

## APPRENTISSAGE DU METIER D'INGENIEUR RISQUES NATURELS ET HYDROGEOLOGUE

Etude de cas : Projet MIROIR, étude de grandes instabilités de versant à activités récurrentes au niveau des Gorges de l'Arly (Savoie) et de la vallée du haut Guil (Hautes-Alpes)

Rapport de projet de fin d'études effectué du 15 Juillet 2021 au 3 décembre 2021

Rose-Adeline FAKOURY

Elève-Ingénieur à l'E.N.S.G.

Stage effectué du 15 Juillet au 3 décembre 2021

### Encadré par

Edouard EQUILBEY, Ingénieur risques naturels

### Tutoré par

Danièle GROSHENY, Enseignante à l'ENSG Nancy



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Bureau de Recherche Géologiques et Minières  
Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes  
15 Boulevard de Stalingrad, 69626 Villeurbanne



UNION EUROPÉENNE  
Fonds Européen de  
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

FONDS NATIONAL  
D'AMENAGEMENT  
ET DE DEVELOPPEMENT  
DU TERRITOIRE  
Massif des Alpes



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

LORRAINE INP

IMT  
Grand  
Est

## Notice analytique

<b>Titre du document</b>	Apprentissage du métier d'ingénieur risques naturels et hydrogéologue Etude de cas : Projet MIROIR, étude de grandes instabilités de versant à activités récurrentes au niveau des Gorges de l'Arly 73 et de la vallée du haut Guil 05
<b>Nature et cadre du travail</b>	Rapport de stage Projet de fin d'études du cycle d'ingénieur à l'ENSG
<b>Dates du travail</b>	Du 15 juillet 2021 au 3 décembre 2021
<b>Date de publication</b>	Le 22 Novembre 2021
<b>Auteur</b>	Rose-Adeline FAKOURY <a href="mailto:rose-adeline.fakoury7@etu.univ-lorraine.fr">rose-adeline.fakoury7@etu.univ-lorraine.fr</a>
<b>Tuteur de stage</b>	Edouard EQUILBEY (Ingénieur Géotechnicien, ENSG) <a href="mailto:e.equilbey@brgm.fr">e.equilbey@brgm.fr</a>
<b>Tuteur académique</b>	Danièle GROSHENY <a href="mailto:daniele.grosheny@univ-lorraine.fr">daniele.grosheny@univ-lorraine.fr</a>
<b>Organisme d'accueil</b>	B.R.G.M Direction régionale Auvergne-Rhône Alpes, 151 BD de Stalingrad, Villeurbanne
<b>Résumé</b>	<p>Au cours de ce stage j'ai travaillé avec un ingénieur géotechnicien spécialisé dans les risques naturels et des ingénieurs hydrogéologues. J'ai participé à différentes missions, par exemple, j'ai fait des expertises de mouvements de terrain, des visites de terrain pour réaliser des relevés géologiques de stratigraphie, de fractures et de volumes, des prélèvements d'eau, des suivis de traçage, des jaugeages – suivis de niveau d'eau – et de piézomètre dans le cadre d'une étude pour apprécier les possibilités de maintien de débit d'étiage dans les cours d'eau d'une commune, de la rédaction de rapport et des simulations pour déterminer un lien entre les données climatiques pluviométriques et le déclenchement de glissement de terrain. J'ai également appris à utiliser différents logiciels : FLUO, FLUNIT, TRAC, XLSTAT, LIBSVM sur MATLAB, HYDROgéo chimie...</p> <p>J'ai exclusivement travaillé sur le projet MIROIR qui étudie les glissements de terrain dans deux vallées situées en Savoie et dans le Queyras, pour lequel j'ai mené différents types de missions sur le terrain et au bureau. Ce rapport détaillera principalement ce projet. Ce stage a été formateur sur le point développement de l'autonomie et l'acquisition de compétences dans le domaine de l'hydrogéologie et de la géotechnique en risques naturels.</p>
<b>Mots clés</b>	Risques naturels, mouvements de terrain, hydrogéologie, données climatiques, prélèvements eaux, jaugeage, étude piézométrique, forages, modélisation, SIG, expertises, études et diagnostics

<b>Nombres de pages et d'annexes</b>	
--------------------------------------	--

## Abstract

<b>Title</b>	Learning about natural hazards and hydrogeological engineering Case study : MIROIR project, study of large slope instabilities with recurrent activities in the canyon of Arly (Savoie) and the Haut Guil Valley (Hautes Alpes)
<b>Framework and nature of work</b>	Internship report Final project of the engineering cycle at ENSG
<b>Date of start and end</b>	From 15 July 2021 to 3 December 2021
<b>Publication Date</b>	22 November 2021
<b>Author</b>	Rose-Adeline FAKOURY <a href="mailto:rose-adeline.fakoury7@etu.univ-lorraine.fr">rose-adeline.fakoury7@etu.univ-lorraine.fr</a>
<b>Supervisor</b>	Edouard EQUILBEY <a href="mailto:e.equilbey@brgm.fr">e.equilbey@brgm.fr</a>
<b>Academic Tutor</b>	Danièle GROSHENY <a href="mailto:daniele.grosheny@univ-lorraine.fr">daniele.grosheny@univ-lorraine.fr</a>
<b>Host organisation</b>	B.R.G.M Direction régionale de Auvergnés Rhône Alpes, 151 BD de Stalingrad, Villeurbanne
<b>Summary</b>	<p>During this internship I worked with a geotechnical engineer specialised in natural risks and hydrogeological engineers. I took part in various missions, for example, I carried out ground movement surveys, site visits to carry out geological surveys of stratigraphy, fractures and volumes, water sampling, tracing monitoring, water level gauging and piezometer monitoring as part of a study to assess the possibilities of maintaining low water flow in the watercourses of a municipality, report writing and simulations/modelling to determine a link between rainfall climate data and landslide triggering. I also learned to use different software: FLUO, FLUINIT, TRAC, XLSTAT, LIBSVM on MATLAB, HYDROgeochemistry... I strictly worked on the MIROIR project which studies landslides in two valleys located in Savoie and Queyras, for which I carried out different types of missions in the field and in the office. This report will mainly detail this project.</p> <p>This internship was formative in terms of developing autonomy and acquiring skills in the field of hydrogeology and geotechnics in natural hazards.</p>

<b>Key words</b>	Natural hazards, ground movements, hydrogeology, climatic data, water sampling, gauging, piezo studies, drilling, modelling, GIS, surveys, studies and diagnoses
<b>Number of pages and appendix</b>	

**Table des matières**

Notice analytique ..... 2

Abstract ..... 3

Remerciements ..... 7

I. Présentation du BRGM et des missions menées au cours de cette apprentissage ..... 7

1.1 Présentation générale du BRGM et de l'unité Auvergne Rhône Alpes ..... 7

1.2 Les missions de l'Ingénieur Risques naturels et l'aménagement du territoire et les missions de l'Ingénieur Hydrogéologue au BRGM ..... 9

1.2.1 Les missions de l'Ingénieur Risques naturels et l'aménagement du territoire au BRGM ..... 9

1.2.2 Les missions de l'Ingénieur Risques naturels et l'aménagement du territoire au BRGM ..... 9

II. Introduction ..... 10

III. III. Les problématiques rencontrées et la méthodologie appliquée ..... 11

2.1 La gestion des risques naturels ..... 11

2.2 Réponses à des appels d'offres de projet et réalisation des expertises au BRGM Auvergne Rhône-Alpes pour l'ingénieur risques naturels ..... 12

2.3 Cartographies d'aléas (cartes de susceptibilité)..... 13

IV. Missions réalisées lors du stage et compétences acquises ..... 14

4.1 Synthèse des missions réalisées dans le cadre du stage ..... 14

4.2 Travail et outils utilisés sur le terrain ..... 19

4.3 Travail et outils utilisés au bureau ..... 19

V. Etude de cas : projet MIROIR ..... 20

5.1 Les objets d'études du projet MIROIR ..... 20

5.2 Caractérisation des zones d'études ..... 20

5.3.1 Les Gorges de l'Arly, Savoie (Projet Miroir) ..... 20

a. Situation Géographique ..... 20

b. Contexte géologique et morphologique ..... 21

c. Contexte historique ..... 25

5.3.2 Le Pas de L'Ours, Queyras (Projet Miroir) ..... 25

a. Contexte géographique et morphologique ..... 25

b. Contexte géologique .....	25
c. Contexte historique .....	26
5.3 Méthodologies employées .....	27
5.3.1 Mission terrain (cartographie géologique de la zone et cartographie morphodynamique, collecte et structuration des données) .....	27
5.3.2 Rencontre avec les différents acteurs .....	28
5.3.3 Études hydrogéologiques .....	30
a. Prélèvements d'eau .....	30
b. Traçage .....	32
5.3.4 Construction d'une base de données pluviométriques et évènementielles pour la partie modélisation .....	41
a. Pluviométries .....	44
b. Évènementielles .....	47
6. Conclusion de l'étude de cas .....	52
Conclusion .....	55
Références .....	56
Annexes .....	57
Figure 1 : Organigramme Général du BRGM (source : intranet BRGM). .....	8
Figure 2 : Répartition du temps de travail pendant le stage. ....	14
Figure 3 : A droite, localisation de la zone d'étude sur la carte de France (Source Open Streetmap) et à gauche image satellite de la zone d'étude. (Source : Google Earth).....	21
Figure 4 : Géomorphologie de la vallée de l'Arly à hauteur des Gorges avec délimitation en rouge de deux principales zones d'instabilité sur la Rive Gauche de l'Arly sur la commune de Cohennoz .....	22
Figure 5 : Carte géologique des Gorges de l'Arly au 1/50 000 <sup>ème</sup> . Vue générale des principales formations présentes dans la zone d'étude. ....	23
Figure 6 : Mise en évidence des zones de glissements et des zones déstructurées sur la carte au 1/50 000 <sup>ème</sup> de la zone d'étude. ....	23
Figure 7 : mise en évidence des différents ouvrages présents dans la zone d'étude. ....	24
Figure 8 : ) mise en évidence des différents ouvrages présents dans la zone d'étude. ....	24
Figure 9 : A droite, localisation de la zone d'étude sur la carte de France (Source Open Streetmap) et à gauche image satellite de la zone d'étude. (Source : Google Earth). ....	25
Figure 10 : Géomorphologie et données de terrain mesurés au Pas de l'Ours. ....	26
Figure 11 : Détermination statistique. Le cercle rouge correspond au pôle moyen des S1. ....	27
Figure 12 : Stéréo avec les données synthétisées. ....	28
Figure 13 : Différentes interprétations des MNT pentes à l'aide du logiciel QGIS.....	29
Figure 14 : Localisation des points des prélèvements d'eau dans l'Arly au niveau des différentes zones de glissement. ....	32

Figure 15 : Localisation des points de prélèvements d'eau dans la vallée du Guil. ....	32
Figure 16 : Eh vs conductivité. En jaune les prélèvements réalisés dans des eaux superficielles souterraines et en rouge dans des eaux superficielles souterraines. ....	33
Figure 17 : Paramètres physico-chimiques mesurés lors de la campagne de terrain de prélèvements d'eau. Ce que l'on pensait être une erreur au début pour la valeur de conductivité de plateau des Saisies est peut-être lié au faible taux de minéralisation présent dans la zone humide. ....	34
Figure 18 : Diagramme de Piper réalisé pour les prélèvements d'eau dans l'Arly. ....	35
Figure 19 : Données utilisées pour réaliser le diagramme de PIPER. ....	36
Figure 20 : ACP des données chimiques et isotopiques pour les Gorges de l'Arly. ....	36
Figure 21 : Localisation des différents points de suivis, d'injection et de dispositifs de surveillance... ..	38
Figure 22 : Fluocapteurs, aux charbons actifs, apte à fixer les colorants.....	40
Figure 23 : GGUN, à droite la notice d'utilisation GGUN et à gauche le GGUN avec la batterie. ....	41
Figure 24 : Les différents matériels nécessaires pour faire le traçage. ....	41
Figure 25 : Morphologie générale d'un mouvement de terrain (USGS, 2004). ....	43
Figure 26 : Nouvelle version de la classification des mouvements de terrain de Varnes (2014). ....	44
Figure 27 : Principe de calcul de l'ETR et de la Pluie efficace (D.Thierry, 1997).....	46
Figure 28 : Méthode de calcul de Thornthwaite, d'après la feuille calcul automatisé ESPER. ....	47
Figure 29 : Synthèse des calculs statistiques sur les sommes cumulées. ....	49
Figure 30 : Explications des étapes de calculs réalisés dans le solveur pour déterminer le calcul des seuils en fonction des différents types de scénarios. ....	51
Figure 31 : Illustrations de quelques photos sur le terrain de l'Arly.....	58
Figure 32 : vue globale de la zone de glissements du Pas de l'Ours; Conséquence du glissement de terrain sur la route ; autre vue des conséquences du glissement de terrain; Fissure sur la route. ....	59
Figure 33 : Stéréo S0 .....	60
Figure 34: Affleurement détaillés, calcul des axes de plis à partir des plans de stratification .....	61
Figure 35 : Axe de plis mesurés ajoutés au stéréo précédent. Axes de plis mesurés avec la croix rouge et lignes pointillées correspondent aux surfaces axiales mesurées. ....	61
Figure 36 : Axe de pli mesuré avec l'ensemble des autres mesures .....	62
Figure 37 : Points de prélèvement dans les Gorges de l'Arly.....	64
Figure 38 : Prélèvement dans un captage particulier ; sonde et appareil de mesure ; mesure du niveau d'eau dans un piézomètre, mesures des paramètres physico-chimiques. ....	66
Figure 39 : A gauche, photo de l'ISCO (préleveur autonome mise en place à la source de la Pause), au centre intérieur de l'ISCO et à droite l'appareil ISCO à mettre en marche pour lancer le prélèvement automatique des échantillons sur le terrain. ....	71
Figure 40 : Interface du logiciel FLUO. ....	75
Figure 41 : Exemples de courbes de restitution du fluorimètre aval. ....	76
Figure 42 : boîtier de protection pour le GGUN relié au fluorimètre positionné dans la rivière; disposition du fluorimètre et du GGUN amont ; fluorimètre Aval; fluorimètre Amont ; Zoom sur un des fluorimètres. ....	77

## Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier vivement Edouard EQUILBEY, mon tuteur de stage, Ingénieur risques naturels au sein de la direction Régionale de Auvergne Rhône Alpes, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'intégrant à l'équipe et plus particulièrement sur son projet MIROIR. Je tiens à le remercier pour le partage de ses connaissances, de son savoir-faire, ses conseils et le temps précieux qu'il m'a consacré.

Je tiens à remercier Stéphane BUSCHAERT, directeur du BRGM Auvergne Rhône Alpes, pour m'avoir pleinement intégrée à son équipe.

Je souhaite également remercier François CRASTES DE PAULET (Ingénieur Hydrogéologue au BRGM Auvergne Rhône Alpes), Stéphane OROFINO (Ingénieur Hydrogéologue au BRGM Auvergne Rhône Alpes) et Aurélien VALLET (Ingénieur Risques naturels et Hydrogéologue au BRGM Bourgogne Franche Comté) avec qui j'ai été amenée à collaborer pour certaines missions. Ils ont été d'un appui précieux, d'une bienveillance et d'entraide remarquable.

Je remercie Frédéric LACQUEMENT (géologue structural au BRGM Orléans) pour m'avoir consacré du temps et partagé ses connaissances sur le terrain.

Je remercie également Zohra Zerzaihi, assistante de direction, pour sa disponibilité et sa sympathie.

Enfin, un grand merci à l'ensemble de l'équipe de m'avoir intégrée, de la bonne ambiance et l'entraide.

## I. Présentation du BRGM et des missions menées au cours de cette apprentissage

### 1.1 Présentation générale du BRGM et de l'unité Auvergne Rhône Alpes

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a été créé en 1959. Il s'agit d'un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) placé sous la tutelle du ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'innovation, du ministre de la Transition écologique, du ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance. Cet établissement public fait référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable. Son action est orientée vers la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques et la coopération internationale en répondant à différents objectifs :

- Comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés ;
- Développer des méthodologies et des techniques nouvelles ;
- Produire et diffuser des données pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources;
- Mettre à disposition les outils nécessaires pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques et des pollutions, aux politiques de réponse au changement climatique.

Ainsi, l'action du BRGM est organisée autour de six enjeux scientifiques et sociétaux :

- Géologie et Connaissance du sous-sol
- Données, services et infrastructures numériques
- Risques et aménagements du territoire
- Gestion des eaux souterraines
- Ressources minérales et économie circulaire
- Transition énergétique et espace souterrain

La présidence du BRGM est assurée par Mme Michèle Rousseau depuis le siège social situé à Orléans (45) qui supervise le pilotage national des différentes missions et objectifs confiés au BRGM. Le BRGM est présent sur tout le territoire national, à travers ses 18 Directions régionales dans chaque région de métropole et d'outre-mer ainsi qu'une antenne en Polynésie française. Ce réseau assure les relations directes avec les services déconcentrés de l'État, les collectivités locales, les agences, les chambres consulaires, les universités et les établissements de recherche, les pôles de compétitivité, les industriels, la société civile. Les implantations dans toutes les régions de France métropolitaine et en Outre-mer permettent de répondre aux attentes de ses partenaires régionaux et de les accompagner face aux enjeux territoriaux. La figure 1 présente l'organigramme général du BRGM.

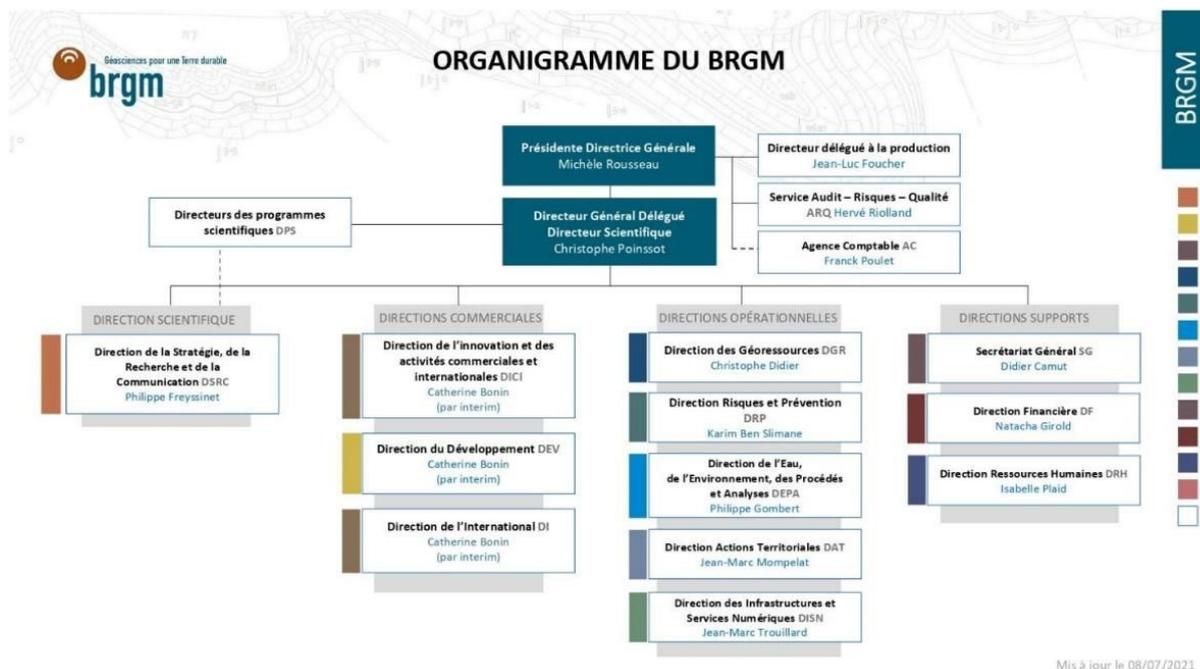


Figure 1 : Organigramme Général du BRGM (source : intranet BRGM).

La direction Régionale d'Auvergne-Rhône Alpes, implantée à Villeurbanne (69), est dirigée par Mr Stéphane Buschaert. L'équipe, à laquelle viennent périodiquement se greffer stagiaires et alternants, est constituée de :

- Monsieur BUSCHAERT Stéphane, directeur régional de l'agence Auvergne-Rhône-Alpes



- Monsieur EQUILBEY Edouard, Ingénieur Risques Naturels et Expertise Après-Mine
- Monsieur CRASTES DE PAULET François, Hydrogéologue
- Monsieur OROFINO Stéphane, Ingénieur Hydrogéologue
- Madame CLOZEL Blandine, Ingénieur Sites et sols pollués
- Madame MERLY Corinne, Ingénieur techniques de l'environnement
- Monsieur CARTANNAZ Charles, géologue/risques naturels
- Madame BUTTARAZZI Ilaria, Technicienne géologue
- Madame ZERZAIHI Zohra, Secrétaire de direction, non cadre

## 1.2 Les missions de l'Ingénieur Risques naturels et l'aménagement du territoire et les missions de l'Ingénieur Hydrogéologue au BRGM

Dans le cadre de ce stage j'ai pu travailler sur des missions de géotechniques en risques naturels mais également avec un volet hydrogéologie. Ainsi, dans un premier temps je vais rappeler les missions de l'Ingénieur Risques naturels et hydrogéologue.

### 1.2.1 Les missions de l'Ingénieur Risques naturels et l'aménagement du territoire au BRGM

Pour un aménagement plus durable des territoires, le BRGM développe des approches intégrées de gestion des risques naturels impactant le sol, le sous-sol et le littoral, ainsi que les risques résultant de l'activité humaine. En effet, dans un contexte de changement global, la durabilité des territoires et de leur aménagement est directement contrainte par les risques Naturels et anthropiques. De nombreux paramètres, comme les développements technologiques, la multiplicité des réseaux, la croissance de la population et son regroupement dans de grandes conurbations, les forçages climatiques, exposent de plus en plus les sociétés modernes qui apparaissent fragiles et potentiellement de moins en moins résilientes. Ainsi l'identification, l'évaluation et la réduction des risques font partie des attentes de la société et sont intégrées dans les politiques publiques et industrielles.

Ainsi, l'ingénieur gestion des risques naturels identifie l'aléa, l'étudie, l'évalue pour prévoir son impact (risque), met en place des mesures de prévention en cas de risque trop élevé et réfléchit à des solutions techniques pour limiter les dommages humains, matériels et financier.

### 1.2.2 Les missions de l'Hydrogéologue au BRGM

Les eaux souterraines constituent un élément considérable du cycle de l'eau et les aquifères s'avèrent des ressources en eau primordiales. Par nature, les eaux souterraines font intervenir de nombreux processus géologiques et géochimiques et sont associées à divers services et fonctions écologiques. Cette ressource est stockée de manière inégale en termes de qualité, quantité et de disponibilité et sa gestion est différente en fonction des finalités souhaitées. Les eaux étant stockées et circulant dans le sous-sol, leurs comportements ne sont pas observables immédiatement. Ainsi des campagnes d'investigations pour récolter des données qualitatives et quantitatives sont réalisées.

L'Hydrogéologue détermine le plus précisément possible le comportement des eaux dans le sol à partir de données ponctuelles et des connaissances générales en hydrogéologie. Il intervient pour résoudre des problèmes de ressources en eau (qualitatif ou quantitatif), exploiter des nappes aquifères (détection de nappes souterraines destinées à la consommation, à l'irrigation ou à la géothermie) et protéger la qualité des eaux et des sols contre toute pollution.

## II. Introduction

Dans le cadre de ma troisième année à l'école Nationale Supérieure de Géologie, j'ai réalisé un stage d'ingénieur géologue géotechnicien risques naturels et hydrogéologue. Les objectifs étaient d'acquérir les compétences techniques en risques naturels et hydrogéologie.

Au cours de mon stage, j'ai travaillé en accompagnant des ingénieurs responsables de projets sur le terrain pour différents types de missions, j'ai eu plusieurs tâches à réaliser dans différents domaines hydrogéologiques et des risques naturels, allant de l'analyse sur le terrain, de la mise en place des choses à faire sur le terrain, des manipulations directes sur le terrain, de la récupération de données aux traitements et rédaction de rapport. Progressivement, j'ai pris en main plusieurs missions, toujours guidée par un ingénieur.

Ce présent rapport expose le travail effectué pendant le stage. Il présente dans un premier temps les problématiques traitées dans la majorité des études sur lesquelles j'ai travaillé et les méthodologies de travail rencontrées. Par la suite les différentes tâches et missions effectuées sont aussi présentées. Le rapport se termine par la présentation détaillée d'un cas d'étude sur lequel j'ai travaillé. J'ai décidé de présenter en particulier cette étude, le projet MIROIR qui étudie l'instabilité de deux versants sur lesquels on retrouve des glissements de terrain de grande ampleur, car elle répond à plusieurs problématiques géotechniques risques naturels et hydrogéologie.

Le projet MIROIR est un projet Européen (FEDER-POIA) qui a pour but d'amorcer une gestion préventive des risques naturels au niveau des Gorges de l'Arly (Savoie) et du glissement de Pas de l'Ours (Queyras). En effet ce projet étudie deux sites ; un site en Savoie et un en site en PACA (vallée du Guil dans le Queyras, Hautes Alpes et Gorges de l'Arly, en Savoie, sites miroirs avec de fortes similarités en terme de contexte, problématique et enjeux...). Ces deux vallées présentent une activité régulière et significative en termes de phénomènes naturels tels que des chutes rocheuses fréquentes, des épisodes de crues torrentielles, des enjeux exposés (surtout des axes routiers ; nécessité d'entretenir ces routes pour le maintien des dessertes routières, notamment pour les stations de ski, le maintien du tissu économique...) qui pour le rétablissement de la circulation après événements, mobilisent déjà des moyens financiers très conséquents.

Le projet se divise en plusieurs étapes avec des premières expertises et état des lieux des connaissances géologiques pour mieux appréhender les nouveaux événements (glissements, coulées) puis la mise en place d'un suivi opérationnel pour contrôler le déclenchement de nouvelles catastrophes. Le projet fait intervenir plusieurs acteurs qui seront détaillés dans la partie cinq de ce présent rapport et plusieurs techniques d'investigations à la fois hydrogéologique et géotechniques risques naturels qui seront également détaillées en partie cinq. Ce projet offre une approche multiéchelles (spatiales et temporelles) et une approche multidisciplinaire. Enfin, le projet s'articule autour de quatre actions scientifiques déclinées comme suite :

- **Caractérisation des deux sites d'études** (collecte de données historiques, chroniques climatiques et événementielles, acquisition d'imagerie, levés géologiques, analyse des structures, relevé des sources, des indices morphodynamiques, levés hydromorphologiques et réalisation de PPRN)
- **Compréhension des cinématiques en cours** (analyse et interprétation des données collectées ou acquises, connectivité entre la dynamique des versant et la rivière, mise en œuvre de l'instrumentation spécifique, intégration du changement

climatique dans la démarche prospective avec une estimation des effets du dérèglement climatique local via l'utilisation de scénarios GIEC et à l'aide de seuils d'activation climatique, proposition des différents scénarios prospectifs les plus plausibles à craindre et à anticiper)

- **Mise en place des dispositifs de suivi opérationnels** (évaluation des impacts techniques, définition des réseaux de suivi et d'alerte opérationnels en concertation avec les acteurs locaux...)
- **Transposabilité du projet et actions de communications**

### III. Les problématiques rencontrées et la méthodologie appliquée

#### 2.1 La gestion des risques naturels

L'instabilité d'un sol peut survenir à la suite d'évènements naturels tels que des changements météorologiques, des séismes ou encore l'érosion. Elle peut aussi être provoquée indirectement par l'action de l'homme. Ces instabilités sont à l'origine de dommages importants et peuvent parfois causer des victimes. Les risques naturels sont une association entre un aléa d'origine naturelle et un enjeu matériel, environnemental, humain ou économique. Dans le cadre de ce stage, nous travaillons sur les risques naturels de types mouvements de terrain. Les mouvements de terrain sont des phénomènes naturels d'origines très diverses, en effet il en survient chaque année en France, d'importants et de types très divers (glissements de terrain, éboulements, effondrements, coulées de boue...). Les mouvements de terrain présentent des formes très diverses et selon leurs vitesses de déplacements, il est possible de distinguer les mouvements lents qui entraînent une déformation progressive des terrains (affaissements, tassements, glissements et retrait-gonflement) et les mouvements rapides, qui surviennent de manière brutale et soudaine (effondrements, chutes de pierres et de blocs, éboulements et coulées boueuses). Les types de mouvements de terrain en question au cours de ce stage et les inondations traitées sont :

- Les glissements de terrain, qui sont un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) d'une masse de terrain sur une pente (Géorisques). Ces phénomènes sont caractérisés par la création d'une surface de rupture, le long de laquelle une masse, aidée par la gravité va se mettre en mouvement (Durville et al., 1996).
- Les éboulements et chutes de blocs correspondent à des mouvements de terrain rapides résultant de l'action de la pesanteur sur des éléments rocheux (ex : chutes de pierres, de blocs, éboulements, écroulements en masse)
- Les effondrements et affaissements correspondent à des mouvements de terrain se produisant de façon plus ou moins brutale et résultant de la rupture du toit ou des appuis d'une cavité souterraine. Ces phénomènes sont provoqués par l'action du poids des terres ou d'une surcharge (Durville et al., 1996).
- Les crues rapides et torrentielles (à distinguer des crues lentes de plaine, lorsqu'un fleuve ou une rivière sort lentement de son lit mineur et envahit son lit moyen voir lit majeur), se produisent en zone montagneuse ou de relief marqué et surviennent suite à des précipitations intenses ou en période de fonte des neiges. L'eau n'a pas le temps de s'infiltrer dans les sols et ruisselle engendrant des crues rapides et brutales (Durville et al., 1996).

Le principal moteur des mouvements de terrain est la pesanteur mais d'autres processus naturels sont à l'origine des différents phénomènes naturels tels que le retrait des gonflements des argiles et l'érosion des sols. Ces mouvements sont ponctuels mais constituent un risque majeur en raison des conséquences lourdes qu'ils peuvent généralement entraîner. Améliorer les connaissances en matières de risques permet d'optimiser les réponses et solutions apportées. Dès lors qu'un phénomène de type mouvement de terrain est compris, il est possible d'enclencher la chaîne de valeurs des risques à savoir :

- La prévention
- La préparation
- L'alerte
- La gestion de crise
- Le relèvement
- L'adaptation
- La résilience

Le phénomène le plus étudié au cours de ce stage est le glissement de terrain. Ce phénomène appartient à la famille des risques d'origine hydrologique ce qui signifie que le principal déclencheur est la pluie. De plus, avec le dérèglement du climat, les catastrophes naturelles s'intensifient et de plus en plus de régions sont impactées par ces phénomènes. Pour pallier à ces aléas naturels, de nombreuses recherches scientifiques et démarches techniques sont mises en place.

## 2.2 Réponses à des appels d'offres de projet et réalisation des expertises au BRGM Auvergne-Rhône- Alpes pour l'ingénieur risques naturels

Le BRGM Auvergne-Rhône Alpes dispose de deux implantations à proximité immédiate de Lyon (direction régionale, à Villeurbanne) et de Clermont-Ferrand (délégation régionale, à Aubière). Les deux sites fonctionnent en réseau, intervenant de façon mutualisée sur le territoire. Ils totalisent une quinzaine d'agents dont des spécialistes des eaux souterraines et thermales, de la pollution des sols et des nappes, des ressources en matériaux, des risques naturels, des problématiques géothermiques et s'appuient sur les compétences du centre scientifique et technique du BRGM basé à Orléans.

Avec douze départements (Ain, Allier, Ardèche, Cantal, Drôme, Isère, Loire, Haute-Loire, Puy-de-Dôme, Rhône, Savoie, Haute-Savoie), la région Auvergne-Rhône Alpes a une superficie de 70000 km<sup>2</sup> et est la deuxième région française en termes de PIB et de démographie avec près de 8 millions d'habitants.

À cheval sur trois bassins hydrographiques (Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée), elle est traversée par le Rhône, par la Saône et, plus à l'ouest, par la Loire amont et l'Allier.

C'est une région aux facettes multiples, à la fois touristique, fortement aménagée (ouvrages hydrauliques, grandes infrastructures, etc.) et intensément exploitée (par le passé) sur d'importants bassins houillers en Auvergne, Loire et Dauphiné ou actuellement pour les matériaux de construction etc. Elle est la plus industrialisée en France, ce qui se retrouve dans la présence d'une trentaine de pôles de compétitivité et clusters. Mais elle est aussi riche de plusieurs massifs géologiques (Massif

Central, Massif alpin, sud du Massif du Jura, avec 67% de son territoire en zone de montagne) et dotée d'une agriculture très développée. De plus cette région est exposée à de nombreux aléas, particulièrement ceux liés aux mouvements de terrain de type chute de blocs, cavités, glissements de terrain. De ce fait l'ingénieur risques naturels est pluridisciplinaire.

Le travail de gestion de ces aléas par l'ingénieur risque naturels régional du BRGM se divise entre :

- Des projets principaux (pluri)annuels (projets de cartographie d'aléa, d'élaboration de Plans de prévention des Risques Naturels, projet de recherche plus spécifiques tels que le projet MIROIR sur les glissements de terrain.
- Expertises ponctuelles de désordres (mouvements de terrain) sur site afin de donner les recommandations de sécurisation immédiate et la démarche, travaux à prévoir et la stabilisation sur le site concerné.
- Mise à jour des bases de données nationales (BD mouvements de terrain) grâce à des renseignements d'informations ponctuelles.

Pour exemple, une expertise de mouvements de terrains respecte différentes étapes. Les objectifs qui correspondent à l'identification si possible de la cause de l'instabilité constatée, de l'évaluation du niveau de risques résiduels et de l'établissement des recommandations en matière de sécurisation. Sur la base des constats il est possible d'évaluer l'aléa puis aboutir aux risques résiduels encroisant cet aléa avec les enjeux présents sur le site. Face à l'occurrence d'un désordre et en fonction des enjeux, un retour rapide de l'expert est attendu afin d'établir la conduite à adopter sur le court terme puis sur le long terme.

### 2.3 Cartographies d'aléas (cartes de susceptibilité)

Une partie du travail de l'ingénieur risques naturels est de réaliser des cartographies d'aléas. Le but de la cartographie est d'améliorer la connaissance de l'aléa en question et de mieux prévenir les risques associés. Les différents objectifs sont donc de graduer le niveau d'aléa sur le territoire donné, de recommander des dispositions constructives en fonction de l'aléa et de proposer si besoin des investigations complémentaires. La cartographie finale permet l'identification des zones à risque et d'utiliser les données de l'étude pour établir des Plans de prévention des Risques dont l'objectif est de prévenir les conséquences humaines et économiques dès lors qu'une catastrophe naturelle survient. Pour cela une base de donnée doit être réalisée avec le recensement des événements historiques et des données existantes (type, densité, date, intensité).

En fonction de l'aléa étudié, des données, de l'échelle cartographique et de l'objectif visé, une méthodologie est appliquée. Les projets de ce type (exemple cartographie d'aléas de la commune de l'Ain pour lequel j'ai réalisé la base de données) font l'objet d'une réunion de lancement de manière à présenter la méthodologie pour définir l'aléa. La méthodologie est présentée aux différents partenaires. Généralement ces projets se font en parallèle d'autres projets.

## IV. Missions réalisées lors du stage et compétences acquises

### 4.1 Synthèse des missions réalisées dans le cadre du stage

Au cours du stage, le travail s'est réparti en différentes tâches et j'ai eu l'occasion de travailler sur des problèmes variés et spécifiques. Le diagramme présenté figure 2 représente le temps consacré aux différentes tâches.

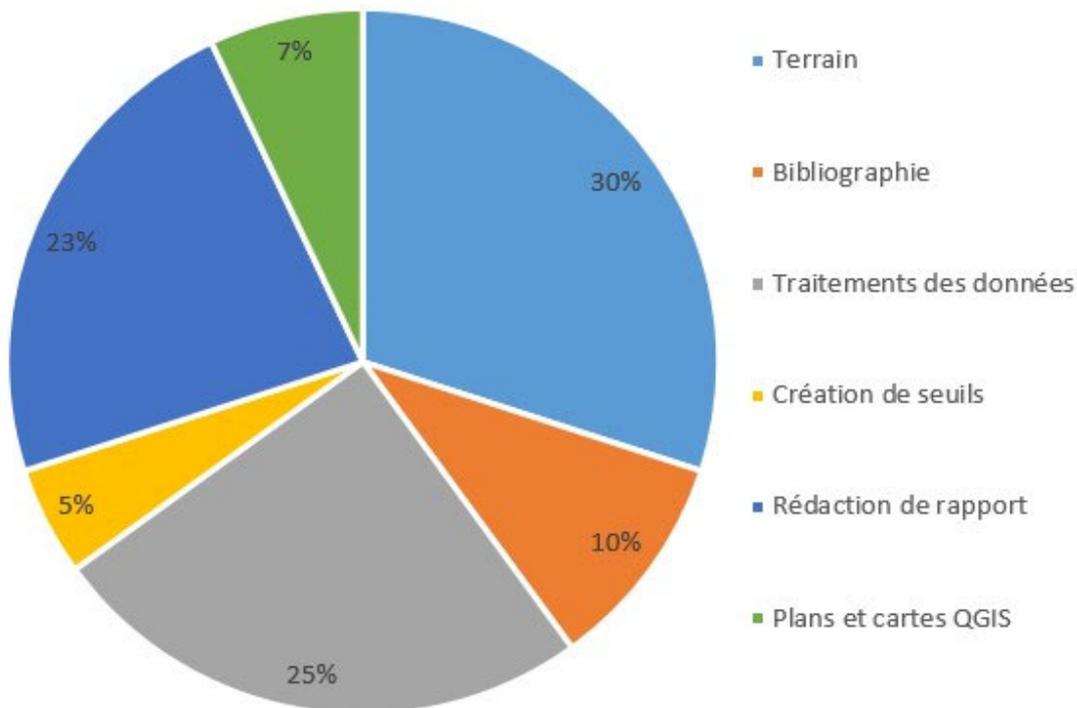


Figure 2 : Répartition du temps de travail pendant le stage.

Le tableau 1, ci-dessous, résume les différentes missions réalisées au cours du stage au BRGM Auvergne-Rhône-Alpes.

Rapport de PFE en risques naturels et hydrogéologie au BRGM

Client	Localisation	Missions et Prestations effectuées	Contexte des missions
Europe	Savoie et Queyras	<p>Projet MIROIR :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Collecte et acquisition de données</li> <li>- Caractérisation des masses instables et des cinématiques en jeu et instrumentation</li> <li>- Simulation de scénarios de risques, en prenant en compte le dérèglement climatique et une première approche économique pour les risques</li> </ul>	<p>Etude de deux zones avec des mouvements de terrains récurrents de type glissements de terrain. Le but de ce projet est d'améliorer l'état de connaissances sur les instabilités de versants présentes dans les Gorges de l'Arly et la Haute vallée du Guil. Tirer les conséquences à titre pour les gestionnaires du risque sur la conduite à tenir, s'adapter à ces masses instables et au gré des événements qui pourraient y survenir. Porte à connaissance les résultats scientifiques obtenus auprès du grand public.</p>
Europe	Savoie, Gorges de l'Arly	<p>Expertise des zones de glissements de terrain dans les Gorges de l'Arly</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Visite du site</li> <li>- Étude historique et documentaire</li> <li>- Étude de vulnérabilité</li> </ul>	<p>Contexte similaire au projet numéro 1</p>
Europe	Queyras, Aiguilles	<p>Expertise du glissement de terrain dans le Queyras (glissement du Pas de l'Ours)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Visite du site</li> <li>- Étude historique et documentaire</li> <li>- Étude de vulnérabilité</li> </ul>	<p>Contexte similaire au projet numéro 1</p>
Europe	Savoie, Albertville, Ugine et Gorges de l'Arly	<p>Cartographie géologique des Gorges de l'Arly</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonages des zones d'études</li> <li>- Mesures sur le terrain</li> <li>- Réalisation de stéréo et interprétations des résultats</li> </ul>	<p>Déterminer le seuil des pentes à l'origine des glissements de terrain, la nature des matériaux à l'origine des glissements et le mécanisme géologique derrière les mouvements de terrain.</p>

Rapport de PFE en risques naturels et hydrogéologie au BRGM

<p><b>Europe</b></p>	<p><b>Gorges de l'Arly</b></p>	<p>Prestation de prélèvements d'eau dans les Gorges de l'Arly (dans le respect de la certification COFRAC)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Visite de site</li> <li>- Étude documentaire et historique</li> <li>- Plan d'échantillonnage</li> <li>- Prélèvements, échantillonnage</li> <li>- Envoie pour analyse au labo</li> <li>- Récupération des données et traitements (diagramme de Piper et ACP)</li> <li>- Analyse et interprétations des résultats</li> </ul>	<p>Douze prélèvements d'eau sont réalisés au niveau des différentes zones de glissement dans les gorges de l'Arly. Un profil hydro chimique est par la suite réalisé de manière à comprendre l'influence et l'origine de l'eau présente sur la zone d'étude des glissements de terrain. Le but est de savoir d'où vient l'eau du glissement de terrain et si l'eau présente en haut de la zone de glissement et la même que celle d'en bas.</p>
<p><b>Europe</b></p>	<p><b>Pas de l'Ours</b></p>	<p>Prestation de prélèvements d'eau sur le Glissement du Pas de l'Ours (dans le respect de la certification COFRAC)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Visite de site</li> <li>- Étude documentaire et historique</li> <li>- Plan d'échantillonnage</li> <li>- Prélèvements, échantillonnage</li> <li>- Envoie pour analyse au labo</li> <li>- Récupération des données et traitements (diagramme de Piper et ACP)</li> </ul>	<p>Huit prélèvements d'eau sont réalisés au niveau des différentes zones de glissement dans les gorges de l'Arly. Un profil hydro chimique est par la suite réalisé de manière à comprendre l'influence et l'origine de l'eau présente sur la zone d'étude des glissements de terrain. Le but est de savoir d'où vient l'eau du glissement de terrain et si l'eau présente en haut de ma zone de glissement et la même que celle d'en bas.</p>

Rapport de PFE en risques naturels et hydrogéologie au BRGM

<p><b>Europe</b></p>	<p><b>Dijon, Montpellier, Aiguilles</b></p>	<p>Réalisation d'un traçage hydrogéologique au niveau du glissement du Pas de l'Ours</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Etablissement du plan de traçage (trois fluorimètres, six fluocapteurs, deux points d'injections)</li> <li>- Calibration du matériel au laboratoire du BRGM de Montpellier</li> <li>- Mise en place du matériel et injection des traceurs</li> <li>- Suivis hebdomadaires</li> <li>- Récolte des données</li> <li>- Traitements et interprétations avec le logiciel FLUO</li> </ul>	
<p><b>Europe</b></p>	<p><b>Aiguilles et Cohennoz</b></p>	<p>Simulation sur Matlab</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Récupération des données climatiques Météo France</li> <li>- Bilan hydrogéologique pour obtenir des données de pluies efficaces et une chronique pluviométrique</li> <li>- Chronique d'évènements</li> <li>- Traitements des données sur Excel et détermination de seuils (Traitement des données sur Matlab)</li> </ul>	<p>A partir de données climatiques (chroniques pluviométriques) et d'une base de données événementielles (crues, chutes de blocs et glissements de terrain), nous déterminons des seuils de déclenchement de ces évènements (sur Excel dans un premier temps puis sur Matlab). Pour chaque évènement un vecteur est créé avec des données de pluies sur N-120 jours.</p>

Tableau 1 : Tableau de synthèse des différentes missions réalisées au cours de mon stage au BRGM Auvergne Rhône Alpes



## 4.2 Travail et outils utilisés sur le terrain

En amont des études, plusieurs visites de terrain ont été réalisées accompagnée d'un ingénieur géotechnicien risques naturels, d'un ingénieur hydrogéologue ou d'une technicienne en fonction du type de la mission. La phase amont du terrain consiste en des études bibliographiques de manière à s'informer et synthétiser les données préexistantes. Des plans sur QGIS sont réalisés pour prévoir les zones d'études et de mesures.

Nous avons réalisé des mesures au niveau des zones de glissements de terrain (mesures de la hauteur, largeur de la zone de glissement, des fissures et des déformations apparentes sur la route ou dans le paysage, mesures de l'ouverture des crevasses, des dolines et autres conséquences d'un mouvement de terrain, d'un affaissement ou de tout autres types de mouvements de terrain).

Nous avons effectué des relevés géologiques tels que des relevés de fracturations, de stratigraphie ou de distances par exemple. Des visites de forages piézométriques, des prélèvements d'eaux superficielles et souterraines, des mesures des paramètres physico chimiques de l'eau, des essais de traçage, des jaugeages et suivis piézométriques ont également été réalisés par exemple.

La méthodologie de certaines de ces tâches sont détaillées dans le rapport, notamment dans la partie 5.

## 4.3 Travail et outils utilisés au bureau

Au bureau, une première partie du travail consiste en la recherche bibliographique des données existantes. En effet, en amont de chaque mission la première tâche à effectuer de chaque étude est la prise de connaissance des données existantes concernant le projet (études géotechniques précédemment réalisées, sondages, forages, études hydrogéologiques, études géologiques, plans fournis). Ces recherches permettent de déterminer le contexte géologique, hydrogéologique du bassin versant et la géomorphologie. Ces données permettent de choisir les zones stratégiques pour faire les mesures, les zones à étudier et à pointer sur le terrain.

En deuxième partie les hypothèses sont établies. Les premières hypothèses se font en amont du terrain (dans la phase préparation du terrain) pour déterminer les plans sur lesquels nous allons baser notre travail sur le terrain. Puis Une deuxième partie des hypothèses arrivent grâce aux observations de terrain, aux dépouillement des données récupérées et à l'expérience de l'ingénieur qui a rencontré des terrains similaires.

Puis une troisième partie consiste lorsque cela est nécessaire aux calculs et à la modélisation à l'aide de différents logiciels. En effet parfois en amont du terrain des calculs doivent être réalisés, par exemple pour l'essai de traçage le logiciel TRAC (outil d'aide à l'interprétation des traçages en milieux poreux, est un logiciel dont l'objectif est l'interprétation et la valorisation des essais de traçage hydrogéologiques, courbes de restitution observées des traçages) peut être utilisé. Le logiciel TRAC vise en premier lieu à aider à la préparation du traçage, en simulant, à partir des données existantes et d'éventuels anciens traçages, la propagation du traceur dans le milieu souterrain. Le logiciel permet surtout d'accompagner les acteurs de la protection des ressources en eau, notamment pour la définition des périmètres de protection des captages destinés à l'eau potable. Il permet également de déterminer la quantité de traceurs à injecter en fonction du contexte hydrogéologique de la zone



d'étude. Ce même logiciel est utilisé lors de la récupération des données acquises sur le terrain pour visualiser les données. D'autres logiciels ont été utilisés tels que ESPER pour réaliser des calculs de bilan hydrologique, XLSTAT pour réaliser des ACP, HYGROCHIMIE pour réaliser des diagrammes de piper, MATLAB avec l'utilisation de la bibliothèque libsvm pour faire des calculs automatiques de seuils de déclenchements de glissements de terrain en fonction de la pluie et enfin QGIS pour réaliser des plans de terrain, des analyses de données et des PPR.

Une quatrième partie consiste en fonction des missions à la réalisation de cartes de risques naturels à l'aide du logiciel QGIS.

Enfin la dernière partie consiste en la rédaction de rapports d'expertises. Les rapports contiennent en générale une description générale du site (géographique, géologique, géomorphologique et hydrogéologique) et une description du projet ainsi que la présentation de l'enjeu (par exemple présentation du risque naturel en cause), un diagnostic et les risques résiduels et les recommandations et déclarations.

## V. Etude de cas : projet MIROIR

Le but du projet MIROIR (Morpho dynamique de deux tronçons de vallées instables dans les Alpes Occidentales : cinématique et suivi opérationnel) est de mieux caractériser les grandes instabilités de versant afin d'appréhender les différents mouvements de terrain, et guider pour anticiper les prochains évènements.

### 5.1 Les objets d'études du projet MIROIR

Le projet MIROIR étudie en parallèle deux sites avec des glissements de terrains qui ont eu des conséquences importantes dans le futur. Le premier site se situe en Savoie au niveau des Gorges de l'Arly, entre la commune de Cohennoz et d'Ugine et on y distingue trois principales zones de glissements de terrain. Le deuxième site se situe dans le Queyras (Hautes Alpes) à côté de la commune d'Aiguilles et concerne un glissement de terrain connu sous le nom du glissement du Pas de l'Ours. Les prochains paragraphes présentes les caractéristiques précises de chacun de ces zones ainsi que le travail effectué au niveau de ces deux sites d'études pendant le stage.

### 5.2 Caractérisation des zones d'études

#### 5.2.1 Les Gorges de l'Arly, Savoie (Projet Miroir)

##### a. Situation Géographique

Les Gorges de l'Arly (73), (cf. figure 3) s'étendent sur les communes d'Ugine et de Cohennoz, dans le département de la Savoie. Sur ce versant de la Rive Gauche de l'Arly, sont situés deux villages : Cohennoz et Les Panissats, accessibles par la RD71. Il présente un dénivelé d'environ 1300 m ; de la cote 550 m NGF en fond de

vallée, drainée par la rivière Arly, jusqu'à une altitude de 1850 m NGF sur le plateau du col des Saisies. Il est drainé par quatre principaux torrents qui sont du Nord au Sud : le Nant des Fattes, le Nant Cortay, le Nant Blanc et en limite sud de d'étude le Nant Boulou.

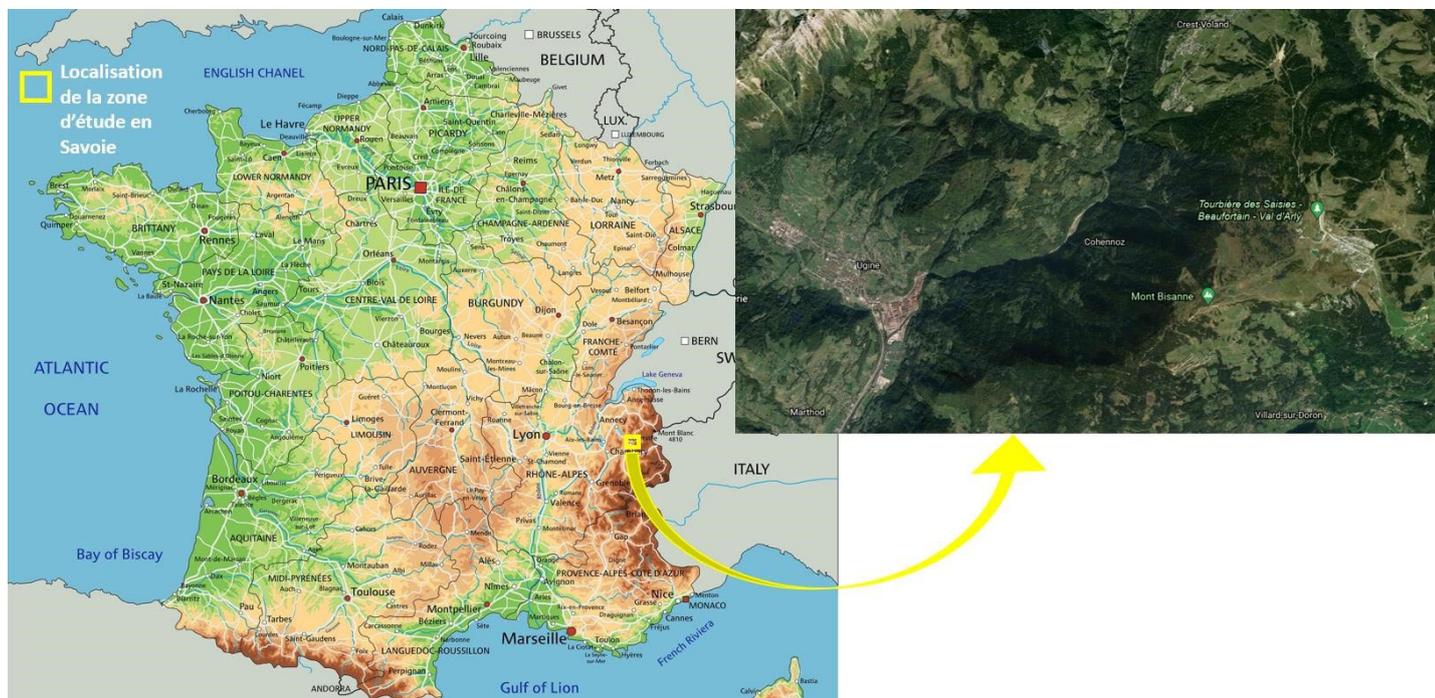


Figure 3 : A droite, localisation de la zone d'étude sur la carte de France (Source Open street map) et à gauche image satellite de la zone d'étude. La zone d'étude s'étend depuis Ugine jusqu'au Crest-Voland passant par la commune de Cohennoz. (Source : Google Earth).

### b. Contexte géologique et morphologique

Une nette dissymétrie d'une rive à l'autre est observée. Les phénomènes de réactivation de glissement en masse sont situés presque tous en rive gauche (forte dissymétrie hydrogéologique de la rive gauche en lien avec des réservoirs aquifères perchés sur le plateau des saisies). Les observations faites sur le terrain montrent aussi au niveau de la rive droite une pente très abrupt, des cicatrices de glissements et de décrochements. Le site le plus actif se trouve au niveau de Moulin Ravier (instabilité de Cohennoz), le site actuellement le plus actif est Montgombert (déjà actif dans les années 70/80) et la troisième zone d'étude se trouve au sud de Panissats (cf figure 4). Ces communes sont soumises à deux aléas majeurs : **les épisodes de crues torrentielles et les mouvements de terrain**, constituant des risques d'intensité relative vis-à-vis des enjeux présents au sein des deux communes. Sur le versant de la Rive Gauche de l'Arly, deux villages sont présents : Cohennoz et les Panissats.



Figure 4 : Géomorphologie de la vallée de l'Arly à hauteur des Gorges (<http://m.geoportail.fr/>) avec délimitation (en rouge) de deux principales zones d'instabilité sur la Rive Gauche de l'Arly sur la commune de Cohennoz, dites de Panissats (au nord), et de Cohennoz-Moulin-Ravier (au sud).

D'après la carte géologique au 1/50 000 ème du BRGM (figure 5), le versant Sud Est des Gorges de l'Arly se situe dans le massif cristallin de Belledonne. Le socle hercynien est recouvert en discordance par la couverture carbonatée mésozoïque qui repose à l'horizontale sur le plateau du col des Saisies et s'incline vers le NW au niveau de Crest-Voland. Sur la carte (figure 5), les parties de versant concernées par les instabilités se situent dans les terrains métamorphiques du socle, « Série satinée » (roches homogènes et constituées par des micaschistes). Ces micaschistes sont constitués de minéraux phylliteux (en paillettes) tel que le mica blanc, de chlorites, de quartz et albite, de graphite, épidote et calcite. Un caractère feuilleté de la roche est notable dû à la forte présence de séricite et chlorite qui confère un caractère feuilleté, friable et altérable avec la présence d'eau. Le plan en débit des micaschistes est lié à la schistosité hercynienne et cette schistosité peut se montrer localement plissée ou cisailée.

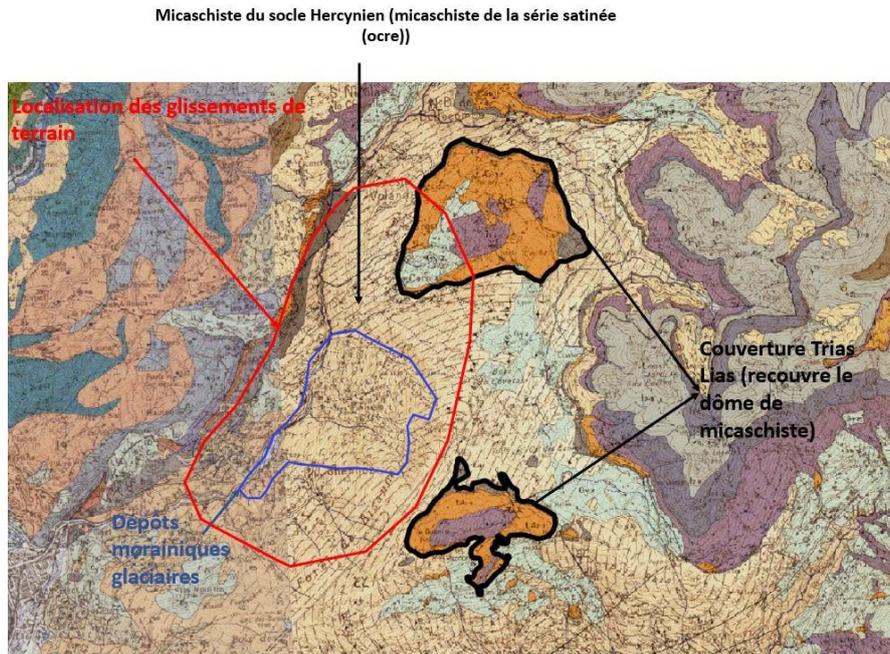
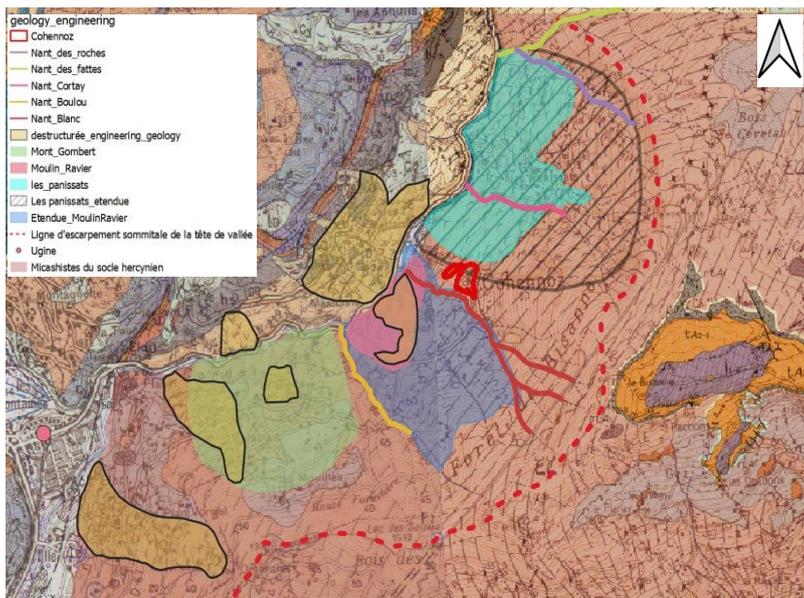


Figure 5 : Carte géologique des Gorges de l'Arly au 1/50 000 ème (<http://infoterre.brgm.fr>). Vue générale des principales formations présentes dans la zone d'étude.

Une cartographie plus précise a permis d'identifier des zones d'instabilités (en jaune)

« destructuré\_engineering\_geology » sur la carte figure 6) sur les flancs de versant de l'Arly (zones de glissements et d'éboulement délimitées par les polygones roses). Grâce aux travaux de différents géologues (Yves Gros (1974) et Yves Simeon (1979)), il est possible de déterminer une nette dissymétrie entre les deux versants de l'Arly. Le versant, siège des glissements identifiés, se compose d'une épaisse formation de micaschistes métamorphiques de la série satinée. Un phénomène de décompression s'est développé depuis le retrait glaciaire du Würmien, celui-ci a provoqué le basculement des micaschistes et entraîné une série d'éboulements dont les éboulis argileux qui ont



glissé en masse jusqu'à l'Arly. C'est tout le versant, délimité en crête par le Saut du Chamois, qui est en mouvement avec des zones plus ou moins actives (le Nant Cortay, talweg de cet ensemble, étant une zone de glissement emblématique du secteur). Le secteur de Moulin Ravier, plus en aval dans la vallée présente un vaste versant en mouvement. Les formations de surface se composent de masses glissées constituées d'éboulis shisto-argileux sous forme de blocs décimétriques et plaquettes centimétriques au sein d'une matrice silto-argileuse.

Figure 6 : Mise en évidence des zones de glissements et des zones déstructurées sur la carte au 1/50 000ème de la zone d'étude.

La notice de la carte géologique de Saint-Gervais-les-Bains, n°703 fournit la description suivante au niveau des Panissats : « Terrains glissés ou éboulés de série satinée : micaschistes ocellaires et gneiss albitiques. »

La notice de la carte géologique de Annecy-Ugine, n°702 fournit la description suivante au niveau de Moulin Ravier et Montgombert: « Loupes de glissement de colluvions, éboulis et moraines remaniées. »

Les sondages voisins extraits de la Banque des Données du Sous-sol (BSS) autour de la zone d'expertise (figures 7 et 8) mettent en évidence la présence de nombreux forages et de sources.

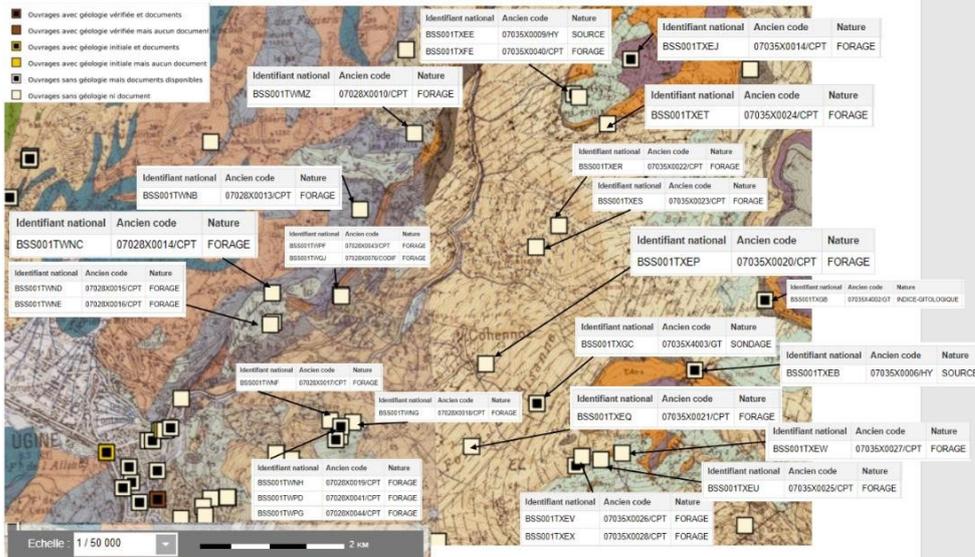


Figure 8 : D'après la base de données du sous-sol de infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) mise en évidence des différents ouvrages présents dans la zone d'étude.

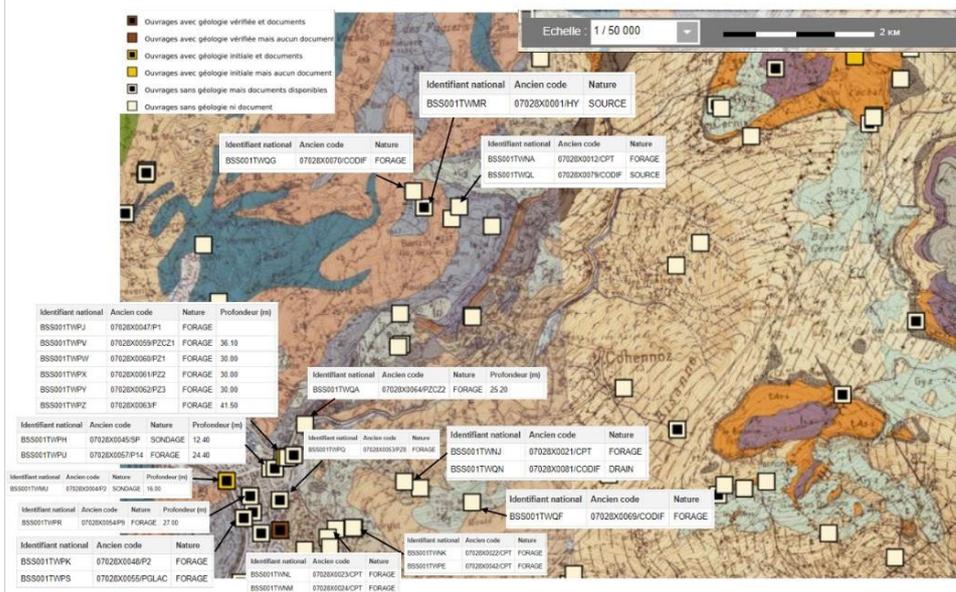


Figure 8 : D'après la base de données du sous-sol de infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) mise en évidence des différents ouvrages présents dans la zone d'étude.

D'un point de vue géomorphologie. L'instabilité du versant est très visible sur le secteur des Panissats qui présente une morphologie en forme de loupe qui affecte l'ensemble du versant. La partie supérieure du glissement est marquée par une forte rupture de pente ouverte vers la vallée. La deuxième zone de glissement correspond à

celle de Moulin Ravier, est moins marquée par la topographie et présente une morphologie de versant ancienne acquise à la fin de la déglaciation alpine lors du retrait du glacier Arve-Arly.

Suite aux visites sur le terrain, il a été observé une morphologie chaotique du terrain (en bosse et en creux), des fissures sur les routes, des troncs courbés ou inclinés, ce qui témoigne d'une instabilité par fluage. **c. Contexte historique**

En ce qui concerne les données historiques des chroniques d'évènements ont été réalisés sur le site des Gorges de l'Arly de 1749 à Mai 2018 pour recenser les différents évènements et les conséquences, qui se sont passés dans les Gorges de l'Arly. Plusieurs types d'évènements ont été répertoriés et différents évènements ont été distingués (crues, glissements de terrain, réactivation de glissements de terrain, chutes de blocs). Ces chroniques sont utilisés par la suite pour des simulations et des calculs de seuils de déclenchements de mouvements de terrain. Une partie des chroniques est disponible en annexe 3.

### 5.2.2 Le Pas de L'Ours, Queyras (Projet Miroir)

#### a. Contexte géographique

Le glissement du Pas de l'Ours se trouve à côté de la commune d'Aiguilles dans le département des Hautes Alpes (05) dans le Queyras (cf. figure 9). Le glissement de terrain du Pas de l'Ours est survenue le mois de mars 2017, sur la commune d'Aiguille. Ce mouvement mobilise un versant dominant la rive droite du Guil à l'amont immédiat d'Aiguilles entre 1490 m et 1950 m d'altitude.



Figure 9 : A droite, localisation de la zone d'étude sur la carte de France (Source Open street map) et à gauche image satellite de la zone d'étude. La zone d'étude démarre après la commune d'Aiguilles. (Source : Google Earth).

#### b. Contexte géologique et morphologique

La morphologie du versant et les différentes observations de terrain permettent de déterminer la présence d'un ancien glissement de versant postglaciaire entre le pied de versant et la niche d'arrachement sommitale (cf. figure 10). La partie active du glissement représente une surface de 18ha en versant raide sur une dénivelée de près de 500m. La partie active du glissement correspond à la partie amont, au-dessus de 1600 m d'altitude. L'activité sur ces terrains se traduit par des chutes de blocs de plus d'un m<sup>3</sup> à partir d'un ressaut rocheux déstabilisé sur 70 m de long, formant un éboulis de pente jusqu'au chemin communal et blocs isolés au-delà et une destruction importante, des décrochements d'environ 3m avec des fissures ouvertes, des niches d'arrachement pouvant atteindre localement 10 à 20 m de hauteur, des déformations de sols avec basculement des arbres et l'avancée d'une langue de glissement en direction d'un thalweg à l'ouest du ravin de Choudane.

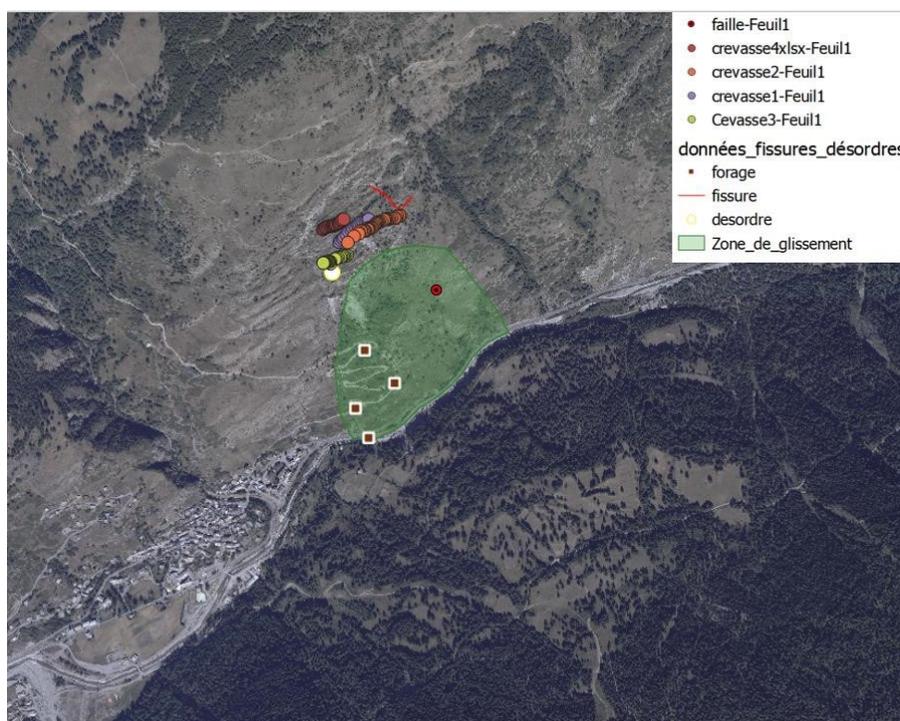


Figure 10 : Géomorphologie et données de terrain mesurés au Pas de l'Ours.

D'après la carte géologique du BRGM, le substratum observé sur le site d'étude est composé d'une alternance schisto-calcaire, datant du crétacé inférieur. Cette formation consiste en des schistes noirs luisants dans lesquels s'interstratifient des bancs de calcaires siliceux gris à patine brune. Ces schistes sont des calcschistes faiblement métamorphisés et présentent un déversement vers le SudOuest et montrent à l'affleurement de nombreux replis souvent rompus et décalés et une fracturation Sud-Ouest, Nord-Est à l'origine des ressauts rocheux en versant.

### c. Contexte historique

En ce qui concerne les données historiques des chroniques d'évènements ont été réalisés sur le site des Gorges de l'Arly de 1749 à Mai 2018 pour recenser les différents évènements et les conséquences, qui se sont passés au niveau du glissement du Pas de l'Ours. Plusieurs types d'évènements ont été répertoriés et différents évènements ont été distingués (crues, glissements de terrain, réactivation de glissements de terrain, chutes de blocs). Ces chroniques sont utilisés par la suite



pour des simulations et des calculs de seuils de déclenchements de mouvements de terrain. Une partie des chroniques est disponible en annexe 4.

### 5.3 Méthodologies employées

Les glissements de terrains sont des phénomènes liés à la nature, la structure des terrains, la morphologie du site, à la pente topographique et à la présence d'eau. Les facteurs à même de déclencher un glissement de terrain peut être d'origine naturelle ou anthropique. Parmi les facteurs déclencheurs d'origine naturelle, on identifie les fortes pluies et la fonte des neiges, l'affouillement des berges, l'effondrement de cavités sous-minant le versant et les séismes.

Le projet MIROIR s'intéresse à plusieurs mouvements de terrain et nécessite un travail à plusieurs échelles dans le temps et l'espace de manière à comprendre les mécanismes de déclenchements des différents mouvements de terrain.

Une première étape du travail est de faire un travail de recherche et de synthèse bibliographique de manière à faire l'état des lieux des données disponibles sur chaque site d'études. Puis, une partie du travail se réalise sur le terrain avec une cartographie géologique des zones d'études, une analyse morpho dynamique des différents glissements de terrain, des prélèvements d'eau, un traçage hydrogéologique et la rencontre avec les différents acteurs. Après avoir collecté les données une partie se réalise au bureau avec un traitement direct des données bruts récupérées. Enfin une partie du travail consiste à la création et aux traitements de base de données événementielles et climatiques sur les deux zones d'études de manière à faire des simulations et déterminer des seuils de déclenchement des glissements de terrain à l'aide de données pluviométriques.

#### 5.3.1 Mission terrain (cartographie géologique de la zone et cartographie morphodynamique, collecte et structuration des données)

Plusieurs missions ont été réalisés sur le terrain allant de la mesure de données brut des dimensionnements (à l'aide d'un *télémètre* laser qui permet de mesurer la distance verticale, horizontale et inclinaison ou d'un inclinomètre) des glissements de terrain, des mesures de fractures, de stratifications, de volumes, des levés géologiques et des données hydrogéologiques.

Dans cette partie, la mission de terrain géologique réalisé avec un Ingénieur géologue du BRGM Orléans est détaillé (cf. [Annexe 5](#) avec la localisation des différents affleurements mesurés lors de la mission géologique de terrain et [Annexe 6](#) avec la présentation de différents stéréos réalisés grâce aux différentes mesures). Au cours de cette mission nous nous sommes rendus dans les Gorges de l'Arly pour faire une étude détaillée de la zone, des mesures de stratigraphies, de fractures et regarder les discordances présentes sur la carte géologique.

A l'issue de ces mesures sur le terrain, des stéréos ont été réalisés à l'aide du logiciel stereonet pour visualiser les données. Suite à la réalisation de différents stéréos des mesures de S0, S1 et SD et à une détermination statistique, il a été montré que le pôle du plan défini par les axes de plis déformant la schistosité est à peu près identique au pôle moyen des S1 ce qui signifie que la déformation à l'origine du plissement de la Schistosité est coaxiale à celle qui est à l'origine de la formation de la Schistosité. (Cf. figure 11).

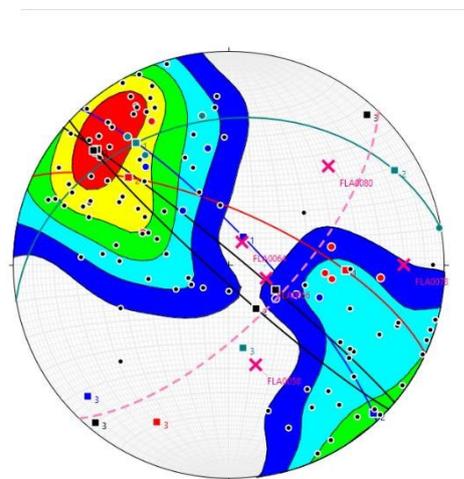


Figure 11 : Détermination statistique. Le cercle rouge correspond au pôle moyen des S1.

Le pôle dominant indique une S1 inclinée vers le sud-ouest de  $70^\circ$  dans l'azimut  $145$  et les valeurs de S1 varient de direction et de pendage de plus ou moins  $20^\circ$ . A partir de cette direction, les plans inclinés vers le sud-est présentent une torsion et un aplatissement vers l'est (flèche noire selon un axe de torsion incliné de  $35^\circ$  dans la direction  $061$  sur la figure 12). Les plans de S1 inclinés vers le nord-ouest présentent également une torsion mais cette fois-ci vers l'ouest selon un axe de torsion de  $35^\circ$  dans la direction  $240$ . Cette torsion suggère que les déformations sont liées à un cisaillement senestre de direction NNE-SSW. Ce plan de déformation doit être celui défini précédemment (ligne en tirées rose) à partir des plis mesurés et calculés (étoiles vertes).

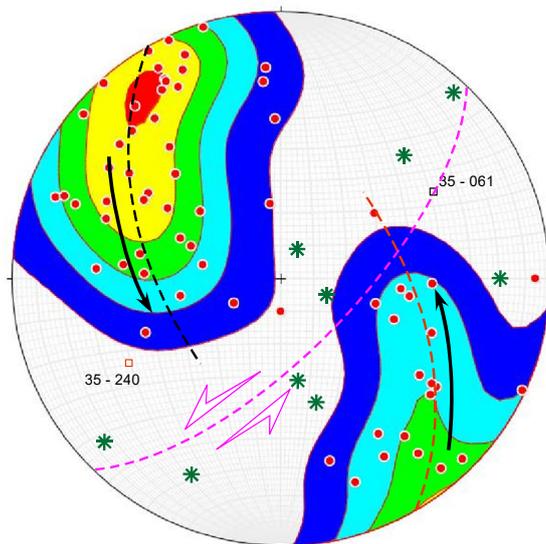


Figure 12 : Stéréo avec les données synthétisées.

En parallèle de ces mesures de stratigraphies réalisées sur le terrain, une analyse des pentes sur les MNT (Modèles numériques de terrain) sur à l'aide du logiciel QGIS et l'utilisation des échelles de cohésion des matériaux a permis de définir différents seuils. Ainsi, pour une pente allant de :

- 0-3, ce qui correspond à des pentes très faibles on retrouve des dépôts alluvionnaires ou lacustres.
- 0-9, correspond à des pentes faibles avec des cônes de déjections et une morphologie glaciaire
  - 9-25, une pente faible forte drapé d'une morphologie glaciaires
- 25-32, pentes moyennement faibles avec des bourrelets ou des zones de concavités / colluvions
- 32-40 avec des pentes moyennement fortes et des roches déstabilisées au pieds de glissements
- 40-50 avec des pentes fortes et des roches glissées ou déstabilisées potentiellement
- Supérieurs à 50° correspond à des pentes fortes type falaise et des roches saines en place.

La figure 13 présentent les différents traitements réalisés sur les MNT de l'Arly.

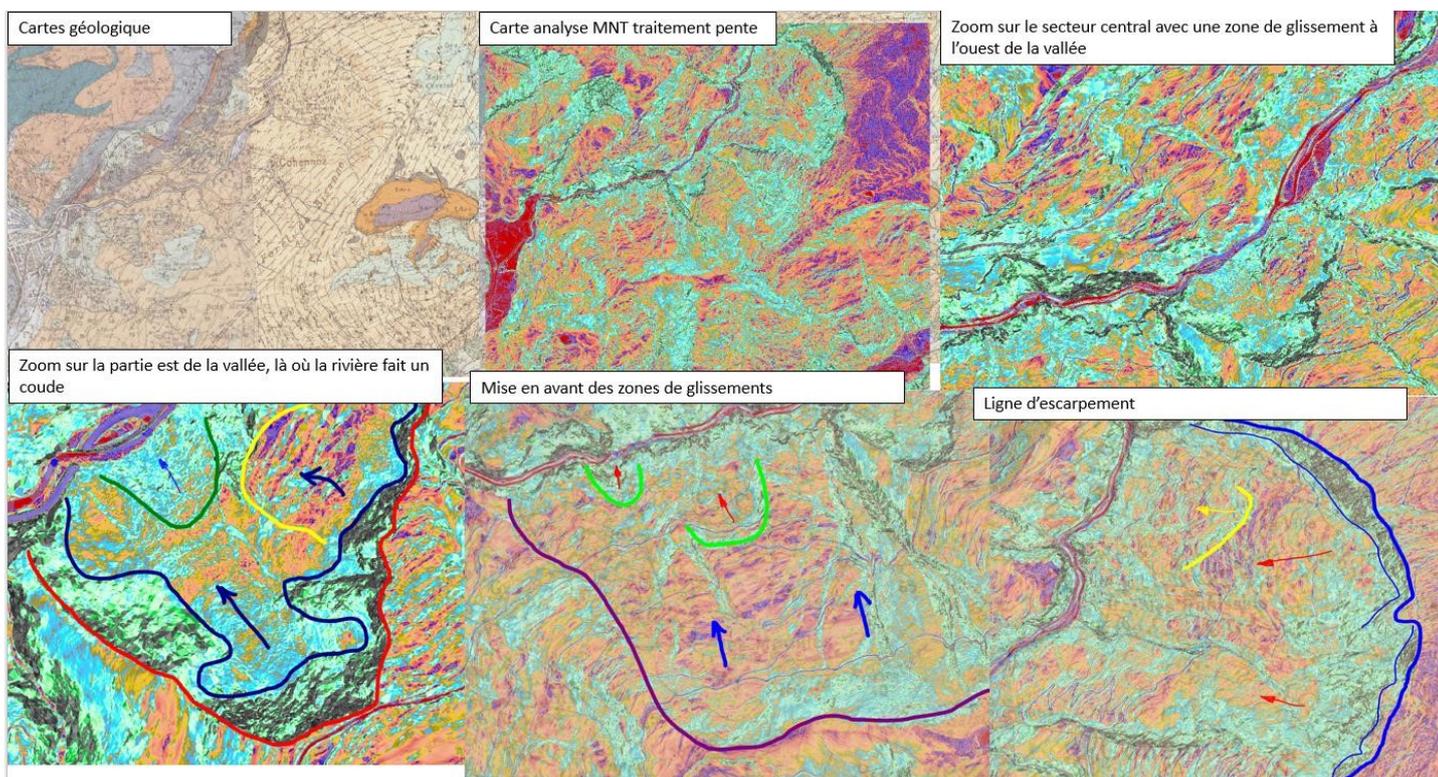


Figure 13 : Différentes interprétations des MNT pentes à l'aide du logiciel QGIS.

Grâce aux différentes mesures réalisées sur le terrain et aux traitements des pentes sur les MNT une première hypothèse a pu être formulée quant à l'apparition des glissements de terrain dans le Val d'Arly. Ce serait probablement un mécanisme de fauchage\* qui serait en partie à l'origine des grandes zones de glissements. Le mécanisme de fauchage consiste en un basculement des blocs (fauchage plurimétrique) avec une formation de fissures puis une fois le fauchage trop important les blocs basculent de 80 à 40 degrés et en dessous les formations glissent.



*\*Le fauchage, en géologie, est un phénomène gravitaire qui se traduit par un basculement des couches géologiques (stratification ou schistosité) en direction de la pente topographique. Sur une tranche de terrain superficiel, la schistosité subit donc une rotation qui s'accompagne souvent d'une dislocation de la roche et de l'apparition de fractures ouvertes. Ceci favorise la circulation des eaux météoriques lesquelles liées à la déformation mécanique gravitaire vont accélérer le processus d'altération et donc dans le cas présente la transformation des micaschistes en argiles et limons.*

Le même travail devra être fait sur le glissement du Pas de l'OURS.

### 5.3.2 Présentation des différents acteurs du projet MIROIR

Les différents acteurs du projet MIROIR :

#### **Dans les Gorges de l'Arly**

- La DDT (Direction départementale des Territoires) de Savoie
- Le SMBVA, syndicat mixte du Bassin versant de l'Arly
- Le conseil départemental de la Savoie (responsable de l'unité risques naturels)
- La RTM local (service de restauration des terrains en montagne)
- La mairie de Cohennoz (commune concernée par les glissements de terrain dans la partie amont des Gorges de l'Arly)
- La mairie d'Ugine
- SAGE (Bureau d'études en risques naturels)

#### **Dans le Queyras**

- Parc Naturel Régional du Queyras (Bérengrère Charnet) chargée de missions eaux et risques, gestion intégrée des risques naturels
- ADRGT (association pour le développement de la recherche sur le glissement de terrain)
- SAGE (Bureau d'études en risques naturels)
- La RTM des Hautes Alpes
- La DDT des Hautes Alpes
- Le conseil départemental des Hautes Alpes
- Le Cerema (centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)
- OMIV (Observatoire multidisciplinaires des instabilités de versant, sous-programme du CNRS)
- Le CNRS (centre nationale de la recherche scientifique)

### 5.3.3 Etudes hydrogéologiques

De manière à bien caractériser le plus précisément les zones d'études des missions hydrogéologiques ont été réalisées. Sur chaque site des prélèvements d'eau ont été réalisés et sur le glissement du Pas de l'Ours un essai de traçage a été mis en place.



### a. Prélèvements d'eau

Cette partie présente la méthodologie pour la campagne de prélèvements d'eau réalisée dans les Gorges de l'Arly et au niveau du Guil et une partie de l'analyse de la qualité des eaux prélevées sur le site des Gorges de l'Arly. La campagne faite sur le Guil ne sera pas commentée dans ce présent rapport car les résultats ne sont pas encore disponibles à la rédaction du rapport.

La technique de prélèvement, d'échantillonnage et de conservation des échantillons d'eau a été validée afin de répondre à trois objectifs : représentativité du milieu, caractérisation des phénomènes et limitation des processus pouvant entraîner une variation des concentrations en éléments dissous et fait l'objet d'un mode opératoire spécifique qui permet de garantir la noncontamination des échantillons.

#### **Prélèvements et paramètres de terrain :**

Les prélèvements sur site ont été réalisés selon le mode opératoire suivant : les prélèvements pour chacun des douze échantillons d'eau (pour les Gorges de l'Arly) et huit échantillons (pour le Guil) sont réalisés à l'aide d'une bouteille en plastique avec un volume de 0.5L et d'une petite fiole pour les métaux lourds de 50 ml. La bouteille doit être rincée plusieurs fois à l'eau à échantillonner afin d'éviter qu'elle ne contienne des éléments indésirables et le flacon doit être rempli jusqu'à deux centimètres avant le bouchon. Ce protocole s'appuie sur la norme \*NF EN ISO 5667-3 Qualité de l'eau – Echantillonnage.

*\*ISO 5667-3 :2012, qualité de l'eau, échantillonnage : conservation et manipulation des échantillons d'eau. Cette norme établit les exigences générales relatives à l'échantillonnage ; la conservation, la manipulation, le transport et le stockage de tous les échantillons d'eau, y compris ceux destinés à des analyses biologiques. Cette norme s'applique à chaque fois qu'un échantillon ponctuel ou composite ne peut être analysé sur site et doit être transporté vers un laboratoire pour analyse.*

De plus, un seau est nettoyé puis rempli avec l'eau pour mesurer les paramètres physico-chimiques. Le pH et la conductivité sont mesurées avec le pH-mètre et le conductimètre, préalablement étalonnés. D'autres paramètres sont également mesurés : la température, l'O<sub>2</sub> dissous (à l'aide d'une sonde O<sub>2</sub> dédiée, et mesures d'oxygène dissous exprimé, en mg/l et en % de saturation) et le potentiel Rédox.

#### **Analyses physico-chimiques**

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées par le Laboratoire Départemental de la Drôme selon les normes NF EN ISO 9963-1 ; 14911 ; 10304-1 ; 15681-2 ; 11885 et 17924-2 et les modes opératoires suivants : titrométrie, calcul, chromatographie ionique, analyse en flux continu, métaux par ICP AES (cf. tableau annexe xx, résultats des analyses pour les Gorges de l'Arly).

#### **Campagnes d'échantillonnage des eaux superficielles et souterraines**

##### **Dates des campagnes**

La campagne d'échantillonnage des eaux superficielles et souterraines a eu lieu le 16/09/2021 soit en période de basses eaux. Pour cette campagne 12 échantillons ont été prélevés, pour les Gorges de l'Arly. Et La campagne d'échantillonnage des eaux superficielles et souterraines a eu lieu le 19/10/2021 soit en période de basses eaux. Pour cette même campagne, dans la vallée du GUIL, huit échantillons ont été prélevés.



### **Localisation des prélèvements dans le contexte hydrogéologique local**

Pour les Gorges de l'Arly, les eaux superficielles ont été prélevées au niveau de rivières et ruisseaux, mais aussi sur une zone humide (1 point sur une zone de tourbière, cf. figure 14). Les eaux souterraines ont été prélevés au niveau de différents captages d'adductions en eau potable (AEP). Pour la vallée du Guil, les eaux superficielles ont été prélevées au niveau de rivières et ruisseaux également et les eaux souterraines aux niveaux de différentes sources d'eau (cf. figure 15).

*Remarque : Le nom indiqué des points des prélèvements est en lien avec leur localisation.*

Au niveau des Gorges de l'Arly, on a la présence de deux aquifères distincts, un aquifère lié à l'encaissant micaschisteux sur toute la zone des Gorges de l'Arly et un aquifère triasique en situation perchée sur le plateau des Saisies d'étendu limitée car circonscrit à deux buttes résiduelles (butte de Cernix au Nord et butte de Bisanne à l'est).

Du fait d'un nombre de points de prélèvement d'eaux souterraines insuffisamment répartis dans le versant des Gorges de l'Arly, il a fallu se rabattre souvent sur les ruisseaux (tel que le captage du Moulin en contexte triasique mais qui se révèle être des eaux de ruisseau).

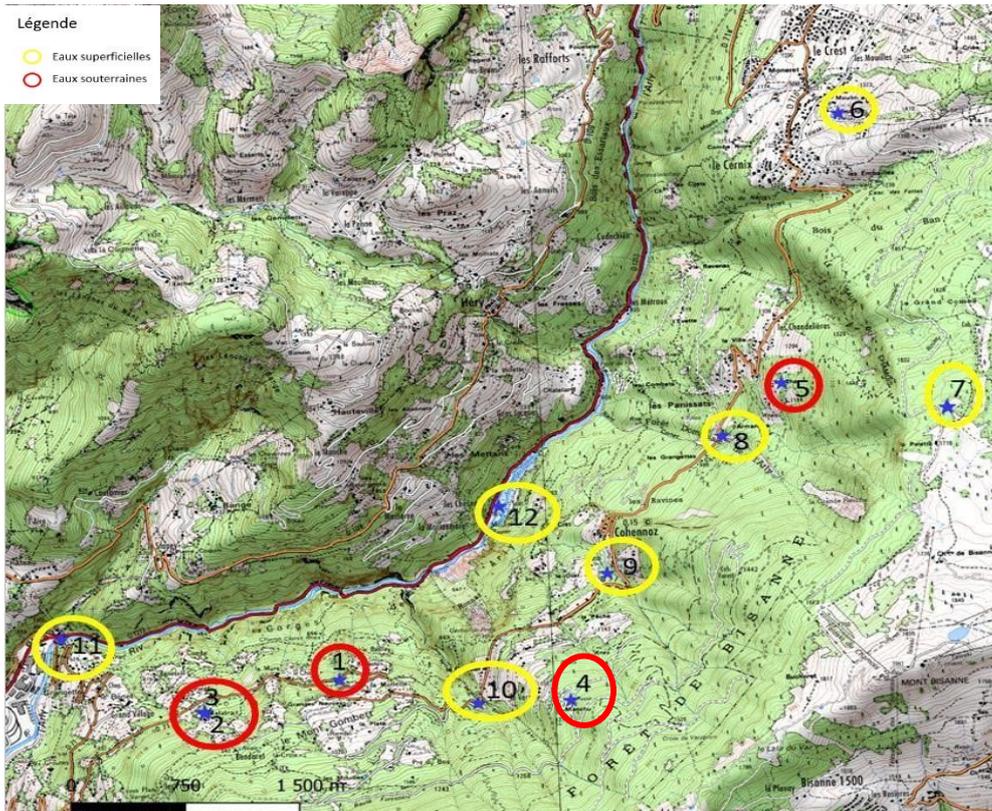


Figure 14 : Localisation des points des prélèvements d'eau dans l'Arly au niveau des différentes zones de glissement.

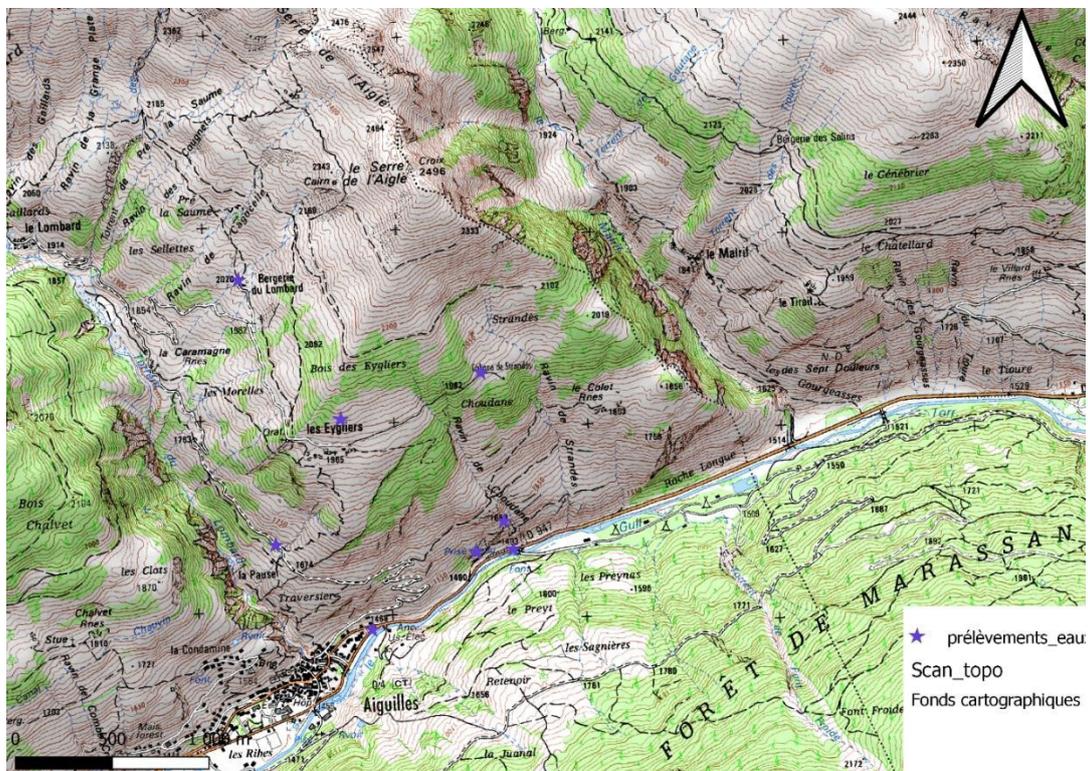


Figure 15 : Localisation des points de prélèvements d'eau dans la vallée du Guil.

## Présentation des résultats obtenus pour les Gorges de l'Arly

### Paramètres in situ (T°, C, pH, Eh, O<sub>2</sub>)

Le pH des eaux souterraines est compris entre 6,9 et 7,5, ce qui correspond à des valeurs classiques pour des aquifères. Les eaux de rivières présentent des pH compris entre 7,9 et 8,6 soit un pH plus élevé de fait des équilibres calcocarbonatés. La valeur de pH relativement acide pour le point échantillonné sur le plateau des Saisies est tout à fait logique sur une zone de tourbière naturelle (acidité généralement liée à la décomposition des acides organiques produits sur place par des processus biogéochimiques).

La conductivité des eaux souterraines est comprise entre 79,3  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et 387  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La variabilité des conductivités est forte comme cela est classique dans des aquifères fissurés plus ou moins minéralisés. En ce qui concerne les eaux superficielles, les conductivités de Nant Boulou, le Diat et Nant Cortay sont plus faibles que celle de l'Arly en raison de la taille réduite des bassins versants qu'ils drainent. Les eaux de l'Arly sont les plus minéralisées avec des conductivités de 600  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  du fait de la taille importante du bassin versant en amont des Gorges de l'Arly par rapport à ces dernières. Les eaux de la tourbière des Plateaux de Saisie ne sont guère différentes de celles des eaux de pluies (pas de bassin versant alimentant la tourbière en dehors de l'étendue du plan d'eau lui-même).

La température des eaux souterraines varie de 5,3°C à 9,2°C et les eaux superficielles présentent une température comprise entre 10,4°C et 14,7°C.

Les valeurs du potentiel Rédox (données en mV NHE) permettent d'estimer les conditions d'oxydoréduction aux points de mesure. Le système est globalement conforme à un milieu réducteur ( $E_h < 350\text{mV}$ ).

La figure 15 présentent la relation entre les données de potentiel Rédox et les données de conductivité.

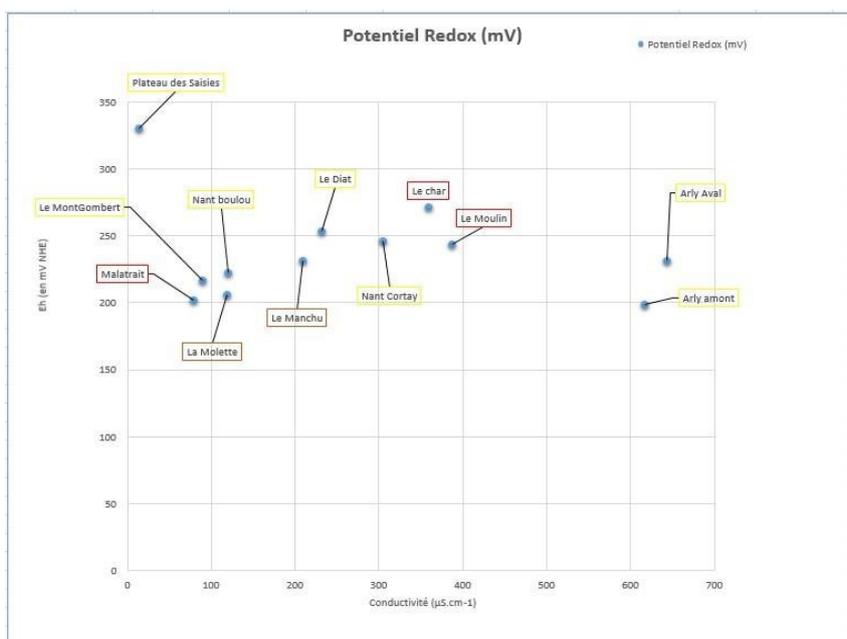


Figure 16 : Eh vs conductivité. En jaune les prélèvements réalisés dans des eaux superficielles souterraines et en rouge dans des eaux superficielles.

Les concentrations en oxygène dissous sont relativement homogènes pour les eaux souterraines et superficielles avec des valeurs légèrement plus élevées pour les eaux souterraines.

Le tableau de la figure 17 synthétise les données des paramètres physico chimiques mesurés sur le terrain.

Nom	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	PH	Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Oxygène dissous (%)	Oxygène dissous ( $\text{mg}/\text{l}$ )	Potentiel Redox (mV)	Observations sur site
La Molette	118,6	6,92	9,2	97,2	10,03	205,9	Eau limpide et pas d'odeur
Maltrait	79,3	7,49	8,9	99,4	10,64	202,2	Eau limpide et pas d'odeur
Charmette	89,9	7,18	9,2	98,4	10,24	217	Eau limpide et pas d'odeur
Le Manchu	209	7,57	5,9	122,5	13,05	231,7	Eau limpide et pas d'odeur
Le Char	359	7,45	9,1	97,4	9,83	271,8	Eau limpide et pas d'odeur
Le Moulin	387	7,42	7,3	95,8	10,04	243,9	Eau limpide et pas d'odeur
Plateau des Saisies	13,2	4,5	13,1	95,5	8,22	329,9	Eaux brunes
Nant Cortay	305	7,98	12,3	99	9,47	246,2	Eaux boueuses, présences de sédiments et pas d'odeur
Le Diat	232	8,44	10,4	99,6	10	253,3	Eau pas pire et pas d'odeur
Nant Boulou	120,6	8,179	12,2	99,7	9,52	222,6	Eau trouble, brune et turbidité
Arly route	616	8,67	15,1	98,9	9,49	199	Eau marron et pas d'odeur
Arly route	643	8,38	14,7	97	9,28	231,6	Eau trouble et pas d'odeur

Figure 17 : Paramètres physico-chimiques mesurés lors de la campagne de terrain de prélèvements d'eau. Ce que l'on pensait être une erreur au début pour la valeur de conductivité de plateau des Saisies est peut-être lié au faible taux de minéralisation présent dans la zone humide.

### Diagramme de Piper

Le diagramme de PIPER permet de représenter simultanément le fond hydrogéochimique de plusieurs échantillons d'eaux. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et anionique des eaux et un losange synthétisant le faciès global.

Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction par rapport à la concentration des anions et des cations. Ainsi deux points représentatifs sont obtenus et indiquent la dominance d'un anion ou d'un cation.

Les sommets du diagramme ternaire des anions sont le sulfate, le chlorure et le carbonate plus l'hydrogénocarbonate. Les sommets du diagramme ternaire des cations sont le magnésium, le calcium et sodium plus le potassium. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un losange. Le losange est une matrice de passage du graphique des anions sulfate + chlorure/total des anions et des cations sodium + potassium/total des cations.

Les concentrations en anions et cations sont disponibles en Annexe xx. Le diagramme de Piper [1994] est une représentation graphique des concentrations en ions dissous dans l'eau – sous la forme de diagrammes ternaires (cf. figure xx).

La réalisation du diagramme de PIPER (cf. figure 18) se fait à l'aide du logiciel HYGROCHIMIE. Le traitement se fait en plusieurs étapes. Les données utilisées pour réaliser le diagramme de PIPER sont synthétisés dans le tableau figure 19.

- Etape 1 : Préparation des données sur Excel qui comporte les éléments majeurs avec les cations et les anions et l'unité qui est  $\text{mg}/\text{l}$ .
- Etape 2 : fermer le fichier et ouvrir le logiciel.

- Etape 3 : « Traiter des fichiers Excel », importer le fichier et rentrer l'unité utilisé, donner le nom de la feuille où les données sont présentes et traiter le fichier.
- Etape 4 : Changer les chiffres dans la colonne pour obtenir des couleurs différentes par point.
- Etape 5 : Faire la légende
- Etape 6 : Lancer la simulation et les calculs pour faire le diagramme de PIPER

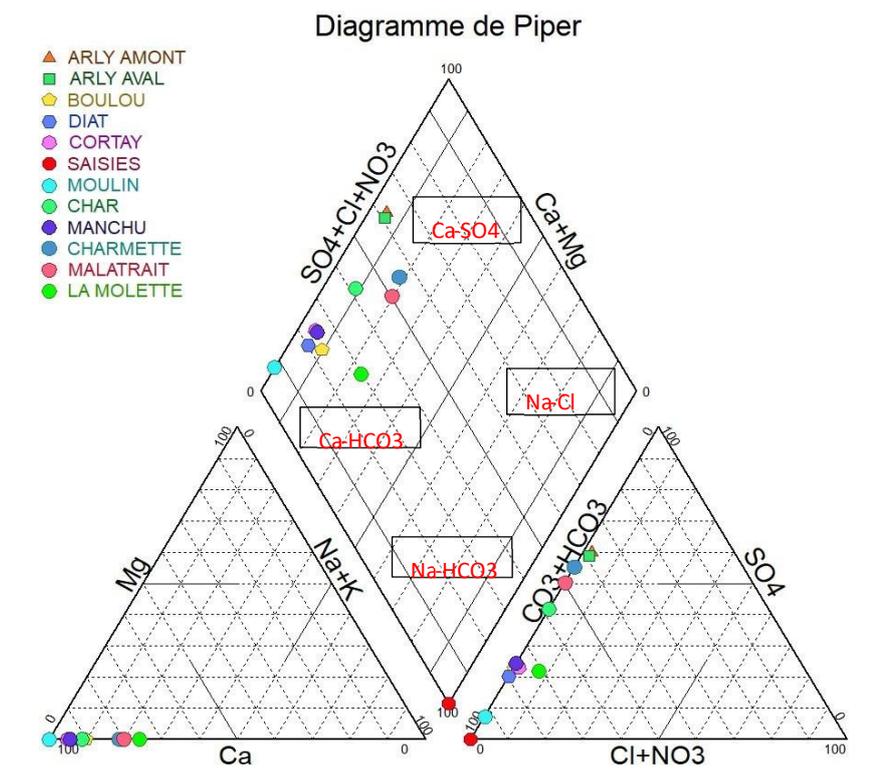


Figure 18 : Diagramme de Piper réalisé pour les prélèvements d'eau dans l'Arly.

Plusieurs familles sont repérables. Famille 1 : Arly Amont et Aval. Famille 2 : Charmette, Malatrait et Molette. Famille 3 : Les Nant Boulou, Nant Cortay et le Manchu. Le Char est un peu connecté à cette dernière famille mais pas totalement. Et enfin les singletons très individualisée (Tourbière des Saisies) et Moulin (triasique).

Les eaux prélevées sont ici majoritairement de type bicarbonaté calcique (Ca-HCO<sub>3</sub>) ; les eaux de Arly Amont, Arly Aval et Charmettes apparaissent plutôt comme de type sulfaté calcique (Ca-SO<sub>4</sub>). Les eaux souterraines du Char et de Malatrait se situent entre deux compositions anioniques. Concernant le triangle de gauche, on observe une faible variabilité de l'importance relative des cations dans les eaux (principalement des composés calciques) tandis que l'on note une évolution des compositions le long d'un axe du triangle de droite ce qui reflète l'importance relative des anions sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). De manière générale les eaux sont proportionnellement plus riches en ions sulfates qu'en autres anions. L'importance des ions NO<sub>3</sub> + Cl varie peu sur l'ensemble des eaux collectées.

La composition chimique des eaux est dominée par la présence de certains ions, appelés « ions majeurs » du fait de leur abondance dans l'eau : 4 cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et 4 anions (hydrogencarbonates, sulfates, chlorures et nitrate).

ID	Température	Ph	Ca+	Mg 2+	Na+	K+	HCO3-	Cl-	NO3	SO4
ARLY AMONT	14,7	8,38	107	17	5,8	1	163,6	5,2	0,28	202
ARLY AVAL	15,1	8,67	95	17	6,2	0	153,8	5,1	0	181
BOULOU	121,2	8,179	14	5,7	1,7	0	51,6	0	0,22	12
DIAT	10,4	8,44	28	12	1,8	0	116,3	0	0,16	23
CORTAY	12,3	7,98	35	18	1,2	1,5	146,3	1,2	0,22	35
SAISIES	13,1	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
MOULIN	7,3	7,42	55	21	0	0	241,2	0	0,38	15
CHAR	9,1	7,45	37	24	2,7	2,3	135,5	0	0	76
MANCHU	5,9	7,57	25	10	1,7	0	98,2	0	0	25
CHARMETTE	9,2	7,18	8	4,2	2,1	0	22,9	0	0	22
MALATRAIT	8,9	7,49	7	3,7	2	0	21,4	0	0	17
LA MOLETTE	9,2	6,92	10	5	3,6	0	45,1	2,6	0,23	11

Figure 19 : Données utilisées pour réaliser le diagramme de PIPER.

### Résultats de l'ACP (Analyse en composantes principales)

L'analyse en composantes principales (ACP) établie pour l'ensemble des points sur la campagne de prélèvement permet de corrélérer les différents paramètres physicochimiques mesurés entre eux puis de discriminer les points échantillonnés en familles présentant des affinités. La figure 20 illustre l'ACP réalisé pour les données mesurées au niveau de l'Arly.

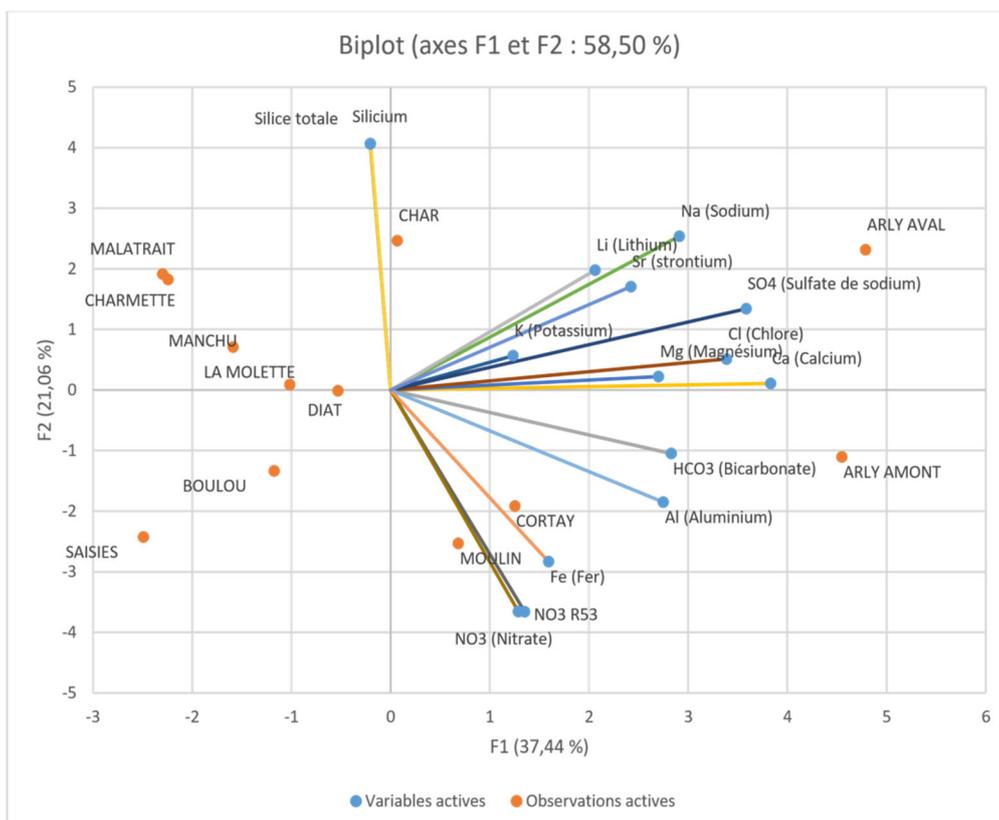


Figure 20 : ACP des données chimiques et isotopiques pour les Gorges de l'Arly.



D'un point de vue paramètres mesurés, l'axe 1 de l'ACP coïncide nettement avec l'ion Calcium et l'axe 2 est très proche du Silicium.

En ACP, où on n'est pas limité qu'aux paramètres du Piper (rajout métaux + Silice), on retrouve néanmoins les mêmes familles d'échantillons pour les plus discriminantes telle le duo Arly Aval-Arly Amont, le trio Charmette Malatrait Molette et le Char un peu à part) mais quelques nuances nouvelles.

Bien qu'inclassable avec les ions majeurs, les Saisies s'individualise moins si on tient compte des métaux et Si (pas si indépendant d'un fonds hydrogéo-chimique). Outre la "perte" de Manchu, Le trio Diat Boulou Cortay perd aussi Cortay mais se reconnecte aux Saisies Nant Cortay se rapproche du point proche du Trias de Moulin

### b. Traçage

Un essai de traçage a été mis en place au niveau du glissement du Pas de l'Ours. Je me suis occupée entièrement de cette mission allant de la conception du plan pour déterminer les zones d'injections et de suivis, de la calibration du matériel avec les différents fluocapteurs, de la mise en place du matériel sur site, de la récupération des données et du suivi sur site aux traitements des données et interprétations. Les différentes étapes sont présentées dans cette partie.

Je vais dans un premier temps vous présenter la mise en œuvre du traçage (avec le travail en amont), le mode de suivi et d'analyses et l'exploitation des données et interprétations.

Le traçage hydrogéologique est une méthode couramment employée pour repérer les trajectoires des eaux souterraines. La restitution d'un produit, souvent coloré, en un ou plusieurs exutoires du système souterrain, après son injection ponctuelle en amont, est généralement interprétée en termes de direction d'écoulement et de vitesse de transfert. Cependant, les informations, issues d'un traçage peuvent être plus complètes. Les signaux de restitution du traceur sont porteurs de renseignements sur le comportement du produit dans le milieu souterrain, ses échanges avec le milieu et sa dispersion (BRGM, 2012).

### Mise en œuvre du traçage

La première étape du traçage est de bien déterminer l'objectif du traçage. Le traçage est ici réalisé au niveau du glissement du Pas de l'Ours (au-dessus de la commune d'Aiguilles, dans le Queyras) et a pour objectif d'essayer d'identifier des circulations souterraines préférentielles au niveau du glissement de terrain.

La deuxième étape consiste à la récolte d'informations existantes (données géographiques, topographiques, géologiques, hydrogéologiques et anthropiques c'est-à-dire usages d'eau, captages, etc...).

La troisième étape consiste en la reconnaissance du site où le traçage va être réalisé. C'est-à-dire qu'il faut repérer les points d'injections potentiels (accès direct ou via une zone non saturée, capacité d'absorption, possibilités de mises en charge et de débordements, besoin de chasse d'eau, accessibilité notamment aux véhicules transportant l'eau destinée à la chasse ...) et des points de restitution potentiels (captages, sources non captées, exutoires en eau de surface, fonctionnement, accessibilité et mesure éventuelle de débit...). Il est important à l'issue de cette visite, de faire un examen de la faisabilité de mise en place des différents dispositifs de surveillance (prélèvements manuels, installation de préleveur automatique, installation de fluorimètre, fixation de détecteurs au charbon

actif...) et anticiper les conditions hydrologiques... qui peuvent être fluctuantes au fil des jours et des saisons.

Concernant le traçage au niveau du glissement du Pas de l'Ours, une visite et analyse du terrain sur place nous a permis de déterminer trois points d'injections potentiels. Deux de ces points d'injections sont situés dans des dolines et un dans une crevasse. Ces trois points sont localisés dans la partie amont du glissement de terrain. L'accès direct est limité et la nécessité d'une chasse d'eau est nécessaire. Ensuite, trois points de restitution au niveau du Guil (là où seront situés nos fluorimètres avec les GGUN), ont été déterminés. Localisation d'un des fluorimètres sur la partie amont du Guil soit en dehors du glissement, un au centre du Guil soit au cœur du glissement et un en aval du Guil soit bien après la sortie du glissement. Enfin, trois points de dispositifs de surveillance ont été choisis. Sur chacun de ces points nous avons dispositionnées des fixations de détecteurs au charbon (fluocapteur) et au niveau d'un de ces points (au niveau de la source « La Pause ») nous avons dispositionnées un préleveur automatique. La figure 21 est un plan établi avec la localisation des différents points d'injections, points de suivis et points de surveillances.

*Remarque :* Il est important de noter que ce plan a dû être réadapté aux contraintes sur le terrain. En effet initialement le point B (fluorimètre) devait être situé en amont de l'usine électrique et le point A au niveau de la cotation 1490 mais des travaux consistant au retrait de tuyaux métalliques de conduites forcés endommagés par le terrain au niveau du Guil ont démarrés au moment de l'installation du matériel. Ces travaux faisaient appel à des machines conséquentes (pelle araignée) qui pouvaient détériorer notre matériel.

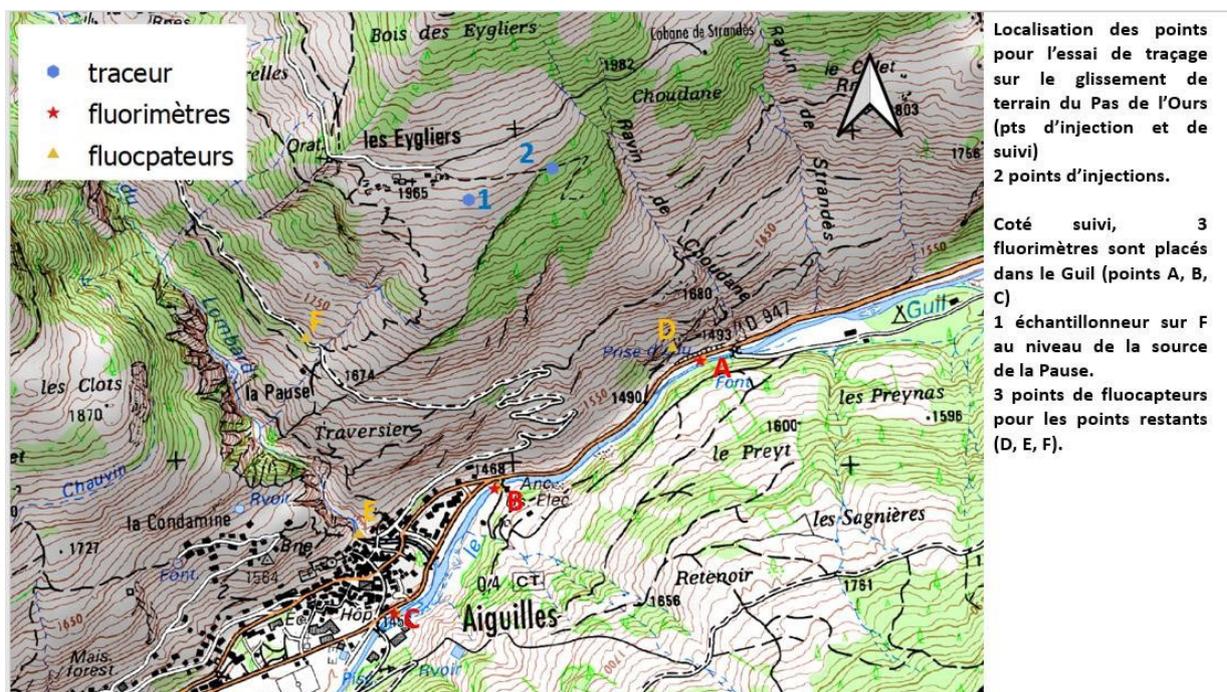


Figure 21 : Localisation des différents points de suivis, d'injection et de dispositifs de surveillance.

Après avoir abordé ces étapes, on peut procéder au dimensionnement du traçage. Ici un multitraçage a été réalisé. Un multi traçage consiste à injecter simultanément différents traceurs, en



plusieurs points d'injection. Il permet de répondre à plusieurs questions à la fois, de réduire le coût et de gagner un temps considérable. En revanche il impose un choix judicieux des traceurs utilisés, suffisamment conservatifs dans le contexte et sans présenter d'interférences analytiques entre eux.

### **Multi-traçage**

Initialement il avait été prévu d'injecter trois traceurs (de la fluorescéine, de la sulforhodamine b et du naphthionate de sodium) dans trois points d'injections différents (deux dolines et une crevasse). Néanmoins par soucis de temps, de gestion et pour éviter toutes interférences, seuls deux traceurs ont été injectés (fluorescéine et sulforhodamine b) au niveau des deux dolines. Ainsi, les injections prévues sont faites dans les parties hautes du glissement entre 750 m et 1,1 km de distance planimétrique avec le Guil en aval. Les transferts n'auront pas lieu dans un milieu karstique comme la plupart des essais de traçage mais dans un milieu poreux (déstructuré certes mais à matrice poreuse) où on attend des vitesses moindres, une rétention des traceurs plus élevée, des restitutions moindres. Les quantités injectées restent réduites (environ 1,3 Kg\*), juste suffisantes pour que les appareils de suivi (fluorimètres) installés en pied de versant dans le Guil puissent quand même détecter le passage des traceurs attendus avant tout en infratracés (aucune coloration visible attendue en principe en pied de versant dans le Guil à hauteur d'Aiguilles).

*\*la quantité de traceur à injecter est une question délicate. Plusieurs formules existantes mais supposent une connaissance du milieu et des paramètres le représentant. Le logiciel TRAC dans le volet « Simulation » permet de faire des estimations nécessitant de sélectionner la solution analytique adaptée au contexte hydrogéologique, correspondant au mieux au transit du traceur dans le système traçage choisi.*

Une fois le plan de traçage et les conditions établies, il a été nécessaire d'aller calibrer le matériel avec les traceurs au laboratoire du BRGM de Montpellier.

Tout d'abord pour ce traçage nous avons utilisés trois fluorimètres disponibles (deux fluorimètres de rivière et un fluorimètre de forage, cf. figure xx). Chaque fluorimètre est relié à un GGUN (boîtier dans lequel une carte micro SD ou une carte flash est insérée pour récupérer les données) à l'aide d'un câble de connectique. Ainsi la calibration a dû se faire pour chaque appareil et pour chaque traceur (deux dans notre situation).

Le protocole de calibration est décrit succinctement ici et disponible en annexe.

- Pesée 1 g de traceur et le diluer avec de l'eau de source (cette manipulation doit se faire dans le noir) dans une fiole de 1L
- Une fois cette manipulation réalisée nous suivons un protocole de dilution pour des solutions à 10, 25 et 100 ppb
- Préparations des solutions mères. M = 1,00g. Solution1 : M dans 1L (à conserver). Solution mère 1 : 10 ml de solution 1 dans 1L : 1000ppb. Solution mère 2 : 20ml de solution 1 dans 1L : 20000ppb.
- Solution à 100 ppb au laboratoire : prélever 10 ml de solution mère 1 et les diluer dans 1L
- Solution à 50 ppb au laboratoire : prélever 10 de solution mère 2 et les diluer dans 1L



- Solution à 10 ppb au laboratoire : prélever 10 ml de solution à 100 ppb et les diluer dans 100 ml.

Ce protocole est réalisé pour chaque traceur. Ainsi nous obtenons ici une solution à 10, 50 et 100 ppb pour la fluorescéine et la même chose pour la sulforhodamine b. Ensuite les trois fluorimètres sont à calibrer. Pour cela le fluorimètre est connecté à un GGU qui est relié à un ordinateur. Le logiciel FLUO est ouvert de manière à récupérer les données. Pour chaque fluorimètre un blanc est réalisé puis les valeurs pour les solutions à 10, 50 et 100 ppb sont récupérées (cf fichier brut en annexe). Ces données sont ensuite insérées dans les fichiers de calibrations de chacun des fluorimètres (cf annexe

avec le fichier cal. Dat du traceur xx) car pour pouvoir lire les données des fluorimètres récupérés sur le terrain à l'aide du logiciel FLUO il est nécessaire d'insérer le fichier de calibration.

Une fois tous les appareils calibrés et le matériel prêt, les bonnes pratiques impliquent la transmission d'une information préalable à l'opération de traçage auprès des autorités et des riverains. Cela permet notamment d'éviter les craintes et alertes liées à la coloration de l'eau, en cas de restitutions accidentelles brutales.

Nous sommes allées installer le matériel sur place (les trois fluorimètres, les trois fluocapteurs et le préleveur automatique ISCO (cf. annexe xxx, détail de l'installation du préleveur autonome) au niveau du point F, cf. plan figure xx). Nous avons décidé d'injecter que la semaine d'après car il est nécessaire avant toute injection de réaliser des prélèvements d'eau d'échantillons témoins. Le protocole mise en place consiste à mettre dans chacun des fluorimètres (points A, B et C) un fluocapteurs, et fluocapteur au niveau du point F avec l'Isco (préleveur autonome) et au niveau des points D et E, sur une cordelette il a été accroché 10 fluocapteurs et un fluocapteur en plus isolé.

Le protocole appliqué avant l'injection a consisté :

- A démarrer le préleveur autonome au niveau du point F pour qu'ils récoltent 24 échantillons de 200 mL correspondant au blanc ;
- Puis nous avons récupérer un fluocapteur au niveau de chacun des points (A, B, C, D, E, F), cela correspond aux blanc et donc à nos témoins.
- Nous avons également lancer les fluorimètres pour vérifier leur fonctionnement et la récolte de données.
- Au niveau des points E et D à chaque passage nous récupérons un fluocapteur sur la cordelette et le fluocapteur isolé et nous changeons le fluocapteur isolé.

En effet comme le protocole que nous avons élaboré inclut l'emploi des détecteurs au charbon actif, il est nécessaire de prévoir l'immersion de fluocapteurs « témoins » à une fréquence adaptée, ainsi deux fois par semaines et cela pendant tout la période de traçage les fluocapteurs sont récupérés et changés.

Les figures 22 et 23 présentent les différents appareils utilisés sur le terrain

De plus en annexe xx, il est possible de retrouver quelques photos de nos installations sur site.



*Figure 22 : Fluocapteurs, aux charbons actifs, apte à fixer les colorants*



Figure 23 : GGUN, à droite la notice d'utilisation GGUN et à gauche le GGUN avec la batterie.

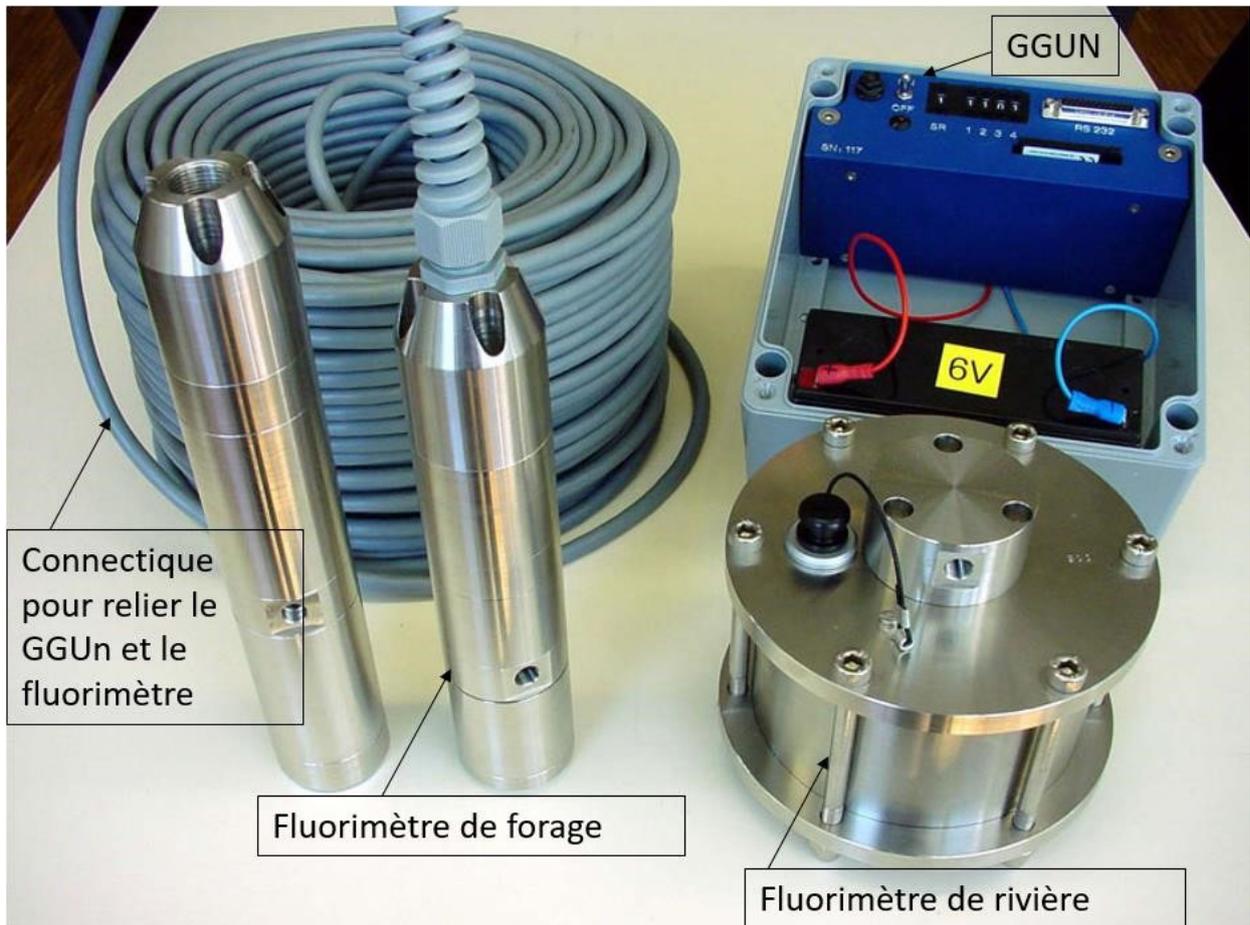


Figure 24 : Les différents matériels nécessaires pour faire le traçage.



### **Mode de suivi et d'analyses**

Lors d'une opération de traçage, la composante analytique est d'une grande importance. Une interprétation fiable ne peut être formulée qu'à partir de résultats basés sur des mesures rigoureusement contrôlées et une logique analytique.

Le mode de suivi et d'analyse dépend de plusieurs facteurs à savoir le type de traceur utilisé (ici fluorescéine et solphorhodamine b), les types de points d'eau suivi (rivière, ruisseau, source et captage dans notre cas). Nous avons utilisé pour le suivi les fluorimètres de terrain de manière à obtenir des résultats en temps quasi-réel et des fluocapteurs pour assurer nos données (moyen secondaire de détection de manière à élargir spatialement le réseau de suivi).

### **Exploitation des données et interprétations**

Les résultats d'un traçage sont illustrés par la courbe de restitution du traceur, donnant l'évolution des concentrations en fonction du temps au point de restitution. A partir de cette représentation, il est possible de déterminer des paramètres simples du transit tels que : le temps d'apparition du traceur, le temps modal, le temps de disparition du traceur, la durée de restitution.

Le protocole d'extraction et d'analyses des données. Depuis le lancer du traçage, toutes les semaines les données sont récupérées sur les trois GGUN (les données sont stockées sur des cartes sd ou des flashcard).

Une carte sd va contenir quatre fichiers (cal. Dat ; calibrat.dat ; f0XX.txt en fonction du numéro du fluorimètre et logrs0.txt). La carte flashcard contient un seul fichier avec les données mesurées. Les fichiers qui nous intéressent sont : l'unique fichier dans la flashcard et le fichier fXXX.txt dans les cartes microsd.

Une fois ces fichiers récupérés, différentes étapes sont à suivre :

- Ouverture de l'application FLUO
- Importation du fichier calibration du fluorimètre qu'on analyse
- Utilisation de l'outil « Read Falshcard » et faire « extract last data from card ». Cette étape permet d'obtenir les données mesurées en milivolts.
- Puis utilisation de l'outil Process MV qui utilise le fichier de calibration pour transformer nos données de mV en données de ppb.

L'annexe 15 illustre l'interface Fluo.

Concernant les résultats, pour le moment à la date de l'écriture de ce rapport les résultats ne sont pas significatifs car le traceur n'a pas été encore restitué. En effet, le versant était pour le moment trop sec et la chasse d'eau après l'injection s'est avéré pour le moment insuffisante. Il est nécessaire d'avoir un apport de pluie en plus. Néanmoins des précipitations sont attendus cette semaine et la commune d'Aiguilles (zone où il y a le traçage) connaît de nombreux épisodes neigeux. Une troisième injection fin mars au niveau de la crevasse, est envisagée. Après la fonte des neiges la quantité d'eau dans le versant sera conséquente et la diffusion des traceurs sera facilité.

### 5.3.4 Analyse statistique des précipitations dans le déclenchement de glissements de terrain

Dans le cadre du projet MIROIR, nous nous intéressons à la problématique du déclenchement de glissements de terrain par la pluie. En effet, les glissements de terrain appartiennent à la famille des risques d'origine hydrologique ce qui signifie que le principal déclencheur est la pluie. Ainsi cette partie vise à étudier le rôle des forçages météorologiques comme déclencheurs de glissements de terrain. Dans un premier des calculs de bilan hydrologique et une analyse statistique a été effectuée sur les données de pluie couvrant la période de 1958 à 2017 au niveau du glissement du Pas de l'Ours dans le Queyras et des glissements présents dans les Gorges de l'Arly en Savoie. Par la suite une base de données de chroniques évènementielles historiques a été réalisée de manière à corréliser les données climatiques aux données évènementielles et repérer des prédispositions saisonnières. La chronique d'évènements comporte des données de glissements de terrain mais également d'éboulements et de crues. Une typologie est créée au sein de la chroniques d'évènements car les réponses aux évènements pluvieux sont différentes. Une fois que les chroniques sont terminées, un travail sur Excel est réalisé. Une étude statistique est effectuée sur les données climatiques pluviométriques puis corrélée à l'inventaire de glissement de terrain sur les deux zones d'études. Puis des seuils pluviométriques sont créés pour déterminer le rôle déclencheur de la pluie sur les glissements de terrain. Bien que la base de données évènementielles ne soit pas très denses pour nos deux zones d'études, le même travail peut ensuite être réalisé sur Matlab à l'aide la bibliothèque Libsvm de manière à automatiser les calculs.

#### Déclenchement hydrologique d'un glissement

Pour rappel un mouvement de terrain est défini comme une descente d'une masse de roche, de terre ou de débris le long d'un versant (Cruden, 1991). La figure 25 illustre la morphologie générale d'un mouvement de terrain et les termes descriptifs utilisés pour décrire un mouvement de terrain. Il existe différents types de mouvements de terrain dont la classification a été créée par Varnes (Varnes, 1978). On distingue ainsi les glissements de type « Rotational landslide », « Translational landslide », « Block slide », les chutes de blocs, les basculements, les coulées de type « Debris flow », « Debris avalanche », « Earthflow » et « creep » et les mouvements latéraux. Cette classification a été récemment revue en 32 types de manière à être compatible avec les termes géotechniques et géologiques des roches et des sols (cf figure 26, Hungr at al., 2014). La tendance à glisser d'une couche est conditionnée par des facteurs de prédisposition tels que la nature (lithologie), la structure (stratification, discontinuités) du sol, la pente, la morphologie et la présence d'eau. Néanmoins le mouvement est initié par un facteur de déclenchement et les précipitations sont le facteur prédominant.

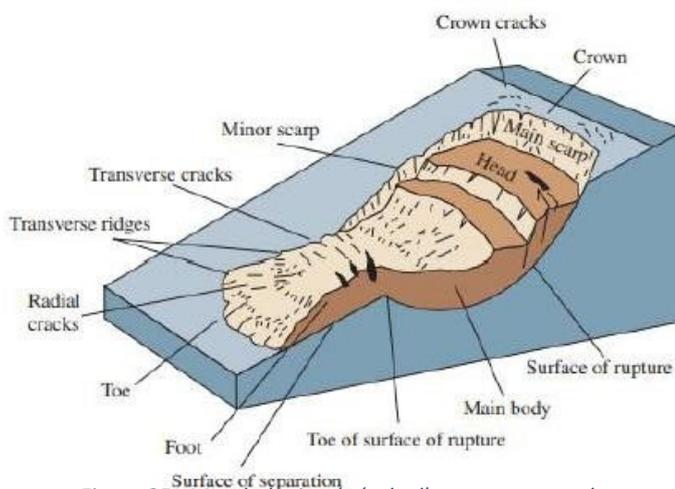


Figure 25 : Morphologie générale d'un mouvement de

D'autres facteurs d'ajoutent également (sismicité, aménagement du sol, action humaine, *terrain* (USGS, 2004). stabilité de la pente).

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice fall</i> <sup>a</sup>	2. <i>Boulder/debris/silt fall</i> <sup>a</sup>
Topple	3. <i>Rock block topple</i> <sup>a</sup>	5. <i>Gravel/sand/silt topple</i> <sup>a</sup>
	4. <i>Rock flexural topple</i>	
Slide	6. <i>Rock rotational slide</i>	11. <i>Clay/silt rotational slide</i>
	7. <i>Rock planar slide</i> <sup>a</sup>	12. <i>Clay/silt planar slide</i>
	8. <i>Rock wedge slide</i> <sup>a</sup>	13. <i>Gravel/sand/debris slide</i> <sup>a</sup>
	9. <i>Rock compound slide</i>	14. <i>Clay/silt compound slide</i>
	10. <i>Rock irregular slide</i> <sup>a</sup>	
Spread	15. <i>Rock slope spread</i>	16. <i>Sand/silt liquefaction spread</i> <sup>a</sup>
		17. <i>Sensitive clay spread</i> <sup>a</sup>
Flow	18. <i>Rock/ice avalanche</i> <sup>a</sup>	19. <i>Sand/silt/debris dry flow</i>
		20. <i>Sand/silt/debris flowslide</i> <sup>a</sup>
		21. <i>Sensitive clay flowslide</i> <sup>a</sup>
		22. <i>Debris flow</i> <sup>a</sup>
		23. <i>Mud flow</i> <sup>a</sup>
		24. <i>Debris flood</i>
		25. <i>Debris avalanche</i> <sup>a</sup>
		26. <i>Earthflow</i>
		27. <i>Peat flow</i>
Slope deformation	28. <i>Mountain slope deformation</i>	30. <i>Soil slope deformation</i>
	29. <i>Rock slope deformation</i>	31. <i>Soil creep</i>
		32. <i>Solifluction</i>

Figure 26 : Nouvelle version de la classification des mouvements de terrain de Varnes (2014).

Il est important de distinguer les fortes pluies sur une courte durée qui peuvent déclencher une instabilité superficielle et donc un phénomène instantané et rapide et la relation entre les pluies et glissements profonds qui est nettement plus dur à interpréter car d'autres mécanismes rentrent en jeu. Une première distinction peut être faite entre les glissements superficiels induits par de fortes pluies et les glissements profonds favorisés par des cumuls de pluies importantes sur de longue période. Dans le cas de notre étude cette distinction reste parfois difficile étant donné que la base événementielle ne donne pas de données précises sur les différents glissements de terrain recensés.

#### a. Chroniques Climatiques

Les données météorologiques (pluie, neige, température, évapotranspiration) proviennent des modèles SAFRAN et COMEPHORE de Météo France. Grâce à une convention recherche entre le BRGM Orléans et Météo France, le partage de données a pu être possible. Les données fournis initialement sont au format NetCDF (Network Common Data Form) (format adapté aux données pluridimensionnelles). Ces données ont été manipulées sous Python en utilisant le modèle Xarray par une Ingénieure du BRGM Orléans avant de nous être transférées sous format texte.

#### Origine des données Réseau SAFRAN

Les données SAFRAN sont des données horaires couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue. Elles sont produites par météo France (centre National de Recherche Météorologique, CNRM). Ces données, au CERFACS, sont utilisées dans le cadre de désagrégation de simulations climatiques afin de produire des données climatiques haute résolution couvrant la France sur la grille SAFRAN. Basée sur le principe de l'interpolation optimale, SAFRAN analyse au pas horaire la température à 2 mètres, le vent à 10 mètres, l'humidité relative à 2 mètres, la quantité et la phase des précipitations, les rayonnements atmosphérique et solaire incident (direct et diffus) ainsi que la nébulosité totale intégrée. Suite à un contrôle qualité et une prise en compte des niveaux d'altitude, les précipitations sont interpolées par zones climatiquement homogènes. Les



données sont interpolées sur une grille de résolution 8 km\* 8km et un fichier de précipitation est constitué par jour (Le Moigne, 2002).

Pour chaque station, les données SAFRAN fournissent des informations journalières sur les variables pluie, neige, évapotranspiration et température (Pluie, Neige, Temp, Evapo). Le jeu de données couvre la période du 01/08/1058 au 31/07/2017, avec un pas de temps journalier. Spatialement, le réseau SAFRAN couvre la France entière et certaines régions alentours (Figure xx).

Pour les gorges de l'Arly quatre stations sont étudiées et dans le Queyras au niveau du glissement du Pas de l'Ours trois stations sont utilisées.

À partir des différents paramètres un bilan hydrologique est réalisé de manière à passer de la pluie brute à la pluie efficace.

### **Réseau COMEPHORE**

Dans le cadre de notre étude, les données COMEPHORE ont également été utilisées. Ces données sont plus précises spatialement et temporellement. Le fichier COMEPHORE contient exclusivement des valeurs de précipitations, sur la période du 01/01/1997 au 31/12/2016 et la résolution temporelle est horaire. Les points de données se trouvent sur une grille régulière avec un maillage de 1km qui couvre l'ensemble du territoire métropolitain français, sans lacunes spatiales ni temporelles. Les données d'entrée utilisées sont les images individuelles de réflectivité radar météorologique pseudo CAPPI de 5 min 512\*512 km<sup>2</sup> du réseau radar français et les pluviomètres horaires et journaliers (de 6 UTC à 6 UTC) à qualité contrôlée. En résumé, ces données sont issues de données de réflectivité radar corrigées puis calibrées à l'aide de mesures de stations pluviométriques, et finalement interpolées avec un pas horaire sur une grille régulière de maillage 1km (Tabary et al., 2012).

### **Calculs**

Pour les chroniques pluviométriques provenant de SAFRAN pour lesquels nous avons les données de Pluie, Température, Evapotranspiration et neige, un bilan hydrologique a été réalisé pour transformer la pluie réelle en pluie efficace. Ainsi pour chaque station SAFRAN les calculs de bilan hydrique ont été conduits au pas journalier.

Pour cela nous avons en paramètre d'entrée :

- La Pluie (P) ou précipitation, parfois appelée pluie brute par opposition à la pluie efficace
- Evaporation (ETR), part de la pluie retournant à l'atmosphère par évaporation directe comme par transpiration des végétaux.

Et nous cherchions à obtenir :

- Evapotranspiration potentielle, évapotranspiration potentielle, quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau du sol étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales. C'est un concept opératoire artificiel, créé pour le calcul de l'ETR
- La Pluie efficace (Pe), ici utilisé au sens strict ce qui correspond à l'infiltration efficace et donc l'alimentation.

On propose ainsi une méthode de calcul d'un des termes du bilan, à partir d'autres termes supposés connus ou au moins estimés, ce qui signifie que l'on pose un modèle. Il est nécessaire de distinguer les quantités physiquement observées des quantités calculées par le modèle. On considèrera qu'on ne fait qu'estimer la pluie efficace.

La figure 17 résume le principe de calcul de la pluie efficace.

La première étape consistait à transformer l'ETR en ETP.

- Etape 1 du calcul : Différence  $ETP - P$
- Etape 2 du calcul : Mise à jour de cette différence, si la différence entre  $ETP - P$  est strictement supérieur à 0 alors on conserve le chiffre sinon on le rehausse à zéro.
- Etape 3 du calcul : Calcul de l'ETR et de la pluie efficace à l'aide de la RFU (estimé à zéro au début) et la RFU Max (estimé à 50 mm dans notre cas, c'est le volume d'eau dans le réservoir). Les formules utilisées sur Excel pour obtenir les différents paramètres qui nous intéressent à savoir ETR, la RU et la PE se sont basés sur le schéma figure 3 qui traduit le principe de calcul de l'ETR et de la Pluie efficace.

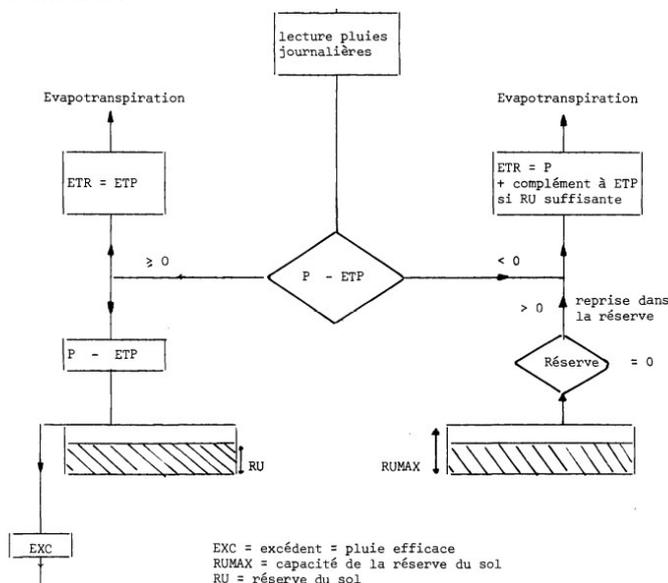


Figure 27 : Principe de calcul de l'ETR et de la Pluie efficace (D.Thierry, 1997).

*Remarque : L'Excel sera fourni en annexe avec le détail des formules et calculs réalisés.*

A l'aide de ces formules nous avons obtenues la pluie efficace journalière pour chaque station Safran pour chaque site d'études. Un autre paramètre était à prendre, la neige. Pour cela la température a été utilisée pour convertir la neige en données pluies. Pour convertir la donnée neige en eau après fonte, il faut tenir compte de la température.

Ainsi, pour convertir la donnée neige en donnée pluie il faut :

- Pour des températures entre 20 et 27 degrés Fahrenheit, il faut multiplier les précipitations par 15 ;
- Pour les températures entre 15 et 19 degrés Fahrenheit, multipliez les précipitations par 20 ;

- Entre 10 et 14, multipliez par 30; entre 0 et 9, multipliez par 40; entre -20 et -1, multipliez par 50, et entre -40 et -21, multipliez par 100.

Une fois la donnée neige convertit en données pluies, les données de pluie efficaces obtenues précédemment ont été additionnées aux données de neige transformés en pluie de manière à obtenir une pluie totale. C'est cet ajout différé de la neige fondue en eau à la pluie qui est utilisé dans les différents calculs de seuils.

Par la suite les données ont pu être vérifiées à l'aide du logiciel ESPER qui est une feuille de calcul Microsoft Excel permettant de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la pluie efficace ou de la recharge d'un aquifère. En fonction des données dont il dispose, l'utilisateur peut choisir les méthodes à appliquer parmi celle qui sont implémentées. Cette feuille contient trois méthodes empiriques (Guttman, Turc et Kessler), trois méthodes de bilan (Thornthwaite, Dingman et Edijatno&Michel) exploitant les données météorologiques journalières et trois méthodes de filtre des chroniques de débits et une méthode d'analyse des variations piézométriques. Une des méthodes intéressantes de cette feuille de calcul est la méthode de Thornthwaite (cf. figure 28) qui prend en compte le paramètre Neige.

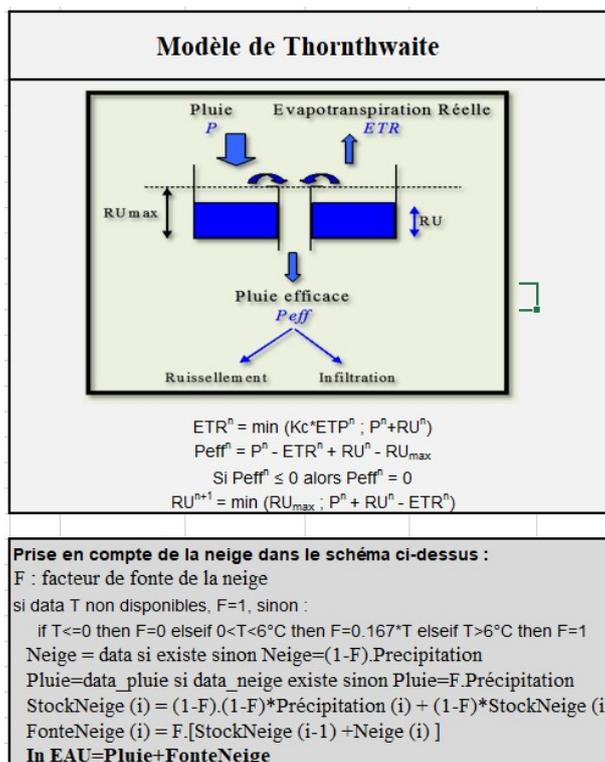


Figure 28 : Méthode de calcul de Thornthwaite, d'après la feuille calcul automatisé ESPER.

## b. Chroniques Événementielles

Pour chaque site d'études une base données de mouvements de terrain est construite à l'aide d'études bibliographiques antérieurs sur les événements passés. La base de données est alimentée par différentes sources : la BDMVT, CD73 ou CD05 [Conseil Départemental], RTM [Restauration des Terrains en Montagne] et des publications historiques dans la presse. Dans cette base de données on



distingue trois types d'évènements : « les crues », « les chutes de blocs » et « les mouvements de terrains de type glissement ». De plus chaque type d'évènement est associé à un chiffre : « 0 » pour les crues, « 1 » pour les chutes de blocs et « 2 » pour les mouvements de terrain de types glissements.

Par la suite pour chaque évènement recensé des données pluviométriques sont associées. Etant donné que les données pluviométriques ne sont disponibles que de 1958 à 2017 une bonne partie des évènements recensés ont dû être mis de côté.

Ainsi à l'issue de ce travail, deux fichiers sont obtenus :

- *Fichier 1 : catalogue évènements : code évènement – date – type d'évènements – intensité/volume – commentaire*
- *Fichier 2 : Pour chaque évènement la chronique de pluie des 120 jours précédents*

Dans la suite, lors du traitement des données, seules les données de types mouvements de terrain ont été utilisées dans le calcul des seuils de déclenchement par la pluie.

### c. Importance des données

De nombreuses études insistent sur l'importance de la qualité des données pluies et des données de glissements dans le calcul de seuils.

Des premières limites de notre étude sont mises en avant ici.

Tout d'abord les données pluviométriques récupérés sur les stations SAFRAN proposent un pas de temps journalier et les stations ne sont pas localisés à l'endroit même où les glissements de terrains ont eu lieu mais dans un rayon de 8km. Il est préférable de manipuler des données pluviométriques de résolution horaire que de résolution journalière. En effet nous avons également récupérer les données de pluies du réseau COMEPHORE qui présentent un pas de temps horaire mais deux problèmes apparaissent dans cette chronique :

- Le seul paramètre présente est la pluie réelle, il n'est donc pas possible de faire un bilan hydrologique pour déterminer la pluie efficace.
- La chronique comprend des données de 1997 à 2016 ce qui est très court et nous empêche de traiter différents évènements de glissements anté 1997.

L'utilisation de données de résolution temporelle grossière augmente les incertitudes sur nos calculs de seuils.

Concernant le jeu de données de la base de données évènementielles, plusieurs points sont à mettre en avant. Le jeu de données a dû être raccourci de 90 évènements à 11 évènements car les données pluviométriques ne démarrent qu'en 1958. Par manque d'informations (notamment concernant les publications scientifiques), notre base évènementielle n'a pas pu renseigner pour chaque mouvement de terrain le type de glissement et le degré initial de la stabilité des pentes. En revanche il a été possible de déterminer la saison et la génération du glissement (à savoir si c'est un déclenchement ou une réactivation). Les résultats des seuils que nous calculons par la suite dépendent directement des inventaires préparés à l'amont. Ainsi pour obtenir une interprétation correcte et pour

pallier aux manques de données de la chronique événementielle il a été décidé de densifier nos chroniques d'évènements. Pour chaque évènement de type glissement de terrain il a été considéré que quatre jours avant et quatre jours l'évènement était soit en cours d'activation soit en activité. Cela nous a permis d'obtenir 99 évènements de types glissements de terrain.

#### d. Explication des calculs de seuil, résultats et interprétations

##### **Méthode**

D'après la définition du Larousse, Seuil pluviométriques de déclenchement un seuil est la « valeur d'un paramètre dont dépend un phénomène, au-dessous de laquelle celui-ci ne se produit pas ». Un seuil minimal, niveau le plus bas en dessous duquel un phénomène ne se produit pas, est à distinguer d'un seuil maximal qui représente le niveau à partir duquel un processus se produit toujours (Guzetti et al., 2007). Dans le domaine des glissements de terrain, les seuils rencontrés sont des seuils minimaux par souci sécuritaire.

La détermination des seuils pluviométriques se réalisent sur Excel. Deux fichiers sont créés au sein d'une feuille Excel, « Seuil\_opti » et « Optimisation1 ». La feuille « Seuil\_opti » contient les données de pluie efficace en [mm] pour la station qui nous intéresse et pour les dates allant du 01/08/1958 au 31/07/2017, pour chaque date et données de pluies efficaces on associe un code événementiel, « 0 » pour un non-événement et 1 pour un événement de type glissement de terrain. Par la suite la somme cumulée sur 5 jours, 10 jours, 15 jours, 30 jours, 60 jours, 90 jours et 120 jours. Le feuille « Optimisation1 » contient les dates de glissements recensés avec la chronique événementielle pour lesquels les quatre jours anté et les quatre jours post événements sont gardés. Les dates de glissements sauvegardés correspondent donc aux événements avec le code 1 sur la Seuil\_opti. Ainsi pour chacun de ces événements récentes la somme cumulée pour 5 jours, 10 jours, 15 jours, 30 jours, 60 jours, 90 jours et 12 jours sont récupérés. Ensuite toujours sur la feuille « Optimisation 1 », un statistique sur les événements est réalisé pour chaque somme cumulée. Ainsi pour chacune des sommes cumulées de tous les événements, le minimum (MIN), le maximum (MAX), la moyenne (MOYENNE), le quartile à 25% (QUARTILE 25%), la médiane (MEDIANE), le quartile 75% (QUARTILE 75%), le centile 90 (CENTILE). De la même manière, une étude statistiques est réalisée cette fois si sur toutes les dates et toutes les données des sommes cumulées du fichier « Seuil\_Opti ».

Une fois ces calculs statistiques réalisés, une fonction Optimisation est utilisée pour calculer des seuils pour 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 jours. La ligne optimisation est rajouté dans le tableau des statistiques des événements et est initialisée avec des valeurs à 10 (cf. figure 29).

Stat des évènements	SC 5j	SC 10 j	SC 15 j	SC 30 j	SC 60 j	SC 90 j	SC 120 j
MIN	0	0	0	0	60,1466667	95,9266667	122,9725
MAX	159,593333	164,226667	212,4	246,1	439,56	654,26	808,86
MOYENNE	32,963367	60,1119192	75,7789226	117,463182	178,323064	232,844571	295,661625
QUARTILE 25%	9,28	27,21	37,27	70,0316667	93,6283333	135,852917	162,27
MEDIANE	23,5	45,46	48,81	103,731667	164,546667	174,226667	265,6
QUARTILE 75%	42	91,165	109,22	154,4	255,163333	268,53	326,836667
CENTILE 90	75,21	129,752	163,458667	218,216667	287,8	329,746667	369,223333
<b>OPTIMISATION</b>	<b>10</b>						

Figure 29 : Synthèse des calculs statistiques sur les sommes cumulées.

Dans le fichier « Seuil\_opti », une fonction seuil est créé pour les données pluvio cumulées sur 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 jours.



Un exemple de cette fonction seuil est décrit pour les sommes cumulées sur 5 jours :

Ainsi « Si la valeur de la somme cumulée sur 5 jours est supérieure à la valeur optimisation du fichier stat évènement sur 5 jours, alors la valeur affichée dans la colonne est 1 sinon 0 ». Le même processus est réalisé pour chaque somme cumulée.

Une fois les seuils calculés, des scénarios vont être réalisés. Dans notre cas 6 scénarios vont être réalisés.

- Scénario 1 : Seuil 15j-30j-60j sans contraintes
- Scénario 2 : Seuil, 15j-30j-60j avec la contrainte que si seuil 15j=1 alors soit seuil 30jours = 1 soit seuil 60 jours = 1
- Scénario 3 : Seuil, 15j-30j-60j avec la contrainte que si seuil 30j=1 alors soit seuil 15jours = 1 soit seuil 60 jours = 1
- Scénario 4 : Seuil 10 j, 30j, 90j, sans contraintes
- Scénario 5 : Seuil 10 j, 30j, 90j avec la contrainte que si seuil 10j=1 alors soit seuil 30jours = 1 soit seuil 90 jours = 1
- Scénario 6 : Seuil 10 j, 30j, 90j avec la contrainte que si seuil 30j=1 alors soit seuil 10jours = 1 soit seuil 90 jours = 1

Le détail d'un des scénarios va être expliqué pour comprendre le principe du calcul, celui du scénario 1.

Dans un premier temps dans la feuille « Seuil\_Opti » une colonne est rajoutée « Seuil 15j, 30j, 60j » et la formule suivante est rentrée : Si la somme du seuil sur 15j, du seuil sur 30j et du seuil sur 60j pour une date et un évènement donné est égal à 3 alors, la valeur affichée est 1 sinon 0. Ensuite des « vrais positifs », « Vrai négatif », « des Faux positifs » et des « Faux négatifs » sont calculés.

Dans un test de classification binaire, un résultat est dit vrai positif lorsqu'un item est correctement détecté par le test, faux positif lorsqu'il est déclaré positif alors qu'il ne l'était pas, faux négatif dès lors que l'item est déclaré négatif alors qu'il était en réalité positif et vrai négatif dès lors qu'il est déclaré comme négatif.

Ainsi pour le vrai positif, on vérifie que la somme de la colonne évènement et la colonne seuil 15j, 30j 60j est égale à 2 si oui la valeur 1 est affichée sinon 0, pour le vrai négatif on vérifie si la somme évènement et seuil égale bien à zéro et si c'est le cas on affiche la valeur 1 sinon la valeur 0 et pour les faux positifs et faux négatifs on regarde si la somme de la colonne évènement et seuil égal à 1 alors la valeur 1 est affichée sinon la valeur 0.

Une fois tous ces calculs réalisés on crée une « fonction à optimiser » dans la feuille « Optimisation1 ». Dans un premier temps la somme des VP, VN et FP\_FN est calculée, puis les VP et VN sont maximisés les FP-FN sont minimisés. La fonction à optimiser correspond ensuite à la différence entre la maximisation des VP et la minimisation des FP-FN. Pour optimiser la fonction, l'outil « solver » sur excel est utilisé. Dans cette outil on sélectionne la fonction à optimiser (cf. formule au-dessus), on sélectionne la plage de données soit dans les stat évènements cela correspond au données de statistiques sur les SC de 15/30/60 jours comme on teste le seuil 15/30/60jours puis on établit trois contraintes : la valeur d'optimisation de SC15jours doit être inférieur ou égale au maximum des SC515jours de même pour les valeurs sur 30 jours et 60 jours. Une fois toutes ces données entrées le solveur est lancé et on obtient des nouvelles valeurs pour la ligne optimisation ainsi que des nouvelles

valeurs pour la fonction à optimiser les VP, VN, FP-FN. Ce sont ces seuils qui sont par la suite interprétés. Une partie de ces étapes sont résumés dans la figure 30.

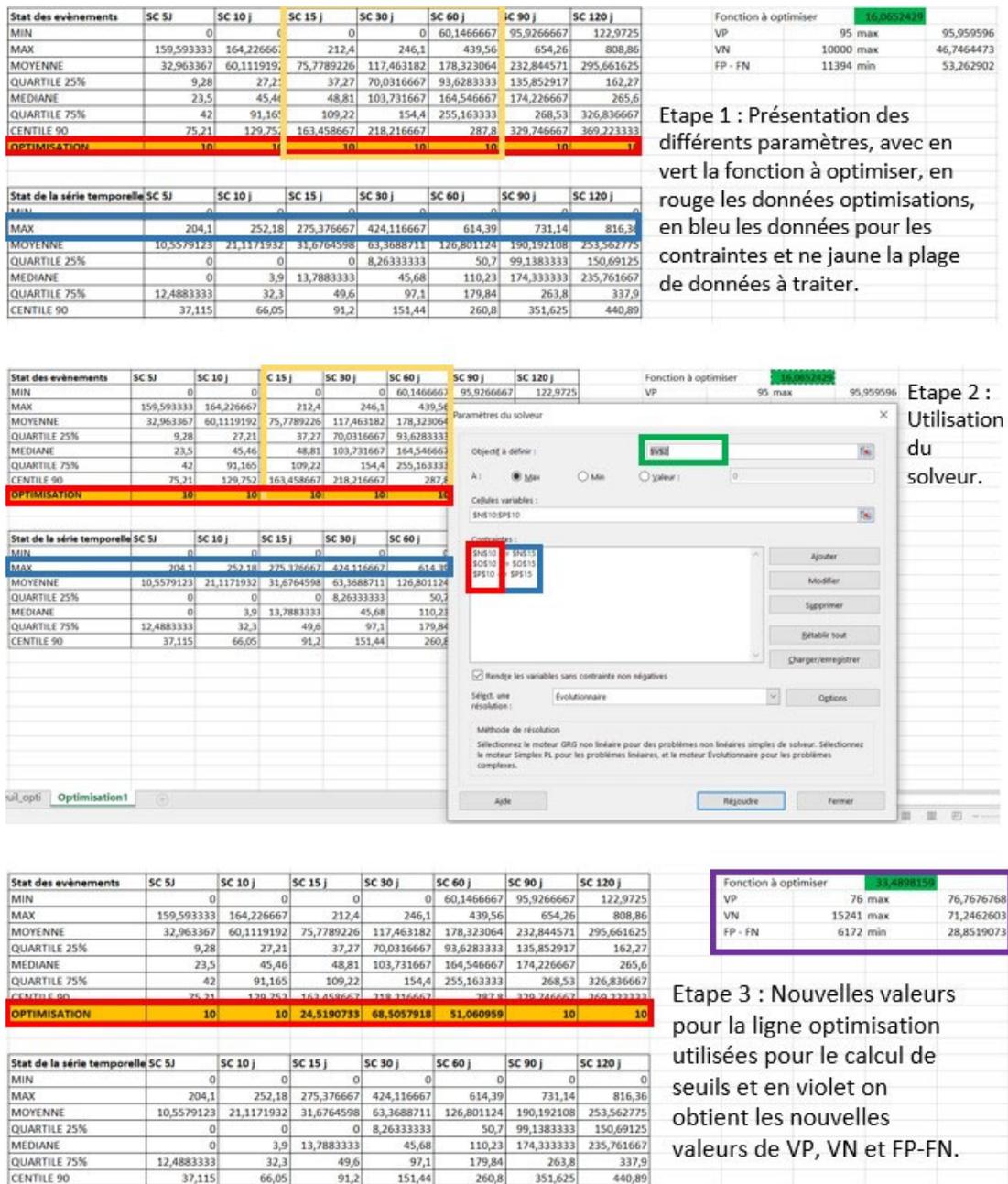


Figure 30 : Explications des étapes de calculs réalisés dans le solveur pour déterminer le calcul des seuils en fonction des différents types de scénarios.

e. Calcul de seuil sur Matlab



### Utilisation de la bibliothèque libsvm one class

LIBSVM est une bibliothèque pour les machines vectorielles de support. C'est un logiciel intégré pour la classification des vecteurs de support, (C-SVC, nu-SVC), la régression (epsilon-SVR, nuSVR) et l'estimation de distribution (SVM à classe unique). Il prend en charge la classification multiclassées. Une classification vectorielle implique la séparation des données en ensembles de formations et de test. Chaque donnée contient « une valeur cible » c'est-à-dire les étiquettes de classe et plusieurs « attributs » (les caractéristiques ou variables observées). L'objectif d'une SVM est de produire un modèle qui prédit les valeurs cibles des données test en tenant compte uniquement des attributs des données test.

Préparation des données : le SVM exige que chaque instance de données soit représentée comme un vecteur de nombres réels. Par conséquent, s'il y a des attributs catégoriels, il est nécessaire dans un premier temps de convertir en données numériques. Ainsi dans les chroniques réalisées ici pour la modélisation les données catégorielles du type événementielles ont été transformés en données numériques. Ainsi l'évènement « crues » reçoit le chiffre 0, l'évènement « chutes de blocs » reçoit le chiffre 1 et l'évènement « glissements » reçoit le chiffre 2.

Par soucis de temps, les simulations libsvm n'ont pas pu être réalisés avant la présentation de ce rapport. Les tests sont toujours en cours d'exécution.

#### f. Perspectives futurs

Cette étude avait pour objectif d'approfondir le lien entre la pluviométrie et les glissements de terrain. Une fois les données de pluviométries étudiées et reliées à l'occurrence de glissements de terrain, il serait intéressant de comparer ces données avec des jeux de données climatiques dégradées issus de scénarios GIEC (Arias et al., 2021) de manière à déterminer les tendances hautes et basses de cumuls et moyennes de pluies et la prédisposition saisonnières pour le déclenchement des catastrophes naturelles. Bien que les seuils ne soient pas assez fiables dû aux manques de précisions dans les données, la démarche est à poursuivre de manière à pouvoir valider les seuils dans un contexte opérationnel. Par la suite, ils seraient intéressant de comparer ces seuils avec des seuils définis à une échelle plus vaste et les seuils doivent être présentés avec des valeurs trouvées dans la littérature.

*Remarque : les mêmes calculs seront faits pour le site dans le Queyras.*



## Conclusion

Ce stage m'a permis de découvrir différents domaines de la géotechnique autour des risques naturels et les différents domaines de l'hydrogéologie. Le travail sur différentes tâches en accompagnement des ingénieurs m'a permis d'apprendre la méthodologie de réflexion et de réalisation des différents sujets abordés dans le domaine de l'hydrogéologie et des risques naturels. J'ai également appris à utiliser différents logiciels de calculs, de méthodologies et de simulations. Ainsi l'ensemble des projets se sont effectués au travers de nombreux jours de terrains en complément du travail en bureau.

Les missions de terrains ont été l'occasion de voir concrètement le déroulement des phases opérationnelles des projets et les zones d'études concernées ce qui permet d'apporter une dimension à la fois pratique, technique et concrète au métier d'un ingénieur.

J'ai eu la chance de pouvoir prendre en main plusieurs missions en réalisant la phase d'études et d'analyses, les visites de terrain, l'acquisition de données, le traitement des données, aux interprétations. Cette mission m'a montrée que la prise de décision et la rigueur sont des éléments essentiels car les décisions impactent le projet et les acteurs qui y participent. Bien qu'une mission ait été pleinement détaillée dans ce rapport, il est essentiel de remarquer que toutes les études réalisées durant ce stage ont été intéressantes et ont permis de développer et augmenter mes connaissances personnelles.

Certaines difficultés et imprévus ont été rencontrés (notamment sur les phases de terrain, ce qui a nécessité de l'adaptation mais l'échange avec les différents ingénieurs a permis de pallier à ces problèmes. Enfin, j'ai également pu expérimenter plusieurs aspects du travail en bureau d'étude, à savoir l'expérience de terrain avec des visites de site et une expérience humaine grâce aux travaux d'équipes et relationnelles, aux différentes réunions, aux plannings d'organisation, aux partages de savoir-faire et aux réunions avec les différents partenaires de chaque mission. Plus particulièrement j'ai pu découvrir les facettes pluridisciplinaires d'un ingénieur en risques naturels et hydrogéologue et la nécessité de mettre à profit ses connaissances techniques, ses qualités d'observations et son sens critique pour répondre à des problématiques variées.

## Références

Arias, Bellouin, Coppola, Jones, Krinner, Marotzke, Naik, Palmer, Plattner, Rogelj, Rojas, Sillmann, Storelvmo, Thorne, Trewin, Rao, Adhikary, Allan, Armour, Bala, Barimalala, Berger, Canadell, Cassou, Cherchi, Collins, Collins, Connors, Corti, Cruz, Dentener, Dereczynski, Luca, Niang, Doblas-Reyes, Dosio, Douville, Engelbrecht, Eyring, Fischer, Forster, Fox-Kemper, Fuglestedt, Fyfe, Gillett, Goldfarb, Gorodetskaya, Gutierrez, Hamdi, Hawkins, Hewitt, Hope, Islam, Jones, Kaufman, Kopp, Kosaka, Kossin, Krakovska, Lee, Li, Mauritsen, Maycock, Meinshausen, Min, S.Monteiro, Ngo-Duc, Otto, Pinto, Pirani, Raghavan, Ranasinghe, Ruane, Ruiz, Sallée, Samset, Sathyendranath, Seneviratne, Sörensson, Szopa, Takayabu, Treguier, Hurk, Vautard, Schuckmann, Zaehle, Zhang, and Zickfeld: Technical Summary (Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 15 I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, 2021.

BRGM. Géorisques [en ligne]. 2019 <https://www.georisques.gouv.fr/> (15/08/2021)

BRGM. Infoterre [en ligne]. 2019 <http://infoterre.brgm.fr/> (15/08/2021)

BRGM, Validation du logiciel TRAC : Aide à l'interprétation de traçages en milieu poreux, Septembre 2012

D. THIERY. : Calculs de pluie efficace au pas journalier avec les sous (programmes climat et clidat°), Avril 1977

DURVILLE, J-L. SEVE, G. Techniques de l'ingénieur, construction : Stabilité de pente, glissement en terrain meuble.

EQUILBEY E, BAUDIN T.: Gorges de l'Arly (Savoie) : Synthèse géologique et géotechnique - préliminaire. Rapport BRGM/RP-65675-FR. 28 octobre 2015.

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière. Géoportail [en ligne], 2020. <https://www.geoportail.gouv.fr/> (15/08/2021)

LE MOIGNE, P. : Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN, June 2002

PLUMELLE, C. Géotechnique : Chapitre VII, géotechnique. Cnam. Paris, 2003

LANINI S., CABARELLO. Y., LE COINTE. P., Manuel Utilisateur ESPERE, Version 2, Rapport BRGM/RP-60538FR, Février 2020

Service RTM des Hautes-Alpes, Rapport d'expertise CATNAT, Mai 2018

Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C., and Soubeyroux, J.-M.: A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results, 6, 2012.

## Annexes

### Annexe 1 : Quelques illustrations des glissements en Savoie



Figure 31 : Illustrations de quelques photos sur le terrain de l'Arly. Figure A : glissement sur la rive gauche de l'Arly; Figure B : fissure sur la route; Figure C : mise en place de filets par blocs dans le Val d'Arly; Figure D : conséquences des mouvements de terrain dans le Val d'Arly et Figure E : Image satellite de la zone d'étude.

Annexe 2 : Quelques illustrations de la zone d'étude dans le Queyras

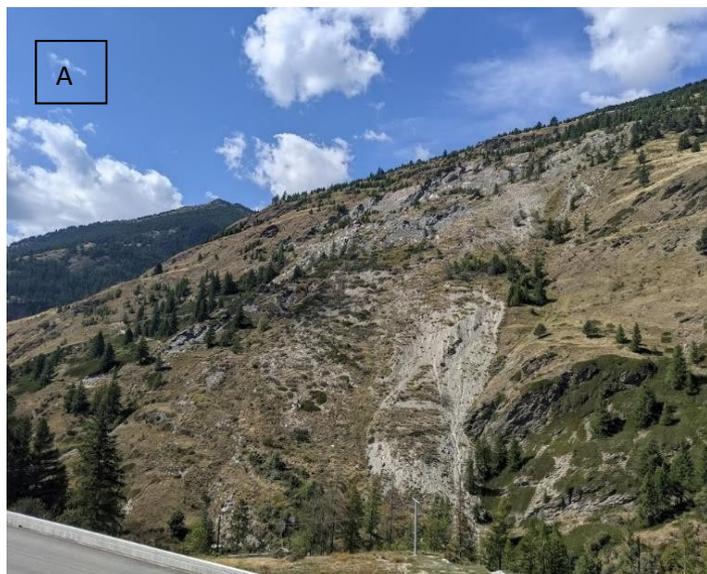


Figure 32 : Figure A : vue globale de la zone de glissements du Pas de l'Ours; Figure B : Conséquence du glissement de terrain sur la route; Figure C : autre vu des conséquences du glissement de terrain; Figure D : Fissure sur la route.

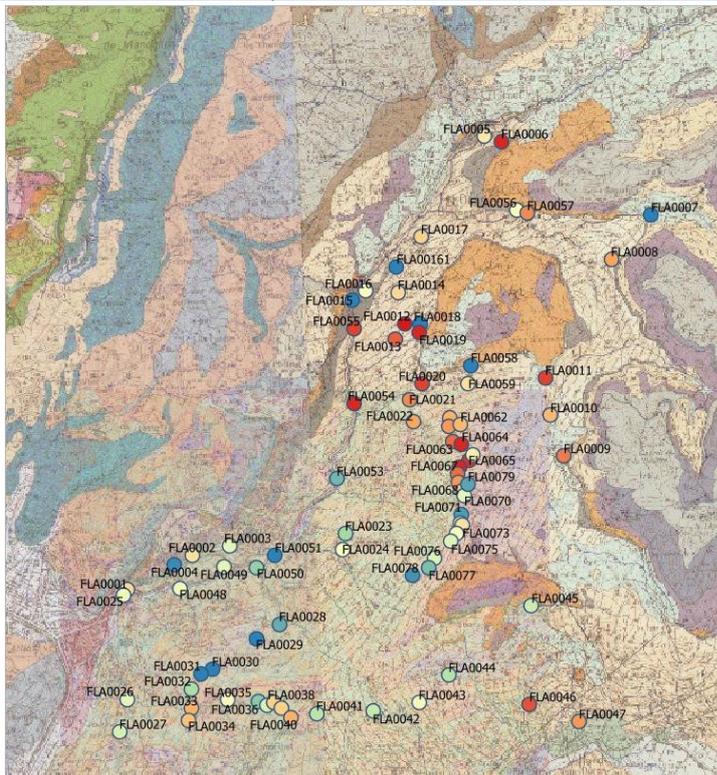
Annexe 3 : Synthèse des données historiques sur les différents mouvements de terrain dans l'Arly

Date	Evénement, information	Lieu	Détails	Code	Type d'événement	localisation station pluvio	localisation station pluvio_reduced
1743	Chue Arly	Secteur de Conflans	Déjà considérées que les glissements, avant coulés, dans le plan de Saint-Etienne...	1	0	0	0
1756mai	Glissement	Buisseau du Flon	Glissement versant est...	2	2	2	2
17700929	Chue Arly	Secteur du pont de Conflans	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	4	0	0	0
17700926	Chue Arly	Gorges de l'Arly	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	4	0	0	0
178711	Chue Arly	Secteur du pont de Conflans	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	5	0	0	0
179012	Chue et glissement	Conflans	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	6	2	0	0
181911	Chue Arly	Roche confluence Isère	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	8	0	0	0
185908	Instabilité versant	RD Arly entre Héry et ruisseau de St Flon	Instabilité versant...	9	2	2	2
185410	Eboulement	Secteur du torrent du Flon	Eboulement...	10	1	1	1
185369	Chue Arly		Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	11	0	0	0
185911	Chue Arly	Moulin Ravier	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	12	0	0	0
18781031	Chue Arly	Gorges Arly	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	13	0	0	0
1877	Divers		Divers...	14	4	1	1
18781100	Chue Arly	Gorges Arly	Chue de terrain qui se situe en un point pour pouvoir passer...	15	0	0	0
187810	Eboulement	Gorges Arly	Eboulement...	16	0	0	0
188311	Eboulement	Gorges Arly	Eboulement...	17	1	1	1
1887	Glissement	Cohencroz	Glissement...	18	2	1	1

Annexe 4 : Synthèse des données historiques sur les différents mouvements de terrain dans le Queyras

Date	Evénement, information	Lieu	Nature du phénomène	Détails	Code	Type d'événements	localisation station pluvio	localisation station pluvio_reduced
avr-02	Glissement de versant	Aiguilles	UNE PARTIE DU MUR DE	LE GLISSEMENT DE	1	1	1	1
mars-14	Glissement de versant	Aiguilles	Réactivation d'un glissement de	un "gros paquet" schiste	2	2	2	2
15-mai-14	Réactivation du glissement	Aiguilles	Chute d'un bloc de 0,5m³ sur	Paquet schisteux volumi	3	2	1	1
Septembre et Octobre 2016	Chutes de blocs	Aiguilles, Pas de l'Ours	Chutes de blocs	quelques chutes de bloc	4	1	1	1
22 décembre 2016	Chutes de blocs	Aiguilles, Pas de l'Ours	Chutes de blocs	Route départementale to	5	1	1	1
25-déc-16	Chutes de blocs	Aiguilles, Pas de l'Ours	Chutes de blocs	Route départementale to	6	1	1	1
printemps 2017	Glissement de terrain	Aiguilles	Amplification rapide du glisse	ment	7	2	1	1
mars-17	Chutes de blocs	Aiguilles, Pas de l'Ours	Chutes de blocs	NA	8	1	1	1
07-avr-17	Coulée boueuses	Aiguilles, Pas de l'Ours	Coulée boueuses	Destruction du mur de p	9	2	1	1

Annexe 5 : Localisation des différents points de mesures réalisés dans le Val D'Arly



Annexe 6 : Synthèses des stéréos réalisés grâce aux mesures de stratigraphies mesurés sur le terrain

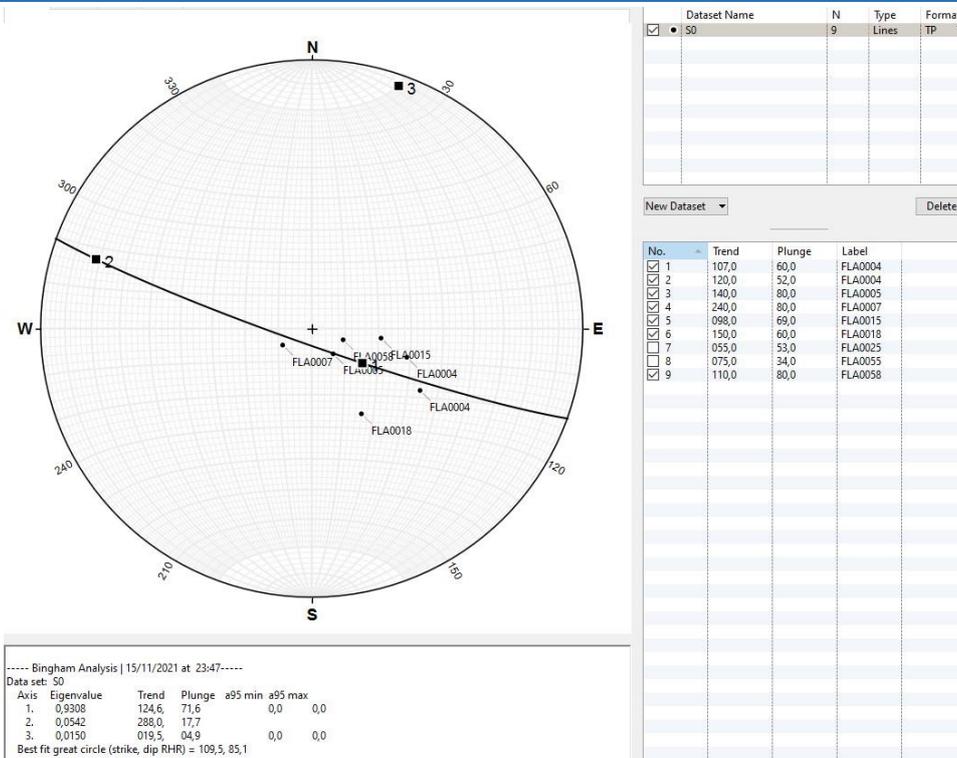


Figure 33 : Stéréo S0

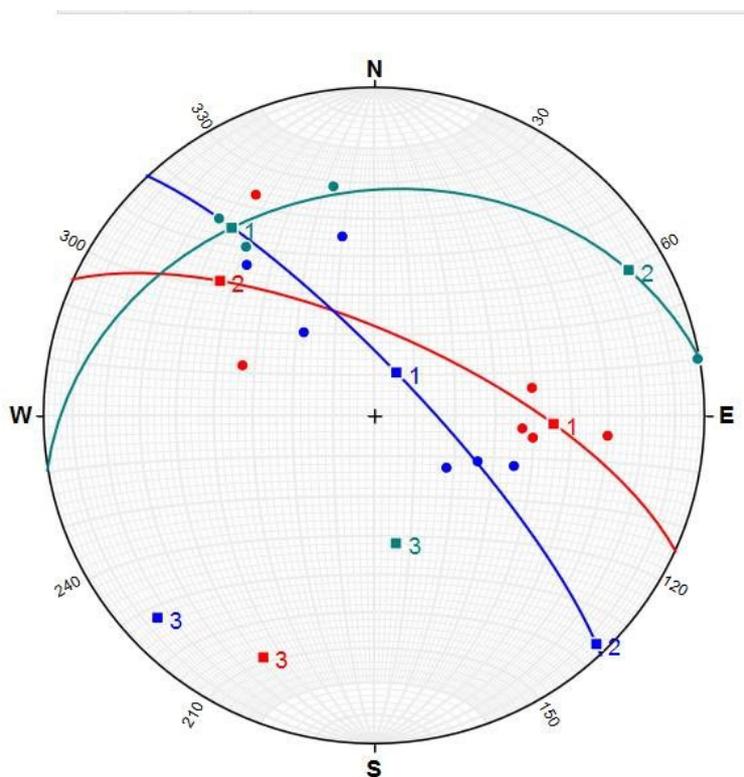


Figure 34: Affleurement détaillés, calcul des axes de plis à partir des plans de stratification. En vert l'affleurement FL0058, en bleu l'affleurement FLA003 et en rouge l'affleurement FLA0002.

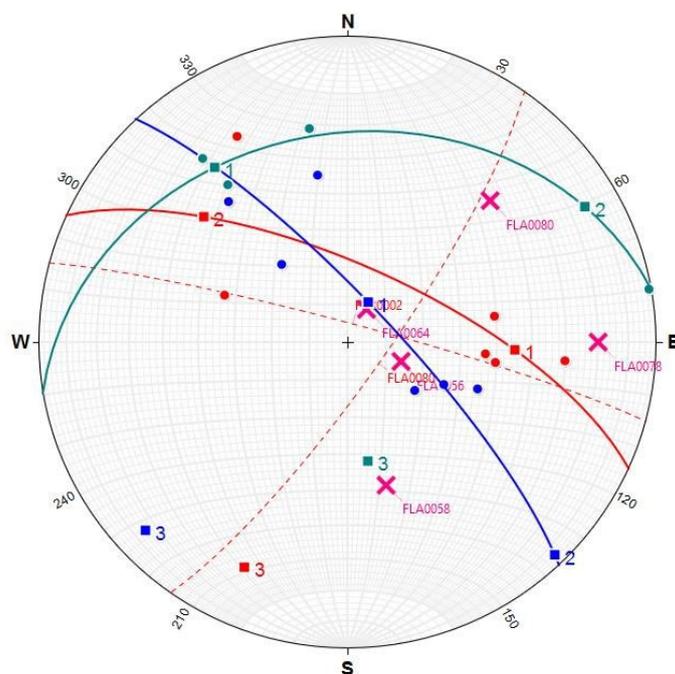


Figure 35 : Axe de plis mesurés ajoutés au stéréo précédent. Axes de plis mesurés avec la croix rouge et lignes pointillées correspondent aux surfaces axiales mesurées.

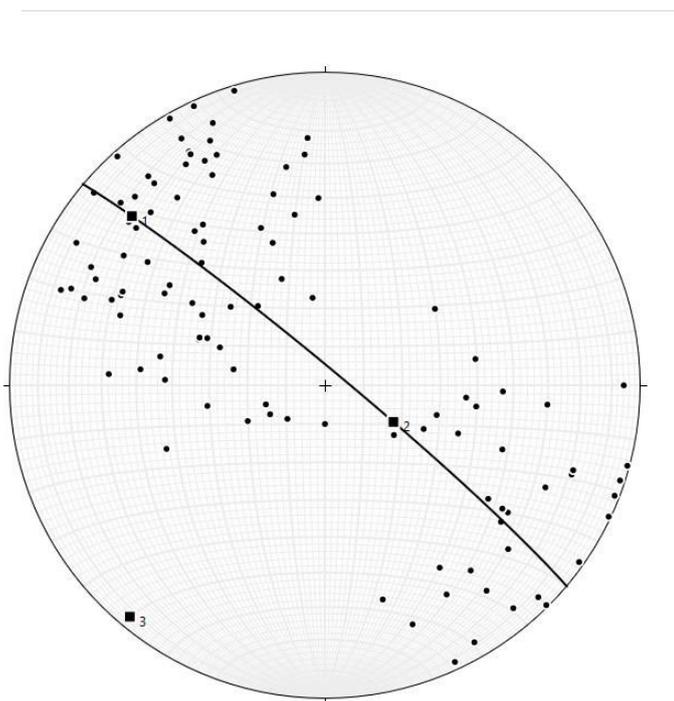


Figure 36 : Axe de pli mesuré avec l'ensemble des autres mesures (axe du pli de 04 220).

#### Annexe 7 : Liste des points mesurés lors des prélèvements d'eau dans les Gorges de l'Arly

Points	Nom	Adresse	Coordonnées GPS		Nature de la source	Date d'intervention	Actions menées sur le terrain
			X	Y			
1	La Molette	Captage la Molette - > prélèvement dans le drain (pour éviter de monter jusqu'au captage)	45.747863994911313	6.458615977317095	Eaux souterraines dans un drain	15/09/2021	Physicochimie
2	Malatrait	Prélèvement dans la partie droite du captage de Mont Gombert	45.746018970385194	6.447136960923672	Eaux dans le captage (eaux souterraines)	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
3	Le mont Gombert	Prélèvement dans la partie gauche du Mont Gombert	45.745907993987203	6.447060015052557	Eaux dans le captage (eaux souterraines)	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
4	Le Manchu	Captage du Manchu	45.745895002037287	6.478033997118473	Eaux dans le captage (eaux souterraines)	15/09/2021	Physicochimie

5	Le Char	Captage le Char (soit au niveau de l'AEP actif soit si cela n'est pas possible faire un peu plus loin dans le	45.76702100224793	6.497164014726877	Eaux dans le captage (eaux souterraines)	15/09/2021	Physicochimie
		secteur des chandelières correspondant au point 8 bis sur la carte)					
6	Le Moulin	Cernix au niveau du captage AEP au niveau du point BSS du Moulin	45.785302016884089	6.503103012219071	Eaux superficielles (captage de ruisseau)	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
7	Plateau des Saisies	Zone humide sur le plateau des Saisies	45.764929968863726	6.51109297759831	Eaux superficielles dans une zone humide	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
8	Nant Cortay	Nant Cortay	45.76354200951755	6.491925995796919	Eaux superficielles d'une rivière	15/09/2021	Physicochimie
9	Le Diat	Emergence au niveau d'une fissure de route (si problème alternative de prélever dans la rivière un peu plus loin)	45.754461977630854	6.481646010652185	Eaux superficielles d'une rivière	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
10	Nant Boulou	Nant Boulou	45.745916962623596	6.470187027007341	Eaux superficielles d'une rivière	15/09/2021	Physicochimie
11	Arly Aval	Arly route	45.751362014561892	6.435299031436443	Eaux superficielles d'une rivière	15/09/2021	Physicochimie et métaux lourd
12	Arly amont	Arly route	45.759304035454988	6.472789021208882	Eaux superficielles d'une rivière	15/09/2021	Physicochimie

Annexe 8 : Synthèse des modes opératoires et méthodes d'analyses des éléments majeurs pour les prélèvements d'eaux réalisées dans les Gorges de l'Arly

Points	Nom	Synthèse des résultats d'analyses	Méthodes														
1	La Molette	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/09/2021</p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/09/2021</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie		
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
2	Malatrait	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/09/2021</p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/09/2021</p> <p>Date d'analyse: ICP_MS 16/09/2021</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
3	Le mont Gombert	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/09/2021</p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/09/2021</p> <p>Date d'analyse: ICP_MS 16/09/2021</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																

4	Le Manchu	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/0</p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/0</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie		
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
5	Le Char	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/0</p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/0</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie		
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
6	Le Moulin	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau 17/0</p> <p>Date d'analyse: ICP_AES 17/0</p> <p>Date d'analyse: ICP_MS 16/0</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																

7	Plateau des Saisies	<b>Mise en route des analyses</b> Date d'analyse: ICP_MS Date de mise en analyse: Chimie Eau Date d'analyse: ICP_AES	16/	<b>Méthodes :</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
			Méthode		Description													
			NF EN ISO 10304-1		Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide													
			NF EN ISO 11885		Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)													
			NF EN ISO 14911		Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous													
			NF EN ISO 15681-2		Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)													
			NF EN ISO 17294-2		Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)													
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																	
17/																		
17/																		

8	Nant Cortay	<b>Mise en route des analyses</b> Date de mise en analyse: Chimie Eau Date d'analyse: ICP_AES	17/	<b>Méthodes :</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
			Méthode		Description											
			NF EN ISO 10304-1		Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide											
			NF EN ISO 11885		Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)											
			NF EN ISO 14911		Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous											
			NF EN ISO 15681-2		Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)											
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie															
17/																

9	Le Diat	<b>Mise en route des analyses</b> Date d'analyse: ICP_AES Date de mise en analyse: Chimie Eau Date d'analyse: ICP_MS	1	<b>Méthodes :</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
			Méthode		Description													
			NF EN ISO 10304-1		Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide													
			NF EN ISO 11885		Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)													
			NF EN ISO 14911		Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous													
			NF EN ISO 15681-2		Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)													
			NF EN ISO 17294-2		Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)													
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																	
1																		
1																		

10	Nant Boulou	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau</p> <p>Date d'analyse: ICP_AES</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie		
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
11	Arly Aval	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date d'analyse: ICP_AES</p> <p>Date d'analyse: ICP_MS</p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 17294-2</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 17294-2	Qualité de l'eau — Dosage par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																
12	Arly amont	<p><b>Mise en route des analyses</b></p> <p>Date de mise en analyse: Chimie Eau</p> <p>Date d'analyse: ICP_AES</p>	<p><b>Méthodes :</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Méthode</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NF EN ISO 10304-1</td> <td>Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 11885</td> <td>Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 14911</td> <td>Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 15681-2</td> <td>Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)</td> </tr> <tr> <td>NF EN ISO 9963-1</td> <td>Alcalinité par Volumétrie</td> </tr> </tbody> </table>	Méthode	Description	NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide	NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)	NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous	NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie		
Méthode	Description																
NF EN ISO 10304-1	Dosage des anions dissous par chromatographie des ions en phase liquide																
NF EN ISO 11885	Qualité de l'eau — Dosage par spectroscopie d'émission optique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES)																
NF EN ISO 14911	Dosage en Chromatographie Ionique cations dissous																
NF EN ISO 15681-2	Dosage des Orthophates et du Phosphore total par Analyse en flux (FIA et CFA)																
NF EN ISO 9963-1	Alcalinité par Volumétrie																

Annexe 9 : Quelques photos des prélèvements et mesures faites dans l'Arly pendant la campagne de prélèvements d'eau (prélèvements d'eau, mesures des paramètres physico chimiques)

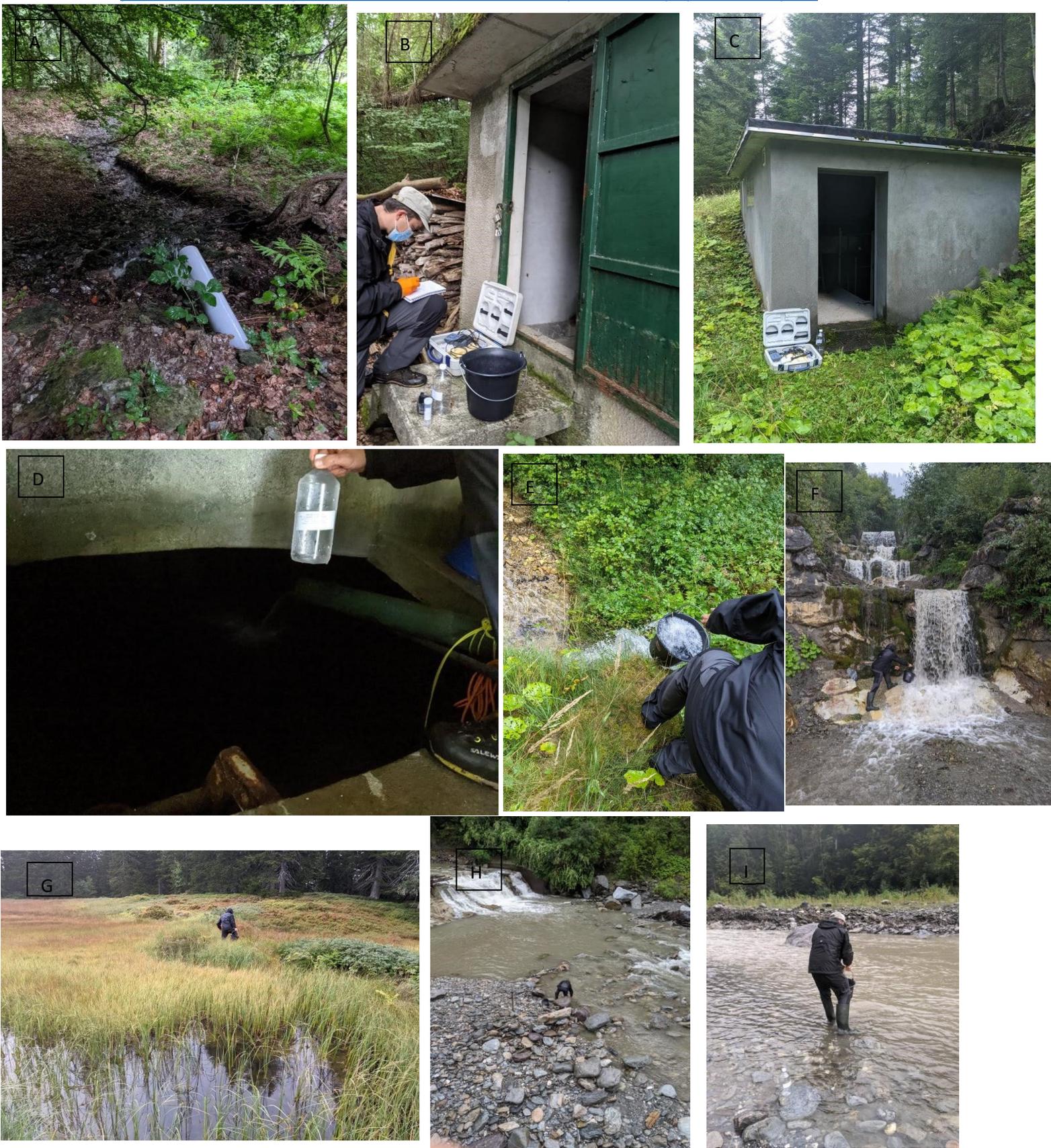


Figure 37 : Figure A : LA MOLETTE ; Figure B: MALATRAIT ; Figure C: LE MANCHU ; Figure D LE MANCHU ; ; Figure E: LE MOULIN; Figure F: NANT CORTAY ; Figure G: LES SAISIES ; Figure H: ARLY AVAL ; Figure I: ARLY AMONT

Annexe 10 : Quelques photos des prélèvements et mesures faites dans le Guil pendant la campagne de prélèvements d'eau (prélèvements d'eau, mesures des paramètres physico chimiques, mesures du niveau d'eau dans les piézomètres).

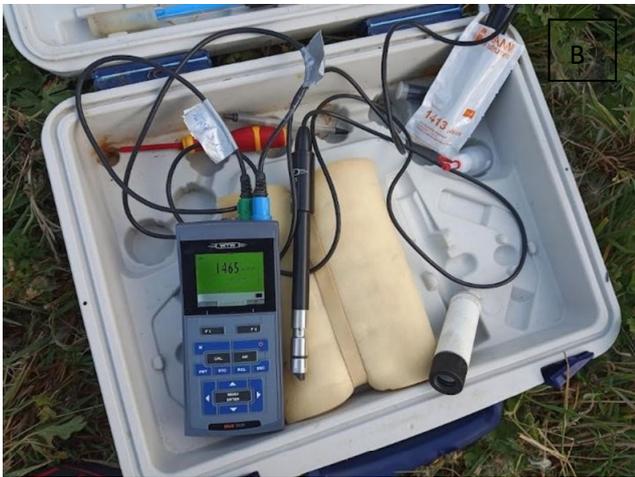


Figure 38 : Figure A prélèvement dans un captage particulier, Figure B sonde et appareil de mesure, figure C mesure du niveau d'eau dans un piézomètre, figures D et E mesures des paramètres physico chimiques.

Annexe 11 : Données bruts des résultats de calibration des trois fluorimètres

Fluo 734					Fluo PACA				
Blanc					Blanc				
Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity		Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity	
2,4	0,81	0,62	34,71		1,19	8,33	1,62	418,47	
Fluo					Fluo				
	Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity		Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity
10 ppb	127,5	4,2	1,5	34,72	10 ppb	46,22	14,03	3,73	428,86
100 ppb	1205	32,72	10,35	33,9	100 ppb	439,8	59,96	21,82	424,9
Sulfo					Sulfo				
	Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity		Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity
10 ppb	7,3	17,3	0,61	29,05	10 ppb	4,39	31,3	2,04	435,05
100 ppb	54,1	164,56	0,71	30,68	100 ppb	19,08	218,14	1,96	424,11
Fluo 922					Turbidité forage				
Blanc					1NTU	2,18	8,37	2,2	448,31
Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity		10NTU	2,92	8,88	3,01	442,39
1,9	0,79	0,37	32,01		100NTU	3,59	15,95	11,32	1895,18
2,4	0,92	0,43	36,32						
Fluo									
	Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity					
10 ppb	101,75	4,64	1,15	26,78					
100 ppb	966,15	33,93	8,38	22,09					
Sulfo									
	Uranine	Schrodamine	AminoGacid	Turbidity					
10 ppb	5,8	19,03	0,4	23,33					
100 ppb	49,03	164,3	0,57	22,85					

Annexe 12 : Fichier calibrat.dat à insérer dans le logiciel FLUO pour pouvoir lire les données

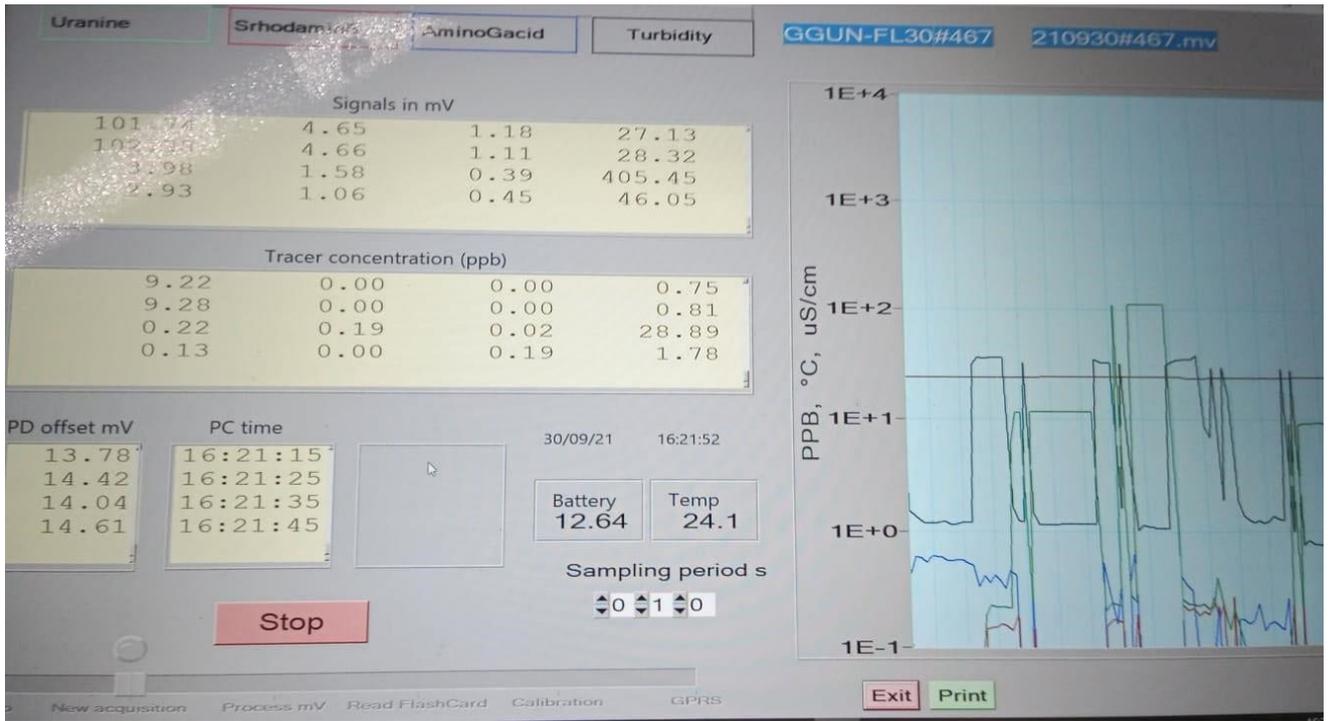
```

-----
Calibration constants - GGUN-FL30 fluorometer #734
-----
Last calibration: 140611
Values in mV

-----
Eau
L1 1.74
L2 0.55
L3 0.64
L4 19.00
-----
Uranine
L1 1405.40
L2 50.27
L3 14.00
L4 21.43
-----
SchrodaminB
L1 79.29
L2 204.63
L3 1.82
L4 22.79
-----
Tinopal-X
L1 4.60
L2 0.78
L3 156.74
L4 28.24
-----
1 NTU
L1 2.36
L2 1.37
L3 0.65
L4 37.99
-----
10 NTU
L1 3.48
L2 1.82
L3 1.04
L4 159.93
-----
100 NTU
L1 12.38
L2 4.69
L3 4.06
L4 1335.62
-----
-----Programme parameters (must start on 1st column)-----
1 Serial port in use (usually 1)
-----Full calibration of tracer 1-----
2 Number of calibration lines, increasing concentration
-8 148.91 log(ppb) & signal (mV)
-7 1405.40 log(ppb) & signal (mV)
-----Full calibration of tracer 2-----
2 Number of calibration lines, increasing concentration
-8 22.75 log(ppb) & signal (mV)
-7 204.63 log(ppb) & signal (mV)
-----Full calibration of tracer 3-----
2 Number of calibration lines, increasing concentration
-8 19.46 log(ppb) & signal (mV)
-7 156.74 log(ppb) & signal (mV)
-----
4 Number of lamps (2 to 4)
0 Relay programming (no=0 yes=1)
-----
100.0 Tracer concentration (ppb) used in L1 to L4 lines
-----
2000.0 25.0 0.021 0.00000 FL Conductimeter gain, T compensation
-0.1659 1.0457 0.0019 Non-linearity correction
-----
2 1= no datalogger 0= with datalogger 2=Gigalog

```

Annexe 13 : Interface du logiciel FLUO pour la partie calibration



Rapport de PFE en risques naturels et hydrogéologie au BRGM

Annexe 14 : Présentation de l'ISCO, préleveur autonome utilisé pendant le traçage au niveau du GUIL au niveau de la source de la pause (point F sur la plane)



Figure 39 : A gauche, photo de l'ISCO (préleveur autonome mise en place à la source de la pause), au centre intérieur de l'ISCO avec les 24 échantillons à prélever ayant une contenance de 800 mL, et à droite l'appareil ISCO à mettre en marche pour lancer le prélèvement automatique des échantillons sur le terrain.





Annexe 15 : Interface FLUO pour le traitement des données récupérées sur les fluorimètres pendant le traçage

**To acquire new data:**

- 1) If logger SR<2 check only 1 tracer box according to button A of logger
- 2) Otherwise select the 4 boxes
- 3) On logger, select SR
- 4) Click "New acquisition"
- 5) Switch power on
- 6) LED starts blinking

The software interface displays various parameters including:
 

- Tracer selection: Uranine, SrhodaminB, Tinopal-X, Turbidity
- Signals in mV and Tracer concentration (ppb) input fields
- PD offset mV, PC time, uS/cm, Battery (0.00), and Temp (0.0) readouts
- Conductimeter status (No/Yes)
- Navigation menu: Setup, New acquisition, Process mV, Read FlashCard, Calibration, GPRS, Hours, Exit, Print
- Graphs for PPB (1E-1 to 1E+4) and a large data table area.

Figure 40 : Interface du logiciel FLUO.



Annexe 16 : Exemple de droite de restitution obtenues avec le logiciel FLUO

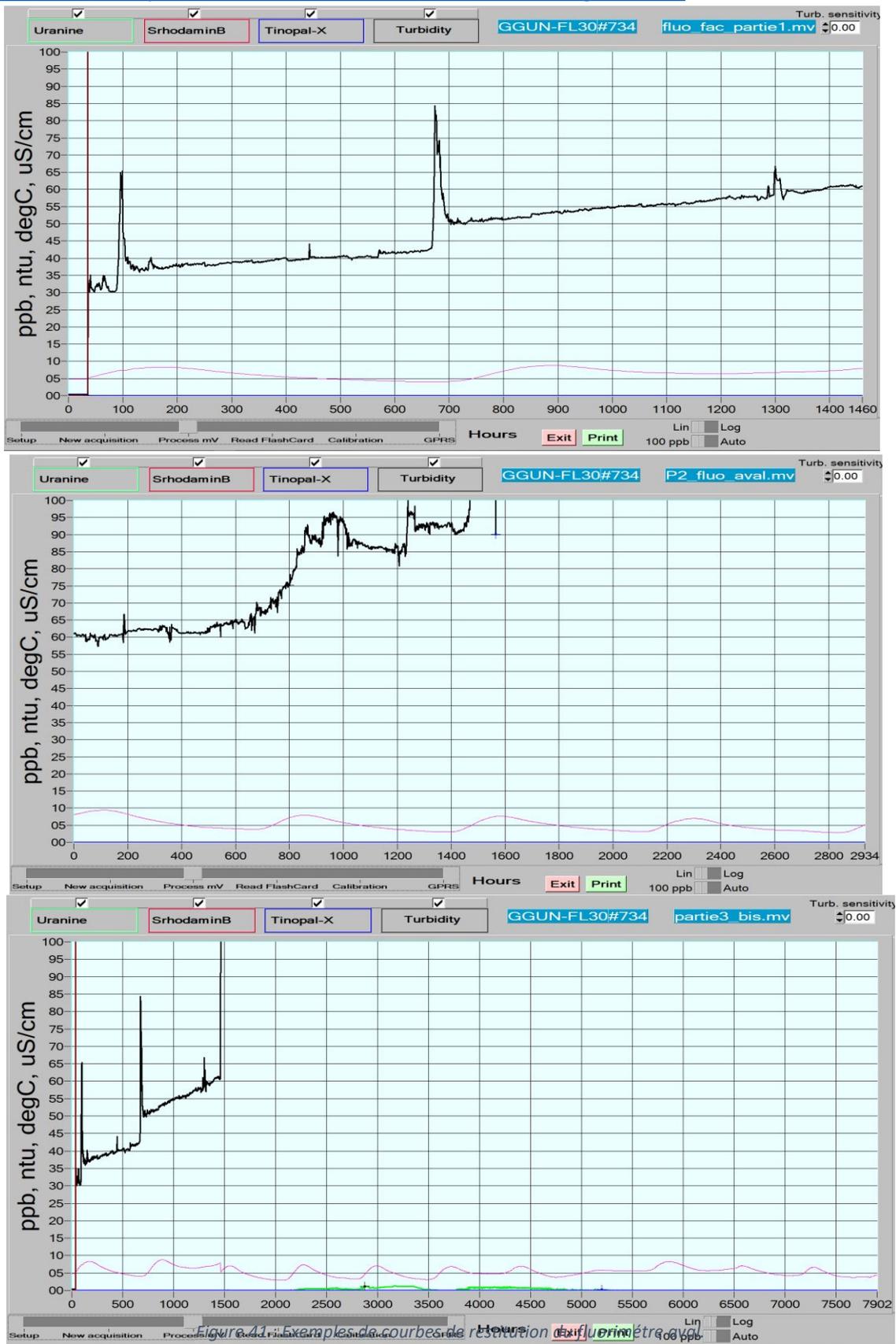


Figure A1 : Exemples de courbes de restitution en fluométrie aval

Annexe 17 : Illustrations des installations des trois fluorimètres dans le Guil (Queyras, 05)



Figure 42 : Figure A : boîtier de protection pour le GGUN relié au fluorimètre positionné dans la rivière; Figure B : disposition du fluorimètre et du GGUN amont ; Figure C : fluorimètre Aval ; Figure D : Fluorimètre Amont ; Figure E : Zoom