

PROJET ENVIRONNEMENTAL:

ETUDE DES TRANSFERTS D'EAU SOUTERRAINE DANS LE KARST PAR TRAÇAGE ARTIFICIEL

Massif de la Sainte-Baume
Sources des Encanaux



Réalisé par:

FERMIER Marie
GARIN Thibaut
Aït MESSAOUD Ayoub
GOURMELON Maël
MEKTOUB Nassim

Encadrants:

Dr. Bruno ARFIB
M. Alexandre ZAPPELLI

Tables des matières

Tables des matières.....	1
Table des figures.....	5
REMERCIEMENTS.....	8
RESUME.....	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUCTION.....	11
2. CADRE GENERAL DE L'ETUDE.....	14
2.1. Problématique.....	14
2.2. L'aquifère karstique.....	14
2.2.1. Les Milieux karstiques.....	14
2.2.2. Formation des karsts.....	16
2.2.3. Types de Karst.....	17
2.2.4. Caractéristiques des Karst.....	17
2.3. Protection des ressources en eau.....	18
2.3.1. Les eaux des milieux karstiques.....	18
2.3.2. La vulnérabilité.....	18
2.3.3. La réglementation.....	19
2.3.4. Périmètres de protection.....	19
2.3.5. Méthodes d'évaluation :.....	20

3.	CAS D'ETUDE.....	21
3.1.	Cadre géographique	21
3.2.	Cadre géologique	22
	Contexte geologique du secteur étudié	24
3.3.	Cadre hydrologique	26
3.4.	Cadre hydrogéologique	26
	3.4.1. Estimation des bassins versants topographique et hydrogéologique :.....	28
	3.4.2. Le bassin des Infernets	29
	3.4.3. Le bassin de Daurengue	29
	3.4.4. Le bassin des Encanaux	30
3.5.	Le gouffre des Encanaux	31
3.6.	Les traçages artificiels existants	35
4.	MATERIELS ET METHODES.....	37
4.1.	La conductivité électrique et la température	37
4.2.	Traçage artificiel.....	38
	4.2.1. Traceurs Artificiels.....	39
	4.2.2. Risques liés aux traceurs	39
	4.2.3. Suivi des traçages	40
	4.2.3.1. Préparation des solutions étalons	40
	4.2.3.2. Suivi en continu à l'aide de fluorimètres de terrain	42
	4.2.3.3. Suivi de la fluorescence par prélèvements automatiques.....	43

4.2.3.4. Etalonnage des fluorimètres	45
4.3. Débit.....	48
4.3.1. Estimation de la vitesse avec un flotteur	48
4.3.2. Mesure de débit par exploration des champs de vitesse et courantomètre	48
4.4. Traitement des données acquises	50
5. <i>RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU SUIVI PHYSICO-CHIMIQUES DES</i>	
<i>ENCANAUX ET DE DAURENGUE.....</i>	52
5.1. Pluie, conductivité électrique et température	52
5.2. Analyse chimique	56
5.3. Choix des traçages réalisés	58
5.4. Le traçage artificiel du 31/01/2015	63
5.4.1. Préparation et injection des traceurs.....	63
5.4.1.1. Préparation de l'injection : le 25/01/2015	63
5.4.1.2. Préparation des traceurs	63
5.4.1.3. Injection	64
5.4.2. Etat hydrologique	65
5.4.2.1. Paramètres physico-chimiques au niveau des points de suivi le 30/01/2015.....	65
5.4.2.2. Remarques et état hydrologique entre le 30/01/2015 et le 20/02/2015	67
5.4.3. Estimation du débit	69
5.4.4. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité des Encanaux	70
5.4.4.1. Correction graphique de la concentration pour le fluorimètre n°369	70
5.4.4.2. Interprétation du traçage sur le ruisseau des Encanaux	72

5.4.5. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité sur le vallon de Daurengue	75
5.4.6. Utilisation du logiciel « TRAC »	76
5.5. Le traçage artificiel du 16/03/215	78
5.5.1. Préparation et injection des traceurs	78
5.5.2. Etat hydrologique	79
5.5.3. Estimation du débit	79
5.5.4. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité des Encanaux	80
5.5.5. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité sur la source des Brailles.....	82
5.6. Résultats des analyses par spectrofluorimétrie en laboratoire des échantillons prélevés	83
5.7 Conclusion générale sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Vède	84
6. DISCUSSION	88
CONCLUSION.....	91
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXE	95

Table des figures

Figure 1: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999)-----	15
Figure 2: Schématisation des périmètres de protection -----	20
Figure 3: Localisation de la zone d'étude sur le fond de carte IGN (carte tirée du visualisateur Infoterre, consulté le 21/02/2015)-----	21
Figure 4: Vue aérienne localisant la zone d'étude (extraite de Google Earth, consulté le 15/02/2015) -----	22
Figure 5 : Coupe géologique de la Sainte-Baume par Plan d'Aups, tiré de la thèse de G.Gieu (1968) -----	22
Figure 6: Extrait de la carte géologique 1/50000 du secteur de la Lare (BRGM, tirée d'Infoterre le 15/02/15) ----	23
Figure 7: Extrait de la carte géologique 1/50000 du secteur d'étude (BRGM, tirée d'Info terre le 15/02/15) -----	24
Figure 8: Carte géologique simplifiée de l'anticlinal de la Lare dans le rayon de la zone d'étude-----	25
Figure 9: Carte IGN 1/25000 présentant les sources de la Vède (carte tirée d'Infoterre, le 15/02/15) -----	27
Figure 10: Estimation des bassins versant topographiques des cours d'eaux étudiés, sur fond de carte IGN 1/1000000, BRGM-----	29
Figure 11: Estimation des bassins versant topographiques des cours d'eaux étudiés, sur fond de carte géologiques, la ligne rouge correspond au tracé de la coupe de G.Gieu. -----	30
Figure 12: Situation et représentation du gouffre des Encanaux -----	31
Figure 14: Schéma du gouffre des Encanaux, en plan et en coupe (Source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015 ; document d'origine : Topographie CAF 1987) -----	32
Figure 13: Entrée du gouffre (cliche pris par M Arfib le 31/01/2015)-----	32
Figure 15: Voûte mouillante (source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015; cliché pris le 29/05/2014)-----	33
Figure 16: Le siphon noir (source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015; cliché pris le 29/05/2014)-----	33
Figure 17: Fonctionnement hydrodynamique du gouffre des Encanaux -----	34
Figure 18: Courbe de restitution du traçage effectué par C. Coulier, le 02/07/1983 -----	35
Figure 19: Utilisation de deux conductimètres, le 20/03/2015 -----	38
Figure 20: Formules développées de l'acide amino G et de l'uranine (ou fluorescéine)-----	39
Figure 21: Etapes de dilution-----	41
Figure 22: Zoom sur l'affichage du logger (Albilis SARL) -----	42
Figure 23: Sonde de mesure de fluorescence (Albilis SARL) -----	42
Figure 24: Logger (le 31/01/2015) -----	42
Figure 25: Répartition des flacons préleveurs, le 30/01/2015 -----	43
Figure 26: Vue d'ensemble du préleveur automatique, le 30/01/2015-----	43
Figure 27: Panneau de commande d'un préleveur automatique, le 02/02/2015-----	43
Figure 28: Spectre d'émission de la fluorescéine, 100ppb, tension PM 460V-----	44
Figure 29: Spectre d'excitation de la fluorescéine, 100ppb, tension PM 460V -----	44
Figure 30: Spectre d'émission de l'acide amino G, 100 ppb, tension PM 540V-----	44

Figure 31 : Spectre d'émissions de l'acide amino G, 100ppb, tension PM540V -----	44
Figure 32: Etalonnage d'un fluorimètre par utilisation d'un PC de terrain, le 20/02/2015-----	45
Figure 33 : Courbe d'étalonnage de l'acide amino G pour le traçage du 31/01/2015-----	46
Figure 34 : Courbe d'étalonnage de la fluorescéine pour le traçage du 31/01/2015 -----	46
Figure 35 : Courbe d'étalonnage de la fluorescéine pour le traçage du 16/03/2015 -----	47
Figure 36: Site de mesure du débit de la rivière des Encanaux, le 20/02/2015-----	49
Figure 37 : Représentation du débit par mesure des champs de vitesses-----	50
Figure 38: Suivi de la conductivité électrique et de la température, données brutes -----	53
Figure 39: Suivi de la conductivité électrique et de la température, données corrigées -----	54
Figure 40: Diagramme de Piper pour les 4 prélèvements effectués le 31/01/2015 -----	56
Figure 41: Travertins à proximité de la source de la Glacière (31/01/2015) -----	57
Figure 42: Relevé des précipitations pendant l'étude -----	59
Figure 43: Emplacement et fonctionnement des fluorimètres pendant l'étude-----	61
Figure 44: Situation géographique des appareils de mesures entre le 30/01 et le 20/02 -----	61
Figure 45: Situation géographique des appareils de mesures entre le 20/02 et el 08/03 -----	62
Figure 46: Situation géographique des appareils de mesures entre le 08/03 et le 27/03 -----	62
Figure 47: Bouteille de Fluorescéine prête à être injecter-----	64
Figure 48: Description de la fluorescéine -----	64
Figure 49: Tentative de débouchage du tuyau (A. Zappelli et M. Decanis)-----	65
Figure 50: Injection directe d'acide amino G dans la vasque (A. Zappelli et M. Decanis)-----	65
Figure 51: Injection de la flurescéine (A. Zappelli et M. Decanis) -----	65
Figure 52: Mauvaise dilution de l'acide amino G (A. Zappelli et M. Decanis)-----	65
Figure 53: Trou des Encanaux (le 31/01/2015 à 11h, le 31/01/2015 à 13h et le 02/02/2015 à 10h) -----	68
Figure 54: Baisse de la hauteur d'eau dans le gouffre des Encanaux -----	69
Figure 55: Correction graphique du palier de saturation du fluorimètre n°369 -----	71
Figure 56: Suivi du traçage du 31/01/2015 sur le ruisseau des Encanaux -----	72
Figure 57: Suivi de la proportion de masse de traceur restituée lors du traçage du 31/01/2015 -----	72
Figure 58: Suivi des paramètres entre le 30/01 et le 20/02 sur la rivière des Encanaux -----	74
Figure 59: Suivi des paramètres sur la rivière de Daurengue-----	75
Figure 61: Schéma de principe de modélisation -----	76
Figure 60: Sonde du fluorimètre encrassée, le 08/03/2015 (A. Zappelli)-----	76
Figure 62: Utilisation du logiciel TRAC par modèle-----	77
Figure 63: DTS obtenue sur le logiciel TRAC -----	78
Figure 64: Suivi des paramètres sur le ruisseau des Encanaux entre le 14/03 et le 20/03 -----	80
Figure 65: Suivi des paramètres sur la source des Brailles -----	82
Figure 66: Schéma conceptuel des relations entre gouffre des Encanaux et les sources du vallon des Encanaux lors du traçage du 31/01/2015 -----	86

<i>Figure 67:Schéma conceptuel des relations entre gouffre des Encanaux et les sources du vallon des Encanaux lors du traçage du 16/03/2015</i>	86
<i>Figure 68: Carte hydrogéologique simplifiée du bassin de la Vède</i>	87
<i>Tableau 1: Tableau de comparaison de mesure ponctuelle à l'aide de deux conductimètres</i>	37
<i>Tableau 2: Récapitulatif des valeurs d'excitation et d'émission pour les deux traceurs</i>	45
<i>Tableau 3: Extrait de données brutes extraites du fluorimètre n°226 (date en anglais du type AA/MM/JJ)</i>	47
<i>Tableau 4: Extrait après traitement de données brutes</i>	48
<i>Tableau 5: Résultats de l'analyse des ions majeurs</i>	57
<i>Tableau 6: Paramètres déterminants dans la formation des travertins</i>	58
<i>Tableau 7: Emplacement des appareils de mesures</i>	60
<i>Tableau 8: Chronologie et problèmes rencontrés (en gras) lors de l'injection du 31/01/2015</i>	64
<i>Tableau 9: Conductivité et température au niveau des appareils de mesure le 30/01/2015</i>	65
<i>Tableau 10: Conductivité et température en différents points le 30/01/2015</i>	66
<i>Tableau 11: Grandeurs principales</i>	74
<i>Tableau 12: Grandeurs principales</i>	74
<i>Tableau 13: Méthode pour déterminer les débits minimum et maximum lors du traçage du 16/03/2015 sur le vallon des Encanaux</i>	80
<i>Tableau 14: Grandeurs principales</i>	81
<i>Tableau 15: Grandeurs principales</i>	81

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons profiter de cet espace pour remercier sincèrement Bruno Arfib pour nous avoir suivis et conseillés pendant cette étude. Toutes les heures passées en sa compagnie nous ont permis d'observer ce qu'être passionné, jusqu'à nous transmettre cette passion.

Nous remercions également le Comité Départemental de Spéléologie des Bouches du Rhône, en particulier Alexandre Zappelli pour son investissement et son aide précieuse dans la réalisation des traçages artificiels sur le terrain.

De même pour leur patience et leur disponibilité, nous voulons remercier M Vassalo et toute l'équipe du laboratoire de Chimie de l'Environnement

RESUME

Dans le cadre de la formation Master SET, GEMA et GERINAT, une application professionnelle est proposée aux étudiants. Ce contexte nous a permis d'étudier les écoulements d'eau dans un milieu karstique. La connaissance de ces milieux et des écoulements d'eau souterrains permettra de connaître la vulnérabilité du milieu et de la ressource aux pollutions extérieures et donc de proposer des aménagements et des périmètres de protection dans le cas de l'installation de captages.

Pour cela une zone d'étude a été définie : le bassin de la Vède pour la faisabilité des opérations de traçage permettant de suivre le cheminement des eaux souterraines depuis une zone d'accès au réseau karstique jusqu'à un complexe de sources aux fonctionnements différents. Il s'agira dans ce rapport d'étudier l'origine de l'eau de ces sources, et d'évaluer les écoulements d'eau souterraine dans des conditions hydrologiques particulières. Pour cela, l'étude propose un suivi en continu ainsi que des mesures ponctuelles des paramètres physico-chimiques de l'eau (dont Température et Conductivité) ainsi que le suivi de la fluorescence lors de traçages artificiels.

C'est l'apport de connaissances sur les milieux karstiques, sur la zone d'étude spécifiquement ainsi qu'une approche globale des techniques d'étude de ces milieux qui a motivé nos recherches.

Celle-ci aura permis de mettre en évidence une différence de l'origine de l'eau entre certaines sources étudiées ainsi qu'une liaison directe entre le gouffre des Encanaux et certaines sources du vallon. De plus, cette étude aura démontré que le cheminement souterrain des eaux dans la zone d'étude diffère en fonction du régime hydrologique et du niveau d'eau dans le gouffre des Encanaux.

ABSTRACT

As part of the Master SET GEMA and GERINAT, a professional application is offered to students. This context has allowed us to study the water flows in a karst environment. Knowledge of these areas and underground water flows will define the vulnerability of the environment and the resource to outside pollution and thus to provide arrangements and protection zones in the case of the installation of catchments.

A study area was defined: the Vede watershed for the feasibility of tracing operations to track the flow of underground water from an access area to the network to a complex karst sources at different operations. It will be in this report the study of the water origin from these sources, and evaluate underground water flows in specific hydrological conditions. To answer to this problematic, the study proposes a continuous monitoring and spot measurements of physicochemical parameters of the water (including temperature and conductivity) and the fluorescence followed in artificial plots.

The contribution of knowledge on karst environments, and specifically on the area of study and a global approach to study techniques of these media has motivated our research.

This has enabled to highlight a difference in the origin of the water between some sources studied and a direct connection between the abyss of Encanaux and some sources of the valley. In addition, this study has demonstrated that the underground path of water in the study area differs depending on the hydrological regime and water level in the pit of Encanaux.

1. INTRODUCTION

Cette étude réalisée dans le cadre de la première année du master SET, spécialités GEMA et GERINAT, a pour objectif de mettre en œuvre et suivre plusieurs traçages artificiels sur le bassin versant de la Vède (Bouches-du-Rhône et Var, nord Sainte-Baume). Elle a été menée en collaboration entre les laboratoires CEREGE et LCE de l'université Aix-Marseille, et le Comité Départemental de Spéléologie (commission scientifique). Cette mission a permis de mettre en pratique l'ensemble des étapes liées à ce type de traçage : des visites du terrain pour s'appropriier la zone d'étude, la compréhension du contexte hydrogéologique général, la réalisation du traçage artificiel, des mesures en laboratoire et enfin l'interprétation des résultats avec une conclusion et des hypothèses sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur étudié. La réalisation de cette étude est donc propice à la découverte et l'apprentissage de méthodes de travail sur un domaine particulier de l'hydrogéologie.

Pour commencer, il est important de poser la problématique général pour ce type d'étude soit « Pourquoi s'intéresse-t-on à l'hydrogéologie et au mode d'écoulement dans le karst ? ». L'hydrogéologie est la science des écoulements souterrains. Elle est indissociable de l'hydrologie étant donné que les eaux dites de « surfaces » ou « souterraines » sont en relations permanentes.

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique d'un secteur consiste à considérer non plus les seules limites apportées par la topographie en surface mais aussi la nature des terrains sous-jacents, avec leurs caractéristiques. La connaissance du sous-sol et des propriétés associées aux roches qui le constitue aide à la compréhension de l'écoulement de l'eau, notamment à travers les compartiments du karst (matrice et conduit). Cela permet au final de définir une ressource en eau d'un point de vue quantitatif et qualitatif et de réfléchir au moyen de protection à mettre en place pour son exploitation.

L'utilisation du cas d'étude du bassin de la Vède permettra d'appliquer une méthode de traçage des écoulements souterrains pour favoriser la compréhension du fonctionnement hydrodynamique sur ce bassin. Le projet a donc pour but de parfaire les connaissances de ce site, tout en manipulant et en réfléchissant sur les méthodes d'études du karst. Le bassin de la Vède se découpe en trois vallons : le vallon de

Daurengue, des Infernets et des Encanaux. Différentes sources de drainage de la nappe se situent dans ces vallons :

Sur le ravin des Encanaux:

- ✓ Le Trou des Encanaux
- ✓ La source Haute des Encanaux
- ✓ La source Supérieure des Encanaux
- ✓ La source des Blocs inférieurs des Encanaux
- ✓ La source inférieure des Encanaux

Sur le ravin de Daurengue :

- ✓ La source des Brailles
- ✓ La Source de la Glacière

Aucune source remarquable n'a été étudiée sur le vallon des Infernets, ce dernier étant alimenté uniquement par les eaux de ruissèlement.

Le choix de ce cas d'étude a été déterminé après avoir constaté la faisabilité de l'étude sur ce site propice au traçage sur une zone (géographique) relativement limitée. En effet, en 2013 et 2014, le gouffre des Encanaux, en amont des sources, a été étudié par l'enregistrement des niveaux d'eau souterraine en plusieurs points-clés de la cavité. Zappelli et Arfib (2015) montrent que lors des pluies la cavité s'ennoie en fonction des écoulements dans les conduits karstiques et la matrice fissurée environnante. Pour aller plus loin dans l'étude de ce système karstique, d'autres méthodes d'étude se sont avérées nécessaires, dont la réalisation de traçage artificiel dans la zone saturée de l'aquifère karstique.

Afin d'acquérir les données nécessaires pour interpréter les écoulements, deux méthodes ont été utilisées :

- ✓ Le traçage artificiel avec un suivi en continu in-situ par fluorimétrie et complété par l'analyse des échantillons d'eau en laboratoire.
- ✓ Le suivi de la conductivité électrique et de la température par des prélèvements ponctuels et automatiques (ISCO). Et continu par fluorimètre

Les observations de terrains ont initiées la détermination qualitative des relations entre les points remarquables et ont permis de déterminer les traçages à effectuer et le placement des appareils de suivis.

Ainsi deux traçages ont été réalisés au cours de l'étude. Il ont tous les deux permis d'apporter des informations sur les vitesses d'écoulements dans le karst et de conforter les hypothèses de relation entre certaines sources et le gouffre des Encanaux. Les données de conductivité électrique et température constituent des paramètres clés facilement mesurables pour comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème. Ils donnent des informations sur l'origine de l'eau (si elle provient d'une source ou du ruissellement,) mais aussi de mettre en évidence les connexions entre les différents points.

La chimie des eaux a apporté quant à elle des informations sur le temps de résidence des eaux sous terres et a contribué à la détermination de marqueurs spécifiques.

Ce rapport se présente en plusieurs parties. Sera d'abord définis le cadre général de ce type d'étude pour ensuite définir plus précisément le contexte (géographique, géologique, hydrologique et hydrogéologique) du cas d'étude du bassin de la Vède. Le matériel et les méthodes utilisés pendant ce projet seront ensuite présentés. L'analyse des résultats et l'interprétation du suivi physico-chimique des vallons de la Vède seront une part importante de notre étude. Enfin, avant de conclure, une partie discussion viendra enrichir les résultats.

2. CADRE GENERAL DE L'ETUDE

2.1. Problématique

Cette partie permet d'introduire la problématique d'un système karstique. L'intérêt de l'étude d'un karst concerne particulièrement l'amélioration des connaissances générales sur ce type particulier de ressource en eau souterraine avec leurs potentielles exploitations. L'utilisation de traçage artificiel est une méthode souvent utilisée dans la caractérisation des aquifères karstiques du fait de la vitesse d'écoulement et de renouvellement de la nappe. La connaissance et l'accessibilité des exutoires permettent de suivre aisément la restitution des traceurs. Cette partie repose d'abord sur le fonctionnement d'un karst de manière générale. Il est possible de préciser dès maintenant le caractère particulier des conduits karstiques, jusqu'à plusieurs mètres de diamètres. La seconde partie s'articule sur l'exploitation de la ressource en eau avec le principe des périmètres de protection.

2.2. L'aquifère karstique

2.2.1. Les Milieux karstiques

Le mot Karst est le nom allemand de la région des plateaux calcaires à l'est de Trieste, en Slovénie.

Le karst est un paysage résultant de processus particuliers d'érosion : la karstification. Ces processus sont commandés par la dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies) constituant le sous-sol des régions concernées. C'est l'eau de pluie infiltrée dans ces roches qui assure cette dissolution. L'eau acquiert l'acidité nécessaire à la mise en solution de la roche en se chargeant de gaz carbonique (CO₂) produit dans les sols par les végétaux et les colonies bactériennes. Le paysage de surface, constitué en général de dépressions fermées (appelées dolines pour les petites, et poljés pour les plaines d'inondation), est associé à un paysage souterrain, dont les grottes et les gouffres parcourables par l'homme font partie.

Le karst est par conséquent un paysage original créé par les écoulements d'eau souterraine. L'eau circule en son sein, s'y accumule et émerge par des sources aux débits souvent considérables, mais très fluctuants dans le temps. Le karst est donc également un aquifère : l'aquifère karstique

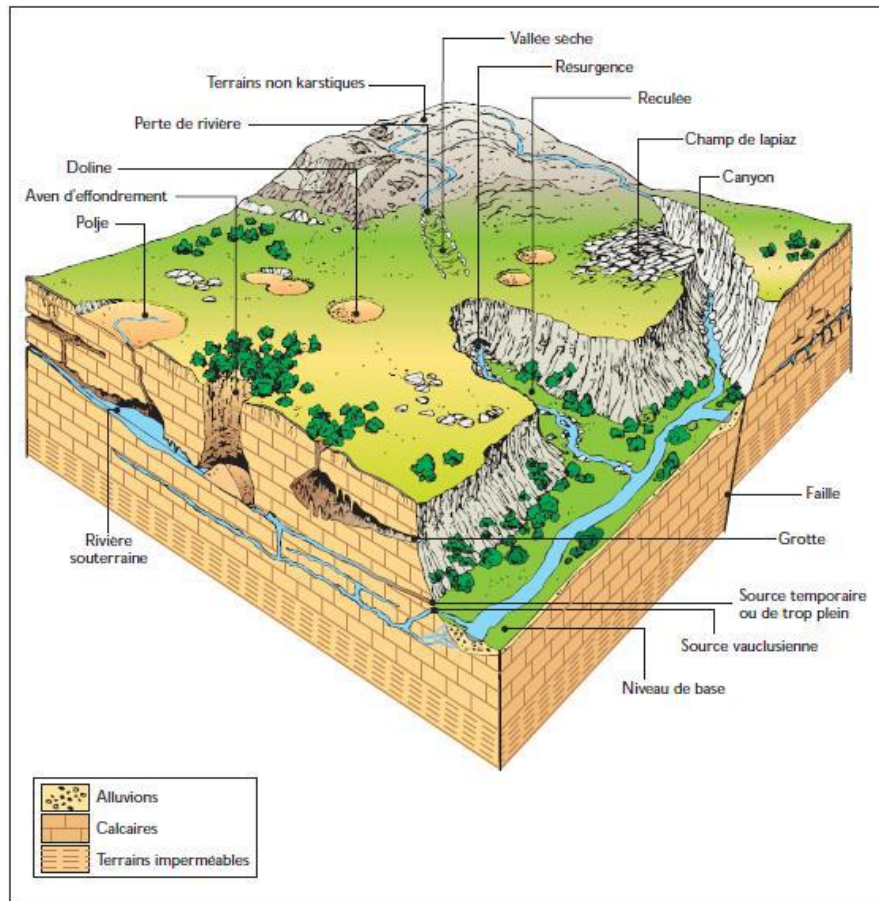


Figure 1: Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999)

Dans l'aquifère karstique les écoulements ont créé des vides organisés en une structure hiérarchisée de drainage, le réseau de conduits, de l'amont (la surface) vers l'aval (la source, exutoire en général unique de l'aquifère). Souvent, au cours de la saison de recharge de l'aquifère, des remontées importantes de l'eau dans le réseau de conduits provoquent l'inondation de réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein.

Le karst est réputé très vulnérable aux pollutions par comparaison avec les autres aquifères, du fait des caractères suivants :

- ✓ Faible rôle filtrant de la zone d'infiltration

- ✓ Faible effet de la dispersion et de la dilution lié à l'organisation des écoulements
- ✓ Temps de séjour de l'eau trop court pour qu'un effet auto-épuration intervienne au sein de l'aquifère
- ✓ Importante variabilité temporelle de la qualité de l'eau

2.2.2. Formation des karsts

La formation du karst se fait selon les mécanismes suivants:

- ✓ La dissolution de la roche
- ✓ L'écoulement souterrain, qui évacue au fur et à mesure les matières dissoutes.

La dissolution des roches carbonatées (calcaire et dolomie) est un ensemble complexe de réactions mettant en jeu trois phases : solide (la roche, CaCO_3 ou $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), liquide (l'eau et ses substances en solution), gazeuse (le CO_2 produit dans les sols). Il s'agit de réaction se produisant entre l'eau et l'air (dissolution ou évaporation du CO_2), entre l'eau et la roche (dissociation des minéraux carbonatés) et à l'intérieur de la solution (combinaison des différents ions entre eux).

Equation de la dissolution du CO_2 :

- ✓ $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$.
- ✓ $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$.

Equation de la dissolution de la calcite (CaCO_3) :

- ✓ $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$

Comme ces réactions ne sont pas immédiates, et se déroulent à des vitesses différentes, la dissolution de la roche se produit soit en surface, soit en profondeur, selon que l'eau circule lentement plus ou moins vite. Quand une fissure est élargie par la dissolution, le débit qui la traverse augmente aux dépens des fissures voisines ; elle prend alors de plus en plus d'importance et devient progressivement un conduit. Toutes les fissures voisines cessent de s'élargir, puisque toute l'eau passe par le conduit.

L'aquifère karstique, à maturité, possède un réseau de conduits organisé à la façon d'un bassin versant de surface.

2.2.3. Types de Karst

Il existe une grande variété d'aquifères karstiques en fonction de l'état de développement de la karstification, depuis le pôle aquifère fissuré jusqu'au pôle aquifère karstique pur. Le degré d'évolution karstique de l'aquifère se traduit dans son fonctionnement hydrogéologique.

L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation, les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées, au moins dans la zone noyée, et sont assurées par des éléments distincts de la structure :

- ✓ Le drainage est assuré par un réseau de conduits hiérarchisé.
- ✓ Le stockage est fourni soit par les parties microfissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (Systèmes Annexes au Drainage, SAD). Le stockage est réalisé par un ensemble d'éléments hydrauliquement indépendants les uns des autres, mais tous connectés plus ou moins bien au réseau de conduits. Il en résulte un compartimentage hydraulique responsable de très fortes hétérogénéités.

2.2.4. Caractéristiques des Karst

L'aquifère karstique se distingue des aquifères poreux et des aquifères fissurés par le fait qu'il possède des vides de grandes dimensions, dans lesquels les eaux souterraines sont susceptibles de circuler très vite.

Les dimensions des vides dans le karst couvrent une très large gamme de valeurs, depuis les fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. De même, les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure.

De ce fait, dans les aquifères karstiques fonctionnels, la très grande majorité des eaux séjourne moins d'un cycle hydrologique, et souvent seulement quelques jours à

quelques semaines. Pour cette raison, toutes les caractéristiques physiques, chimiques et hydrauliques, présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

2.3. Protection des ressources en eau

Les aquifères karstiques sont des ressources précieuses qui assurent 55% des eaux destinées à l'eau potable. Néanmoins ces ressources sont réputées d'être vulnérables, due à leurs faible filtration, faible auto-épuration, et une mauvaise dispersion et dilution des polluants, ce qui a imposé la mise en place des lois afin d'assurer leur protection.

2.3.1. Les eaux des milieux karstiques

Les eaux des aquifères karstique sont exploitables à partir d'un simple traitement de désinfection suivi par une floculation. Néanmoins, la présence de matière organique ou l'augmentation de la turbidité peuvent modifier la qualité des eaux en période de crues.

La grande vitesse d'écoulement des eaux engendre une sensibilité des aquifères karstiques face aux impacts anthropiques et donc une vulnérabilité de la qualité de l'eau aux diverses pollutions.

2.3.2. La vulnérabilité

La vulnérabilité est la possibilité qu'un contaminant percole de la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles (Albinet & Margat 1970). Elle se distingue en deux types :

La vulnérabilité d'un captage et de la ressource s'apprécie de deux manières :

- ✓ la vulnérabilité intrinsèque, propre au captage et à l'aquifère, compte tenu de leurs caractéristiques physiques.
- ✓ la vulnérabilité induite, ou extrinsèque, due à l'occupation du sol et aux activités anthropiques.

Dues aux caractéristiques intrinsèques des milieux karstiques, la réglementation a imposé des mesures de protection spécifiques.

2.3.3. La réglementation

Afin de garantir la santé publique et la pérennité de la qualité des eaux distribuées, la loi a imposé un code de santé publique (Art. L 1321-2 du Code de la santé publique).

L'exploitation des ressources en eau est soumise à une réglementation qui impose des périmètres de protection pour les captages d'eau utilisés pour l'alimentation des populations, des périmètres qui sont basés sur des critères hydrogéologiques et qui prend en compte la vulnérabilité du système.

2.3.4. Périmètres de protection

Afin de réduire les risques de pollutions ponctuelles et accidentelles autour les points de captage d'eau potable, un zonage est établi. Il existe trois types de périmètres:

- ✓ PPI : Périmètre de Protection Immédiate autour du point de captage situé au sein du bassin d'alimentation.
- ✓ PPR : Périmètre de Protection Rapprochée avec la possibilité de créer des périmètres disjoints ou des sous-périmètres.
- ✓ PPE : Périmètre de Protection Eloignée

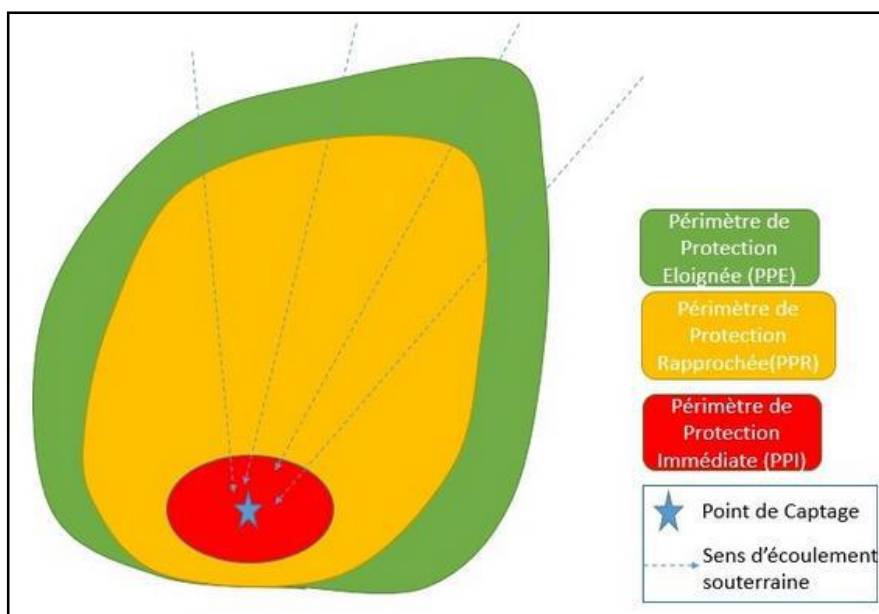


Figure 2: Schématisation des périmètres de protection

2.3.5. Méthodes d'évaluation :

De nombreuses méthodes ont été développées afin de déterminer la vulnérabilité des eaux souterraines, des méthodes complexes avec des modèles analytiques qui prennent en compte les processus physiques, chimiques et biologiques (*Guide Pratique : Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses, BRGM/RP-55332-FF Mai 2007*), et d'autres qui consistent à la pondération entre différents critères (*guide pratique : cartographie de la vulnérabilité en régions karstique (EPIK) 1998, Office Fédérale de l'environnement des forêts et du paysage*).

3. CAS D'ETUDE

Dans la réalisation de cette étude, le bassin de la Vède a été étudié avec la volonté de parfaire la compréhension de ce système en particulier. Pour ce faire, une définition du cadre général de la zone d'étude va être réalisée.

3.1. Cadre géographique

Le massif de la Sainte-baume est situé en basse Provence à cheval sur les départements des bouches du Rhône et du Var. C'est la plus haute montagne du littoral méditerranéen français, et le plus vaste avec près de 400 km².

Ces caractéristiques topographiques permettent de qualifier cet ensemble de « principal château d'eau de la basse Provence ». L'escarpement du massif s'oriente vers le NW et se prolonge par l'Agnis et la Loube. Pour cette étude on s'intéressera plus particulièrement à l'environnement de la Lare qui contient en son sein ouest les vallons de la Daurengue, Les Infernets et les Encanaux. La zone étudiée ([Figure 3](#): Localisation de la zone d'étude sur le fond de carte IGN (carte tirée du visualisateur Infoterre, consulté le 21/02/2015)) se situe sur la commune d'Auriol à la frontière entre les Bouches du Rhône et le Var, au Nord-Ouest du massif de la Sainte-Baume. Ces deux cours d'eau sont affluents de la Vède, qui se jette dans l'Huveaune à Auriol.

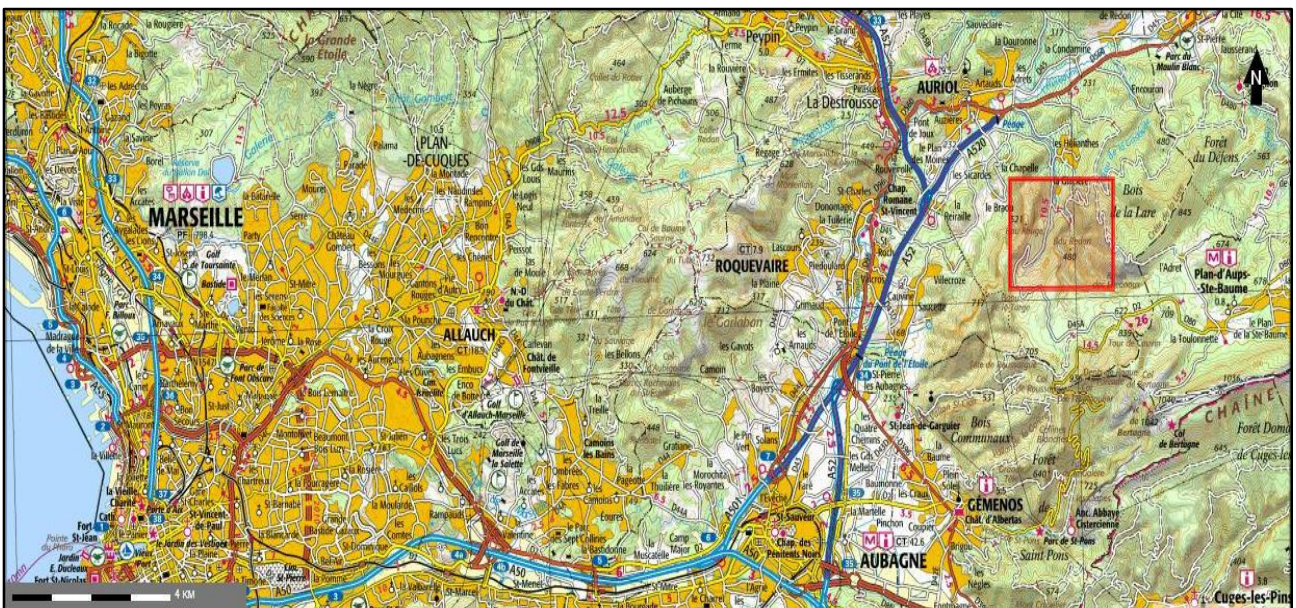


Figure 3: Localisation de la zone d'étude sur le fond de carte IGN (carte tirée du visualisateur Infoterre, consulté le 21/02/2015)



Figure 4: Vue aérienne localisant la zone d'étude (extraite de Google Earth, consulté le 15/02/2015)

3.2. Cadre géologique

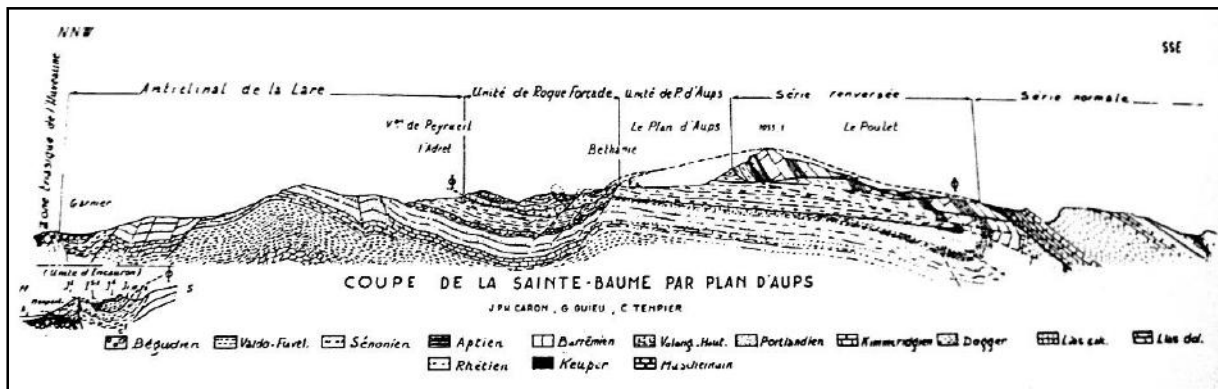


Figure 5 : Coupe géologique de la Sainte-Baume par Plan d'Aups, tiré de la thèse de G.Gieu (1968)

La topographie variée du massif exprime en fait sa grande complexité géologique. Elle se constitue en effet d'un enchevêtrement d'unités autochtones, para-autochtones et allochtones qui résultent des différents événements survenus au cours de l'histoire de sa formation.

Cette organisation stratigraphique a été majoritairement acquise lors de la phase pyrénéo-provençal (compression du Crétacé à l'Eocène inférieur) et achevée à la fin de son orogénèse (il y a 8 millions d'années) avec la surrection des Alpes.

Des événements remarquables marquent l'histoire géologique de la Sainte Baume comme le « bombement Durancien » de la fin du Crétacé qui marque une émergence temporaire de la zone (sous l'influence de l'orogénèse pyrénéenne), ce qui va permettre la formation d'une croûte de bauxite en surface par altération des roches sous le climat tropical du Crétacé. Au Bartonien survient le premier épisode des plissements provençaux, causés par l'association des fortes pressions exercés en profondeur sur le vieux socle hercynien (ce qui entraîne un soulèvement des terrains associé à des failles, mouvements de charriage, chevauchement, plissement) et de la continuité de l'orogénèse pyrénéo-provençale. La tectonique de l'Oligocène va être déterminante sur l'individualisation des bassins et des vallées. Enfin les changements climatiques liés aux dernières glaciations vont achever le façonnement des reliefs actuels (G.Gieu,1968).

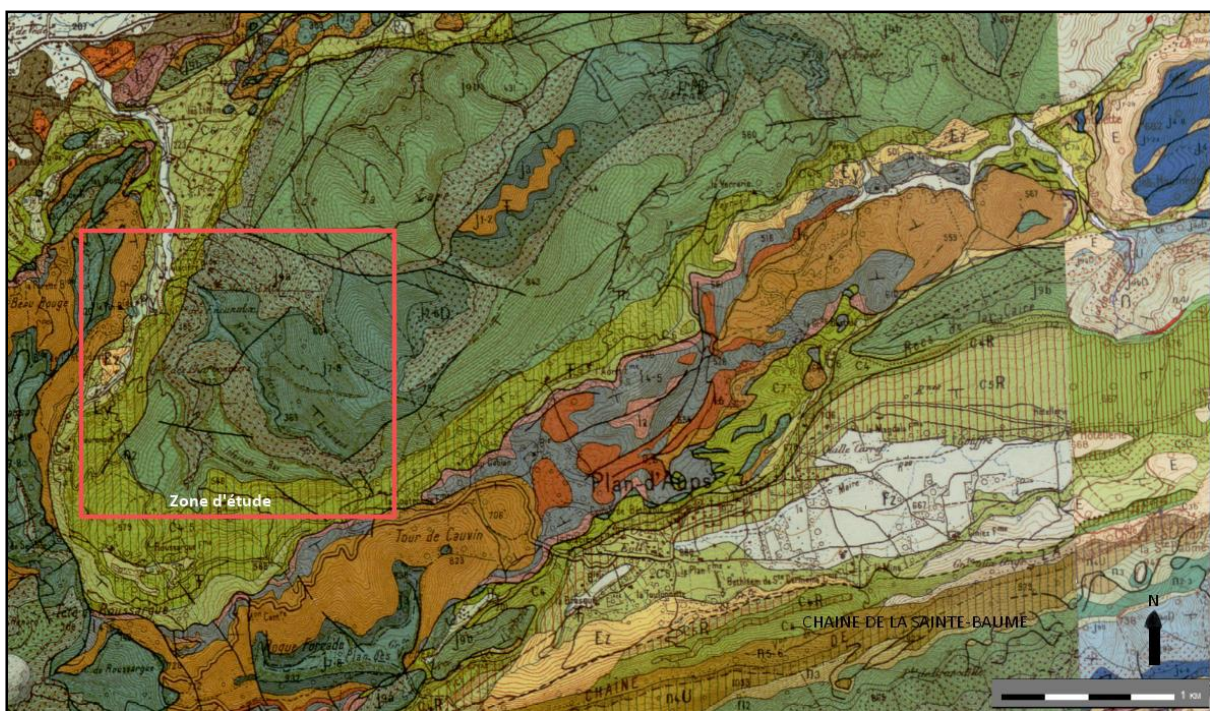


Figure 6: Extrait de la carte géologique 1/50000 du secteur de la Lare (BRGM, tirée d'Infoterre le 15/02/15)

Le massif de la Lare correspond à un dôme anticlinal faillé (formé à l'Oligocène), à noyau de Bathonien supérieur, il est essentiellement constitué par des calcaires et

dolomies du Jurassique supérieur. Il est enveloppé par du crétacé supérieur marin et fluvio-lacustre. (G.Gieu, 1968). Des lambeaux de la nappe de Roqueforcade (Figure 5) sont observables sur le flanc nord du pli, témoins des anciens mouvements de charriages (G.Guieu et al. 2008)

Contexte géologique du secteur étudié

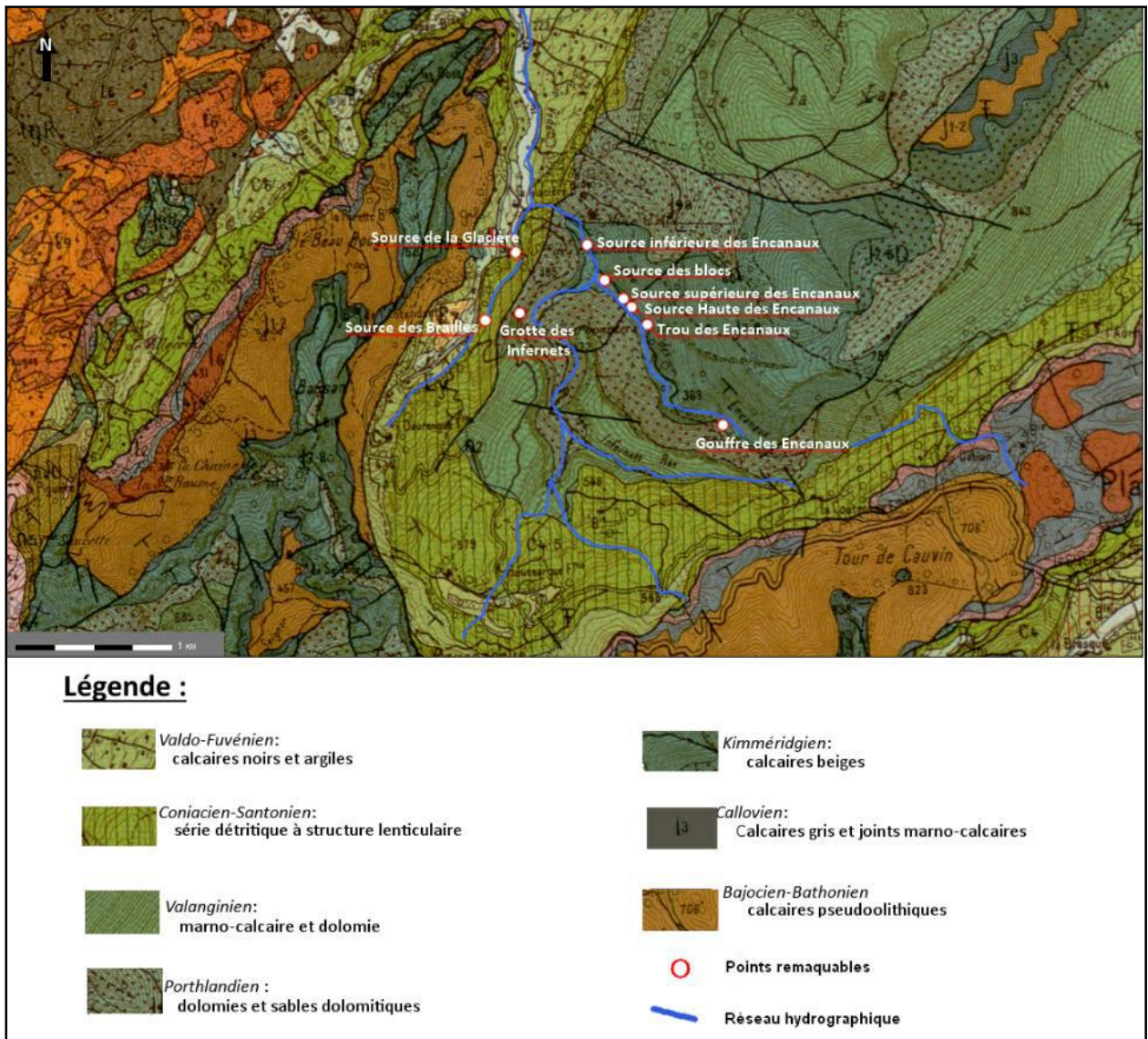


Figure 7: Extrait de la carte géologique 1/50000 du secteur d'étude (BRGM, tirée d'Info terre le 15/02/15)

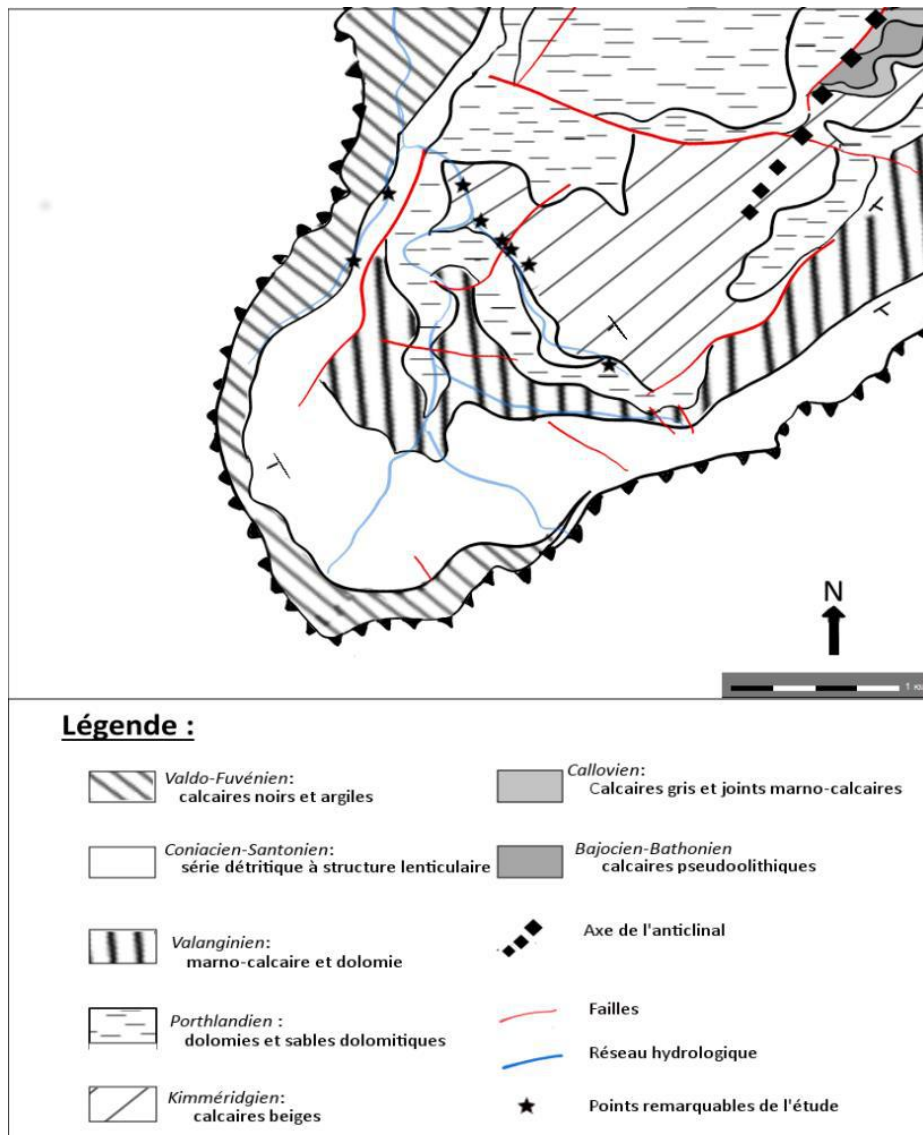


Figure 8: Carte géologique simplifiée de l'anticlinal de la Lare dans le rayon de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la partie Ouest de l'anticlinal de la Lare. En ce qui concerne la géologie du secteur étudié, le vallon de la Daurengue s'est creusé majoritairement dans les calcaires noirs Valdo-Fuvélien avec des traversées dans le Coniacien-Santonien au niveau de la Glacière et de la source des Braille. Le ruisseau des *Infernets* ruisselle à la fois sur les terrains calcaires du Crétacé et les dolomies du Jurassique tout en ayant son origine dans la série détritique du Coniacien-Santonien. Le vallon est recoupé par deux failles dans sa partie supérieure Est et par une troisième à l'aval, cette troisième faille recoupe aussi le vallon des Encanaux et celui de Daurengue. Enfin le vallon des *Encanaux* s'enfonce profondément à la limite du Valanginien (G.Guieu, 1968) dans des terrains marno calcaires à dolomitiques. Quatre failles remarquables traversent le vallon des Encanaux, ainsi qu'un grand nombre de failles de plus petite amplitude.

3.3. Cadre hydrologique

L'écoulement des eaux dans la région est régi par le climat tempéré et la nature calcaire des sols. Cela correspond à un réseau hydrographique peu étendu et un écoulement souterrain dominé par le karst. Ainsi l'Huveaune forme le seul fleuve pérenne de la zone. Sur ce territoire, l'hydrologie et l'hydrogéologie sont dictées par la nature des roches et leur fracturation ainsi que par les niveaux de base formés par l'Huveaune et la mer (B. Arfib, 2015).

Le ruisseau de la Vède est un affluent de l'Huveaune (jonction à Auriol) qui constitue un cours d'eau temporaire en lien avec une source. Son bassin versant draine le flanc nord-ouest de la Sainte Baume. C'est la confluence des ruisseaux de Daurengue, des Infernets et des Encanaux qui forment la Vède. L'alimentation de ces trois vallons est majoritairement souterraine, par les sources des Encanaux et la source de trop plein des Brailles, et complétée par un fort ruissèlement de surface durant épisodes pluvieux.

3.4. Cadre hydrogéologique

Cette région se caractérise par un système karstique développé comme en témoignent les sources permanentes et temporaires présentes sur les deux vallons. Ces sources voient leurs fonctionnements régies en fonction du régime des pluies et des variations d'écoulements des eaux souterraines. Les aquifères associés aux sources de la région sont représentés principalement par des roches carbonatées qui forment un milieu hétérogène pour l'écoulement de l'eau souterraine. Comme il a été remarqué précédemment, ces roches ont été affectées par un grand nombre d'événements tectoniques, ce qui leur donne leur nature très fracturée. L'ensemble des roches carbonatées du territoire ne jouent pas le même rôle vis-à-vis de l'eau. En effet si les terrains dolomitiques constituent un réservoir conséquent, les calcaires, plus compact, vont offrir des zones de transfert des fluides vers les résurgences.

Les sources constituent les exutoires des nappes d'eau souterraines en zone carbonatée karstique. Dans la région les sources sont majoritairement temporaires et les sources pérennes à débit important sont rares. Sur le bassin de la Vède sont recensées les sources suivantes ([Figure 9](#)) :



Figure 9: Carte IGN 1/25000 présentant les sources de la Vède (carte tirée d'Infoterre, le 15/02/15)

Il est par ailleurs possible de donner quelques informations à partir des observations faites sur le terrain les 30 et 31 Janvier concernant le bassin de la Vède :

Vallon de Daurengue

- ✓ Présence de nombreux travertins dans le cours d'eau et au bord du chemin
- ✓ La source des Brailles (source temporaire) fonctionne
- ✓ La source de la Glacière (source permanente) est difficilement atteignable car noyée dans la rivière
- ✓ Les travertins occupent le lit de la Daurengue ([Figure 41](#))

Vallon des Encanaux :

- ✓ La source Inférieure des Encanaux (source permanente) a une conductivité et température en générale supérieure aux autres sources de ce vallon
- ✓ Présence de travertins en aval de la source inférieure des Encanaux

- ✓ La source des Blocs inférieures des Encanaux (source temporaire) fonctionne en crue seulement
- ✓ La source Supérieure des Encanaux (source permanente) avec un débit important le 30/01/2015
- ✓ La source Haute des Encanaux (source temporaire) de trop-plein, active en crue
- ✓ Les Trous des Encanaux (source temporaire) débordant dans la rivière le 30/01/2015

Les fiches descriptives de ces points sont accessibles en annexe ([Annexe 8](#) à [Annexe 14](#)).

3.4.1. Estimation des bassins versants topographique et hydrogéologique :

En se basant sur l'estimation qualitative des bassins versants des différents cours d'eau étudiés, il est possible de compléter la compréhension de leurs fonctionnements hydrologique et hydrogéologique. L'estimation du bassin versant topographique permet d'évaluer les écoulements de surface et d'ainsi fournir un ordre de grandeur quant à la quantité d'eau entrant dans le système hydrologique. Il est cependant important de noter que ces données peuvent être influencées par un grand nombre de variables de terrains notamment en ce qui concerne le contexte géologique. L'étude préalable des cartes topographiques et géologiques, l'utilisation de précédentes études corrélées aux observations effectuées sur le terrain permettront donc de fournir des hypothèses de fonctionnement cohérentes.

Bassins versants topographiques :

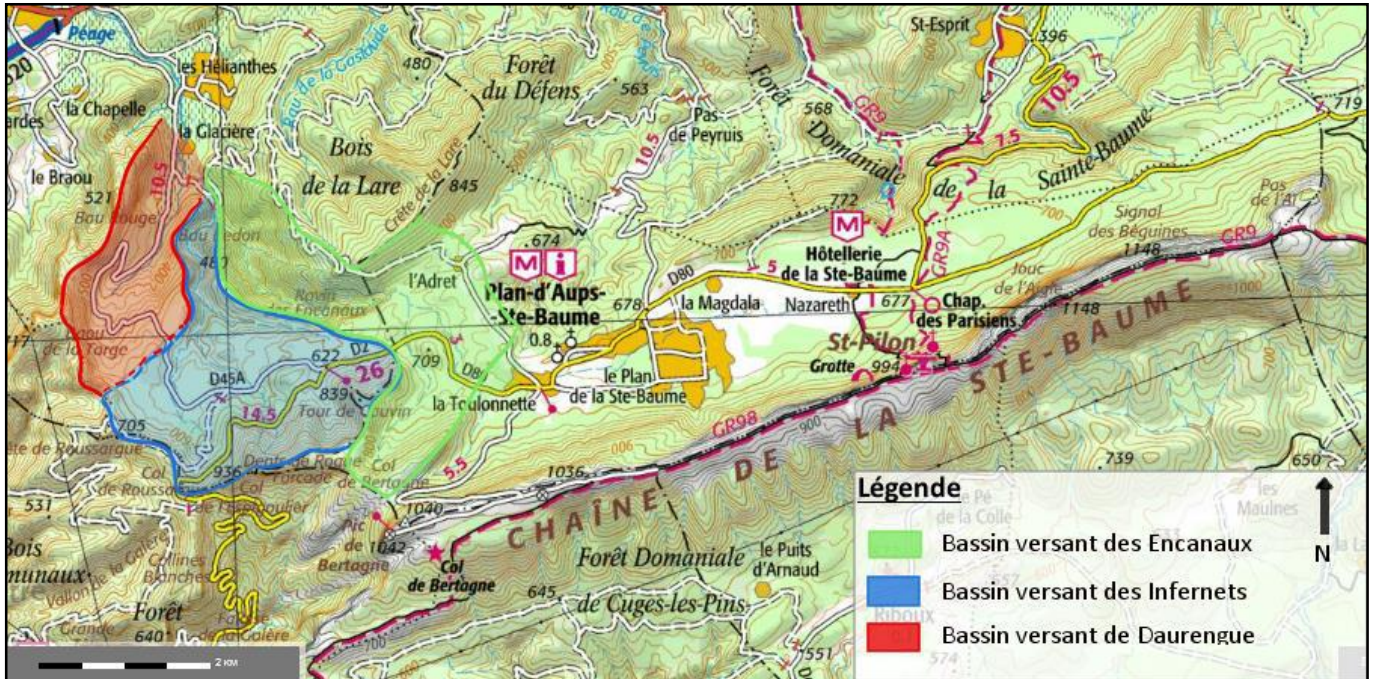


Figure 10: Estimation des bassins versant topographiques des cours d'eaux étudiés, sur fond de carte IGN 1/1000000, BRGM

Ces estimations ont été définies par l'étude de la carte topographique IGN à différentes échelles. Ont été pris en compte les altitudes, les lignes de crêtes et les réseaux hydrologiques déjà établis.

3.4.2. Le bassin des Infernets

Le bassin en lui-même est la seule source d'alimentation du ruisseau des Infernets. En effet, aucune source pérenne ou remarquable n'a été observée dans ce vallon. Ce cours d'eau ne coule donc qu'exceptionnellement.

3.4.3. Le bassin de Daurengue

Le ruisseau de Daurengue compte un grand nombre de petite résurgence assurant son alimentation constante (bien que le ruisseau puisse à l'étiage présenter un débit très faible). La source des Brailles se situe sur ce vallon.

3.4.4. Le bassin des Encanaux

La zone autour de Plan-d'Aups/Ste-Baume présente une morphologie de type plateau qui rend plus difficile la détermination exact des écoulements et leurs rôles dans l'alimentation des différents cours d'eaux. Cependant en se basant sur la topographie seule, le bassin versant des Encanaux s'étend du vallon des Encanaux jusqu'à au sud du massif de la St Baume, cela en passant par l'ouest de Plan d'Aups, où l'on observe une ligne de partage des eaux. Le plateau du Plan d'Aups n'alimente donc pas par ruissellement les Encanaux. De plus, une grande partie du Plan d'Aups est drainée vers des pertes qui alimentent ensuite le vallon de la Castelette Concernant l'écoulement des sources présentes sur le plateau, les sources des Lavandiers et du Cros, dans la partie Est du plateau, alimentent le flux des Encanaux.

Ces bassins définissent les ruissellements de « surfaces », pour pouvoir estimer les écoulements réels il est nécessaire de comprendre la structure des terrains en profondeur.

Bassin versant hydrogéologique :

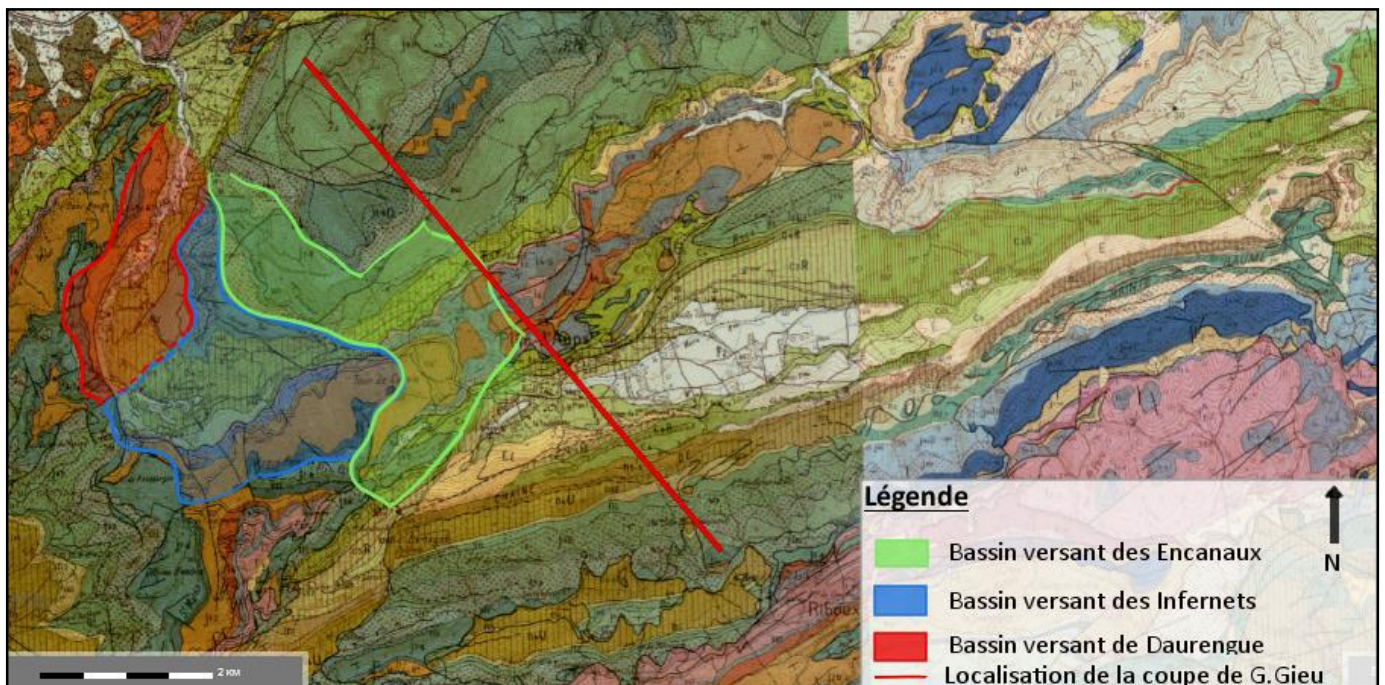


Figure 11: Estimation des bassins versants topographiques des cours d'eau étudiés, sur fond de carte géologiques, la ligne rouge correspond au tracé de la coupe de G. Gieu.

Pour comprendre la structuration de la zone, une analogie à la coupe géologique présentée dans la thèse de G.Gieu ([Figure 6](#): Extrait de la carte géologique 1/50000 du secteur de la Lare (BRGM, tirée d'Infoterre le 15/02/15)) permet une meilleure appréciation du bassin. Dans la zone d'étude sensu stricto, le vallon de Daurengue s'est tracé dans les calcaires noirs Valdo-Fuvélien tandis que les eaux des Infernets traversent des terrains à dominance dolomitique/marno-calcaire. Le ruisseau des Encanaux s'enfonce quand à lui dans des terrains calcaires et dolomitiques. Dans cette zone le pendage des couches est NW mais perturbé localement par la présence de failles.

Ces observations réduisent l'étendue des bassins versants réels des vallons étudiés (par rapport à l'estimation topographique) qui se limiteraient aux vallons en eux même. Il serait cependant intéressant de compléter ces hypothèses par des observations de terrains plus approfondies et des traçages à plus grande échelle pour pouvoir appréhender au mieux le rôle des réseaux karstiques et des failles dans l'alimentation sur l'étendue du massif.

3.5. Le gouffre des Encanaux

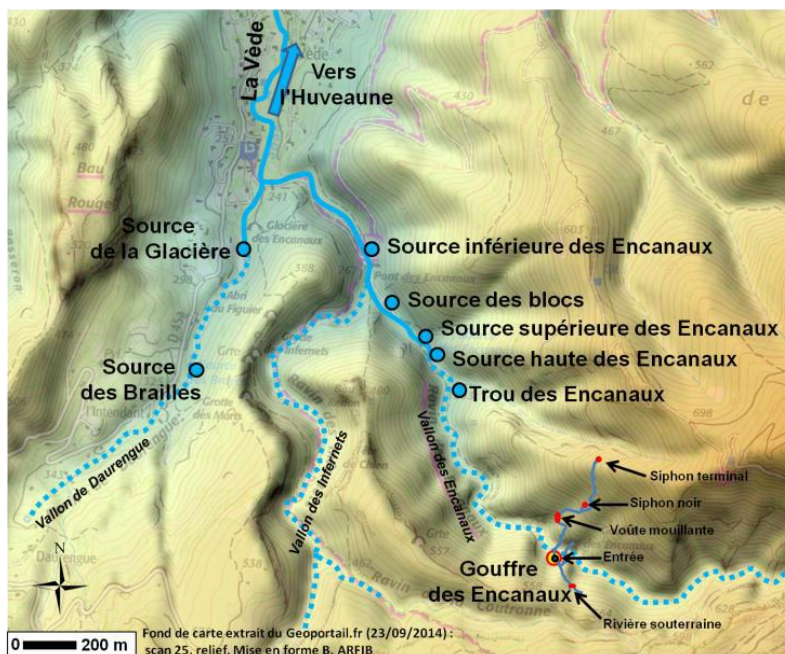


Figure 12: Situation et représentation du gouffre des Encanaux

Le karst de ce secteur est reconnu pour ces cavités spéléologiques accessibles relativement facilement et sujettes à des crues et des ennoiements à certaines périodes de l'année. Le gouffre des Encanaux fait partie de ces cavités qu'il est possible de pénétrer et donc d'étudier. L'entrée du gouffre se situe 420m d'altitude sur

la rive gauche du vallon des Encanaux, à environ 10 m au-dessus du lit de la rivière (après 45 minutes de marche environ en suivant le vallon

des Encanaux). La rivière étant généralement à sec (du fait d'une alimentation quasi exclusive par ruissellement) en amont des sources, le parcours peut se révéler compliquer par temps humide (rocher très glissant et vasque d'eau à contourner plus ou moins facilement).



L'entrée du gouffre amène sur un puits direct de 67 mètres de profondeur dans une fracture orientée NE/SO.

Figure 13: Entrée du gouffre (cliche pris par M Arfib le 31/01/2015)

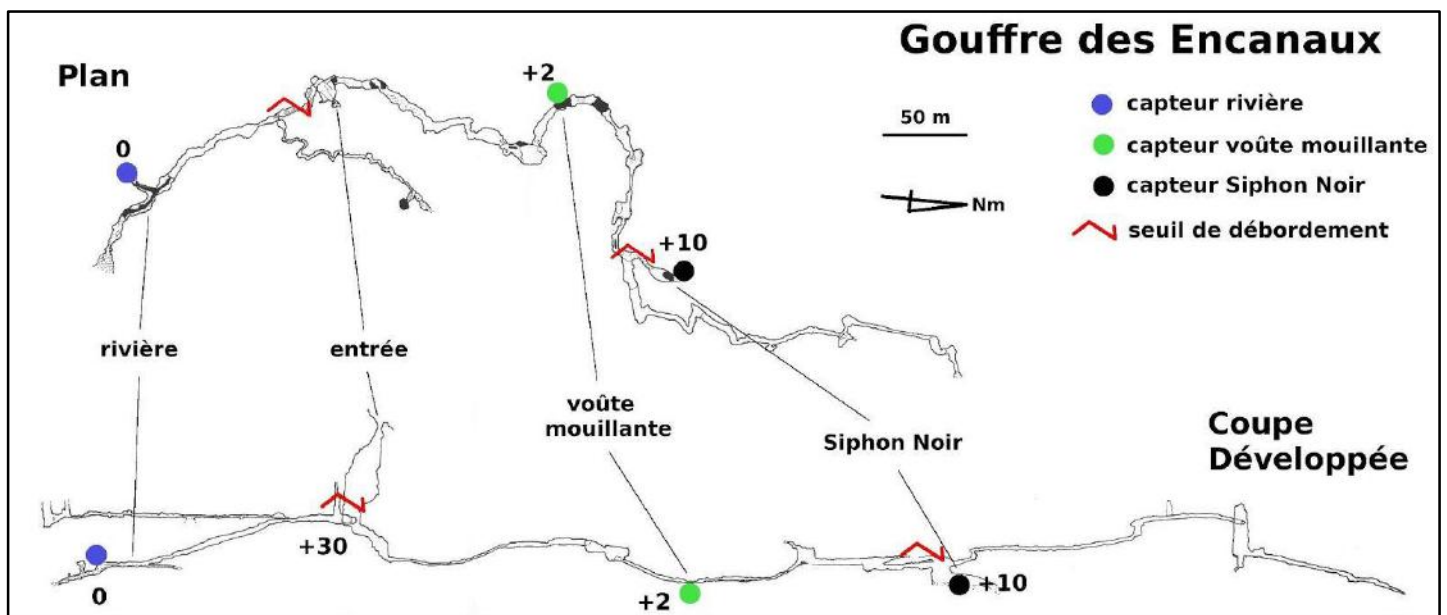


Figure 14: Schéma du gouffre des Encanaux, en plan et en coupe (Source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015 ; document d'origine : Topographie CAF 1987)

Quatre grands ensembles sont repérés dans le gouffre : l'entrée qui se fait par le puits, la rivière souterraine qui est directement liée à certaines sources du vallon des Encanaux (source supérieure d'après la thèse de C. COULIER), la voûte mouillante et le siphon noir. Dans le but d'étudier la circulation de l'eau et les liens entre ces unités, des capteurs de pression ont été placés en différents points du gouffre comme le

montre le schéma précédent. Il a été décidé de fixer le niveau de la rivière souterraine comme référentiel pour les mesures de hauteur d'eau dans le gouffre. A partir du référentiel, il est possible de voir des variations d'altitude influençant la circulation de l'eau entre les unités. Il existe par ailleurs plusieurs seuils de débordement : le premier entre la rivière et le chenal en direction de la voûte mouillante, et le second entre la voûte mouillante et le siphon noir.



Il est possible de décrire la voûte mouillante : elle correspond à un plan d'eau, simple voûte mouillante en été, et qui siphonne le reste de l'année

Figure 15: Voûte mouillante (source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015; cliché pris le 29/05/2014)

De même, le siphon noir est une cavité de 40 mètres de profondeur qui a été plongé à plusieurs reprises, et débouche sur une galerie exondée et un nouveau siphon.

Figure 16: Le siphon noir (source : revue Spelunca, Mr Alexandre Zappelli et Mr Bruno Arfib, 2015; cliché pris le 29/05/2014)



Dans l'ensemble de la cavité, on peut remarquer des traces de mise en charge avec des dépôts noirs, des dépôts argileux et de sable sur les parois ainsi que des galets ronds polis. Des lames d'érosion sont présentes à plusieurs endroits de la cavité ce qui démontrent d'une variation du niveau d'eau dans les cavités souterraines.

Par ailleurs, une étude préalable du fonctionnement hydrodynamique du gouffre a permis de déterminer les conditions de mises en charges des compartiments (rivière, voûte mouillante et siphon noir). Ces données permettent de comprendre les relations entre pluviosité et hauteur d'eau dans le gouffre et pourront nous servir dans l'interprétation et la compréhension du bassin de la Vède

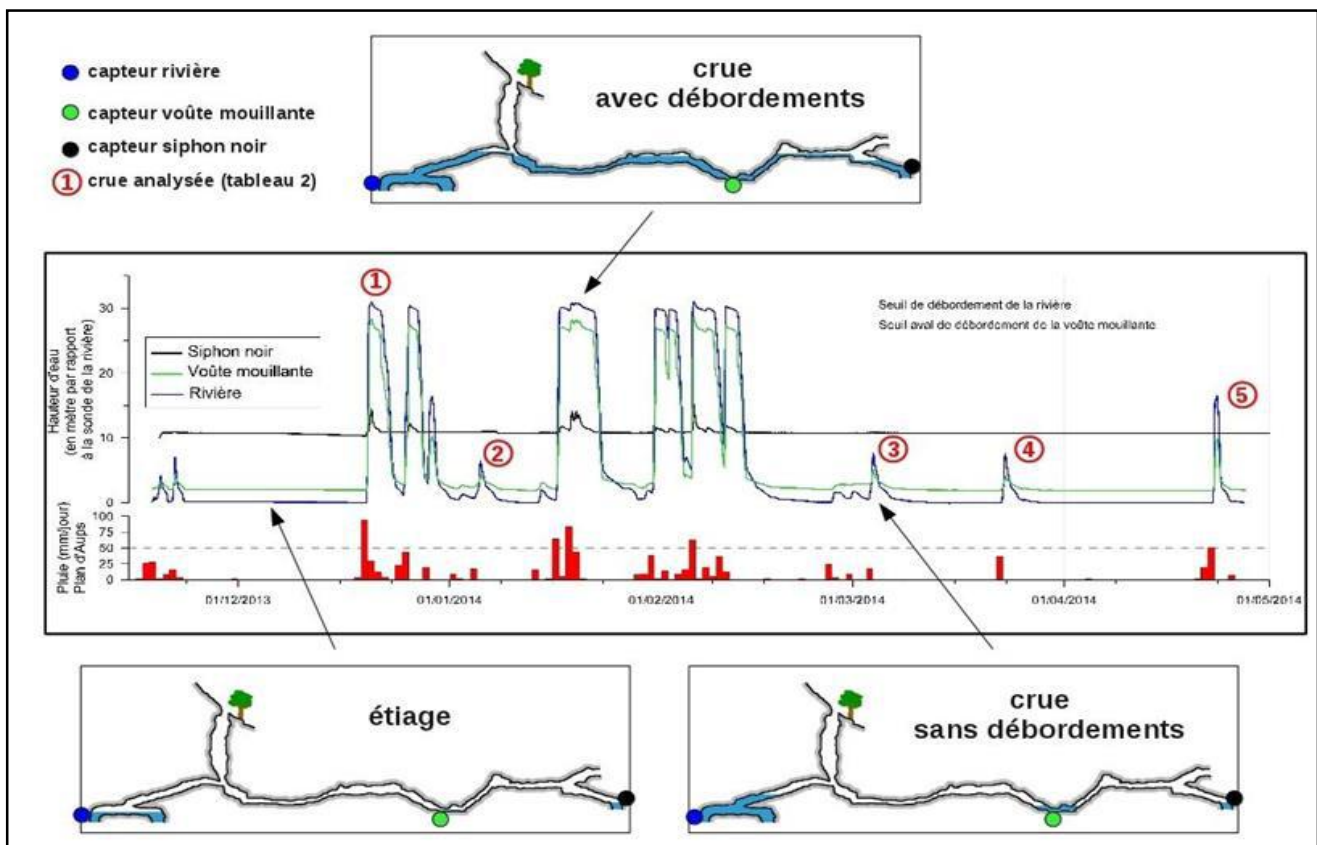


Figure 17: Fonctionnement hydrodynamique du gouffre des Encanaux

3.6. Les traçages artificiels existants

Plusieurs traçages artificiels ont déjà été effectués par M. Coulier en 1983 (Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale, Bouches du Rhône-Var, 1985).

Le traçage a eu lieu le 02/07/1983. L'injection de 238g de fluorescéine a été faite au niveau de la rivière souterraine du gouffre des Encanaux, en étiage sévère. Les points surveillés étaient le ruisseau de Daurengue, la source inférieure, la source supérieure et le trou des Encanaux.

Les résultats de ce traçage ont montré une relation directe entre le point d'injection et la source supérieure. Cela se traduit par une restitution quasi complète du traceur, de l'ordre de 100%. Il faut tout de même noter la présence de traceur au niveau du trou des Encanaux. Enfin, l'absence de relation entre source supérieure et source inférieure est confirmée dans ces conditions hydrologiques. En termes de temps de restitution, il faut remarquer un étalement de la réponse assez important, de l'ordre de 8j pour restituer une grande partie du traceur.

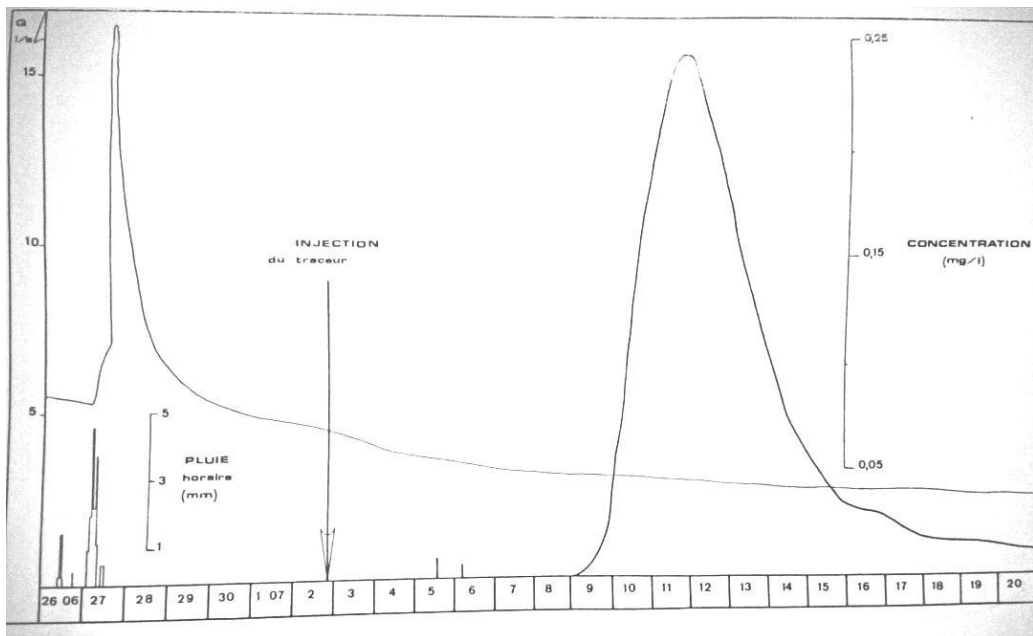


Figure 18: Courbe de restitution du traçage effectué par C. Coulier, le 02/07/1983

Plusieurs conclusions sur le fonctionnement des sources ont été tirées du traçage et des analyses chimiques de l'eau dans le travail réalisé par M Coulier.

- ✓ Origine de l'eau différente entre source supérieure et inférieure
- ✓ Karstification développée au niveau de la source supérieure
- ✓ Indépendance des deux sources dans leurs fonctionnements (traçage artificiel et étude corrélative des débits)
- ✓ Observations sur le vallon de Daurengue : la source temporaire des Brailles possédant un réseau spéléologique important, et la source de la Galcière dans le lit du ruisseau remarquable par sa température élevée de l'ordre de 20,5°C (contre environ 13°C dans cette région).

Il est important de noter que ce traçage a été fait en étiage. Il faudrait donc compléter cette étude avec des traçages en crue ou en conditions intermédiaires pour observer l'évolution des paramètres entre le gouffre et les sources (pourcentage de restitution, vitesse de restitution).

4. MATERIELS ET METHODES

4.1. La conductivité électrique et la température

La conductivité témoigne de la minéralisation de l'eau, et donc dépendante de la concentration en ions dans l'eau. Plusieurs facteurs influencent donc ce paramètre: la concentration en CO₂ dissous et la nature de la roche encaissante.

La mesure de la conductivité électrique et de la température est une méthode pouvant servir à déterminer en partie la vulnérabilité d'une eau de source. En effet, en mesurant ces paramètres sur une source, il est possible d'observer leurs variations en fonctions des conditions hydrologiques. Ainsi, une eau de source dont la conductivité est modifiée après un épisode pluvieux témoigne de l'infiltration rapide des eaux de ruissellement. Il est donc intéressant de mesurer en continu ces paramètres sur une source pour avoir un suivi le plus complet possible de la ressource en eau.

La mesure s'effectue à l'aide d'un conductimètre fournissant aussi la température et la salinité. D'autres mesures physico-chimiques sont possibles avec différentes sondes (pH, ...)

Deux conductimètres différents ont été utilisés pendant cette étude. Pour s'assurer que les appareils fournissent des valeurs similaires de température et de conductivité, deux mesures ont été effectués le 20/03/2015 sur la source des Brailles.

	WTW Multi 340i	WTW TetraCom 1970i
Heure	20/03/2015 à 8h50	20/03/2015 à 8h50
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	511	508
Température ($^{\circ}\text{C}$)	13.0	13.0

Tableau 1: Tableau de comparaison de mesure ponctuelle à l'aide de deux conductimètres



Figure 19: Utilisation de deux conductimètres, le 20/03/2015

La méthode de mesure est très simple. Il suffit de plonger la sonde dans l'eau, en essayant de se placer dans des zones assez calme, avec peu de remous, attendre ensuite quelques secondes, le temps que la valeur se stabilise.

Il est important de noter précisément les valeurs obtenues avec la date et l'heure afin d'avoir le suivi le plus précis possible.

4.2. Traçage artificiel

Les méthodes de traçage artificiels, permettent l'investigation des aquifères karstiques afin de comprendre leurs fonctionnements dans leur ensemble (zones de réserves, zones de transit) ainsi que pour déterminer les aires d'alimentation ainsi que pour quantifier les risques de pollution par des produits solubles et donc transportables (*Phillipe Meuse*).

Un traçage artificiel consiste à introduire dans le sous-sol un traceur, puis à rechercher cette même substance en un ou plusieurs points d'émergence des eaux souterraines. Le traceur est défini comme étant une substance facilement détectable et peu dégradable dans le milieu souterrain, qui est transportée par l'eau et susceptible de représenter son transit. On parle d'injection de traceurs artificiels dans le cas d'une injection de colorants fluorescents destinée à définir l'appartenance d'un point (Source) au système et pour caractériser les conditions d'écoulements souterrains.

Les sources sont les points de convergence des écoulements souterrains. Ainsi, l'étude des aquifères karstiques s'articule entre l'hydrodynamique (étude de la variation des débits de sortie au cours du temps : hydrogramme) et l'hydrogéochimie, soit la variation de concentration des différents traceurs injectés au cours du temps.

Il faudra étudier chaque aquifère karstique dans sa totalité, de manière à prendre en compte dans sa globalité l'organisation de son drainage souterrain et sa fonctionnalité.

Pour ce faire, le suivi en continu des écoulements aux exutoires du système (source pérenne, sources de trop plein) et le suivi de la chimie de l'eau (enregistrement de la conductivité, campagnes d'échantillonnages pour analyses chimiques) constituent les informations de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement karstique.

4.2.1. Traceurs Artificiels

Qu'est qu'un traceur artificiel: " Substance aisément décelable qu'on peut introduire en faible quantité dans une eau courante, de surface ou souterraine, pour matérialiser les trajectoires des particules ou mesurer des caractéristiques de l'écoulement telles que vitesse du courant, temps de parcours, dilution, etc..". (Glossaire International d'Hydrologie, 1992)

Durant cette étude, deux colorants ont été utilisés, en fonction de leurs qualités, leurs coûts et de leurs toxicités.

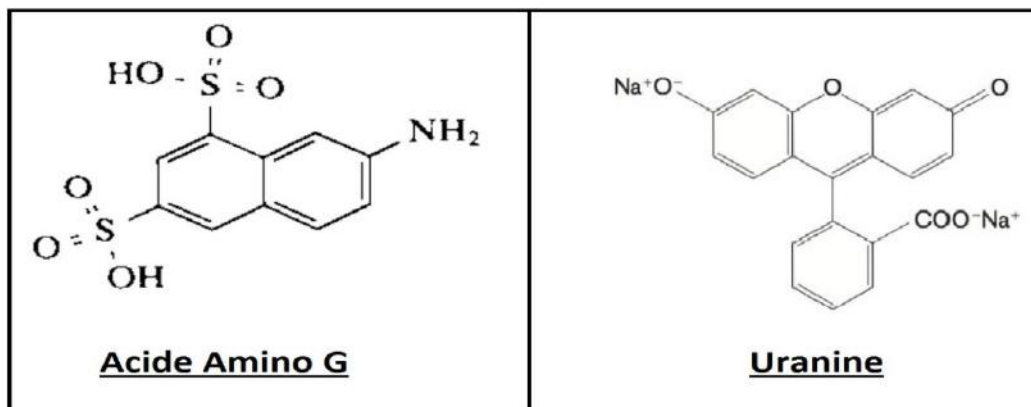


Figure 20: Formules développées de l'acide amino G et de l'uranine (ou fluorescéine)

4.2.2. Risques liés aux traceurs

De nombreuses études ont été mené (Gombert et Carré, Karstologia n°58, 2011) afin de déterminer la toxicité des traceurs et leurs impacts sur l'environnement où les évaluations montrent que les traceurs artificiels ne peuvent présenter aucun risque

significatif pour la santé ou l'environnement, si la concentration est maintenue en dessous de 1 à 2 mg/l durant 24h au point de captage.

4.2.3. Suivi des traçages

Le suivi des traçages effectués sur la zone d'étude a été réalisé à l'aide de mesures se basant sur la fluorescence de l'eau après injection de deux traceurs artificiels : l'uranine (ou fluorescéine) et l'acide amino G. Pour réaliser l'analyse des données récoltées sur le terrain, la préparation de solutions étalons de ces deux traceurs est nécessaire.

4.2.3.1. Préparation des solutions étalons

Elles serviront à la réalisation des droites d'étalonnages nous permettant ainsi d'obtenir une relation entre intensité (mesuré en mV) et concentration en traceurs (en $\mu\text{g/L}$ ou ppb).

Les solutions étalons d'Uranine et d'Acide Amino G sont faites à trois concentrations :

- ✓ 1 $\mu\text{g/L}$
- ✓ 10 $\mu\text{g/L}$
- ✓ 100 $\mu\text{g/L}$

Précautions :

- ✓ Rinçage du matériel à l'eau ultra pure.
- ✓ Homogénéisation des solutions d'Acide Amino G et d'Uranine.
- ✓ Détermination de la masse volumique exacte de l'Uranine.

Matériels :

- ✓ 1 erlenmeyer de 200mL
- ✓ 4 erlenmeyers de 1L
- ✓ Acide Amino G en poudre
- ✓ Fluorescéine liquide
- ✓ Bécher
- ✓ Parafilm
- ✓ Eau pure

- ✓ Sabot en verre
- ✓ Balance
- ✓ Pipettes mécaniques à dosage 1mL/5mL/10mL

Pour réaliser la solution étalon d'acide amino G, il faut dissoudre 0.1g de poudre dans 1L d'eau ultra pure. Il faut pour cela, utiliser un sabot et la balance tarée précise à 0.0001g. Cette solution à 1000µg/L est ensuite diluée pour obtenir une solution mère 2 à 200µg/L, en utilisant toujours de l'eau ultra pure.

Il suffit ensuite de diluer cette solution mère pour obtenir les trois solutions étalons.

- ✓ Etalon 100µg/L : solution mère 2 diluée 10 fois; soit 100ml de solution mère 2 pour 1L d'eau
- ✓ Etalon 10µg/L : solution mère 2 diluée 100 fois; soit 10ml de solution mère 2 pour 1L d'eau
- ✓ Etalon 1µg/L : solution mère 2 diluée 1000 fois; soit 1ml de solution mère 2 pour 1L d'eau

Le schéma suivant résume le principe de dilution et l'obtention des solutions étalons d'acide amino G

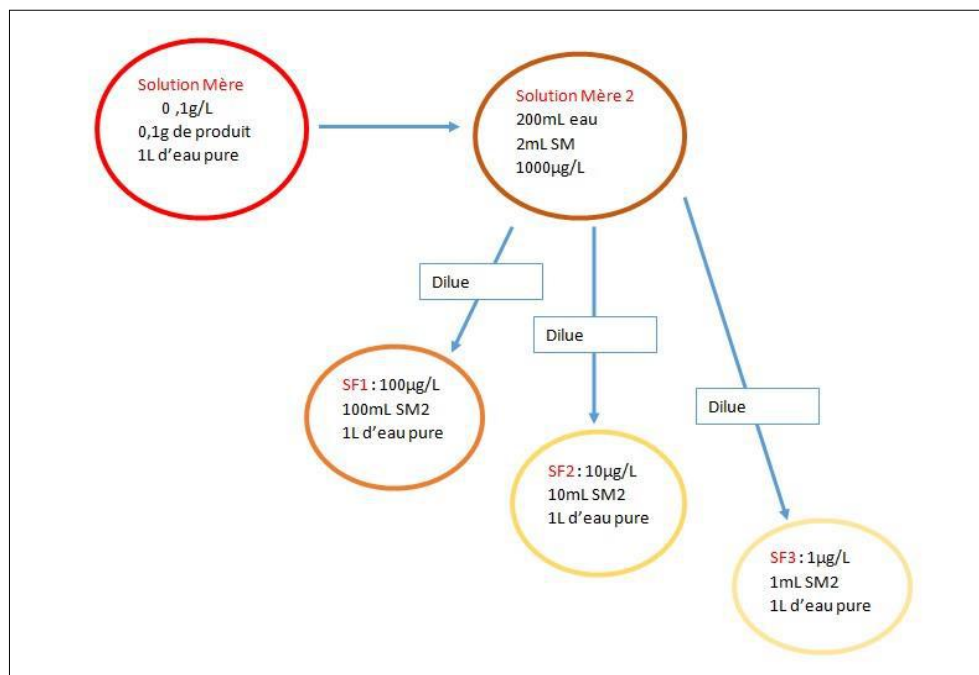


Figure 21: Etapes de dilution

La même méthode a été suivie pour réaliser les solutions étalons de fluorescéine liquide dont il a d'abord fallu déterminer la masse volumique. Pour cela, 5mL de fluorescéine ont été pesés dans un bécher avec lequel la balance a été préalablement tarée.

Il a été obtenu que 5 mL pèse 5.6386 g soit une masse volumique de 1127.82g/L.

Pour obtenir une solution à 1000µg/L, il faut l'équivalent de 0,1g de fluorescéine, soit 0.0887mL ou 88,7µL qui seront dilués dans 1L d'eau ultra pure. La solution mère 2 est ensuite obtenue en prélevant 2 mL de cette solution qu'il faut mélanger à 200mL d'eau ultra pure.

Les solutions étalons de fluorescéine seront obtenues en diluant cette solution mère de la même façon que pour l'acide amino G.

Toutes les solutions étalons sont ensuite versées dans des flacons en plastique puis entreposées en chambre froide. L'intérêt est de les conserver à l'abri de la lumière et à des températures basses pour limiter la dégradation des traceurs.

4.2.3.2. Suivi en continu à l'aide de fluorimètres de terrain

Deux fluorimètres de type GGun ont été utilisés. Ils sont composés de deux parties principales. Il faut préciser que ces appareils sont alimentés à partir d'une batterie de 6V.



Figure 24: Logger (le 31/01/2015)



Figure 23: Sonde de mesure de fluorescence (Albilis SARL)



Figure 22: Zoom sur l'affichage du logger (Albilis SARL)

4.2.3.3. Suivi de la fluorescence par prélèvements automatiques

4.2.3.3.1. Les préleveurs automatiques

Deux préleveurs automatiques de type ISCO 1680 ont été installés sur la zone d'étude. L'intérêt de ces appareils est de prélever des échantillons à intervalle de temps régulier (de 1 à 999 min). Voici la composition de ces appareils :



Figure 27: Panneau de commande d'un préleveur automatique. le 02/02/2015



Figure 26: Vue d'ensemble du préleveur automatique, le 30/01/2015



Figure 25: Répartition des flacons préleveurs, le 30/01/2015

A partir des prélèvements, il est possible de réaliser des mesures de fluorescence à l'aide du spectrofluorimètre du LCE (Laboratoire de Chimie de l'Environnement).

L'utilisation du spectrofluorimètre ne demande pas de compétences particulières. Il suffit de maîtriser les bases du logiciel associé à l'appareil pour réaliser des spectres d'excitation et d'émission ainsi que des mesures d'intensité à longueur d'onde fixe.

Quelques précautions sont tout de même à prendre pour réaliser dans de bonnes conditions les mesures de fluorescence des échantillons de terrain.

- ✓ Nettoyage des cuves de mesures à l'aide de papier essuie-tout
- ✓ Vérification des longueurs d'ondes d'excitation et d'émission pour les deux traceurs utilisés (Fluorescéine et Acide Amino G)

4.2.3.3.2. Vérification des longueurs d'ondes des traceurs

Cette vérification se fait en réalisant les spectres d'excitation et d'émission de la fluorescéine et de l'acide amino G. Il faut remarquer que la connaissance de ces longueurs d'ondes permettra de confirmer ou infirmer la détection d'un traceur lors de l'analyse des échantillons. Cette remarque fait particulièrement référence à l'acide amino G. En effet, la gamme de longueurs d'onde sur l'acide amino G des fluorimètres peut se confondre avec la fluorescence naturelle de la matière organique. La définition précise des longueurs d'ondes permet de se débarrasser de ce biais.

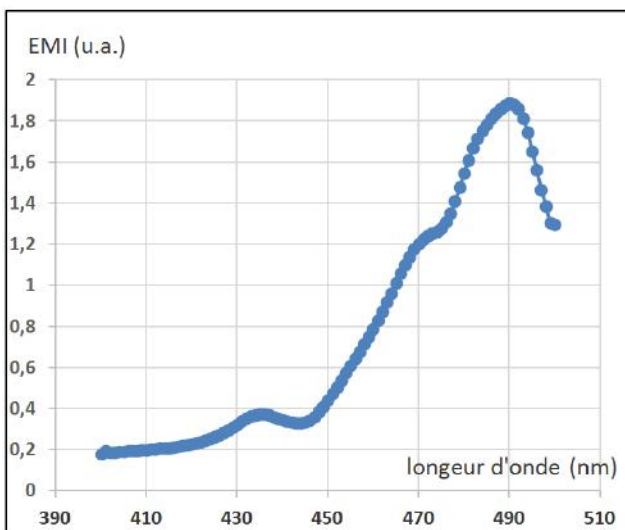


Figure 29: Spectre d'excitation de la fluorescéine, 100ppb, tension PM 460V

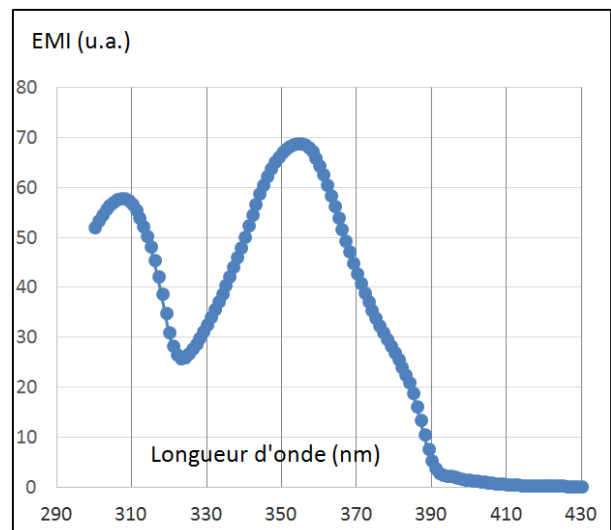


Figure 30: Spectre d'émission de l'acide amino G, 100 ppb, tension PM 540V

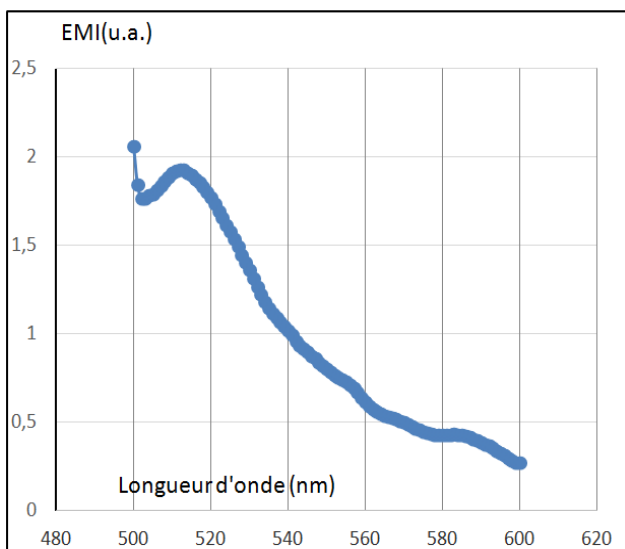


Figure 28: Spectre d'émission de la fluorescéine, 100ppb, tension PM 460V

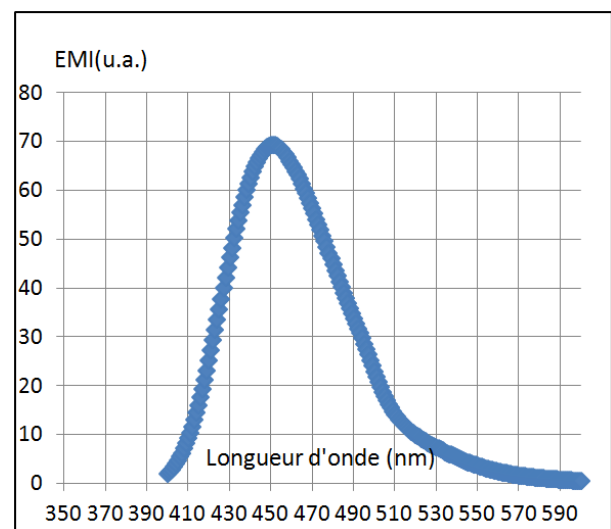


Figure 31 : Spectre d'émissions de l'acide amino G, 100ppb, tension PM540V

Les spectres présentés ci-dessus permettent simplement de confirmer les valeurs fixes d'excitation et d'émission des deux traceurs utilisés pour les mesures de fluorescence des échantillons prélevés par les ISCO.

	Fluorescéine	Acide Amino G
Longueur d'onde d'excitation (nm)	490	355
Longueur d'onde d'émission (nm)	512	450

Tableau 2: Récapitulatif des valeurs d'excitation et d'émission pour les deux traceurs

Ces valeurs correspondent d'ailleurs bien à celles de la littérature (Guide méthodologique, les outils de l'hydrogéologie karstique, BRGM et ONEMA, 2010, p116 et Note brève sur la caractérisation des couples de longueurs d'onde des fluorophores utilisés lors de traçage artificiel, B Arfib, 2012).

4.2.3.4. Etalonnage des fluorimètres

Il est possible d'effectuer les étalonnages à partir des solutions étalons. Pour cela, il est préférable d'utiliser un ordinateur portable sur le terrain pour réaliser l'étalonnage via le logiciel d'acquisition en direct comme nous pouvons le voir sur la photo suivante.



Figure 32: Etalonnage d'un fluorimètre par utilisation d'un PC de terrain, le 20/02/2015

L'étalonnage permet d'obtenir des valeurs en mV dépendante de la concentration en traceur. Trois courbes d'étalonnages ont été réalisées, une pour la fluorescéine et une deuxième pour l'acide amino G fournis par M Arfib (pour le traçage du 31/01/2015) et une troisième pour la fluorescéine fournie par M Zappelli (pour le traçage du 16/03/2015).

Traçage du 31/01/2015 :

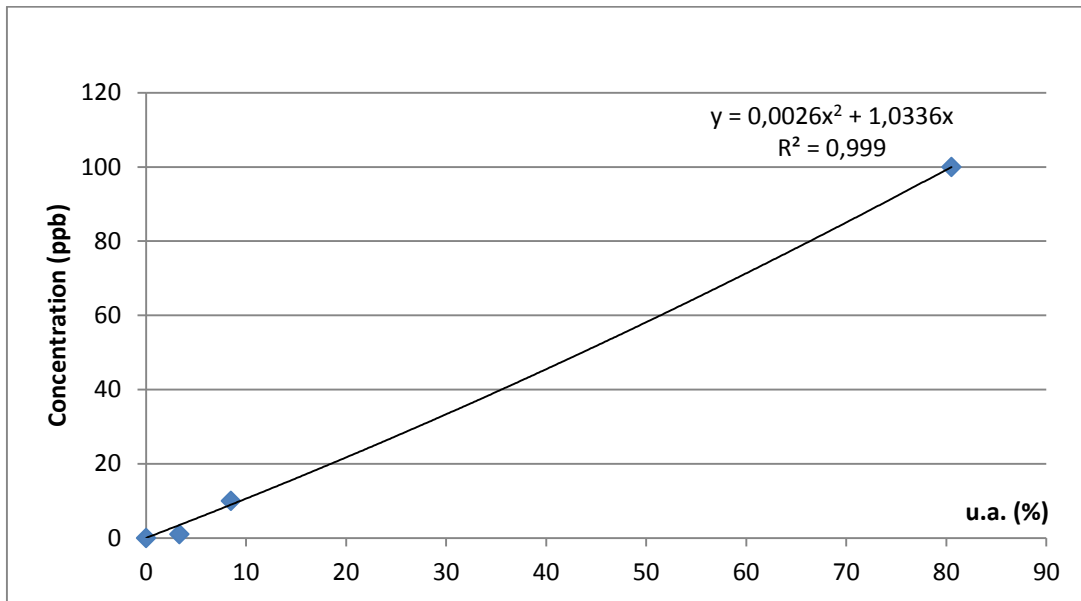


Figure 33 : Courbe d'étalonnage de l'acide amino G pour le traçage du 31/01/2015

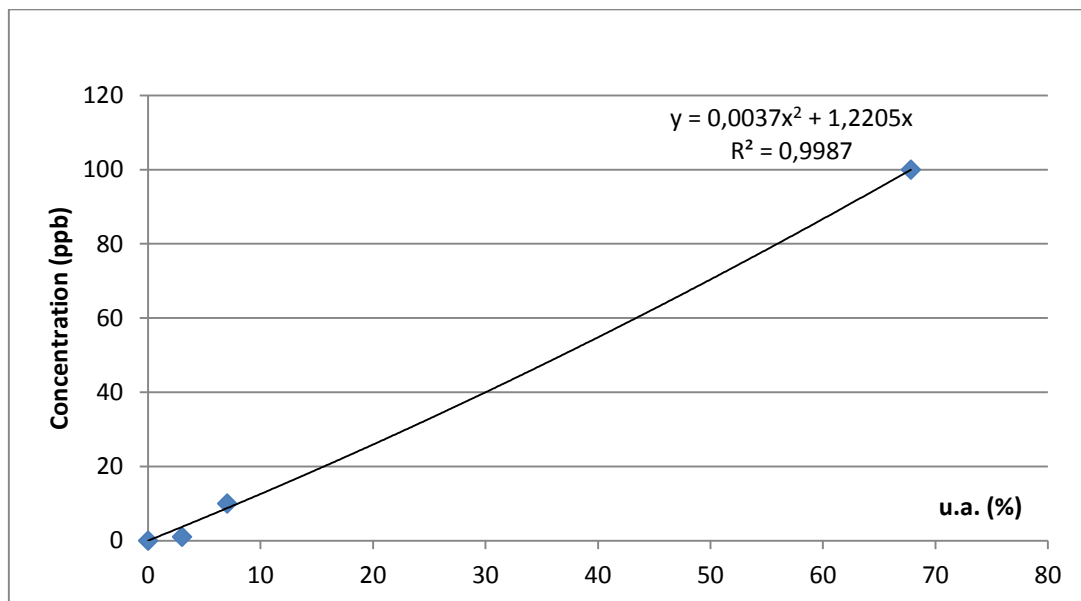


Figure 34 : Courbe d'étalonnage de la fluorescéine pour le traçage du 31/01/2015

Tracage du 16/03/2015 :

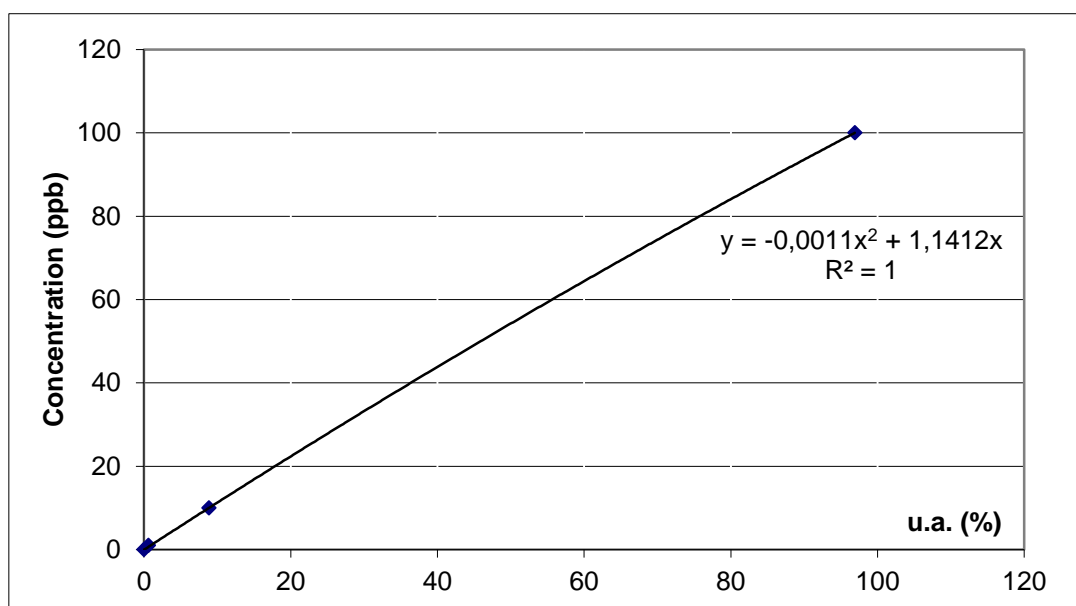


Figure 35 : Courbe d'étalonnage de la fluorescéine pour le tracage du 16/03/2015

Ces équations de courbes sont ensuite utilisées pour convertir les données des fluorimètres pour pouvoir être exploitées. L'intérêt est d'obtenir la concentration des traceurs en fonction du temps à partir des données brutes en millivolts. Cette transformation se réalise à l'aide du logiciel « Fluo ».

Voici un exemple de transformation des données brutes (en mV) en données traitées par le logiciel(en ppb, NTU et $\mu\text{S}/\text{cm}$) pour le fluorimètre n°226 situé en aval de la source supérieure des Encanaux. Seules les valeurs de température ne sont pas modifiées.

#	Time	R	Tracer 1	Tracer 2	Tracer 3	Turbidity	Baseline	Battery V	T	Conductiv
1	15/01/30-18:31:07	0	4.04	0.66	3.96	97.72	13.72	6.33	11.81	0.628
2	15/01/30-18:46:07	0	4.02	0.64	3.95	96.05	13.72	6.33	11.92	0.630
3	15/01/30-19:01:07	0	3.95	0.63	3.95	95.60	13.75	6.33	11.95	0.629
4	15/01/30-19:16:06	0	3.97	0.66	3.93	97.64	13.73	6.32	11.95	0.628
5	15/01/30-19:31:06	0	3.96	0.64	3.92	95.90	13.73	6.32	11.96	0.632
6	15/01/30-19:46:06	0	3.95	0.62	3.89	95.22	13.74	6.32	11.96	0.630
7	15/01/30-20:01:06	0	4.31	0.62	3.94	95.08	13.73	6.32	11.96	0.628
8	15/01/30-20:16:06	0	3.91	0.64	3.89	96.75	13.73	6.32	11.97	0.628
9	15/01/30-20:31:06	0	3.98	0.62	3.39	95.98	13.73	6.32	11.98	0.633
10	15/01/30-20:46:06	0	3.89	0.61	3.89	94.92	13.73	6.32	11.99	0.633

Tableau 3: Extrait de données brutes extraites du fluorimètre n°226 (date en anglais du type AA/MM/JJ)

#	Time	Tracer 1	Tracer 2	Tracer 3	Turbidity	T°C	microS/cm
1	15/01/30-18:31:07	0.94	1.11	53.55	1.78	11.81	5.59e+02
2	15/01/30-18:46:07	0.94	1.04	53.41	1.68	11.92	5.59e+02
3	15/01/30-19:01:07	0.92	1.01	53.44	1.66	11.95	5.58e+02
4	15/01/30-19:16:06	0.92	1.11	53.15	1.78	11.95	5.57e+02
5	15/01/30-19:31:06	0.92	1.04	53.01	1.68	11.96	5.60e+02
6	15/01/30-19:46:06	0.92	0.97	52.59	1.64	11.96	5.59e+02
7	15/01/30-20:01:06	1.03	0.95	53.15	1.63	11.96	5.57e+02
8	15/01/30-20:16:06	0.91	1.05	52.61	1.72	11.97	5.57e+02
9	15/01/30-20:31:06	0.93	0.98	45.49	1.68	11.98	5.61e+02
10	15/01/30-20:46:06	0.90	0.94	52.62	1.62	11.99	5.61e+02

Tableau 4: Extrait après traitement de données brutes

4.3. Débit

4.3.1. Estimation de la vitesse avec un flotteur

Il est intéressant d'effectuer cette estimation pour avoir une idée du débit qui circule au moment des mesures sur le terrain. Cependant, il est difficile de les considérer comme valables et justes. Elle reste une mesure très approximative et peu exploitable dans le cadre de mesures ou d'analyses précises. Il semble tout de même intéressant de présenter rapidement la méthode. Le calcul se fait à l'aide de la formule suivante :

$$Q \approx k \times S \times V$$

- ✓ **Q** : débit en m³/s
- ✓ **k** : coefficient correcteur en fonction des conditions locales de l'expérimentation (on considère k = 2/3 la plupart du temps)
- ✓ **S** : section mouillée en m² (correspond au produit de la largeur avec une profondeur moyenne)
- ✓ **V** : moyenne de plusieurs vitesses du flotteur en surface de la rivière en m/s

4.3.2. Mesure de débit par exploration des champs de vitesse et courantomètre

C'est à l'aide de cette méthode précise que plusieurs mesures de débit ont été réalisées sur le terrain. Cette partie va s'attacher à décrire le principe et les difficultés qui peuvent être liées à l'utilisation de cette méthode.

Sur une section transversale d'une rivière, la vitesse de l'eau n'est pas homogène. Il est donc nécessaire de faire plusieurs mesures ponctuelles de vitesse de l'eau sur plusieurs verticales. Ces mesures permettent d'obtenir une vitesse

moyenne pour chaque verticale. Il suffit ensuite d'additionner ces vitesses et les multiplier par la surface de la section étudiée. C'est le débit.

Plusieurs précautions sont à prendre pour effectuer une mesure de qualité. La première est le choix de la section de rivière à étudier. Il est nécessaire d'avoir un écoulement relativement laminaire, dans un chenal rectiligne et de section et rugosité régulière. C'est pour cela il est intéressant d'utiliser cette méthode en amont d'un petit seuil, réunissant donc les conditions citées précédemment.



Figure 36: Site de mesure du débit de la rivière des Encanaux, le 20/02/2015

La photo précédente ([Figure 36](#)) montre une des sections de mesure du débit au niveau du fluorimètre n°22. Le chenal est relativement rectiligne avec un courant assez laminaire. Le seul problème rencontré était la présence de rocher immergé en aval de la mesure, qui modifie l'écoulement et donc la vitesse de l'eau.

Un courantomètre électromagnétique a été utilisé pour la mesure des vitesses. Le principe de cet appareil repose sur la modification du champ électromagnétique généré par la sonde par la force exercée par l'eau. Pour réaliser une mesure de bonne qualité, il est nécessaire de placer la sonde face au courant et d'être le plus immobile possible pendant la mesure (1 mesure / seconde pendant 10 secondes). La gamme de mesure de ces appareils est de 0.1m/s à 6 m/s.

En parallèle de la réalisation du champ de vitesse, il faut prendre en note le profil en long de la section.

Enfin, à l'aide d'un modèle de fiche de mesure sur le terrain, il faut noter précisément l'ensemble des valeurs de vitesse à chaque profondeurs pour chaque verticale, l'emplacement des verticales par rapport au bord de la rivière et dessiner un profil en long précis. Vous trouverez un modèle de fiche de terrain ainsi que celle réalisé pendant l'étude pour réunir ces informations en Annexe 1: Fiches de travail pour mesure de débit sur le terrain ([Annexe 1](#)).

Le schéma ([Figure 37](#): Représentation du débit par mesure des champs de vitesses) représente un exemple de profil en long, avec les différentes verticales et les profils en vitesse pour chaque verticale. Ce n'est pas représentatif des mesures effectuées par nos propres moyens.

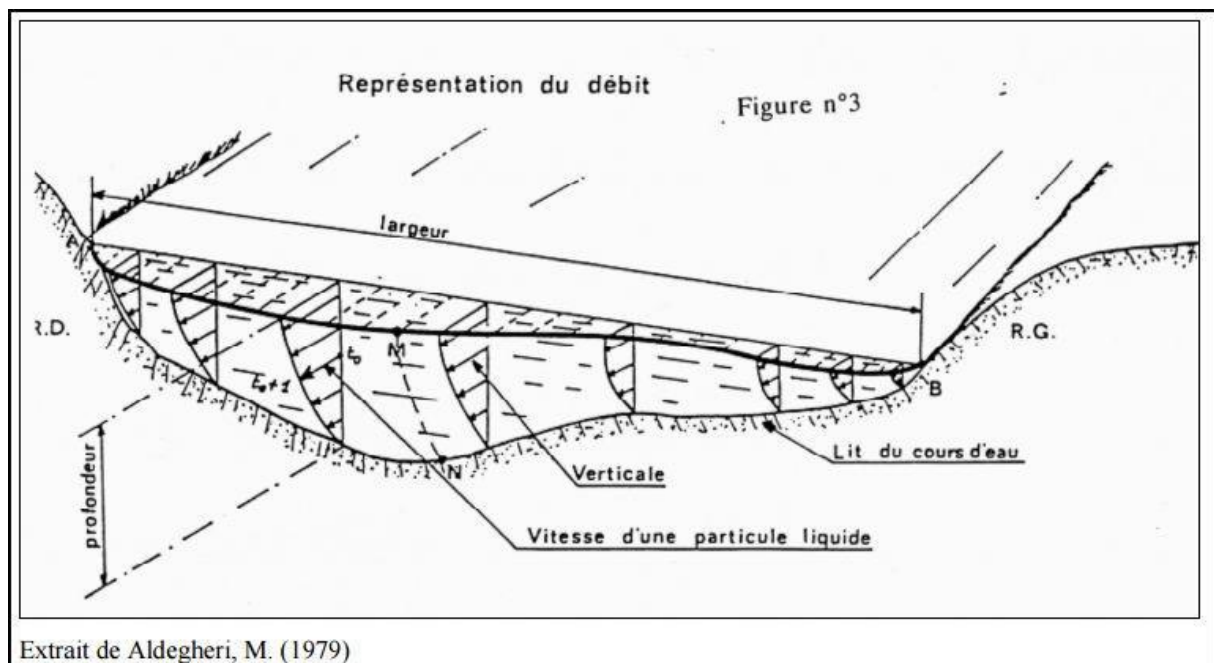


Figure 37 : Représentation du débit par mesure des champs de vitesses

4.4. Traitement des données acquises

L'analyse des données des fluorimètres s'est faite par la succession de plusieurs étapes. La première est la récupération des données brutes de fluorescence, turbidité, conductivité (toutes en mV) et température (en °C) à partir des cartes mémoires. Ces données brutes ont ensuite été traitées à l'aide du logiciel

« Fluo ». Cela a permis l'obtention de fichiers avec la concentration en traceur (en ppb), la turbidité (en NTU), la conductivité (en $\mu\text{S/cm}$) et la température (en $^{\circ}\text{C}$). Vous trouverez un exemple de ces fichiers en [Annexe 3](#) et [Annexe 4](#).

Pour continuer l'analyse, il a fallu effectuer différents calculs à partir d'excel ([Annexe 5](#): Extrait du fichier de travail du fluorimètre 226). Ces calculs permettent d'obtenir la concentration de traceurs en prenant le bruit de fond en compte, le flux de traceur (en g/s), la masse de traceur restituée (en g), le pourcentage de masse restituée par rapport à la masse de traceur injectée (en %) et la Distribution du Temps de Séjour (en s^{-1}).

L'intérêt de ces paramètres est leurs exploitations à partir des logiciels « Grapher » (création de graphique à plusieurs échelles) et « TRAC » (interprétation et modélisation des traçages en milieux poreux). Ce logiciel de modélisation permet, à partir des données traitées, de caler une courbe « modèle ». Ce calage peut se modifier en jouant sur les différents paramètres du modèle :

- | | |
|--|---|
| ✓ Masse de traceur injecté (kg) | ✓ Distance du point de mesure (injection/restitution) (m) |
| ✓ Porosité cinématique | ✓ Coefficient de retard |
| ✓ Vitesse de Darcy (m/s) | ✓ Temps de demi-vie (j) |
| ✓ Vitesse réelle (m/s) | ✓ Coefficient de dégradation (1/s) |
| ✓ Aire de la section transversale (m^2) | |
| ✓ Dispersivité longitudinale (m) | |

L'intérêt principal de ce logiciel est de pouvoir observer les variations de la courbe modèle en fonction de la variation des paramètres.

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU SUIVI PHYSICO-CHIMIQUES DES ENCANAUX ET DE DAURENGUE

L'étude du bassin de la Vède a demandé de travailler sur différents paramètres habituellement utilisés pour caractériser une eau et son écoulement au sein d'un karst. Ainsi, en parallèle des traçages artificiels, le suivi de la conductivité et de la température a été réalisé pour obtenir des informations sur les liens entre les sources. Une analyse chimique de l'eau en quatre points du bassin a aussi été faite et permet de fournir une explication sur l'origine de l'eau de ce système. La majeure partie de ces résultats concernent tout de même les deux traçages artificiels dont l'intérêt est de déterminer et préciser les liaisons entre le gouffre des Encanaux et les différents exutoires de la nappe.

5.1. Pluie, conductivité électrique et température

Le suivi des précipitations associé au suivi de la conductivité et de la température de l'eau est une méthode intéressante pour comprendre en partie le fonctionnement hydrodynamique sur le bassin de la Vède. Dans le but de suivre ces paramètres, des mesures ponctuelles sur le terrain ont été effectuées à l'aide d'un conductimètre étalonné. Les fluorimètres permettent aussi de récolter des données sur ces deux paramètres de manière continue sur les 2 mois de mesures. Enfin, les préleveurs automatiques permettent de fournir des données à différentes périodes. Il faut rappeler qu'au cours de l'étude, le fluorimètre 369 a été déplacé deux fois ([Figure 43](#)).

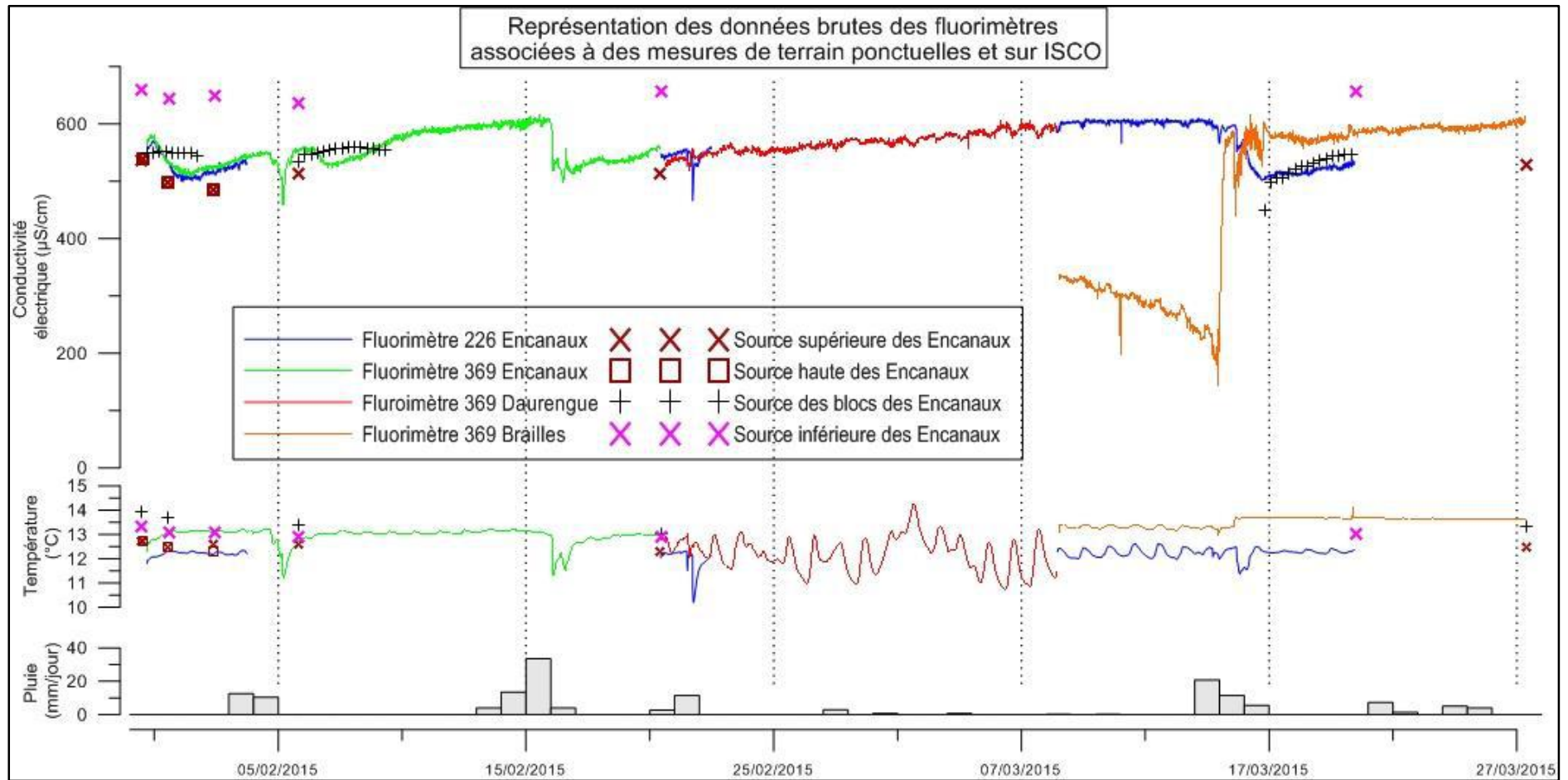


Figure 38: Suivi de la conductivité électrique et de la température, données brutes

Tout d'abord, il est possible de représenter une partie des données sur le même graphique. Le point important est la différence entre les valeurs fournies par les fluorimètres et les valeurs obtenues par mesures ponctuelles sur le terrain. C'est pourquoi un travail a dû être fait pour corriger les données à partir du conductimètre étalonné. Cela a permis d'obtenir le graphique suivant :

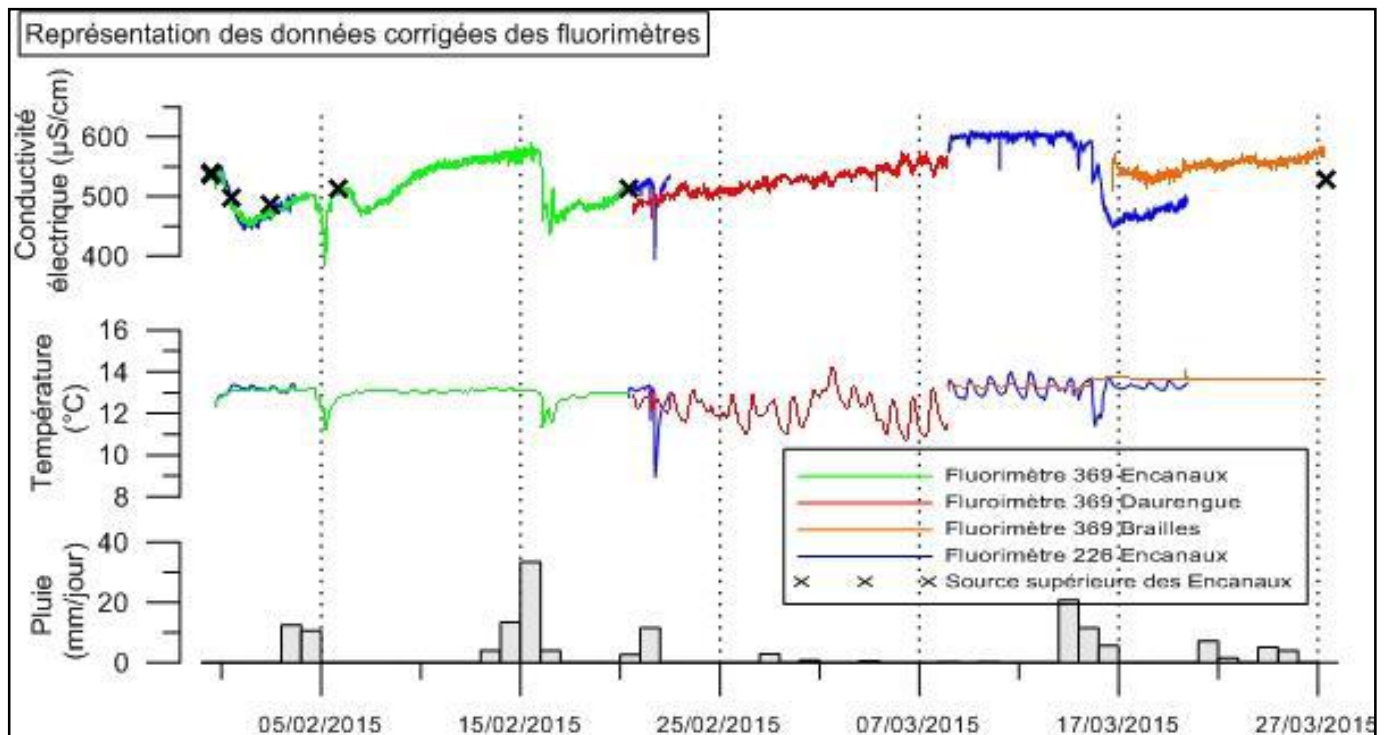


Figure 39: Suivi de la conductivité électrique et de la température, données corrigées

En s'intéressant maintenant aux données, il est possible de faire plusieurs commentaires et d'en tirer quelques informations sur le fonctionnement hydrodynamique des sources et aussi l'influence de la pluie sur le suivi de ces paramètres.

En premier lieu, les mesures de conductivité électrique et de température permettent d'expliquer des relations entre les différentes sources du bassin de la Vède. Tout d'abord, ces deux paramètres sont très similaires sur les sources supérieures des Encanaux (supérieure, haute et trou) et la source de Brailles. Cela montre une origine de l'eau commune, avec un drainage de la même nappe contenue dans un unique aquifère par ces quatre sources. Les mêmes observations permettent de dire que la source inférieure et la source des blocs des Encanaux ont une origine différente des sources en amont des Encanaux. Associés aux

observations de terrain, la source des blocs se définit comme une source de trop-plein de la nappe fournissant la source inférieure.

La seconde remarque concerne la diminution de la température et de la conductivité électrique quelques heures après un épisode pluvieux sur le fluorimètre 369 sur le ruisseau des Encanaux. Ce phénomène s'observe deux fois : le 06/02 et le 16/02. Il faut rappeler que l'appareil est placé dans la rivière. Cette diminution des paramètres s'expliquent simplement par l'apport d'eau de ruissellement froide et peu minéralisée dans la rivière.

La troisième remarque concerne l'augmentation régulière de la conductivité les jours suivants une pluie. Cela montre que l'eau dans la rivière provient des sources et surtout de masses d'eau souterraine qui sont restées stockées pendant une période plus longue. En effet, une eau avec un temps de résidence dans la nappe plus long se charge doucement en minéraux par dissolution des roches encaissantes.

Quatrièmement, les variations assez marquées de la température sur le ruisseau de Daurengue. Elles s'expliquent probablement par l'exposition du fluorimètre au soleil, les variations étant finalement la fluctuation journalière de la température de l'eau à cet endroit.

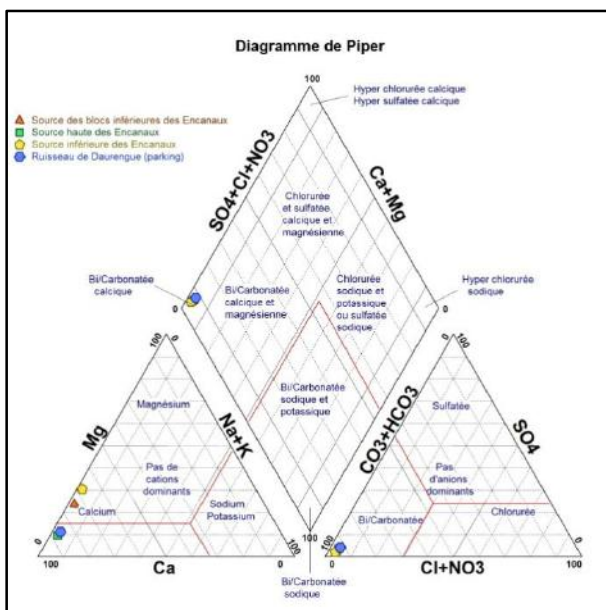
Enfin, une dernière remarque importante au niveau de la source des Brailles. Dans ce cas, le fluorimètre est placé directement au niveau de la source. L'absence de variations de conductivité et de température peut s'expliquer d'une façon : l'eau de la source n'est peu voire pas influencée par les précipitations. En effet, la température reste assez stable tout le long de la mesure malgré des précipitations autour du 16/03/2015 ; de même pour la conductivité. C'est une information importante pour l'exploitation des ressources d'un système karstique, puisque ça implique finalement que cette source est peu vulnérable aux infiltrations des eaux de pluie.

Au final, le suivi de la conductivité électrique et de la température permettent de fournir des informations sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Vède.

5.2. Analyse chimique

A partir de l'analyse des ions majeurs réalisés par le Laboratoire de Chimie et l'Environnement de l'université d'Aix-Marseille, il est possible d'en déduire des informations sur l'origine de l'eau. Un point à déterminer est la possibilité d'une origine commune pour la plupart d'entre elles. Les échantillons ont été prélevés le 31/01/2015, jour du premier traçage.

Les résultats de l'analyse ont été interprétés à l'aide du logiciel « Diagrammes » accessible gratuitement par le biais de l'université d'Avignon (Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon). Celui permet d'obtenir différentes informations concernant l'eau analysée, en particulier l'indice de saturation de la calcite ou encore la pression équilibrante en CO_2 . Ces deux paramètres sont cités car ils ont une grande importance dans la formation des travertins sur le ruisseau de Daurengue et des Encanaux en aval de la source inférieure.



Ce logiciel permet aussi de créer des diagrammes représentant la situation des eaux analysées et donc permettent leurs classements. C'est le cas du diagramme de Piper (Figure 40). Cela permet de considérer l'eau de ces quatre prélèvements comme étant bi/carbonatée calcique avec une origine assez similaire.

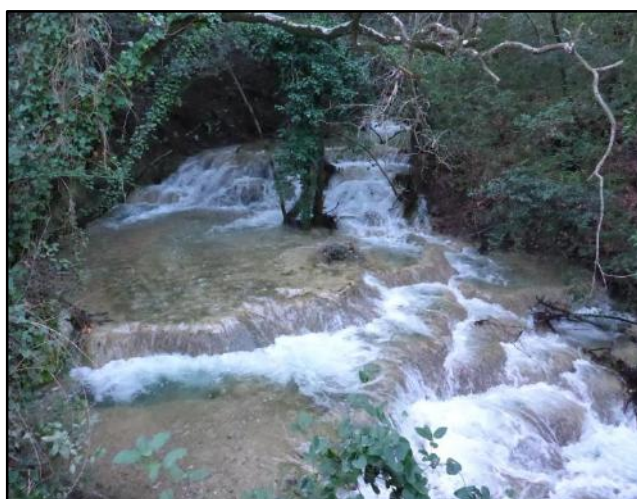
Figure 40: Diagramme de Piper pour les 4 prélèvements effectués le 31/01/2015

En s'attachant plus en détails à certains paramètres, il est possible de différencier ces eaux de par leurs caractéristiques chimiques.

Nom des échantillons	Date	O ₂ dissous	Conductivité	pH	TAC	TAC	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻
		mg/L	μS/cm		mg HCO ₃ ⁻ /L	mg CaCO ₃ /L	mg/L	mg/L	mg/L
Source des blocs	31/01/2015 13:30	9,09	556	7,21	367	301	< LD	6,02	< LD
source haute	31/01/2015 12:25	9,97	499	7,15	318	261	< LD	5,32	< LD
source inférieure	31/01/2015 14:10	9,15	647	7,08	439	360	< LD	6,63	< LD
Ruisseau de Daurengue parking	31/01/2015 14:25	10,13	462	7,69	290	238	< LD	5,86	< LD
		NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Source des blocs	31/01/2015 13:30	1,69	< LD	< LD	7,41	92,51	17,83	3,35	0,54
source haute	31/01/2015 12:25	2,36	< LD	< LD	9,68	95,34	6,31	3,47	0,53
source inférieure	31/01/2015 14:10	1,44	< LD	< LD	8,16	100,52	27,36	3,43	0,22
Ruisseau de Daurengue parking	31/01/2015 14:25	1,68	< LD	< LD	10,64	86,81	6,99	3,34	0,49

Tableau 5: Résultats de l'analyse des ions majeurs

Pour l'ensemble des points de mesures, la conductivité électrique démontre d'une minéralisation importante de l'eau. Il faut remarquer une conductivité nettement plus élevée pour l'eau de la source inférieure qui témoigne donc d'une minéralisation importante de l'eau. De même, la source inférieure possède une concentration en Mg²⁺ bien plus élevée. L'explication la plus probable est que l'eau de la source Inférieure est restée en contact plus longtemps que les autres eaux avec des dolomies, roche fortement chargée en magnésium. Il semble que la source des Blocs inférieurs évacue des eaux d'origine assez semblable avec un temps de résidence tout de même plus faible. Au contraire, l'eau de la source haute est clairement moins minéralisée témoignant d'un temps de résidence plus faible.



Le bassin de la Vède, et en particulier le ruisseau de Daurengue, est caractérisé par la présence de travertins (ou tufs calcaires).

Figure 41: Travertins à proximité de la source de la Glacière (31/01/2015)

	Indice de saturation en calcite	Pression équilibrante en CO ₂ (% atm)
Source des blocs inférieurs	0.30	0.02230
Source haute des Encanaux	0.20	0.02230
Source inférieure	0.27	0.03572
Ruisseau de Daurengue (parking)	0.67	0.00588

Tableau 6: Paramètres déterminants dans la formation des travertins

Il est possible de classer à part l'eau du ruisseau de Daurengue du fait d'une différence nette de son indice de saturation de calcite et de la pression équilibrante en CO₂. Ces paramètres témoignent simplement de la déminéralisation de l'eau de source au contact de l'atmosphère. En effet, les eaux surchargées en CO₂ se dégazéifient comme le montre le paramètre « pression » qui diminue. Cela entraîne finalement la précipitation d'une partie des minéraux en soluté qui se traduit par un indice de saturation qui se rapproche de 1. Ce phénomène explique donc la création de travertins, dépôts calcaires pouvant former des gours que l'on observe uniquement en aval de source inférieure sur le ruisseau des Encanaux et sur le ruisseau de Daurengue.

5.3. Choix des traçages réalisés

Dans le but de déterminer au mieux le fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Vède, il a été décidé d'effectuer deux traçages à des dates différentes. Le choix de ces dates dépend principalement des conditions hydrologiques et donc du comportement de l'eau dans le gouffre des Encanaux, lieu d'injection.

Pour commencer, il faut rappeler le fonctionnement du gouffre en fonction des précipitations et les rapprocher des précipitations pendant les 2 mois d'études.

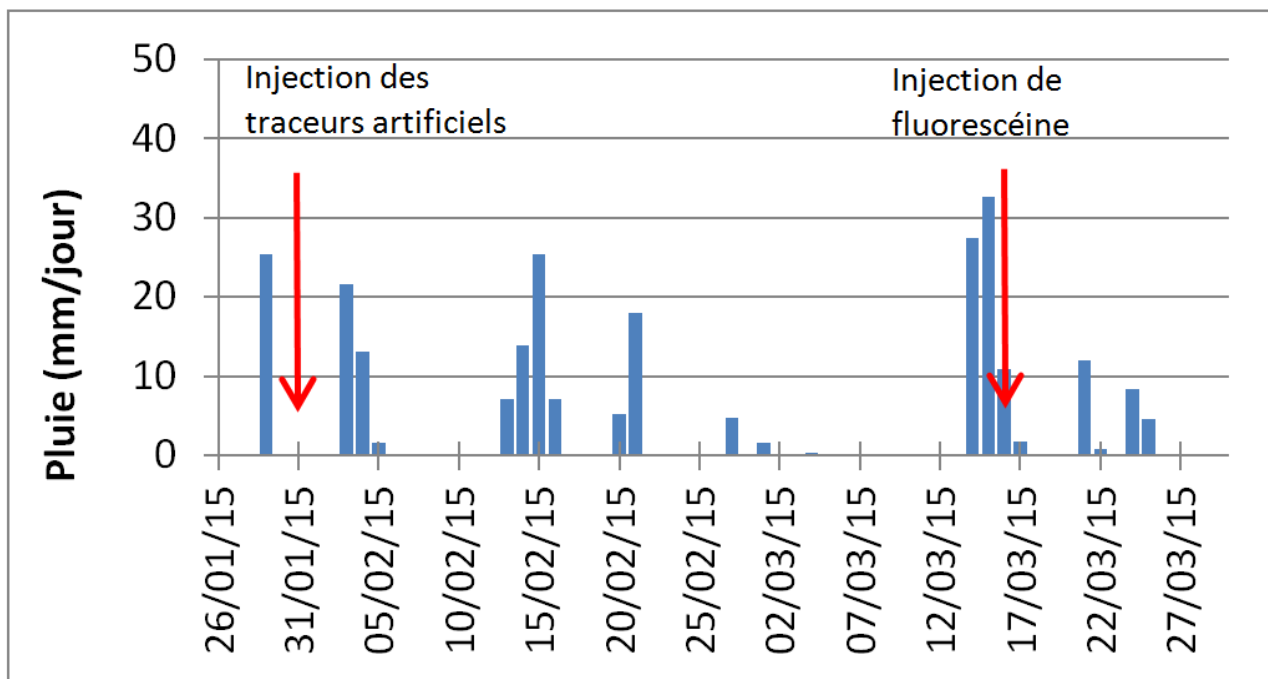


Figure 42: Relevé des précipitations pendant l'étude

D'après B. Arfib et A. Zappelli, le choix des injections a été fait pour suivre les traceurs en conditions de crue et en étiage. Concernant le traçage du 31/01/2015, un épisode pluvieux de 20mm a eu lieu le 29/01/2015, soit deux jours avant le traçage. Du fait de la forte réactivité du gouffre aux précipitations, l'hypothèse d'être en décrue a été faite. Cela a été confirmé par les observations dans le gouffre où le niveau de l'eau correspondait à un niveau de crue sans débordement par le seuil au niveau du puits d'entrée. (Figure 14 et [Figure 17](#)). Le niveau de l'eau à la rivière souterraine des Encanaux était d'environ 6 mètres au-dessus du niveau d'étiage.

Pour effectuer un deuxième traçage en conditions de crue, celui-ci a été effectué le 16/03/2015. Le cumul de précipitations entre le 14/03 et le 16/03 est de 72 mm, soit 3,5 fois plus importante que lors du premier traçage. Les conditions hydrologiques étaient donc bonnes pour effectuer l'injection. Les observations d'A. Zappelli dans le gouffre confirme un fonctionnement en crue, avec le niveau d'eau légèrement inférieure au seuil de débordement de la rivière souterraine vers le puits d'entrée. (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). De plus, des écoulements importants au travers de fissures étaient présents, permettant l'injection et la circulation directe de la fluorescéine.

Dans le but de suivre en continu ces deux traçages, deux types d'appareils ont été installés en différents points sur la zone d'étude pour suivre la restitution des deux traceurs utilisés. Cependant, de part le suivi des traçages, il a été nécessaire de déplacer le fluorimètre 369. De plus, de part des problèmes de fonctionnement, une partie des données du fluorimètre ne sont exploitables.

- ✓ Fluorimètre de terrain: mesure en continu de la fluorescence et de la turbidité
- ✓ Préleveur automatique de type ISCO : Prélèvements d'eau à interval régulier

Ayant à disposition deux fluorimètres de terrain et deux ISCO, il a été décidé de suivre quatre points sur le site d'étude.

		Situation géographique	Pas de temps de mesures (minutes)
Fluorimètres	n°369	Rivière entre source Haute et source Supérieure des Encanaux	15
	n°226	Rivière entre source Supérieure et source des Blocs Inférieures des Encanaux	15
ISCO	n°22	Source des Blocs Inférieures des Encanaux	360
	n°21	En Aval de la source de la Glaciaire	360

Tableau 7: Emplacement des appareils de mesures

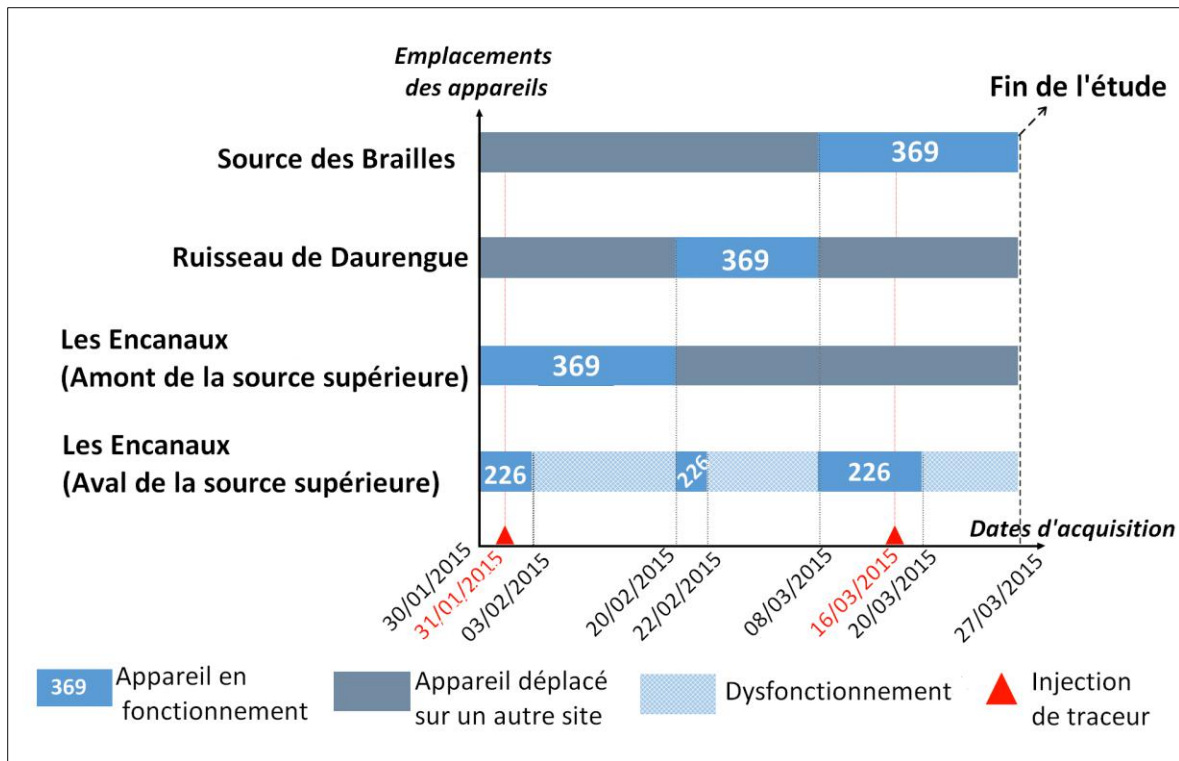


Figure 43: Emplacement et fonctionnement des fluorimètres pendant l'étude

Les cartes suivantes (Figure 44, Figure 45, Figure 46) permettent de situer facilement l'emplacement des appareils et des points remarquables tout au long de l'étude.



Figure 44: Situation géographique des appareils de mesures entre le 30/01 et le 20/02

Il faut noter le déplacement du fluorimètre 369 entre le ruisseau des Encanaux et le ruisseau de Daurengue le 20/02, puis le 08/03 sur la source des Brailles (Figure 43)



Figure 45: Situation géographique des appareils de mesures entre le 20/02 et el 08/03

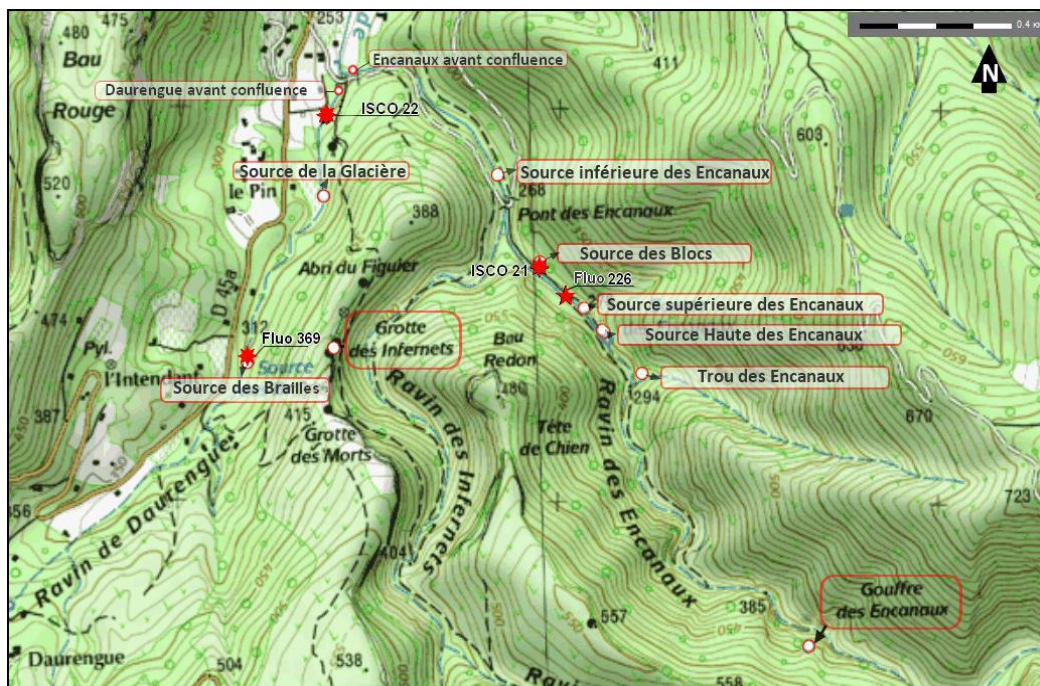


Figure 46: Situation géographique des appareils de mesures entre le 08/03 et le 27/03

5.4. Le traçage artificiel du 31/01/2015

Cette partie présente l'ensemble des conditions et les résultats liés au traçage réalisé le 31/01/2015.

5.4.1. Préparation et injection des traceurs

5.4.1.1. Préparation de l'injection : le 25/01/2015

Le dimanche 25/01/2015, A. Zappelli et plusieurs spéléologues, ont installés deux tuyaux : un de la rivière souterraine jusqu'au palier, le second de la voûte mouillante jusqu'au premier ressaut. L'intérêt de ces tuyaux est de pouvoir injecter les traceurs directement dans le courant, en évitant au maximum les zones de stagnation de l'eau. Les tuyaux sont fixés par des fils du fer et des sangles et lestés par des pierres pour éviter qu'ils soient emportés par le courant. Lors de l'installation de ces tuyaux, le niveau d'eau est assez élevé : 2 mètre à la rivière et 1 mètre à la voûte mouillante.

La journée du 31/01/2015 présente les objectifs suivants : Atteindre la rivière souterraine, Vérifier le niveau d'eau, Injecter les traceurs au niveau de la rivière souterraine et assurer la diffusion des traceurs afin d'assurer que la totalité du traceur soit injectée. Elle a aussi permis l'installation des appareils de mesures ([Figure 44](#))

5.4.1.2. Préparation des traceurs

La préparation des traceurs a été réalisée la veille pour l'acide amino G et le matin pour la fluorescéine. En ce qui concerne la fluorescéine, il a suffi de remplir une bouteille en plastique à hauteur d'un litre. Des mesures en laboratoire quelques semaines plus tard ont permis de déterminer la masse volumique de la fluorescéine utilisée lors de ce traçage à 1127.82 g/L. Il faut tout de même remarquer que la masse totale de fluorescéine injectée ce jour-là est de 388g.



Figure 47: Bouteille de Fluorescéine prête à être injecter

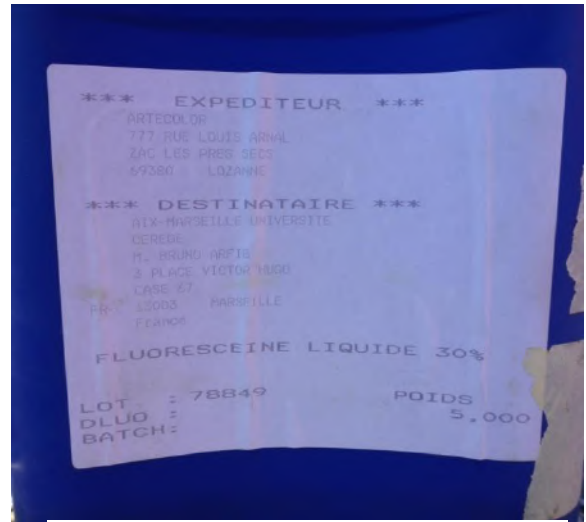


Figure 48: Description de la fluorescéine

La préparation de l'acide amino G a nécessité la dilution partielle de la poudre dans de l'eau. Au final, cela a créé un mélange assez pâteux stocké dans quatre bidons de 5L environ. Un total de 8.285kg de traceur a été utilisé.

5.4.1.3. Injection

11h45	Entrée dans le gouffre
11h55	Injection à la voûte est impossible , le premier passage bas juste après le premier ressaut est noyé
12h05	Arrivée sur le plan d'eau dans la galerie de la rivière. La hauteur d'eau est estimée entre 6 et 8 mètres. Le tuyau est découpé environ 10 mètres plus haut pour l'injection
12h15	Injection du bidon n°2 d'Acide Amino G dans le tuyau: mauvaise dilution et le liquide est pâteux
12h20	Injection de la moitié du bidon n°3 d'Acide Amino G dans le tuyau: Le tuyau est bouché
12h45	Impossible de déboucher le tuyau. Tentative d'injecter depuis le seuil de la rivière en raccordant le tuyau
12h55	Suite à l'injection du reste du bidon n°3 et la moitié du bidon n°1, le tuyau est bouché
13h30 à 13h50	Injection des bidon n°4 en entier plus la moitié du n°1 et n°3 directement dans la vasque. La dilution est très mauvaise. Il reste de nombreux grumeaux de toutes tailles qui surnagent sur la surface
14h10	Injection de la fluorescéine sous 1 mètre d'eau au milieu de la vasque à l'aide d'un bout de tuyau de 4 mètres. La vasque devient rapidement verte en surface. Il aurait été plus efficace d'injecter la fluorescéine le plus profondément possible avec un plus long tuyau
14h45	Sortie du gouffre

Tableau 8: Chronologie et problèmes rencontrés (en gras) lors de l'injection du 31/01/2015

Quelques photos :



Figure 49: Tentative de débouchage du tuyau (A. Zappelli et M. Decanis)



Figure 50: Injection directe d'acide amino G dans la vasque (A. Zappelli et M. Decanis)



Figure 52: Mauvaise dilution de l'acide amino G (A. Zappelli et M. Decanis)



Figure 51: Injection de la fluorescéine (A. Zappelli et M. Decanis)

5.4.2. Etat hydrologique

5.4.2.1. Paramètres physico-chimiques au niveau des points de suivi le 30/01/2015

		Heure	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Fluorimètres	n°369	16h30	524	11,9
	n°226	16h40	526	12,0
ISCO	n°22	16h55	511	13,9
	n°21	17h30	492	12,0

Tableau 9: Conductivité et température au niveau des appareils de mesure le 30/01/2015

Remarque : la variation de la conductivité électrique autour de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est considérée comme une caractéristique d'un écoulement dans des calcaires ou des dolomies.

Lieu	Heure	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Ruisseau de la Daurengue avant confluence Encanaux	9h40	503	11,9
Aval source de la glacière	10h25	512	12,1
Source temporaire s'écoulant sur la gauche du chemin longeant le ruisseau de Daurengue (50m du parking)	10h15	482	11,0
Ruisseau des Encanaux avant confluence Daurengue	11h10	513	11,4
Source Inférieure des Encanaux	11h30	659	13,3
Pont sur rivière des Encanaux (coin pique-nique)	11h40	511	11,5
Source des Blocs inférieures des Encanaux	11h50	538	13,9
Source Supérieure des Encanaux	12h10	536	12,7
	12h45	538	12,7
Source Haute des Encanaux	12h10	539	12,7
Rivière en amont de la source Haute	12h15	456	8,6
Rivière entre source Supérieure et source des Blocs inférieures des Encanaux	12h55	525	11,8
Rivière entre Trous des Encanaux et source Haute des Encanaux	12h35	463	9,0
	12h35	466	9,2
Trous des Encanaux	12h40	541	12,6
Rivière en amont des Trous des Encanaux	12h40	367	4,9
Rivière entre source Haute et source Supérieure des Encanaux	12h45	520	11,6
Rivière en aval de source Supérieure	12h50	525	11,8

Tableau 10: Conductivité et température en différents points le 30/01/2015

5.4.2.2. Remarques et état hydrologique entre le 30/01/2015 et le 20/02/2015

Le 30/01 :

- ✓ La totalité des sources du vallon des Encanaux sont en fonctionnement
- ✓ La source de la Glacière est noyée dans le ruisseau de Daurengue
- ✓ Le vallon des Infernets est à sec, du fait de son fonctionnement uniquement par ruissellement. Même état hydrologique observé à chaque période sur le terrain.

Le 31/01 :

- ✓ La source inférieure, la source supérieure, la source haute des Encanaux sont en fonctionnement
- ✓ Le trou des Encanaux ne déborde plus vers la rivière, écoulement souterrain visible
- ✓ Diminution visible de l'écoulement de la source des blocs inférieurs des Encanaux
- ✓ Aucune remarque particulière sur le ruisseau de Daurengue
- ✓ Gouffre des Encanaux (Tableau 8: Chronologie et problèmes rencontrés (en gras) lors de l'injection du 31/01/2015

Le 02/02 :

- ✓ La source inférieure et la source supérieure des Encanaux fonctionnent avec un débit assez stable
- ✓ Diminution du débit de la source haute des Encanaux
- ✓ Arrêt du fonctionnement de la source des blocs des Encanaux (le 01/02 entre 17h et 23h)
- ✓ Baisse du niveau d'eau dans le trou des Encanaux

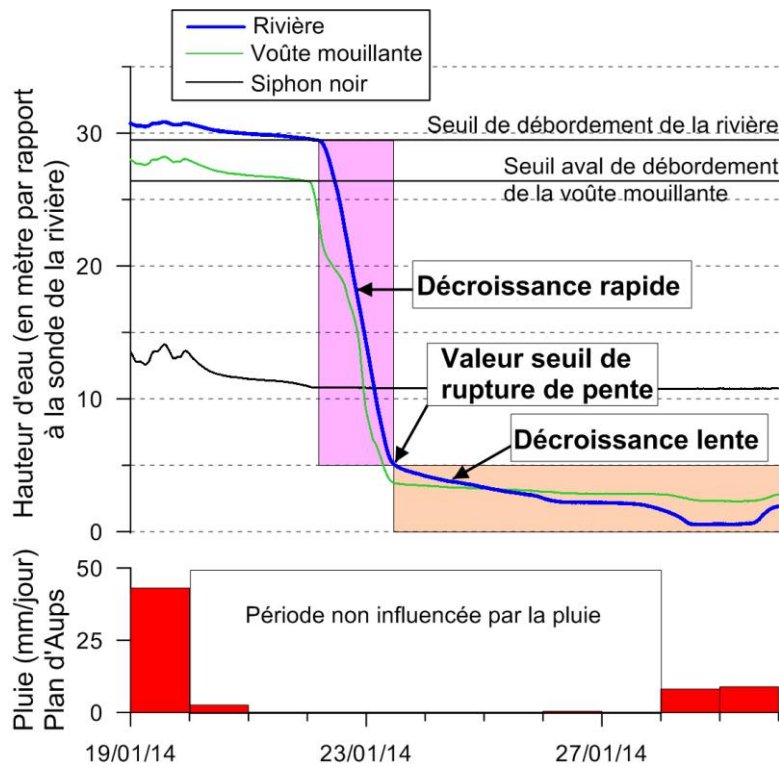


Figure 53: Trou des Encanaux (le 31/01/2015 à 11h, le 31/01/2015 à 13h et le 02/02/2015 à 10h)

Le 08/02 (A. Zappelli):

- ✓ Décrue en cours observable au niveau des sources ainsi que du gouffre :
- ✓ Sources en fonctionnement : Source Inférieure, Source Supérieure, Source Haute, Source des Brailles (sur le vallon de Daurengue)
- ✓ Source des Blocs inférieures ne s'écoule plus
- ✓ Trou des Encanaux ne déborde plus vers la rivière. On remarque un filet dans la rivière en amont du Trou des Encanaux
- ✓ Etat du gouffre : puits sec, filet d'eau vers la voûte mouillante, gros filet d'eau vers la rivière
- ✓ Hauteur d'eau : environ 2 mètres inférieures à la hauteur d'injection et environ 1.5 mètres à la voûte.
- ✓ Des traces de fluorescéine sont à remarquer sur le dernier palier. Cela est une information qu'il faudra prendre en compte dans les calculs de restitution des traceurs lors de l'analyse des résultats.

Ces observations présentent par ailleurs un intérêt dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la zone étudiée avec l'arrêt du fonctionnement de certaines sources. Il est d'ailleurs possible de fournir une explication rapide à partir des travaux antérieurs réalisés en 2014.



D'après B. Arfib et A. Zappelli, la baisse de la hauteur d'eau dans le gouffre après une crue se fait en deux étapes principales (Figure 54). Ce graphique permet de d'observer une cassure dans la décroissance du niveau d'eau dans le gouffre des Encanaux.

Figure 54: Baisse de la hauteur d'eau dans le gouffre des Encanaux

Cette modification du fonctionnement hydrologique peut s'expliquer par l'arrêt du débordement du Trou des Encanaux, un des points de drainage de la nappe karstique.

5.4.3. Estimation du débit

Lors de cette étude, aucune mesure du débit en continu n'a été réalisée. Cela pose problème dans l'utilisation des données des fluorimètres. En effet, pour déterminer la masse de traceur restitué, une mesure de débit est nécessaire puisque les fluorimètres fournissent une concentration en traceur.

Pour guider dans le choix de cette valeur, plusieurs mesures de débit ont été effectuées le 20/02/2015. Bien sûr, il aurait été préférable de le faire le même jour que le traçage pour avoir une restitution la plus précise possible. Au total, quatre mesures ont été faites : en amont direct de la source supérieure, au niveau du fluorimètre n°226, sur le ruisseau des Encanaux avant la confluence avec la Daurengue, sur la Vède après confluence Encanaux/Daurengue.

Au final, du fait des données récoltées par les fluorimètres, il est intéressant d'estimer le débit en aval de la source supérieure lors du traçage du 31/01/2015, en

utilisant donc les mesures de débit et les différentes observations de terrain. Ainsi, le 20/02/2015, le débit mesuré était de 98l/s. La contrainte de débit minimum est donc à 100l/s.

Par ailleurs, à l'aide du fichier de calcul de masse restituée, un débit de 150l/s permettait d'obtenir une masse restituée de 100%. Cela représente donc la limite maximale pour le débit.

Il a donc été décidé de fixer un débit constant de 125l/s lors du traçage du 31/01/2015.

En ce qui concerne la valeur du débit entre le 20/02/2015 et le 08/03/2015 pour le fluorimètre n°369 installé à ce moment sur le ruisseau de Daurengue ([Figure 43](#)), le choix de débit s'est basé sur les mesures du 20/02/2015. Ainsi, en soustrayant simplement le débit de la rivière des Encanaux avant confluence à celui de la Vède, on en déduit une valeur de débit pour le ruisseau de Daurengue. Celui-ci était donc de 48l/s.

5.4.4. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité des Encanaux

5.4.4.1. Correction graphique de la concentration pour le fluorimètre n°369

Un premier commentaire à faire concerne l'utilisation des deux fluorimètres sur le ravin des Encanaux entre le 30/01/2015 et le 20/02/2015. Lors de l'analyse des résultats, il n'était pas nécessaire de différencier les résultats de ces fluorimètres. Cependant, l'utilisation de ces deux fluorimètres s'est avérée utile pour pallier aux soucis rencontrés lors de leurs fonctionnements et manipulations. Il a ainsi été possible de combiner les données récoltées par les deux appareils pour ensuite interpréter les résultats.

Au niveau du fluorimètre n°369, le passage de la fluorescéine c'est traduit par la saturation de l'appareil. Elle se remarque par un cours palier de saturation (entre 2 intervalles de mesures). Cette saturation peut poser problème puisqu'elle entraîne une sous-estimation de la masse de traceur restitué.

Au niveau du fluorimètre n°226, un problème a eu lieu lors de l'extraction des données rendant inexploitable les données entre le 03/02 et le 20/02. Graphiquement ([Figure 55](#)), il a donc été possible de déterminer les deux valeurs

réelles de concentrations qui formaient le palier de saturation du fluorimètre 369 donc et obtenir une courbe pleinement exploitable.

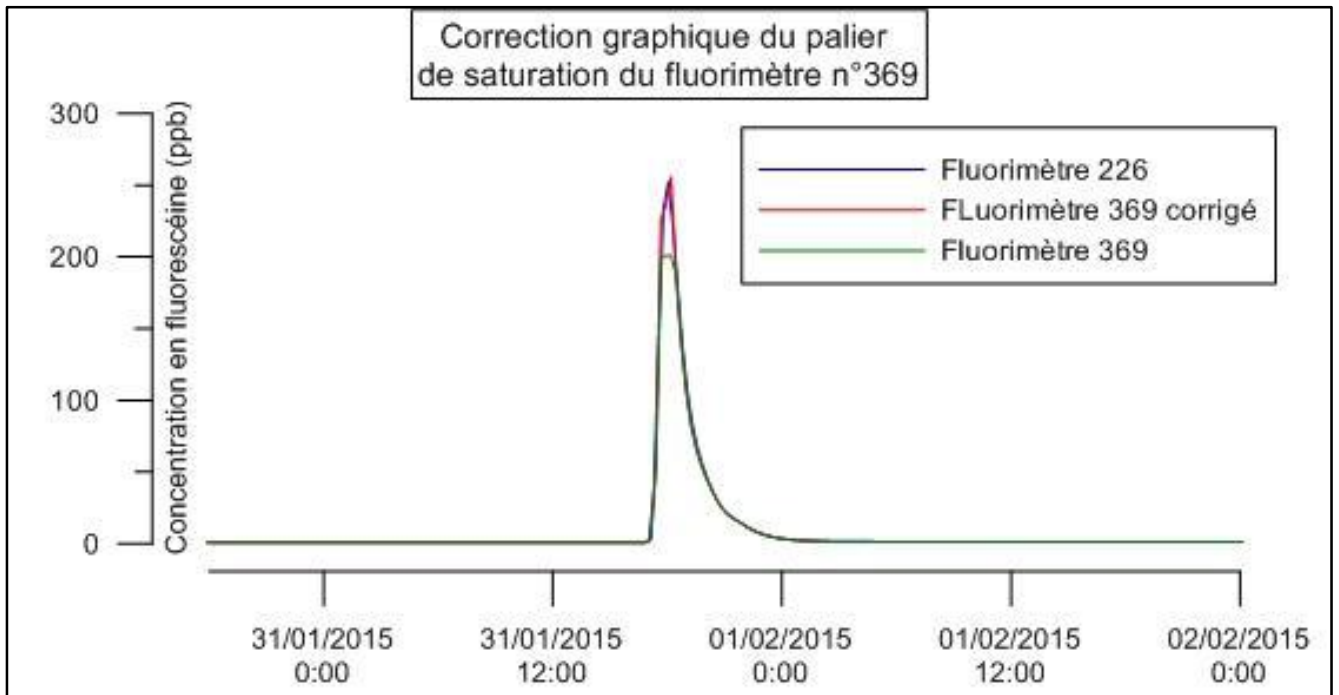


Figure 55: Correction graphique du palier de saturation du fluorimètre n°369

Il faut aussi remarquer sur ce graphique la similitude dans la restitution du traçage entre les deux appareils. Cela va permettre de simplifier la démarche en s'attachant uniquement aux données du fluorimètre n°369 pour les 20 premiers jours. Pour rappel, un débit de 125 l/s a été utilisé pour effectuer les calculs de masse restitué lors du traçage du 31/01.

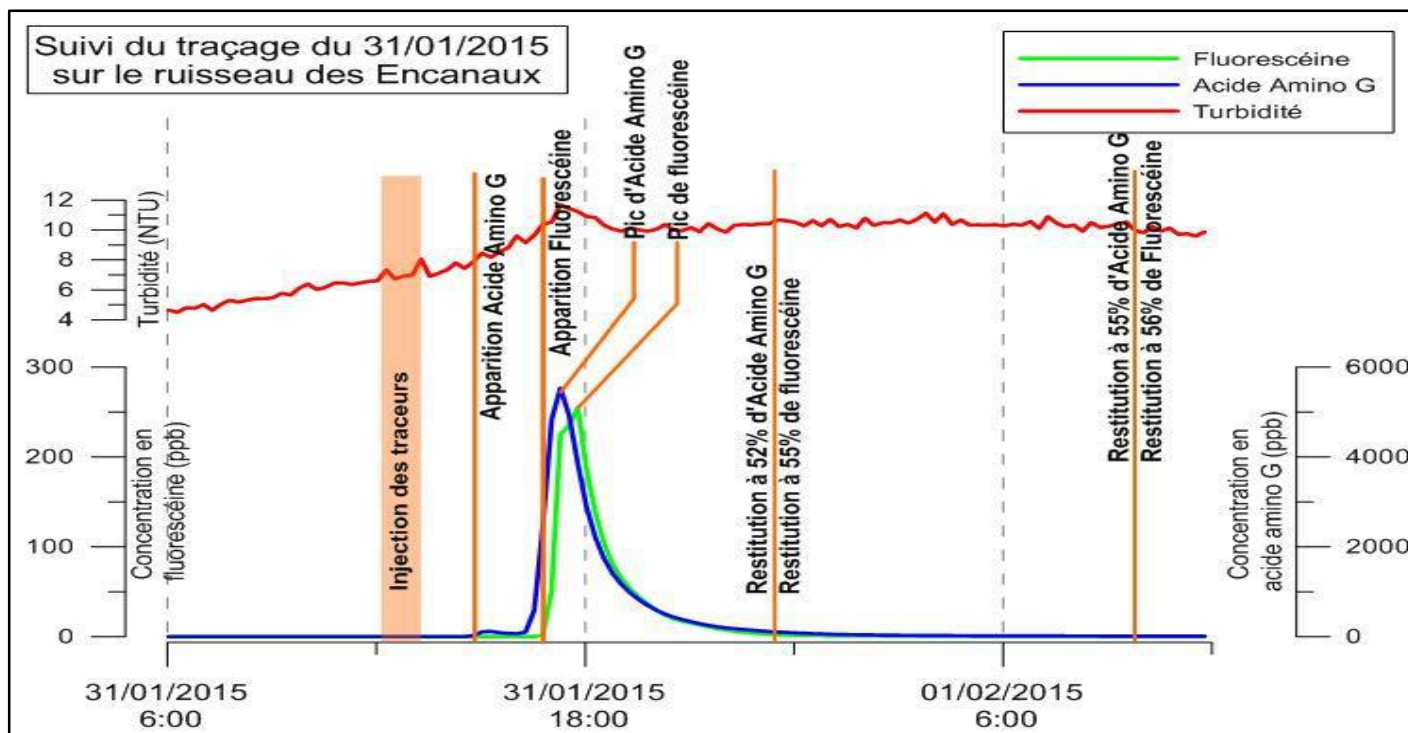


Figure 56: Suivi du traçage du 31/01/2015 sur le ruisseau des Encanaux

5.4.4.2. Interprétation du traçage sur le ruisseau des Encanaux

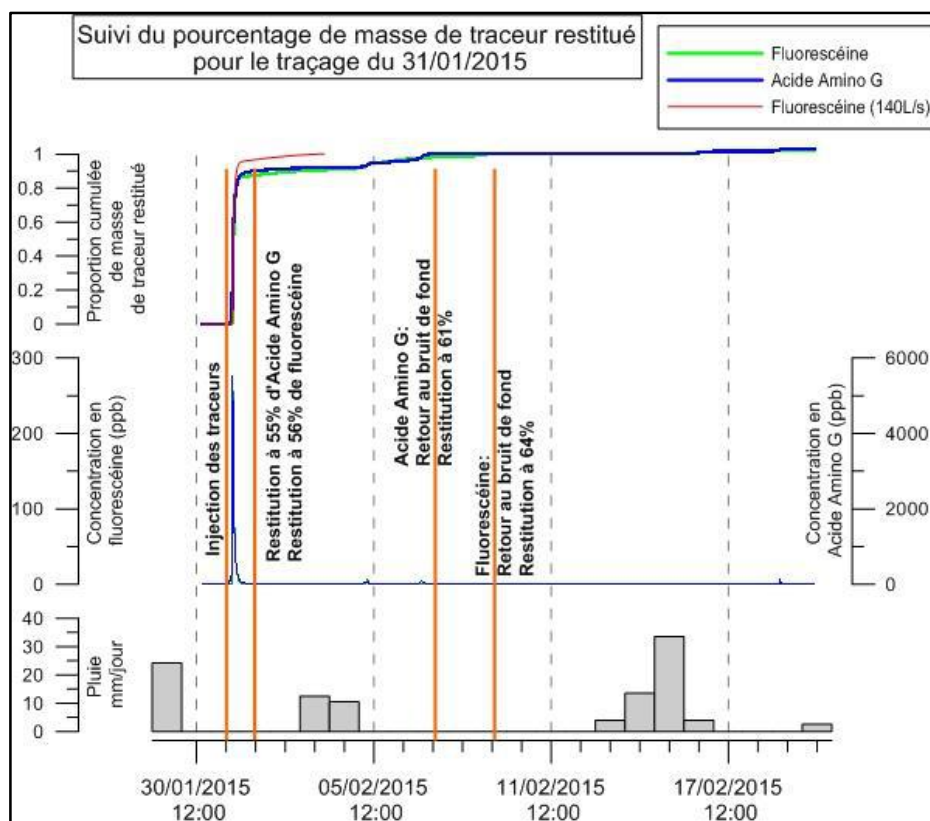


Figure 57: Suivi de la proportion de masse de traceur restituée lors du traçage du 31/01/2015

Ces deux premiers graphiques permettent de mettre en évidence plusieurs informations obtenues à l'aide du traçage artificiel du 31/01/2015.

- ✓ Une première apparition d'acide amino G légèrement en avance sur la fluorescéine : elle semble être liée aux soucis rencontrés lors de l'injection (l'injection partielle d'acide amino G environ 2h avant la fluorescéine)
- ✓ Un premier pic de restitution très net, avec une concentration très forte des deux traceurs : on estime que la concentration en fluorescéine a permis de colorer fortement l'eau de la rivière
- ✓ Une similitude des traceurs dans leurs courbes de restitution (temps de restitution et pic de concentration proches) : le résultat du traçage ne dépend pas du traceur utilisé.
- ✓ Un pic de turbidité au même moment que ceux de traceurs : la mesure de turbidité est influencée par le passage des traceurs
- ✓ Une restitution de traceurs importante dans les premières heures suivant le traçage
- ✓ Un retour au bruit de fond des traceurs plusieurs jours après l'injection

Il est intéressant de noter la différence de proportion cumulée de masse restitué lorsque le débit est modifié dans les calculs. Ainsi, un débit de 140 l/s au lieu des 125 l/s entraîne l'augmentation de 10% de masse restitué en fluorescéine. Cela démontre de l'importance de connaître le débit lors d'un traçage.

Les tableaux suivant reprennent précisément les valeurs à retenir à la suite de ce traçage :

Traceur	Injection	Première apparition	Pic de concentration	Retour à la valeur initiale (bruit de fond)
Fluorescéine 388g	31/01/2015 14h10	31/01/2015 à 16h45 2h35 depuis injection	31/01/2015 à 17h45 3h35 depuis injection 255 ppb	09/02/2015 à 13h45 8j et 9h depuis injection
Acide Amino G 8225g	31/01/2015 de 11h55 à 13h50	31/01/2015 à 14h45 2h50 depuis injection	31/01/2015 à 17h15 3h45 depuis injection 5534 ppb	07/02/2015 à 14h30 6j et 18h depuis injection

Tableau 11: Grandeurs principales

Traceur	Vitesse d'arrivée	Vitesse au pic	Temps de passage
Fluorescéine	354m/h	256m/h	Environ 216h
Acide Amino G	324m/h	172m/h	Environ 168h

Tableau 12: Grandeurs principales

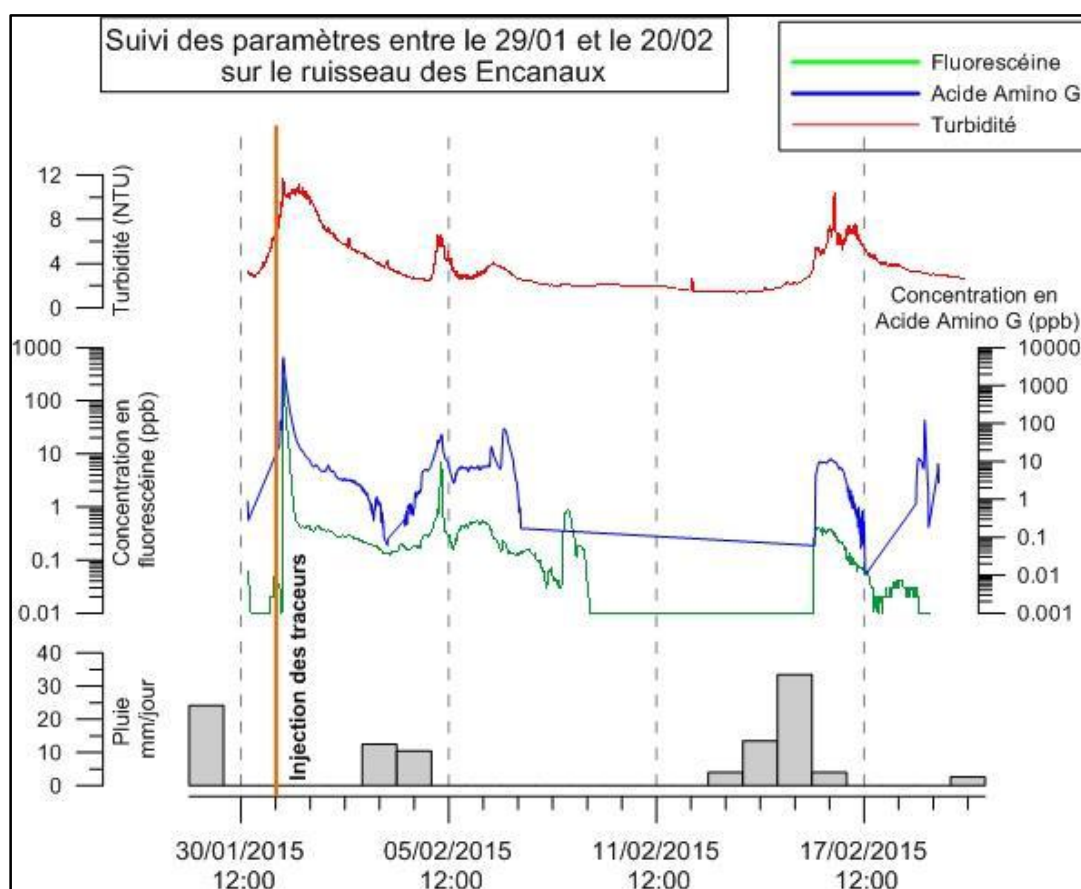


Figure 58: Suivi des paramètres entre le 30/01 et le 20/02 sur la rivière des Encanaux

A l'aide d'une échelle logarithmique, il est possible d'observer plus facilement les différentes périodes de restitution des traceurs. Ainsi, la pluie du 03/02 permet la restitution assez importante de traceur, mais dans des proportions nettement plus faible que le premier pic (concentration 100 fois moins importante). Enfin, il est possible de considérer la fin de la restitution lorsque les valeurs de concentration sont au niveau du bruit de fond ([Tableau 11](#)).

5.4.5. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité sur le vallon de Daurengue

A la suite de ce traçage, le fluorimètre n° 369 a été déplacé dans le ravin de Daurengue ([Figure 43](#)) pour la préparation à un second traçage. L'intérêt est donc d'étudier les liens entre gouffre des Encanaux et le ravin de la Daurengue, s'ils existent.

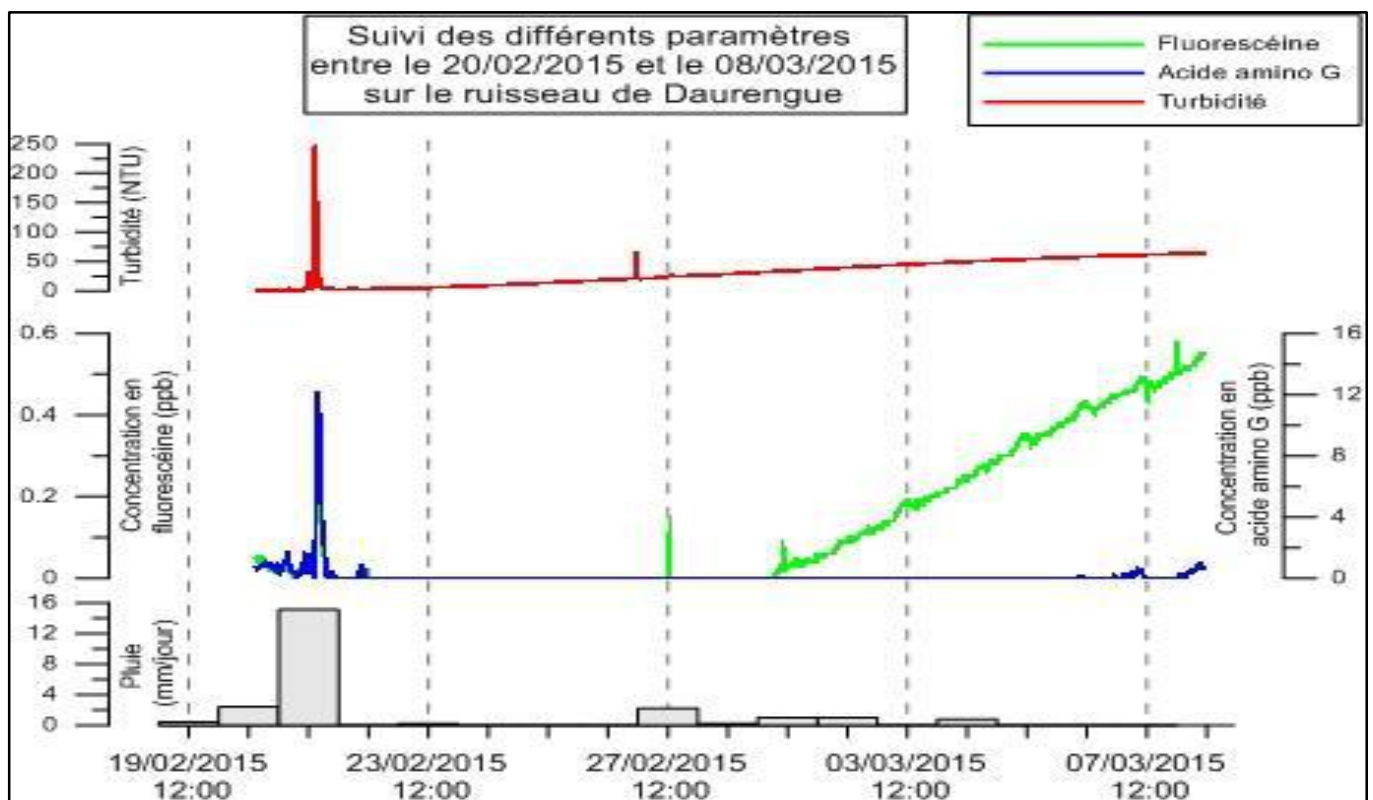


Figure 59: Suivi des paramètres sur la rivière de Daurengue

Plusieurs points sont à remarquer sur ce graphique :

- ✓ Augmentation progressive de la turbidité et de la fluorescéine : cela s'explique par l'encrassement de la sonde ([Figure 60](#))

- ✓ Pic de turbidité le 21/02/2015 qui s'associe facilement avec un épisode pluvieux les jours précédents
- ✓ Un pic de fluorescéine et d'acide amino G : en se fiant aux concentrations, ces résultats dépendent de la fluorescence naturelle plutôt qu'une restitution des traceurs injectés 20 jours avant



Figure 60: Sonde du fluorimètre encrassée, le 08/03/2015 (A. Zappelli)

Des précautions sont à prendre dans l'utilisation de ces appareils, en particulier en ce qui concerne le nettoyage de la zone de détection. Du fait des dépôts des carbonates sur le ruisseau de Daurengue, la sonde de mesure du fluorimètre n°369 s'est encrassée. Cela se traduit par une augmentation des

valeurs de turbidité qui n'est aucunement liée au fonctionnement hydrogéologique du système karstique.

Les données récoltées par le fluorimètre 369 montrent une augmentation régulière de la turbidité et des autres paramètres. Il faut donc prêter attention à la propreté des appareils pour pouvoir exploiter les mesures effectuées.

5.4.6. Utilisation du logiciel « TRAC »

A partir de la formule de Crank (1956) et Bear (1972), il est possible de proposer un premier modèle.

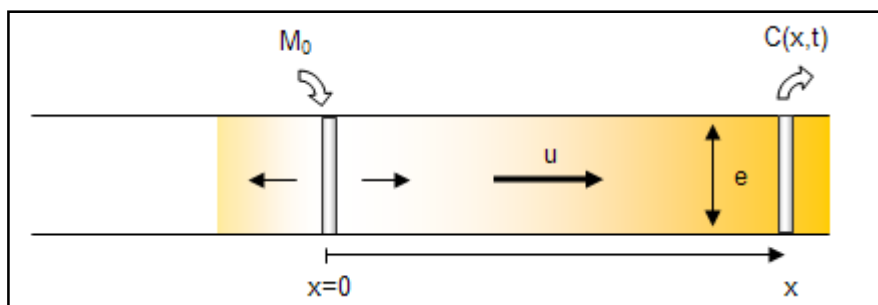


Figure 61: Schéma de principe de modélisation

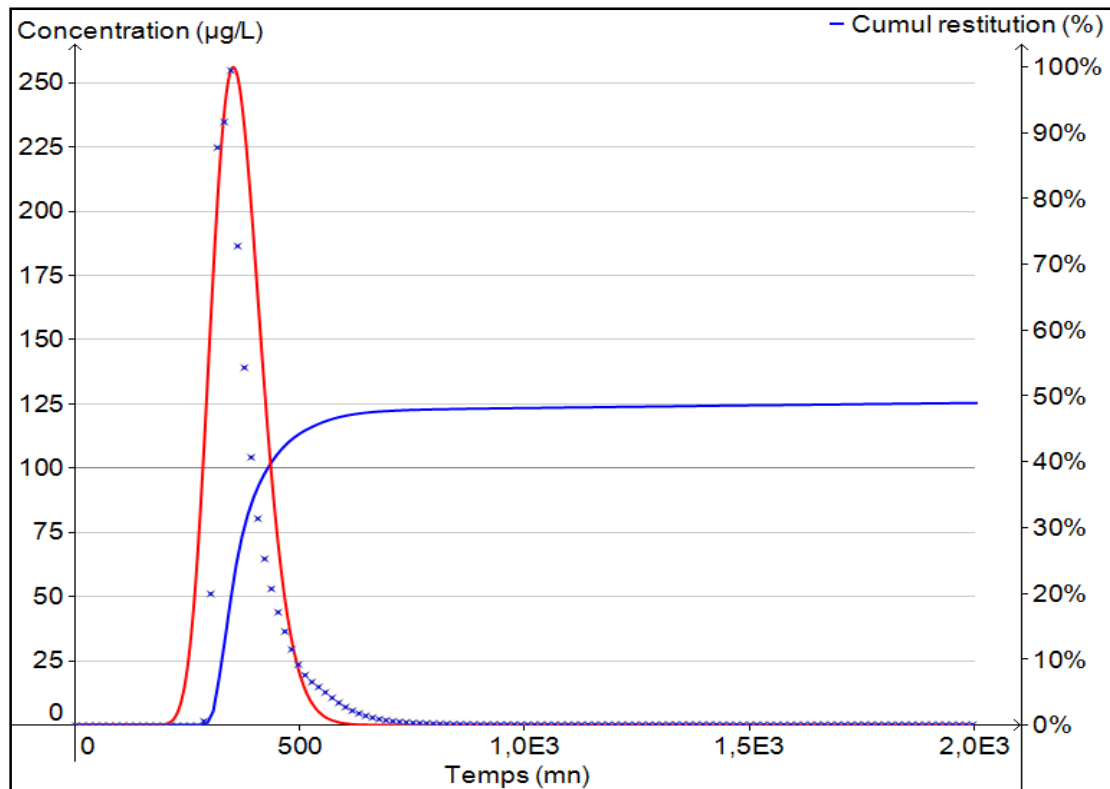


Figure 62: Utilisation du logiciel TRAC par modèle

Finalement, en travaillant à partir des données du fluorimètre n°369 entre le moment du traçage (environ 12h le 31/01) et le 20/02, avant de le déplacer, il est possible d'obtenir une courbe calée sur la concentration en fluorescéine lors du premier traçage, ainsi que la courbe de masse restituée et différentes données.

Le premier commentaire concerne le cumul de restitution, qui se trouve à environ 50%. La masse restituée pendant le traçage est de 190g, soit 48 % de la masse de traceur injectée. Le logiciel trace aussi une courbe de Distribution du Temps de Séjour complétée par plusieurs données :

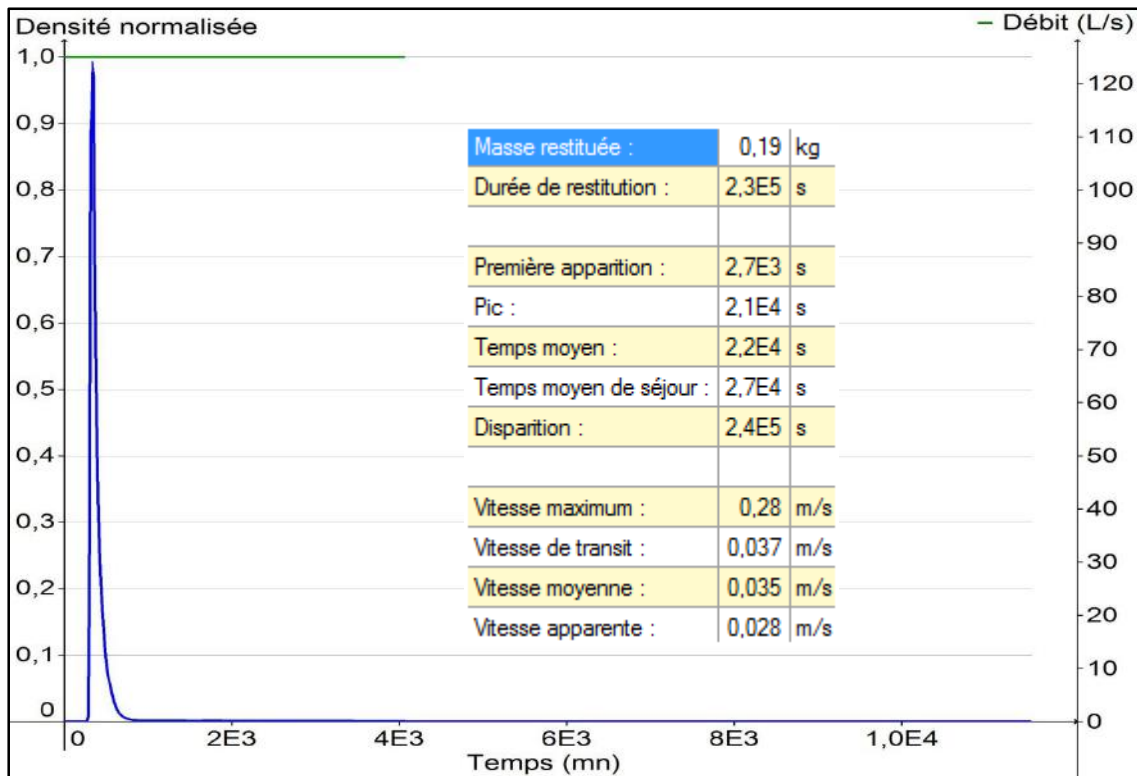


Figure 63: DTS obtenue sur le logiciel TRAC

Au final, le logiciel permet de proposer des valeurs de vitesse moyenne, de temps de séjour ou encore de durée de restitution du traceur.

5.5. Le traçage artificiel du 16/03/215

A la suite des résultats obtenus pour le premier traçage, il a été décidé de réaliser un second traçage ([5.3. Choix des traçages réalisés](#))

5.5.1. Préparation et injection des traceurs

Il a été choisi d'utiliser qu'un seul traceur. Ce principe se rapproche d'ailleurs des conditions de traçage réalisé normalement. Il n'y a que très peu d'intérêt de combiner deux traceurs quand la fluorescéine est reconnue comme fiable. Au final, l'injection de 500g de fluorescéine a été effectuée dans la voûte mouillante dans le gouffre des Encanaux ([Figure 14](#)).

En ce qui concerne les appareils de mesure, le fluorimètre a été déplacé le 08/03/2015 au niveau de la source des Brailles ([Figure 43](#) et [Figure 46](#))

5.5.2. Etat hydrologique

Les observations effectuées lors du traçage ont montré un niveau d'eau nettement plus élevé que le 31/01/2015. En effet, le niveau est juste quelques centimètres au-dessous du seuil de débordement entre la rivière souterraine et la voûte mouillante ([Figure 14](#)). Voici quelques informations sur l'état hydrologique du secteur :

- ✓ Source des Brailles active
- ✓ Source des blocs, source haute, source supérieure et Trou des Encanaux actifs
- ✓ Traces de mousse de crue à 2-3 mètres au-dessus de la base du puits
- ✓ Début de décrue

5.5.3. Estimation du débit

Dans cette étape nécessaire au calcul de masse restitué pendant le traçage, il faut utiliser une valeur de débit. Cependant, la mesure n'a pas été réalisé ni sur le ruisseau des Encanaux ni sur la source des Brailles. C'est pourquoi il faut expliquer la démarche effectuée pour déterminer le débit des sources le 16/03. En se basant sur le traçage du 31/01/2015 et les conditions hydrologiques et les observations dans le gouffre (Alexandre Zappelli) et sur le terrain, un débit supérieur à 125l/s est évident sur le vallon des Encanaux, le karst étant en charge. Il faut donc réfléchir à une borne supérieure du débit. Pour cela et à l'aide des fichiers excel ([Annexe 5](#): Extrait du fichier de travail du fluorimètre 226), il a été déterminé un débit de 465l/s pour lequel la totalité de la masse du traceur est restitué. Ce sont les seules informations de débit obtenues sur le traçage du 16/03. Bien sûr, cette méthode amène à considérer un débit constant sur la période du traçage ce qui n'est pas représentatif des conditions réelles.

Débit (l/s)	Masse restituée (en g)	Masse restituée (en % de la masse injectée)
125 (minimum)	134	0.27
250	268	0.54
500	537	108
465 (maximum)	500	100

Tableau 13: Méthode pour déterminer les débits minimum et maximum lors du traçage du 16/03/2015 sur le vallon des Encanaux

Aucune donnée n'a été récoltée de façon suffisante précise pour estimer le débit sur la source des Brailles.

5.5.4. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité des Encanaux

Pour interpréter pleinement le traçage du 16/03/2015, il est nécessaire de se rappeler l'emplacement des fluorimètres ([Figure 43](#)). Le fluorimètre n°226 est donc toujours en aval de la source Supérieure des Encanaux et le fluorimètre n°369 a été placé sur la source des Brailles le 08/03/2015. Le traçage a permis d'obtenir les courbes suivantes :

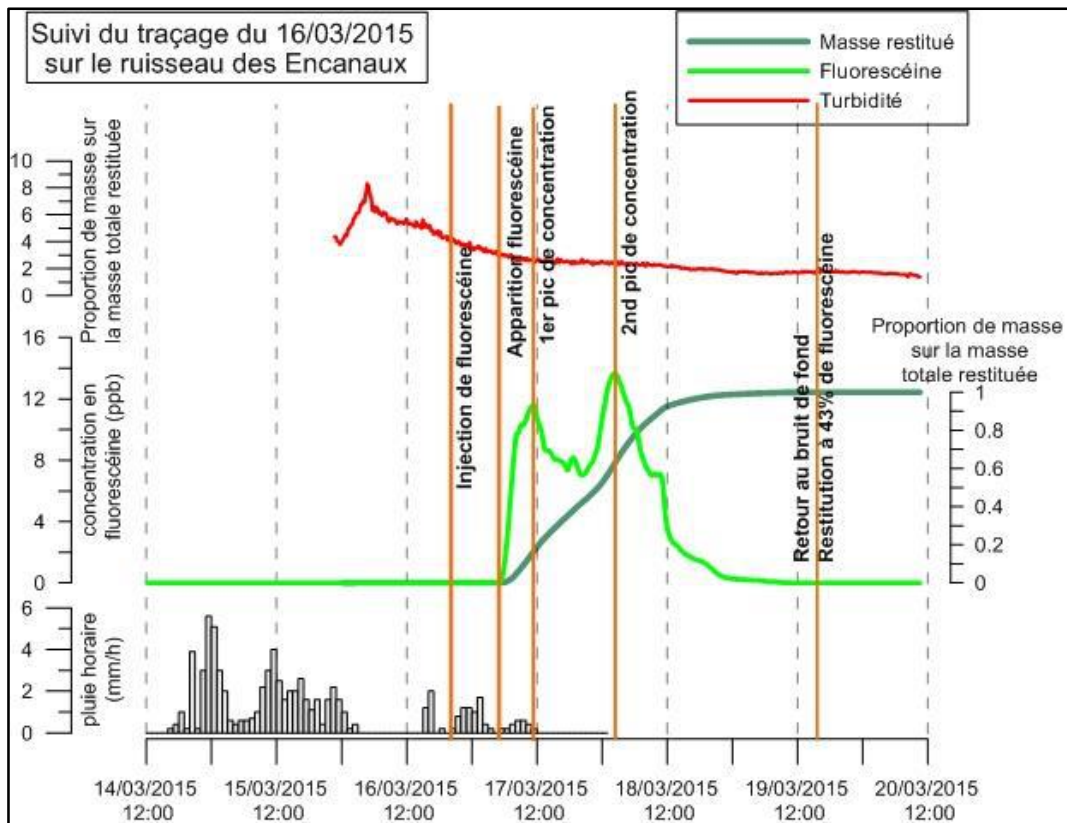


Figure 64: Suivi des paramètres sur le ruisseau des Encanaux entre le 14/03 et le 20/03

Il est possible de tirer quelques observations:

- ✓ 2 pics distincts de concentration en fluorescéine à environ 24 d'intervalles
- ✓ L'absence de corrélation entre l'apparition du traceur et la turbidité
- ✓ Une restitution de traceur rapide, à hauteur de 35% de la masse totale injectée
- ✓ Un retour au bruit de fond et la fin de restitution du traceur en à peine 3 jours.

Les tableaux suivant reprennent précisément les valeurs à retenir à la suite de ce traçage

Traceur	Injection	Première apparition	1 ^{er} pic de concentration	2 nd pic de concentration	Retour au bruit de fond

Fluorescéine 500g	16/03/2015 20h20	17/03/2015 à 05h03 463 minutes depuis l'injection	17/03/2015 à 11h18 795 minutes depuis l'injection 11.81 ppb	18/03/2015 à 02h18, 1695 minutes depuis l'injection 13.84 ppb	19/03/2015 à 16h33 3270 minutes depuis l'injection
----------------------	---------------------	--	---	---	--

Tableau 14: Grandeurs principales

Traceur	Vitesse d'arrivée	Vitesse au 1 ^{er} pic	Vitesse au 2 nd pic	Temps de restitution
Fluorescéine	118m/h	94m/h	32m/h	Environ 59h

Tableau 15: Grandeurs principales

Il est important d'expliquer cette restitution assez différente de celle obtenue lors du premier traçage ([Figure 56](#)). La présence de deux pics peut s'expliquer de plusieurs façons :

La seconde dépend des conditions hydrologiques au moment du traçage. Il faut remarquer des précipitations cumulées de 63 mm entre le 14/03 et le 16/03 avant le traçage, puis un second épisode entre le 16/03 à 21h et le 17/03 à 12h avec un cumul de 9.1mm. Les observations réalisées par A. Zappelli lors du traçage indiquent une circulation de l'eau et la mise en mouvement rapide du traceur par les eaux s'écoulant des fissures dans l'ensemble de la cavité. On peut émettre l'hypothèse que la pluie avant l'injection et l'infiltration des eaux à travers les fissures a permis de créer un courant permettant de mettre en mouvement une partie du traceur. Le système étant très réactif, un début de décrue aurait ralenti le déplacement de la fluorescéine. Ensuite, le second épisode pluvieux aurait permis de remettre en mouvement les masses d'eau et donc la fluorescéine présente ce qui expliquerait le second pic.

Une seconde explication pourrait être le passage du traceur par deux chemins différents. Il existe des liens accessibles par l'homme entre voûte mouillante et siphon noir dans le gouffre des Encanaux, liens qui pourraient permettre une circulation de traceur entre ces deux compartiments. Mais, il existe aussi probablement des liaisons inaccessibles par l'homme entre le point d'injection et de

restitution. Cette hypothèse de deux chemins d'écoulement reste donc assez difficile à vérifier pour le moment.

5.5.5. Le suivi de la fluorescence et de la turbidité sur la source des Brailles

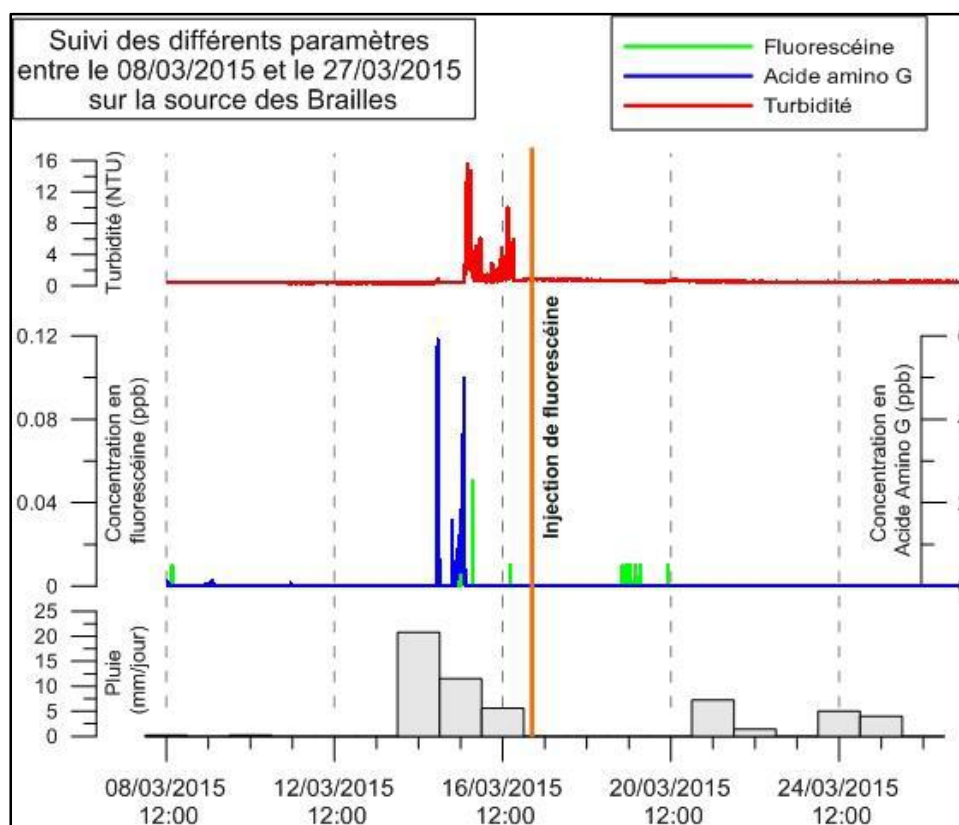


Figure 65: Suivi des paramètres sur la source des Brailles

. De nouveau, il est possible de commenter ce graphique :

- ✓ Concentration très faible en fluorescéine (inférieure à 0.15ppb contre un pic à 14 ppb dans les Encanaux) : fluorescence probablement naturelle
- ✓ Un pic en Acide Amino G avant le pic de turbidité : il faut supposer un apport de matière organique direct par ruissellement au niveau de la sonde de mesure
- ✓ En se référant aux mesures de conductivité ([Figure 38](#)), un problème de mesures se remarquait entre le 08/03 et le 17/03. D'après les observations sur le terrain, la sonde était mal placée avec probablement des bulles d'air ou une courant pas assez régulier

Ces commentaires permettent d'affirmer l'absence de détection de fluorescéine sur la source des Brailles pendant le traçage du 16/03/2015.

5.6. Résultats des analyses par spectrofluorimétrie en laboratoire des échantillons prélevés

A l'aide des préleveurs automatiques installés sur la source des blocs des Encanaux et sur le ruisseau de Daurengue et des échantillons ponctuels fait principalement sur les sources de l'ensemble du bassin de la Vède, il a été possible d'analyser en laboratoire la fluorescence de l'eau.

Ces analyses ont de multiples intérêts. En effet, le suivi de la source des blocs des Encanaux a pour but de suivre régulièrement le passage potentiel des traceurs. Sur la source inférieure, le suivi de la conductivité électrique et de la température ont déjà montré un fonctionnement plus inertiel de cette source, ayant peu ou pas de connexion avec la nappe des sources amont des Encanaux. Cela confirme les travaux de C. Coulier (1983). En ce qui concerne les prélèvements sur la source du trou des Encanaux, la source haute ou la source supérieure des Encanaux, ils peuvent servir de confirmation aux données des fluorimètres. Enfin, les prélèvements automatiques sur le ruisseau de Daurengue peuvent aussi servir de confirmation du suivi du fluorimètre 369 entre le 20/02 et le 08/03, ainsi que le suivi intermittent de la fluorescence durant toute l'étude.

Dans la réalisation des analyses, il a été choisi de sélectionner les échantillons à cause du grand nombre de prélèvements effectués. Ce choix s'est basé sur les besoins de l'étude mais n'a pas toujours été fait de façon la plus logique. L'analyse, permettant de fournir une valeur en unité arbitraire, se complète par le calcul de concentration obtenu à l'aide des étalonnages des traceurs. Des précautions sont aussi à prendre dans l'analyse, avec la vérification des longueurs d'ondes dans le cas où la concentration est positive.

Le choix a été fait de ne pas exploiter ces données ([Annexe 6](#) et [Annexe 7](#)). Pour justifier ce choix, nous pouvons fournir une explication principale : l'absence de spectre d'émission (ou d'excitation) sur certaines mesures. Par exemple, l'obtention de concentration positive n'a pas pu être confirmé ou infirmer du fait de l'absence de ces spectres.

5.7 Conclusion générale sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Vède

Il est possible d'obtenir différentes informations à partir des traçages réalisés lors de cette étude. Tout d'abord, il existe une relation importante entre le gouffre des Encanaux (et la rivière souterraine) avec la source supérieure et la source haute. En effet, le premier traçage a montré une restitution de traceur particulièrement importante sur ces deux sources. Cela confirme les informations de M Coulier quant à leurs fonctionnements. Il faut aussi remarquer une restitution de la majorité du traceur restitué en moins de 24h ([Figure 56](#): Suivi du traçage du 31/01/2015 sur le ruisseau des Encanaux) qui prouve une karstification développée.

L'absence de lien entre gouffre des Encanaux et ruisseau de Daurengue est aussi confirmée entre le 20/02 et le 08/03. Cependant, il aurait été plus intéressant de placer un fluorimètre sur ce ruisseau dès le 30/01/2015 pour suivre la restitution au même moment.

Le traçage du 16/03/15 a permis d'apporter d'autres informations quant au fonctionnement du secteur. La première est l'existence de liaisons karstiques entre la voûte mouillante et la rivière souterraine au sein du gouffre des Encanaux.

La seconde est l'absence de liaison entre le ravin des Encanaux et le système des Brailles. En effet, aucun traceur n'a été détecté entre le 08/03 et le 27/03 sur cette source.

Il faut tout de même se poser des questions quant à la restitution des traceurs. Malgré des conditions de crue le 16/03 qui doivent se traduire par une vitesse de circulation de l'eau plus rapide, ce n'est pas ce que nous avons observé ([Tableau 12](#): Grandeurs principales et [Tableau 14](#)). L'apparition des traceurs s'est faite en 160 minutes le 31/01 contre 460 minutes le 16/03.

Par contre, le temps de retour à la valeur initiale (bruit de fond) se fait plus rapidement le 16/03, en environ 2 jours, contre 7 à 9 jours pour le 31/01. Cela prouve donc une mise en circulation de l'eau de la nappe plus rapide en conditions de crue que d'étiage.

Ce phénomène est probablement dû au choix du lieu d'injection. En effet, l'injection le 31/01 dans la rivière souterraine a permis la circulation rapide et directe de la majorité des traceurs mais une partie des colorants est restée stockée dans la

cavité (comme le montre les observations de terrain le 08/02). Le reste a donc été remis en circulation à la suite d'épisodes pluvieux les jours suivants et explique un temps de restitution plus important. L'injection du 16/03 a eu lieu dans la voûte mouillante et non pas dans la rivière. C'est probablement pour cela que l'apparition de fluorescéine s'est faite tardivement. Des liaisons karstiques entre la voûte et la rivière souterraine par des fissures sont supposées. En effet, ces fissures par définition de petites tailles, auraient permis le transfert de fluorescéine de la voûte vers la rivière assez lentement. Puis, arrivé à la rivière souterraine, le traceur est restitué rapidement ce qui explique les pics de concentration. Il faut remarquer une proportion de traceur restitué plus faible lors du 16/03. Il est difficile de dire si cela dépend du débit fixé pour les calculs de masse restitué ou si une partie du traceur a été fixé dans les liaisons entre voûte mouillante et rivière souterraine.

Au final l'ensemble de ces résultats et interprétations de cette étude, associé aux connaissances acquises par les études antérieures du gouffre et du fonctionnement des sources (B. Arfib, A. Zappelli et C. Coulier), nous permettent de proposer plusieurs schémas conceptuels de vallon des Encanaux :

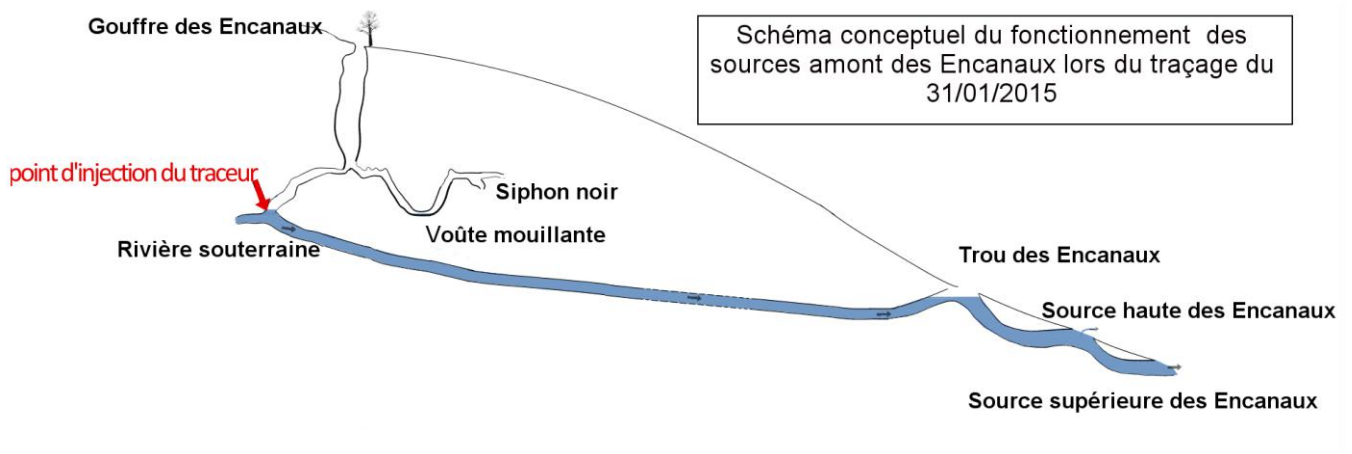


Figure 66: Schéma conceptuel des relations entre gouffre des Encanaux et les sources du vallon des Encanaux lors du traçage du 31/01/2015

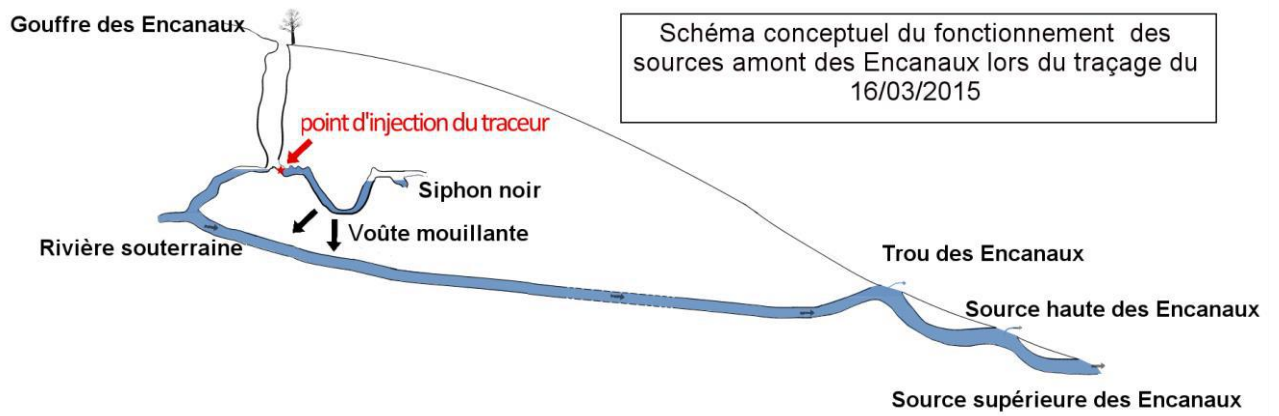
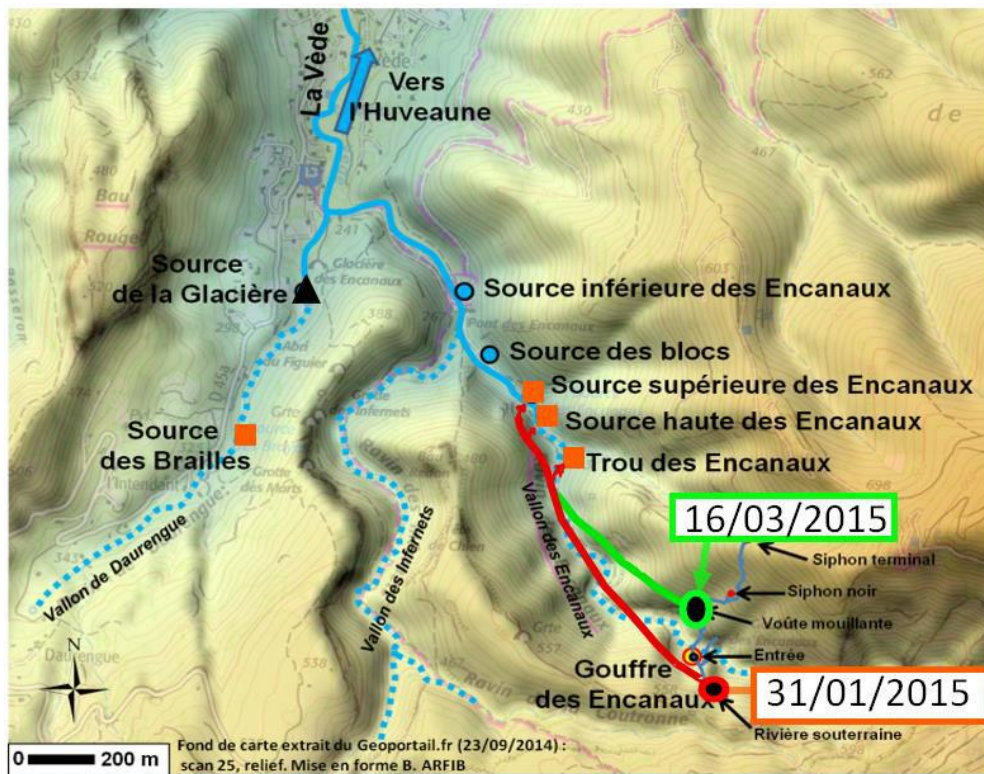


Figure 66: Schéma conceptuel des relations entre gouffre des Encanaux et les sources du vallon des Encanaux lors du traçage du 16/03/2015

Ces deux permettent finalement de présenter les relations entre ces compartiments sur le secteur particulier du vallon des Encanaux. Il faut remarquer le débordement du Trou des Encanaux lorsque le niveau d'eau augmente dans le gouffre ([Figure 54](#): Baisse de la hauteur d'eau dans le gouffre des Encanaux).



Légende:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| ■ Eau d'origine identique | <u>Cheminement des traceurs:</u> |
| ● Point d'injection du 31/01/2015 | — Traçage du 31/01/2015 |
| ● Point d'injection du 16/03/2015 | — Traçage du 16/03/2015 |

Figure 67: Carte hydrogéologique simplifiée du bassin de la Vède

Cette dernière carte permet finalement de résumer sur une vue en plan les informations recueillies au cours de l'étude en ce qui concerne les relations entre les différentes sources du bassin de la Vède. La seconde information permet finalement de représenter schématiquement les écoulements à travers le karst entre le gouffre des Encanaux et les sources amont du vallon des Encanaux.

6. DISCUSSION

Cette étude aura permis de mettre en évidence le fonctionnement hydrogéologique de la zone étudiée. Ainsi, elle apporte un nouvel exemple probant sur la circulation de l'eau en aquifère karstique. De plus, les méthodes et techniques utilisées auront permis d'établir les démarches à suivre dans le cas de futures études sur les milieux karstiques ainsi que sur la ressource en eau souterraine.

Premièrement, dans le but de suivre le fonctionnement des sources il est intéressant d'utiliser plusieurs outils en parallèle afin de pouvoir récolter différentes données lors d'un traçage. En effet, l'intérêt principal des fluorimètres de terrain est de suivre en continu la concentration et donc la restitution des traceurs au cours du temps. Par ailleurs, il faut remarquer que les deux fluorimètres installés nous ont permis d'avoir un suivi en continu de la conductivité électrique et de la température, paramètres aidant à la compréhension des relations entre sources.

Dans le même temps, l'utilisation de préleveurs de terrain (ISCO) permet aussi le suivi d'un traçage mais de façon plus intermittente dans le cas de cette étude (il est possible de sélectionner un pas de temps de mesure de 1 à 999 min mais seulement 28 flacons sont présents). En effet, un pas de temps de 6h ou 12h permettant de prélever des échantillons sur plusieurs jours, mais avec un nombre limité d'échantillons a été utilisé. Dans le cas d'une restitution très rapide (comme dans le cas du premier traçage), un ISCO n'est pas suffisant pour suivre clairement la restitution des traceurs. Au final, l'utilisation de deux appareils au même endroit permet de vérifier les données du fluorimètre avec l'analyse en laboratoire des échantillons par spectrofluorimétrie.

En ce qui concerne le nombre et la disposition des appareils, il aurait été intéressant de pouvoir installer d'autres fluorimètres sur les deux vallons lors du premier traçage. Malgré l'installation d'un préleveur sur le vallon de Daurengue, un fluorimètre aurait permis d'acquérir des données plus régulières, précises et facilement exploitables. Cela se traduit aussi par un gain de temps en surveillant simultanément tous les exutoires principaux de la nappe. Cela aurait aussi pût fournir une vision d'ensemble du fonctionnement de la zone plus facilement.

L'étude présentée peut servir de modèle en matière de méthodes et d'interprétations, notamment dans la recherche de nouvelles ressources en eau souterraines de ce type pour son exploitation. Une telle étude permettrait de définir les périmètres de protection de captage. La démarche sera identique à celle présentée dans ce projet, un temps de transfert rapide étant un des paramètres à prendre en compte dans l'estimation de la sensibilité de la ressource aux perturbations extérieures.

Cette étude nous aura permis d'appréhender les techniques de traçage, l'utilisation de matériel, des méthodes d'analyse en laboratoire et de traitement des données de terrain. Elle nous aura appris la rigueur nécessaire dans le cadre du suivi d'un milieu ainsi que la réactivité nécessaire à la réalisation de traçages dépendant du régime hydrologique de la zone d'étude. Ces connaissances, pourront être réinvesties dans le cas d'études futures ou dans le cas de conseils à apporter à d'autres chercheurs.

Ainsi, dans le cas d'une étude similaire, il faudra prendre en compte les risques d'erreurs dues aux différents opérateurs et de bien définir les différentes techniques à utiliser. En effet, le travail en équipe demande un partage du travail. Il faut donc pouvoir fixer les méthodes et outils à utiliser pour faciliter la mise en commun des données et donc rendre leurs analyses plus aisées.

Une information que nous n'avons pas récoltée sur le terrain concerne les coordonnées GPS des points de suivi (source et mesure sur la rivière). En effet, pour s'assurer d'un suivi régulier et précis des points de mesure, l'utilisation des coordonnées permettrait de garantir un suivi de qualité lors de chaque intervention sur le terrain. Dans le même ordre d'idée, il est intéressant de prendre des photos sur le terrain, celles-ci pouvant illustrer les observations de terrain des conditions hydrologiques ou des sites de mesures.

Enfin, l'interprétation des résultats obtenus à l'aide des données des fluorimètres nécessite l'utilisation du débit le jour du traçage (calcul de la masse restituée en [Annexe 5](#): Extrait du fichier de travail du fluorimètre 226). Nous n'avons pas effectué cette mesure le jour même, mais seulement 20 jours après le traçage, c'est-à-dire dans des conditions hydrologiques différentes. Il a donc fallu estimer, à

partir des observations de terrain et les mesures effectuées, quel était le débit au 31/01/2015. Cela influence les calculs de pourcentage de masse restituée. Connaître le débit le jour du traçage nous aurait assuré de déterminer précisément la masse restituée dans des conditions hydrologiques particulières.

De même, il apparaît au vu des résultats qu'il peut exister entre le point d'injection et le point de sortie deux chemins d'écoulements, il est impossible de les localiser précisément avec les données actuelles, ces chemins pouvant être inaccessibles à l'homme, il faudrait des informations supplémentaires apportées par les capteurs de pression situés dans la rivière souterraine, dans la voute mouillante et dans le siphon noir, qui apporteraient des données de pression et de hauteur d'eau, permettant de savoir si le niveau d'eau a atteint pendant la crue du 16/02/15 le seuil de débordement entre voute mouillante et siphon noir.

CONCLUSION

Cette étude a eu pour but de définir l'origine et le mode d'écoulement de l'eau souterraine qui alimente les sources karstiques du bassin de la Vède. Pour cela, des visites sur le terrain ont permis d'évaluer les relations entre les différentes sources et le suivi nécessaires pour vérifier les liens supposés. Les références à d'anciennes études, notamment la thèse de C. Coullier, ont contribué à la formulation d'hypothèses de travail et permis d'orienter nos choix de traçage.

Le choix du traçage artificiel, avec un suivi en continu et ponctuel de plusieurs paramètres (fluorescence, conductivité électrique, température) a été mis en place à partir du gouffre des Encanaux. Avec les observations de terrains et les données récoltées qui ont été interprétées, il a été possible de fournir une explication à la problématique posée en début d'étude : le fonctionnement du karst du bassin de la Vède.

Ainsi, le système karstique du bassin de la Vède apparaît plus clair. Les relations définies par C Coullier entre le gouffre des Encanaux et la source supérieure ont été confirmées. A partir des observations de terrain, les liens entre le trou des Encanaux, la source haute et la source supérieure ont été plus clairement définis. Lorsque le trou des Encanaux cesse de déborder vers la rivière, il existe une circulation dans le karst sous-jacent et une évacuation des eaux au niveau de la source supérieure et de la source haute (en crue seulement). Cela est prouvé par le suivi en continu ou ponctuel de la conductivité électrique et de la température, avec des sources ayant une eau d'origine commune. Les analyses chimiques couplées aux mesures de conductivité et température à la source inférieure des Encanaux ont mis en avant l'origine différente de l'eau de cette source, avec un temps de résidence dans le système karstique plus long que les autres sources du vallon des Encanaux.

En ce qui concerne les traçages, ils ont permis de préciser le fonctionnement hydrogéologique du bassin. Celui du 30/01/2015 a confirmé la liaison entre la source supérieure et le gouffre des Encanaux par un système très karstifié, comme le montre la restitution des traceurs. Celui du 16/03/2015 a quant à lui montré l'existence de liaisons karstiques entre la voûte mouillante et la rivière souterraine dans le gouffre des Encanaux.

Bien que cette étude ait apportée des résultats concluant sur les transferts d'eau souterraine dans le karst de la Vède, il serait possible et intéressant de l'enrichir par de nouvelles acquisitions. Des traçages supplémentaires à différentes échelles seraient envisageables, par exemple à l'échelle du bassin versant pour clarifier l'origine des écoulements et mieux comprendre les partages des eaux en tête de bassin. Mais des traçages à petite échelle seraient aussi cohérents pour apporter plus de précision sur les liens entre les sources des Encanaux,

Enfin cette étude s'étant concentrée sur le cas du fonctionnement d'une zone d'étude particulière, il serait intéressant de poursuivre la réflexion en s'attachant à une étude à l'échelle de bassin versant. Cette étape supplémentaire serait réalisée pour répondre à la problématique de la protection de la ressource et la définition de périmètre de protection.

BIBLIOGRAPHIE

H. Pauwels, 1995, « *Evaluation de traceurs artificiels pour l'étude du transport de soluté dans les eaux souterraines* », BRGM, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-38323-FR.pdf>

C. COULIER, 1985, « *Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale, Bouches-du-Rhône-Var* », Th Université de Provence BRGM.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-38323-FR.pdf>

B. Arfib et A. Zappelli, 2014, « *Le Gouffre des Encanaux Ou les vases communicants provençaux* », Speclunca.

G.Guieu, 1968, « *Etude tectonique de la région de Marseille* », thèse université de Provence.

G.Guieu, J.Ricour, Jacques Rouire, 2008, « *Découverte géologique de Marseille et de son environnement montagneux* » édition Jeanne Laffitte – BRGM éditions.

Phillipe Meuse, 1993, « *Hydrogéologie d'un aquifère karstique dans les calcaires carbonifères* » université de Liège <http://bictel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-01302009-140630/unrestricted/Philippe MEUS these 1993.pdf>

M. Bakalowicz, 1999, « *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques.* » Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse <http://sierm.eaurmc.fr/sdage/documents/guide-tech-3.pdf>

M. Bakalowicz, 1999, « *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques.* » Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse <http://sierm.eaurmc.fr/sdage/documents/guide-tech-3.pdf>

Nevila Jozja, 2008, « *Importance de la composante analytique dans la fiabilité de l'interprétation d'un traçage* » Université d'Orléans
http://www.polytech.free.fr/colloque_MichelLepiller/Actes/actes%20pdf/Importance%20de%20la%20composante%20analytique%20dans%20la%20fiabilit%C3%A9%20de%20l%27interpr%C3%A9tation%20d%27un%20tra%C3%A7age.pdf

Paul Henri Mondain & Phillipe Muet, 2008, « *Proposition d'une grille d'évaluation des résultats des traçages en milieu karstique (au moyen de traceurs fluorescents)* » Nantes
http://www.polytech.free.fr/colloque_MichelLepiller/Actes/actes%20pdf/Proposition%20d%E2%80%99une%20grille%20d%E2%80%99%C3%A9valuation%20des%20r%C3%A9sultats%20des%20tra%C3%A7ages%20en%20milieu%20karstique.pdf

Thibaut Blondel, 2012, « *Traçage Spatial et temporel des eaux souterraines dans les hydrosystèmes karstiques par les matières organiques dissoutes* » Université d'Avignon <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00684295/document>

Michel Bakalowicz, 2002, « *Hydrogéologie karstique* » Montpellier
<http://www.sisyphe.upmc.fr/~m2hh/hydr/baka/Baka.pdf>

D.Leparoux, 1998, « *Etude de faisabilité pour la détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques dans la région de Strasbourg* » Strasbourg
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-40266-FR.pdf>

Vincent Jourdiar, 2013, « *L'élevage bovin et la ressource en eau potable* »
<http://www.pleinchamp.com/elevage/actualites/l-elevage-bovin-et-la-ressource-en-eau-potable>

ANNEXE

<i>Annexe 1: Fiches de travail pour mesure de débit sur le terrain</i>	96
<i>Annexe 2: Recensement des sources et de leurs situations par rapport à l'entrée du gouffre des Encanaux</i>	97
<i>Annexe 3: Extrait des données brutes (en mV) du fluorimètre 226</i>	98
<i>Annexe 4: Extrait des données traitées (en ppb) du fluorimètre 226</i>	98
<i>Annexe 5: Extrait du fichier de travail du fluorimètre 226</i>	99
<i>Annexe 6: Analyse des échantillons par spectrofluorimétrie</i>	100
<i>Annexe 7: Analyse des échantillons par spectrofluorimétrie</i>	101
<i>Annexe 8: Source des blocs des Encanaux</i>	102
<i>Annexe 9: Source des Brailles</i>	103
<i>Annexe 10: Source haute des Encanaux</i>	104
<i>Annexe 11: Source inférieure des Encanaux</i>	105
<i>Annexe 12: Source supérieure des Encanaux</i>	106
<i>Annexe 13: Le trou des Encanaux</i>	107
<i>Annexe 14: Deux pointst de mesures remarquables</i>	108

MESURES DE DEBIT AU MOULINET

Opérateur : _____
 Moulinet Ott n° : _____
 Equipement : _____
 Montage : _____
 Hélice utilisée n° : _____
 Cadence des impulsions : _____
 Mode de comptage compteur type : _____
 Temps de mesuresecondes.

N° Code Hydrologique : _____
 Cours d'eau : _____
 Emplacement : _____
 Commune : _____
 Niveau à l'échelle ou repère : _____
 Emplacement du repère : _____
 Résultat de la mesure Q : _____ m³/sec.

date: _____

Croquis de(ou des)section(s)de jauge

Observations

N° des Verticales	Largeur cumulée (cm)	Profondeur mouillée (cm)	N° des points de mesure	Hauteur du point de mesure au-dessus du fond (cm)	Nombre de tours de l'hélice	Vitesse mm/sec.	Vert	L.C.	P. M.	Mes.	H.	N ^b T	V.
1			6				6						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										
2			6				7						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										
3			6				8						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										
4			6				9						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										
5			6				10						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										
			6				11						
			5										
			4										
			3										
			2										
			1										

Point de mesure	Distance à l'entrée du gouffre des Encanaux (m)	Type d'écoulement	Altitude (m)	Latitude	Longitude
Entrée du Gouffre des Encanaux	-	Pas d'écoulement par l'entrée	410 m (entrée du gouffre)	43°20'11.55"N	5°40'29.64" E
Rivière souterraine du gouffre des Encanaux à l'étiage	développement : 130 m dénivelé : 90 m	permanent	320 m environ (rivière souterraine à l'étiage)		
Source inférieure des Encanaux	1400	permanent	260 m	43°20'50.26"N	5°39'56.38" E
Source des blocs des Encanaux	1190	temporaire	280 m	43°20'43.44"N	5°40'0.33"E
Source supérieure des Encanaux	990	permanent	275 m	43°20'38.64"N	5°40'5.83"E
Source haute des Encanaux	920 m	temporaire	285 m	43°20'36.99"N	5°40'7.69"E
Trou des Encanaux	760 m	temporaire	305 m	43°20'32.90"N	5°40'12.25" E
Source de la Glacière	1750	permanent	270 m	43°20'52.23"N	5°39'35.43" E
Source des Brailles	1600 m	temporaire	300 m	43°20'35.49"N	5°39'26.16" E



Annexe 2: Recensement des sources et de leurs situations par rapport à l'entrée du gouffre des Encanaux

GGUN-FL Fluorometer #226 - Signals in mV

#	Time	R	Tracer 1	Tracer 2	Tracer 3	Turbidity	Baseline	Battery V	T	Conductiv
1	15/01/30-18:31:07	0	4.04	0.66	3.96	97.72	13.72	6.33	11.81	0.628
2	15/01/30-18:46:07	0	4.02	0.64	3.95	96.05	13.72	6.33	11.92	0.630
3	15/01/30-19:01:07	0	3.95	0.63	3.95	95.60	13.75	6.33	11.95	0.629
4	15/01/30-19:16:06	0	3.97	0.66	3.93	97.64	13.73	6.32	11.95	0.628
5	15/01/30-19:31:06	0	3.96	0.64	3.92	95.90	13.73	6.32	11.96	0.632
6	15/01/30-19:46:06	0	3.95	0.62	3.89	95.22	13.74	6.32	11.96	0.630
7	15/01/30-20:01:06	0	4.31	0.62	3.94	95.08	13.73	6.32	11.96	0.628
8	15/01/30-20:16:06	0	3.91	0.64	3.89	96.75	13.73	6.32	11.97	0.628
9	15/01/30-20:31:06	0	3.98	0.62	3.39	95.98	13.73	6.32	11.98	0.633
10	15/01/30-20:46:06	0	3.89	0.61	3.89	94.92	13.73	6.32	11.99	0.633
11	15/01/30-21:01:06	0	3.89	0.60	3.88	94.98	13.75	6.32	12.00	0.634
12	15/01/30-21:16:06	0	3.90	0.61	3.86	96.78	13.73	6.32	12.02	0.635
13	15/01/30-21:31:06	0	3.88	0.63	3.85	94.77	13.73	6.32	12.03	0.635
14	15/01/30-21:46:06	0	3.89	0.63	3.84	95.10	13.74	6.31	12.03	0.636
15	15/01/30-22:01:06	0	3.84	0.62	3.85	94.20	13.73	6.31	12.05	0.635
16	15/01/30-22:16:06	0	3.88	0.64	3.88	94.74	13.72	6.31	12.06	0.639
17	15/01/30-22:31:06	0	3.88	0.63	3.89	94.55	13.72	6.31	12.06	0.640
18	15/01/30-22:46:06	0	3.80	0.62	3.85	94.00	13.74	6.31	12.06	0.640
19	15/01/30-23:01:05	0	3.86	0.61	3.84	95.10	13.72	6.31	12.07	0.643
20	15/01/30-23:16:05	0	3.86	0.64	3.84	95.31	13.72	6.31	12.08	0.642
21	15/01/30-23:31:05	0	3.82	0.62	3.84	94.95	13.73	6.31	12.08	0.642
22	15/01/30-23:46:05	0	3.80	0.62	3.83	93.35	13.76	6.31	12.08	0.641
23	15/01/31-00:01:05	0	3.84	0.61	3.83	94.84	13.72	6.31	12.07	0.645
24	15/01/31-00:16:05	0	3.86	0.62	3.82	94.36	13.73	6.31	12.07	0.643
25	15/01/31-00:31:05	0	3.84	0.65	3.81	94.69	13.73	6.31	12.07	0.645
26	15/01/31-00:46:05	0	3.93	0.61	3.83	96.30	13.73	6.31	12.07	0.644
27	15/01/31-01:01:05	0	3.78	0.61	3.84	97.26	13.74	6.31	12.07	0.643
28	15/01/31-01:16:05	0	3.80	0.64	3.84	96.71	13.74	6.31	12.07	0.642
29	15/01/31-01:31:05	0	3.82	0.63	3.82	97.02	13.75	6.31	12.07	0.644
30	15/01/31-01:46:05	0	3.81	0.66	3.83	98.98	13.75	6.31	12.07	0.643
31	15/01/31-02:01:05	0	3.81	0.63	3.83	99.15	13.73	6.31	12.07	0.642
32	15/01/31-02:16:05	0	3.83	0.62	3.83	98.98	13.73	6.31	12.08	0.641
33	15/01/31-02:31:05	0	3.84	0.61	3.82	101.28	13.73	6.31	12.08	0.638
34	15/01/31-02:46:04	0	3.87	0.66	3.83	100.66	13.72	6.31	12.08	0.636
35	15/01/31-03:01:04	0	3.85	0.63	3.84	100.31	13.75	6.31	12.08	0.635
36	15/01/31-03:16:04	0	3.82	0.62	3.85	101.82	13.74	6.31	12.08	0.638
37	15/01/31-03:31:04	0	3.83	0.63	3.87	101.15	13.74	6.30	12.08	0.632
38	15/01/31-03:46:04	0	3.86	0.64	3.88	101.74	13.75	6.30	12.08	0.631
39	15/01/31-04:01:04	0	3.86	0.63	3.89	101.86	13.76	6.30	12.09	0.630
40	15/01/31-04:16:04	0	3.88	0.63	3.89	103.33	13.73	6.30	12.09	0.629

Annexe 3: Extrait des données brutes (en mV) du fluorimètre 226

GGUN-FL Fluorometer #226 - Dye concentration

#	Time	Tracer 1	Tracer 2	Tracer 3	Turbidity	T°C	microS/cm
1	15/01/30-18:31:07	0.94	1.11	53.55	1.78	11.81	5.59e+02
2	15/01/30-18:46:07	0.94	1.04	53.41	1.68	11.92	5.59e+02
3	15/01/30-19:01:07	0.92	1.01	53.44	1.66	11.95	5.58e+02
4	15/01/30-19:16:06	0.92	1.11	53.15	1.78	11.95	5.57e+02
5	15/01/30-19:31:06	0.92	1.04	53.01	1.68	11.96	5.60e+02
6	15/01/30-19:46:06	0.92	0.97	52.59	1.64	11.96	5.59e+02
7	15/01/30-20:01:06	1.03	0.95	53.15	1.63	11.96	5.57e+02
8	15/01/30-20:16:06	0.91	1.05	52.61	1.72	11.97	5.57e+02
9	15/01/30-20:31:06	0.93	0.98	45.49	1.68	11.98	5.61e+02
10	15/01/30-20:46:06	0.90	0.94	52.62	1.62	11.99	5.61e+02
11	15/01/30-21:01:06	0.91	0.90	52.48	1.62	12.00	5.62e+02
12	15/01/30-21:16:06	0.91	0.94	52.19	1.73	12.02	5.62e+02
13	15/01/30-21:31:06	0.90	1.02	52.05	1.61	12.03	5.62e+02
14	15/01/30-21:46:06	0.90	1.01	51.91	1.63	12.03	5.63e+02
15	15/01/30-22:01:06	0.89	0.98	52.07	1.58	12.05	5.62e+02
16	15/01/30-22:16:06	0.90	1.05	52.48	1.61	12.06	5.65e+02
17	15/01/30-22:31:06	0.90	1.02	52.62	1.60	12.06	5.66e+02
18	15/01/30-22:46:06	0.88	0.99	52.09	1.57	12.06	5.66e+02
19	15/01/30-23:01:05	0.90	0.94	51.92	1.63	12.07	5.69e+02
20	15/01/30-23:16:05	0.89	1.05	51.92	1.64	12.08	5.68e+02
21	15/01/30-23:31:05	0.88	0.98	51.94	1.62	12.08	5.68e+02
22	15/01/30-23:46:05	0.88	0.99	51.80	1.53	12.08	5.67e+02
23	15/01/31-00:01:05	0.89	0.94	51.79	1.61	12.07	5.71e+02
24	15/01/31-00:16:05	0.89	0.98	51.64	1.59	12.07	5.69e+02
25	15/01/31-00:31:05	0.88	1.09	51.50	1.61	12.07	5.71e+02
26	15/01/31-00:46:05	0.92	0.94	51.75	1.70	12.07	5.70e+02
27	15/01/31-01:01:05	0.87	0.94	51.95	1.75	12.07	5.69e+02
28	15/01/31-01:16:05	0.87	1.05	51.94	1.72	12.07	5.68e+02
29	15/01/31-01:31:05	0.88	1.02	51.65	1.74	12.07	5.70e+02
30	15/01/31-01:46:05	0.87	1.12	51.80	1.85	12.07	5.69e+02
31	15/01/31-02:01:05	0.88	1.01	51.80	1.86	12.07	5.68e+02
32	15/01/31-02:16:05	0.88	0.97	51.79	1.85	12.08	5.67e+02
33	15/01/31-02:31:05	0.89	0.93	51.65	1.99	12.08	5.64e+02
34	15/01/31-02:46:04	0.89	1.12	51.77	1.95	12.08	5.62e+02
35	15/01/31-03:01:04	0.89	1.01	51.92	1.93	12.08	5.61e+02
36	15/01/31-03:16:04	0.88	0.97	52.08	2.02	12.08	5.64e+02
37	15/01/31-03:31:04	0.88	1.01	52.36	1.98	12.08	5.58e+02
38	15/01/31-03:46:04	0.89	1.04	52.49	2.01	12.08	5.58e+02
39	15/01/31-04:01:04	0.89	1.00	52.63	2.02	12.09	5.56e+02
40	15/01/31-04:16:04	0.90	1.00	52.62	2.10	12.09	5.55e+02

Annexe 4: Extrait des données traitées (en ppb) du fluorimètre 226

#	Heure réelle	R	Uranine Traceur 1 (mV)	Rhodamine Traceur 2 (mV)	Acide Amino G Traceur 3 (mV)	Turbidity (mV)	Baseline	Battery V	Temperature (°C)	Conductiv brute (mV)	Uranine total (ppb)	Rhodamine total (ppb)	Acide Amino G total (ppb)	Turbidity (NTU)	Temperature (°C)	Temperature modifié (°C)	Conductivité électrique (µS/cm)	Conductivité électrique Corrigée (µS/cm)	Calculs	Uranine - BF (ppb)	Acide Amino G BF(ppb)	Flux de traceur Uranine (g/s)	Flux de traceur Ac Am G (g/s)	Masse restituée cumulée Uranine (g)	Masse restituée cumulée Ac Am (G)	% masse restituée uranine sur masse totale restituée	%masse restituée uranine sur masse totale injectée	% masse restituée Acide amino G sur masse totale restituée	% masse restituée Acide amino G sur masse totale injectée	Distribution des Temps de Séjour Uranine (s-1)	Distribution des Temps de Séjour Ac Am G (s-1)				
1	30/01/2015 17:03	0	4,04	0,66	3,96	97,72	13,72	6,33	11,81	0,628	0,94	1,11	53,55	1,78	11,81	12,30	559	534		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	30/01/2015 17:18	0	4,02	0,64	3,95	96,05	13,72	6,33	11,92	0,63	0,94	1,04	53,41	1,68	11,92	12,53	560	536	Bruit de fond Uranine BF (ppb)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
3	30/01/2015 17:33	0	3,95	0,63	3,95	95,6	13,75	6,33	11,95	0,629	0,92	1,01	53,44	1,66	11,95	12,59	561	537	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
4	30/01/2015 17:48	0	3,97	0,66	3,93	97,64	13,73	6,32	11,95	0,628	0,92	1,11	53,15	1,78	11,95	12,59	562	539		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
5	30/01/2015 18:03	0	3,96	0,64	3,92	95,9	13,73	6,32	11,96	0,632	0,92	1,04	53,01	1,68	11,96	12,61	563	540	Bruit de fond Ac Am G BF (ppb)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	30/01/2015 18:18	0	3,95	0,62	3,89	95,22	13,74	6,32	11,96	0,63	0,92	0,97	52,59	1,64	11,96	12,61	564	542	54,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	30/01/2015 18:33	0	4,31	0,62	3,94	95,08	13,73	6,32	11,96	0,628	1,03	0,95	53,15	1,63	11,96	12,61	565	543		0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,4E-08	0,00	
8	30/01/2015 18:48	0	3,91	0,64	3,89	96,75	13,73	6,32	11,97	0,628	0,91	1,05	52,61	1,72	11,97	12,63	566	545	Débit constant (l/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	30/01/2015 19:03	0	3,98	0,62	3,39	95,98	13,73	6,32	11,98	0,633	0,93	0,98	45,49	1,68	11,98	12,65	567	546	125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	30/01/2015 19:18	0	3,89	0,61	3,89	94,92	13,73	6,32	11,99	0,633	0,9	0,94	52,62	1,62	11,99	12,67	568	548		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
11	30/01/2015 19:33	0	3,89	0,6	3,88	94,98	13,75	6,32	12	0,634	0,91	0,9	52,48	1,62	12	12,69	569	549		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
12	30/01/2015 19:48	0	3,9	0,61	3,86	96,78	13,73	6,32	12,02	0,635	0,91	0,94	52,19	1,73	12,02	12,74	570	551		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
80	31/01/2015 12:48	0	4,19	0,74	4,06	133,11	13,74	6,29	12,31	0,611	0,97	1,33	54,86	3,84	12,31	13,34	638	653		0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
81	31/01/2015 13:03	0	4,23	0,73	4,07	133,8	13,73	6,29	12,31	0,613	0,98	1,29	54,98	3,88	12,31	13,34	639	655		0,00	0,14	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
82	31/01/2015 13:18	0	4,19	0,72	4,08	135,13	13,75	6,29	12,31	0,61	0,97	1,26	55,14	3,95	12,31	13,34	640	656		0,00	0,30	0,00	0,00	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
83	31/01/2015 13:33	0	4,22	0,73	4,05	136,4	13,73	6,29	12,31	0,611	0,98	1,29	54,7	4,03	12,31	13,34	641	658		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
84	31/01/2015 13:48	0	4,26	0,92	4,34	134,47	13,78	6,29	12,31	0,609	0,96	1,99	58,79	3,92	12,31	13,34	642	659		0,00	3,95	0,00	0,00	0,01	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
85	31/01/2015 14:03	0	4,25	0,78	4,08	138,79	13,79	6,29	12,32	0,61	0,98	1,47	55,11	4,17	12,32	13,36	643	661		0,00	0,27	0,00	0,00	0,01	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
86	31/01/2015 14:18	0	4,27	0,73	4,08	134,53	13,78	6,29	12,32	0,608	0,99	1,29	55,11	3,92	12,32	13,36	644	662		0,00	0,27	0,00	0,00	0,01	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
87	31/01/2015 14:33	0	4,26	0,73	4,07	141,12	13,77	6,29	12,32	0,603	0,99	1,28	54,96	4,31	12,32	13,36	645	664		0,00	0,12	0,00	0,00	0,01	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
88	31/01/2015 14:48	0	4,19	0,77	4,06	144,98	13,82	6,29	12,33	0,608	0,96	1,43	54,84	4,53	12,33	13,38	646	665		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
89	31/01/2015 15:03	0	4,25	0,73	5,39	137,7	13,8	6,29	12,33	0,605	0,99	1,26	73,69	4,1	12,33	13,38	647	667		0,00	18,85	0,00	0,00	0,01	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
90	31/01/2015 15:18	0	4,24	0,76	9,44	139,61	13,73	6,29	12,33	0,598	0,99	1,28	131,14	4,22	12,33	13,38	648	668		0,00	76,30	0,00	0,01	0,01	11,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
91	31/01/2015 15:33	0	4,28	0,74	11,48	141,53	13,74	6,29	12,32	0,599	1	1,16	160,06	4,33	12,32	13,36	649	670		0,01	105,22	0,00	0,01	0,01	23,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
92	31/01/2015 15:48	0	4,27	0,77	10,88	149,28	13,73	6,29	12,33	0,601	0,99	1,27	151,54	4,79	12,33	13,38	650	671		0,00	96,70	0,00	0,01	0,01	34,06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
93	31/01/2015 16:03	0	4,25	0,76	9,74	152,63	13,74	6,29	12,33	0,598	0,99	1,25	135,37	4,98	12,33	13,38	651	673		0,00	80,53	0,00	0,01	0,01	43,12	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
94	31/01/2015 16:18	0	4,25	0,78	9,16	150,46	13,76	6,29	12,32	0,604	0,98	1,34	127,14	4,86	12,32	13,36	652	674		0,00	72,30	0,00	0,01	0,01	51,25	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
95	31/01/2015 16:33	0	4,26	0,79	10,63	150,56	13,75	6,28	12,32	0,593	0,99	1,35	147,99	4,86	12,32	13,36	653	676		0,00	93,15	0,00	0,01	0,01	61,73	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
96	31/01/2015 16:48	0	4,27	0,76	33,9	152,82	13,75	6,28	12,32	0,595	1,02	0,74	478,06	4,99	12,32	13,36	654	677		0,03	423,22	0,00	0,05	0,01	109,34	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	1,8E-08	0,00	0,00	0,00	
97	31/01/2015 17:03	0	9,31	0,95	127,56	150,87	13,74	6,28	12,32	0,599	2,57	0,01	1804,53	4,88	12,32	13,36	655	679		1,58	1749,69	0,00	0,22	0,19	306,18	0,00	0,00	0,00	0,07	0,04	9,4E-07	0,00	0,00	0,00	
98	31/01/2015 17:18	0	133,18	5,38	269,63	155,7	13,73	6,28	12,31	0,589	38,6	4,5	3768,44	5,16	12,31	13,34	656	680		37,61	3713,60	0,00	0,46	4,42	723,96	0,02	0,01	0,16	0,09	2,2E-05	0,00	0,00	0,00		
99	31/01/2015 17:33	0	500,41	18,39	361,94	165,11	13,75	6,28	12,31	0,589	145,12	26,94	4925,71	5,72	12,31	13,34	657	682		144,13	4870,87	0,02	0,61	20,63	1271,94	0,10	0,06	0,27	0,15	8,6E-05	0,00	0,00	0,00		
100	31/01/2015 17:48	0	804,96	29,13	370,31	168,32	13,75	6,28	12,31	0,594	233,41	46,81	4918,3	5,91	12,31	13,34	658	683		232,42	4863,46	0,03	0,61	46,78	1819,08	0,22	0,14	0,39	0,22	1,4E-04	0,00	0,00	0,00		
101	31/01/2015 18:02	0	870,31	31,43	323,42	172,02	13,76	6,28	12,3	0,59	252,3	52,09	4226,1	6,13	12,3	13,32	659	685		251,31	4171,26	0,03	0,52	75,05	2288,34	0,36	0,22	0,49	0,28	1,5E-04	0,00	0,00	0,00		
102	31/01/2015 18:17	0	765,24	27,84	261,29	166,51	13,73	6,28	12,29	0,593	221,77	46,92	3388,32	5,8	12,29	13,30	660	686		220,78	3333,48	0,03	0,42	99,89	2663,36	0,48	0,30	0,57	0,32	1,3E-04	0,00	0,00	0,00		
103	31/01/2015 18:32	0	610,58	22,34	205,33	167,13	13,72	6,28	12,29	0,591	176,89	37,75	2658,6	5,84	12,29	13,30	661	688		175,90	2603,76	0,02	0,33	119,68	2562,28	0,57	0,35	0,63	0,36	1,1E-04	0,00	0,00	0,00		

Nom/site de mesure	Date et heure	Acide Amino G		Bruit de fond moyen (u.a.)	Fluorescéine		Bruit de fond moyen (ua)	Traceurs B. ARFIB	Remarque Analyses Fluorescéine		
		Intensité (u.a)	Concentration ppb		Intensité (u.a)	Concentration (µg/L)					
ISCO n° 21 (au moment de l'installation)	30/01/2015 17:30	19	0,000	19,562	0,27	0,008	0,263333333				
ISCO 21 Daurengue n°3	31/01/2015 05:45	13,4	0,000		0,25	0,000					
ISCO 21 Daurengue n°4	31/01/2015 11:45	15,2	0,000		0,27	0,008					
ISCO 21 Daurengue n°5	31/01/2015 17:45	19,9	0,350		0,4	0,167					
ISCO 21 Daurengue n°6	31/01/2015 23:45	20	0,454		0,31	0,057					
ISCO 21 daurengue n°7	01/02/2015 05:45	20,8	1,284		0,32	0,069					
ISCO 21 daurengue n°8	01/02/2015 11:45	21	1,492		0,29	0,033					
ISCO 21 daurengue n°9	01/02/2015 17:45	19,9	0,350		0,26	0,000					
ISCO 21 daurengue n°10	01/02/2015 23:45	19,7	0,143		0,29	0,033					
ISCO 21 daurengue n°11	02/02/2015 05:45	19,7	0,143		0,3	0,045					
ISCO 21 daurengue n°12	02/02/2015 11:45	20,2	0,664		0,29	0,033					
ISCO 21 daurengue n°13	02/02/2015 17:45	19,7	0,143		0,27	0,008					
ISCO 21 daurengue n°14	02/02/2015 23:45	20,3	0,765		0,27	0,008					
ISCO 21 daurengue n°15	03/02/2015 05:45	19,9	0,350		0,26	0,000					
ISCO 21 daurengue n°16	03/02/2015 11:45	19,9	0,350		0,26	0,000					
ISCO 21 daurengue n°17	03/02/2015 17:45	19,9	0,350		0,32	0,069					
ISCO 21 daurengue n°18	03/02/2015 23:45	21,5	2,013		0,28	0,020					
ISCO 21 daurengue n°19	04/02/2015 05:45	21,3	1,895		0,39	0,155					
ISCO 21 daurengue n°20	04/02/2015 11:45	21,4	1,909		0,3	0,045					
ISCO 21 daurengue n°25	05/02/2015 17:45	22,2	2,745		0,39	0,155					
ISCO 21 daurengue n°5	06/02/2015 21:18	19,7	0,143		0,29	0,033					
ISCO 21 daurengue n°9	07/02/2015 21:18	19,2	0,000		0,34	0,094					
ISCO 21 daurengue n°13	08/02/2015 21:18	19,8	0,247		0,26	0,000					
ISCO 21 daurengue n°17	09/02/2015 21:18	18,1	0,000		0,26	0,000					
ISCO 21 daurengue n°21	10/02/2015 21:18	18,8	0,000		0,27	0,008					
ISCO 21 daurengue n°25	11/02/2015 21:18	18,1	0,000	0,26	0,000						
				Bruit de fond moyen			Bruit de fond moyen				
ISCO n° 22, ponctuelle	30/01/2015 16:55	30,5	0,000	26,344	0,25	0,000	1,109				
ISCO 22 blocs n°5	31/01/2015 17:10	25,7	0,000		7,5	6,712					
ISCO 22 blocs n°6	31/01/2015 23:10	24,9	0,000		0,33	0,000					
ISCO 22 blocs n°7	01/02/2015 05:10	25,2	0,000		0,29	0,000					
ISCO 22 blocs n°8	01/02/2015 11:10	24,8	0,000		0,32	0,000					
ISCO 22 blocs n°9	01/02/2015 17:10	25,5	0,000		0,29	0,000					
ISCO 22 blocs n°5	06/02/2015 20:00	30,1	3,918		0,29	0,000					
ISCO 22 blocs n°9	07/02/2015 20:00	29,9	3,708		0,33	0,000					
ISCO 22 blocs n°13	08/02/2015 20:00	30,5	4,340		0,38	0,000					
					Bruit de fond moyen				bruit de fond moyen		
Source supérieure des Encanaux	30/01/2015 12:45	22,8	0,000		26,638	0,25		0,000	0,471		
Source supérieure des Encanaux	31/01/2015 13:15	25,2	0,000			0,276		0,000			
Source supérieure des Encanaux	02/02/2015 09:35	29,2	2,665	0,6		0,157					
Source supérieure des Encanaux	03/02/2015 17:05	26,3	0,000	0,29		0,000					
Source supérieure des Encanaux	05/02/2015 20:10	30,9	4,452	0,62		0,182					
Source supérieure des Encanaux	08/02/2015 16:05	25	0,000	0,5		0,025					
Source haute des Encanaux	30/01/2015 12:00	21,7	0,000	0,27		0,000					
Source haute des Encanaux	31/01/2015 13:05	25,5	0,000	1,39		1,124					
Source haute des Encanaux	02/02/2015 09:30	27,8	1,204	0,31		0,000					
Source haute des Encanaux	03/02/2015 17:14	26,3	0,000	0,3		0,000					
Source haute des Encanaux	08/02/2015 16:00	24,1	0,000	0,77		0,365					
Source des trous des Encanaux	02/02/2015 09:15	27,7	1,100	0,28		0,000					
Source des trous des Encanaux	08/02/2015 15:46	33,7	7,428	0,27		0,000					
				Bruit de fond moyen			Bruit de fond moyen				
Source des blocs inférieurs des Encanaux	31/01/2015 13:30	25,7	0,000	32,050	0,27	0,000	0,780				
Source des blocs inférieurs des Encanaux	05/02/2015 19:55	38,4	7,899		1,29	0,623					
				Bruit de fond moyen			Bruit de fond moyen				
Source inférieure des Encanaux	31/01/2015 14:10	27,1	0,000	29,200	0,74	0,248	0,537				
Source inférieure des Encanaux	02/02/2015 10:20	25,6	0,000		0,5	0,000					
Source inférieures des Encanaux	03/02/2015 17:44	24,1	0,000		0,31	0,000					
Source inférieure des Encanaux	05/02/2015 19:40	35,5	7,836		0,81	0,334					
Source inférieure des Encanaux	06/02/2015 18:00	33,7	5,567		0,324	0,000					
				Bruit de fond moyen			Bruit de fond moyen				
Ruisseau Daurengue avant confluence encanaux	30/01/2015 17:45	20,5	0,854	19,675	0,25	0,000	0,385				
Ruisseau Daurengue avant confluence encanaux	31/01/2015 14:25	19,7	0,026		0,74	0,367					
Ruisseau Daurengue avant confluence encanaux	02/02/2015 10:30	19,4	0,000		0,26	0,000					
Ruisseau Daurengue avant confluence encanaux	03/02/2015 18:01	19,1	0,000		0,29	0,000					

Annexe 6: Analyse des échantillons par spectrofluorimétrie

Source des Blocs inférieure des Encanaux



Figure 1: Source des Blocs lors de la crue du 30/01/2015.(11h15)



Localisation de la source des Blocs inférieure des Encanaux sur la carte IGN
(Carte issue du visualisateur InfoTerre le (21/03/2015))

Situation géographique



Figure 2: Source des Blocs le lendemain de la crue du 30/01/2015.

- Altitude: 280 m
- Coordonnées: 43°20'43.44"N X: 625326.51
5°40'0.33"E Y: 916311.05

- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 1190 m



Figure 3: Source des Blocs, à sec, le 02/01/2015. (9h30)

Observations:

- Source temporaire du ravin des Encanaux.
- Source située en amont de la source inférieure des Encanaux et en aval de la source supérieure des Encanaux.
- Cette résurgence possède une source supérieure, observable en amont.

Source des Brailles



Figure 1: écoulement des Brailles
(prise le 20/03/2015 à 12h)



Figure 2: La source des Brailles
(prise le 20/03/2015 à 12h02)



Localisation de la source inférieure des Encanaux sur la carte IGN
(Carte issue du visualisateur InfoTerre le (21/03/2015))

Situation géographique:

- Altitude: 300 m
- Coordonnées: 43°20'35.49"N X: 6252971.93
5°39'26.16"E Y: 915551.69
- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 1600 m

Observations:

- Source temporaire, quand la résurgence ne se fait pas, il est possible de descendre dans la cavité.
- En période de crue cette source apporte une quantité d'eau importante qui va alimenter la Daurengue.



Figure 3: Cavité de la source des Brailles, pouvant être à sec
(Prise le 20/03/2015 à 12h04)

Source Haute des Encanaux



Situation géographique:

- Altitude: 285 m
- Coordonnées: 43°20'36.99"N
5°40'7.69"E
X: 6253032.73
Y: 916493.61
- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 920m

Localisation de la source Haute des Encanaux sur la carte IGN
(Carte tirée du visualisateur Infoterre (consulté le 21/03/2015)



Figure 1: La source haute des Encanaux après la crue du 30/01/2015.
(Prise le 30/01/2015 à 13h09)

Observations:

- Source temporaire du ravin des Encanaux, ce situant en aval du Trou des Encanaux et en amont de la source supérieure des Encanaux.
- Lors des crues, la source Haute va venir alimenter la rivière, arrivant de l'amont, formée par les eaux de ruisselements canalisés dans le vallon des Encanaux.

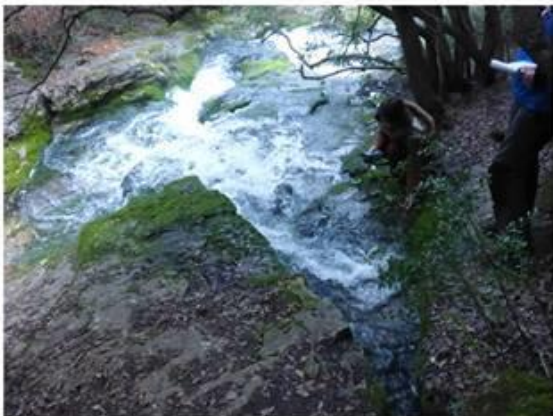


Figure 2: La source haute des Encanaux après la crue du 30/01/2015.
Vue de dessus. (Prise le 02/02/2015 à 10h30)



Figure 3: On remarquera ici la différence de débit entre la source et la rivière en amont. (Prise le 02/02/2015 à 10h01)

Annexe 10: Source haute des Encanaux

Source inférieure des Encanaux



Figure 1: Vue générale de la source inférieure des Encanaux.
(Prise le 20/02/2015 à 12h43)



Figure 2: Source inférieure des Encanaux. (Prise le 20/02/2015 à 12h42)

Figure 3:

Cascade travertineuse à sortie de la source.
(Prise le 20/02/2015 à 15h14)



Localisation de la source inférieure des Encanaux sur la carte IGN
(Carte issue du visualisateur infoTerre le (21/03/2015))

Situation géographique :

- Altitude: 260 m
- Coordonnées: 43°20'50.26"N
5°39'56.38"E
X: 6253453.76
Y: 916210.51
- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 1400m

Observations:

- Source permanente du ravin des Encanaux.
- Elle présente des caractéristiques physico-chimiques particulières par rapport aux autres sources du ravin des Encanaux.
- Des travertins se sont formés en aval de cette source
- Source la plus basse des Encanaux en terme d'altitude. Dernière source avant la confluence avec le vallon de Daurengue.

Source supérieure des Encanaux



Figure 1: Zone de résurgence vers la rivière.
(Prise 20/02/2015 à 10h35)



Localisation de la source supérieure des Encanaux sur la carte IGN
(Carte issue du visualisateur InfoTerre le (21/03/2015))

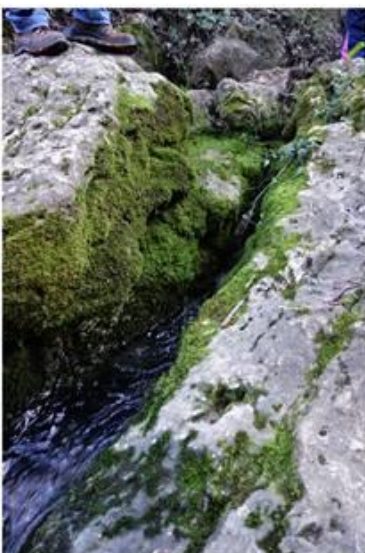


Figure 2: Source des Encanaux (Prise 20/02/2015 à 10h34)

Situation géographique

- Altitude: 275 m
- Coordonnées: 43°20'38.64"N X: 6253032.73
5°40'5.83"E Y: 916493.61
- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 990m

Observations:

- Source permanente du ravin des Encanaux.
- Se situe en aval de la source haute des Encanaux et en amont de la source inférieure des Blocs.
- Les valeurs de conductivité électrique et de température mesurées sont les mêmes que celles du Trou des Encanaux et de la source haute des Encanaux. C'est l'exutoire le plus en aval du système trou des Encanaux - source haute - source supérieure des Encanaux.

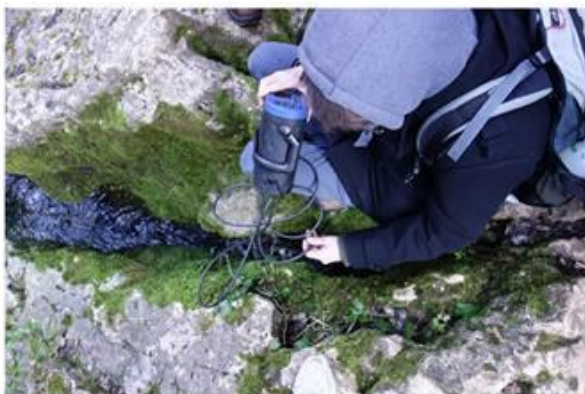


Figure 3: Mesure de la conductivité électrique (Prise 20/02/2015 à 10h34)

Annexe 12: Source supérieure des Encanaux

Le Trou des Encanaux



Figure 1 : En période de crue, le trou des Encanaux fait office de source temporaire qui alimente la rivière en contrebas. (Prise le 30/01/2015 à 13h23)



Localisation du Trou des Encanaux sur la carte IGN
(Carte issue du visualisateur InfoTerre le (21/03/2015))

Situation géographique:

- Altitude: 305 m
- Coordonnées: 43°20'32.90"N X: 625387.32
5°40'12.25"E Y: 916596.85
- Distance à l'entrée du Gouffre des Encanaux : 760 m

Observations:

- "Source" temporaire du ravin des Encanaux.
- Résurgence permettant à l'eau de « déborder » vers la rivière en période de crue.
- Offre un regard sur le karst adjacent à la rivière, ce qui permet d'appréhender la circulation de l'eau souterraine en fonction du régime hydraulique du moment.
- Source temporaire la plus en amont, dans la succession des sources du vallon des Encanaux. On retrouve la source Haute des Encanaux en aval.
- Lorsque l'eau souterraine ne déborde pas à la surface, l'eau s'écoule en direction de la source Haute et de la source Supérieure des Encanaux.



Figure 2: Le trou des Encanaux, le lendemain de la crue. On peut remarquer que l'eau ne déborde plus vers la rivière. Cependant on peut toujours voir et entendre un écoulement en profondeur dans le "regard" (Prise le 31/01/2015 à 13h13)



Point de mesure: Encanaux avant confluence

- Mesure en aval de l'ensemble des sources et apport de ruissellement du vallon des Encanaux.
- La confluence entre les Encanaux et la Daurengue forme la Vède en contrebas.
- Présence de nombreuses formations travertineuses

Figure 1: Localisation du point de mesure sur la carte IGN (Carte issue d'infoterre, consulté le 21/02/2015)



Figure 2: Photographie de la zone de mesure (prise le 20/03/2015 à 12h00)

Point de mesure: Daurengue avant la confluence

- Mesure en aval de l'ensemble des sources et apport de ruissellement du vallon de Daurengue.
- La confluence entre les Encanaux et la Daurengue forme la Vède en contrebas.
- Présence de nombreuses formations travertineuses



Figure 3: Localisation du point de mesure "Daurengue avant confluence" sur la carte IGN (Carte issue d'infoterre, consulté le 21/02/2015)



Figure 4: Photographie de la zone de mesure (prise le 20/03/2015 à 12h05)

Annexe 14: Deux points de mesures remarquables

Annexe 15 : Calcul hydraulique

Dimensionnement du conduit karstique entre la source des trous et la source haute des Encanaux :

Pour calculer les diamètres des conduits karstiques entre les sources on utilise les lois de pertes de charges, qui dépendent du débit véhiculé et de la rugosité des parois dans ces conduits karstiques. On suppose que l'écoulement est libre entre les sources et les conduits karstiques sont de forme circulaire avec un diamètre hydraulique équivalent D_h .

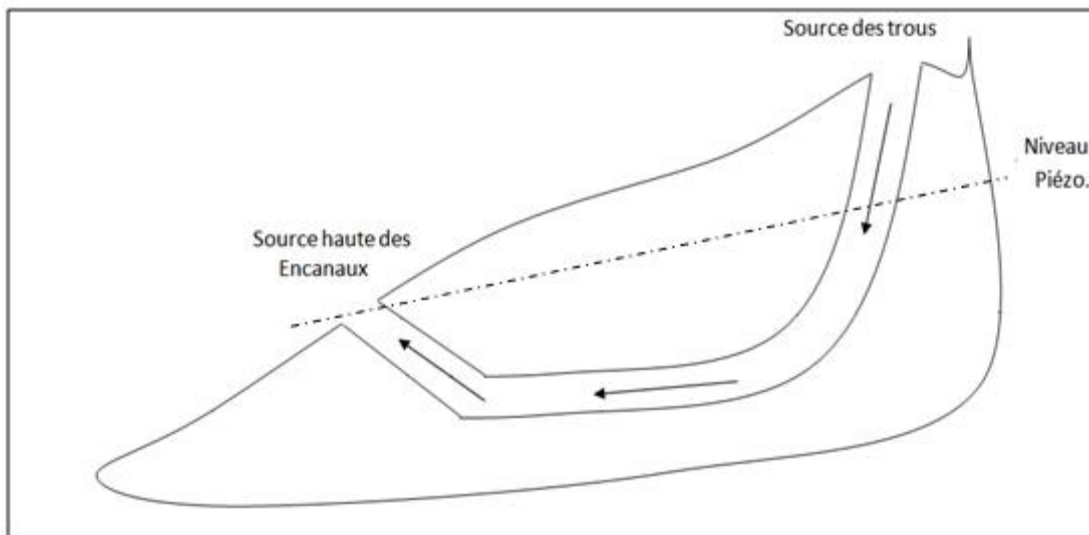


Schéma représentatif de l'écoulement souterrain entre la source des trous et la source haute des Encanaux

La Formule de *Darcy-Weisbach* ou *Nikuradzé* est la plus utilisée pour le calcul des pertes de charges dans conduits karstiques :

$$\Delta H = 0,0827 \lambda L (Q^2/D^5)$$

Avec :

- ✓ ΔH : Différence de charges (altitudes) entre les deux sources (m).
- ✓ Q : Débit estimé au niveau de la source en aval (m^3/s).
- ✓ D : Diamètre du conduit karstique (m).
- ✓ L : La distance entre les deux sources (m).

- ✓ λ : Coefficient de frottement linéaire, dépend de la rugosité relative ϵ/D et du nombre de Reynolds Re .

Pour une rugosité relative ϵ/D très élevée et un nombre de Reynolds Re faible car on est dans le cas d'un conduit karstique avec des diamètres petits, en utilisant le diagramme de Moody on prend $\lambda = 0,08$.

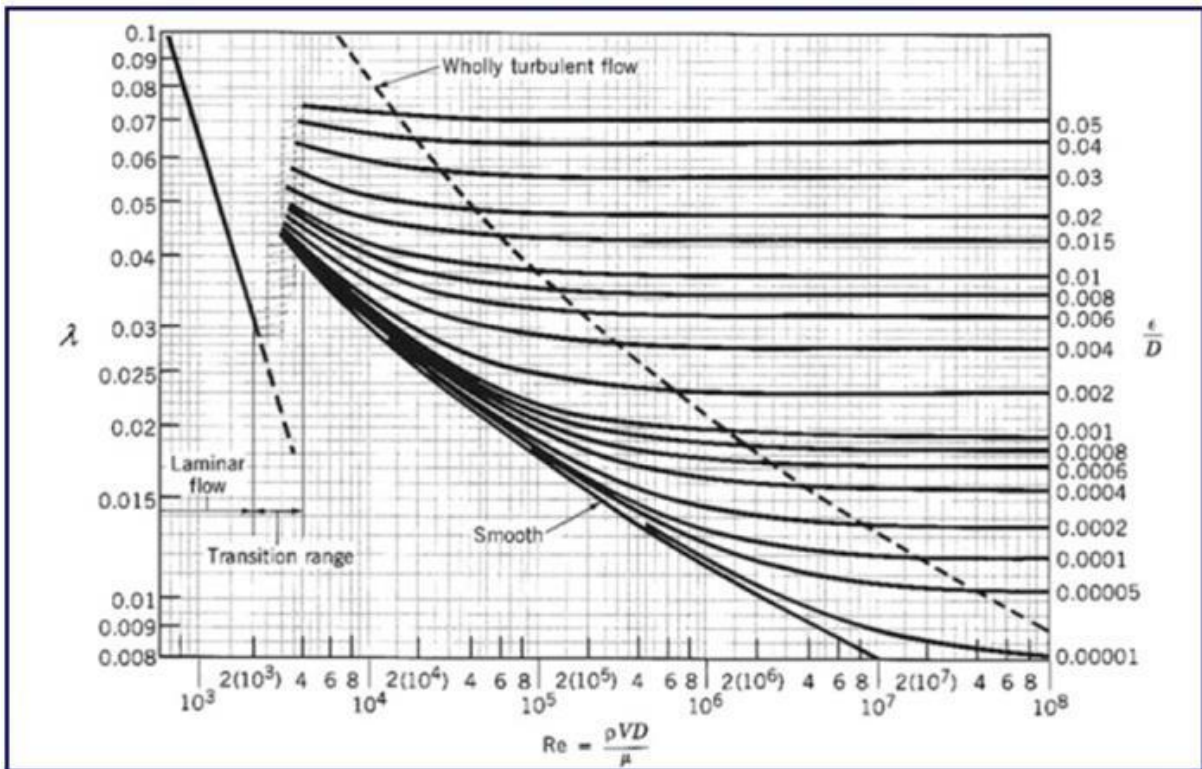


Diagramme de Moody

La *Formule de Darcy-Weisbach ou Nikuradzé* pour le calcul des pertes de charges dans conduits karstiques est :

$$\Delta H = 0,0827 \lambda L (Q^2/D^5)$$

On en déduit la relation du diamètre :

$$D^5 = 0,0827 \lambda L (Q^2/ \Delta H)$$

$$D = \sqrt[5]{0,0827 \lambda L (Q^2/ \Delta H)}$$

Pour une distance en vol d'oiseaux entre les deux sources de $l = 160\text{m}$, on peut estimer la longueur du conduit karstique entre ces dernières en multipliant la distance à un coefficient $\alpha = 1,3$ et on aura : $L = \alpha * l = 1,3 * 160\text{m} = 208\text{m}$.

Avec un débit de 125 l/s et une différence de charges entre les deux sources

$$\Delta H = 305 - 285 = 20\text{m}$$

Q (m ³ /s)	Q ²	L(m)	ΔH (m)	λ	D ⁵	D (m)	V (m/s)
0,125	0,015625	208	20	0,08	0,0010751	0,25	2,55

On utilisant les données mentionnées au tableau à la formule (2), on aura un diamètre du conduit karstique entre la source des trous et la source haute des Encanaux égal à : $D = 250\text{ mm}$.

Dimensionnement des conduits karstiques entre le gouffre des Encanaux et la source haute des Encanaux et la source inférieure des Encanaux :

Pour calculer le diamètre des conduits karstiques entre le gouffre des Encanaux et la source haute des Encanaux et/ou la source inférieure des Encanaux, on peut utiliser la même méthode utilisée pour le dimensionnement du conduit entre la source des trous et la source haute des Encanaux. En supposant que l'écoulement est libre entre le gouffre et chaque source et avec l'application de la loi de perte de charge de *Darcy-Weisbach*. On déduit la relation du diamètre du conduit supposé de forme circulaire :

$$D = \sqrt[5]{0,0827 \lambda L (Q^2 / \Delta H)}$$

Avec :

- ✓ $\lambda = 0,08$: en utilisant le Diagramme de Moody
- ✓ L : La distance entre les deux sources(m)

Pour une distance en vol d'oiseaux entre les deux sources de I, on peut estimer la longueur du conduit karstique entre ces dernières en multipliant la distance à un coefficient $\alpha = 1,3$ et on aura : $L = \alpha * I$

Gouffre des Encanaux – source haute des Encanaux							
Q (m ³ /s)	Q ²	L(m)	ΔH (m)	λ	D ⁵	D (m)	V (m/s)
0,125	0,015625	1196	135	0,08	0,0009158	0,25	2,55
Gouffre des Encanaux – source inférieure des Encanaux							
Q (m ³ /s)	Q ²	L(m)	ΔH (m)	λ	D ⁵	D (m)	V (m/s)
0,125	0,015625	1820	160	0,08	0,0011759	0,26	2,37