



2016

Rapport final – version 1

HYDROGÉOLOGIE ET QUALITÉ DES EAUX DU SECTEUR DE SAINT-FELIX-DE-PALLIERES (GARD)

GOYETCHE TYBAUD, PISTRE SEVERIN, CASIOT CORINNE, FREYDIER REMI, SEIDEL JEAN-LUC

Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM)
330, Avenue du Professeur Emile Jeanbrau, Montpellier

Rapport final – version 1

HYDROGÉOLOGIE ET QUALITÉ DES EAUX DU SECTEUR DE
SAINT-FELIX-DE-PALLIERES (GARD)

GOYETCHE Tybaud (étudiant Master 1)

PISTRE Séverin (Professeur Université Montpellier)

CASIOT Corinne (Chercheur CNRS)

FREYDIER Rémi (Ingénieur CNRS)

SEIDEL Jean-Luc (Chercheur CNRS)

Abstract: The main goal of this study was to characterize groundwater in the Saint-Félix-de-Pallières area. In fact, in this area there is a high natural mineralization of lead and zinc which was exploited in three mining sites. They generated a large amount of mining residues abandoned on the site. Today they can be the source of groundwater contamination.

In addition, the hydrogeological system of the area is characterized by major faults which create a preferential path for groundwater flow but also compartmentalize aquifers.

Geochemical analysis results show low concentration of trace elements in groundwater. From that we can imagine two scenarios: the first one is that karstic galleries bring water in contact with mineralization where the dissolution permit to chemicals to be in solutions but low concentrations are due to the short residence time which not permit to elements to get in solution. And/or raining water infiltration through mining residues until aquifers, by preferential path like faults, where concentrations will be diluted.

Résumé : Le but de la présente étude était de caractériser les eaux souterraines du secteur de Saint-Félix-de-Pallières. En effet, la géologie du secteur présente des minéralisations naturelles riches en plomb et en zinc qui furent autrefois exploitées dans trois mines générant de grandes quantités de résidus aujourd'hui encore présents en surface pouvant être à l'origine de contaminations des eaux souterraines.

De plus, le système hydrogéologique du secteur est caractérisé par la présence de failles majeures importantes créant des chemins préférentiels pour les écoulements souterrains, mais aussi compartimentant différents aquifères présents sur le secteur.

Les résultats des analyses géochimiques montrent la présence d'éléments traces dans les eaux souterraines, présents cependant en faibles concentrations. Ceci nous amène à supposer les scénarios suivants : soit l'eau circule dans le massif et entre en contact des minéralisations dans les conduits souterrains mettant en solution les éléments chimiques. Or la circulation rapide de type karstique entraîne une minéralisation des eaux peu importante. Soit l'eau de pluie s'infiltré à travers les résidus miniers, puis via des chemins préférentiels, tels que des failles, pour atteindre l'aquifère où les concentrations en éléments chimiques y sont diluées.

Mots-clés : Hydrogéologie, eaux souterraines, activités minières, résidus miniers, fond géochimique, failles, bordure sous-cévenole.

Table des matières

Table des matières.....	6
Avant-propos.....	10
1. Présentation du Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM).....	10
2. Mode de financement.....	10
Introduction.....	1
Cadre de l'étude.....	2
1. Contexte géologique.....	2
1.1. Stratigraphie.....	2
1.2. Histoire tectonique et fracturation.....	3
1.3. Origine des minéralisations.....	4
1.4. Coupes géologiques.....	5
2. Environnement hydrodynamique du secteur.....	5
2.1. Hydrologie régionale.....	5
2.1.1. Relief, topographie et bassin versant.....	5
2.1.2. Climat.....	6
2.2. Hydrogéologie.....	6
3. Activités minières passées.....	7
3.1. Les mines de Saint-Félix-de-Pallières.....	7
3.2. Les mines de Durfort.....	7
3.3. Résidus miniers et sédiments.....	8
Matériels et méthodes.....	9
1. Inventaire des points d'eau.....	9
2. Sélection des points d'eau à analyser.....	10
3. Prélèvements.....	11
4. Procédure analytique.....	11
4.1. Mesures in-situ.....	11
4.2. Mesures au laboratoire.....	12
Résultats.....	12
1. Validité des résultats.....	12
2. Présentation des résultats.....	12
2.1. Statistiques et distribution des paramètres physico-chimiques.....	12
Figure 10 : Histogramme de l'inertie totale.....	14
Figure 11 : Représentation des variables.....	14
Figure 12 : Représentation des individus.....	14
2.2. Exploitation des données.....	15
2.2.1. Diagramme de Piper.....	15
Figure 13 : Diagramme de Piper.....	15

2.2.2.	Présentation des graphiques binaires	15
2.2.2.1.	Relation avec les ions chlorure	16
2.2.2.2.	Relation avec le calcium et le magnésium	16
2.2.2.3.	Relation avec les évaporites	16
2.2.3.	Éléments chimiques présents dans les minéralisations et dans les résidus miniers	17
Tableau 3 : Dépassement des normes de potabilité		17
2.2.4.	Autres résultats	18
Figure 14 : Diagrammes binaires		18
Figure 15 : Cartes de répartition des concentrations en éléments traces		19
Interprétations		20
1.	Caractérisation globale des eaux	20
1.1.	Identification d'un facteur de contrôle	20
2.	Éléments de conclusion	21
2.1.	Contribution de l'interaction eau-roche à la chimie des eaux souterraines	21
2.2.	Rôle des failles dans le phénomène de dilution	21
Conclusion		22
Perspectives		22
Bibliographie		23
Annexes		0
Annexe 1 : Carte géologique du secteur d'étude		0
Annexe 2 : Log stratigraphique du secteur d'étude		0
Annexe 3 : Étude des sondages		1
Secteur 1		1
Figure 1 : Corrélacion entre les sondages (S-N)		1
Figure 2 : Corrélacion entre les sondages (W-E) au Sud		2
Figure 3 : Corrélacion entre les sondages (W-E) au Nord		2
Annexe 4 : Rosaces de fracturation		3
Annexe 5 : Coupes géologiques		0
Annexe 6 : Carte de localisation des mines et points d'eau (sources et forages)		0
Annexe 7 : Liste des points d'eau sélectionnés		0
Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques		2
Schéma du dispositif		5
Conductivité mesurée en fonction du temps		5
Bloc diagramme ICP-MS		6
Annexe 9 : Éléments analysés par ICP-MS		6
Annexe 10 : Résultats des analyses		0

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme HydroSciences Montpellier.....	10
Figure 3 : Localisation du site d'étude.....	2
Figure 4 : Phases de tectoniques affectant le Sud de la France	4
Figure 5 : Frise chronologique.....	4
Figure 6 : Carte du relief dans la région d'étude	5
Figure 7 : Données climatiques de la station Mont Aigoual (moyennes 1991-2010)	6
Figure 8 : Carte de la localisation des points de prélèvements	11
Figure 9 : Illustration des matrices de corrélation	13
Figure 10 : Diagramme de Piper.....	15
Figure 11 : Diagrammes binaires.....	18
Figure 12 : Cartes de répartition des concentrations en éléments traces	19

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ordre de grandeur des différents résidus d'exploitations de mines plombo-zincifères.....	8
Tableau 2 : Mesures effectués au laboratoire	12

Liste des annexes

Annexe 1 : Carte géologique du secteur d'étude	
Annexe 2 : Log stratigraphique du secteur d'étude	
Annexe 3 : Étude des sondages	
Annexe 4 : Rosaces de fracturation	
Annexe 5 : Coupes géologiques	
Annexe 6 : Carte de localisation des mines et points d'eau (sources et <i>forages</i>)	
Annexe 7 : Liste des points d'eau sélectionnés	
Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques	
Annexe 9 : Éléments analysés par ICP-MS	
Annexe 10 : Résultats des analyses	

Avant-propos

1. Présentation du Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM)

Le Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM) est une unité mixte de recherche entre l'IRD, le CNRS et l'Université de Montpellier regroupant près de 150 personnes : des chercheurs, des doctorants, du personnel administratif ainsi que des personnes non permanentes telles que des doctorants (une trentaine) et des stagiaires (une centaine par an).

Localisés sur deux sites de l'Université de Montpellier (Maison des Sciences de l'Eau – campus Triolet et à la Faculté de Pharmacie) et également à l'IRD. Ses spécialistes en sciences de l'eau couvrent un large éventail de domaines allant de la biogéochimie aux événements extrêmes en passant par les eaux souterraines et l'étude du cycle hydrologique (Figure 1).

AXES DE RECHERCHE				GOUVERNANCE
TRACES Transferts, Contaminants, Pathogènes, Environnement Santé Porteur : P. Monfort (DR CNRS) PoMES – Pollutions Minières, Environnement et Santé Porteur : C. Cassin (CR CNRS) ConsEri – Contaminants Emergents Porteur : E. Gomez (PR UM) PhYSE – Pathogènes Hydriques, Santé, Environnement Porteur : E. Jumas-Biak (PI/PR UM) PUrH – Pollutions Urbaines et Hydrologie Porteur : W.-G. Touboul (PR UM)	EChangES Eau, Changements Environnementaux et Sociétés Porteur : D. Rueland (IR CNRS)	TECHS Transferts dans les Eco-Hydro-systèmes Porteurs : B. Cappelaere (IR IRD) & J. Demary (CR IRD)	KMH2E Karst, Milieux Hétérogènes et Evénements Extrêmes Porteur : H. Jourde (PR UM) Karst & Aquifères hétérogènes + Hydrogéologie & Transferts Porteur : C. Biais-Guette (MCF UM) ETH – Etude multi-échelle des Transferts en Milieux Hétérogènes Porteur : Y. Guirat (PR UM) EvExt – Evénements Extrêmes Porteur : L. Nezeat (MCF UM)	Directeur d'Unité P. Saylor (DR IRD) Directrice Adjointe H. Fenni (PR UM) Secrétaire Générale E. Deme (IE IRD) Conseil de Direction Conseil de Laboratoire Conseil Scientifique
ATELIERS TRANSVERSAUX				MOYENS
AT-HYS Atelier Hydrologique Spatialisé : plateforme informatique de modèles hydrologiques et de traitements de données Porteur : V. Bonnel-Estupina (MCF UM)		TRACEURS Techniques analytiques de traçage de transferts ou de processus hydrologiques Porteurs : C. Batiot-Guilhe (MCF UM), R. Freyrier (IR CNRS) & N. Patris (IR IRD)		Administration - Gestion E. Deme (IE IRD) Equipe Terrain P. Marchand (IE IRD) Informatique - Réseau S. Conrad (IE UM) Formation Permanente C. Rodier (IE CNRS) Hygiène et Sécurité N. Patris (IR IRD), D. Rosain (TC UM) & S. Van Ester (AI CNRS)
PLATES-FORMES				
AETE Analyse des Eléments Traces dans l'Environnement Porteurs : J.-L. Seibel (CR CNRS) & R. Freyrier (IR CNRS)		LAMA Laboratoire Mutualisé d'Analyse des isotopes stables de l'eau Porteurs : N. Patris (IR IRD) & J.-D. Taupin (CR IRD)		Labos de Chimie des Eaux D. Rosain (TC UM) & J.-L. Seibel (CR CNRS) Labo de Microbiologie A. Desoeuvre (AI CNRS)

Figure 1 : Organigramme HydroSciences Montpellier

Source : (Hydrosciences Montpellier)

2. Mode de financement

Le financement de cette étude est exceptionnel puisque réalisé à la demande de l'**Association pour la Dépollution des Anciennes Mines de la Vieille Montagne (ADAMVM)** grâce à une plateforme de financement participatif (Ulule, 2016). Les internautes pouvaient y contribuer sous la forme de dons. C'est grâce à la participation de 118 internautes que le financement de l'étude a été réalisé à 120 % par rapport à l'objectif initialement fixé. Ainsi ce rapport présente les résultats de cette étude et sera partagé avec l'association, les participants au financement et publiés dans une revue scientifique. J'ai donc fait en sorte lors de la rédaction de ce mémoire qu'il soit accessible au plus grand nombre en matière de compréhension.

Introduction

Le secteur de Saint-Félix-de-Pallières se situe dans la bordure sous-cévenole du département du Gard. Il s'agit de la zone comprise entre les Cévennes et les Garrigues, au niveau de la faille des Cévennes. Elle comprend notamment les communes de Saint-Félix-de-Pallières (Figure 2) et de Durfort-et-Saint-Martin-de-Sossenac. Celles-ci ont connu une activité minière (Pb, Zn, Ag) soutenue pendant plus d'un siècle du fait de la présence de minéralisation plombo-zincifères dans le sous-sol. Mais nous nous sommes également intéressés aux eaux souterraines présentes sur les communes voisines : Corbes, Anduze, Thoiras, Monoblet, Fressac, Vabres, Cros, Saint-Hippolyte-du-Fort, La Cadière-et-Cambo, Saint-Roman-de-Codières et enfin Sumène.

L'extraction du minerai dans ces mines a généré près de 20.000 emplois. Néanmoins, elles sont à l'origine d'une quantité importante de résidus miniers¹ qui aujourd'hui sont stockés dans des digues à stériles.

En 1997, le BRGM a évalué l'impact éventuel d'un résidu minier sur l'environnement selon : sa quantité totale, sa composition chimique et minéralogique, ses caractéristiques physiques, sa méthode de stockage et sa localisation dans un contexte environnemental particulier. Il en conclut que les résidus miniers posaient des problèmes environnementaux préoccupants le plus souvent sur la pollution chimique ou mécanique des eaux de surface, l'absence de végétation (et/ou son dépérissement), et la dégradation du paysage.

De précédentes études ont fait le point sur l'état des eaux de surface et sur les teneurs en éléments toxiques dans les sédiments (Damon and Corre, 2013; Picot and Tsakiris, 2013). Mais aucune étude sur les eaux souterraines n'a été réalisée à ce jour.

Nous devons donc nous demander, si la contamination des résidus miniers d'exploitations anciennes va se superposer au fond géochimique naturel des eaux souterraines de la zone d'étude ; ou bien, si les minéralisations plombo-zincifères de la bordure sous-cévenole sont responsables d'une éventuelle contamination naturelle des aquifères à proximité ?

Ainsi l'objectif principal de ce travail est d'étudier l'hydrogéologie et la qualité des eaux souterraines du secteur de Saint-Félix-de-Pallières. Et de la comparer avec la signature géochimique des eaux souterraines du secteur de Monoblet et Cambou situés plus au Sud, dont la lithologie est identique, mais où aucune activité minière n'a été recensée.

Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué dans une première partie un bilan des connaissances du secteur d'étude basée sur une recherche bibliographique. Celle-ci apporte des précisions sur les structures géologiques multi-échelles du secteur étudié, bordé au Sud par la faille des Cévennes, à partir d'une analyse tectonique de terrain, bibliographique et par photo-aériennes. Cette première partie comprend également des informations sur le niveau de karstification des aquifères calcaires et dolomitiques présents sur la zone d'étude, sur la dynamique des fluides et sur les activités minières passées.

¹ **Résidus miniers** (BRGM, 1997) : tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai ; ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie, scories) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques.

De cette manière, de bas en haut de la série stratigraphique on retrouve les couches géologiques suivantes :

- Le **Trias** avec ses couches d'argiles et à certains endroits des marnes ;
- Le **Rhétien** présente une limite difficile à établir avec un faciès détritique composé de grès feldspathiques à ciment siliceux ou dolomitique et de calcaires et dolomies bien litées. Toutefois, il faut faire attention aux discordances légères et à des lacunes dans le Rhétien ;
- La série **Hettangienne** constitue un ensemble homogène de dolomies en banc métriques. Par ailleurs, le débit prismatique justifie l'appellation qu'on leur donne ;
- Enfin le **Sinémurien-Lotharingien**, appelé aussi « Liais calcaire indifférencié » (Alabouvette, 1988) du fait de la complexité de la couche liée aux événements tectoniques.

Cette série sédimentaire s'étend en suivant l'axe de la faille des Cévennes : de Corbes au Nord de Saint-Félix-de-Pallières jusqu'au massif de Cambo plus au Sud-Ouest. En passant par Saint-Félix-de-Pallières, Durfort et Monoblet.

1.2. Histoire tectonique et fracturation

La zone d'étude est intensément plissée (Marchal and Blaise, 2004). Elle est bordée à l'Est par la faille des Cévennes qui marque la limite entre les Cévennes et les Garrigues. Créé à la fin de l'orogénèse hercynienne, cette faille est orientée Nord-Est/Sud-Ouest. Elle est souvent représentée par une faille unique, pourtant on retrouve également d'autres failles orientées Est-Ouest mais également des failles Nord-Sud pouvant avoir comme origine d'autres épisodes tectoniques.

On se trouve en présence de trois phases tectoniques successives radicalement différentes et indépendantes, décrites par (Karim, 1973) :

Tout d'abord, la **phase de distension anté-pyrénéennes**, où une tectonique cassante se manifeste par des failles normales NNE-SSW ;

Puis, la **formation de la chaîne Pyrénéo-provençale** affecte le sud du Massif Central par une compression Nord-Sud, avec un jeu de failles normales en failles inverses et la formation de plis Est-Ouest. À cela s'ajoute un mouvement sénestre ;

Enfin, une **période d'extension oligocène**, datée par les terrains tertiaires. La tectonique cévenole est marquée dans la sédimentation oligocène par des failles normales d'orientation cévenole. Cependant, elle ne semble que très peu affecter la zone de Pallières.

On peut voir sur la Figure 3, une illustration de l'étendue de ces deux derniers événements. Ces différents événements tectoniques vont être à l'origine de variations d'épaisseur des différentes couches. Que l'on peut observer grâce à de nombreux sondages d'exploration minière (Annexe 3).

L'orientation des événements tectoniques peut être étudiée par stéréophotographie avec l'analyse des photos aériennes récupérées sur le site *geoportail.gouv.fr* (Annexe 4 : *Rosaces de fracturation*). Ceci a été réalisé au niveau de Saint-Félix-de-Pallières et également au niveau du massif de Cambo au Sud-Ouest.

On retrouve dans ces deux secteurs une prédominance des failles NE-SW de même direction que la faille des Cévennes, mais également d'autres directions.

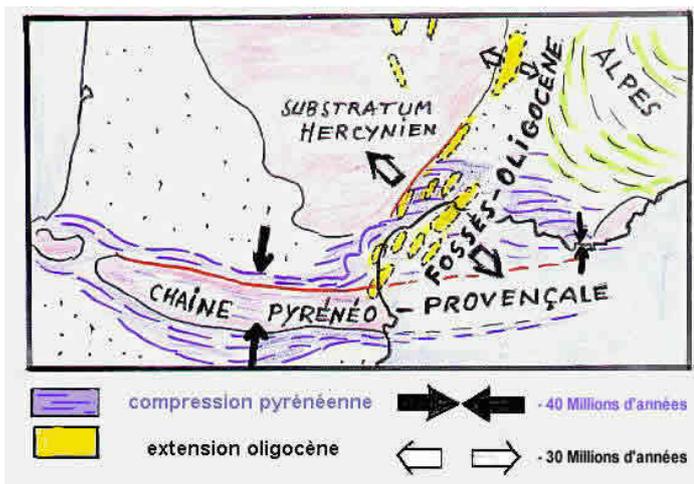


Figure 3 : Phases de tectoniques affectant le Sud de la France

Source : Urgelli, 2001

1.3. Origine des minéralisations

Les circulations souterraines passées sont à l'origine des minéralisations de plomb-zinc, dites du type «Mississippi Valley». Elles témoignent de paléocirculations et s'observent en bordure des bassins sédimentaires, généralement dans des roches carbonatées faiblement enfouies (Gouin and Bailly, 2011; Jost, 2001). Ces minéralisations se sont mises en place dans les conduits karstiques de l'Hettangien (Gouin and Bailly, 2011), et à l'interface Hettangien-Rhétien en bordure de faille. En effet, la dissolution des dolomies de l'Hettangien et également les fracturations vont être aptes à véhiculer les fluides riches en minéraux.

De plus, les failles majeures vont constituer de véritables «cheminées» thermiques marquées par la présence d'éléments chimiques (Co, Ti, As, In, Ge, Sb et Hg) étrangers aux terrains de l'Hettangien. Ces éléments seraient en provenance très probable du socle ou du tégument détritique de la base du Trias (Coumoul and Aubague, 1988).

Ainsi par ascension d'eaux salines et chaudes liées au gradient thermique on va progressivement avoir précipitation dans ces vides créés de dolomite ferrifère, de pyrite, de sulfure de Zn et de Pb et enfin de silice auxquels s'ajoutent les éléments du socle cité précédemment.

La datation des minéralisations d'âge Paléocène-Eocène révèle que la migration des fluides est liée au soulèvement majeur de la zone Nord-Pyrénéenne (Jost, 2001).

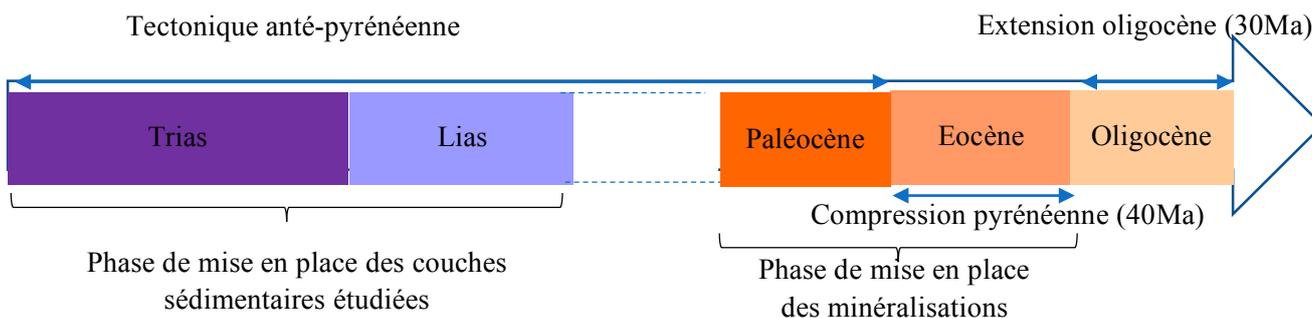


Figure 4 : Frise chronologique

1.4. Coupes géologiques

L'étude de la carte géologique du Vigan (Alabouvette, 1988) a permis de réaliser des coupes géologiques au niveau du secteur de Saint-Félix-de-Pallières. La localisation des coupes est présentée en Annexe 1 et l'Annexe 5 présente ces coupes.

Une coupe Nord-Sud a été réalisée afin d'avoir un point de vue global sur le massif. Puis deux autres coupes Ouest-Est ont été réalisées :

- Une au Nord, car elle passe au niveau de la source Le Bijournet source karstique remarquable par son débit important, mais aussi sur l'ancienne mine de la Croix de Pallières ;
- Une seconde plus au Sud du massif au niveau de l'ancienne mine Joseph.

D'autres ont été réalisées au niveau de Durfort, mais ces dernières sont beaucoup plus complexes du fait de la présence de nombreuses failles.

De plus, l'étude de (Coubes and Martin, 1971) avait déjà montrée des coupes sur le secteur de Monoblet qui sont également présentées en Annexe 5.

Une coupe a également été réalisée au niveau du massif de Cambo.

2. Environnement hydrodynamique du secteur

2.1. Hydrologie régionale

2.1.1. Relief, topographie et bassin versant

La topographie de la région d'étude est généralement à faible relief (Figure 5). Les pentes engendrées sont donc faibles et les gradients hydrauliques des cours d'eau sont également faibles. Le réseau hydrographique est plutôt développé, on y retrouve des cours d'eau allant des classes 1 à 6 (d'après la classification typologique de Strohler, 1957). De ce fait, les cours d'eau des classes les plus élevés sont pour la plupart asséchés pendant l'été. Ce réseau hydrographique va déboucher sur des cours d'eau majeurs à savoir le Vidourle, le Gard, le Gardon St-Jean et l'Hérault.

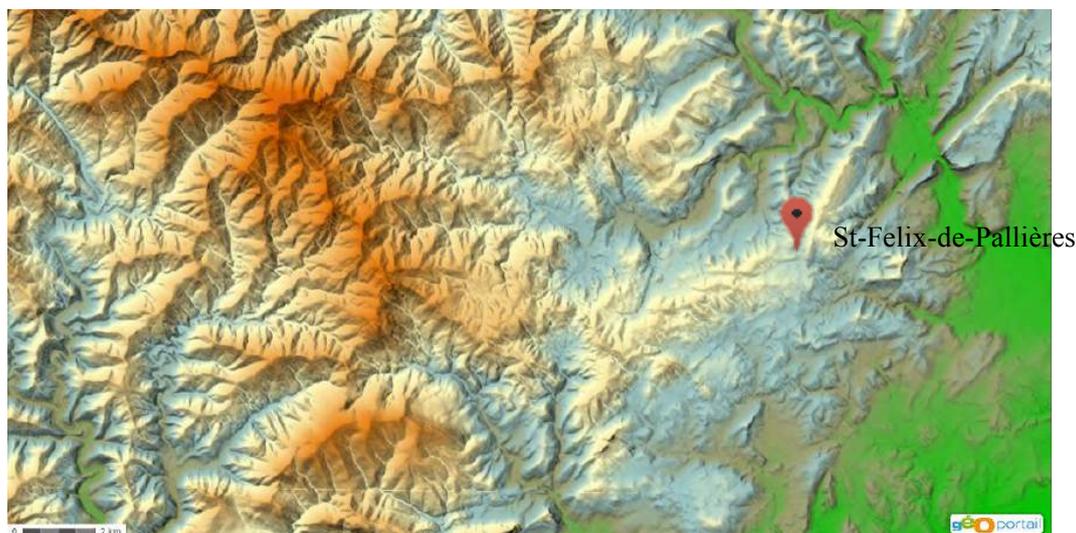


Figure 5 : Carte du relief dans la région d'étude

Source : Geoportail.gouv.fr

2.1.2. Climat

Les plus proches données climatiques sur le secteur sont celles du Mont Aigoual, situé plus en altitude et sont présentées sur la Figure 6.

On peut y voir des précipitations modérées toute l'année avec des diminutions pendant l'été et une augmentation plus importante de septembre à novembre, ce qui est typique sur le pourtour méditerranéen.

Du côté des températures en hiver des températures plutôt froides pouvant être négatives et en été des températures assez chaudes.

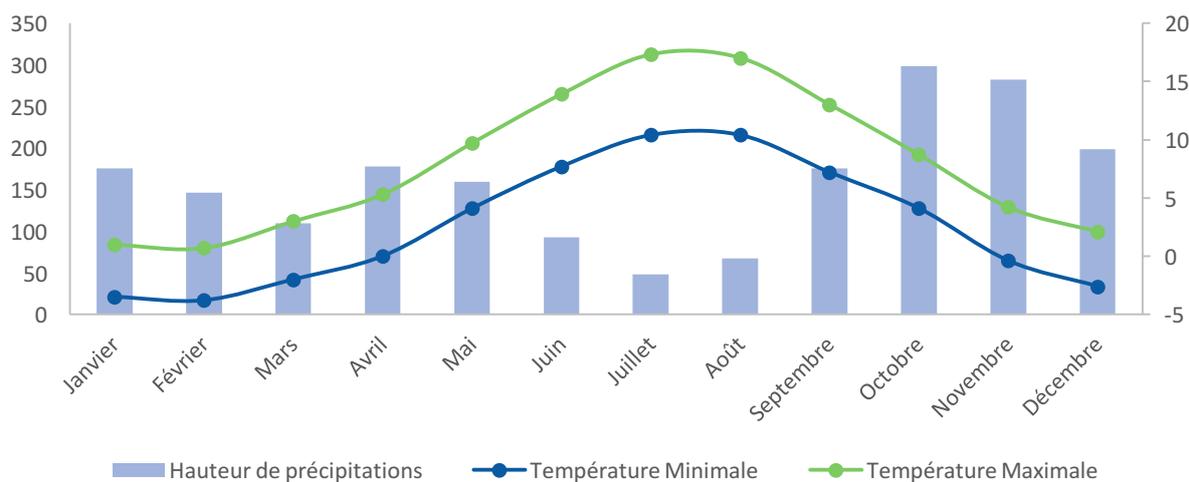


Figure 6 : Données climatiques de la station Mont Aigoual (moyennes 1991-2010)

Source : (Météo France)

2.2. Hydrogéologie

La zone d'étude présente de nombreuses unités aquifères relativement peu étendues (inférieur à 20 km²) du fait de la grande diversité de faciès, de structures et de fracturations des niveaux perméables.

Les dolomies et les calcaires du Lias (Hettangien surtout) vont constituer les principaux aquifères et permettent l'existence de sources à débit élevé. Les autres formations vont offrir des ressources nettement plus limitées : c'est notamment le cas des couches du Trias. Ce dernier constituera la semelle imperméable de cette série sédimentaire (Alabouvette, 1988).

En effet, avec une épaisseur de près de 300 m, les dolomies de l'Hettangien vont constituer l'aquifère majeur de cette série sédimentaire, en alimentant des sources moins importantes, mais plus nombreuses (Alabouvette, 1988). Des essais par pompage ont été réalisés dans des forages et révèlent une transmissivité mesurée de l'ordre de 10⁻⁴ m²/s (Coubes and Lemaire, 1971).

De plus, les failles vont généralement engendrer des axes de drainage (BRGM, n.d.). En effet, la dissolution des dolomies provoque la formation de « chenaux » essentiellement localisés dans des fissures et empruntés par les eaux souterraines (karstification) (Coubes and Lemaire, 1971).

Enfin à plus petite échelle, le creusement des galeries minières et leur remblayage va modifier profondément les voies naturelles de circulations des eaux souterraines. Auxquels s'ajoute l'utilisation des

explosifs fragilise des zones plus riches en éléments traces métalliques que la moyenne, en multipliant les réseaux de microfissures. Il en résulte une augmentation importante de la perméabilité des zones exploitées (Bril and Floch, 2001).

3. Activités minières passées

Une **mine** comprend tous les aménagements, ouvrages et équipements d'extraction, installations de traitement de minerais, haldes³ de stockages provisionnels et permanents de matériaux et/ou de résidus nécessaires pour l'exploitation et la valorisation d'un gisement.

Les exploitations minières de zinc et de plomb de la zone sous-cévenole se déroulent de la manière suivante : les exploitations sont souterraines et l'extraction du minerai des galeries souterraines nécessite l'extraction d'une grande quantité de stériles pour accéder au minerai à plus forte teneur.

Le minerai est ensuite transporté à une usine de traitement ou laverie. Celle-ci produit un minerai beaucoup plus concentré en enlevant la phase minérale du minerai. Cependant, cette usine va produire des résidus qui peuvent avoir des teneurs élevées en métaux et peuvent contenir des additifs utilisés lors de l'enrichissement du minerai.

Le minerai est enfin envoyé dans une usine métallurgique (BRGM, 1997).

Le secteur étudié présente 4 anciens sites miniers localisés sur les communes de Saint-Félix-de-Pallières et Durfort (Annexe 6 : Carte de localisation des mines et points d'eau (sources)).

3.1. Les mines de Saint-Félix-de-Pallières

Cette commune comprend deux mines : la Croix-de-Pallières et la Mine Joseph. Elles ont été exploitées pendant plus d'un siècle.

La mine de la **Croix-de-Pallières** a été exploitée à partir de 1844 par la Société de la Vieille Montagne avec une intensification de son exploitation au cours de la période de 1948 à 1971. Sa production totale est estimée à 80.000 t de Zn, 34.000 t de Pb, 30 t d'Ag, 520 t de Cd et 28 t de Ge à partir de plus d'1 Mt de minerai tout-venant. L'activité minière cesse en 1971 faute de réserves. Malgré des recherches d'extension effectuées par l'entreprise entre 1975 et 1979, l'activité ne reprendra pas et la concession sera renoncée en 2004 par la Société Umicore (Gouin and Bailly, 2011).

La **mine Joseph**, très peu documentée quant à elle a été abandonnée en 1955 et laisse jusqu'à aujourd'hui un amas de résidus miniers sur le site, en bordure du ruisseau de Paleyrolle.

3.2. Les mines de Durfort

Trois mines ont fonctionné à Durfort entre l'antiquité et 1977 : la Grande Vernissière, La Coste et Valensole (Mairie de Durfort et St Martin de Sossenac, n.d.)

³ **Haldes** : Tas constitué avec les déchets de triage et de lavage d'une mine métallique. (Larousse.fr)

La **Grande Vernissière**, tient son nom de l'alquifoux qui sert à vernir les poteries. Son exploitation a commencé au XVIIIe siècle, mais son pic d'exploitation n'a eu lieu que de 1904 à 1907 avec 18 à 20 tonnes par an grâce à la construction d'une laverie de minerai, de galeries et d'une remontée. Les travaux qui ont cessé en 1954.

La mine de **La Coste** est entrée en fonctionnement en 1791, elle présente une laverie sur son site cependant celle-ci a été détruite en 1925. Reprise par la Société de la Vieille montagne en 1953, ce sont 130.600 tonnes de minerai qui ont été acheminées vers la laverie de Saint-Félix-de-Pallières. Abandonnés en 1971, les puits et galeries sont comblés.

La mine **Valensole** est très peu exploitée avec seulement 120 tonnes de calamine, quelques tonnes d'alquifoux et 50 tonnes de blende plombeuse qui ont été extraites.

3.3. Résidus miniers et sédiments

Actuellement, les résidus miniers sont stockés en surface dans des digues, ils vont donc être sensibles à l'érosion par les pluies, mais aussi par l'érosion éolienne. Ils sont également sujets à une percolation des eaux à travers ces amas de stériles dont les teneurs en éléments sont trop faibles pour une commercialisation. Cependant, le fait de les accumuler va concentrer les éléments. On peut voir dans le Tableau 1 un ordre de grandeur de la teneur en métaux dans les résidus miniers d'une mine de Pb/Zn (BRGM, 1997).

Pour l'ancienne mine de la Croix de Pallières, ainsi que pour les anciennes mines de l'ensemble de la bordure cévenole, une quantité non négligeable de métaux est encore présente dans les résidus. Ceux-ci pourraient constituer un minerai « anthropique » exploitable (compte tenu des progrès technologiques réalisés en matière d'extraction) avec des volumes à évaluer qui pourraient être considérables (Gouin and Bailly, 2011).

De plus, l'analyse des sols sur différents sites de la zone étudiée montre des concentrations (exprimé en mg/kg) assez importantes. Les études qualitatives précédentes s'intéressent aux éléments suivants : le Plomb (Pb), le Zinc (Zn), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), l'Antimoine (Sb), le Manganèse (Mn), le Fer (Fe) et le Cuivre (Cu) dans les sédiments et également dans les eaux de surface (Picot and Tsakiris, 2013).

Tableau 1 : Ordre de grandeur des différents résidus d'exploitations de mines plombo-zincifères

Sources : (BRGM, 1997) et (Gouin and Bailly, 2011)

Lieu	Résidu	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	
Mines plombo-zincifères en général	Haldes d'anciennes exploitations Pb-Zn	5000 – 20000	5000 – 20000	50 – 200	
	Rejets de laverie	1300 – 7000	1000 – 2500	30 – 50	
	Stériles de découverte	50 – 500	200 – 2000	5 – 10	
Lieu	Résidu	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Fe (mg/kg)
La croix de Pallières	Digues à résidus	1000 - 8500	1800 – 25000	0 – 120	25000 – 41000
	Haldes	900 – 114000	500 – 15000	35 – 95	450 – 825
	Terril	4000 - 40000	6000 - 45000	50 - 200	900 – 4250
Mine Joseph	Haldes	230 - 70000	0 - 5600	0 - 130	10000 – 725000

Matériels et méthodes

La démarche utilisée est basée sur l'étude hydrogéochimique des eaux. Il faut savoir que l'eau de pluie en s'infiltrant et en circulant à travers les roches va acquérir une certaine composition chimique. De ce fait, les eaux souterraines seront davantage minéralisées que les eaux superficielles.

De plus, cette composition chimique varie selon la nature de l'aquifère (sa lithologie, la présence de gisements métalliques), les conditions physico-chimiques du milieu, le temps de résidence de l'eau à l'intérieur de celui-ci et le degré d'altération de l'aquifère.

Par conséquent, l'eau possède un signal géochimique initial ou fond géochimique qui dépend de l'encaissant dans lequel elle circule. On peut donc grâce à la composition chimique de l'eau, déterminer les minéralisations traversées par les eaux souterraines avant la source ou le forage. Cependant, la composition des eaux souterraines peut être impactée par d'éventuelles contaminations anthropiques ou naturelles de surface. D'où notre intérêt de comparer les eaux souterraines du secteur minier de Saint-Félix-de-Pallières avec celles du massif de Cambo (de même lithologie) où il n'y a pas eu d'activités minières.

1. Inventaire des points d'eau

Tout d'abord, nous avons réalisé un inventaire de tous les points d'eau (sources et forages) présents dans la zone d'étude (Annexe 6 : Carte de localisation des mines et points d'eau (sources et forages). Pour cela nous avons procédé de la manière suivante :

- Dans un premier temps nous les avons répertoriés grâce aux **données du Bureau de Recherche en Géologiques Minières (BRGM)** suivantes : la base de données du sous-sol (BSS), la base de données des cavités (BDC) et les sources indiquées sur la carte géologique au 1:50.000 du Vigan.
- Dans un second temps, d'autres points d'eau non répertoriés ont pu être identifiés grâce à l'aide des **populations locales** questionnées directement sur place.

Cet inventaire a permis de répertorier un total de 100 sources et 31 forages sur l'ensemble du secteur d'étude. Il est suivi d'une phase de terrain où nous avons vérifié la localisation et effectué des mesures de conductivité électrique et de température des points d'eau grâce à un conductimètre de terrain (WTW Catalogue Lab 2012, Conductivité - conductimetre_3110_3310). Cette phase de terrain comprend 65 points d'eau localisés et en eau à la date de visite avec des mesures de conductivité s'étendant de 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 5,52 mS/cm (Figure 7).

Nous avons choisi de nous intéresser essentiellement aux sources, car elles sont beaucoup plus faciles d'accès par rapport aux forages. En effet, les bases de données du BRGM contiennent peu d'informations sur leurs propriétaires et sur leur état. De plus, l'accès à l'eau est plus difficile, il s'avère donc compliqué de faire des mesures sur ces derniers sans matériel tel qu'une pompe

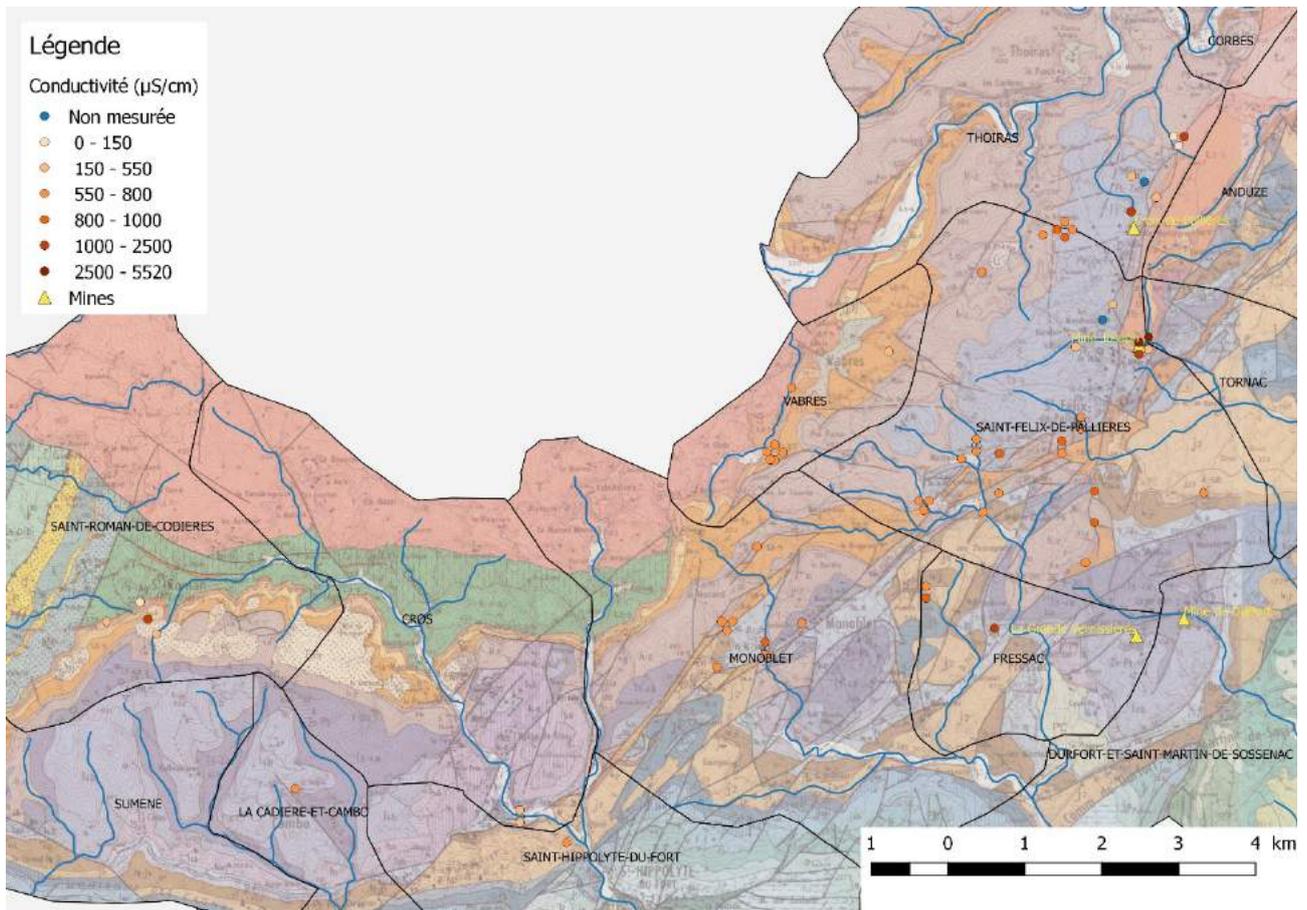


Figure 7 : Carte des mesures de conductivité

2. Sélection des points d'eau à analyser

Le budget de l'étude fût organisé afin de réaliser deux campagnes d'analyses. En effet, la seconde campagne viendrait valider les résultats obtenus lors de la première campagne. Pour cela nous avons dû sélectionner les points d'eau pour lesquels nous avons effectué des analyses physico-chimiques.

Pour la première campagne d'analyses, la sélection se base tout d'abord sur les mesures de conductivités effectuées sur le terrain lors de l'inventaire des points d'eau. Ces mesures de conductivité vont nous donner des informations indirectes sur les teneurs en éléments dissous dans l'eau. Lorsque la conductivité est élevée, ces eaux ont été sélectionnées pour être analysées.

Puis le fond géochimique⁴ sera déterminé par l'analyse de points d'eau dont la conductivité n'est pas remarquable, mais plutôt suivant la lithologie dont elle est originelle. Ainsi les analyses vont permettre d'identifier les processus contrôlant la composition des eaux souterraines du secteur de Saint-Félix-de-Pallières.

En ce qui concerne la seconde campagne, nous avons repris certains point d'eau pour pouvoir confirmer certains résultats obtenus lors de la première campagne. Puis nous y avons ajouté les eaux situées vers le secteur de Cambo (au Sud-Ouest) où l'on retrouve la même lithologie sans exploitations minières. D'autres

⁴ **Fond géochimique :**

points ont été sélectionnés de par leur conductivité remarquable mesurée après la première campagne dans les alentours de la mine Joseph.

La liste complète des points de prélèvements sélectionnés lors des deux campagnes est présentée en Annexe 7.

3. Prélèvements

Les prélèvements d'échantillons d'eau se sont déroulés le 25 Mai 2016 et le 6 Juillet 2016 au niveau des points d'eau présentés sur la Figure 8 (Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques).

Lors du premier échantillonnage, deux des points sélectionnés ne coulaient plus : le ruisseau du crassier et le ruisseau du Bijournet au Nord du secteur.

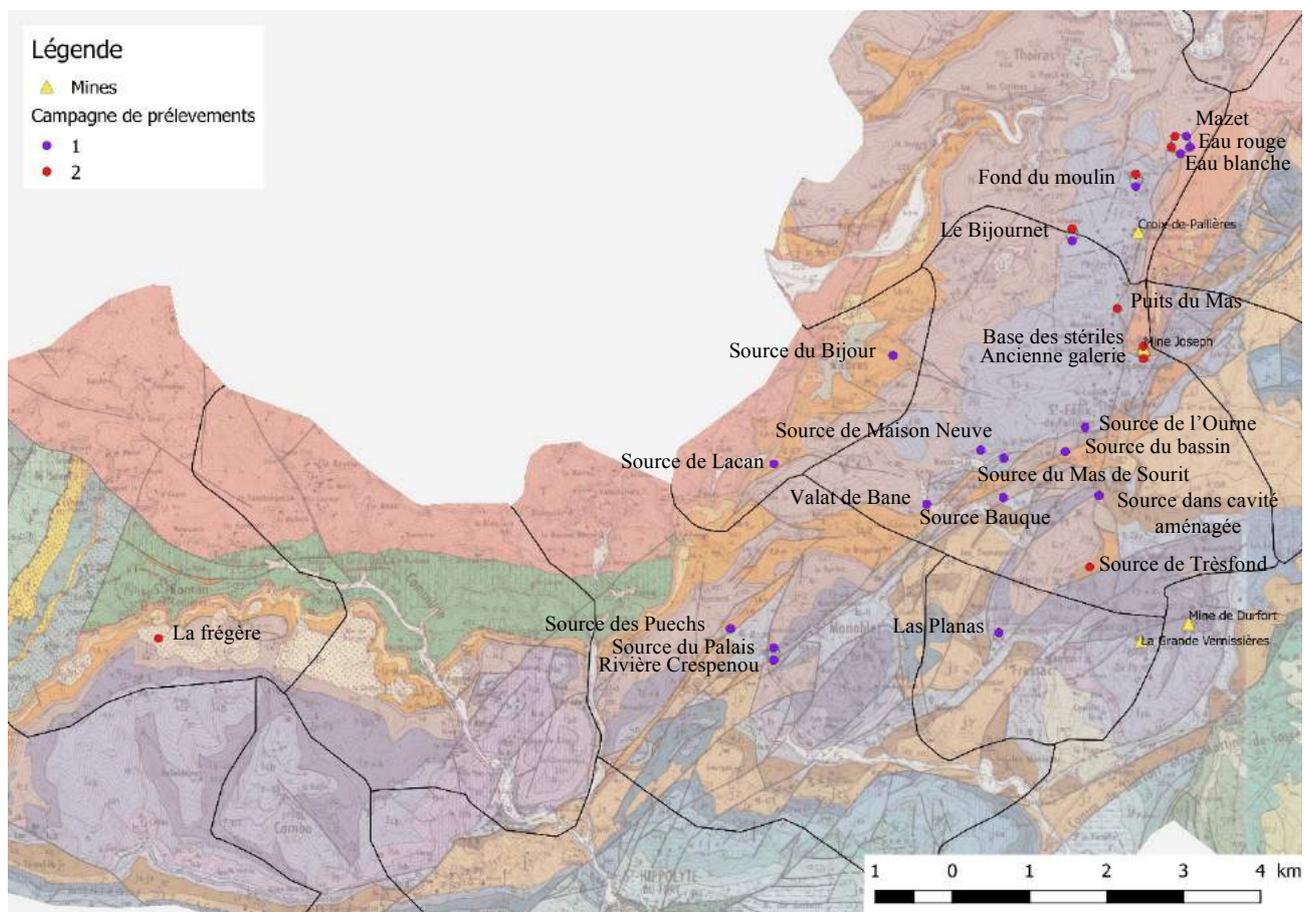


Figure 8 : Carte de la localisation des points de prélèvements

4. Procédure analytique

4.1. Mesures in-situ

Sur le terrain sont mesurés certains paramètres tels que la conductivité électrique, le pH et la température grâce à un conductimètre et un pH-mètre de terrain (Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques). En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions du milieu et susceptibles de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur place.

Lors de la seconde campagne d'autres paramètres ont été mesurés : l'oxygène dissous et le potentiel d'oxydo-réduction (eH). En effet, l'oxygène dissous va jouer un rôle dans la dissolution des roches La teneur

en oxygène dissous pour une nappe libre du domaine sédimentaire est de l'ordre de 10 mg/L (Agence de l'eau Loire-Bretagne)

4.2. Mesures au laboratoire

Les paramètres mesurés au laboratoire ainsi que les techniques utilisées sont présentés dans le Tableau 2 ci-dessous. Deux flacons sont prélevés par point d'eau ; ils serviront pour l'un à l'analyse de l'alcalinité totale (TAC) et l'autre servira pour l'analyse des cations, des anions et des éléments traces (Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques).

Tableau 2 : Mesures effectuées au laboratoire

Éléments		Technique
TAC	HCO ₃ ⁻ et CO ₃ ²⁻	Titrateur METTLER TOLEDO Rondolino G20
Cations	Ca ²⁺ ; Mg ²⁺ ; Na ⁺ et K ⁺	ICP-MS iCAP Q THERMO SCIENTIFIC
Anions	Cl ⁻ ; NO ₃ ⁻ ; SO ₄ ²⁻	Chromatographie ionique DIONEX ICS-1000
Éléments traces	<i>Annexe 9</i>	ICP-MS iCAP Q THERMO SCIENTIFIC

Résultats

1. Validité des résultats

Le calcul de la balance ionique (BI) permet de tester la validité des résultats. La balance ionique exprimée en pourcentage correspond à l'écart des résultats entre les analyses des cations et des anions. En effet, les eaux présentent une électroneutralité c'est-à-dire que la somme des concentrations des espèces chargées positivement est égale à la somme des concentrations des espèces chargées négativement.

$$\sum cations = \sum anions$$

$$BI = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100$$

NB : Les concentrations doivent être exprimées en équivalent par litre (éq/L)

Les résultats obtenus sont acceptables (*Annexe 10*) avec une balance ionique inférieure ou égale à $\pm 6\%$. On note toutefois une balance ionique trop élevée (+13 %) pour la source du Mazet du fait de l'acide trop concentrée utilisée pour la mesure de l'alcalinité par rapport à la faible conductivité de notre échantillon.

2. Présentation des résultats

Les résultats des analyses géochimiques complètes sont présentés en *Annexe 10*.

2.1. Statistiques et distribution des paramètres physico-chimiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide des logiciels R studio et Microsoft Excel.

La Figure 9 réalisée avec R studio est un corrélogramme ; les **corrélations positives** sont affichées en bleu et les **corrélations négatives ou anti-corrélations** en rouge. L'intensité de la couleur et la taille des

cercles sont proportionnelles aux **coefficients de corrélation**. En bas du **corrélogramme**, la légende de couleurs montre les **coefficients de corrélation** et les couleurs correspondantes.

Rappelons que les minéralisations plomb-zinc sont associées aux sulfates. Ainsi on a une corrélation importante entre les concentrations en ions SO_4 avec les concentrations en Mg, en Ca, en Mn, en Co, en Ni, en Zn et Cd, mais pas avec le plomb. Cependant, les concentrations en plomb semblent être corrélées avec celles de l'aluminium et du cuivre.

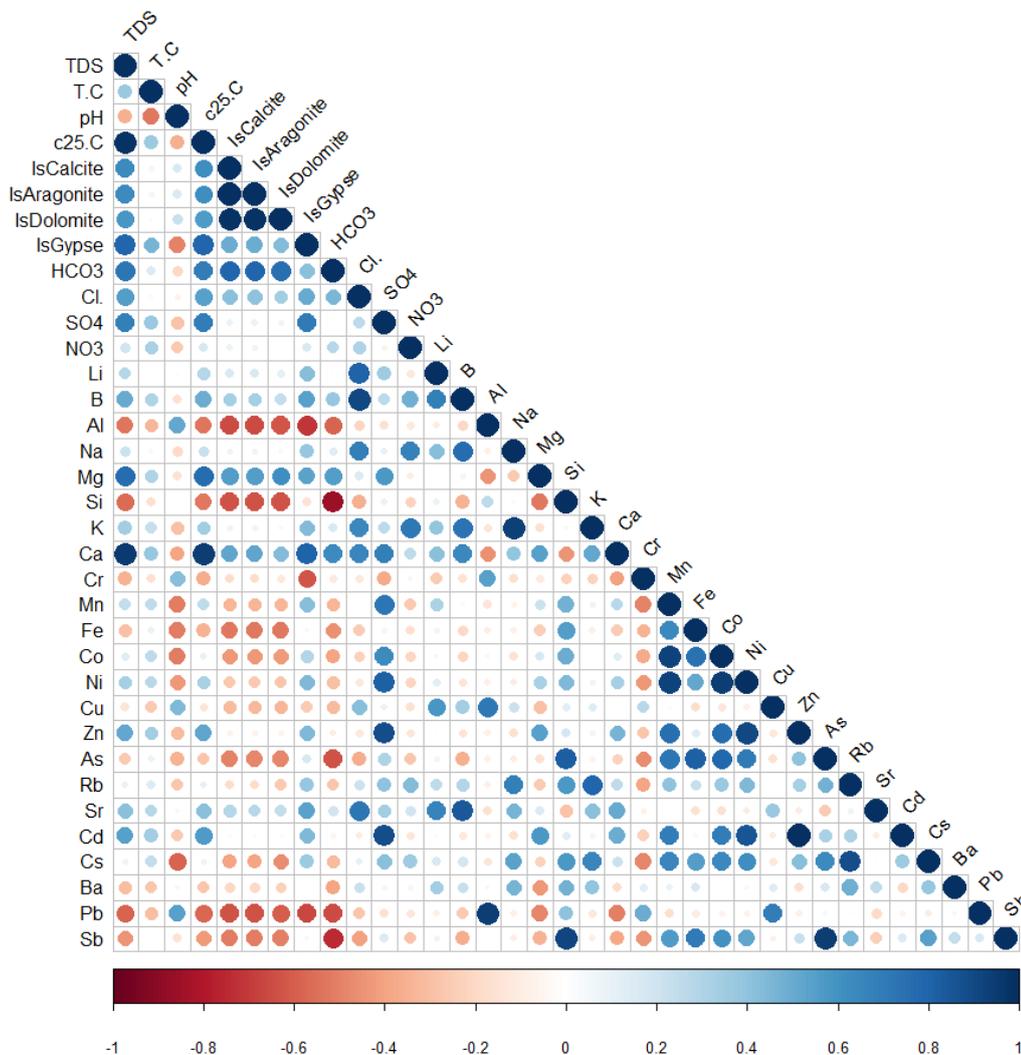


Figure 9 : Illustration des matrices de corrélation

Une Analyse en Composante Principale (ACP) à été réalisée à l'aide du logiciel R studio afin d'observer les différences entre les échantillons, mais également par quels paramètres leur composition va être influencée.

La composante 1 représente 91,93% de l'inertie totale et la composante 2 représente 7,75% de l'inertie ce qui n'est pas négligeable. Ce qui conduit à un taux d'inertie expliquée de 99,68% (Figure 10). En représentant les variables (Figure 11) en fonction de ces deux composantes on voit que celles-ci dépendent de : Ca, TDS, c25.C, B, Si et Cl pour l'axe 1. Et du Co, Cs, Ni et Mn.

Enfin la représentation des individus montre que les individus de 14 à 18 s'écartent du reste du groupe (Figure 12).

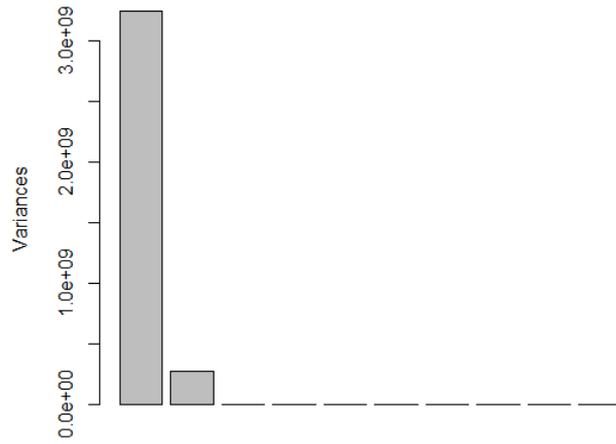


Figure 10 : Histogramme de l'inertie totale

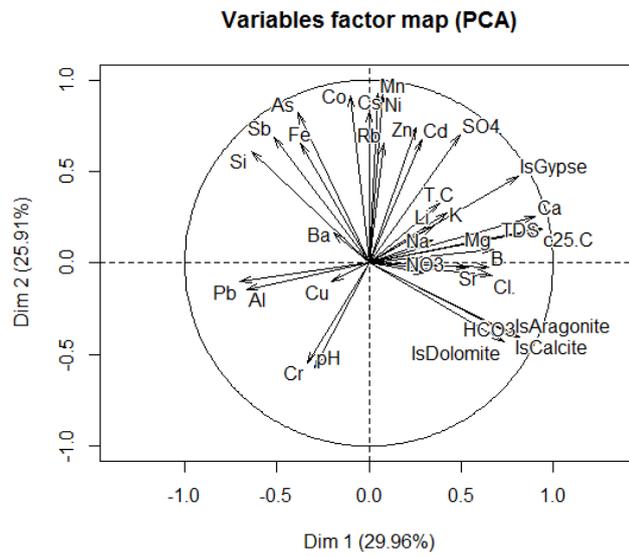


Figure 11 : Représentation des variables

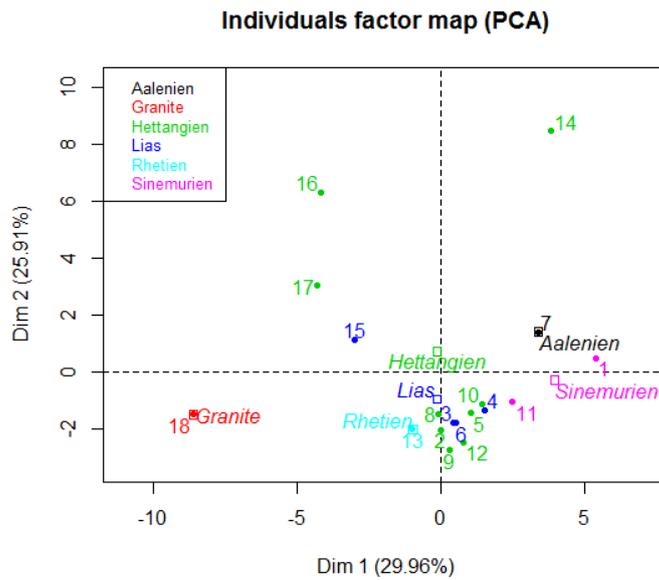


Figure 12 : Représentation des individus

2.2. Exploitation des données

2.2.1. Diagramme de Piper

La Figure 13 a été construite avec le logiciel DIAGRAMMES développé par l'Université d'Avignon. Le diagramme de Piper permet de déterminer le faciès chimique d'une eau. Le losange central présente les faciès et les deux triangles du bas les proportions en cations à gauche et en anions à droite.

On distingue trois groupes d'eau :

- Un premier groupe majoritaire avec un faciès bicarbonaté calcique et magnésien avec des eaux plutôt riches en Ca et en Mg ce qui correspond à la lithologie du secteur : les roches carbonatées de type calcaire et dolomies. À l'intérieur duquel on peut distinguer trois sous-groupes s'individualisant par les concentrations en sulfate et en chlorure qui augmentent.
- L'eau de la source du Bijournet présente un faciès franchement sulfaté calcique et magnésien. De ce fait, par rapport aux autres eaux, elle est principalement enrichie en SO_4^{2-} .
- La source du Mazet est isolée, fortement enrichie en Na et K, mais sans anions dominants.

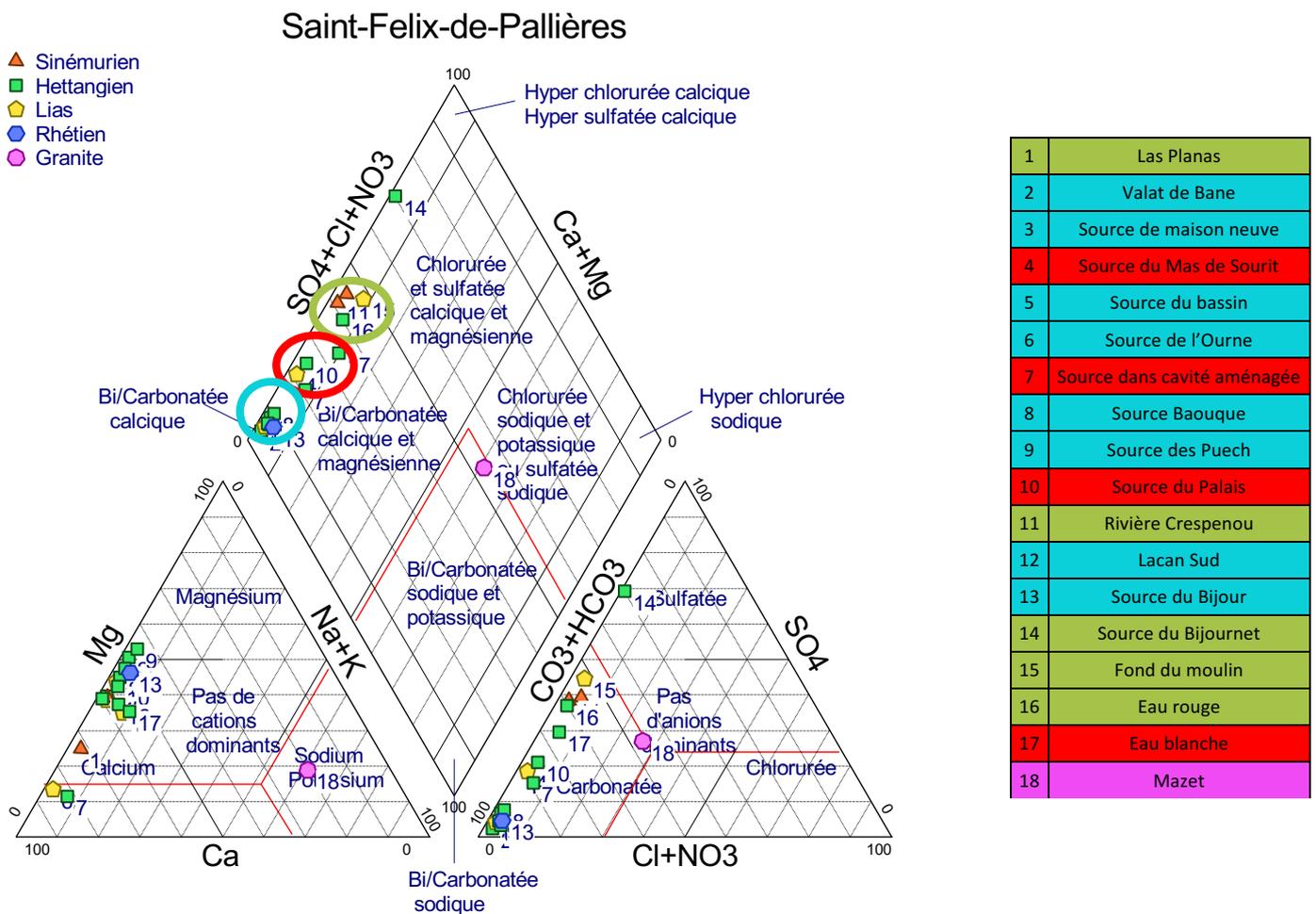


Figure 13 : Diagramme de Piper

2.2.2. Présentation des graphiques binaires

Des graphiques binaires ont été élaborés grâce au logiciel DIAGRAMMES.

2.2.2.1. Relation avec les ions chlorure

En Figure 14A sont représentés les ions chlorure (Cl^-) en fonction des ions sodium (Na^+). La droite noire représente la droite $y=x$ et correspond à la droite de dissolution de la halite ($\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) et la droite bleue représente la droite de dilution l'eau de mer. Cependant du fait de la distance à la mer de la zone d'étude les eaux ne sont pas influencées par les aérosols marins.

La majorité des eaux est proche de la droite de dissolution de la halite indiquant que la concentration en Na et en Cl dans ces eaux est principalement contrôlée par la dissolution de ce minéral. Les concentrations en Na et Cl allant de 0,15 à 0,3 meq/L. La source de la cavité aménagée reste sur cette droite, mais est particulièrement enrichie en Na et Cl.

Les eaux prélevées au Nord de Saint-Félix-de-Pallières (de 15 à 18) montrent un enrichissement en sodium qui ne provient pas de la halite.

De plus, la source de Las Planas (1) présente un enrichissement en chlorure dont l'origine reste à expliquer.

2.2.2.2. Relation avec le calcium et le magnésium

La Figure 14B présente la variation des ions bicarbonates en fonction de la somme des ions calcium et magnésium. La droite d'équation $y=x/2$ (puisque en meq/L $\text{Ca}+\text{Mg} = 2 \text{HCO}_3$) représente la droite de dissolution des roches carbonatées (calcaires et dolomies confondues). Les eaux issues de l'Hettangien et du Lias sont regroupées entre elles (on l'appellera « groupe principal » par la suite). Cependant, les eaux 15, 16 et 17 présentent des concentrations plus faibles que les autres eaux de même lithologie. L'eau de la source du Bijour issu du Rhétien, se trouve sur la même droite. Toutefois, les eaux du Sinémurien et celle de la source du Bijournet s'en écartent du fait d'un enrichissement en Ca et Mg. L'eau du Mazet issue de granite est très appauvrie.

2.2.2.3. Relation avec les évaporites

Les évaporites telles que le gypse (CaSO_4) peuvent être présentes dans notre zone d'étude puisque le trias est affleurant. C'est pourquoi des diagrammes binaires en rapport avec des minéraux évaporitiques tels que Ca, SO_4 , Sr et Li sont présentés sur les Figure 14E à H.

La Figure 14C montre la relation SO_4 en fonction de Ca. Le groupe principal des eaux se situe en dessous de la droite de dissolution du gypse et n'est donc pas contrôlé par ce minéral étant donné les concentrations en sulfates faibles par rapport au calcium qui est principalement contrôlé par la calcite. Les sources du Sinémurien se distinguent de ce groupe avec des concentrations plus importantes en sulfates tout en restant enrichies en calcium. La source de Las Planas (1) est particulièrement enrichie en sulfates.

Seule l'eau de la source du Bijournet qui présente un faciès sulfaté comme vu précédemment sur le diagramme de Piper (Figure 13) semble marquer par la dissolution du gypse, avec un enrichissement important en sulfate par rapport aux autres eaux de même lithologie.

De plus, si l'on s'intéresse aux relations avec le strontium présenté en Figure 14D et E on distingue trois groupes : le groupe principal très peu concentré en ces éléments, les eaux du Sinémurien plus riches en

strontium et les eaux 7 et 10 qui ont des concentrations intermédiaires, tout en se démarquant du groupe principal.

Sur le diagramme sulfate/strontium (Figure 14E), le Bijournet se distingue comme précédemment du fait de ses concentrations en sulfates plus importantes.

Et pour ce qui est des relations avec le lithium et le bore (Figure 14F), on retrouve une même tendance que précédemment : le groupe principal avec de faibles concentrations et les eaux du Sinémurien qui s'en écartent avec les eaux 7 et 10.

2.2.3.Éléments chimiques présents dans les minéralisations et dans les résidus miniers

Les éléments chimiques marquant la minéralisation sont : le Plomb (Pb), le Zinc (Zn), l'Arsecenic (As), le Cadmium (Cd), l'Antimoine (Sb), le Manganèse (Mn), le Fer (Fe) et le Cuivre (Cu). Si on regarde leur répartition (Figure 15), ils présentent des concentrations enrichies (en comparaison aux autres sources de la zone) dans les eaux de la source du Bijournet, de la source de Fond du Moulin, les sources « eau rouge » et « eau blanche » ainsi qu'au Mazet. Avec des dépassements des normes de potabilité présenté dans le tableau ci-dessous. On a par exemple un dépassement de 2789,6% de la norme du fer pour la source eau rouge.

Tableau 3 : Dépassement des normes de potabilité

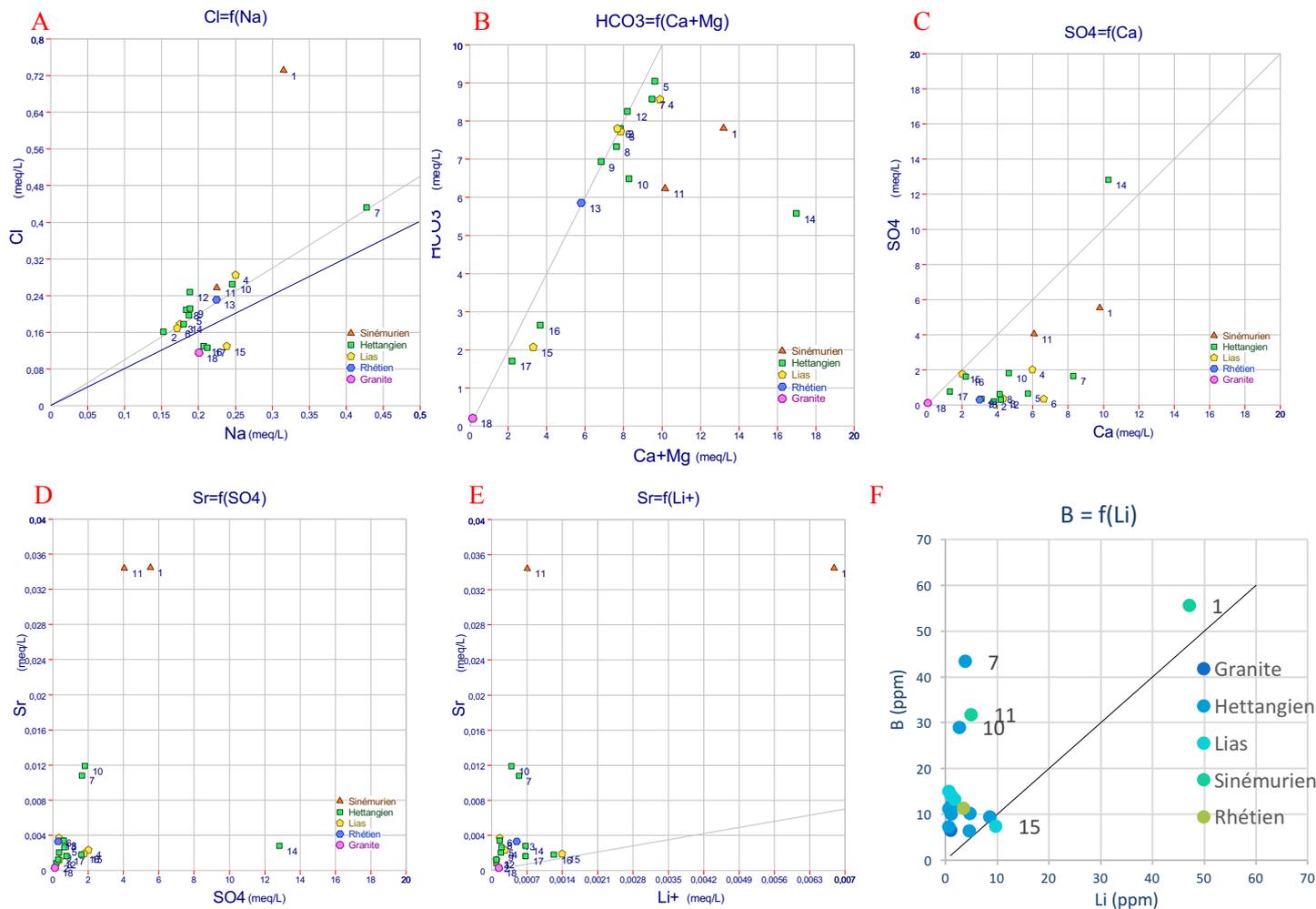
		Lithologie	SO4	Ca2+	Mn	Fe	As
Pourcentage de dépassement par échantillon des normes de potabilité	Las Planas	Sinémurien	6,3%	22,9%	221,5%	-	-
	Source dans cavité aménagée	Aalenien	-	4,1%	-	-	-
	Source du Bijournet	Hettangien	146,5%	28,7%	706,9%	280,1%	16%
	Fond du moulin	Lias	-	-	-	-	28%
	Eau rouge	Hettangien	-	-	483,5%	2789,6%	107%
	Eau blanche	Hettangien	-	-	312,4%	788,0%	8%
		Effectif	SO4	Ca2+	Mn	Fe	As
Pourcentage de sources dépassant les normes de potabilité	Aalenien	1	-	100%	-	-	-
	Granite	1	-	-	-	-	-
	Hettangien	9	11%	11%	33%	33%	33%
	Lias	4	-	-	-	-	25%
	Rhétien	1	-	-	-	-	-
	Sinémurien	2	50%	50%	50%	-	-
Pourcentage total de source dépassant les normes de potabilité		18	11%	17%	22%	17%	22%

On a une particularité pour le plomb qui se retrouve en plus forte concentration à la source du Mazet et le cuivre à la source de Las Planas, du Mazet et en plus faible concentration à la source de Fond du Moulin.

Les concentrations en zinc mesurées dans les sédiments où il avait été montrée de plus fortes concentrations dans la partie Nord de Saint-Félix-de-Pallières (Gouin and Bailly, 2011) pourraient correspondre avec les concentrations mesurées dans les eaux souterraines. On peut penser que pour d'autres éléments on retrouverait la même tendance.

2.2.4. Autres résultats

Pour plusieurs sources, certains éléments chimiques présents dans les eaux ne peuvent être négligés. C'est notamment le cas de la source du Mazet pourtant très peu minéralisée, qui présente des concentrations en éléments traces plus élevées que les autres eaux, en particulier les Terres rares (*Annexe 10*).



1	Las Planas	10	Source du Palais
2	Valat de Bane	11	Rivière Crespenou
3	Source de maison neuve	12	Lacan Sud
4	Source du Mas de Sourit	13	Source du Bijour
5	Source du bassin	14	Source du Bijournet
6	Source de l'Ourne	15	Fond du moulin
7	Source dans cavité aménagée	16	Eau rouge
8	Source Baouque	17	Eau blanche
9	Source des Puech	18	Mazet

Figure 14 : Diagrammes binaires

Interprétations

1. Caractérisation globale des eaux

1.1. Identification d'un facteur de contrôle

Cette première série d'analyses des eaux souterraines vient éclaircir la chimie des eaux souterraines du massif de Saint-Félix-de-Pallières. Les concentrations en éléments majeurs semblent être liées à la lithologie du secteur comme vu précédemment sur le diagramme de Piper (Figure 13).

Les différents diagrammes binaires ont permis de montrer la formation d'un groupe principal constitué par les eaux situées plus au Sud du secteur d'étude qui représente le bruit de fond géochimique.

Cependant, certaines eaux peuvent présenter des enrichissements en certains éléments comme en chlorure pour la source de Las Planas, en SO_4 pour la source du Bijournet, en strontium pour les eaux du Sinémurien. Ou parfois des concentrations plus faibles en éléments majeurs comme notamment à la source du Fond du moulin et aux sources Eau rouge et Eau blanche. Cela peut s'expliquer par la petite taille des aquifères du fait de la forte compartimentation des aquifères par les failles et donc un faible temps de séjour dans ces derniers.

De plus, les concentrations en éléments traces vont être pour la plupart faibles à très faibles avec toutefois des éléments plus concentrés comme le fer qui peut être trouvé en quantités importantes dans certaines eaux, la présence de fer dans ces eaux paraissait évidente lors du prélèvement à la vue de la coloration rougeâtre de l'eau. Mais on a aussi d'autres éléments que l'on devrait retrouver comme le plomb où les concentrations sont assez faibles témoignant d'une faible mobilité de cet élément dans les eaux du secteur (Ratio Pb/Zn moyen = 0,66%).

Ainsi les concentrations observées dans les points d'eau suivants : eau rouge, eau blanche, la source du Bijournet et le Fond du Moulin pourraient être liées à des apports additionnels au fond géochimique au niveau de la région d'étude ou être dues à un fond géochimique localement plus élevé.

De plus, les eaux du Sinémurien semblent être plus riches en éléments chimiques issus de minéraux de roches évaporitiques présents dans la série sinémurienne.

Enfin, la source du Mazet où les concentrations très faibles en éléments majeurs semblent montrer qu'il s'agit d'une eau superficielle très peu minéralisée, sortant des granites et dont le temps de séjour pourrait être très court. Cependant, les teneurs en éléments traces sont remarquables et nous suggèrent plutôt des remontées plus profondes à travers un réseau de failles.

L'étude statistique par ACP, vient confirmer ces résultats avec l'ensemble des sources représentant le fond géochimique du secteur se regroupant selon leur lithologie. On a ensuite la source du Mazet issue d'une lithologie différente qui s'écarte des autres sources et va dépendre des concentrations en Pb et en Al. Les sources eau rouge et eau blanche et la source du Fond du moulin semblent être corrélés avec les concentrations en Si, Sb, As et Fe. Avec toutefois, une corrélation plus importante pour la source Eau rouge. La source du Bijournet, s'écartent du groupe, elle est corrélée avec les deux axes donc avec les concentrations en calcium et en Mn, Ni, Rb, Cs élevée mais va dépendre également des concentrations en sulfates et en cadmium. Celle-

ci contient également une quantité non négligeable de thallium. On a toutefois entre ces sources des différences marquées entre elles avec des concentrations différentes (ex : le thallium dans la source du Bijournet), ce qui nous laisse penser à des minéralisations des eaux différentes.

2. Éléments de conclusion

2.1. Contribution de l'interaction eau-roche à la chimie des eaux souterraines

Dans la majorité des cas, la chimie des eaux souterraines du secteur d'étude reflète la lithologie dont elles sont originelles avec des minéralisations plus ou moins importantes selon leur temps de séjour. Le fond géochimique a pu être défini grâce au groupe principal que l'on a pu mettre en évidence sur les diagrammes binaires (Figure 14).

Toutefois, certains points de mesures présentent des minéralisations plus importantes avec des concentrations plus élevées en certains éléments chimiques, mais il est difficile à ce stade de l'étude de quantifier la part des contaminants, qui pourraient être issus de l'activité minière par rapport au fond géochimique local pour certaines sources situées dans la zone de Pallières. En effet, les matériaux situés sur le trajet des eaux souterraines (anciennes galeries de mines remblayées par des stériles) ou stockées au sein des haldes, sont sujets à une forte instabilité chimique dans les nouvelles conditions d'oxydoréduction auxquelles ils sont soumis puisqu'ils contiennent naturellement plusieurs pour cent de sulfures de métaux, instables en conditions oxydantes. Cette altération, phénomène universel dans les haldes ou les anciennes galeries conduit à la libération de métaux et de grandes quantités d'ions sulfate (SO_4) (Bril and Floc'h, 2001). Ce que l'on retrouve dans certaines de nos sources pourtant ces sulfates pourraient provenir de la dissolution des minéralisations naturelles.

2.2. Rôle des failles dans le phénomène de dilution

Nous savons que les écoulements se font principalement par le biais des roches karstifiées, suivant l'orientation des failles, cependant les faibles concentrations en éléments traces trouvés sur notre zone d'étude suggèrent deux processus de minéralisation des eaux :

- Les eaux dans le système karstique, circulant rapidement, ne permettent pas la mise en solution d'une quantité importante d'éléments traces présents dans les minéralisations.
- Les eaux de ruissellement s'infiltrent à travers les résidus miniers en surface. Ces eaux fortement minéralisées circulent par le biais des failles et atteignent les aquifères sous-jacents où elles sont diluées.

Ceci pourrait expliquer la chimie des eaux du Sud de la zone d'étude très peu concentrée en éléments traces.

Conclusion

Le secteur d'étude, proche de Saint-Félix-de-Pallières, présente des structures géologiques riches en plomb et en zinc. Ces métaux étaient exploités au sein des mines de « La Croix de Pallières », « la mine Joseph » et « La grande Vernissière », dont on observe encore aujourd'hui la présence de résidus miniers. À cause de leur mise à nu par le biais de leur exploitation, ces résidus d'éléments chimiques sont présents dans les sols en concentrations plus élevées que la moyenne locale.

De plus, dans ce secteur fortement tectonisé, la présence de failles majeures va créer des zones d'écoulements préférentiels. Ainsi, suite à l'analyse géochimique des eaux issues de 18 « sources » sélectionnée sur le secteur, on y observe pour certaines d'entre elles des concentrations en éléments chimiques potentiellement dangereux tel que des métaux. Certes, ces concentrations sont non négligeables surtout au niveau des points d'eau prélevés au Nord de la mine de la Croix-de-Pallières. Cependant, les concentrations observées dans les eaux sont très faibles par rapport aux concentrations mesurées dans les résidus miniers.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces variations spatiales de concentrations. Le plus probable serait lié à la géologie du secteur. Tout d'abord, le réseau de roches karstifiées, impactées par un important réseau de failles, serait responsable de la dilution des eaux du secteur. En effet, l'ensemble de l'eau infiltrée sur le système karstifié formerait un apport d'eau conséquent, responsable de la dilution de nos eaux, initialement fortement concentrée.

L'autre hypothèse serait que les eaux traversant les résidus miniers n'atteignent pas les aquifères et que les concentrations s'expliqueraient par une mise en contact dans le réseau karstique des minéralisations en plomb et zinc, mais le temps de séjour trop court ne permet pas une mise en solution importante des éléments.

Perspectives

Étant donné la difficulté à ce stade de définir la part anthropique et naturelle d'altération sur la chimie des eaux il convient donc de poursuivre l'étude plus au Sud du secteur vers la zone de Cambo (secteur 4). Étant donné que l'on retrouve la même lithologie, mais qu'aucune exploitation minière n'ait eu lieu dans cette zone, ceci permettrait de savoir si les minéralisations naturelles non exploitées (« le fond géochimique ») peuvent expliquer certaines valeurs élevées en certains métaux et métalloïdes dans les eaux souterraines sur l'ensemble de la bordure sous-cévenole ou bien si ce sont les résidus miniers qui sont à l'origine de ces concentrations élevées en ces éléments.

De plus, si le budget de l'étude le permet, il serait également intéressant d'analyser les eaux dans des forages. En effet, les forages et/ou captages d'eau potable. En effet, les forages situés à proximité des zones de stockage de résidus miniers permettraient d'estimer la dilution de ces éléments entre la zone de stockage et les sources plus éloignées. De plus, les eaux potables pourraient être analysées pour déterminer la présence éventuelle de ces éléments traces dans les eaux.

Bibliographie

- Agence de l'eau Loire-Bretagne, n.d. Cahier pédagogique n°4 - A la découverte des eaux souterraines - CP4_LD.pdf [WWW Document]. URL http://www.eau-loire-bretagne.fr/espace_educatif/outils_pedagogiques/educateurs_et_enseignants/CP4_LD.pdf (accessed 7.12.16).
- Alabouvette, B., 1988. Carte géologique de la France BRGM Le Vigan 937.
- BRGM, 1997. Les résidus miniers français: typologie et principaux impacts environnementaux potentiels (No. RR-39503-FR).
- BRGM, n.d. Calcaires du Lias et jurassique de la bordure cévenole entre Ales et Sumène.
- Bril, H., Floc'h, J.P., 2001. Le devenir des métaux provenant des anciennes mines; l'exemple du Massif central français. *Géologues* 130, 233–241.
- Coubes, L., Lemaire, B., 1971. Alimentation en eau du village de vacances de monoblet (Gard) (No. 72–SGN–030–LRO).
- Coubes, L., Martin, P., 1971. Etude géologique préliminaire - Village de vacances de Monoblet (GARD) (No. 71–SGN–132–LRO).
- Coumoul, A., Aubague, M., 1988. Recherches de nouvelles minéralisations Zn-Pb sur le flanc ouest du horst de Pallières (bordure cévenole, Gard) (No. 88–DAM–001–OP4).
- Damon, E., Corre, R., 2013. Diagnostique environnemental interprétation de l'état des milieux (IEM) - Anciens sites miniers sur les communes de Saint-Felix-De-Pallières et Thoiras (30) (No. AIX120851R-VP2).
- Dionex Corporation, n.d. ICS-1000 Ion Chromatography System Operator's Manual - 4559-031879_02 ICS-1000 manual.pdf.
- ENSEGID Bordeaux, n.d. La chromatographie ionique [WWW Document]. URL <about:blank> (accessed 6.8.16).
- Geoportail.gouv.fr, n.d. Toutes les données - Géoportail [WWW Document]. URL <http://www.geoportail.gouv.fr/donnees> (accessed 6.8.16).
- Gouin, J., Bailly, L., 2011. Actualisation des connaissances du potentiel minier français : Le gisement à Zn-Pb-(Ge) de La Croix de Pallières (Gard) (No. RP-60617-FR).
- Hydrosciences Montpellier, n.d. Organigramme HSM.
- Jost, A., 2001. Etude des paléo-circulations de fluides de la bordure cévenole à l'Eocène, engendrées par l'orogénèse pyrénéenne, potentiellement responsables des minéralisations de type Mississippi Valley.
- Karim, Y., 1973. Relation entre la minéralisation et l'évolution sédimentologique, diagénétique et géochimique du Lias inférieur, dans le gisement plombo-zincifère de St-Felix-de-Pallières (Gard, France). Université de Paris VI.
- Larousse.fr, n.d. Larousse.fr : encyclopédie et dictionnaires gratuits en ligne [WWW Document]. URL <http://larousse.fr/> (accessed 6.8.16).
- Mairie de Durfort et St Martin de Sossenac, n.d. Les mines de Durfort [WWW Document]. URL <http://www.mairie-durfort.fr>
- Marchal, J., Blaise, M., 2004. Actualisation de la synthèse hydrogéologique en région Languedoc-Roussillon (No. BRGM/RP-53020-FR).
- Météo France, n.d. CLIMAT MONT-AIGOUAL par Météo-France - Normales et relevés sur la station de MONT-AIGOUAL [WWW Document]. URL <http://www.meteofrance.com/climat/france/mont-aigoual/30339001/normales> (accessed 5.26.16).
- Midi Libre, 2016. Gard : pollution dans une ancienne mine, dix-huit plaintes au pénal [WWW Document]. *MidiLibre.fr*. URL <http://www.midilibre.fr/2016/02/25/pollution-a-l-arsenic-au-plomb-et-au-cadmium-des-gardois-portent-plainte,1291481.php> (accessed 6.8.16).
- Picot, A., Tsakiris, J., 2013. Chape de plomb sur le site minier de Saint-Felix-de-Pallières (Gard).
- Rolley, J.-P., 2007. Géologie du département du GARD. Alès.
- Thierrin, J., Steffen, P., Cornaz, S., Vuataz, F.-D., Balderer, W., Looser, M., 2003. Guide pratique: échantillonnage des eaux souterraines.
- Ulule, 2016. Cévennes en eaux troubles [WWW Document]. *Ulule*. URL <https://fr.ulule.com/depollution-mines/> (accessed 5.4.16).
- Urgelli, B., 2001. École de Terrain - Histoire tectonique de la faille des Cévennes [WWW Document]. URL <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/excursion-cevennes.xml> (accessed 6.8.16).
- Washington University in St. Louis, n.d. ICP-MS [WWW Document]. URL <http://eecelabs.seas.wustl.edu/ICP-MS.aspx> (accessed 6.8.16).

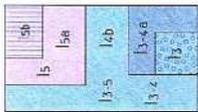
Annexes

Légende

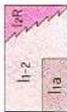
— coupes



1.25 0 1.25 2.5 3.75 5 km

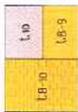


- Sénozoïque (Cenozoïque)**
- ls - Calcaires siliceux (Craie(s) supérieurs)
 - ls8 - Calcaires à débris feuilletés (Craie(s)-Craie(s) inférieurs)
 - ls5 - Calcaires fins à coquilles (Craie(s) supérieurs)
 - ls4 - ls4a - ls4b - Lias calcaire indifférencié
 - ls3 - Calcaires molles et calcaires à sphaères
 - ls2 - Dolomites azimutales (Sinozoïque (Lithothamnien inférieurs))
 - ls1 - Calcaires rocheux (Sinozoïque)
 - ls0 -

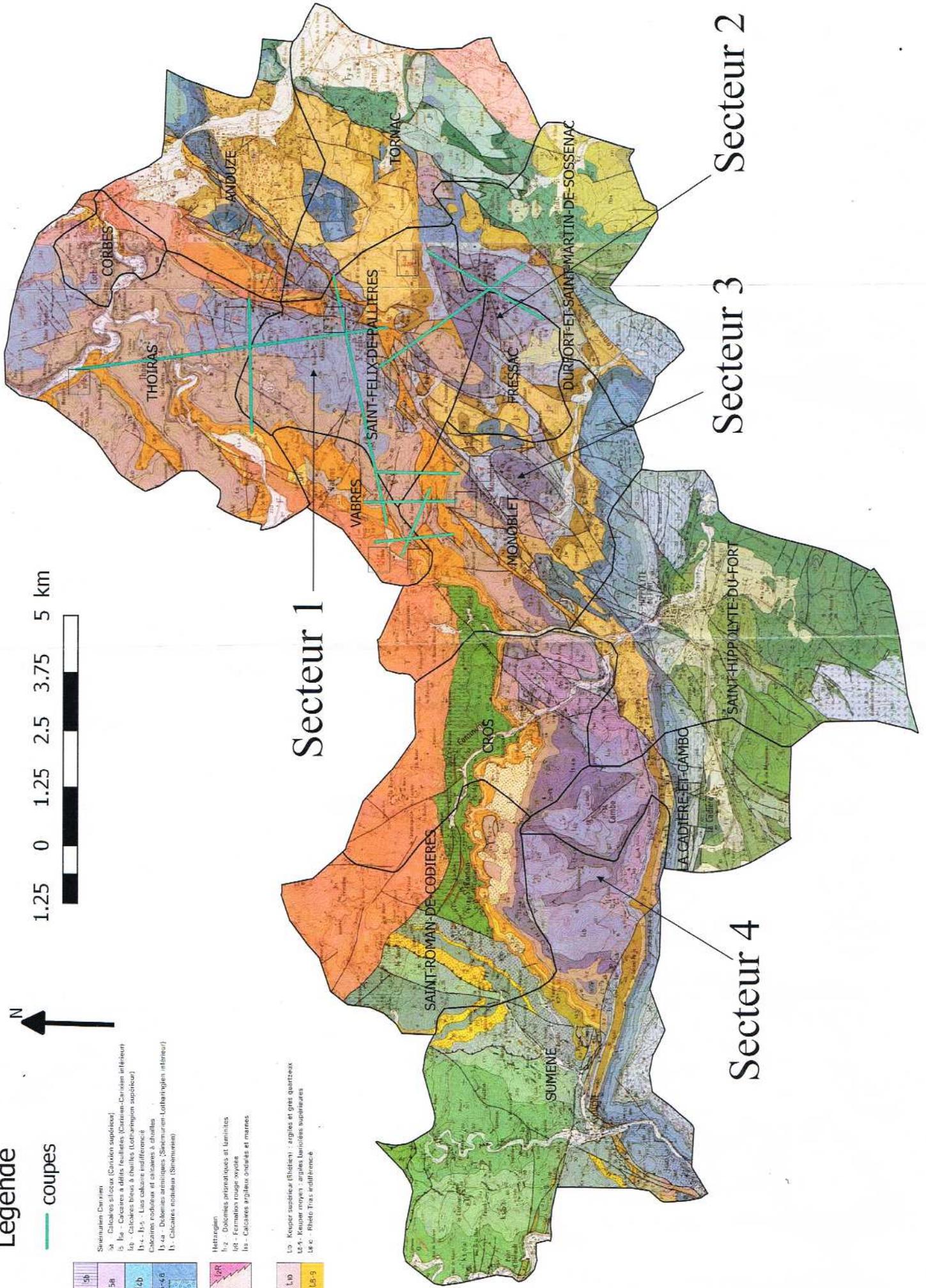


- Mésozoïque**
- m2 - Dolomites prismatiques et laminites
 - m1 - Formation rouge oxydée
 - m0 - Calcaires argileux ondulés et marins

Trias



- Trias**
- t0 - Keuper supérieur (Elsässen) : argiles et grès quartzeux
 - t1 - Keuper moyen : argiles bentonitiques supérieures
 - t2 - Rhétas
 - t3 - Rhétas indifférenciés
 - t4 -
 - t5 -
 - t6 -
 - t7 -



Secteur 1

Secteur 4

Secteur 3

Secteur 2

Annexe 2 : Log stratigraphique du secteur d'étude

Log	Ère	Description	Propriétés hydrogéologiques	
	Sinémurien Lotharingien inférieur	Dolomies arénitiques : Bancs plus massif que dans l'Hettangien, stratifications obliques fréquentes, grain plus grossiers, structure arénitiques reconnaissable à lithoclastes, oolithes, gravelles et bioclastes		
	Lias	Lias calcaires indifférencié : pour des raisons de complications tectoniques ou d'homogénéité composé des calcaires noduleux du Sinémurien et les calcarénites fines du Latharingien supérieur. Couches renfermant du Zn et Pb	Aquifère Karstifié	
	Jurassique	Hettangien	Dolomies prismatiques et laminites : dolomies en bancs métriques, à débit prismatiques et grains plutôt fins. Réduction de l'épaisseur au niveau du petit horst de Pallières lié à une érosion anté-sinémurienne.	Alimentent les sources moins importantes mais plus nombreuses du Lias ou quelque fois du Trias
		Rhétien	Argiles et grès quartzeux : alternance d'argile vert-pâle, de grès grossiers à quartz roulés blancs, de dolomies et de calcaires.	Perméabilité faible
	Trias	Rhéto-trias	Argiles : argiles bariolées grises ou vertes	Substratum

Annexe 3 : Étude des sondages

Secteur 1

Du fait de la recherche de minéralisation riche en plomb et en zinc, le secteur présente de nombreux forages d'exploration. Nous avons ici étudié la corrélation entre les sondages en suivant les mêmes transects que nos coupes géologiques. Avec tout d'abord, sur la figure 1 les sondages allant du Sud au Nord, puis sur la figure 2 en suivant la coupe réalisée au Sud et la figure 3 en suivant la coupe au niveau de Le Bijournet.

On peut voir sur la figure 1, des épaisseurs de couches variables entre le Sud et le Nord, avec des épaisseurs de l'Hettangien beaucoup plus importantes au centre et moins importantes au Sud formant une cuvette. Les soulèvements au Sud et au Nord pourraient s'expliquer par un paléorelief.

Le Sinémurien s'épaissit au Sud, on le retrouve également sur la Figure 2. On peut voir sur cette même figure un décalage des couches entre le sondage CMB2 et CMB3 on pourrait imaginer la présence d'une faille. Et à l'Est au niveau du sondage CC on a une remontée des couches liée à des failles que l'on a pu montrer sur la coupe géologique. On retrouve également cette forme particulière en cuvette.

Enfin sur la Figure 3, on a toujours cette forme de cuvette avec un épaississement des couches au centre. Lorsque l'on observe le décalage entre les couches, on peut imaginer la présence de failles présentes sur les coupes géologiques entre les sondages.

Sud

Nord

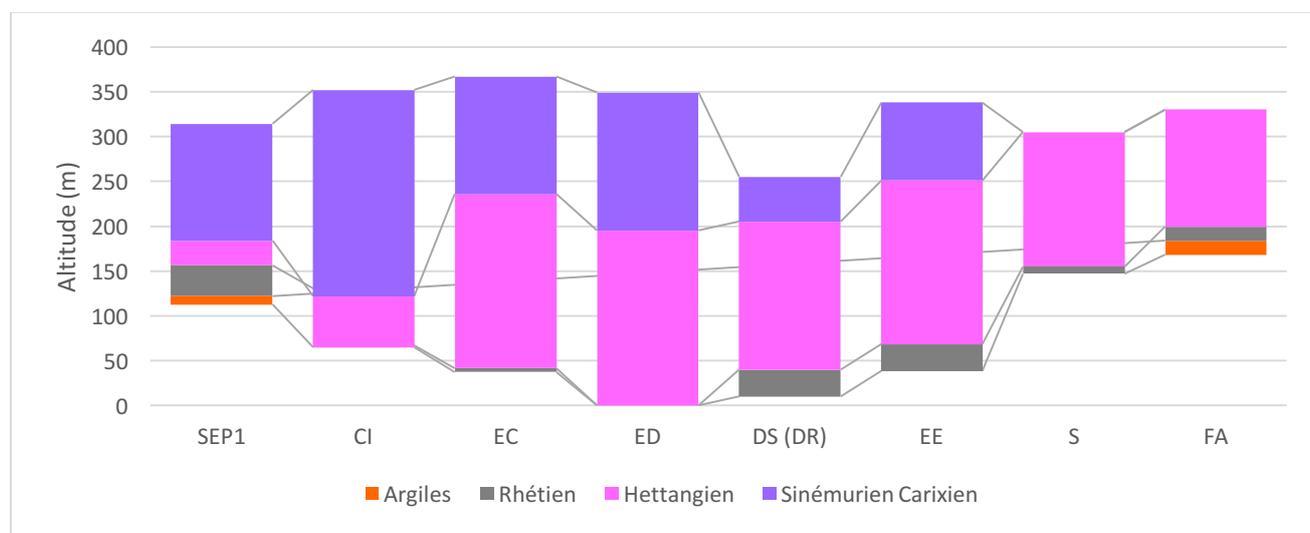


Figure 1 : Corrélation entre les sondages (S-N)

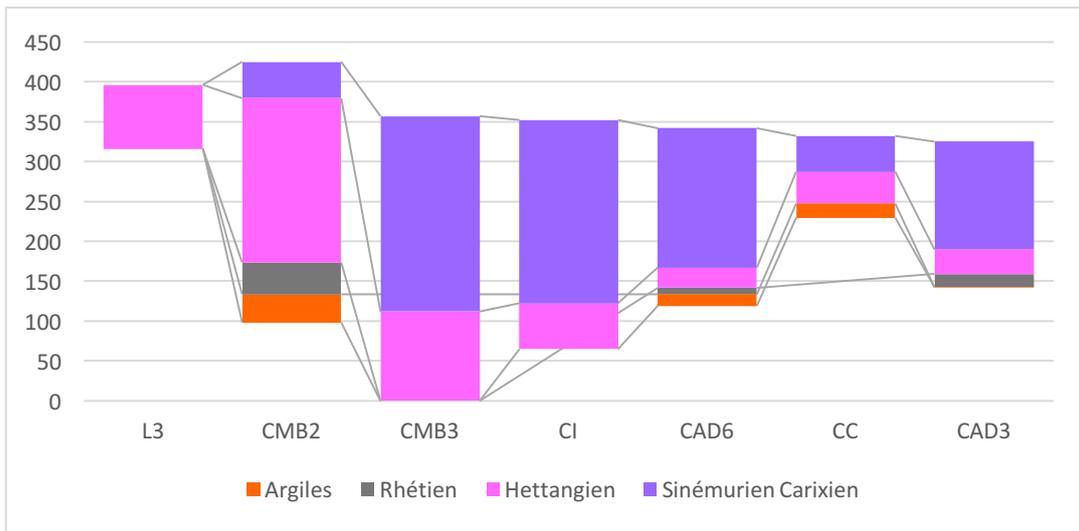


Figure 2 : Corrélation entre les sondages (W-E) au Sud

Ouest

Est

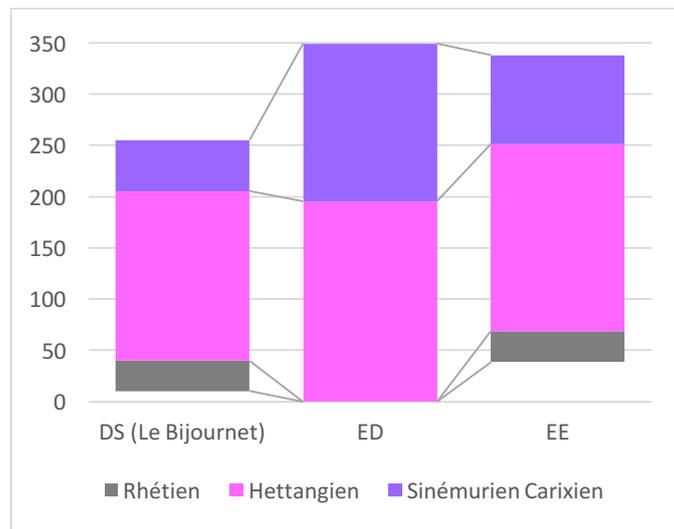
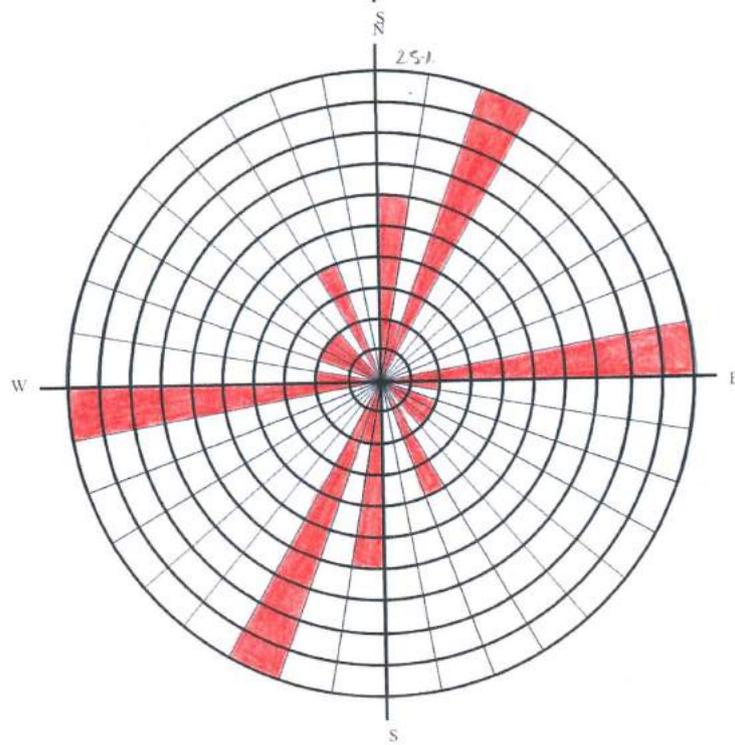
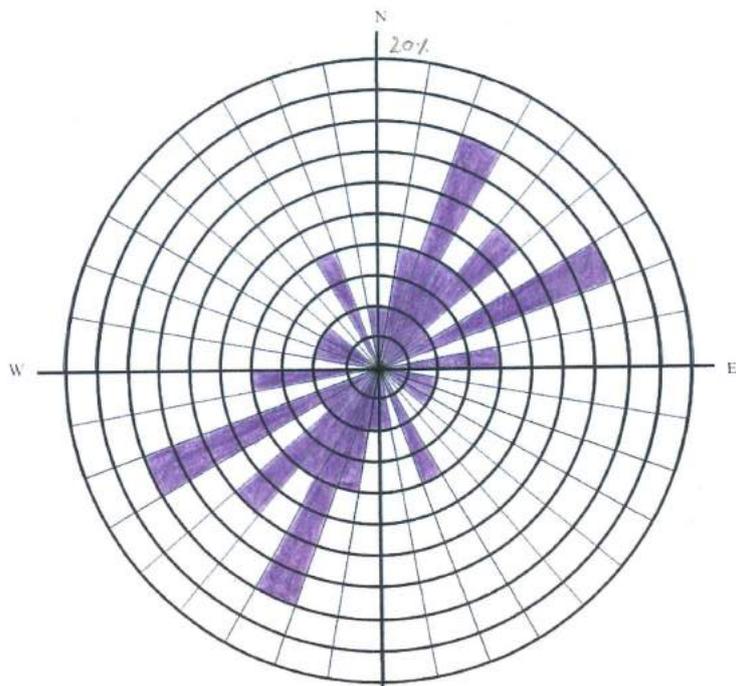
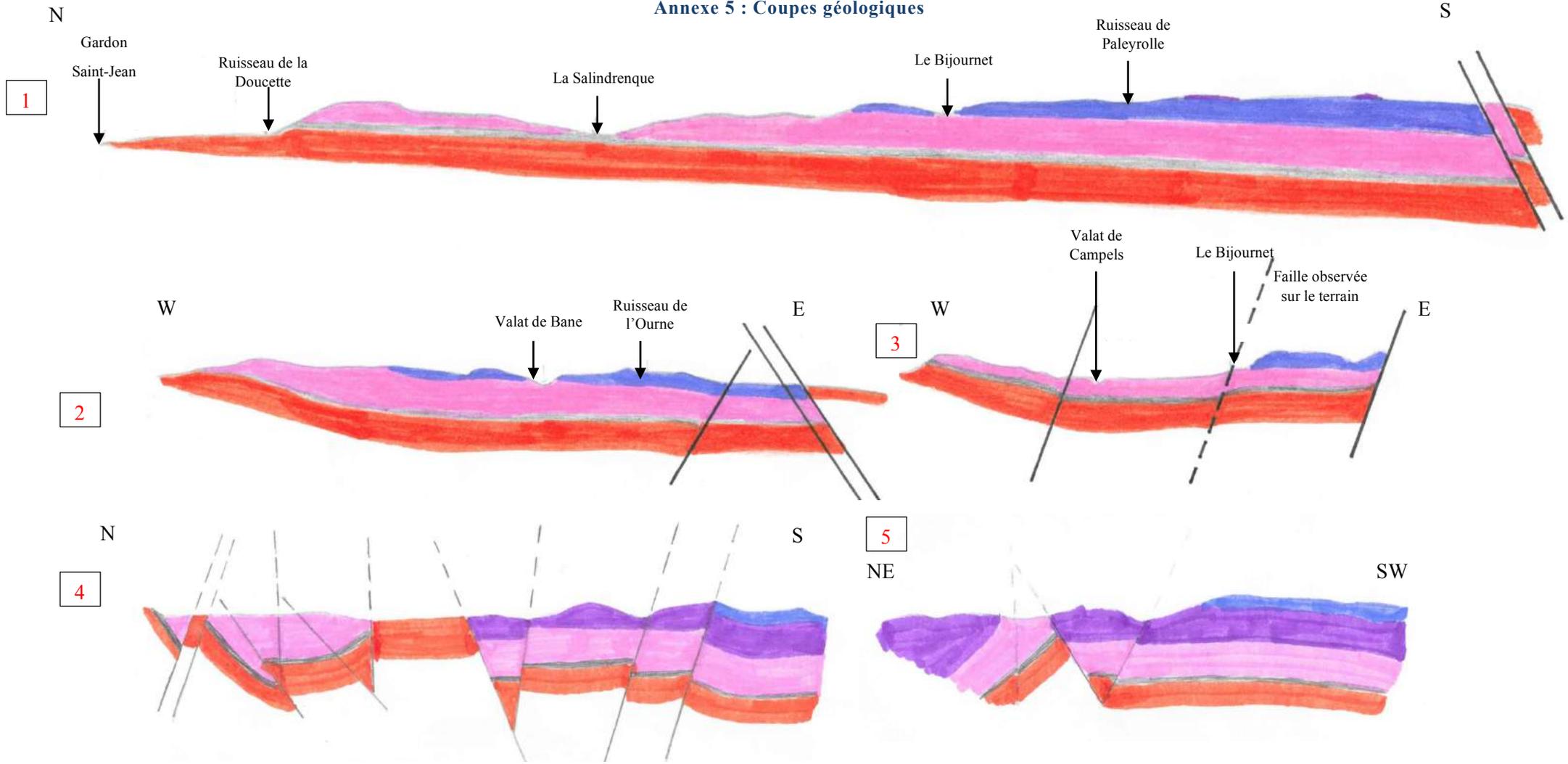


Figure 3 : Corrélation entre les sondages (W-E) au Nord

Annexe 4 : Rosaces de fracturation

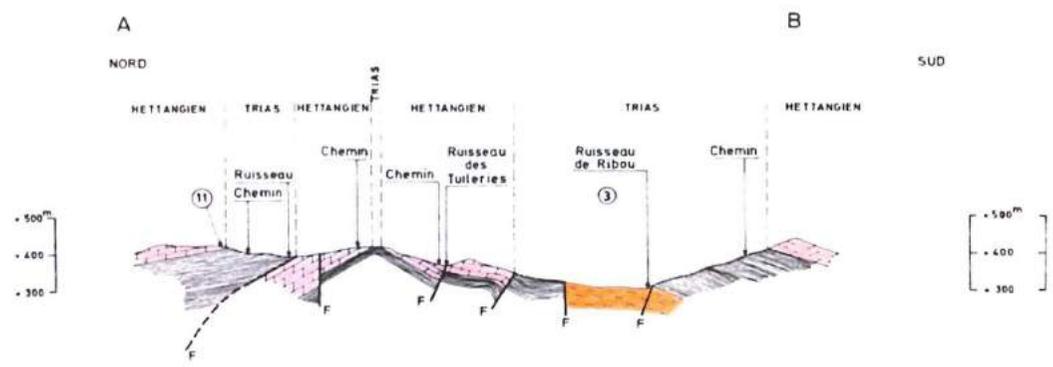


Annexe 5 : Coupes géologiques

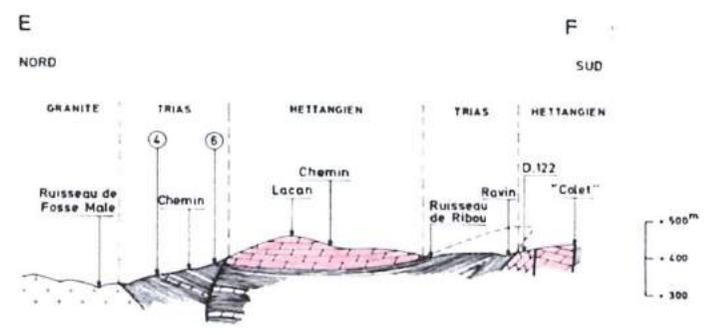


- Sinémurien
- Lias
- Hettangien
- Rhétien
- Trias

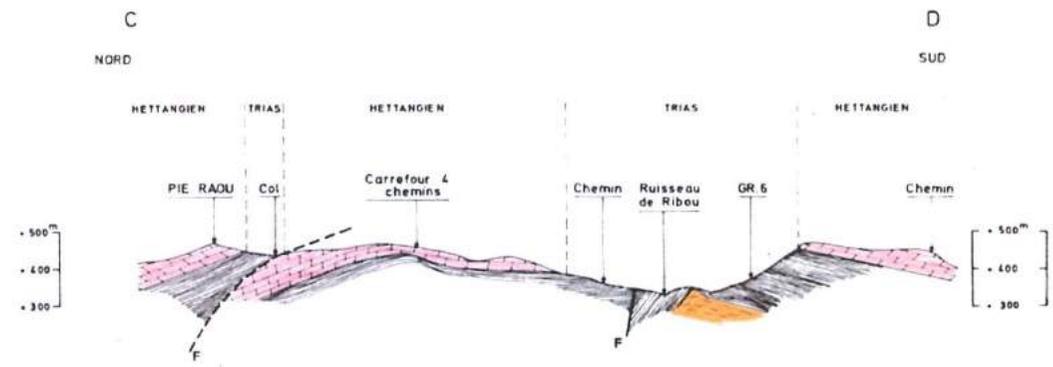
6



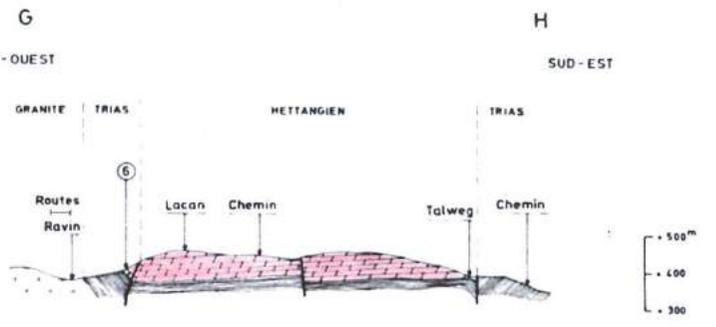
8



7



9

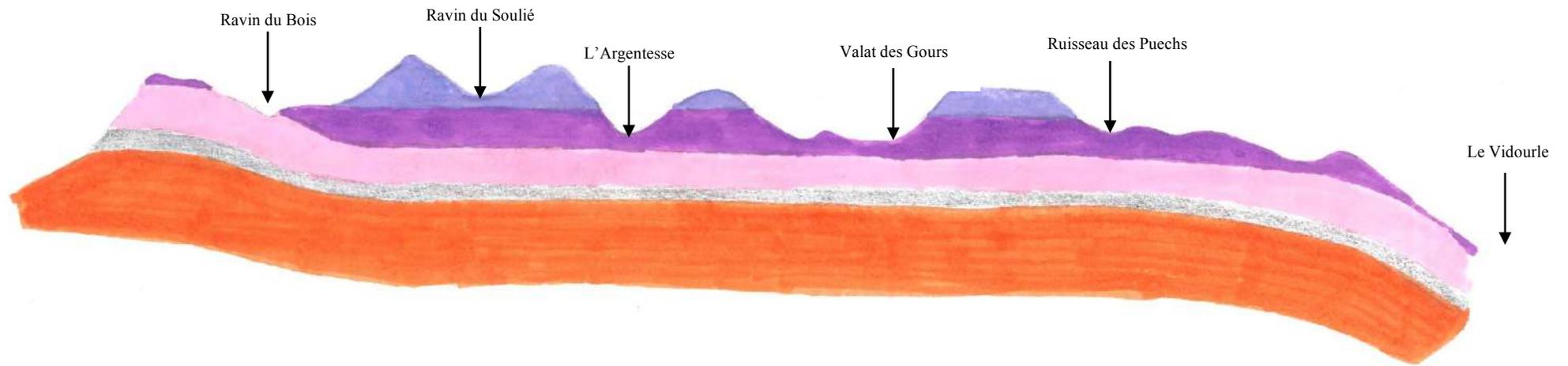


LEGENDE

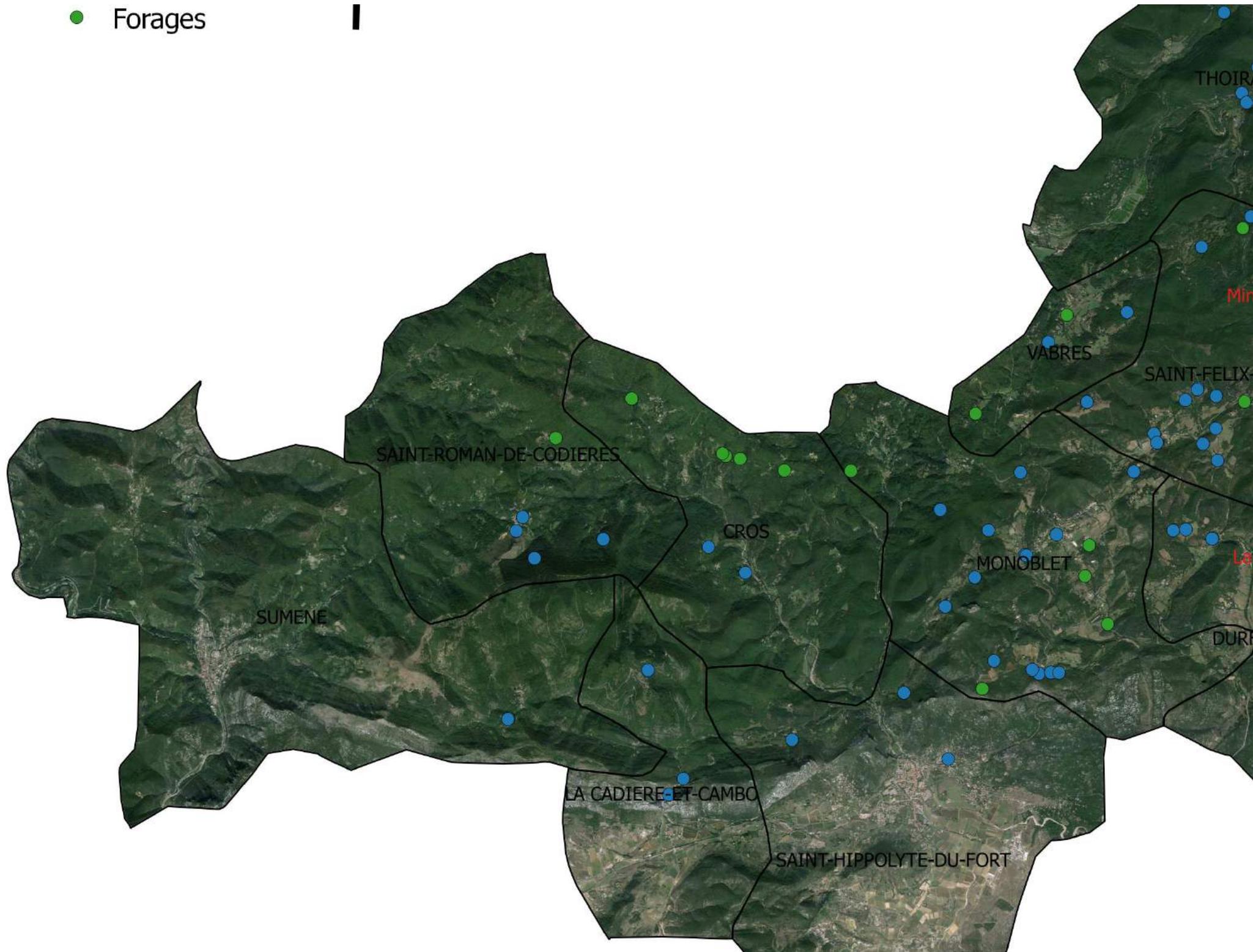
-  Hettangien
-  Rhétien
-  Trias
-  Granite

W

E



● Forages



Annexe 7 : Liste des points d'eau sélectionnés

Sélection pour prélèvement du 25/05/16 :

ID	Point d'eau	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	Lithologie	Commentaires
1	Ruisseau du Crassier	2300	14	Lias	Aval digue stériles
2	Eau rouge	2000	14	Trias	Idem source Sylvette
3	Las Planas	1148	13,7	Sinémurien	Alternance marnes et bancs calcaires (faible débit)
4	Source karstique du Bijournet	973	13,2	Hettangien	Très rouge → Dépôts de fer
5	Source du Mas de Sourit	945	11,2	Lias	Faille observée orientation N/E
6	Source dans cavité aménagée	935	13,7	Aalénien	Faille
7	Rivière Crespenou	895	13,5	Sinémurien	
8	Source du bassin	890	14,5	Hettangien	Situé dans la ligne droite à la sortie du village
9	Lacan Sud amont	783	12,8	Hettangien	Amont de la source précédente, conductivité plus élevée, dépôt important sur la végétation voir photo 14
10	Source du Palais	753	14,6	Hettangien-Sinémurien	
11	Source de l'Ourne	742	14,7	Lias	
12	Source de maison-neuve	732	12,4	Lias	
13	Source Bauque	704	13,6	Hettangien	Eau sortant en dessous de la porte du Local
14	Valat de Bane	680	12,6	Hettangien	
15	Ruisseau du Bijournet	617	12,7	Hettangien	Arrive de l'amont de la source karstique du Bijournet
16	Source des Puech 3	606	12,6	Hettangien	
17	Source du Bijour	375	11,6	Rhétien	Longue galerie Géologie : Rhétien (Carte géologique = Argiles) Très peu minéralisée
18	Eau blanche	100	14	Hettangien	Quelque mètre de eau rouge Consommation déconseillée et eau trouble
19	Mazet	70	13,3	Granite	Source pérenne
20	Fond du moulin			Lias	Conductivité élevée, température normale

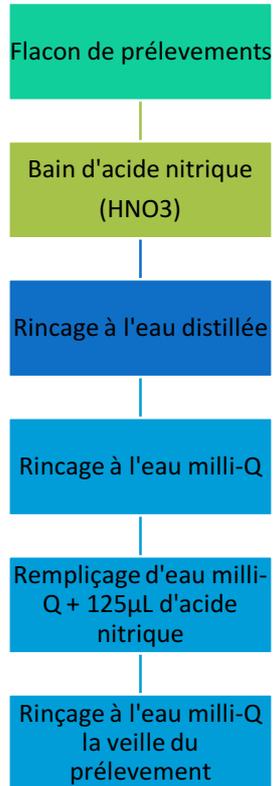
ID	Point d'eau	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	Lithologie	Commentaires
1	Ruisseau du Crassier	2300	14	Lias	Aval digue stériles
2	Eau rouge	2000	14	Trias	Idem source Sylvette
3	Source karstique du Bijournet	973	13.2	Hettangien	Très rouge → Dépôts de fer
4	Eau blanche	100	14	Hettangien	Quelque mètre de eau rouge Consommation déconseillée et eau trouble
5	Fond du moulin	362		Lias	Conductivité élevée Température normale
6	La Frégère	383		Hettangien	Secteur de cambo
7	Puit du Mas	438		Lias	Eau trouble : fer ?
8	Ancienne galerie Mine Joseph	1721		Haldes	Conductivité élevée
9	Sources bases des stériles	5520		Haldes	Conductivité très élevée
10	Source de Tresfond	660		Hettangien	AEP Durfort

Sélection pour prélèvements du 25/05/16 :

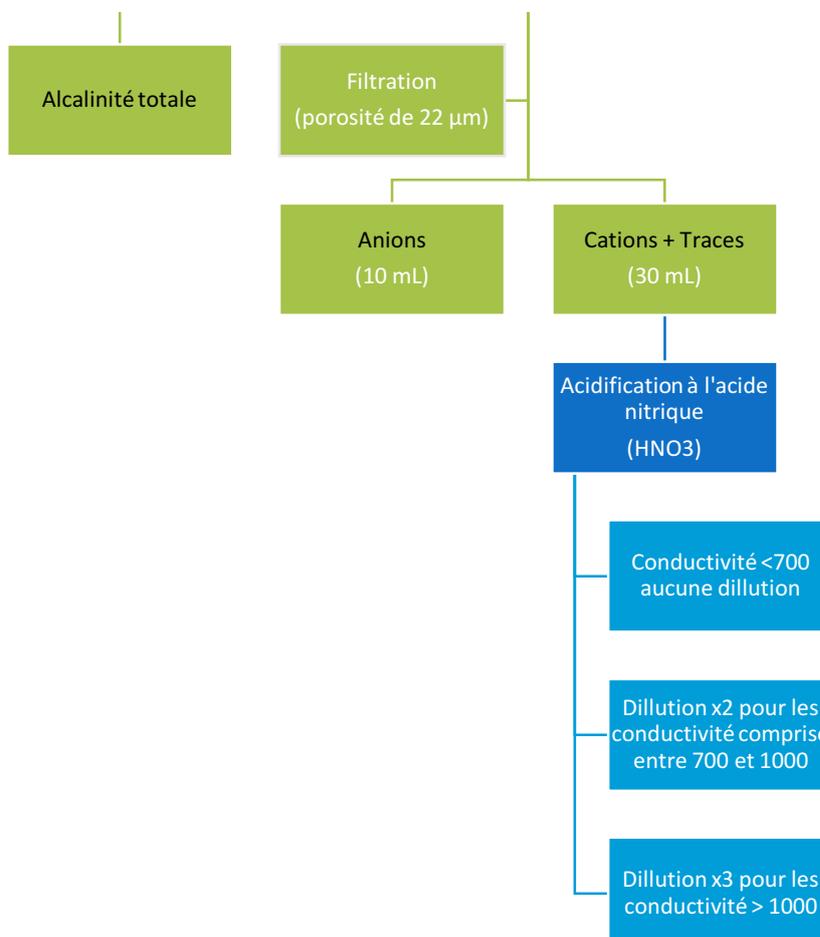
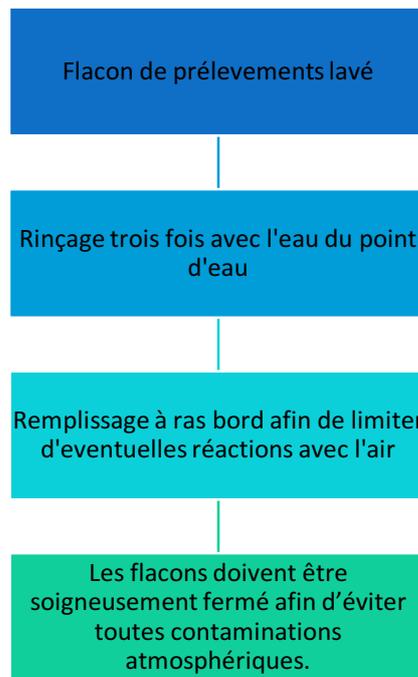
Annexe 8 : Protocole d'échantillonnage et procédures analytiques

Tout d'abord, certaines précautions ont été prises afin de ne pas polluer les échantillons :

1) Préparation des flacons de prélèvement au laboratoire



2) Protocole de prélèvement



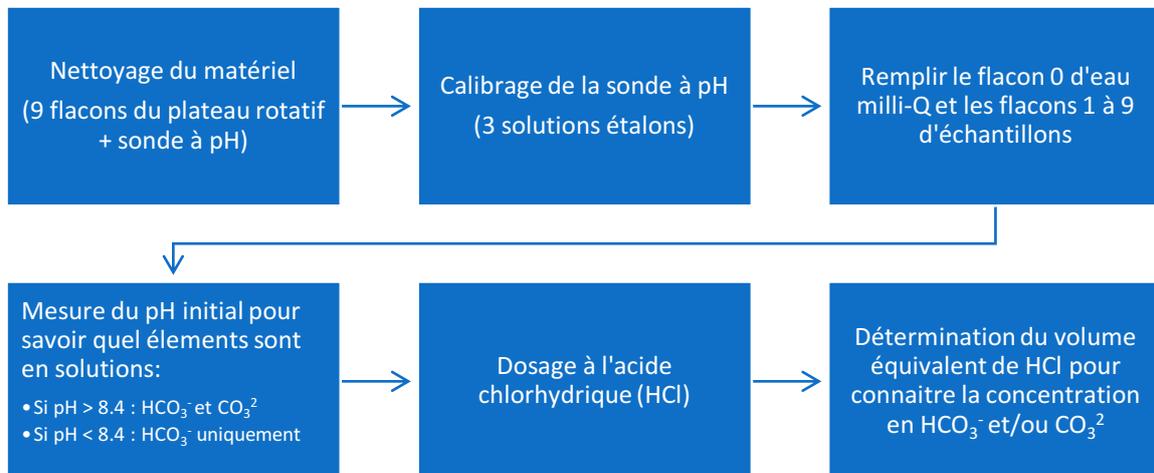
L'acidification à l'acide nitrique permet d'assurer une parfaite conservation de l'échantillon et la stabilisation des certaines espèces chimiques (Thierrin et al., 2003).

L'ensemble des échantillons ont été étiquetés puis placés au réfrigérateur pour une meilleure conservation.

NB : Ce protocole est répété pour chacun des échantillons.

3) Protocole de mesure in-situ

Les mesures in-situ sont réalisées à l'aide du conductimètre de terrain (WTW Cond 3310) et le pH-mètre de terrain (WTW pH 3310) : ce sont des sondes que l'on introduit au niveau du point d'eau qui permettent de mesurer automatiquement la conductivité et le pH. Elles sont équipées d'un boîtier sur lequel s'affiche directement la valeur mesurée.



b. Anions – Chromatographie ionique DIONEX ICS-1000

Protocole réalisé à partir Dionex Corporation et ENSEGID Bordeaux

Tous d'abord les échantillons sont placés dans des cuves de 10 mL avec un couvercle percé pour permettre à une aiguille de prélever.

NB : Les échantillons doivent être dilués si leur conductivité sort de la gamme étalon.

L'appareil de mesure de la chromatographie ionique comprend les éléments suivants :

- Un système automatisé de prélèvements de l'échantillon

- Un système d'injection
- Une pompe de circulation
- Une colonne de séparation, spécifique des éléments à analyser
- Un éluant qui assure le transport des espèces
- Un système de détection

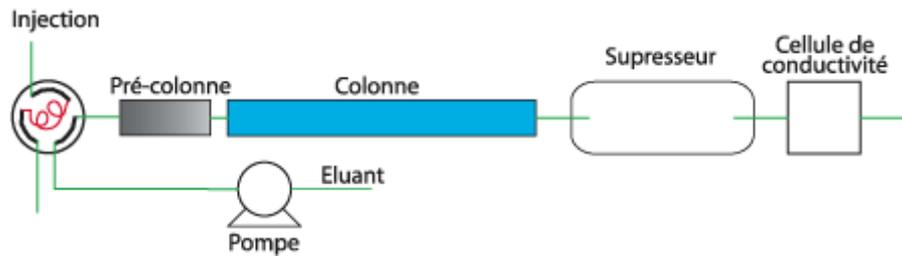
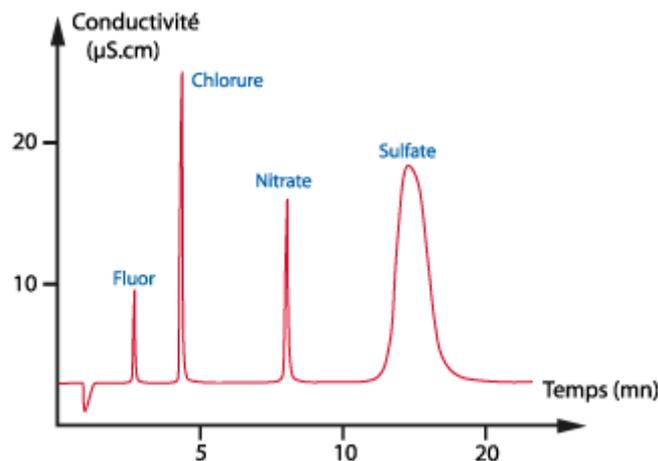


Schéma du dispositif

Source : ENSEGID Bordeaux

les ions en sortie de la colonne et grâce à des étalons dont on sait les concentrations des éléments que l'on souhaite analyser et l'appareil détermine selon la conductivité la concentration en solution équivalente. L'analyse est plutôt longue de l'ordre de 6 minutes par élément.



Conductivité mesurée en fonction du temps

Source : ENSEGID Bordeaux

c. Cations + Traces-ICP-MS THERMO

Pour l'analyse des cations et des éléments traces à l'aide de l'ICP - MS Thermo il faut manipuler en salle blanche afin de minimiser la pollution des échantillons du fait des faibles concentrations qui peuvent être mesurées.

Des flacons de 10 mL sont remplis avec l'échantillon auquel on ajoute 1 % d'acide nitrique (HNO₃).

NB :

- Si conductivité < 700 aucune dilution
- Si $1000 > \text{conductivité} > 700$ dilution x 2
- Si conductivité > 1000 dilution x 3

Ces flacons sont ensuite placés dans l'appareil où les échantillons sont prélevés automatiquement un par un. L'appareil présente une structure comme présentée sur le schéma ci-dessous. Cet appareil présente une capacité de mesure importante puisqu'il va mesurer atome par atome du Lithium (Li) à l'Uranium (U) un nombre de coûts donnés par les atomes et grâce à des étalons il les traduira en concentrations. Le temps de mesure par échantillon est de 3 minutes maximum. Pendant ce temps la mesure est répétée trois fois de manière automatique et pour calculer une moyenne.



Bloc diagramme ICP-MS

Source : Washington University in St. Louis

Annexe 9 : Éléments analysés par ICP-MS

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

<http://www.kjf-split.hr/periodni/ff/>

PÉRIODE	GROUPE																		18
	1 IA	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA	
1	1 1.0079 H HYDROGÈNE																		2 4.0026 He Hélium
2	3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BÉRYLLIUM											5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE	8 15.999 O OXYGÈNE	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NÉON	
3	11 22.990 Na SODIUM	12 24.305 Mg MAGNÉSIMUM											13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE	16 32.065 S SOUFRE	17 35.453 Cl CHLORE	18 38.948 Ar ARGON	
4	19 39.098 K POTASSIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.887 Ti TITANE	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROME	25 54.938 Mn MANGANÈSE	26 55.845 Fe FER	27 58.933 Co COBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.39 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.80 Kr KRYPTON	
5	37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTRIUM	40 91.224 Zr ZIRCONIUM	41 92.906 Nb NIOBIUM	42 95.94 Mo MOLYBDÈNE	43 (98) Tc TECHNÉTIUM	44 101.07 Ru RUTHÉNIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ÉTAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE	52 127.60 Te TELLORE	53 126.90 I IODE	54 131.29 Xe XÉNON	
6	55 132.91 Cs CÉSIMUM	56 137.33 Ba BARYUM	57-71 La-Lu Lanthanides	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.95 Ta TANTALE	74 183.84 W TUNGSTÈNE	75 186.21 Re RHÉNIUM	76 180.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATINE	79 196.97 Au OR	80 200.59 Hg MERCURE	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTATE	86 (222) Rn RADON	
7	87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Ac-Lr Actinides	104 (261) Rf RUTHÉRFORDIUM	105 (262) Db DUBNIUM	106 (266) Sg SEABORGIUM	107 (264) Bh BOHRILIUM	108 (277) Hs HASSIUM	109 (268) Mt MEITNERIUM	110 (281) Uun UNUNNIUM	111 (272) Uuu UNUNNIUM	112 (285) Uub UNUNBIUM	114 (289) Uuq UNUNQUADIUM						

Lanthanides

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CERIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTÉRIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Actinides

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 687-683 (2001)

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

Editor: Michel Orlin

			($\mu\text{S/cm}$)				mg/L										
Las Planas	25/05/2016	13,5	1195	13,3	7,54	7,4	476,74	25,88		265,75	196,56	41,19	7,24	5,25	7,81	0,73	
Valat de Bane	25/05/2016	13,4	710	13,5	7,27	7,0	475,63	5,68	1,53	9,46	75,99	48,89	3,51	0,23	7,79	0,16	
Source de maison neuve	25/05/2016	13,5	780	13,6	7,54	7,3	471,70	6,33		17,68	86,63	42,93	4,02	0,42	7,73	0,18	
Source du Mas de Sourit	25/05/2016	12,2	957	12,2	7,41	7,7	522,42	10,12		96,74	119,60	47,65	5,75	0,63	8,56	0,29	
Source du bassin	25/05/2016	13,4	873	13,5	7,22	6,9	551,28	7,01		31,77	114,55	47,48	4,30	0,89	9,03	0,20	
Source de l'Ourne	25/05/2016	13,3	737	13,5	7,41	7,2	476,00	5,99		16,75	132,82	12,76	3,94	0,38	7,80	0,17	
Source dans cavité aménagée	25/05/2016	13,7	956	13,8	6,8	6,8	523,16	15,26	12,34	79,64	166,50	14,02	9,83	10,35	8,57	0,43	
Source Baouque	25/05/2016	13,7	713	13,8	7,19	6,8	447,27	7,40		29,86	82,51	42,64	4,21	1,05	7,33	0,21	
Source des Puech	25/05/2016	12,8	606	13	8,23	8,1	423,20	7,51		16,38	62,22	45,07	4,33	0,87	6,94	0,21	
Source du Palais	25/05/2016	14,5	761	14,7	7,23	6,7	395,69	9,37	4,99	87,56	93,03	44,14	5,64	2,12	6,48	0,26	
Rivière Crespenou	25/05/2016	13,8	889	13,9	7,46	7,2	379,48	9,06	3,06	194,97	121,56	49,54	5,17	1,65	6,22	0,26	
Lacan Sud	25/05/2016	12,9	779	13,1	7,61	7,2	503,02	8,79	6,05	13,96	84,24	48,57	4,32	0,75	8,24	0,25	
Source du Bijour	25/05/2016	12,4	562	12,6	7,69	7,3	357,25	8,25		14,00	60,01	34,09	5,15	1,70	5,85	0,23	
Source du Bijournet	25/05/2016	14,1	1485	14,2	6,92	6,6	340,06	6,26		616,16	205,96	81,42	4,14	2,57	5,57	0,18	
Fond du moulin	25/05/2016	13	362	13,1	8,2	6,9	126,86	4,62	0,61	85,61	40,72	15,28	5,47	2,45	2,08	0,13	
Eau rouge	25/05/2016	13,3	258	13,6	6,61	6,4	161,74	4,64		78,52	44,42	17,74	4,75	1,26	2,65	0,13	
Eau blanche	25/05/2016	12,9	397	13,2	7,02	6,3	104,26	4,54		36,82	26,80	10,47	4,86	1,17	1,71	0,13	
Mazet	25/05/2016	12,4	44,9	12,7	8,22	6,0	13,14	4,13	0,38	6,00	1,45	0,82	4,61	0,74	0,22	0,12	

Nom des échantillons	Li	B	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Cu
	Résultats exprimés en ppb															
Las Planas	470 737	55,5653	7240,3894	41190,8993	1,5822	3794,8038	89345,5330	5249,7016	196561,5747	0,0220	160,7515	6,9552	0,2963	1,5558	1,0528	1,0701
Valat de Bane	0,6396	7,2629	3507,3671	48891,6344	1,2935	2289,9772	3805,3048	229,2998	75989,2469	0,0602	0,4403	0,9795	0,0093	0,0426	0,0404	0,0477
Source de maison neuve	0,6743	14,9334	4024,1527	42932,0807	1,5057	3551,1353	6589,2342	419,8700	86626,9450	0,0208	29,9609	6,1930	0,0173	0,1674	0,0979	0,0996
Source du Mas de Sourit	1,8389	13,1349	5746,6983	47651,0304	0,3797	3063,0145	33218,1994	625,6021	119601,8074	0,0095	7,9330	5,1233	0,0486	1,0540	0,1801	0,1874
Source du bassin	1,3067	11,6708	4295,5161	47476,4727	0,6627	3738,3914	11545,3443	894,4178	114552,5825	0,0280	3,6268	4,6608	0,0176	0,2196	0,1127	0,1253
Source de l'Ourne	1,1060	14,1225	3938,8348	12760,4770	0,8930	3276,5921	5754,6028	381,9541	132820,5421	0,0366	6,9635	5,3762	0,0307	0,4105	0,1051	0,1099
Source dans cavité aménagée	3,7889	43,3222	9826,2062	14023,5774	0,4912	4388,9098	27576,4148	10345,3329	166504,1097	0,0193	0,0741	0,4878	0,0264	0,4807	0,0798	0,0952
Source Baouque	1,0988	10,0134	4205,7062	42641,9780	0,2658	3164,8543	10606,0239	1046,6648	82508,6890	0,1071	0,1715	0,5479	0,0130	0,1913	0,0953	0,1120
Source des Puech	1,2812	12,0251	4332,8869	45070,5874	9,6524	2922,1492	6103,4811	867,0460	62217,1497	0,0510	1,9622	3,9046	0,0143	0,0808	0,0666	0,0725
Source du Palais	2,7103	28,9007	5640,8496	44136,0534	0,7425	2753,3161	30701,1582	2119,7592	93030,5949	0,0977	0,1683	0,5226	0,0109	0,1391	0,1179	0,1337
Rivière Crespenou	4,9324	31,6789	5173,3078	49541,8576	1,9160	2587,5700	67115,3056	1646,0244	121560,6365	0,0567	1,6575	1,9287	0,0203	0,1574	0,1757	0,1949
Lacan Sud	0,6661	11,1278	4318,8042	48574,0367	0,8907	3091,4921	5223,1139	748,0303	84244,6729	0,0991	0,4610	0,8391	0,0081	0,0346	0,0394	0,0422
Source du Bijour	3,4850	11,3237	5154,8834	34089,7791	4,3592	5204,8931	5325,2589	1702,2324	60009,8588	0,1614	1,0860	2,7990	0,0072	0,0722	0,0330	0,0508
Source du Bijournet	4,7015	10,1716	4137,5745	81424,5138	0,6952	6461,5114	215978,0302	2567,9367	205964,2132	0,0000	403,4363	760,1302	7,1828	11,4374	0,0636	0,0884

Annexe 10 : Résultats des analyses

Nom des échantillons	Date des échantillons	Mesures terrain				mg/L														méq/L													
		T°C	C.E. (µS/cm)	T°C	pH	HCO3-	Cl-	NO3-	S(4-)	Ca++	Mg++	Na+	K+	HCO3-	Cl-	NO3-	S(4-)	Ca++	Mg++	Na+	K+	Ba	Sb	Pb	U								
Las Planas	25/05/2016	13,5	1195	13,3	7,54	7,4	476,74	25,88	265,75	196,56	41,19	7,24	5,25	7,81	0,73	5,53	9,81	3,39	0,31	0,13	-2%	14,08	13,65										
Valat de Bane	25/05/2016	13,4	710	13,5	7,27	7,0	475,63	5,68	9,46	48,89	3,51	0,23	0,23	7,79	0,16	0,02	0,20	3,79	4,02	0,15	0,01	-1%	8,18	7,97									
Source de maison neuve	25/05/2016	13,5	780	13,6	7,54	7,3	471,70	6,33	17,68	86,63	42,93	4,02	0,42	7,73	0,18			4,32	3,53	0,18	0,01	-1%	8,28	8,04									
Source du Mas de Sourit	25/05/2016	12,2	957	12,2	7,41	7,7	522,42	10,12	96,74	119,60	47,65	5,75	0,63	8,56	0,29			2,01	5,97	3,92	0,25	0,02	-3%	10,86	10,16								
Source du bassin	25/05/2016	13,4	873	13,5	7,22	6,9	551,28	7,01	31,77	114,55	47,48	4,30	0,89	9,03	0,20			0,66	5,72	3,91	0,19	0,02	0%	9,89	9,83								
Source de l'Ourne	25/05/2016	13,3	737	13,5	7,41	7,2	476,00	5,99	16,75	132,82	12,76	3,94	0,38	7,80	0,17			0,35	6,63	1,05	0,17	0,01	3%	8,32	7,86								
Source dans cavité aménagée	25/05/2016	13,7	956	13,8	6,8	6,8	523,16	15,26	79,64	166,50	14,02	9,83	10,35	8,57	0,43	0,20		1,66	8,31	1,15	0,43	0,26	-3%	10,86	10,15								
Source Baouque	25/05/2016	13,7	713	13,8	7,19	6,8	447,27	7,40	29,86	82,51	42,64	4,21	1,05	7,33	0,21			0,62	4,12	3,51	0,18	0,03	-2%	8,16	7,84								
Source des Puech	25/05/2016	12,8	606	13	8,23	8,1	423,20	7,51	16,38	62,22	45,07	4,33	0,87	6,94	0,21			0,34	3,10	3,71	0,19	0,02	-3%	7,49	7,02								
Source du Palais	25/05/2016	14,5	761	14,7	7,23	6,7	395,69	9,37	87,56	93,03	44,14	5,64	2,12	6,48	0,26	0,08		1,82	4,64	3,63	0,25	0,05	0%	8,65	8,57								
Rivière Crespenou	25/05/2016	13,8	889	13,9	7,46	7,2	379,48	9,06	194,97	121,56	49,54	5,17	1,65	6,22	0,26	0,05	4,06	6,07	4,08	0,23	0,04	-1%	10,58	10,41									
Lacau Sud	25/05/2016	12,9	779	13,1	7,61	7,2	503,02	8,79	13,96	84,24	48,57	4,32	0,75	8,24	0,25	0,10	0,29	4,00	4,00	0,19	0,02	-3%	8,88	8,41									
Source du Bijour	25/05/2016	12,4	562	12,6	7,69	7,3	357,25	8,25	14,00	60,01	34,09	5,15	1,70	5,85	0,23			0,29	2,99	2,81	0,22	0,04	-2%	6,38	6,07								
Source du Bijournet	25/05/2016	14,1	1485	14,2	6,92	6,6	340,06	6,26	616,16	205,96	81,42	4,14	2,57	5,57	0,18			12,83	10,28	6,70	0,18	0,07	-4%	18,58	17,22								
Fond du moulin	25/05/2016	13	362	13,1	8,2	6,9	126,86	4,62	85,61	40,72	15,28	5,47	2,45	2,08	0,13	0,01	1,78	2,03	1,26	0,24	0,06	-5%	4,00	3,59									
Eau rouge	25/05/2016	13,3	258	13,6	6,61	6,4	161,74	4,64	78,52	44,42	17,74	4,75	1,26	2,65	0,13			1,63	2,22	1,46	0,21	0,03	-6%	4,42	3,92								
Eau blanche	25/05/2016	12,9	397	13,2	7,02	6,3	104,26	4,54	36,82	26,80	10,47	4,86	1,17	1,71	0,13			0,77	1,34	0,86	0,21	0,03	-3%	2,60	2,44								
Mazet	25/05/2016	12,4	44,9	12,7	8,22	6,0	13,14	4,13	6,00	1,45	0,82	4,61	0,74	0,22	0,12	0,01	0,13	0,07	0,20	0,02	-13%	0,46	0,36										

Nom des échantillons		Li	B	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Cd	Sb	Ba	Pb	U
Résultats exprimés en ppb																									
Las Planas	47,0737	55,5653	7240,3894	41190,8993	1,5822	3794,8038	89345,5330	5249,7016	196561,5747	0,0220	160,7515	6,9552	0,2963	1,5558	1,0528	1,0701	0,9243	0,2658	2,8011	1508,6733	0,0033	0,0578	52,3641	0,0000	0,8296
Valat de Bane	0,6396	7,2629	3507,3671	48891,6344	1,2935	2289,9772	3805,3048	229,2998	75989,2469	0,0602	0,4403	0,9795	0,0093	0,0426	0,0404	0,0477	0,9452	0,1488	0,1321	37,6121	0,0031	0,0445	4,0507	0,0076	0,4239
Source de maison neuve	0,6743	14,9334	4024,1527	42932,0807	1,5057	3551,1353	6589,2342	419,8700	86626,9450	0,0208	29,9609	6,1930	0,0173	0,1674	0,0979	0,0996	0,8885	0,3782	0,1563	52,1327	0,0027	0,1278	7,1308	0,0022	0,4017
Source du Mas de Sourit	1,8389	13,1349	5746,6983	47651,0304	0,3797	3063,0145	33218,1994	625,6021	119601,8074	0,0095	7,9330	5,1233	0,0486	1,0540	0,1801	0,1874	0,4136	2,8178	0,5923	103,1822	0,0031	0,1062	9,6236	0,0000	0,8711
Source du bassin	1,3067	11,6708	4295,5161	47476,4727	0,6627	3738,3914	11545,3443	894,4178	114552,5825	0,0280	3,6268	4,6608	0,0176	0,2196	0,1127	0,1253	2,4629	0,3440	0,4662	115,9236	0,0380	0,0899	21,2974	0,0042	0,6963
Source de l'Ourne	1,1060	14,1225	3938,8348	12760,4770	0,8930	3276,5921	5754,6028	381,9541	132820,5421	0,0366	6,9635	5,3762	0,0307	0,4105	0,1051	0,1099	1,6409	0,1533	0,3530	161,8744	0,0166	0,0581	7,7711	0,0012	0,4355
Source dans cavité aménagée	3,7889	43,3222	9826,2062	14023,5774	0,4912	4388,9098	27576,4148	10345,3329	166504,1097	0,0193	0,0741	0,4878	0,0264	0,4807	0,0798	0,0952	0,1462	0,0940	7,8297	473,8304	0,0010	0,0122	52,2879	0,0000	0,2933
Source Baouque	1,0988	10,0134	4205,7062	42641,9780	0,2658	3164,8543	10606,0239	1046,6648	82508,6890	0,1071	0,1715	0,5479	0,0130	0,1913	0,0953	0,1120	7,4893	3,4791	0,5246	150,0199	0,0388	0,1063	10,9205	0,0658	0,5861
Source des Puech	1,2812	12,0251	4332,8869	45070,5874	9,6524	2922,1492	6103,4811	867,0460	62217,1497	0,0510	1,9622	3,9046	0,0143	0,0808	0,0666	0,0725	0,1316	0,1327	0,6624	89,8953	0,0005	0,0413	21,8630	0,0085	0,4064
Source du Palais	2,7103	28,9007	5640,8496	44136,0534	0,7425	2753,3161	30701,1582	2119,7592	93030,5949	0,0977	0,1683	0,5226	0,0109	0,1391	0,1179	0,1337	1,3529	0,6121	0,9131	151,6843	0,0155	0,0899	16,9060	0,0050	0,6332
Rivière Crespenou	4,9324	31,6789	5173,3078	49541,8576	1,9160	2587,5700	67115,3056	1646,0244	121560,6365	0,0567	1,6575	1,9287	0,0203	0,1574	0,1757	0,1949	1,6315	0,4555	0,7727	1507,6672	0,0138	0,0940	38,1689	0,0069	0,7654
Lacau Sud	0,6661	11,1278	4318,8042	48574,0367	0,8907	3091,4931	5223,1139	748,0303	82144,6729	0,0991	0,4610	0,8391	0,0081	0,0346	0,0394	0,0422	0,4023	0,1413	0,3944	53,9543	0,0024	0,0303	94,1368	0,0013	0,4431
Source du Bijour	3,4850	11,3237	5154,8834	34089,7791	4,3592	5204,8931	5325,2589	1702,2324	60009,8388	0,1614	1,0860	2,7990	0,0072	0,0722	0,0330	0,0508	0,5306	0,4833	0,4413	144,5432	0,0008	0,0188	94,1568	0,0035	0,7313
Source du Bijournet	4,7015	10,1716	4137,5745	81424,5138	0,6952	6461,5114	215978,0302	2567,9367	205964,2132	0,0000	403,4363	760,1302	7,1828	11,4574	0,0636	0,0884	2005,7191	11,5844	4,8009	122,0475	1,3117	0,3953	10,5905	0,0075	1,2006
Fond du moulin	9,6596	7,3252	5468,6982	15277,9994	8,0268	11374,3379	28472,8830	2447,7888	40719,6481	0,0102	4,1138	25,7718	0,0503	1,5178	0,2572	0,2661	11,3438	12,7707	5,6310	83,2767	0,0154	0,8552	46,4829	0,1659	0,2949
Eau rouge	8,5380	9,4184	4753,4238	17742,4785	0,4491	9672,3168	26342,7858	1264,7902	44416,1849	0,0036	291,7606	5779,2933	6,6674	6,1579	0,0247	0,0279	184,2469	20,6940	3,3854	78,7885	0,0010	0,8853	39,2800	0,0000	0,6101
Eau blanche	4,6578	6,2795	4864,0492	10474,7929	1,7802	9876,4568	11811,2459	1167,4032	26797,0481	0,0036	206,1864	1776,0031	1,8326	1,9709	0,0330	0,0418	48,0690	10,7676	2,9423	73,1275	0,0050	0,6761	64,8538	0,0064	0,0533
Mazet	0,9883	6,4365	4606,3767	819,4710	100,5985	7680,9823	1781,2599	741,4969	1448,0643	0,1720	2,7555	73,5326	0,7942	0,6472	1,1787	1,1845	1,8553	1,6592	1,1322	12,1297	0,0197	0,2101	31,4024	0,4679	0,2816