

5. Opération de traçage

5.1. Protocole de traçage mis en œuvre

5.1.1. Généralités

La technique du traçage artificiel est couramment utilisée en hydrogéologie karstique afin de vérifier l'existence d'une relation entre une zone d'infiltration et un ou plusieurs exutoires, ceci permettant de préciser les limites des bassins d'alimentation des sources. Cette opération constitue également une véritable simulation de pollution, en évaluant la dilution et l'épuration naturelle au sein même du système karstique.

L'opération de traçage nécessite cependant de respecter certaines conditions, notamment :

- L'injection du traceur doit se faire de façon instantanée, de manière à obtenir une réponse impulsionnelle facilement interprétable ;
- La masse de traceur injectée doit être suffisante pour que sa présence puisse être détectée à l'exutoire ;
- L'échantillonnage à la sortie du système karstique doit être effectué à un pas de temps adapté, afin de caractériser les variations de concentration du traceur restitué en fonction du temps ;
- Les mesures de débits couplées à des mesures de hauteurs d'eau doivent être réalisées au niveau des exutoires afin de pouvoir effectuer un bilan massique de l'opération. Il correspond au rapport entre la masse injectée et la masse restituée.

Un résultat de traçage doit toujours être illustré par la courbe de restitution (donnant la répartition des concentrations en fonction du temps).

On retiendra qu'une opération de traçage permet de calculer de nombreux paramètres dont :

- L'analyse du **flux de sortie**, permettant d'obtenir la masse de traceur restituée et donc le pourcentage de restitution en traceur, caractéristique des phénomènes d'autoépuration du système karstique ;
- Le **temps moyen de transit** et la vitesse apparente permettant de décrire le déplacement du nuage ;
- Le **taux de dilution** subi par le traceur qui présente un intérêt pour une simulation de pollution.

Le traceur injecté ne va parcourir qu'une partie seulement du système karstique, appelée système-traçage (cf. Figure 10). Les résultats obtenus indiquent donc des informations sur les modalités de transit de l'eau marquée et par conséquent sur la structure de la partie du système concernée par ce transit.

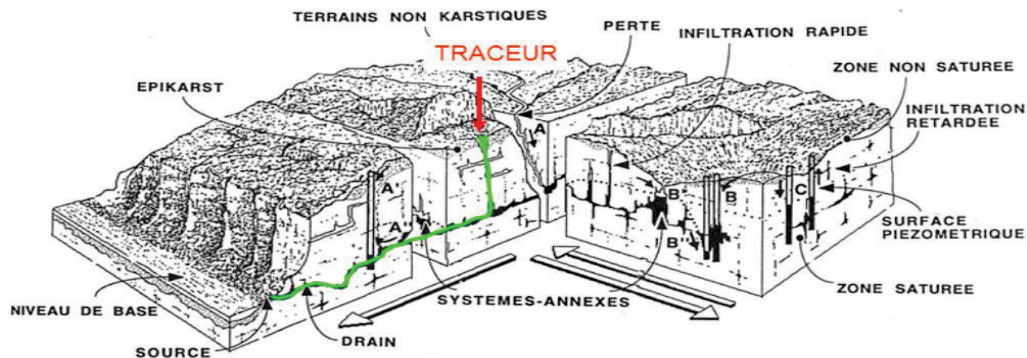


Figure 11 : Schéma de principe d'un aquifère karstique (MANGIN, 1975) et trajet potentiel d'un traceur

Le trajet du traceur et donc de la molécule polluante dépend de la structure verticale du système karstique qui peut se schématiser ainsi :

- Une couverture (sol) plus ou moins épaisse et ralentissant les écoulements ;
- Une zone d'infiltration (ou Zone Non Saturée) plus ou moins fracturée ;
- La zone noyée drainée vers l'exutoire.

- Le sol,
- La Zone Non Saturée (ZNS),
- La Zone Saturée (ZS).

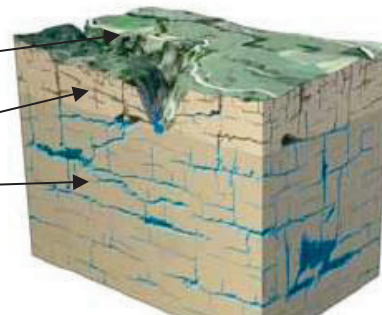


Figure 12 : Schéma d'un aquifère karstique (BRULHAM et al., 2004)

5.1.2. Phase préalable de prévention

L'injection de traceur, si elle n'est pas maîtrisée, peut engendrer une coloration des eaux souterraines (sources, forages...) ou superficielles (ruisseaux, cours d'eau...). Cette coloration, totalement inoffensive pour la santé humaine et le milieu aquatique, peut constituer une gêne importante vis-à-vis des usagers de l'eau (exploitants agricoles, particuliers, syndicats d'eau, pêcheurs). Il est donc primordial de communiquer sur l'innocuité du traceur et sur l'objectif de l'opération.

Ainsi, l'ARS, la DDT, le PNRGC, les mairies de LA CAVALERIE, MILLAU, CREISSELS et LA ROQUE-SAINTE-MARGUERITE, la gendarmerie nationale, le SDIS ont été prévenus par courriels une semaine avant l'injection des traceurs.

De plus, l'une des sources suivies se situant sur une propriété privée, le propriétaire a été préalablement contacté. Sa présence est nécessaire pour toute intervention à la source.

5.1.3. Choix du point d'injection

La campagne géophysique ainsi que les sondages à la pelle mécanique réalisés ont permis de choisir l'endroit le plus propice à l'injection du traceur.

Ainsi, il a été décidé d'injecter le colorant dans la fosse 3 (Figure 5), présentant une meilleure vitesse d'infiltration.

5.1.4. Choix des points de suivi

Les points de suivi ont été choisis au regard des traçages réalisés précédemment sur le secteur et de l'importance des sources AEP présentes également. Ces points sont présentés dans le Tableau 6 et sur la Figure 12.

Au total, 5 sources ont été suivies et deux d'entre elles sont exploitées pour l'alimentation en eau potable collective et une pour l'alimentation en eau potable d'un particulier.

Points de suivi	X (m, Lambert 93)	Y (m, Lambert 93)	Z (m NGF)	Observations
Source de l'Esperelle	716 771	6 335 785	397	Source captée pour l'alimentation en eau potable de MILLAU
Source de Riou Ferrand amont	711 510	6 334 105	411	Source non captée située dans les coteaux du causse face au lieu-dit Le Monna
Source de Riou Ferrand aval	711 126	6 334 220	379	Source non captée située dans les coteaux du causse face au lieu-dit Le Monna
Source du Moulin de Laumet	713 293	6 334 510	391	Source captée pour l'alimentation en eau potable de l'habitation au moulin de Laumet
Source de l'Homède	704 838	6 330 884	500	Source captée pour l'alimentation en eau potable de CREISSELS

Tableau 7 : Présentation des sources suivies pour l'opération de traçage

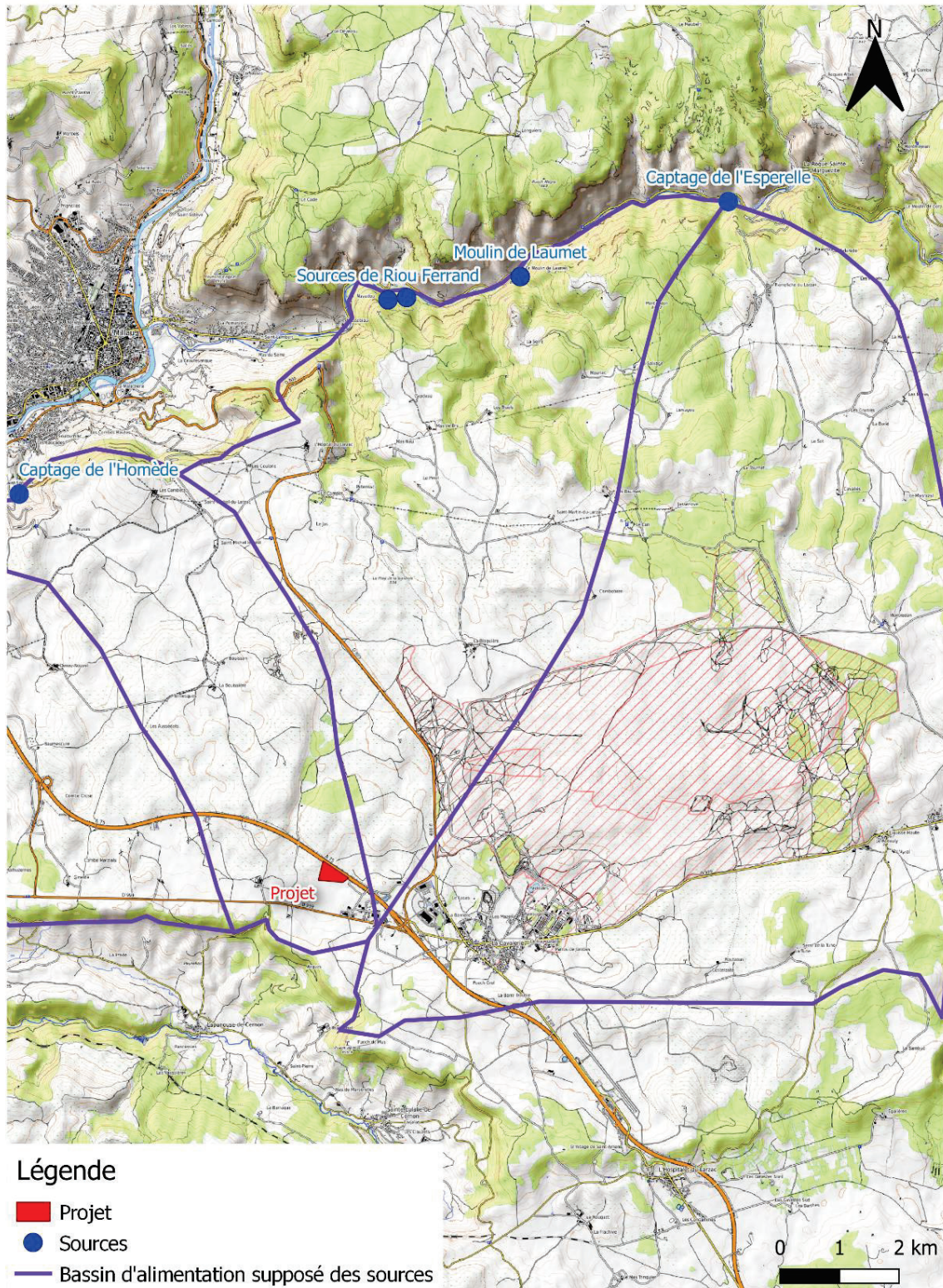


Figure 13 : Localisation des sources suivies pour l'opération de traçage

5.1.5. Choix et justification du traceur utilisé

Le traceur utilisé est la fluorescéine.

Totalement inoffensif et couramment utilisé en hydrogéologie, ce colorant est adapté au contexte de l'étude (sorties possibles sur des captages utilisés pour l'alimentation en eau potable) sans engendrer de contraintes fortes en termes de potabilité de l'eau ou pour d'autres utilisations.

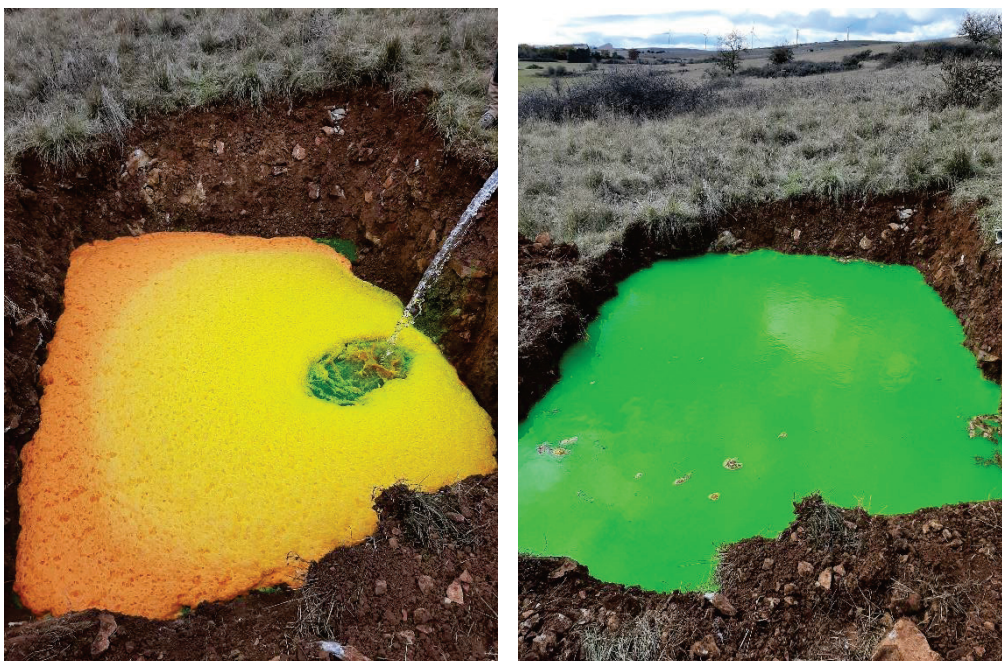
Afin d'assurer des restitutions de bonnes qualités, la quantité de traceur injectée doit être adaptée. Dans le cas de cette opération, elle a été déterminée à partir des informations suivantes :

- La distance entre le point d'injection et les sources suivies est comprise entre 8 et 13 km ;
- Les conditions hydrologiques au cours du traçage correspondent à des basses eaux ;
- Les quantités de traceurs injectés pour les traçages voisins sont comprises entre 7 et 11 kg (cf. Tableau 3 et Tableau 4).

Ainsi, il a été décidé d'injecter une quantité de **13,5 kg** de fluorescéine. Elle est un peu plus importante que celle des traçages voisins en raison de la faible capacité d'infiltration des calcaires au droit du point d'injection (infiltration diffuse).

5.1.6. Méthodologie de l'injection du traceur

L'opération d'injection a eu lieu le 3 novembre 2021 à 11h20. Afin de « pousser » le traceur à travers la zone d'infiltration du système karstique, un important volume d'eau claire (20 m³) a été déversé dans la fosse. Celle-ci a été rebouchée le lendemain matin.



Injection d'eau et du colorant claire à partir d'un camion-citerne

Figure 14 : Illustrations de l'opération d'injection du traceur dans le bassin d'infiltration

5.1.7. Méthodologie du suivi de la restitution

Le suivi de la restitution a été réalisé sur toutes les sources (Figure 14) à partir de fluorimètres de terrain de type SHNEGG (pas de temps de mesure de 15 minutes).

Sur les sources de l'Esperelle, de l'Homède et du moulin de Laumet, des préleveurs autonomes d'une capacité de 24 flacons de 0,5 à 1,0 litre ont également été installés (pas de temps de prélèvements variables entre 4 et 7h).

Au niveau des sources de Riou Ferrand, dont l'accès est plus difficile, des échantillons ont été prélevés manuellement à chaque tournée de maintenance du matériel de suivi.

La surveillance s'est déroulée du 3 novembre au 2 décembre 2021, soit une durée d'un mois, comprenant 4 tournées de maintenance.



Figure 15 : Illustrations du matériel de suivi installé à la source du Moulin de Laumet

5.1.8. Analyse des échantillons

Les échantillons prélevés par les préleveurs automatiques ont été stockés dans des flacons en verre brun fumé rincés à l'eau prélevée. L'analyse par spectrofluorimétrie a été réalisée par la Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en TRaçage Appliqués à l'Hydrogéologie et à l'Environnement (CETRAHE) de l'université d'Orléans.

Le spectrofluorimètre utilisé est un appareil mono-faisceau dont la résolution du balayage spectral est de l'ordre de 2 nm. Sous l'action d'un rayon lumineux de longueur d'onde bien précise (pic d'excitation), les produits fluorescents émettent un rayonnement (pic d'émission) dont l'amplitude est proportionnelle à la concentration du produit analysé.

La comparaison entre l'amplitude obtenue sur l'échantillon et l'amplitude d'une gamme étalon réalisée sur le même colorant permet alors de déterminer la concentration du produit. La comparaison entre les longueurs d'ondes des échantillons analysés (spectres d'émission et d'excitation) et du traceur utilisé lors de l'injection permet de vérifier que l'intensité mesurée correspond bien aux produits recherchés.

Ainsi le spectre positif signifie que le colorant est présent dans l'échantillon analysé. A l'inverse, si le spectre est négatif, le produit analysé n'est pas le colorant mais un tout autre produit comme la matière organique ou divers « polluants » pouvant contenir un mélange fluorescent interférent avec la mesure. Les résultats des analyses effectuées sont présentés en annexe 4.

Les seuils de détection de la fluorescéine utilisée sont résumés dans le tableau suivant :

Traceur	Eaux naturelles optiquement propres (µg/l)	Bruit de fond élevé (µg/l)
Fluorescéine	0,001	0,01

Tableau 8 : Seuils de détection du traceur

5.2. Résultats du traçage

5.2.1. Pluviométrie

Les données de pluie quotidienne sur le Larzac ont été récupérées auprès de Météo-France, à partir de la station météorologique nommée « Millau-Larzac-SAPC », n°12063003, qui se trouve à l'aérodrome de Millau, à quelques kilomètres au sud de la Cavalerie. Elles sont présentées sur la figure suivante.

Sur les 5 jours avant l'opération de traçage, un épisode pluvieux a permis un cumul d'eau précipitée de 29,4 mm.

Au cours de la période de suivi de restitution, quelques jours de pluie ont eu lieu sur la dernière moitié jusqu'à 5,8 mm le 01/12/2021.

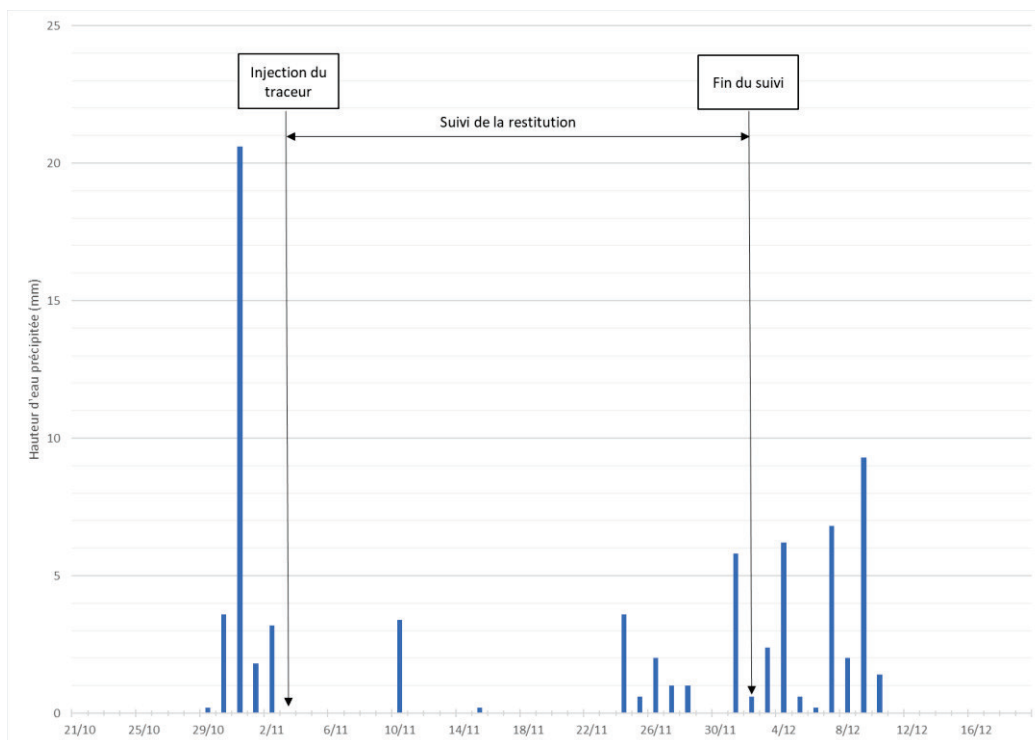


Figure 16 : Précipitations journalières à La Cavalerie au mois d’octobre à décembre 2021

5.2.2. Conditions hydrologiques

Les débits de la Dourbie ont été récupérés sur la banque de données « Banque Hydro », à la station située à Massebiau (code : O3394030), à environ 4 km en amont de Millau.

D’après les débits moyens mensuels de la Dourbie du début d’année 2021 (Figure 17), comparées aux débits mensuels moyennés sur 103 ans (Figure 16), les conditions hydrologiques au cours desquelles a été réalisé le traçage, correspondent à des basses eaux.

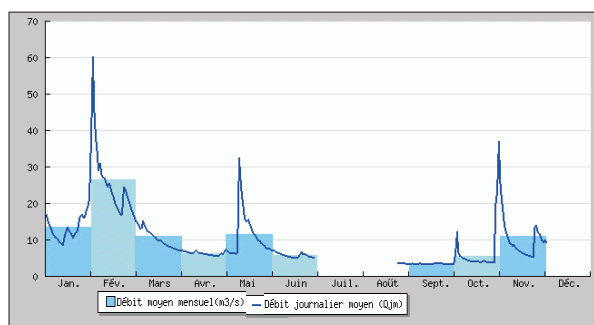


Figure 18 : Débit mensuel moyen de la Dourbie en 2021

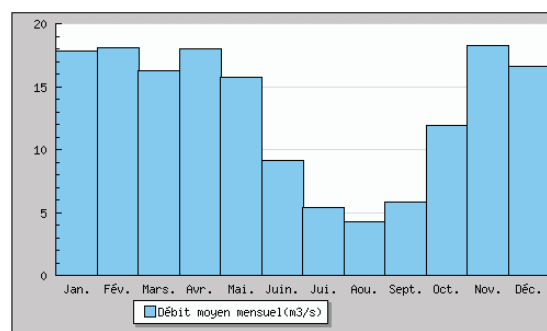


Figure 17 : Débit mensuel moyen de la Dourbie moyenné sur 103 ans

5.2.3. Débits des sources

Les débits de la source de l'Homède et de l'Esperelle sont suivis grâce à des stations de mesures gérées par le Parc Naturel Régional des Grands Causses. Les débits des sources de Laumet de Riou Ferrand ont été obtenues par jaugeages au micromoulinet.

Source du moulin de Laumet

Des jaugeages ont été réalisés en aval de la source de Laumet. Les débits mesurés sont présentés dans le tableau suivant. Ces mesures au micromoulinet présentent une incertitude non négligeable liée principalement aux caractéristiques du site. En aval de la source, aucune section de mesures adéquate n'a été identifiée pour réaliser un jaugeage fiable (écoulement turbulent avec des rapides, présence de cailloux et blocs). Les mesures du jaugeage du Tableau 8 doivent alors être considérées comme une approche du débit de la source de Laumet.

Date	Débit mesuré (l/s)
10/11/2021	45,2
18/11/2021	37,5
25/11/2021	57,2
02/12/2021	62,0

Tableau 9 : Mesures manuelles du débit de la source de Laumet

Afin d'avoir un suivi en continu du débit, une sonde mesurant les hauteurs d'eau a été placée au fond du cours d'eau, en aval de la source. Ces mesures sont rapportées en débit à partir des valeurs des jaugeages. Ainsi, on obtient la courbe de variation de débit présentée sur la figure suivante.

Le débit de base de la source est autour de 45 l/s. Comme pour la source de l'Esperelle, une crue est observée en fin de la période de suivi le 25/11/2021, avec un débit maximum évalué à 81 l/s.

Sources de Riou Ferrand

Des jaugeages au micromoulinet ont été réalisés uniquement sur la source Riou Ferrand aval. Le cours d'eau en amont ne présentant pas de section adaptée pour un jaugeage au micromoulinet, deux mesures par « flotteur » ont été réalisées afin d'avoir un ordre de grandeur du débit de la source (Tableau 9). Comme pour les mesures de la source de Laumet, ces valeurs présentent une marge d'erreur importante.

Les sources de Riou Ferrand sont issues d'un même système karstique. La source aval en est le principal exutoire puisqu'elle présente un débit plus important.

Date	Débit mesuré (l/s)	
	Riou Ferrand amont	Riou Ferrand aval
03/11/2021	-	9,3
18/11/2021	-	5,9
25/11/2021	10,1	8,8
02/12/2021	15,9	29,5

Tableau 10 : Mesures manuelles du débit des sources de Riou Ferrand

Une sonde mesurant les hauteurs d'eau a été placée en aval des deux sources permettant d'obtenir les courbes de suivi de débit présentées sur la figure suivante.

Comme pour les autres sources, un épisode pluvieux a provoqué une crue à la fin du suivi moins marquée sur la source Riou Ferrand amont.

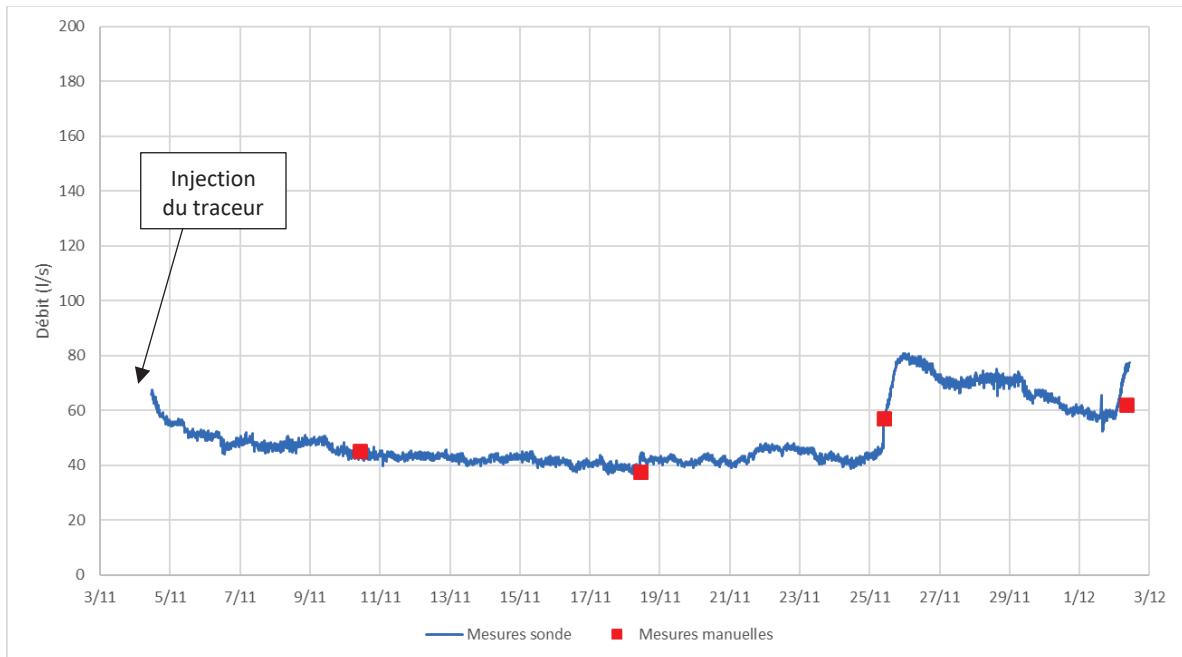


Figure 19 : Débit de la source de Laumet au cours du traçage

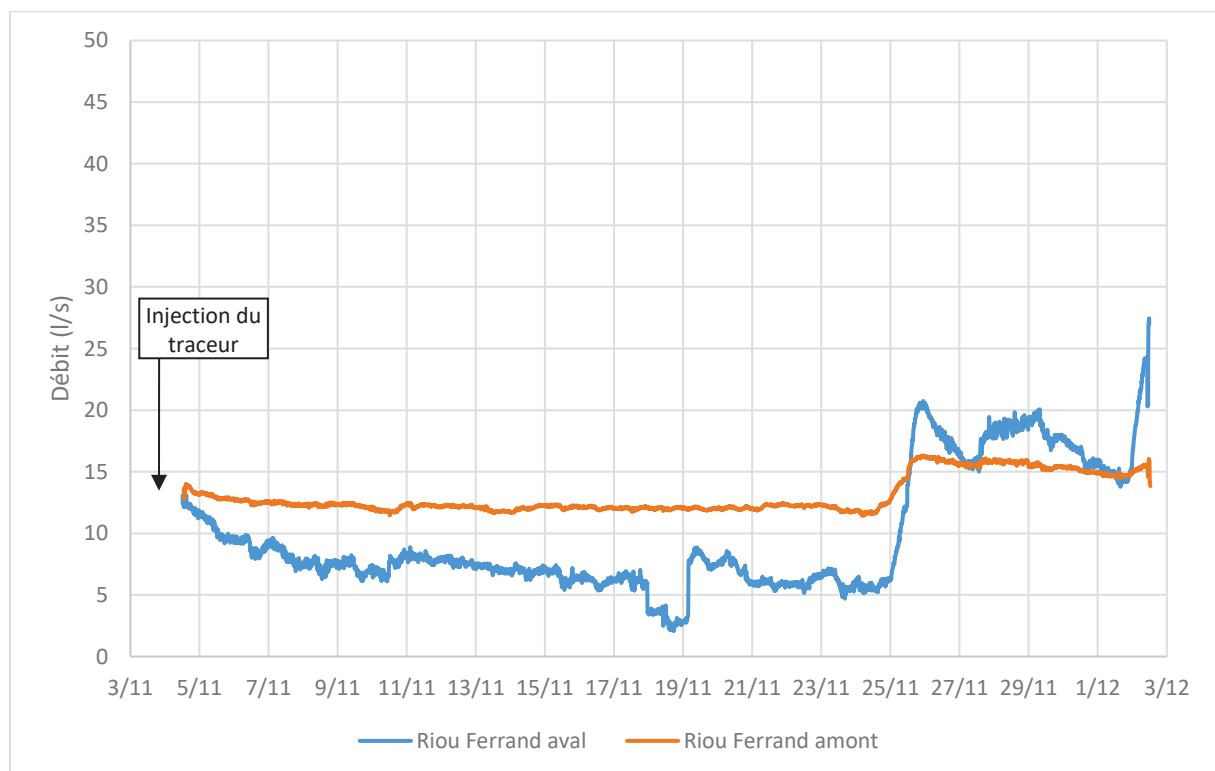


Figure 20 : Débits des sources de Riou Ferrand au cours du traçage

5.2.4. Résultats des restitutions en traceur

5.2.4.1. Restitution aux sources Riou Ferrand

Pour rappel, l'injection de fluorescéine s'est déroulée le 3 novembre à 11h20.

Les suivis effectués avec les fluorimètres indiquent une restitution aux deux sources de Riou Ferrand, confirmée ensuite par les analyses des prélèvements en laboratoire (Figure 20 et Figure 21).

Les premières traces de fluorescéine sont détectées sur les deux sources de Riou Ferrand, le 11/11 vers 08h30, soit environ 8 jours (189h) après l'injection. La distance entre le projet et ces sources étant de 9,7 km, la vitesse maximale atteinte par le traceur est de 51 m/h.

Les deux courbes de restitution obtenues présentent un seul pic avec des concentrations maximales de 2,52 µg/l sur la source amont et de 2,42 µg/l sur la source aval, atteintes environ 230h après l'injection. La vitesse modale du traceur est alors d'environ 42 m/h.

Puis, la concentration en fluorescéine diminue très rapidement et passe en-dessous de 0,1 µg/l le 19/11 en début de soirée. La durée du pic de restitution est alors de 205h, soit un peu plus de 8 jours. L'analyse des derniers échantillons prélevés le 02/12 indiquent une teneur en fluorescéine de 0,029 µg/l pour la source aval et de 0,032 µg/l pour la source amont.

La période de surveillance a permis d'observer une restitution à Riou Ferrand aval, de l'ordre de 5,1 g soit 0,04% de la masse du traceur injectée. Sur Riou Ferrand amont, la masse restituée est de 8,7 g, soit un taux de restitution de 0,06%.

Ces bilans massiques, qui sont calculés à partir des mesures de débits peu fiables, donnent un ordre de grandeur du flux de sortie.

Le taux de dilution unitaire du traceur calculé (concentration maximale restituée sur la masse injectée) est de $1,9 \cdot 10^{-10} \text{ l}^{-1}$ au niveau des deux sources. Ainsi pour un déversement de 50 kg d'une substance potentiellement polluante et miscible à l'eau, dans les mêmes conditions d'injection et de transfert que celles du traçage, la concentration maximale attendue aux sources de Riou Ferrand serait de l'ordre de 9 µg/l.

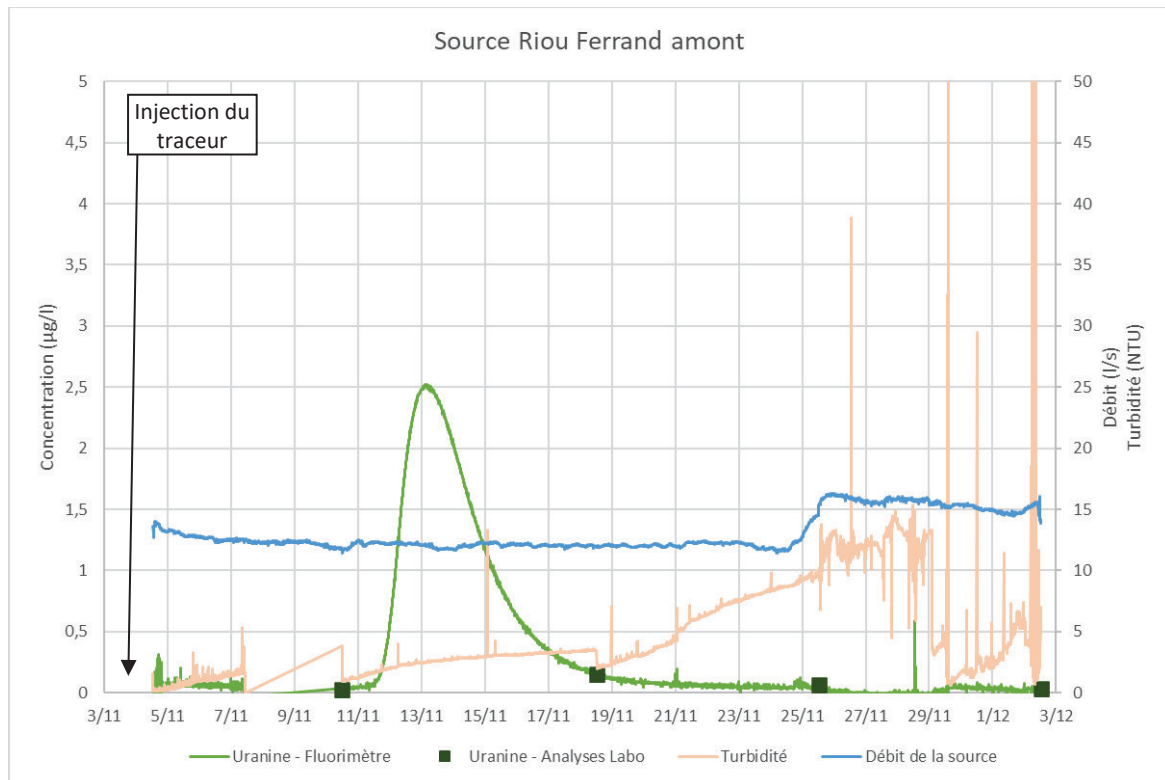


Figure 21 : Résultats du suivi à la source Riou Ferrand amont

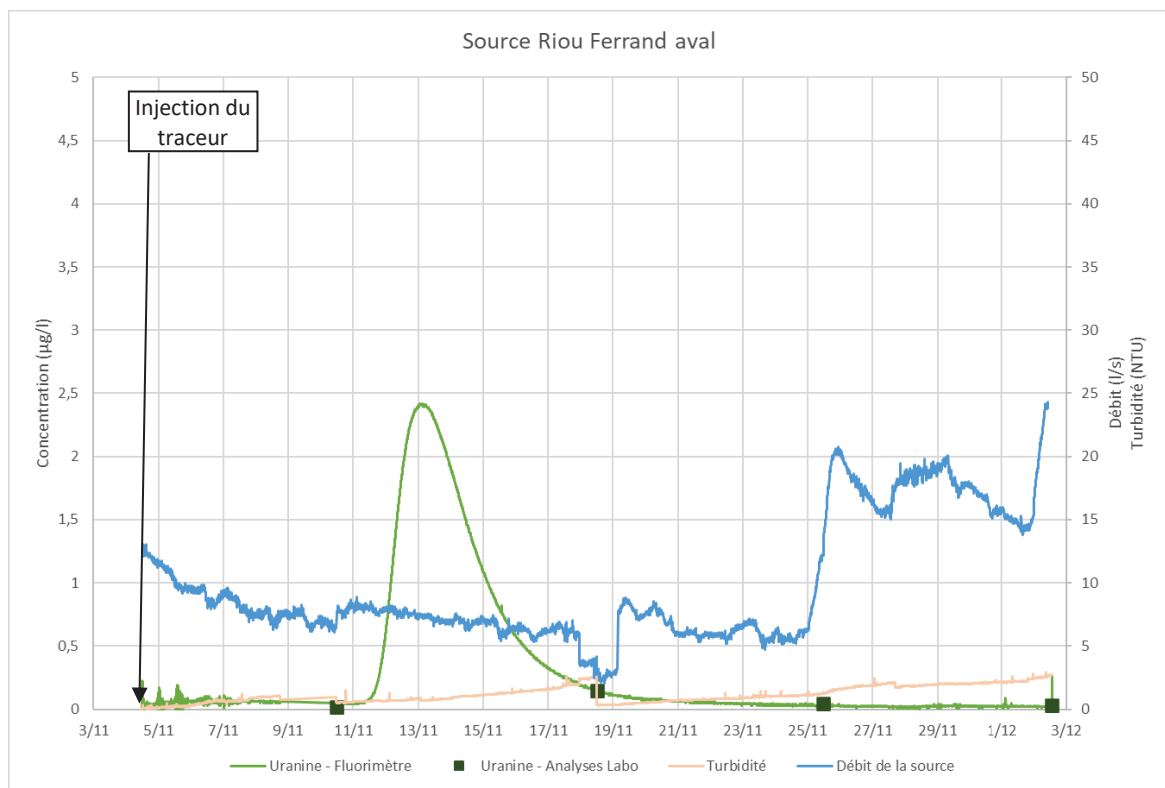


Figure 22 : Résultats du suivi à la source Riou Ferrand aval

5.2.4.2. Restitution à la source du moulin de Laumet

Le suivi avec le fluorimètre indique une restitution tardive à la source du Moulin de Laumet, confirmée ensuite par les analyses des prélèvements en laboratoire (Figure 22).

Les premières traces de fluorescéine sont détectées le 20/11 vers 18h, soit un peu plus de 17 jours (415h) après l'injection. La distance entre le projet et la sources étant de 10,5 km, la vitesse maximale atteinte par le traceur est de 25 m/h.

La courbe de restitution obtenue présente un pic plus étalé que celui observé sur les sources de Riou Ferrand. La concentration maximale mesurée est de 0,21 µg/l, atteinte environ 21 jours après l'injection. La vitesse modale du traceur est alors d'environ 21 m/h.

Puis, la concentration en fluorescéine diminue progressivement, la queue de restitution est assez étalée. L'analyse du dernier prélèvement effectué le 01/12, indique encore la présence de fluorescéine (0,673 µg/l).

En fin de période de restitution, trois valeurs élevées apparaissent, issues des analyses en laboratoires. Ces concentrations en uranine ne sont pas observées avec le fluorimètre. Les concentrations mesurées en suivant de ces échantillons étant nulles, ces mesures peuvent correspondre à des contaminations lors des analyses ou des prélèvements (la turbidité restant relativement stable) et ne sont pas représentatives du milieu.

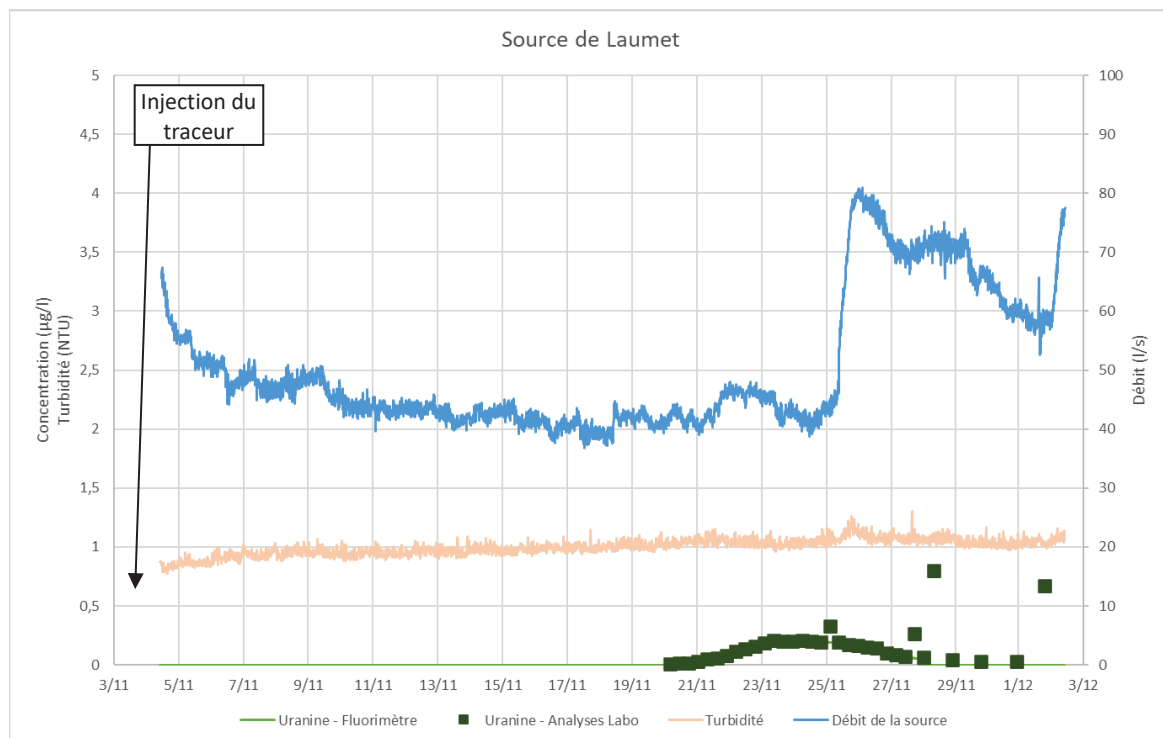


Figure 23 : Résultats du suivi à la source de Laumet

La période de surveillance a permis d'observer une restitution à la source de Laumet, de l'ordre de 4,3 g soit 0,03 % de la masse de traceur injectée. Ici aussi, les débits mesurés sur cette source ne sont pas suffisamment précis et peuvent fausser les résultats sur le calcul de masse restituée.

Le taux de dilution unitaire du traceur calculé (concentration maximale restituée sur la masse injectée) est de $1,6 \cdot 10^{-11} \text{ l}^{-1}$. Ainsi pour un déversement de 50 kg d'une substance potentiellement polluante et miscible à l'eau, dans les mêmes conditions d'injection et de transfert que celles du traçage, la concentration maximale attendue à la source de Laumet serait inférieure à $1 \mu\text{g/l}$.

5.2.4.3. Sur les autres sources

Source de l'Esperelle

Les données du fluorimètre montrent l'absence de restitution durant la période de suivi, confirmée par les résultats d'analyses de quelques échantillons prélevés pendant cette période.

A partir du 18/11 après-midi, les valeurs des mesures par le fluorimètre augmentent, oscillant jusqu'à un maximum de $1,18 \mu\text{g/l}$. Ces pics d'uranine sont liés à l'apparition de la turbidité dans la source lors des épisodes de crue.

Les analyses en laboratoire indiquent aucun résultat positif à la fluorescéine sur des échantillons prélevés lors de ces pics.

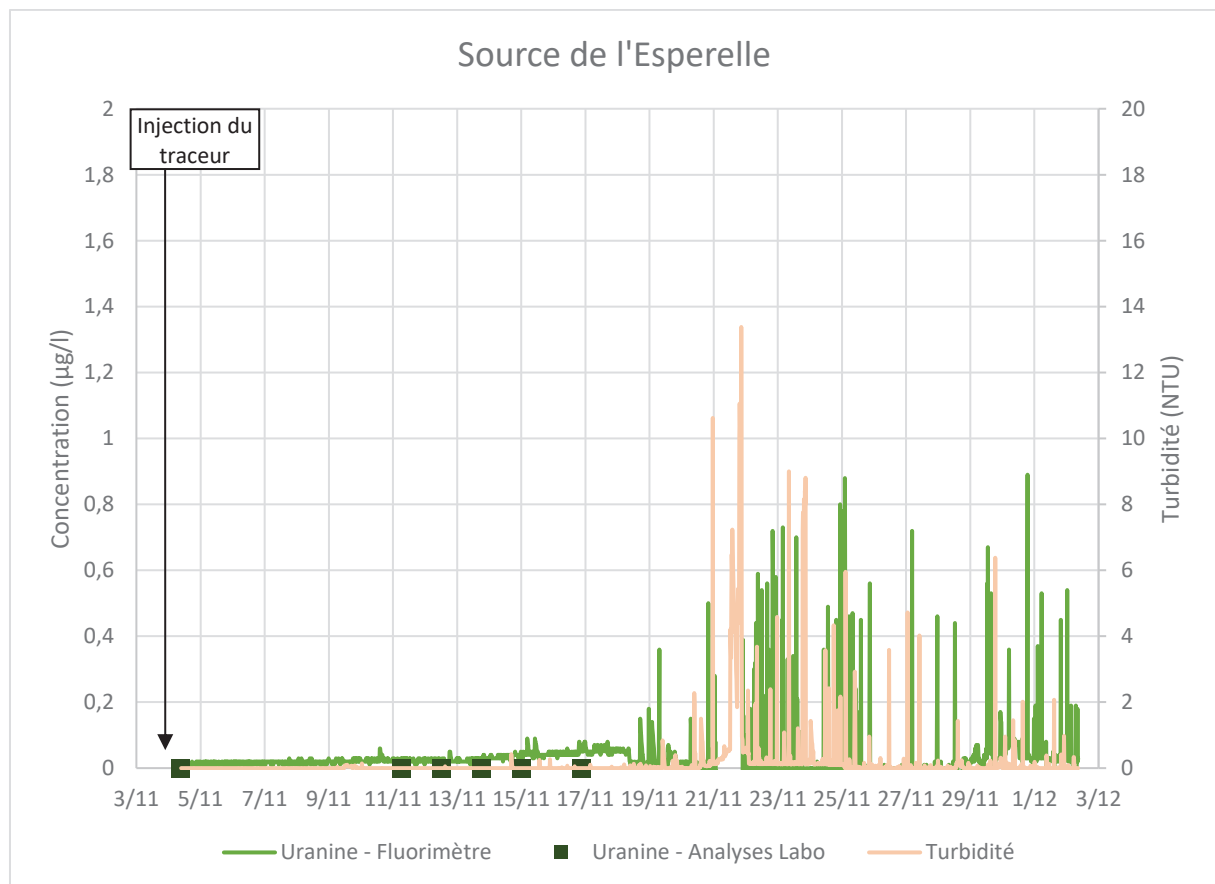


Figure 24 : Résultats du suivi à la source de l'Esperelle

Source de l'Homède

Aucune restitution du traceur n'a été identifiée sur la source de l'Homède.

Comme pour les autres sources, les données du fluorimètre montrent un léger pic de fluorescéine, concomitant à celui de la turbidité. Mais les résultats d'analyses des échantillons prélevés sur cette période confirment l'absence de traces de fluorescéine dans les eaux de la source de l'Homède.

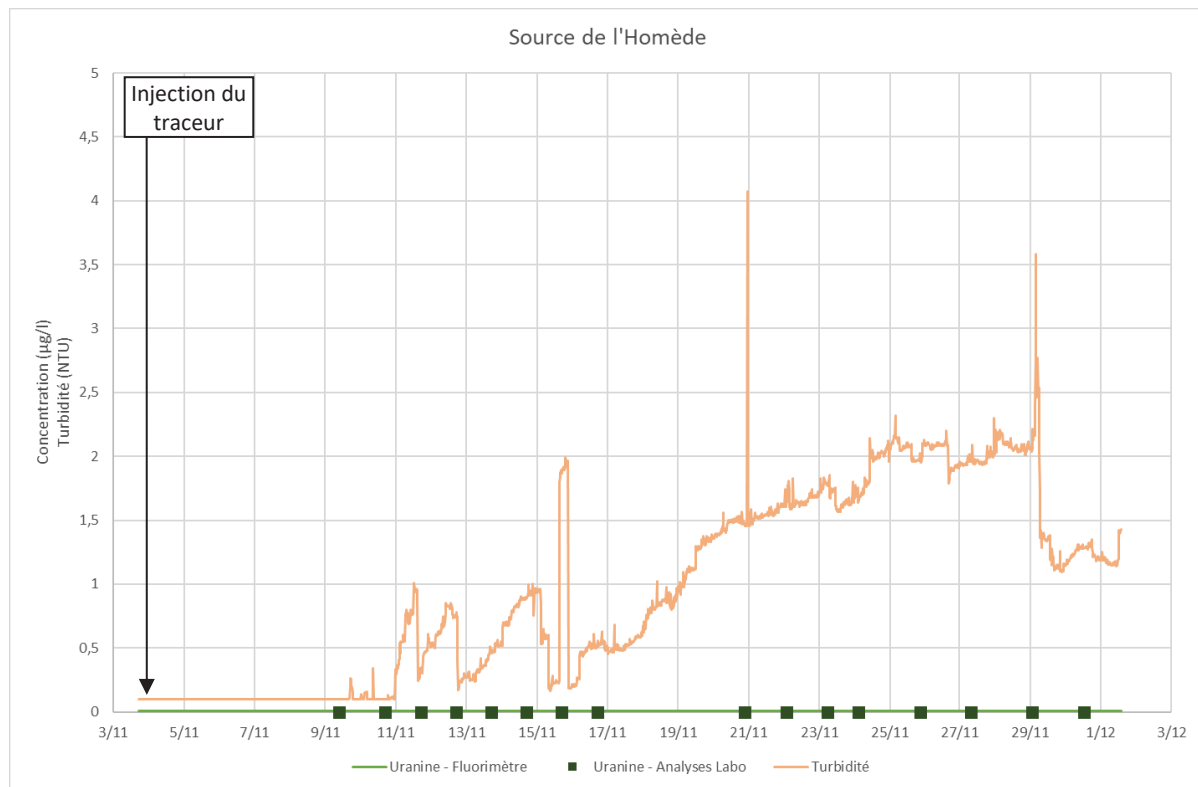


Figure 25 : Résultats du suivi à la source de l'Homède

5.3. Interprétation des résultats

Le traceur injecté dans le bassin d'infiltration sur le site du parc photovoltaïque des Clapas à la Cavalerie, a été retrouvé aux sources de Riou Ferrand et à la source du moulin de Laumet. Le projet est donc situé sur le bassin d'alimentation de ces sources et notamment celui de Riou-Ferrand (la source du moulin de Laumet étant connue pour être un trop-plein du système). Ce résultat va donc à l'encontre des études antérieures qui positionnaient ce secteur sur le bassin d'alimentation de la source captée de l'Homède.

Les vitesses maximales de transit sont inférieures à 51 m/h et le temps de séjour moyen est d'environ 8 jours. Ces deux paramètres ainsi que la forme de la courbe de restitution (pic unitaire) témoignent d'une faible dispersion du traceur et une organisation structurée et fonctionnelle des écoulements depuis la zone d'infiltration vers les exutoires principaux.

Avec des concentrations maximales de fluorescéine très faibles (environ 2,5 µg/l), les taux de dilution calculés sont importants ($1,9 \cdot 10^{-10} \text{ l}^{-1}$), témoignant d'une importante zone noyée.

La restitution de la fluorescéine à la source de Laumet vient un peu plus de 17 jours après l'injection et 8 jours après l'arrivée du colorant aux sources de Riou Ferrand. La vitesse maximale de transit est de 25 m/h. La forme étalée de la courbe de restitution indique une forte dispersion du traceur dans le système-traçage. Ces informations indiquent que la circulation du colorant est peu rapide et se fait dans un système peu organisé. Cette restitution tardive, dans des conditions hydrologiques stables (pas de crue), signifie probablement que le réseau de la source de Laumet est connecté au drain principal du système des sources de Riou Ferrand.

Sur la masse de traceur injectée, seulement 0,1 % environ est restitué sur les 3 sources. Une partie du colorant injecté a probablement été piégée dans les matériaux drainants du bassin d'infiltration et/ou dans la zone d'infiltration.

L'ensemble des résultats des deux traçages est synthétisé dans le tableau suivant.

Traçage			
Lieu d'injection	Bassin d'infiltration sur le site du futur parc photovoltaïque		
Date d'injection	03/11/2021 11h20		
Traceur et masse injectée (g)	Fluorescéine – 13 500 g		
Restitution	Riou Ferrand amont	Riou Ferrand aval	Moulin de Laumet
Distance entre l'injection et la restitution (m)	9 737	9 796	10 566
Masse restituée (g)	8,7	5,1	4,3
Restitution %	0,06	0,04	0,03
Temps			
Apparition du traceur (j)	7,9	7,9	17,3
Temps modal (j)	9,7	9,6	20,9
Temps moyen de séjour (j)	11,1	11,1	21,3
Vitesses			
Vitesse d'apparition (m/h)	51,5	51,8	25,5
Vitesse modale (m/h)	42,0	42,6	21,0
Vitesse moyenne (m/h)	40,6	42,4	20,8
Vitesse apparente (m/h)	36,5	36,7	20,7
Concentration et dilutions			
Concentration initiale (g/l)	300	300	300
Concentration max (g/l)	2,5E-6	2,4E-6	2,1E-7
Dilution unitaire (l ⁻¹)	1,9E-10	1,8E-10	1,6E-11
DTS max (s ⁻¹)	3,5E-6	3,6E-6	3,0E-6

Tableau 11 : Bilan des restitutions de la fluorescéine