. Les paramètres caractéristiques de la DTS sont donc connus pour des débits dont l'intervalle contient les variations observées au cours d'un cycle hydrologique. En première approche, la simulation d'une pollution accidentelle peut être caractérisée par le temps de premières apparitions en hautes eaux et la durée de restitution en basses eaux afin de prendre les précautions les plus fortes (BRGM, 2010).

Autrement, par extrapolation, il est possible de prédire la restitution d'une substance injectée de façon instantanée dans le milieu pour n'importe quel débit. Plusieurs travaux ont mis en évidence diverses relations entre débit et paramètre d'une DTS :

- Le maximum de la DTS est proportionnel au débit (Mull et al., 1988)
- Les temps caractéristiques de la DTS sont inversement proportionnels au débit suivant la forme $t = AQR^{-\alpha}$ (Morales et al., 2007)

Ces relations ont été observées dans des systèmes karstiques relativement simples, bien développés et parfois avec un accès direct à la zone noyée. Cependant cela reste des indicateurs intéressants à appliquer sur le système de l'Espérelle. Les données issues des DTS concernant la source d'Espérelle sont détaillées dans le Tableau 7.

Tableau 7 Paramètres de restitution permettant de simuler une pollution

	Maximum de la DTS (s ⁻¹)	Débit moyen Q* (L/s)	Temps modal (h)
2022 - Basses eaux	1.76E-06	160	596
2025 - Hautes eaux	5.43E-06	3473	201

*La moyenne des débits est calculée à partir des valeurs depuis la date d'injection jusqu'à la date correspondante à la plus forte concentration de traceur enregistrée.

Les relations obtenues ont pour équation :

$$Max\ DTS = 1.10^{-9} * Q + 2.10^{-6} \quad (1)$$

$$Temps\ modal = 3\ 574 * Q^{-0.4} \quad (2)$$

Cela signifie que lorsque le débit augmente, le flux massique maximal de la substance polluante en solution augmente conjointement selon l'équation (1). A l'inverse le temps modal, le temps écoulé entre l'injection et le pic de concentration, diminue selon l'équation (2). Pour un débit de moyennes eaux de 800 l/s, le pic de concentration apparaîtrait 14 jours après l'injection et le maximum de la DTS serait égal à $2.8.10^{-6}$ s⁻¹. A partir de ce maximum de DTS et de la masse restituée (déduite de la masse injectée et des pourcentages de restitution), la concentration maximale attendue à l'exutoire peut être estimée tel que : $C_{max} = \frac{Max\ DTS * M_{rest}}{Q}$.

6 INTERPRETATIONS ET DISCUSSION

Au vue des éléments présentés précédemment l'hypothèse suivante est proposée afin d'expliquer le comportement des aquifères karstiques du causse du Larzac septentrional.

Il existe une zone d'alimentation commune aux sources d'Espérelle, du Moulin de Laumet et de Riou Ferrand. Pour autant ces dernières sont trois émergences distinctes qui possèdent leur propre système karstique.

Au sein de cette zone, représentée sur la Figure 24, affleurent les formations du Bajocien et du Bathonien, constituées de dolomies, de calcaires et de calcaires à chailles (Figure 25). Les différentes natures de la zone épikarstique affectent sûrement les vitesses d'infiltration cependant les conditions d'injection des opérations de traçage n'ont pas permis de le mettre en avant (Bruxelles, 2001). Que ce soit en sortie de bassin de décantation où l'évacuation des eaux de pluie a induit une infiltration préférentielle dans le milieu au fil du temps, ou dans l'écoulement au fond de l'aven de la Tonne, les modalités d'injection ne reflètent pas une infiltration naturelle mais empruntent des trajets préférentiels.

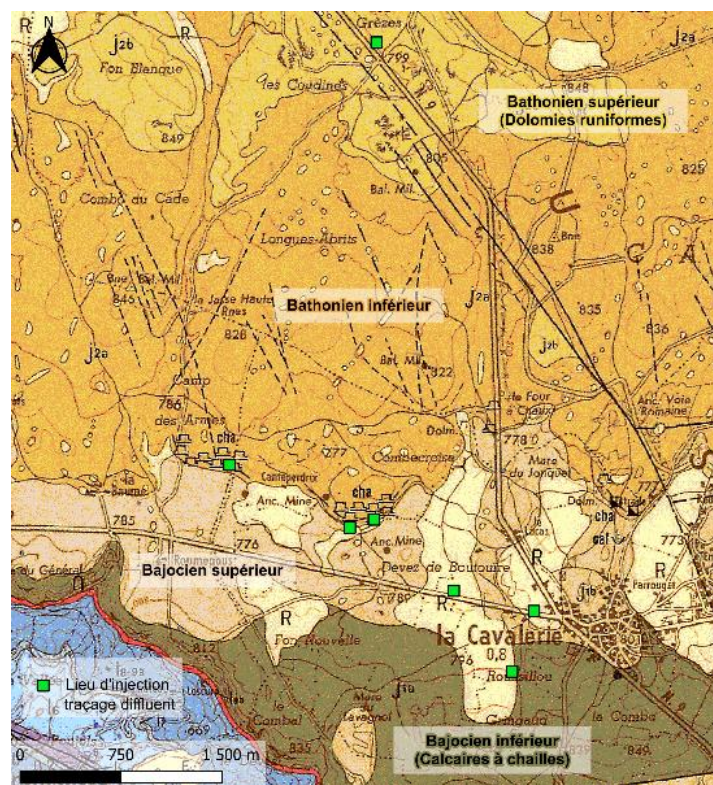


Figure 25 Formations affleurantes au sein de la zone d'alimentation commune (RB)

L'eau s'infiltrant à travers la zone d'alimentation commune parvient à la zone non saturée qui est connectée à trois sources : Espérelle, Laumet et Riou Ferrand. Ces dernières sont issues de système karstiques différents.

La source de l'Espérelle est caractérisée par deux cinétiques d'écoulement ; d'une part une infiltration rapide d'autre part une infiltration amortie en témoigne la forme plurimodale de la DTS. Elle possède également le taux de restitution le plus élevé, la plus longue durée de restitution ainsi que le volume d'Allen le plus important. L'ensemble de ces éléments indiquent que le réseau tracé est constitué d'un drain majeur auquel sont reliées des parties capacitatives. Ces dernières semblent de grande importance puisque le temps de séjour moyen est relativement long et les teneurs en magnésium, fortes (Batiot-Guilhe, s. d.). L'étude menée par le BRGM et le CNRS avait tirées les mêmes conclusions sur le système karstique de l'Espérelle et évaluait ses réserves à 4.5 millions de m³ (Ricard & Bakalowicz, 1996). En outre, la dimension des drains du réseau semble être largement développée en cohérence avec un débit moyen annuel de l'ordre de 1 m³/s et sa position au cœur d'une structure géologique majeure orientée nord-sud et composée de failles dont le pendage est vertical (GEOTER, 2019).

Les écoulements de cette source vauclusienne sont entraînés par un gradient de charge hydraulique inférieur à celui des deux autres sources énoncées car l'Espérelle se trouve plus haute en altitude et à une distance plus grande de la zone d'alimentation commune.

Le système traçage de la source du moulin de Laumet est marqué par un volume d'Allen intermédiaire à celui des deux autres sources mais bien plus proche de celui de Riou Ferrand. Il est également décrit par des vitesses d'apparition et apparente homogènes dont les valeurs sont inférieures à 100 m/h en hautes eaux. De fait, le réseau semble être mal organisé et composé de drains de dimensions relativement moyennes (BRGM, 2010). De plus, les taux de restitution mesurés très faibles et les temps de restitution courts signifient qu'une faible part des infiltrations introduite dans le milieu souterrain depuis la zone d'alimentation commune transite jusqu'à l'émergence de Laumet. La part d'alimentation par cette zone commune est probablement moindre devant le reste de son bassin hydrogéologique.

La source de Riou Ferrand se distingue par des vitesses de circulation élevées, supérieures à 100 m/h traduisant une bonne organisation de son réseau tracé (BRGM, 2010). Ces écoulements rapides expliquent la présence de traces d'impact anthropique dans l'hydrochimie (teneurs en Cl, NO₃ et en Fe). Son volume d'Allen, très faible devant ceux des deux sources précédentes, notamment celui de l'Espérelle, confirme l'idée d'une circulation préférentielle rapide au cœur d'un réseau de drains sans doute de moindre dimension.

Les sources du moulin de Laumet de Riou Ferrand sont soumises à un gradient de charge plus fort que celui de l'Espérelle et, comme cette dernière, elles sont alignées sur des failles mais de moindre ampleur. C'est pourquoi les débits issus de ces réseaux moins développés sont plus faibles que celui de l'Espérelle (drains de moindre dimension, davantage de pertes de charge).

Les données issues des opérations de traçages et des analyses hydrochimiques apportent des informations sur les particularités des trois systèmes karstiques des sources de l'Espérelle, de Laumet et de Riou Ferrand, en revanche beaucoup d'incertitudes demeurent sur la formation et le fonctionnement de la zone d'alimentation commune à ces sources.

Il semblerait que la source de l'Espérelle soit le principal système drainant, vient ensuite celui de Riou Ferrand puis celui de Laumet. En supposant qu'au sein des réseaux karstiques soumis au plus fort gradient, c'est-à-dire ceux de Laumet et Riou Ferrand, les circulations entraînent une érosion régressive des conduits. Cela impliquerait une hiérarchisation du réseau avec des cavités qui s'étendent jusqu'à atteindre la limite du bassin d'alimentation de l'Espérelle. Ainsi une partie des écoulements qui part initialement dans le système majeur de l'Espérelle est captée par ces deux réseaux annexes, en particulier celui de Riou Ferrand, moins développés en termes de dimension de conduits et de longueur de réseau.

Par ailleurs, dans la zone d'alimentation commune à proximité du bassin de Riou Ferrand, le réseau de cet exutoire domine dans l'organisation du drainage des eaux infiltrées.

Cette explication mise en avant ci-dessus n'est qu'une conjecture faite à partir des informations acquises sur le secteur et des notions de karstogénèse. Le potentiel fonctionnement hydrogéologique de ce domaine karstique est résumé dans la Figure 26.

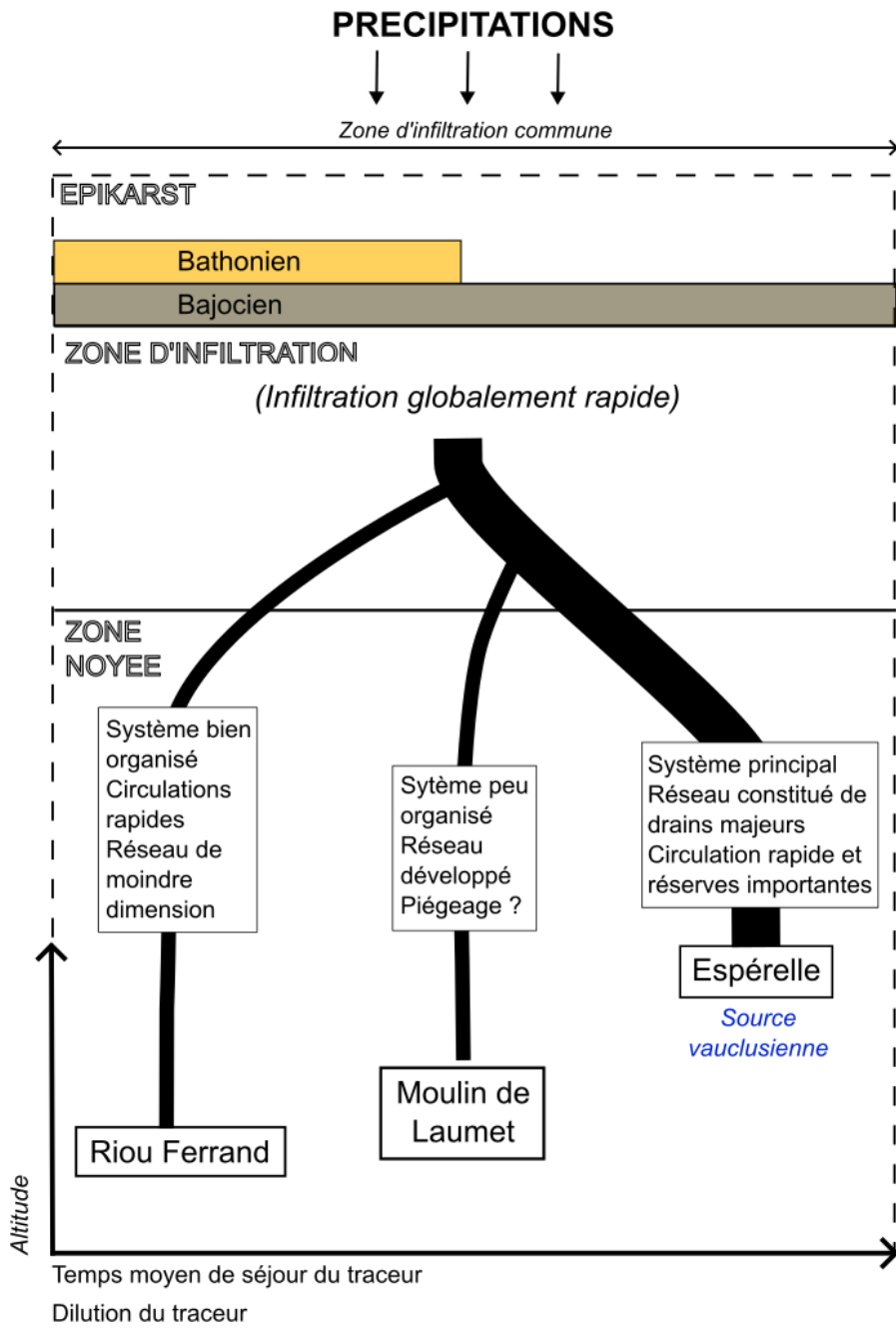


Figure 26 Modèle conceptuel (RB)

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La partie nord du causse du Larzac septentrional est constituée de plusieurs systèmes karstiques dont les réseaux se sont développés dans les formations du Jurassique moyen et supérieur. En surface l'infiltration des eaux de pluie est principalement contrainte par les formations carbonatées du Bathonien et du Bajocien. La recharge est uniquement autochtone (karst unaire) et alimente une dizaine de sources parmi lesquelles celle de l'Espérelle, du moulin de Laumet et de Riou Ferrand, situées le long de la Dourbie.

Lors de la période d'étiage de l'année 2022, la réalisation d'un traçage artificiel mettait en évidence une zone d'alimentation commune à ces trois sources. Jusqu'ici l'alimentation des trois sources étaient attribuées à deux bassins ; celui d'Espérelle et celui de Laumet-Riou Ferrand.

L'observation de ce phénomène de diffluence a remis en cause les opérations de traçage artificiel réalisé sur le secteur. Le suivi est-il suffisamment long pour mesurer toutes les restitutions ? Les trois sources étaient-elles suivies lors de chaque opération ? Le travail de recherche ainsi que la mise en place d'un mutli-traçage avec un suivi des débits de toutes les sources par l'installation de stations hydrométriques temporaires, a permis d'apporter des informations supplémentaires sur les systèmes karstiques tracés.

Les analyses hydrochimiques mettent en avant trois sources distinctes alimentées par leur propre système karstique mais les résultats des traçages indiquent qu'elles partagent une zone d'alimentation qui s'étend depuis le sud-ouest de La Cavalerie jusqu'à environ 5 km au nord. A partir de cette zone, les molécules d'eau infiltrées se répartissent sur les trois réseaux et ressortent chronologiquement à Riou Ferrand puis à Laumet et enfin à Espérelle. Cette hiérarchisation est induite par les différences de gradients hydrauliques.

Le système karstique de l'Espérelle est celui qui possède les conduits de plus grandes dimensions ainsi que les plus grandes réserves. Il pourrait être représenté par un drain majeur qui collecte les écoulements. En revanche les systèmes annexes de Riou Ferrand et de Laumet sont bien moins développés, mais relativement mieux hiérarchisés avec des circulations plus rapides.

De fortes incertitudes demeurent concernant l'explication de ce phénomène de diffluence. Seulement une hypothèse peut être proposée qui est la suivante, les bassins de Riou Ferrand et Laumet auraient une dynamique conquérante sur celui d'Espérelle puisqu'elles sont caractérisées par un gradient supérieur à celui de l'Espérelle, donc seraient davantage sujettes à subir une érosion régressive.

Si toutefois les informations acquises lors de cette étude ne permettent pas d'affirmer un modèle conceptuel, elles donnent lieu à une nouvelle appréciation des limites de bassins d'alimentation de ces trois sources avec une zone commune. Les nouveaux bassins d'alimentation proposés impliquent un agrandissement du bassin de la source d'Espérelle, qui pourrait conduire à la reconsidération de son périmètre de protection rapproché.

Ces nouvelles limites sont issues des estimations de superficie des bassins d'alimentation qui comprennent beaucoup d'approximations. Les mesures de débit des sources de Laumet et Riou Ferrand sont à l'origine d'incertitudes non négligeables. Pour des mesures plus précises il aurait fallu placer des seuils afin d'avoir des sections uniformes. De plus la période de tarage n'était pas suffisamment longue pour avoir une relation débit-hauteur d'eau correctement établie.

Il conviendrait également d'effectuer une nouvelle opération de traçage en moyennes eaux pour obtenir une meilleure simulation de pollution. En parallèle un autre point d'injection pourrait être testé afin de déterminer la limite nord-est de cette zone d'alimentation commune.

Enfin le logiciel MFIT, conçu pour modéliser des courbes de restitution de traceur, intègre des modèles de transport multiflux qui prennent en compte le concept de double porosité. Ces modèles sont adaptés à l'hétérogénéité d'un aquifère karstique ce qui permettrait d'acquérir des indications supplémentaires sur les systèmes, notamment la structuration du réseau, ses parties capacitatives et transmissives (Bodin, 2020).

8 REFERENCES

- Ambert, M., & Ambert, P. (1995). Karstification des plateaux et encaissement des vallées au cours du Néogène et du Quaternaire dans les Grands Causses méridionaux (Larzac, Blandas). *Géologie de la France*, 37-50.
- Apolit, C. (2020). *Traçage de la zone d'activité de la Devèze Les Bergers du Larzac—Connaissance hydrogéologique du Larzac Nord*. PNRGC.
- Apolit, C. (2021). *Traçage concernant le devenir des lixiviats de l'ancienne décharge du Roubelier*. PNRGC.
- Apolit, C. (2023). *Gestion du risque pour la santé publique Réalisation de traçages en aval des bassins de décantation de l'A75 : A29, A31, A32 et A36 situés sur des périmètres de protection de sources captées pour l'alimentation en eau potable*. PNRGC.
- Arrêté relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine (2007).
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000465574>
- Bakalowicz, M., & Ricard, J. (1994). *Etude hydrogéologique de la source de l'Espérelle et de son bassin d'alimentation en vue de l'établissement des périmètres de protection*.
- Batiot-Guilhe, C. (s. d.). *Rappels sur l'acquisition du faciès chimique des eaux et évolution géochimique d'une eau souterraine au cours du temps* [Support de cours]. HAO931T Traçage naturel des écoulements et vulnérabilité des aquifères.
- Blum, A., Chery, L., Barbier, J., Baudry, D., & Petelet-Giraud, E. (2002). *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie*.
- Bodin, J. (2020). MFIT 1.0.0 : Multi-Flow Inversion of Tracer breakthrough curves in fractured and karst aquifers. *Geoscientific Model Development*, 13(6), 2905-2924.
<https://doi.org/10.5194/gmd-13-2905-2020>
- Boyer, A. (2019). *Opération de traçages depuis le camp militaire du Larzac*. ANTEA.
- Boyer, A. (2020). *Projet de construction du village de marques à La Cavalerie (12)—Expertise hydrogéologique*. ANTEA.
- Boyer, A. (2022). *Projet de parc photovoltaïque des Clapas à La Cavalerie (12)—Expertise hydrogéologique*. ANTEA.
- BRGM. (2010). *Guide méthodologique—Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource*.

- BRGM. (2016). *Origine, caractérisation et distribution prédictive du Karst sur la bordure Nord-Aquitaine—OKaNA*.
- Bruxelles, L. (2001). Reconstitution morphologique du Causse du Larzac : Rôle des formations superficielles dans la morphogenèse karstique. *Karstologia*, 25-40. <https://doi.org/10.13140/2.1.1241.1521>
- Bruxelles, L., & Cailhol, D. (2022). Two plateau karsts at the origin of French karstology : The Grands Causses and the plateaus of the Jura / Deux karsts de plateaux à l'origine de la karstologie française : les Grands Causses et les plateaux du Jura. *Karstologia*, 79(1), 11-20. <https://doi.org/10.3406/karst.2022.3306>
- Bruxelles, L., & Camus, H. (2010). Géodynamique et évolution géomorphologique des Grands Causses. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/261176749_Geodynamique_et_evolution_geomorphologique_des_Grands_Causses
- Centre Presse Aveyron. (2024, février 7). *Armée : 1 350 militaires, 5 compagnies de combat, opérations : portrait de la 13e DBLE du camp militaire du Larzac en Aveyron*. <https://www.centrepresseaveyron.fr/2024/02/07/1-300-militaires-5-compagnies-de-combat-operations-portrait-la-13e-dble-du-camp-militaire-du-larzac-11748233.php>
- Cerema. (2025). *Le parc naturel régional (PNR). Outils de l'aménagement*. <https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/parc-naturel-regional-pnr>
- Commissariat Général au Développement Durable. (2019). *Les nitrates, le principal polluant des eaux souterraines*. notre-environnement. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>
- Corbel, J. (1954). Les phénomènes karstiques dans les Grands Causses. *Géocarrefour*, 29(4), 287-315. <https://doi.org/10.3406/geoca.1954.1990>
- Décret n°67-158, Pub. L. No. 67-158 (1962). <https://www.legifrance.gouv.fr/download/securePrint?token=ixvSg6xrBoADXmOMh8Fx&pagePdf=3>
- Durand, J. (2024). *Ancien Centre d'Enfouissement Technique du Roubelier à Millau (12) Suivi environnemental du site—Année 2023*. ANTEA.
- Fédération des parcs naturels régionaux de France. (s. d.). *Fonctionnement*. Parcs naturels régionaux de France. Consulté 24 août 2025, à l'adresse <https://www.parcs-naturels-regionaux.fr/les-parcs/fonctionnement>
- Fédération des Parcs naturels régionaux de France. (2023). *Guide des syndicats mixtes des parcs naturels régionaux*.

- Fédération des parcs naturels régionaux de France. (2024). *Les 59 Parcs en chiffres*. Parcs naturels régionaux de France. <https://www.parcs-naturels-regionaux.fr/les-parcs/comprendre-les-parcs/les-59-parcs-en-chiffres>
- Gagnebet, P. (2015, septembre 9). La Légion étrangère prend ses quartiers sur le plateau du Larzac. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/societe/article/2015/09/13/la-legion-etrangere-prend-ses-quartiers-sur-le-plateau-du-larzac_4754136_3224.html
- GEOTER. (2019). *Etude hydrogéologique du Causse Noir—Etude géologique et structurale*.
- INRAE. (s. d.). *Incertitudes sur les jaugeages*. BaRatin - Bayesian Rating Curves. Consulté 24 août 2025, à l'adresse <https://baratin-tools.github.io/fr/doc/topics/jaugeages/>
- INSEE. (s. d.). *Dossier complet – Commune de Millau (12145)*. Consulté 24 août 2025, à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-12145#chiffre-cle-1>
- Maréchal, J.-C., & Rouillard, J. (2020). Groundwater in France: Resources, Use and Management Issues. In J.-D. Rinaudo, C. Holley, S. Barnett, & M. Montginoul (Éds.), *Sustainable Groundwater Management: A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries* (p. 17-45). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32766-8_2
- Mondain, P.-H., & Muet, P. (2008). *Proposition d'une grille d'évaluation des résultats des traçages en milieu karstique (au moyen de traceurs fluorescents)*.
- Morales, T., Fdez. de Valderrama, I., Uriarte, J. A., Antigüedad, I., & Olazar, M. (2007). Predicting travel times and transport characterization in karst conduits by analyzing tracer-breakthrough curves. *Journal of Hydrology*, 334(1), 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.006>
- Mull, D. S., Liebermann, T. D., Smoot, J. L., & Woosley, L. H. (1988). *Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes*. https://digitalcommons.usf.edu/kip_data/9
- Plagnes, V. (1997). *Structure et fonctionnement des aquifères karstiques: Caractérisation par la géochimie des eaux* [These de doctorat, Montpellier 2]. <https://theses.fr/1997MON20193>
- PNRGC. (2015). *Le karst, un paysage calcaire*.
- PNRGC. (2017). *Gestion du risque pour la santé publique: Réalisation de traçages afin de redéfinir les limites des bassins hydrogéologiques des sources captées pour l'alimentation en eau potable de l'Homède et du Boundoulaou*.
- PNRGC. (2020). *Traçages de l'Aven des 4 Vents Connaissance hydrogéologique du Larzac Nord*.
- PNRGC. (2024a). *Charte 2024-2039*.

PNRGC. (2024b). *Rapport d'activités 2024*.

Quinif, Y., & Bruxelles, L. (2011). L'altération de type « fantôme de roche » : Processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 17(4), Article 4. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9555>

Ricard, J., & Bakalowicz, M. (1996). *Connaissance, aménagement et protection des ressources en eau du Larzac Septentrional*. BRGM.

SNO KARST. (s. d.). *Karst?* SNO KARST Website. Consulté 20 août 2025, à l'adresse <https://sokarst.org/en/general-public-karst/>

Subias, C. (2006). *Création d'une zone d'activité sur la commune de La Cavalerie*. Calligee.

Taillé-Rousseau, J. (2024). *Avis sur le bilan ex post de l'autoroute A75 Sud entre Sévérac-le-Château et l'A9* (Nos. 013779-01). IGEDD.

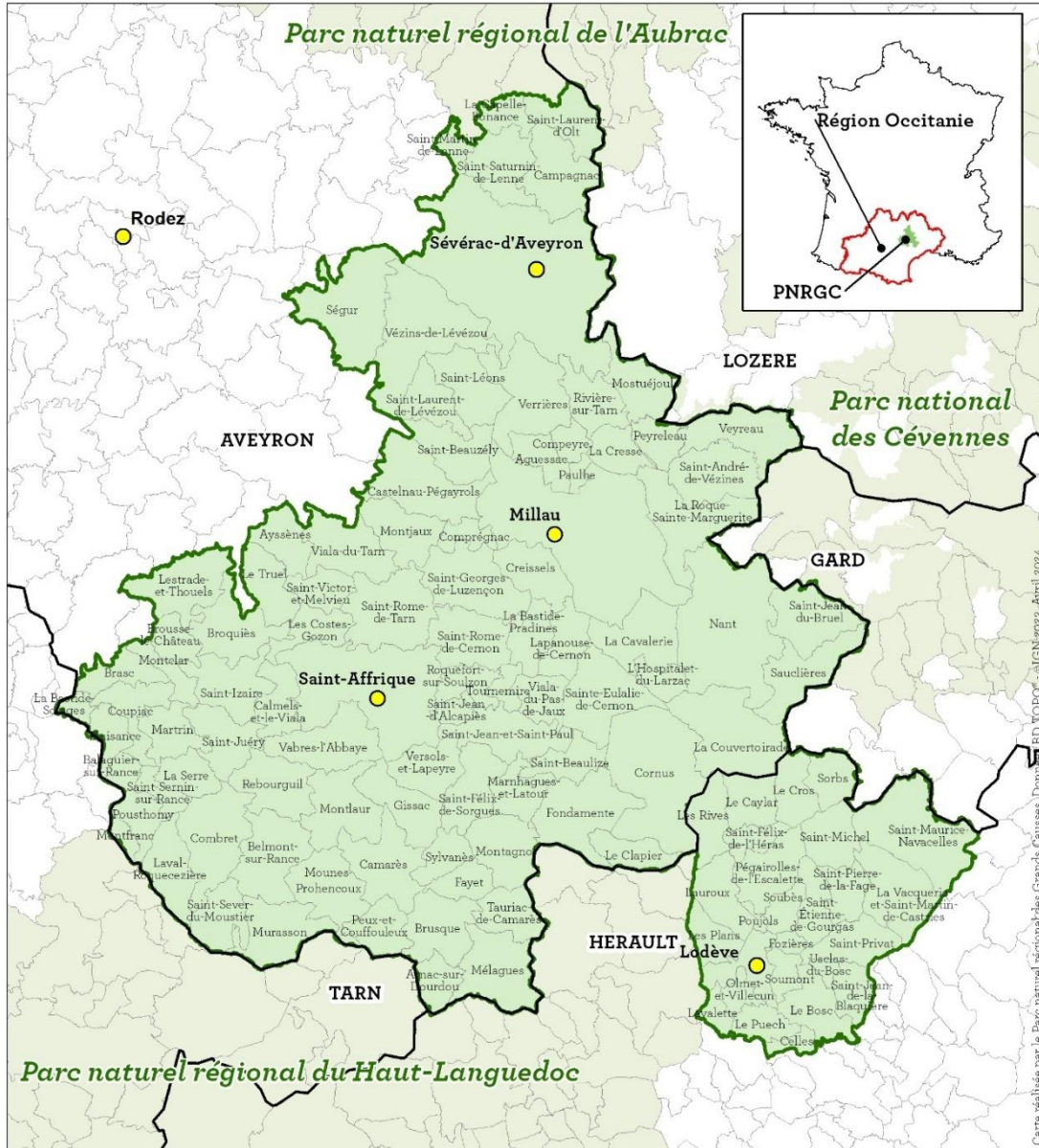
Turc, L. (1955). Le bilan d'eau des sols : Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Journées de l'hydraulique*, 3(1), 36-44.

9 ANNEXES



Territoire du Parc naturel régional des Grands Causses

Avril 2024



Légende

- Périmètre du Parc naturel régional des Grands Causses
- Périmètre des Parcs naturels régionaux et Parc national limitrophes

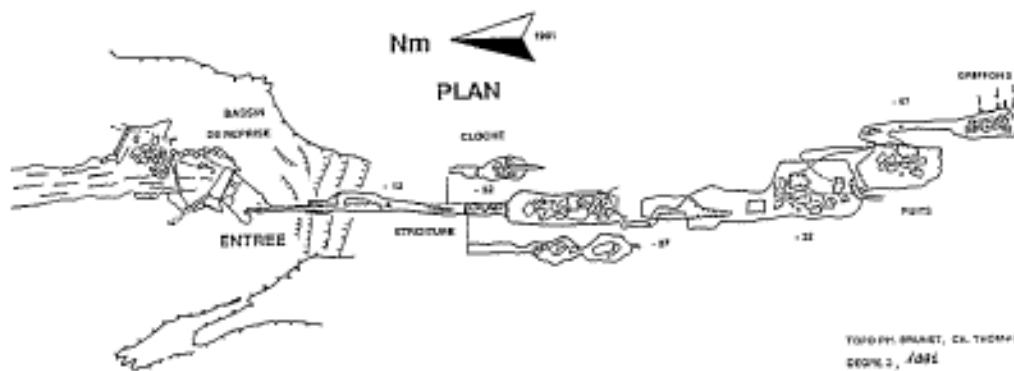
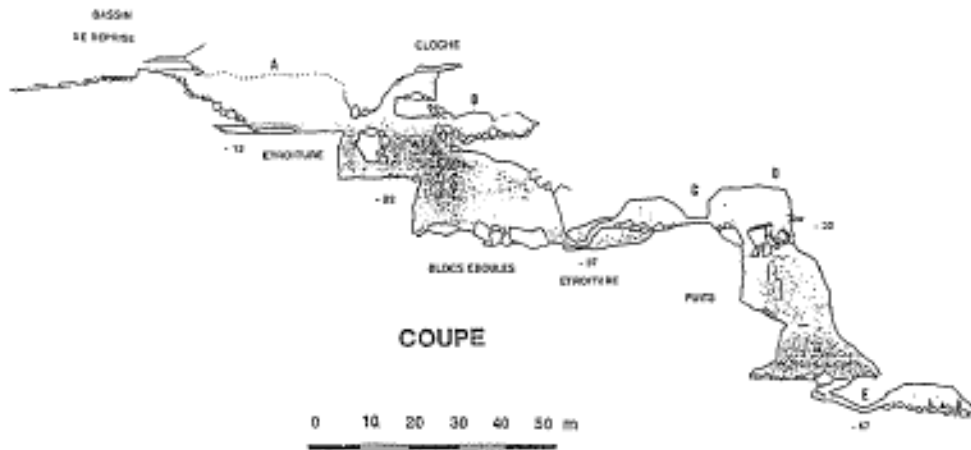
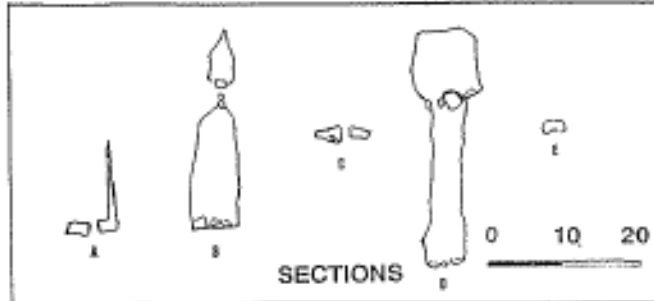
- Limites communales
- Limites départementales
- Région Occitanie



Annexe 1 PNRGC

plan et coupe de l'exurgence de l'Espérelle, La Roque-Ste-Marguerite (12)

ESPÉRELLE



TOPO PH. BRUNET, CH. THOMAS
DEPIÉ 2, 1991

plan relevé par Ph. Brunet et Ch. Thomas (1991)

Annexe 2 Plan et coupe du réseau exploré de la source de l'Espérelle (Ricard, 1996)

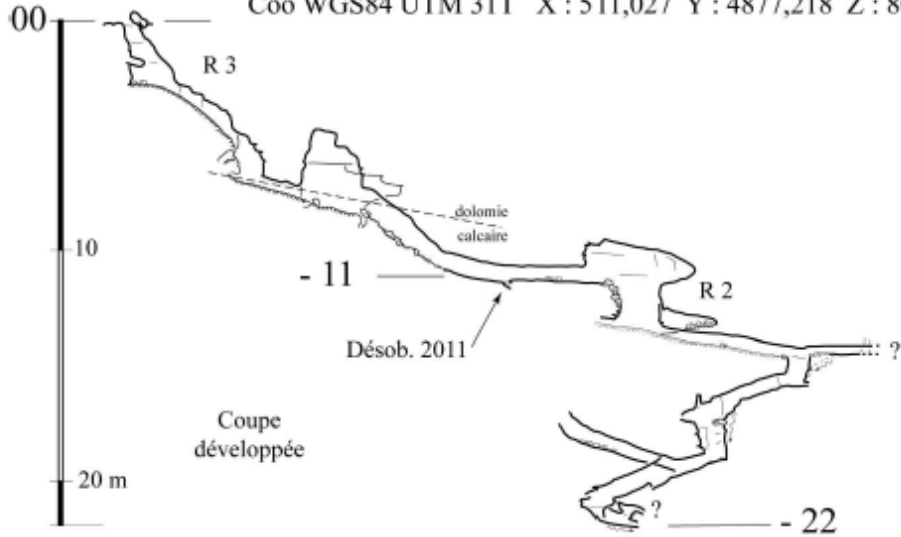
N°	INJECTION				RESTITUTION				Sources
	Date	Point	Traceur	Masse (g)	Sortie	1° apparition (j)	Taux (%)	Conditions hydrologiques	
1	24/04/1992	Rajal del Gorps	F	1000	Riou Ferrand aval	2.4	54		(Ricard & Bakalowicz, 1996)
2	05/07/1992	Aven du Bateau	F	800	Espérelle	2.3	57		(Ricard & Bakalowicz, 1996)
3	12/02/1993	Doline de la Baume	F	3200	Homède	3.2	98		(Ricard & Bakalowicz, 1996)
4	22/02/1993	Aven du Renard	F	2900	Espérelle	8.1	80.7		(Ricard & Bakalowicz, 1996)
5	14/04/1995	Aven de Longs Abrits	F	2100	Riou Ferrand aval	1.9	15		(Ricard & Bakalowicz, 1996)
6	30/05/2006	ZAE Millau Sud	F	7000	Laumet Riou Ferrand aval	13 5.9	6	BE	(Subias, 2006)
7	22/02/2017	Bassin de rétention A34	F	1500	Homède	0.67	28	HE, décrue	BD traçages
8	05/03/2017	Aven du Terry	S B	200	Homède	0.76	97	HE, décrue	(PNRGC, 2017)
9	30/03/2017	Aven Peyre Blanche	F	1500	Homède	47.5	40	HE, décrue	BD traçages
10	05/04/2018	Aven A6	F	9000	Espérelle	7.3	16	HE	(Boyer, 2019)
11	05/04/2018	Aven A1	S	11000	Espérelle	6.2		HE	(Boyer, 2019)
12	20/09/2018	Aven A6	F	9000	Espérelle	27	3	BE	(Boyer, 2019)
13	20/09/2018	Aven A1	S B	6000	Espérelle	17		BE	(Boyer, 2019)
14	07/02/2020	Bergers du Larzac	F	9000	Homède	3.1	60	HE	(Apolit, 2020)
15	09/02/2020	Aven des 4 vents	S B	4000	Laumet	3		HE	(PNRGC, 2020)
16	20/05/2020	Village de marques	F	15000	Laumet Riou Ferrand amont/ aval	8.4 3.3	9.1	ME	(Boyer, 2020)
17	25/08/2020	Décharge du Roubelier	F	300	Brefuel Riou Ferrand amont	? 2.3		BE	(Apolit, 2021)
18	22/01/2021	Décharge du Roubelier	F	1500	Brefuel Riou Ferrand amont/aval Roubelier	? 1.4 5.5		ME	(Apolit, 2021)
19	03/11/2021	Parc photovoltaïque	F	13500	Laumet Riou Ferrand amont/ aval	17.3 7.9	0.1	ME, décrue	(Boyer, 2022)
20	19/09/2022	Bassin de rétention A36	F	9000	Espérelle Laumet Riou Ferrand amont/ aval	20 15 5.4	>30.7	BE	(Apolit, 2023)

Annexe 4 Traçages artificiels réalisés sur le causse du Larzac au nord de La Cavalerie

Aven de la Tonne

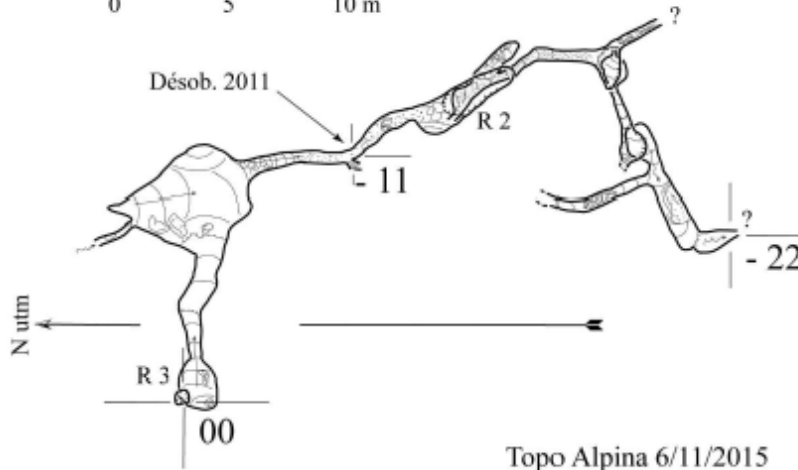
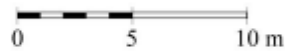
Causse du Larzac, commune de Millau, Aveyron

Coo WGS84 UTM 31T X : 5 11,027 Y : 4 877,218 Z : 805 m.



Plan

(dével. topo 57 m)



Topo Alpina 6/11/2015

Dessin : Caillou

Annexe 5 Plan et coupe de l'aven de la Tonne

ANALYSE PAR SPECTROFLUORIMETRIE

(Laboratoire Analyses Biogéochimiques et Isotopiques des Hydro-Systèmes - HydroSciences Montpellier)

Nombre d'échantillons analysés par source et par traceur

Sources	Espérelle	Homède	Laumet	RF amont	RF aval	Manuels
Fluorescéine	36	27	21	26	19	6
Sulforhodamine B	24	24	20	5	23	6

L'analyse par spectrofluorimétrie est la méthode de détection de traceurs fluorescents la plus fiable. Chaque traceur fluorescent est caractérisé par une longueur d'onde d'excitation et une longueur d'onde d'émission.

Deux méthodes permettent de révéler si oui ou non le traceur recherché est présent dans l'échantillon d'eau. La combinaison des deux méthodes assure une forte fiabilité.

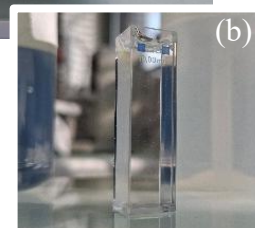
Le spectre d'émission consiste à fixer la longueur d'onde d'excitation et observer sur quelles longueurs d'ondes l'émission est exprimée.

Le spectre d'excitation c'est l'inverse. La longueur d'onde d'émission est fixée et la longueur d'onde d'excitation associée à cette émission est recherchée.

Pour ces analyses seul le spectre d'émission a été réalisé.



Figure 27 Spectrofluorimètre (a) et cuve en quartz (b)



D'après les données des fluorimètres de terrain les concentrations en fluorescéine ne dépassent pas 60 µg/L et 30 µg/L pour la sulforhodamine B, de ce fait les concentrations des solutions utilisées pour l'étalonnage ont été adaptées afin d'encadrer au mieux la gamme de concentrations attendues :

Solution étalon n°	Fluorescéine	Sulforhodamine B
1	100 µg/L	50 µg/L
2	30 µg/L	20 µg/L
3	10 µg/L	5 µg/L
4	1 µg/L	1 µg/L



Les blancs des sources de Riou Ferrand amont et de l'Espérelle ont servi à diluer le traceur pour obtenir ces différentes concentrations.

Ces solutions étalons sont utilisées pour ajuster l'ouverture des fentes du monochromateur pour s'assurer de pouvoir détecter les faibles concentrations comme les plus élevées.

Paramètres méthodes d'analyse (spectre d'émission)

Fluorescéine :

- Excitation : 490 nm
- Fentes : 1.5 / 3 nm
- Fenêtre d'observation : 450 à 700 nm

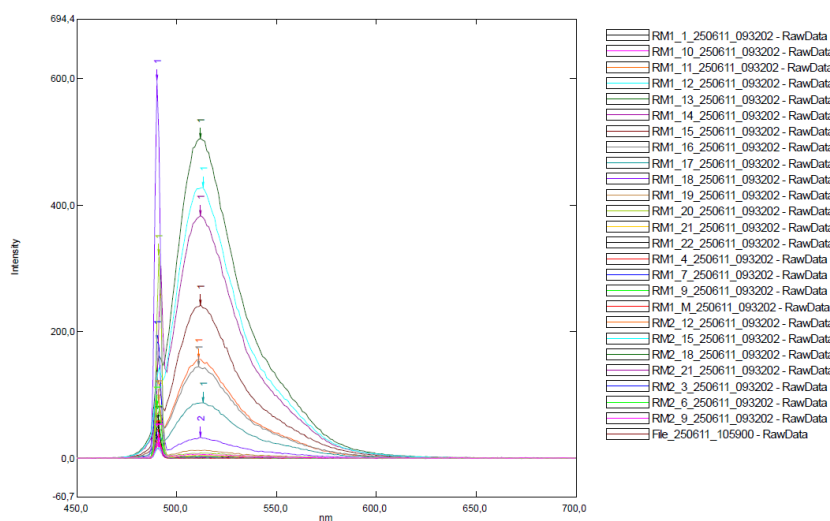
Sulforhodamine B :

- Excitation : 562 nm
- Fentes : 1.5 / 10 nm
- Fenêtre d'observation : 450 à 650 nm

Sur le graphique ci-dessous sont représentés les spectres de l'ensemble des échantillons prélevés à Riou Ferrand amont. Le premier pic correspond à l'excitation ici fixée à 490 nm et le second pic observé sur quelques échantillons affiche un maximum situé autour de 512 nm la longueur d'émission caractéristique de la fluorescéine. Ce traceur est présent dans l'eau de cette source.

Overlay Graph Report

Print Date: 11/06/2025 11:01:27



Les intensités mesurées par le spectrofluorimètre sont converties en concentrations de traceur grâce aux solutions étalons. Pour chaque solution de concentration connue l'intensité correspondante est relevée. Les couples intensité/concentration permettent de construire une courbe d'étalonnage qui suit une fonction linéaire.

Pour les deux traceurs utilisés les équations obtenues sont les suivantes :

Fluorescéine : $y = 9.0762x - 9.5564$ ($R^2 = 0.9995$)

Sulforhodamine B : $y = 13.099x - 18.291$ ($R^2 = 0.9966$)

Annexe 6 Analyses par spectrofluorimétrie

STATIONS HYDROMETRIQUES TEMPORAIRES

Objectif : connaître les débits des sources au cours d'une opération de traçage

Matériels mis en place

- 3 échelles limnimétriques de 1m
- 2 sondes de pression OTT PLS
- 1 OTT ecoLog 500(?)

Les trois cours d'eau issus des sources sont guidés par des murs en pierre, leur fond est rocheux. Aucun seuil n'a été construit, l'emplacement des appareils a été choisi au droit des portions les plus « uniformes » en amont de « seuil » naturel.



Moulin de Laumet



Riou Ferrand amont



Riou Ferrand aval

Jaugeage par dilution – traceur salin (NaCl)

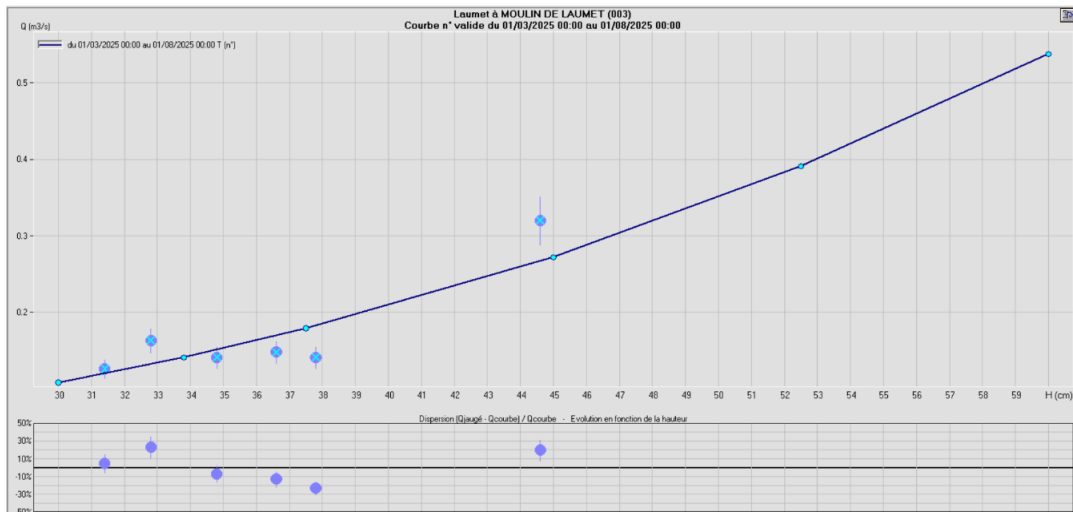
Matériel : seau, sel (1 à 2 g par L/s), sonde conductivité

Lors de chaque jaugeage cinq mesures de conductivité sont effectuées pour cinq concentrations connues de sel dilué dans l'eau de la source. Ces mesures serviront à obtenir l'équation qui relie concentration et conductivité par régression linéaire.

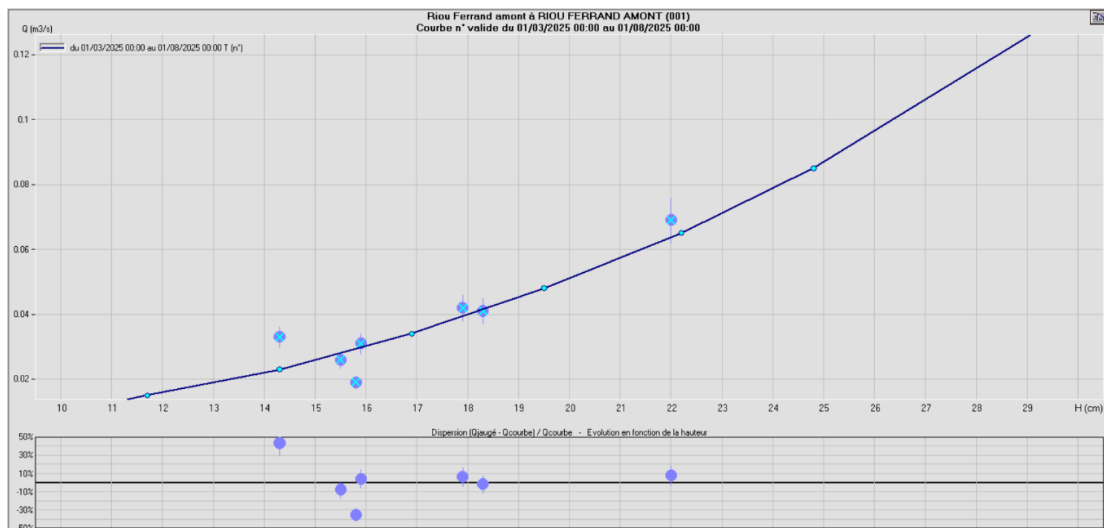
Le mélange de sel et d'eau est déversé dans le cours d'eau dans lequel, quelques mètres en aval, une sonde de conductivité est placée et fait des mesures en continu à un pas de temps fixe. Les conductivités enregistrées sont alors converties en concentrations puis intégrées sur le temps, connaissant la masse injectée, il est alors possible, à partir de ces éléments, de quantifier le débit en se basant sur la conservation de la masse. La partie calculatoire est réalisée grâce au logiciel SolutionNaCl développé par l'INRAE.

Sources	Masse de sel (g)	Nombre de jaugeages validés
Moulin de Laumet	200	6
Riou Ferrand amont	100	7
Riou Ferrand aval	300 à 400	8

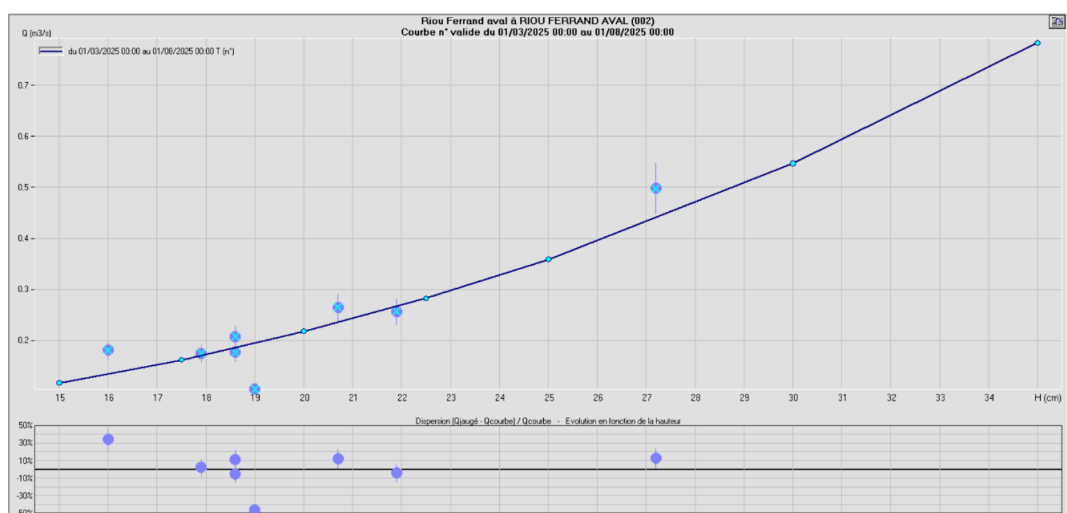
Le dépouillement des jaugeages s'est fait à l'aide du logiciel Barème. La relation entre débit et hauteur d'eau est établie suivant la forme de l'équation de contrôle standard $Q = a(H-H_0)^b$.



Moulin de Laumet : $Q = 1.15 \cdot 10^{-5} (H + 4.7)^{2.58}$



Riou Ferrand amont : $Q = 1.83 \cdot 10^{-5} (H + 1.8)^{2.57}$



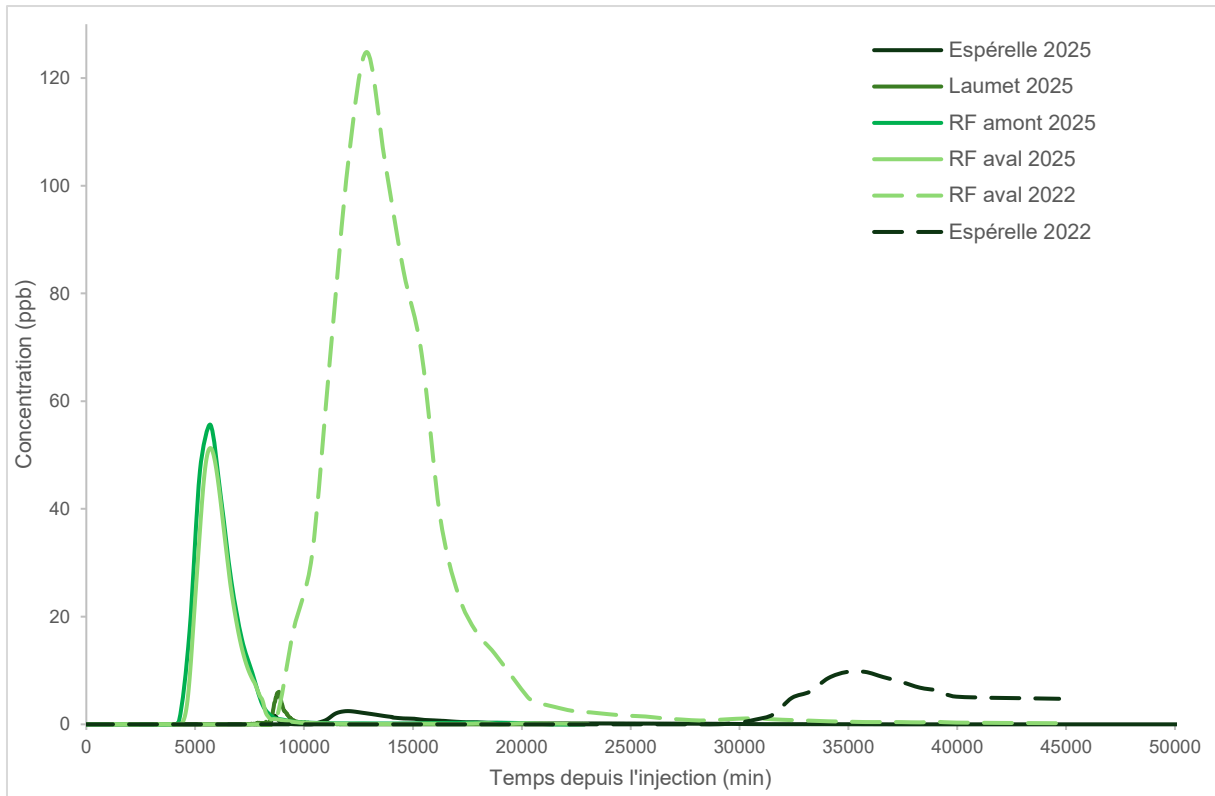
Riou Ferrand aval : $Q = 7.05 \cdot 10^{-5} (H + 3.1)^{2.56}$

A partir des équations de contrôle et des mesures de hauteur d'eau par sonde de pression l'évolution des débits a pu être estimée sur la période de suivi du traçage.

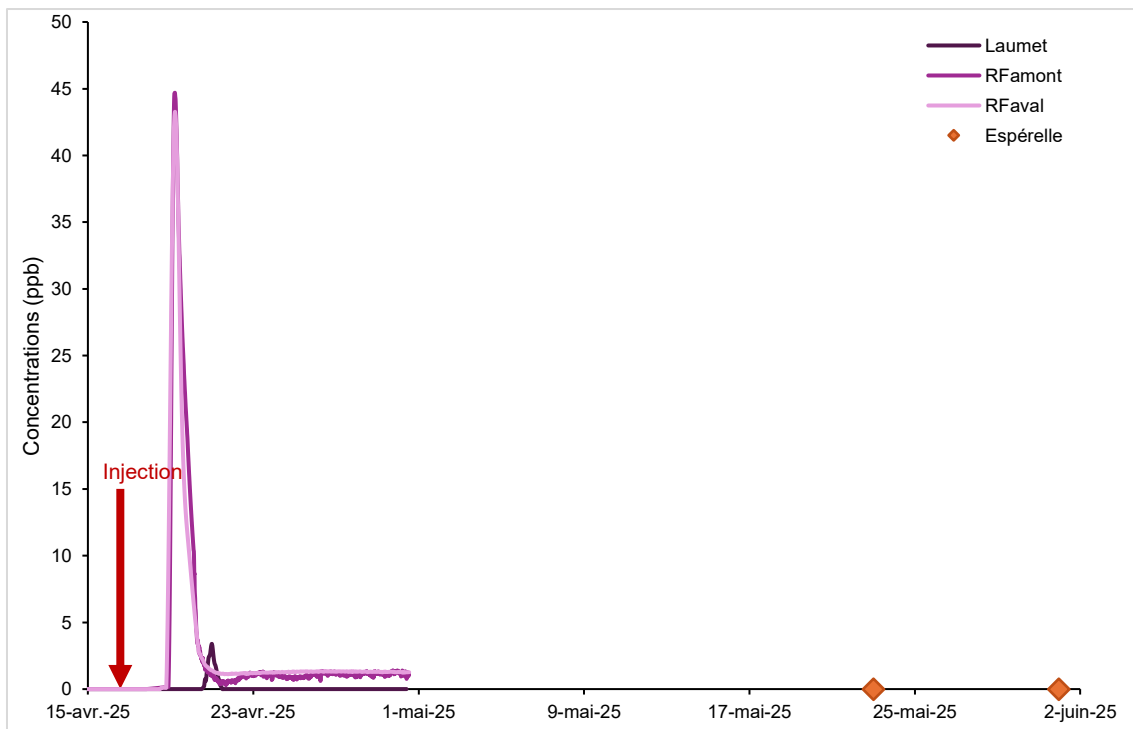
Annexe 7 Détails sur l'installation des stations hydrométriques temporaires

Lieu injection		Bassin A36				Aven de la Tonne		
Traceur		Fluorescéine				Sulforhodamine B		
Masse injectée (g)		9 000				10 000		
Restitution		Espérelle	Laumet	RF amont	RF aval	Laumet	RF amont	RF aval
Distance (m)		13 260	11 588	11 191	11 332	7 227	6 606	6 440
Masse restituée (g)		2 799	95	174	1 243	49	105	748
Restitution %		31.1	1.1	1.9	13.8	0.5	1	7.5
TEMPS	Durée de restitution (j)	20.1	2.5	4.7	5.5	0.9 (22h)	2.6	2.9
	Moyen de séjour (j)	9.1	6.2	4.3	4.4	4.4	3.2	3.2
	1 ^{ère} apparition (j)	5.8	5.6	2.6	2.7	4	2.3	2
	Modal (j)	8.4	6.1	4	4	4.4	2.6	2.6
VITESSE	D'apparition (m/h)	95	86	178	177	76	119	137
	Modale (m/h)	66	79	118	119	68	105	102
	Apparente (m/h)	61	77	108	108	68	87	85
	Moyenne (m/h)	64	78	111	111	68	89	88
Concentration max (ppb)		2.5	6	55.6	51.3	3.4	44.7	43.3
Section Allen (m ²)		561.1	19.9	0.9	7	24.7	1	8.6
Volume Allen (m ³)		7 440 348	230 564	9 491	79 266	178 255	6 749	55 279
Dilution unitaire (L ⁻¹)		2.8.10 ⁻¹⁰	6.7.10 ⁻¹⁰	6.1.10 ⁻⁹	5.7.10 ⁻⁹	3.4.10 ⁻¹⁰	4.5.10 ⁻⁹	4.3.10 ⁻⁹

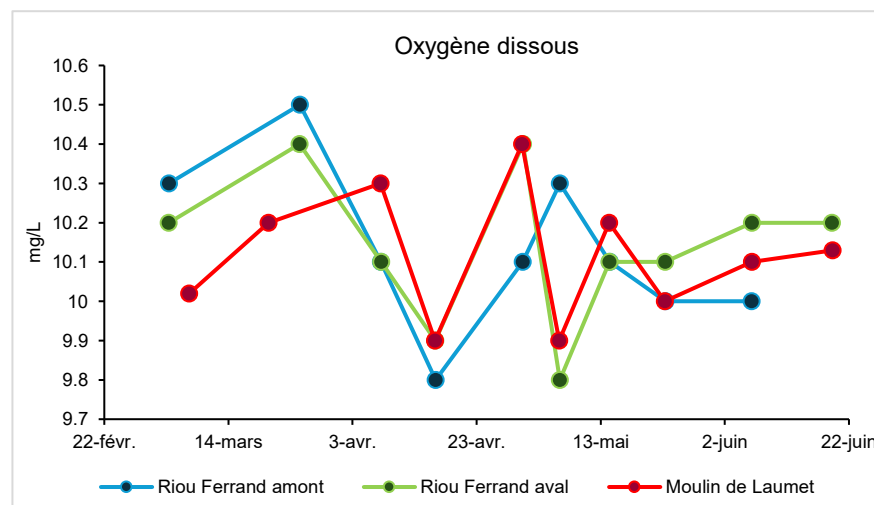
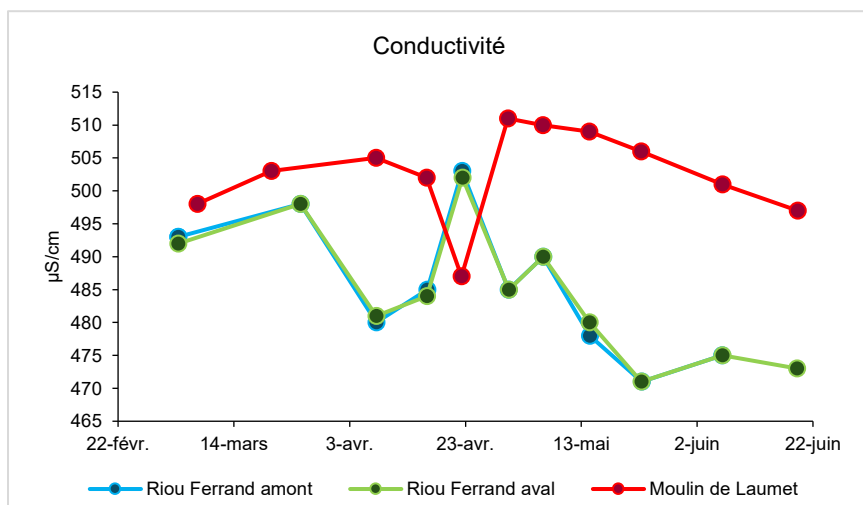
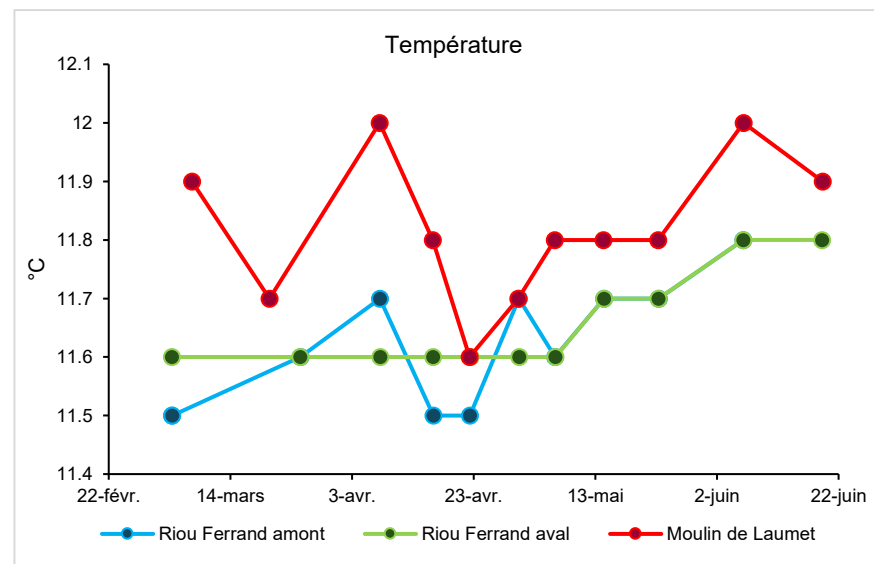
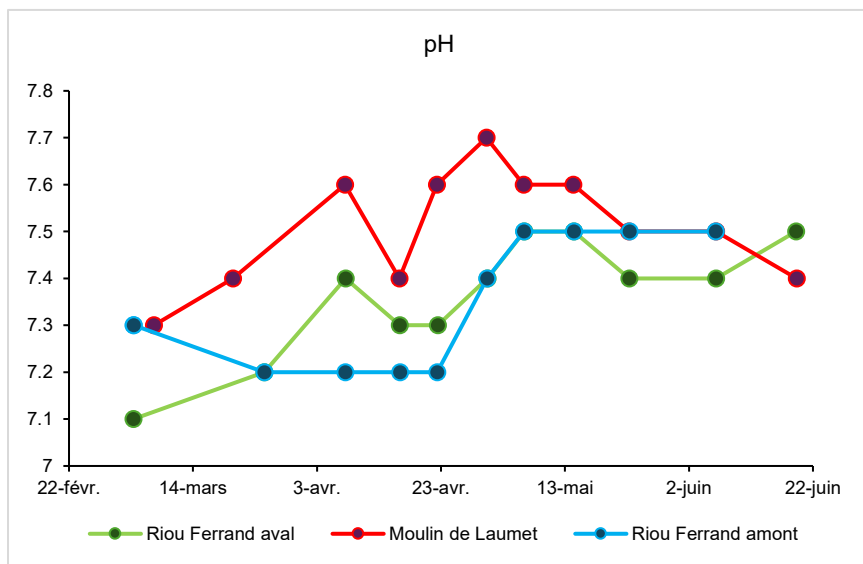
Annexe 8 Récapitulatif des résultats du multi-traçage



Annexe 9 Courbes de restitution en fluorescéine de quatre exutoires



Annexe 10 Courbes de restitution en sulforhodamine B de quatre exutoires



Annexe 11 Variations des paramètres physico-chimiques sur les sources de Laumet et de Riou Ferrand

10 RESUME

Ce rapport s'intéresse au fonctionnement hydrogéologique du causse du Larzac nord, situé au sein d'un domaine karstique emblématique : les Grands Causses.

Plusieurs systèmes karstiques sont présents sur la partie nord du causse du Larzac. Ils se sont développés dans les formations carbonatées du Jurassique et constituent la principale ressource en eau potable du territoire, notamment pour l'agglomération de Millau. Leur hétérogénéité, avec des conduits de tailles variables et une double porosité, confère à ces systèmes une grande complexité et également une forte vulnérabilité face aux pollutions.

Une opération de traçage, réalisée en septembre 2022, sur la commune de La Cavalerie met en avant un phénomène de diffluence. Cela supposerait l'existence d'une alimentation commune à plusieurs exutoires karstiques de la vallée de la Dourbie, la source de l'Espérelle de Laumet et de Riou Ferrand. A la lumière de cette hypothèse, d'anciens traçages sont reconsidérés et semblent également témoigner de diffluence. Cette observation remet donc en question la délimitation des bassins de l'Espérelle et de Laumet–Riou Ferrand jusqu'alors admise.

Les résultats d'une nouvelle opération de traçage menée en avril 2025 confirment que la zone de d'alimentation identifiée, située à proximité de La Cavalerie, alimente successivement trois réseaux karstiques distincts : Riou Ferrand, Laumet puis Espérelle. Cette hiérarchisation des restitutions est liée aux gradients hydrauliques et à la dimension des conduits. Le système de l'Espérelle constitue le drain majeur, avec les plus grandes réserves, tandis que ceux de Riou Ferrand et Laumet présentent des circulations plus rapides au sein de conduits de moindre dimension.

Ces deux derniers bassins, caractérisés par des gradients plus élevés, exerceraient une dynamique conquérante susceptible d'empiéter sur le bassin de l'Espérelle.

Si cette étude ne permet pas de définir un modèle conceptuel complet, elle permet une nouvelle appréciation des limites des bassins d'alimentation, incluant un élargissement du bassin de l'Espérelle. Ces modifications impliquent des conséquences pour la gestion de la ressource.

Ainsi, ce travail contribue à enrichir les connaissances sur la dynamique des aquifères karstiques du Larzac, en mettant en évidence la complexité des circulations souterraines.

Mots clés : karst, Larzac, diffluence, traçage artificiel, bassin d'alimentation, hydrochimie, Espérelle, Laumet, Riou Ferrand, PNRGC.