

Centre d'hydrogéologie et de géothermie

Université de Neuchâtel



Travail de fin d'études
Master en hydrogéologie et géothermie

**Etude du rôle protecteur des dépôts du Quaternaire
sur la vulnérabilité des eaux souterraines karstiques
à La Côte-aux-Fées (NE)**

Farine Raphaël Jean Nicolas

Superviseur : Dr Preisig Giona

15 août 2019

Résumé

Ce travail de master se porte sur la vulnérabilité des eaux souterraines d'un système karstique à La Côte-aux-Fées (NE) dans le canton de Neuchâtel dans le Jura suisse. Les eaux des aquifères karstiques sont en règle générale plus vulnérables que les aquifères poreux en raison de la présence d'un réseau de conduits naturels acheminant rapidement les eaux. Néanmoins, la surface de l'aquifère est recouvert par des dépôts morainiques d'origine jurassienne et par une couverture pédologique. Ces dépôts peuvent avoir un rôle protecteur non-négligeable sur la qualité des eaux d'infiltration et constituent alors une « couverture protectrice ».

L'aquifère faisant l'objet de cette étude alimente de nombreuses sources dont une est actuellement exploitée par la commune de La Côte-aux-Fées (NE) pour l'eau potable. En raison de précédentes études, l'ensemble du bassin versant des sources est classé en zone de protection S2 et est donc sujet à des restrictions sur le bâti et sur les activités agricoles notamment.

L'étude détaillée de la répartition géographique et de la capacité filtrante de ces dépôts permet de s'interroger sur l'étendue de la zone de protection S2 actuelle. Le travail a consisté en une surveillance à haute résolution des sources, à définir la répartition spatiale et l'épaisseur de la couverture protectrice à l'aide de la géophysique et enfin à évaluer son efficacité à filtrer l'eau grâce à un essai de traçage double.

L'analyse des hydrogrammes montre des variations parfois brutales du débit et des différences saisonnières remarquables typiques des milieux karstiques. L'étude démontre également une répartition très hétérogène de la couverture protectrice (moraine jurassienne + couverture pédologique) variant entre 0 à 9.5 mètres. De ce fait, la vulnérabilité des eaux souterraines est elle aussi variable. L'essai de traçage double a permis de mettre en lumière une capacité de filtration de la couverture protectrice peu marquée comparé aux attentes surtout en ce qui concerne le temps de transit.

Abstract

This master's project is focused on the vulnerability of groundwater in a karstic system located at La Côte-aux-Fées (NE) in the canton of Neuchâtel in the Swiss Jura. Groundwater from karstic aquifers is generally more vulnerable than groundwater in porous aquifers due to the presence of natural pipes. Nevertheless, the karstic system is covered by Jurassic moraine deposits and the soil cover, and these can have a non-negligible protective role during water infiltration.

This aquifer feeds several sources, one of them is actually exploited by the commune of La Côte-aux-Fées (NE) for drinking water. Previous studies classified the entire source watershed in the protection zone S2 which is very restricted for the construction and agricultural activities.

The detailed study on the spatial distribution and the filtering capacity of these deposits make possible to question the extent of the current protection zone S2. This work consisted: i) monitoring karstic springs at a high temporal resolution, ii) define the geographical extent and the thickness of the Quaternary deposits via geophysics surveys, iii) evaluate the efficiency of the cover to filter and delay groundwater infiltration through a tracer test.

Spring hydrograph analysis shows brutal variations of the flow rates and remarkable seasonal differences typical for a karstic aquifer. The study shows also a highly heterogeneous repartition of the protective cover (Jurassic moraine + soil cover) varying between 0 and 9.5 meters. This acts directly on the spatial vulnerability of groundwater. The double tracer test revealed a low filtration and delay capacity of the protective cover compared to expectations, particularly concerning the transit time between the infiltration area and springs.

Remerciements

Ce travail de fin d'études n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de personnes dévouées non-seulement au sein du CHYN mais aussi dans mon entourage proche. Je tiens naturellement à exprimer ma gratitude envers elles.

Tout d'abord je souhaite remercier mon superviseur Giona Preisig qui a toujours montré une grande disponibilité pour donner ses conseils et sa participation sur le terrain. Il a fait preuve d'une patience appréciable et a su me guider dans mes décisions.

Je remercie Isabelle Butty, hydrogéologue cantonale au service de l'environnement et de l'énergie de Neuchâtel à l'origine du projet à La Côte-aux-Fées. Elle a montré son enthousiasme et son intérêt au suivi du projet.

Je remercie l'ingénieur Roberto Costa pour ses conseils pratiques sur les appareils de mesure et pour la conception des dispositifs et de l'essai de traçage. Je remercie également l'hydrogéologue Vincent Gruber pour son aide à la préparation et à l'analyse des échantillons d'eau et de traceurs. Leurs explications et conseils m'étaient indispensables.

J'exprime ma reconnaissance envers Pierre-André Schnegg avec qui j'ai passé beaucoup de temps à comprendre et traiter les données du spectrofluorimètre de terrain.

Je remercie Michiel Pronk pour les conseils et les analyses des données microbiologiques. Il m'a également donné quelques conseils pratiques en prévision de l'essai de traçage.

Merci à Michael Sinreich pour notre petit entretien « spécial essai de traçage » au CHYN pour la mise en place de cet essai.

Mes remerciements vont à Raphaël Walzer, fontainier à la commune de La Côte-aux-Fées, toujours disponible et m'accueillant avec le sourire pour boire le café. Son aide à la réalisation des projets (creuse de la fosse), ses relations et ses bons conseils ont grandement facilité les choses. Benoît Erb, exploitant sur le Mont-du-Bec, nous a fourni en électricité et en eau avec une grande générosité.

Je remercie grandement mes collègues, assistant et amis Roman Lindegger, Morgane Koumrouyan, Kévin Choffat, Loïc Modoux, Léa Perrochet et Keven Simonet pour leur précieuse aide sur le terrain dans la neige mais aussi au bureau avec les moments de rire. Ils m'ont été d'un grand soutien moral.

Enfin je souhaite exprimer à mes parents Jacqueline et Jean-Paul, ma sœur Vanessa et ma compagne Giulia ma gratitude pour leur soutien moral, leurs conseils et pour leur aide sur le terrain.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Liste des Figures	xi
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Annexes	xv
1 Introduction.....	1
1.1 Contexte général de l'étude	1
1.2 Motivation et objectifs	1
1.3 Structure de l'étude.....	2
2 Etat des connaissances.....	3
2.1 Concept de vulnérabilité des eaux souterraines	3
2.2 Méthodes de détermination cartographique de la vulnérabilité applicable en milieu karstique.....	5
3 Situation de l'étude	11
3.1 Contexte géographique et météorologie	11
3.2 Contexte géologique et hydrogéologique	12
4 Surveillances des sources, de l'étang et du ruisseau	15
4.1 Description du réseau hydrologique et du réseau de captage des sources	15
4.2 Configuration des captages des sources	17
4.3 Méthodes pour le suivi hydrogéologique des sources, étang et ruisseau	18
4.4 Résultats et interprétations du suivi hydrogéologique des sources, étang et ruisseau	25
5 Epaisseur de la couverture protectrice – campagne géophysique.....	45
5.1 Description et but de la campagne géophysique	45
5.2 Méthodes d'application géoélectrique – tomographie de résistivité électrique	45
5.3 Résultats et interprétations de la campagne ERT	49
6 Caractérisation de la capacité filtrante de la moraine jurassienne : essais d'infiltration et essai de traçage.....	61
6.1 Description et buts des essais d'infiltration et de traçage	61
6.2 Méthodes et applications des essais	61
6.3 Résultats et interprétations des essais d'infiltration et de l'essai de traçage	76

7	Modèle conceptuel	89
7.1	Délimitation et épaisseur de l'aquifère	89
7.2	Modèle d'écoulement dans le karst	90
7.3	Bilan hydrogéologique	91
7.4	Estimation de la porosité efficace du massif karstique	95
8	Synthèse et discussions	97
9	Conclusions et recommandations	99
	Bibliographie	101
	Annexes	103

Liste des figures

Figure 1 : Modèle conceptuel du karst	4
Figure 2: Précipitations cumulées par mois à la station de l'Auberson.	11
Figure 3: Carte géologique de La Côte-aux-Fées.....	12
Figure 4 : Carte de La Côte-aux-Fées avec sources et zone de protection S2	13
Figure 5: Plan du réseau de captage des sources	16
Figure 6: Configuration des chambres de captage et de rassemblement	17
Figure 7: Hydrogramme de la source de La Scie	26
Figure 8 : Hydrogramme de la source César-Guye	27
Figure 9: Hydrogramme des sources Mélangées.....	28
Figure 10: Hydrogramme des trois Combes.....	29
Figure 11: Graphiques montrant la variation de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous et de la température aux sources et à l'étang.	32
Figure 12: Diagramme de piper.....	36
Figure 13: Diagramme de Schoeller	37
Figure 14: Variation temporelle de la concentration ionique aux sources et à l'étang.	40
Figure 15 : Résistivité des différents matériaux géologiques et de l'eau	46
Figure 16 : Dispositif Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle	47
Figure 17 : Tomographie de résistivité électrique avec dispositif Wenner-Schlumberger	48
Figure 18 : Profils ERT A-D sur le plateau des Bourquins.	53
Figure 19 : Profils ERT E-H sur le plateau des Bourquins.	54
Figure 20 : Profils ERT I-L sur le plateau des Bourquins.	55
Figure 21 : Profil ERT M sur le plateau des Bourquins.	56
Figure 22 : Carte de l'épaisseur de la couverture protectrice sur le plateau des Bourquins... ..	57
Figure 23 : Profils ERT N-Q à La Maison Neuve.....	59
Figure 24: Infiltromètre à double annea	62
Figure 25: Injection des deux traceurs aux Bourquins-de-Bise vue en plan et en coupe.....	63
Figure 26: Schéma d'un spectrofluorimètre	67
Figure 27: Spectrofluorimètre de terrain GGUN-FL30.....	68
Figure 28: Construction de la sonde de mesure du spectrofluorimètre.....	69
Figure 29: Méthode graphique Cpic sur la courbe de restitution.....	74
Figure 30: Courbes de restitution normalisées et courbes cumulées à la source de La Scie. .	80
Figure 31: Courbes de restitution normalisées et courbes cumulées à la source César-Guye	81
Figure 32 : Courbes de restitution normalisées et courbes cumulées aux sources Mélangées.	83
Figure 33: Carte synthétique de l'essai de traçage double	86
Figure 34 : Modèle synthétique de l'aquifère.....	89
Figure 35: Modèle d'écoulement des eaux souterraines.....	90
Figure 36 : Bilan hydrogéologique.....	95

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des objectifs et restrictions pour les zones de protection....	7
Tableau 2 : Indexation des 4 critères de la méthode EPIK.....	9
Tableau 3 : Equivalence entre facteur de protection F et zone de protection S.....	10
Tableau 4 : Situation et code des sources, étang et ruisseau observés.	15
Tableau 5 : Récapitulatif des anions et cations mesurés.....	22
Tableau 6 : Exigences microbiologiques défini par l'OPBD, 2016.....	24
Tableau 7 : Débitaux aux sources.....	30
Tableau 8 : Débit à source temporaire de la Combe Sud et de la source du Ruisseau Sud	31
Tableau 9 : Débit au ruisseau de l'Echelier	31
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des données physico-chimiques aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier.....	33
Tableau 11 : Moyenne des nitrates et ammonium.....	41
Tableau 12 : Résultats des analyses microbiologiques aux sources et à l'étang.	43
Tableau 13 : Facteur A d'ajustement aux conditions de l'aquifère	65
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des données d'injection.	66
Tableau 15 : Spectre d'excitation et d'émission pour l'uranine et la sulforhodamine B.....	68
Tableau 16 : Système de surveillance de l'essai de traçage.....	70
Tableau 17 : Résultats des essais d'infiltration	77
Tableau 18 : Calcul du temps de transit au travers la couverture protectrice.	78
Tableau 19 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulée.....	80
Tableau 20 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulée.....	81
Tableau 21 : Temps de transit moyen, vitesse moyenne, dispersivité longitudinale et coefficient de dispersion longitudinale.....	82
Tableau 22 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulées.	83
Tableau 23 : Temps de transit moyen, vitesse moyenne, dispersivité longitudinale et coefficient de dispersion longitudinale.....	84
Tableau 24 : Recherche du taux d'infiltration I à l'aide du calcul du bassin versant.	93
Tableau 25 : Bilan hydrogéologique et calculs du bassin versant.....	94
Tableau 26: Estimation de la porosité efficace en variant l'épaisseur saturée.	96

Liste des annexes

Annexe 1 : Situation et géologie régionale à La Côte-aux-Fées (NE)	103
Annexe 2 : Coupes géologiques AA', BB' et CC'	105
Annexe 3 : Photos du site d'étude	107
Annexe 4 : Photos des captages des sources	108
Annexe 5 : Courbes de tarage	111
Annexe 6 : Résultats des mesures physico-chimiques et du débit	112
Annexe 7 : Résultats des analyses hydrochimiques	114
Annexe 8 : Rapports d'analyses microbiologiques <i>fcm-lab sàrl</i>	116
Annexe 9 : Disposition des profils géoélectriques (ERT)	122
Annexe 10 : Profils géoélectriques (ERT) par Preisig G. (2017)	123
Annexe 11 : Sondages à la tarière par Preisig G. (2017)	124
Annexe 12 : Modèle numérique de terrain avec fractures	129
Annexe 13 : Carte format A3 de l'épaisseur de la couverture protectrice sur le plateau des Bourquins	131
Annexe 14 : Photos de l'injection de l'essai de traçage	133
Annexe 15 : Etapes de récupération des données du spectrofluorimètre de terrain	134
Annexe 16 : Résultats et analyses des essais de traçage	137
Annexe 17 : Courbes de restitution normalisées	139
Annexe 18 : Courbes de restitution à toutes les sources	141
Annexe 19 : Carte synthétique de l'essai de traçage à l'échelle régionale	142
Annexe 20 : Carte géologique avec bassin versant hypothétique	143

1 Introduction

1.1 Contexte général de l'étude

L'exploitation des nappes phréatiques et la production d'une eau potable de qualité constituent un intérêt primordial pour ses consommateurs. La qualité de l'eau d'un aquifère est cependant variable. Le terme de vulnérabilité désigne la sensibilité des eaux souterraines face aux contaminations tant bien d'origine naturelle que d'origine anthropogénique (Margat, 1968). La détermination de cette vulnérabilité sert à la mise en place de mesures de protection adaptées pour garantir la qualité de l'eau potable. Ces mesures sont par exemple l'établissement d'une zone de protection, le traitement de l'eau ou encore la mise en place de pratiques agricoles adaptées.

Ce travail de Master se porte sur un cas pratique concernant l'exploitation en eau potable d'un aquifère karstique sur le territoire de la commune de La Côte-aux-Fées (CH1903 527514/190991) dans le canton de Neuchâtel (annexe 1.1). Actuellement, une seule source est exploitée par la commune, cependant, le débit qui en ressort se révèle insuffisant en période sèche. Un intérêt croissant se porte donc sur l'exploitation possible d'autres sources du même aquifère afin de compléter le manque.

Le danger principal de contamination à La Côte-aux-Fées est d'origine microbienne en raison de l'activité agricole et de l'épandage d'engrais en amont des sources. Suite à des études menées dans les années nonante par le bureau *Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA* (1994 & 1995) la majeure partie du bassin versant des sources captées subit des restrictions sur l'exploitation agricole et la construction (zone de protection S2). Le rôle protecteur des dépôts du Quaternaire recouvrant le karst a peu été étudié et de ce fait, la zone de protection pourrait être sur- ou sous-évaluée.

1.2 Motivation et objectifs

En Suisse, les milieux karstiques sont représentés par la chaîne montagneuse du Jura ainsi qu'une partie des Alpes (Brühlmann, 2004) qui sont essentiellement constitués de calcaire. Près de 18 % de l'eau potable consommée dans le pays est d'origine karstique (Malard & Jeannin, 2013). La particularité de ces systèmes est la variabilité importante des débits aux sources (Doerflinger & Zwahlen, 1998) et leurs sensibilités face aux contaminations (vulnérabilité) en raison de vitesses d'écoulement souterrain très rapides. La vulnérabilité marquée dans les systèmes karstiques, l'étendue parfois conséquente de leur bassin versant et la méconnaissance due à leur hétérogénéité amène à un dimensionnement important des zones de protection par rapport aux aquifères poreux. Néanmoins, la présence de dépôts du Quaternaire recouvrant les aquifères karstiques peut avoir une influence considérable sur la vulnérabilité des eaux souterraines (Doerflinger & Zwahlen, 1998) en jouant le rôle de « couverture protectrice ».

Ce travail consiste à étudier en détail la capacité de la couverture protectrice à protéger l'aquifère karstique sous-jacent à l'aide de divers outils tels que la géophysique et un essai de traçage. Les objectifs principaux sont d'observer les variations du débit et des paramètres physico-chimiques, de déterminer la répartition spatiale et l'épaisseur de la couverture du Quaternaire recouvrant l'aquifère karstique et d'évaluer comparativement, à l'aide d'un essai de traçage double, l'effet protecteur de celle-ci.

1.3 Structure de l'étude

L'étude est divisée en trois parties majeures, la première traite de l'observation et l'analyse des données des hydrogrammes, des mesures physico-chimiques, hydrochimiques et microbiologiques. La seconde partie traite de la distribution spatiale de la couverture protectrice établie à l'aide de méthodes de géophysique électrique (géoélectrique). Enfin, la dernière partie de l'étude se consacre à l'essai de traçage double pour comparer le pouvoir filtrant de la couverture (moraine jurassienne + couverture pédologique) avec un essai diffus à la surface et un essai directement injecté dans l'épikarst. Dans ce cadre, des essais d'infiltration ont également été réalisés à divers endroits du bassin versant.

Travaux réalisés :

1. Surveillance des sources, du ruisseau et de l'étang

- a. Mesures du débit à haute résolution ($\Delta t = 10$ min)
- b. Mesures régulières des paramètres physico-chimiques : température, conductivité électrique, taux d'oxygène, pH.
- c. 7 campagnes de prélèvement d'eau pour analyses hydrochimiques et 3 campagnes pour analyses microbiologiques en période de hautes et basses eaux. .

2. Détermination de la répartition spatiale et de l'épaisseur de la couverture protectrice

- a. 17 tomographies géoélectriques (ERT) sur l'ensemble du plateau des Bourquins et une partie de La Maison Neuve.
- b. Carte des épaisseurs de la couverture protectrice basée sur les données d'ERT.

3. Détermination de la capacité filtrante de la couverture protectrice : essai de traçage et essais d'infiltration.

- a. Essai de traçage diffus et concentré en zone non-saturée.
- b. 4 essais d'infiltration classiques sur la couverture pédologique et dans l'épikarst.

Ce travail de Master présente en premier lieu une introduction, un état des connaissances et une situation géographique et (hydro-)géologique. Les méthodes, les résultats et les interprétations sont présentés par chapitre pour chacune des trois parties afin de garder une certaine homogénéité pour les travaux réalisés. Puis un chapitre se porte sur le modèle conceptuel de l'aquifère. Enfin une synthèse et discussion ainsi qu'une conclusion rassemblent les observations faites sur l'ensemble de l'étude.

2 Etat des connaissances

2.1 Concept de vulnérabilité des eaux souterraines

La section qui suit a pour but d'introduire le concept de vulnérabilité des eaux souterraines face à des contaminants et plus particulièrement en environnement karstique.

2.1.1 Définition de vulnérabilité d'un aquifère

Le terme de « *vulnérabilité naturelle de l'eau souterraine à la contamination* » introduit par Margat, J. (1968) est défini comme la sensibilité de l'eau souterraine face à une contamination quelle que soit sa nature, autrement dit, il s'agit de la définition inverse de la « *protection naturelle de l'eau souterraine* ». La vulnérabilité des eaux souterraines d'un aquifère est une propriété purement qualitative et non-mesurable (Vrba & Zaporozec, 1994). Vrba, J. et Zaporovec, A. (1994) proposent de distinguer deux types de vulnérabilité pour éviter toutes ambiguïtés : le premier est la vulnérabilité dite intrinsèque et le second est la vulnérabilité dite spécifique. La vulnérabilité intrinsèque est indépendante de la nature du contaminant, elle est définie uniquement sur la base d'informations géologiques et hydrogéologiques, tandis que la vulnérabilité spécifique prend en compte le comportement particulier d'un contaminant dans un environnement. Au vue de la complexité et de la diversité des contaminants, l'établissement des cartes de vulnérabilité ou de protection des eaux souterraines se base, pour la plupart, uniquement sur la vulnérabilité intrinsèque. Cette dernière décrit le comportement et le chemin que prend une particule d'eau dans le système hydrogéologique.

2.1.2 Origine de la vulnérabilité de l'eau souterraine

Lorsqu'un contaminant s'infiltré dans le sol et rejoint plus tard l'aquifère, différents processus vont avoir un effet protecteur sur la qualité de l'eau au captage. Ces processus sont notamment la dispersion-diffusion, l'effet de dilution, la dégradation chimique, biologique et radioactive, l'absorption et désorption, la filtration et la sédimentation et pour finir la volatilisation (Vrba & Zaporozec, 1994, Fetter, 2001). La présence et l'efficacité de ces processus dépendent du type de contaminant entrant et des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère en question.

2.1.3 Spécificité du karst

Pour le cas étudié lors de ce travail de master, il faut se concentrer sur la spécificité des aquifères karstiques. Ce qui fait la particularité du karst est la dualité de la porosité (Doerfliger & al., 1999). En effet, d'un côté il y a le réseau de conduits (diamètre >10 mm) caractérisé par un écoulement turbulent rapide et une conductivité hydraulique élevée ($K > 10^{-1}$ m/s). Ce réseau ne représente qu'un petit volume comparé au reste du système karstique. De l'autre côté, il y a la matrice rocheuse calcaire environnante avec des conductivités hydrauliques très variables mais beaucoup plus faible (10^{-3} m/s $> K > 10^{-7}$ m/s). Il est important de mentionner que les deux sont étroitement connectés, les conduits karstiques en périodes de crues alimentent ou recharge la matrice peu perméable et à l'inverse en période d'étiage c'est la matrice qui alimente les conduits.

Dans les systèmes karstiques, les écoulements en milieu non-saturé se font principalement le long de conduits verticaux pour rejoindre le milieu saturé. Dans la zone phréatique, les écoulements se font principalement le long de conduits horizontaux (Jeannin, 1998). Ce modèle conceptuel du karst est schématisé ci-dessous (Fig.1).

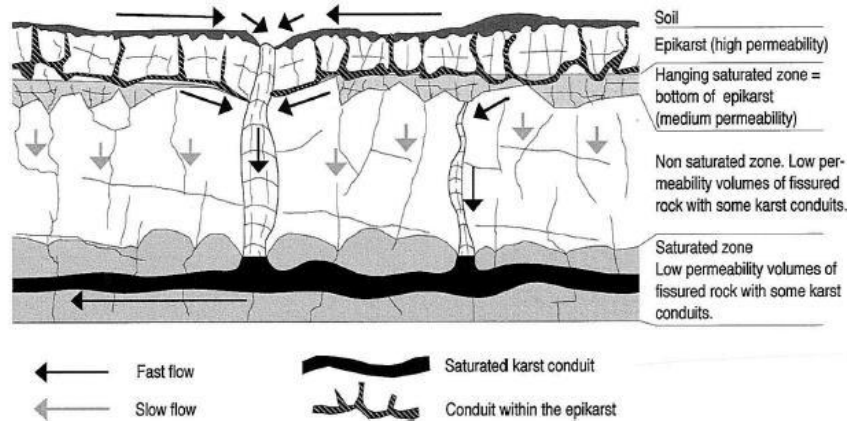


Figure 1 : Modèle conceptuel du karst et recharge en eau du système (de Jeannin et Grasso 1995 d'après Smart et Friedrich 1986).

D'autres particularités du karst sont notamment géomorphologiques telles que la présence de dolines, gouffres, lapiez, épikarst ; et hydrogéologiques telles que la présence de grandes sources, pertes, une absence de drainage de surface, des temps de transit rapides, des variations importantes de débit aux sources, de fortes et rapides variations chimiques de l'eau (Jeannin, 1998, Doerflinger & Zwahlen, 1998).

Du fait de ses caractéristiques, les aquifères karstiques sont considérés depuis longtemps comme particulièrement vulnérables (Doerflinger & Zwahlen, 1998). En effet, la présence de points d'infiltration concentrée comme les dolines, les gouffres et d'un réseau plus ou moins bien connecté de conduits impliquent des temps de transit entre la surface et la source pouvant être très rapides selon le régime hydrologique, par exemple lors de crues. Par conséquent, le temps de résidence peut être très court (Doerflinger & al., 1999) dans l'aquifère et donc peu de filtration et dégradation ont lieu. La qualité de l'eau en est alors d'autant plus altérée. Néanmoins, d'autres processus sont à prendre en compte, comme la dilution qui est beaucoup plus marquée en hautes eaux et compense en partie les conséquences du faible temps de résidence dans l'aquifère. A l'inverse, en période d'étiage, l'eau est de meilleure qualité due à un temps de résidence plus grand, car elle provient essentiellement de la matrice rocheuse (Doerflinger & al., 1999). La qualité de l'eau des systèmes karstiques varie par conséquent selon le régime hydrologique.

Certains paramètres comme la présence d'un sol actif biologiquement et d'une couche imperméable telle que des dépôts du Quaternaire peuvent avoir un effet protecteur conséquent (Doerflinger & Zwahlen, 1998).

2.1.4 Indicateurs de la qualité des eaux souterraines en milieu karstique

Le risque principal d'une contamination des sources à La Côte-aux-Fées est d'origine microbienne. La présence de bactéries fécales comme *E.Coli* et des entérocoques dans l'eau

des sources n'est pas rare. Les analyses microbiologiques (bactérie + levures + moisissures) des eaux peuvent prendre jusqu'à plus de 72 heures (temps d'incubation) selon les méthodes imposées par l'OPBD¹ (2016). Ce temps d'attente est trop long pour un temps de réaction adéquat lorsque les concentrations microbiennes sont trop élevées.

Selon Pronk, M. (2008), la turbidité peut être liée à la présence de bactéries (*E.Coli* et entérocoques) et est facilement mesurable. En surveillant la turbidité et plus particulièrement la distribution de la taille des particules dans l'eau (PSD = particle-size distribution) à l'aide d'un compteur de particules, il est possible de déterminer si l'origine de la turbidité est autochtone ou allochtone. La turbidité autochtone provient de la remobilisation des particules dans le système karstique (intrakarst) due à une augmentation du débit. Elle est caractérisée par une augmentation de la concentration en particules et par une gamme étendue de la taille de ces particules (colloïde à 0.1 mm). La turbidité allochtone est quant à elle représentée par une prédominance de particules fines (0.9 à 10 µm) et provient de la surface suite à des précipitations. Une turbidité allochtone est synonyme d'un possible risque de contamination microbienne depuis la surface du système karstique. Le PSD est alors utilisable comme un indicateur d'une contamination de ce type.

2.2 Méthodes de détermination cartographique de la vulnérabilité applicable en milieu karstique

Plusieurs méthodes, notamment basées sur les SIG (système d'information géographique), ont été mises au point afin de cartographier la vulnérabilité des aquifères. Certaines d'entre elles se veulent applicables à tous types d'aquifères (aquifère poreux, fissuré et karstique) tel que la méthode américaine DRASTIC (Aller & al., 1987). Cependant, des lacunes existent notamment en ce qui concerne les aquifères karstiques, d'où la nécessité de développer d'autres méthodes plus spécifiques à cet environnement comme la méthode suisse EPIK (Doerflinger & Zwahlen, 1998). Cette dernière reste pour le moins critiquable, négligeant le rôle du sol et de la forêt, pour cela, d'autres méthodes adaptées aux milieux forestiers ont été recherchées comme les méthodes ForDISK et ForSIG (Thueller, 2014).

2.2.1 Méthodes et applications

Les méthodes DRASTIC, EPIK et ForSIG vont être brièvement présentées et comparées, le but étant de discuter des différents aspects utilisés pour l'établissement de ces cartes de vulnérabilité dans les environnements karstiques.

La méthode **DRASTIC** (Aller & al., 1987) est applicable à tous types d'aquifères sous divers climats ce qui lui procure un aspect pratique intéressant. Elle ne prend en compte que la vulnérabilité intrinsèque. La méthode utilise sept critères de base qui sont les suivants : profondeur de la zone insaturée, la recharge, la géologie, les propriétés du sol, la topographie,

¹ Ordonnance du département fédéral de l'intérieur (DFI) sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public.

l'impact de la zone vadose et la conductivité hydraulique de l'aquifère. Un indice DRASTIC est calculé à partir des classements attribués pour chaque critère. Grâce à cet indice, une carte de la vulnérabilité est établie.

La méthode **EPIK** (Doerflinger & Zwahlen, 1998) est une méthode multicritère développée spécialement pour l'environnement karstique en Suisse et pour l'établissement des zones de protection dans ce milieu. A cause de la particularité des aquifères karstiques, la nécessité de créer une méthode adaptée au karst s'est fait ressentir. L'indice EPIK s'établit sur la base de 4 critères, à savoir : le développement de l'épikarst (E), la couverture protectrice (P), les conditions d'infiltration (I) ainsi que le développement du réseau karstique (K). Une carte de vulnérabilité est établie sur la base de l'évaluation donnée à chacun de ces critères.

La méthode **ForSIG** (Thueller, 2014) a été développée spécifiquement pour la création de cartes de vulnérabilité intrinsèque en milieu forestier. Cet aspect était auparavant négligé par les méthodes existantes alors qu'il est démontré (Thueller, 2014) que le sol forestier ralentit l'infiltration des contaminants vers la nappe et amoindri leurs effets grâce à une importante activité biologique notamment. L'application de la méthode ForSIG requiert une étude hydrogéologique détaillée et est applicable à tous types d'aquifères en milieu forestier. Des classes spéciales sont prévues pour certains critères afin de répondre aux particularités que présentent les environnements karstiques. La méthode ForSIG prend en compte 11 paramètres qui sont répartis dans les 4 catégories suivantes : propriétés de l'aquifère, propriétés du terrain, propriétés du sol et propriétés de la forêt.

2.2.2 Critiques des méthodes

Selon Thueller, L. (2014), la méthode DRASTIC reste très généraliste en négligeant certaines spécificités propres au type d'aquifère, en particulier les aquifères karstiques. Des paramètres déterminants comme la présence d'une couche protectrice, d'un sol ou encore du type de végétation n'ont que peu de poids dans la méthode. La méthode EPIK cible plus précisément les variations propres aux aquifères karstiques avec l'évaluation de paramètres spécifiques. Cependant la méthode fait encore trop abstraction de certaines propriétés du sol jouant un rôle prépondérant dans la filtration de l'eau comme le contenu en matière organique et le peuplement de ce sol (p.e. forêt, prairie). La méthode ForSIG essaye de combler cette lacune en milieu forestier en appliquant des critères propres aux forêts comme la proportion de résineux et la répartition des classes d'âges des arbres (Thueller, 2014).

2.3 Zones de protection en Suisse

2.3.1 Principe des zones de protection

Selon les *Instructions publiques pour la protection des eaux souterraines* de l'OFEV² (Brühlmann & al., 2004) les zones de protection sont mises en place autour des captages d'eau potable d'intérêt publique et servent à protéger ces exploitations d'éventuelles pollutions afin

² Office fédéral de l'environnement

de garantir une qualité d'eau qui répondent « *aux exigences sur la législation des denrées alimentaires et des installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines* » (Brühlmann & al., 2004).

Il existe trois catégories de zones de protection, en allant de la plus restrictive à la plus permissive il y a la zone S1, S2 et S3. Les zones de protection sont des périmètres de sécurité correspondant à des règles strictes délimités suite aux résultats d'études hydrogéologiques mais aussi selon des aspects pratiques. En effet, elle doit s'adapter aux conditions locales, limites parcellaires, constructions et installations, lisières de forêt etc. (OFEV, 2004).

2.3.2 Objectifs et restrictions des zones de protection

Chacune de ces 3 zones endosse un rôle bien précis avec les restrictions qui s'en suivent. Ci-dessous, un tableau résume (Tab.1) les buts et restrictions associés pour chaque zone.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des objectifs et restrictions pour chaque zone de protection, tiré du document « *Instructions publiques pour la protection des eaux souterraines* » de 2004 de l'OFEV.

Zone	Objectifs	Restrictions
S1 (zone de captage)	<p>Cette zone doit éviter :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'endommagement des installations de captage et l'entrée directe de polluant dans celles-ci. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seules les activités liées à l'exploitation en eau potable sont autorisées.
S2 (zone rapprochée)	<p>Cette zone doit éviter :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le passage de germes ou virus, ainsi que de liquides polluants jusqu'au captage. • les pollutions provoquées par des travaux ainsi que la réduction de la capacité de filtration de l'aquifère. • l'arrivée au captage de polluants en forte concentration. • la modification des écoulements souterrains par effet de barrage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de construction • Pas de fouille ou mouvement de terrain. • Pas de produit phytosanitaire mobile et difficilement dégradable • Pas d'engrais liquide comme du purin. • S'ajoute aux restrictions de S3
S3 (zone éloignée)	<ul style="list-style-type: none"> • Cette zone joue le rôle de tampon autour de la zone S2 et évite la présence d'installations et activités pouvant altérer la qualité de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'extraction de graviers, sables ou autres matériaux. • Pas de décharge. • Pas d'entreprise présentant un danger. • Pas de construction en-dessous du niveau piézométrique maximum de la nappe.

Les restrictions propres à chaque zone de protection se superposent sur les restrictions des zones supérieures (S1 > S2 > S3) mais aussi sur le secteur de protection des eaux souterraines A_u et Z_u. Par exemple, une zone de protection S2 suivra les restrictions qui lui sont propres en plus des restrictions en vigueur pour des zones S3 et secteur de protection A_u. Le secteur de protection A_u et l'aire d'alimentation Z_u font aussi l'objet de restrictions et servent pour le

premier à préserver les nappes phréatiques avec un potentiel d'exploitation (débit et qualité suffisante) et pour le second à préserver la qualité des eaux déjà polluées (assainissement de contaminants mobiles et persistants).

2.3.3 Délimitation des zones de protection

En Suisse, les trois types d'aquifères sont représentés : les aquifères poreux, fissurés et karstiques. Chaque type possède ses spécificités même si dans la nature des intermédiaires existent. Selon les *Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines* de l'OFEV (Brühlmann & al., 2004) l'établissement des zones de protection se fait en principe sur la base des isochrones dans le cas d'aquifères poreux et d'aquifères fissurés à faible hétérogénéité. Dans le cas d'aquifères karstiques et d'aquifères fissurés à forte hétérogénéité, il a lieu d'établir les zones de protection sur la base d'une carte de vulnérabilité. La raison est due au temps de résidence faible de l'eau dans ces systèmes et par conséquent à une filtration limitée des eaux souterraines. La délimitation des zones de protection se fait comme suit :

Aquifères poreux :

La zone de protection S1 (zone de captage) est établie selon la construction du captage. En principe, la limite doit se situer à 10 mètres au minimum du point de captage le plus éloigné, par exemple le bout d'un drain latérale de captage.

La limite externe de la zone de protection S2 (zone rapprochée) est établie selon un isochrone de 10 jours à partir du captage. C'est-à-dire qu'une particule d'eau partant de cette limite mettra au minimum 10 jours pour atteindre le captage. Le calcul de cette distance est réalisé sur la base de conditions d'étiage piézométrique avec un débit d'exploitation maximal. Une seconde condition est imposée, la distance entre le captage et la limite externe de la zone de protection S2 est d'au minimum 100 mètres à l'amont hydraulique du captage.

La limite externe de la zone de protection S3 en amont hydraulique du captage s'étend à environ deux fois la distance entre la zone de protection S1 et la zone de protection S2. En aval hydraulique du captage, cette limite s'établit sur le point de stagnation pour les conditions les plus défavorables.

Aquifères karstiques :

La méthode **EPIK** (Doerflinger & Zwahlen, 1998) développée pour la délimitation des zones de protection en milieu karstique se base sur l'évaluation de 4 critères E,P,I,K (voir section 2.2.1). Ils sont évalués à distance régulière à la surface de l'aquifère (grille de 20 m par exemple) pour créer par la suite une carte de vulnérabilité. Un indice entre 1 et 3 ou 1 et 4 est attribué pour chaque critère. Plus cet indice est petit, plus les eaux souterraines sont vulnérables et à l'inverse, plus cet indice est grand, plus les eaux souterraines sont protégées.

La méthode EPIK datant de 1998 n'a pas été appliquée pour la délimitation de la zone de protection des sources à La Côte-aux-Fées (1994-1995) même si certains critères comme l'épaisseur de la couverture ont en partie été pris en compte. L'évaluation des 4 critères peut se révéler difficile en raison du manque d'informations. Dans le cas de l'évaluation de la

couche protectrice, il est parfois difficile même avec les méthodes actuelles de connaître avec précision son épaisseur et sa répartition spatiale. Les cartes géologiques font souvent abstraction des dépôts quaternaires comme la moraine jurassienne lorsque ceux-ci n'atteignent pas des épaisseurs conséquentes ou peu visible comme c'est le cas sur le plateau des Bourquins à la Côte-aux-Fées.

L'indexation pour chaque critère se fait comme suit (Tab.2) :

Tableau 2 : Indexation des 4 critères de la méthode EPIK (modifié par Thueler, 2014 d'après Doerflinger et Zwahlen, 1998).

Morphologie karstique observée (en relation avec l'épikarst)	E1	Gouffre, aven, ponor, embut, doline, lapiez, relief uniforme, cuestas	
	E2	Zones intermédiaires situées dans les alignements de dolines; ouvalas, vallées sèches, canyons, poljés	
	E3	Le reste du bassin versant	
Absence de morphologie karstique			
		A. Sol reposant directement sur les formations calcaires ou sur des formations détritiques de très grande conductivité hydraulique (éboulis, moraines latérales)	B. Sol reposant sur > de 20 cm de formation géologique de faible conductivité hydraulique (K) (argiles, limons)
Absence de ouverture protectrice	P1	0-20 cm de sol	
	P2	20-100 cm de sol	20-100 cm de sol et de formation de faible K.
	P3	> 1m De sol	> 1m de sol et de formation de faible K.
Couverture protectrice importante	P4		Formation de très faible K > 8m, ou d'épaisseur > 6m avec > 1m de sol
Infiltration concentrée	I1	Perte – lits et berges des cours d'eau alimentant une perte – écoulements superficiels s'infiltrant – secteurs du bassin versant d'un cours d'eau comprenant des systèmes de drainage artificiel	
	I2	Secteur du bassin versant d'un cours d'eau non drainé artificiellement, et dont la pente est > 10% pour les surfaces cultivées et > 25% pour les prairies et les pâturages	
	I3	Secteur du bassin versant d'un cours d'eau dont la pente est < 10% pour les zones cultivées et <25% pour les prairies et pâturages. En dehors du bassin versant d'un cours d'eau, zones de pieds de pente collectant les eaux de ruissèlement et pentes prononcées (> 10% pour les zones cultivées et > 25% pour les prairies et pâturages) dont les eaux de ruissèlement alimentent ces zones	
Infiltration diffuse	I4	Le reste du bassin d'alimentation	
Réseau karstique bien développé	K1	Réseau karstique bien développé à conduits décimétriques à métriques très peu colmatés et bien connectés entre eux	
Réseau karstique mal développé	K2	Réseau karstique mal développé, à drains ou conduits mal connectés ou colmatés, ou encore de dimension décimétrique et inférieure	
Aquifère mixte ou fissuré	K3	Exutoire en milieu poreux avec un effet protecteur possible – aquifère fissuré non karstique	

Sur la base de ces indices un facteur de protection F est calculé tel que (Eq.1) :

$$F = E * \alpha + P * \beta + I * \gamma + K * \delta \quad (1)$$

F : facteur de protection

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficient de pondération de chacun des critères

E, P, I, K : valeur de chacun des critères

A partir de la valeur calculée de F, la vulnérabilité et par extension l'attribution d'une zone de protection s'effectue de la manière suivante (Tab.3) :

Tableau 3 : Equivalence entre facteur de protection F et zone de protection S (modifié d'après Doerflinger et Zwahlen, 1998).

Vulnérabilité	Facteur de protection F	Zone de protection
Très élevée	9 à 19	S1
Elevée	20 à 25	S2
Moyenne	> 25	S3
Faible	> 25 et présence des critères indexés P4 + (I3, I4)	Reste du bassin versant

Aquifères fissurés :

La complexité des aquifères en milieu fissuré fait qu'il n'y a pas de méthode unique pour la délimitation des zones de protection. La méthode appliquée dépend de chaque cas, c'est-à-dire de la vulnérabilité des eaux du captage dans une première phase puis dans une seconde de l'hétérogénéité du milieu. Selon le besoin, la méthode des distances et des isochrones suffisent mais parfois une carte de vulnérabilité établie sur des critères spécifiques doit être mise en place (méthode **DISCO**).

3 Situation de l'étude

3.1 Contexte géographique et météorologie

La commune de La Côte-aux-Fées se situe dans la chaîne montagneuse du Jura plissé suisse à environ 1000 mètres d'altitude, au Nord-Ouest de la montagne du Chasseron (annexe 1.1). La commune compte quelques 442 habitants au 31 décembre 2018 qui doivent être alimentés en eau potable avec une demande d'environ 180 m³ par jour.

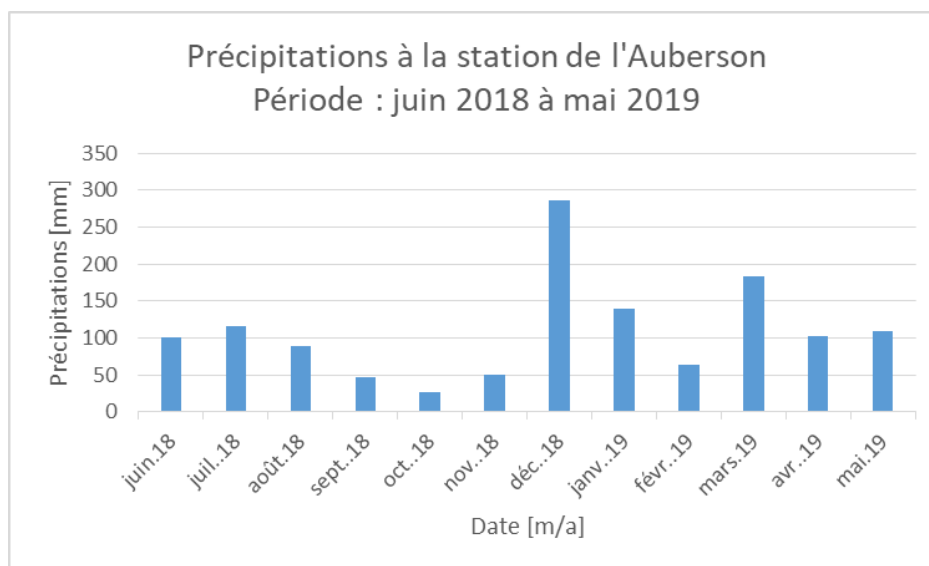


Figure 2: Précipitations cumulées par mois à la station de l'Auberson (VD).

Concernant la météorologie, la moyenne des précipitations de ces 5 dernières années (2013 à 2018) est, selon *MétéoSuisse (climap)*, de 1540 mm à la station de mesure de l'Auberson³. Les précipitations tombées durant la période du 1^{er} juin 2018 au 1^{er} juin 2019 sont de 1318 mm et sont illustrées par le graphique ci-dessus (Fig. 2). Les mois de décembre, janvier et mars ont été les plus productifs alors que les mois de septembre à novembre se sont révélés très secs pour la saison (<51 mm).

³ Station météorologique de l'Auberson (VD) située à près de 5 km de La Côte-aux-Fées.

3.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Carte géologique avec disposition des coupes à La Côte-aux-Fées

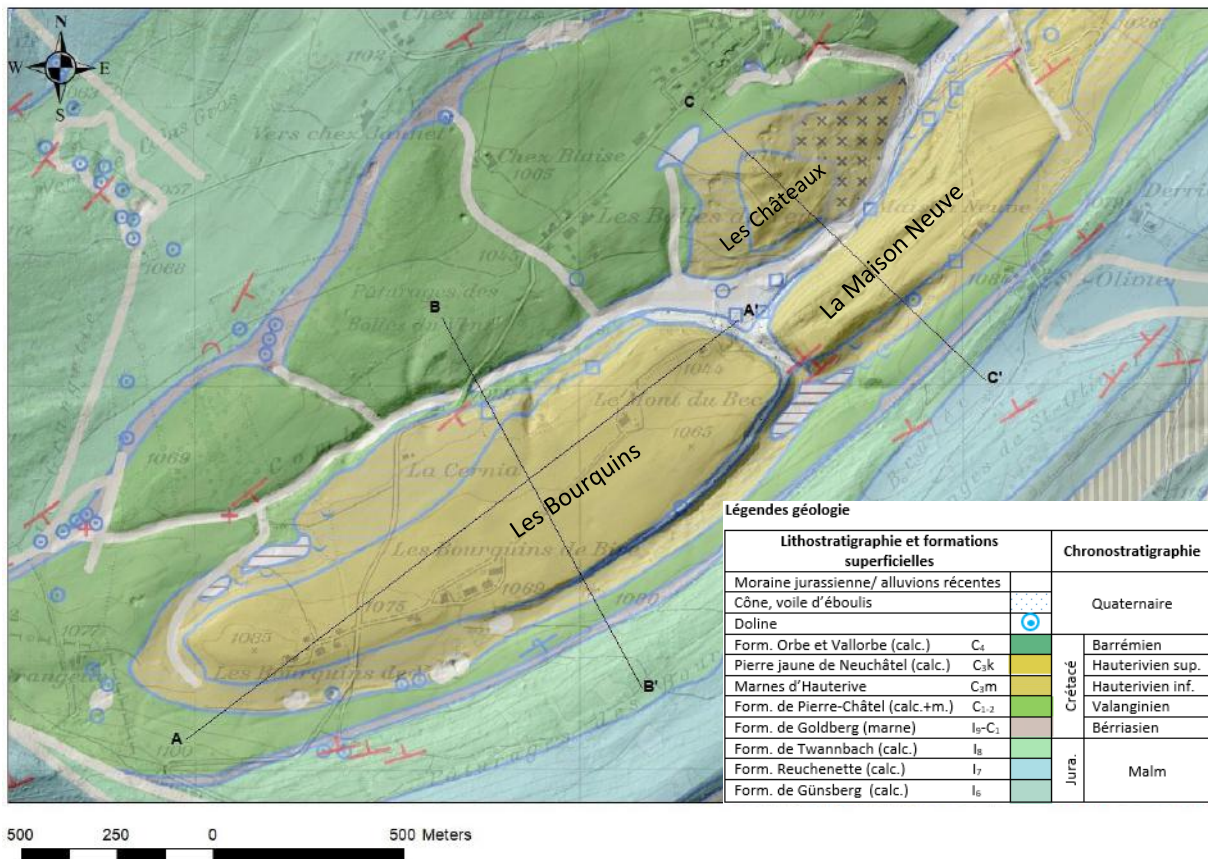


Figure 3: Carte géologique de La Côte-aux-Fées combinée avec le MNT SwissALTI3D (modifiée à partir de l'atlas géologique de la Suisse, Swisstopo) et disposition des coupes géologiques de l'annexe 2.

Géologiquement, la commune de La Côte-aux-Fées se trouve au cœur du synclinal du même nom et repose sur des calcaires et marnes datant du Crétacé et du Jurassique (Fig.3, annexe 2). L'axe du synclinal est grossièrement orienté Nord-Est/ Sud-Ouest en plongeant vers le Nord-Est. Des lambeaux de calcaire de l'Hauterivien supérieur appelé « Pierre jaune de Neuchâtel » se superposent sur les marnes plus âgées de l'Hauterivien inférieur appelé « Marnes d'Hauterive ». Le passage des marnes aux calcaires est progressif (Rigassi & Jaccard, 1995). A La Côte-aux-Fées, les lambeaux de Pierre Jaune se manifestent sous la forme de plateaux surélevés dans le paysage et entourés par des pentes parfois raides avec plus de 45° (annexe 3). Il s'agit du plateau des Bourquins (CH1903 526745/ 189665) et de La Maison Neuve (CH1903 527977/190403). Le lambeau des Châteaux (CH1903 527500/ 190508), de par sa taille limitée, ne se manifeste que partiellement dans la topographie. Les affleurements de Pierre Jaune de Neuchâtel sont rares mais néanmoins visibles sur la face Est de La Maison Neuve au lieu-dit de « l'Ancienne carrière » (CH1903 527585/190040) (annexe 3h). Une autre spécificité du lieu est l'alignement de dolines au Sud du plateau des Bourquins (Fig.3, annexe 3g) à l'interface des calcaires de Pierre-Châtel⁴ et des Marnes d'Hauterive. Elles ne concernent

⁴ Formation calcaire de Pierre-Châtel datant du Crétacé (Valanginien).

donc pas directement la Pierre Jaune de Neuchâtel mais constituent des points d'infiltrations préférentielles rejoignant des aquifères plus profonds dans les roches datant du Malm.

Des dépôts autochtones datant du Quaternaire, plus précisément de la moraine jurassienne, reposent sur les calcaires de la Pierre Jaune avec une répartition spatiale et épaisseur hétérogène. Une granulométrie majoritairement silto-graveleuse est observée sur le lieu de l'étude (Preisig, 2017). Ces formations superficielles sont attribuées à la calotte glaciaire jurassienne qui s'étendait il y a environ 20'000 ans sur une partie de l'arc jurassien et se développait indépendamment des glaciers alpins. Selon la notice explicative de l'atlas géologique suisse (Rigassi & Jaccard, 1995), des traces de l'activité glaciaire ont été observées proche de La Côte-aux-Fées sous la forme de galets striés et indiquent un sens d'écoulement provenant du Nord-Ouest ou de l'Ouest. Il est important de relever que la carte géologique fait totalement abstraction de cette moraine jurassienne sur le plateau des Bourquins et La Maison Neuve (Fig.3, annexe 1.2). Cependant, des dépôts de moraine jurassienne sont reportés à quelques kilomètres du plateau des Bourquins sur la feuille Ste-Croix de l'Atlas géologique suisse.

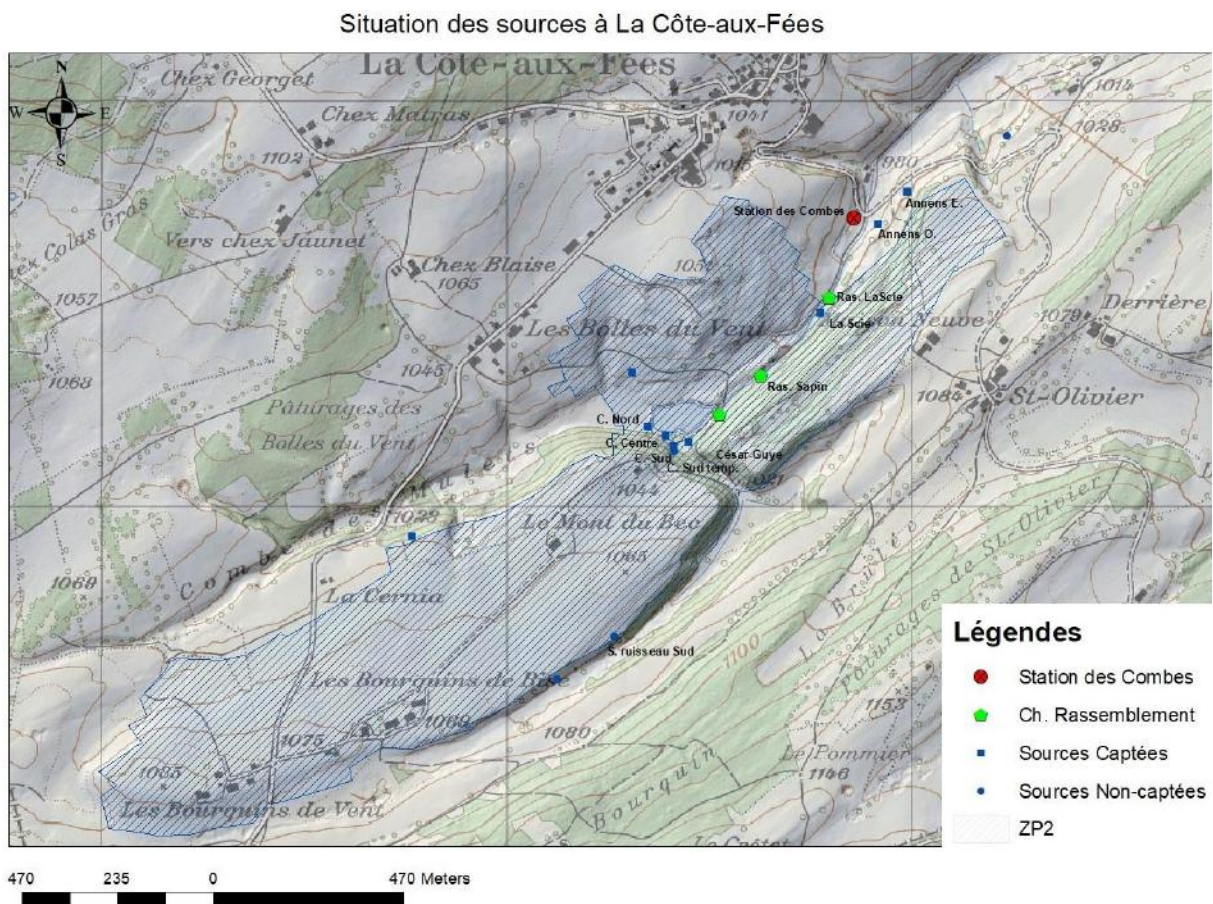


Figure 4 : Carte de La Côte-aux-Fées avec sources et zone de protection S2 en vigueur.

A l'interface des deux unités de l'Hauterivien susmentionnées (Pierre Jaune de Neuchâtel et Marnes d'Hauterive) de nombreuses sources ressortent et sont pour la plupart captées. La

Pierre Jaune de Neuchâtel est en effet considérée comme un aquifère karstique alors que les Marnes d'Hauterive ont un comportement aquitard (Kiraly, 1973). Les calcaires du Malm (Jurassique) présent dans la région sont également considérés comme des aquifères.

Parmi les sources captées, seule la source de La Scie est exploitée car elle présente rarement des signes de turbidité contrairement aux autres sources (Matthey, 1994). Le débit de cette source est en général suffisant pour garantir l'approvisionnement de la commune, néanmoins, en période d'étiage, cette dernière doit se fournir en eau au réseau SEMVER⁵. L'eau de la source est ensuite traitée à la station des Combes (Fig.4) à l'aide d'un filtre à sable et de rayons UV. Une zone de protection S2 est délimitée (Fig.4) sur quasiment l'ensemble du bassin versant des sources qui concerne les lambeaux de Pierre Jaune de Neuchâtel du plateau des Bourquins, de La Maison Neuve et des Châteaux (Bolles-du-Vent). Cette délimitation fait suite aux résultats de plusieurs rapports techniques (Matthey, 1994 & 1995). Ces études démontrent une mauvaise qualité des eaux des sources captées provoquée par l'exploitation agricole des terrains (épandage d'engrais) sus-jacents aux aquifères et en amont des sources.

⁵ Syndicat Intercommunal des eaux du **Mont-des-Verrières**

4 Surveillances des sources, de l'étang et du ruisseau

4.1 Description du réseau hydrologique et du réseau de captage des sources

La situation des points de mesures des eaux à La Côte-aux-Fées et à Buttes est rassemblée dans le tableau ci-dessous (Tab.4). Un code est attribué spécifiquement à chaque source, étang et ruisseau. L'étude actuelle et les études précédentes (Matthey, 1994 & 1995) démontrent que l'aquifère karstique du plateau des Bourquins et de la Maison Neuve alimentent de nombreuses sources d'importance variable. Les essais de traçage ont révélé que ce sont en grande majorité les sources captées autour de l'étang des Sagnes qui sont concernées (Fig.4, Tab.4). Le captage de ces sources est organisé en un réseau de tuyauterie en béton et PVC dirigeant les eaux captées vers l'aval (Fig.5) et vers la station de traitement des Combes.

Tableau 4 : Situation et code des sources, étang et ruisseau observés.

Source/nature	Code	Lieu	Coordonnées (CH1903/LV03)	Altitude [m]	Remarques
Station des Combes	-	La Côte-aux-Fées	527862/190711	986	-
Chambre ras. de La Scie : La Scie	CAF1	La Côte-aux-Fées	527792/190512	994	capté
Chambre ras. de La Scie : sources Mélangées (César-Guye + Combe Nord, Centre, Sud)	CAF2	La Côte-aux-Fées	527792/190512	994	capté
Captage de La Scie	CAF3	La Côte-aux-Fées	527767/190468	995	capté
Captage César-Guye	CAF4	La Côte-aux-Fées	527453/190158	1005	capté
Etang des Sagnes	CAF5	La Côte-aux-Fées	527421/190225	1003	artificiel
Captage Combes Nord	CAF6	La Côte-aux-Fées	527352/190197	1002	capté
Captage Combes Centre	CAF7	La Côte-aux-Fées	527395/190175	1003	capté
Captage Combes Sud	CAF8	La Côte-aux-Fées	527419 /190144	1005	capté
Source temporaire C. Sud	CAF9	La Côte-aux-Fées	527419 /190144	1005	non-capté
Source ruisseau Sud	CAF11	La Côte-aux-Fées	527270/189680	1056	non-capté
Source Annens Ouest	CAF12	La Côte-aux-Fées	527930/190706	992	capté
Source des Raies	CAF13	Buttes	531841/193050	774	capté
Ruisseau de l'Echelier	CAF10	La Côte-aux-Fées	-	-	-

Le réseau est construit de la manière suivante (Fig.5, annexe 4), les eaux des sources de la Combe Sud et de César-Guye sont captées séparément puis rassemblées dans la chambre de rassemblement inférieure de César-Guye. Ces eaux sont ensuite rejointes par le mélange des eaux de sources de la Combe Nord et Centre dans la chambre de rassemblement du Sapin (ou Carrée). A la chambre de rassemblement de La Scie, les eaux des trois Combes (Combe Nord, Centre et Sud) et de la César-Guye sont finalement rejetées dans le ruisseau de l'Echelier. Quant à la source de La Scie captée légèrement en amont, elle est acheminée dans la chambre de rassemblement du même nom puis canalisée séparément des autres pour être envoyée à la station de traitement des eaux des Combes et dans le réseau en eau potable.

Mis à part les sources décrites ci-dessus, d'autres sources non-captées (Fig.4) ont été observées non loin de la source de la Combes Sud et sur le flanc sud du plateau des Bourquins.

Ces deux sources sont nommées respectivement source temporaire de la Combe Sud et source du Ruisseau Sud (Tab.4, annexe 4p-r). La source du Ruisseau Sud alimente un ruisseau qui rejoint l'étang des Sagnes en période de très hautes eaux mais qui se perd dans le sous-sol autrement.

Plan du réseau de captage des sources

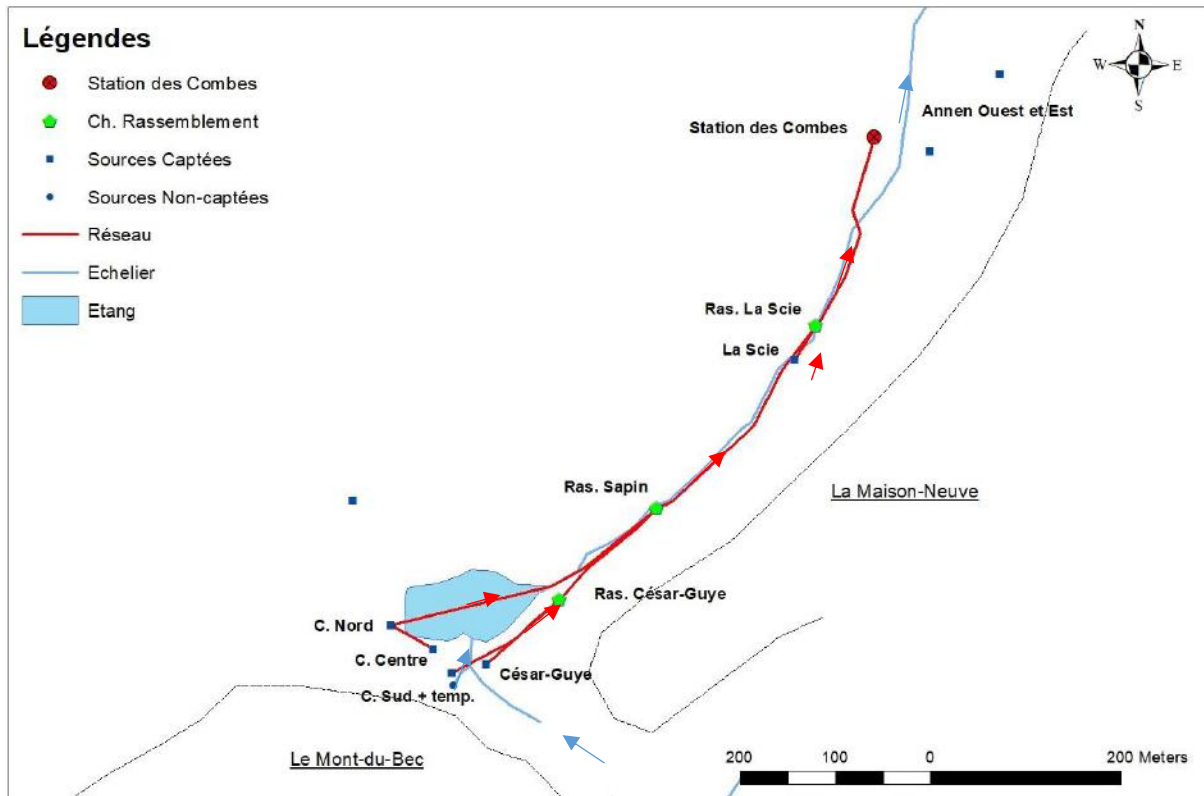


Figure 5: Plan du réseau de captage des sources.

Le pied du plateau des Bourquins et de la Maison Neuve est constitué de zones humides pouvant être inondées lors de précipitations abondantes, c'est le cas aux alentours de l'étang des Sagnes, au lieu-dit des Envers et aux Chenailons (annexe 1.1) où des alluvions récentes reposent sur les marnes d'Hauterive partiellement imperméables. Le ruisseau (Sud) de l'Echelier prend sa source depuis le bois des Envers (source Ruisseau Sud) et continue son chemin entre le plateau des Bourquins et La Maison Neuve pour se jeter dans l'étang des Sagnes (Fig.5). Lorsque l'étang atteint des hauts niveaux d'eau, il se vide au Nord-Est à l'aide d'un trop plein qui alimente le ruisseau de l'Echelier. L'Echelier continue sa course le long du bois de La Scie jusqu'à atteindre la chambre de rassemblement de La Scie, à cet endroit, les eaux rassemblés des sources de César-Guye et des trois Combes rejoignent le ruisseau. Il faut noter qu'en période de basses eaux l'étang ne débordent pas de son trop-plein et que par conséquent, entre l'étang et la chambre de rassemblement, le cours d'eau est à sec.

4.2 Configuration des captages des sources

Les sources captées de La Scie, César-Guye, Combe Nord, Centre et Sud (annexe 4a-p) présentent différentes configuration de captage (Fig.6). Cependant, elles se présentent toutes sous la forme de chambre cylindrique en béton fermée par un couvercle en fonte. Ces sources captent toutes des eaux provenant du flanc du plateau des Bourquins et de la Maison Neuve néanmoins, des apports d'eaux de surfaces depuis l'étang ou le ruisseau existant suivant les sources (Matthey, 1994 & 1995). En effet, ces sources ne sont pas captées à grandes profondeurs, entre 1.9 m et 3.8 m et l'étanchéité de la tuyauterie est à reconsidérer.

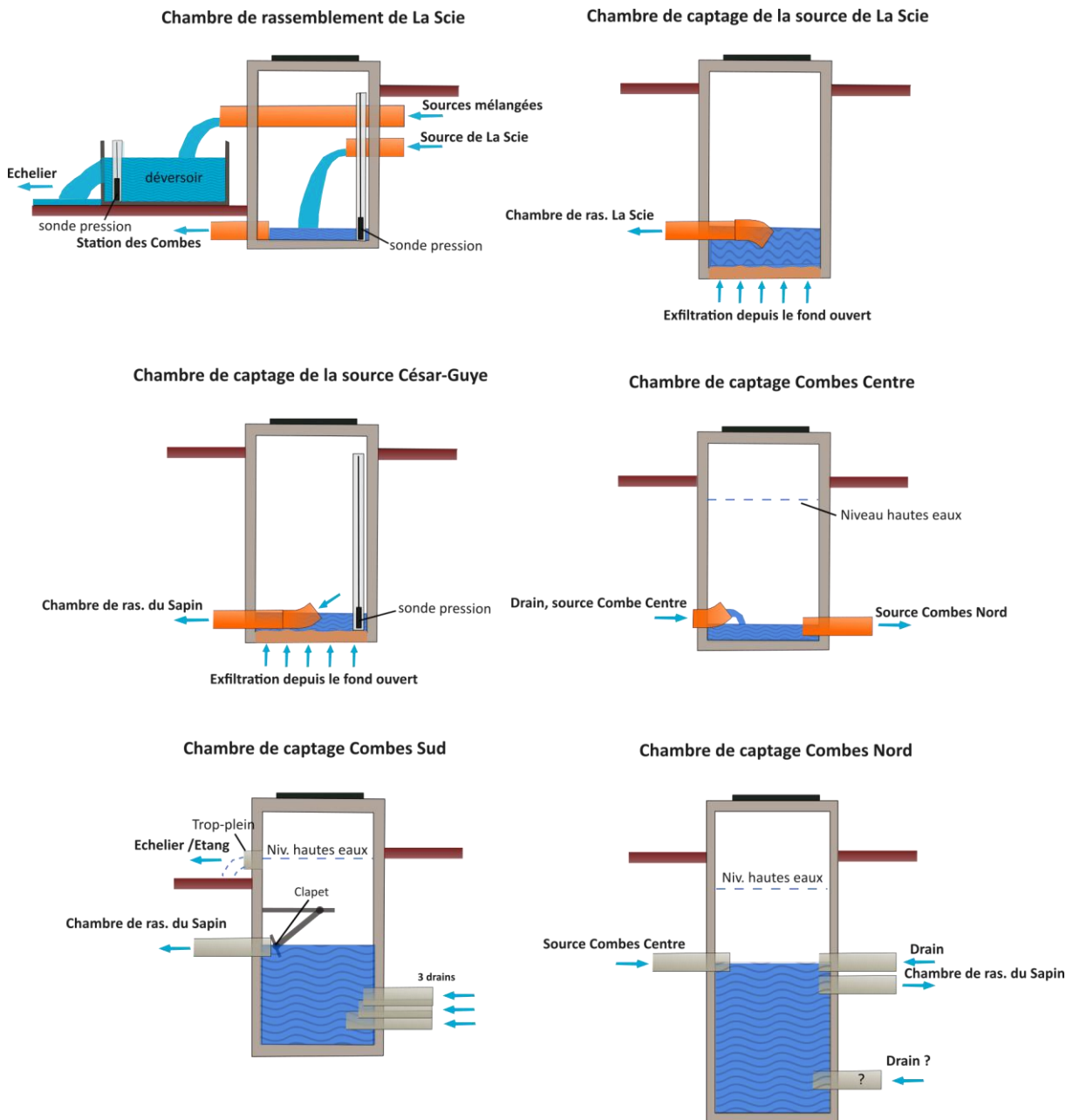


Figure 6: Configuration des chambres de captage et de rassemblement et installation relative à la mesure du débit.

Les sources de La Scie et César-Guye sont captées directement dans la chambre de captage. L'eau de la source remonte par exfiltration depuis le fond ouvert et vaseux de l'infrastructure. L'eau est ensuite évacuée et acheminée en aval à l'aide d'une conduite. Les eaux des sources de la Combe Nord, Centre et Sud sont, quant à elles, captées à l'aide de un ou plusieurs drains latéraux qui rassemblent les eaux dans la chambre de captage. Ces eaux sont ensuite évacuées à l'aide d'une conduite ou bien encore, comme dans le cas de la Combe Sud, à l'aide d'un trop-plein à la surface.

4.3 Méthodes pour le suivi hydrogéologique des sources, étang et ruisseau

Le système de surveillance des sources est focalisé sur les exutoires principaux de l'aquifère, c'est-à-dire à la source de La Scie, César-Guye ainsi que les trois sources des Combes (Fig.4, annexe 4a-p). Des mesures de débit à haute résolution ont été effectuées à la source de La Scie, César-Guye et dans un déversoir mis en place à la sortie de la canalisation qui rassemble les sources de César-Guye et des Combes appelées sources Mélangées (Fig.6, Tab.4). Le débit a également été mesuré manuellement à ces trois points, au trop plein du captage de la Combe Sud et dans le ruisseau de l'Echelier.

D'autres mesures telles que le taux d'oxygène, le pH, la température, la conductivité électrique et la turbidité ont été réalisées aux sources de La Scie, de César-Guye, des trois Combes ainsi que dans l'eau de l'étang des Sagnes et dans le ruisseau de l'Echelier. Des analyses hydrochimiques et microbiologiques ont été effectuées régulièrement.

Ces mesures s'étalent sur une période de 7 mois et demi, d'octobre 2018 à juin 2019.

4.3.1 Mesure du débit pour chaque source

L'intérêt à mesurer le débit des sources avec une haute résolution temporelle est d'observer les extrêmes et la réactivité du système karstique lors d'évènements pluvieux et de fonte des neiges. Ces mesures importent aussi pour l'établissement de bilans hydrogéologiques.

Mesure du débit au mélange des sources de la César-Guye et de la Combe Nord, Centre et Sud (sources Mélangées)

La mesure du débit en [L/min] du mélange des sources à la chambre de rassemblement de La Scie a été effectuée à haute résolution temporelle. Pour se faire, un système de mesure simple a été mis en place, il s'agit du principe du déversoir (Fig 6, annexe 4b-c). Ceci consiste à faire écouler l'eau de la source dans un conteneur en la laissant s'échapper de préférence par une ouverture en « V ». Ainsi chaque niveau d'eau mesuré en [cm] dans le conteneur correspond à un débit en [L/min] bien précis par le biais d'une courbe de tarage. Plus le niveau est élevé, plus le débit sera important et inversement en fonction de la courbe qui établit la relation entre la hauteur d'eau et le débit. Il faut préciser que la courbe de tarage dépend de chaque conteneur, elle est alors créée directement sur le terrain à l'aide de mesures manuelles du débit et de la hauteur du niveau d'eau simultanément. Ensuite, les points de mesures hauteur d'eau/débit sont interpolés à l'aide d'une fonction mathématique qui établit la relation entre

les deux entités (fit). Les mesures manuelles du débit ont été réalisées simplement à l'aide d'un seau et d'un chronomètre, alors que la prise manuelle du niveau d'eau a été faite à l'aide d'un double-mètre. En prenant suffisamment de mesures, la courbe ainsi faite servira plus tard à la conversion des niveaux d'eau de haute résolution temporelle en débit.

Le niveau d'eau est mesuré à haute résolution temporelle avec un intervalle de 10 minutes à l'aide d'une sonde pression (SOLINST modèle Levellogger) disposée dans un tube de plastique crépiné à la verticale dans le déversoir (Fig.6). Les sondes de pression mesurent la pression d'eau et la pression atmosphérique cumulées. Pour n'avoir que la pression d'eau, il suffit de soustraire aux mesures la pression atmosphérique, ainsi une sonde barométrique a également mesuré toutes les 10 minutes la pression atmosphérique. Le programme *Levellogger vers. 4.4.0* mis à disposition par la firme SOLINST permet de réaliser directement cette opération de soustraction et d'obtenir la pression d'eau en colonne d'eau en [cm].

Mesure du débit à la source de La Scie, César-Guye

La configuration des captages des sources de La Scie et César-Guye (chambre cylindrique) rend impossible la mise en place d'un déversoir traditionnel.

Le débit de la source de La Scie n'est pas directement mesurée à la source mais au niveau d'une conduite en PVC dans la chambre de rassemblement de La Scie (Fig.6, annexe 4). L'eau provenant de la source tombe dans la chambre par cette conduite en PVC et est évacuée par le fond à l'aide d'une autre conduite (Fig.6). En utilisant le principe du déversoir, une sonde de pression (SOLINST modèle Levellogger) a été installée dans un tube crépiné à la verticale et mesure le niveau d'eau en [cm] dans la chambre toutes les 10 minutes. Une courbe de tarage a également été créée manuellement. Les mesures manuelles du débit en [L/min] et du niveau d'eau en [cm] ont été réalisées à l'aide d'un seau, d'un chronomètre et d'une sonde piézométrique plongé dans le tube crépiné de la sonde.

Pour la source César-Guye le problème est similaire sauf que l'eau remonte par exfiltration du fond ouvert de la chambre de captage et est évacuée par un drain en PVC. Le principe reste le même, le niveau d'eau de la chambre est mesuré en [cm] grâce à une sonde de pression dans un tube crépiné. Les mesures manuelles du débit en [L/min] et du niveau d'eau en [cm] ont été réalisées à l'aide d'un sac plastique à la sortie du tuyau d'évacuation, d'un chronomètre et d'une sonde piézométrique plongé dans le tube crépiné de la sonde.

Mesure du débit du trop-plein à la source Combe Sud

Le débit de la source de la Combe Sud est déjà compris dans le total du mélange des sources (sources Mélangées) néanmoins, le captage est équipé d'un trop-plein qui évacue l'eau dans le ruisseau de l'Echelier lorsque le débit de la source est trop important. En période d'étiage, le trop-plein n'évacue donc pas d'eau, cependant, lorsque celui-ci est fonctionnel, les débits y sont mesurés en [L/min] manuellement toutes les deux semaines afin d'avoir un recouvrement plus complet des eaux sortantes de l'aquifère.

Mesure du débit du total de la Combe Nord, Centre et Sud

La mesure à haute résolution temporelle du débit aux sources Mélangées (déversoir) et à la source César-Guye permet de calculer le débit additionné des sources de la Combe Nord, Centre et Sud en [L/min]. Les sources Mélangées comprennent le débit de la source César-Guye et des trois Combes confondus, il suffit alors de soustraire le débit de la source César-Guye à celui des sources Mélangées tel que (Eq.2) :

$$Q_{Combes} = Q_{s.Mélangées} - Q_{César-Guye} \quad (2)$$

Q_x : débit de la source x en [L/min]

Mesure du débit au ruisseau de l'Echelier

Le débit du ruisseau a été mesuré occasionnellement en [L/min] à l'aide d'un jaugeage au sel juste avant d'atteindre la station des Combes (CH1903 527886/190692) pour permettre de mesurer l'ensemble des eaux drainées en amont. Cette méthode se base sur le principe de la conservation de masse et consiste à injecter une certaine quantité de sel (NaCl) diluée dans le ruisseau et de mesurer la conductivité électrique de cette eau en aval du point d'injection. Ainsi, une courbe de la conductivité électrique de l'eau en fonction du temps est obtenue. La conductivité est directement convertible en concentration de NaCl tel que (Eq.3) :

$$C_{NaCl} = 0.5 * EC \quad (3)$$

C_{NaCl} : concentration de NaCl en [mg/L], EC : conductivité électrique en [μ S/cm]

En intégrant cette courbe de concentration C [mg/L] vs temps [min] et en divisant la masse totale injectée M [mg] de NaCl injecté avec cette somme, une valeur du débit est obtenue telle que (Eq.4):

$$Q = \frac{M}{\int_{t_0}^{t_1} (C_{tot} - C_{initial}) dt} \quad (4)$$

Q : débit de la source en [L/min], M : masse de NaCl en [mg]

C_{tot} et $C_{initial}$: concentration total et concentration initial de l'eau en [mg/L]

Il est important de relever que la concentration déduite à l'aide de la conductivité électrique doit être corrigée en soustrayant la valeur initiale de la concentration (à partir de la conductivité électrique initiale) qui agit comme un bruit de fond sur les mesures.

Une fois le débit mesuré obtenu il faut encore y soustraire (Eq.5) le débit des sources Mélangées étant donné que les eaux de ces dernières sont rejetées dans le ruisseau en amont du point de mesure.

$$Q_{Echelier} = Q_{mesuré} - Q_{s.Mélangées} \quad (5)$$

Q_x : débit x en [L/min]

4.3.2 Mesures des paramètres physico-chimiques : conductivité, pH, taux d'oxygène et température

La conductivité électrique de l'eau mesurée en [$\mu\text{S}/\text{cm}$] exprime la capacité de cette eau à conduire un courant électrique. Cette caractéristique dépend du contenu en ions dissous. La conductivité électrique procure alors une information sur la minéralisation de l'eau (Thierrin & al., 2003). Les eaux de surfaces sont faiblement minéralisées et montrent des conductivités électriques faibles par comparaison aux eaux souterraines. La minéralisation d'une eau souterraine dépend notamment de la géologie traversée et du temps de résidence en son sein (Moore & al., 2008) mais aussi, dans certains cas, de l'activité humaine (p.e salages des routes). La température de l'eau influence la conductivité mesurée, cependant, celle-ci est corrigée par le conductimètre (WTW modèle 3310) pour une température standard de 25°C.

Le pH et le taux d'oxygène permettent de caractériser la qualité de l'eau et les conditions dans laquelle elle évolue (Kale, 2016). Ces deux paramètres doivent être absolument mesurés *in-situ* (Thierrin & al., 2003) car ils peuvent changer rapidement avec la température, le dégazage et l'activité microbienne. Le pH (potentiel hydrogène) sans unité [-] est un indicateur de la concentration en ion hydrogène (acidité et basicité) et dépend de la nature des terrains traversés, de l'activité biochimique dans l'eau et de l'activité humaine. Le taux d'oxygène est mesuré en [mg/L]. Une eau mouvante et en contact avec l'atmosphère sera plutôt bien oxygénée à l'inverse d'une eau stagnante et plutôt déconnectée de l'atmosphère (Kale, 2016). Elle donne aussi des informations concernant les réactions biochimiques. Les deux paramètres donnent des indications sur la mobilité de certains métaux qui dépend du taux d'oxygène ou du pH du milieu (Kale, 2016).

La tournée des sources a eu lieu toutes les deux semaines environ. La conductivité, la température, le pH et le taux d'oxygène sont régulièrement mesurés aux sources de La Scie, César-Guye, des trois Combes et dans l'étang des Sagnes à l'aide de sondes. Quelques mesures, à titre indicatif, ont également été effectuées dans la source temporaire de la Combe Sud, le ruisseau de l'Echelier et la source du Ruisseau Sud. La conductivité électrique et la température ont été relevées grâce à un conductimètre (WTW modèle 3310) alors que le pH et l'oxygène ont été relevés à l'aide d'une sonde multi-paramètres (HACH modèle HQ40d). Une calibration régulière du pH est requise sur cet appareil pour garantir une bonne qualité des données. En plus de cela, deux sondes (HOBO modèle U24) ont mesuré avec une haute résolution temporelle (10 minutes) la conductivité électrique à la source de La Scie et de César-Guye.

4.3.3 Mesures hydrochimiques

L'analyse de la composition chimique de l'eau est essentielle pour sa caractérisation, comprendre sa provenance et éventuellement observer des traces de l'activité humaine sur le bassin versant. Plus de 90% des solides dissous dans l'eau sont représentés par les ions suivants : sodium, calcium, potassium, magnésium, sulfate, chlorure et bicarbonate (Fetter, 2001). Ces ions sont appelés « ions majeurs ». D'autres ions en quantité plus faible nommés « ions mineurs » sont représentés par le fer, nitrate, nitrite, phosphate, fluorure, strontium et bore. En milieu karstique, la composition chimique peut varier significativement en fonction du régime hydrologique en raison de la nature même de ce type de système (Jeannin, 1998). Un échantillonnage régulier à différents régimes hydrologiques permet d'observer les variations périodiques et saisonnières des concentrations des espèces mesurées. Un intérêt particulier est porté sur les nitrates comme indicateur de l'activité agricole sur le bassin versant des sources (Gilli, 2016).

Des échantillons d'eau de 250 ml (Thierrin & al., 2003) ont été prélevés à peu près chaque mois aux sources de La Scie, César-Guye, de la Combe Nord, Centre et Sud, de l'étang des Sagnes et du ruisseau de l'Echelier afin de mesurer les concentrations des ions majeurs, ions mineurs et du TAC (Titre Alcalimètre Complet) (Tab.5). Les échantillons ont été immédiatement passés dans un filtre cellulosique à 0.45 µm afin de retirer les particules organiques et inorganiques pour éviter tous changements de composition de l'eau post-échantillonnage en raison d'interactions avec ces particules. L'eau destinée pour l'analyse des cations doit être acidifiée avec de l'acide nitrique (HNO₃) afin d'éviter leur dégradation (Thierrin & al., 2003). L'ensemble des échantillons est conservé en milieu réfrigéré à < 10°C. Ces manipulations permettent de garantir la conservation des échantillons.

Tableau 5 : Récapitulatif des anions et cations mesurés

Type	Espèce(s)
Anions	F⁻ (fluorure), Cl⁻ (chlorure), NO₂⁻ (nitrite), NO₃⁻ (nitrate), Br⁻ (bromure), PO₄³⁻ (phosphate), SO₄²⁻ (sulfate)
Cations	Na⁺ (sodium), Li⁺ (lithium), NH₄⁺ (ammonium), K⁺ (potassium), Mg²⁺ (magnésium), Ca²⁺ (calcium), Sr²⁺ (strontium)
TAC	HCO₃⁻ (hydrogénocarbonate)

Les concentrations des anions et des cations sont mesurées en [mg/L] en laboratoire grâce à la méthode de la chromatographie ionique (DIONEX modèle ICS-1600). Le TAC est quant à lui mesuré en [mg/L] par titration à l'acide chlorhydrique de concentration 0.1 M (METROHM modèle Titrino Plus 848 et 869). En connaissant les concentrations de l'ensemble de ces ions, une balance ionique est établie. Cette dernière permet de vérifier la qualité des analyses des

eaux. En effet, l'eau est censée être globalement équilibrée électriquement (neutre). Pour constater cela, il suffit de sommer l'ensemble des charges positives (cations) d'un côté et de sommer l'ensemble des charges négatives (anions + TAC) de l'autre. En comparant les deux, les charges positives et négatives devraient s'annuler, garantissant la neutralité de l'eau. L'écart entre le total des charges positives et négatives est calculé avec un pourcentage de la manière suivante (Fetter, 2001) (Eq.6):

$$\Delta\% = \frac{\sum \text{charges positives} - \sum \text{charges négatives}}{\sum \text{charges (total)}} * 100 \quad (6)$$

Les charges sont calculées en [meq/L] à partir des concentrations en [mg/L] (Eq.7). Cette unité [meq/L] est indispensable car elle donne le nombre de charge par unité de volume permettant ainsi de calculer le total des charges. Pour la conversion des [mg/L] en [meq/L] il suffit de procéder de la manière suivante :

$$C_{charge\ x} = \frac{C_x}{M_x} * N_x \quad (7)$$

$C_{charge\ x}$: concentration de charge de l'espèce x en [meq/L]

C_x : concentration de l'espèce x en [mg/L]

M_x : masse molaire de l'espèce x en [mg/mol], N_x : nb de charges pour un ion de l'espèce x

Il faut procéder ainsi pour chaque espèce séparément, la masse molaire et le nombre de charge par espèce étant variable. Une fois la conversion faite, il suffit de sommer l'ensemble des concentrations de charges positives et négatives séparément.

4.3.4 Microbiologie et turbidité

Le bassin versant des sources captées à La Côte-aux-Fées est sujet aux conséquences de l'activité agricole. L'épandage d'engrais naturels comme du purin ou encore du fumier à la surface peut amener à une détérioration des eaux souterraines aux sources. L'intérêt de ces analyses à différents régimes hydrologiques et périodes de l'année permet donc d'émettre des comparaisons et d'observer les conditions qui sont plus ou moins défavorables.

Des analyses microbiologiques standards sur trois types de germes ont été réalisées à 7 points d'eau, à 3 périodes différentes en basses et hautes eaux par le laboratoire privé *fcm-lab sàrl*. Les germes analysés sont ceux proposés par le *guide pratique pour l'échantillonnage des eaux souterraines* de l'OFEV de 2003 (Thierrin et al., 2003), à savoir les germes aérobies mésophiles (ou « germes totaux ») ainsi que deux autres types de bactéries d'origine fécale : *Escherichia coli* et les entérocoques (*Streptocoques faecalis* et *faecium*). Le prélèvement a été réalisé à la source de La Scie, César-Guye, Combe Nord, Centre et Sud et dans l'étang des Sagnes en hiver à la fonte des neiges et au printemps. Ce type de prélèvement est sensible car il faut éviter

tout contact ou apports de bactéries extérieures dans les échantillons. Des bouteilles stérilisées en plastique de 1 litre sont utilisées et l'eau est prélevée au plus proche de la source (Thierrin et al., 2003). L'analyse des échantillons a été confiée à un laboratoire privé en raison du type et de la reconnaissance de la méthode d'analyse. La méthode d'analyse classique et reconnue utilisée pour ce genre de germes est le comptage par mise en culture de germes. Elle consiste à laisser proliférer les germes dans une boîte de pétri et à compter le nombre de colonies bactériennes en unité [UFC⁶/ml] qui s'y sont développées (OPBD, 2016).

L'OPBD de 2016 définit les exigences microbiologiques (Tab.6) relatives à la qualité des eaux pour les germes cités ci-dessus. Remarquons que les exigences pour les bactéries d'origine fécales (*E. coli* et entérocoques) sont très strictes : non-décelé au captage, après le traitement et dans le réseau de distribution. Dans les régions karstiques, la qualité des eaux étant très variables, des exigences strictes ont pour conséquences l'abandon de l'exploitation de sources locales. Le captage de ces sources fait souvent l'objet de zone de protection étendue et les eaux exploitées restent en principe de bonne qualité en période de basses à moyennes eaux. C'est en période de crues que la qualité microbiologique de l'eau peut se détériorer considérablement.

Tableau 6 : Exigences microbiologiques défini par l'ordonnance du département fédéral de l'intérieur (DFI) sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD), 2016.

Exigences microbiologiques relatives à l'eau potable

Ch.	Produit	Paramètres	Valeurs maximales UFC ⁸	Référence analytique Méthode	Remarques
1	Eau potable				
1.1	au captage, non traitée	Germes aérobies mésophiles	100/ml	EN/ISO 6222	Température d'incubation: 30 °C Durée d'incubation: 72 heures
		<i>Escherichia coli</i>	nd ⁹ /100 ml	EN/ISO 9308-1	
		Entérocoques	nd/100 ml	EN/ISO 7899-2	
1.2	après le traitement	Germes aérobies mésophiles	20/ml	EN/ISO 6222	Température d'incubation: 30 °C Durée d'incubation: 72 heures S'applique immédiatement après le traitement de l'eau
		<i>Escherichia coli</i>	nd/100 ml	EN/ISO 9308-1	
		Entérocoques	nd/100 ml	EN/ISO 7899-2	
1.3	dans le réseau de distribution, traitée ou non traitée	Germes aérobies mésophiles	300/ml	EN/ISO 6222	Température d'incubation: 30 °C Durée d'incubation: 72 heures
		<i>Escherichia coli</i>	nd/100 ml	EN/ISO 9308-1	
		Entérocoques	nd/100 ml	EN/ISO 7899-2	

⁷ Nouvelle teneur selon le ch. I al. 2 de l'O du DEFR du 12 mars 2018, en vigueur depuis le 1^{er} mai 2018 (RO 2018 1325).

⁸ UFC: unités formant colonie

⁹ nd: non décelé

La turbidité est une propriété optique de l'eau qui se traduit par sa teneur en particules solides en suspension dans l'eau et elle est mesurée en unité [NTU⁷]. Suivant la teneur, une eau laissera donc plus ou moins bien passer la lumière (trouble). Les matériaux en suspension peuvent être d'origine minérale (argiles, silt, sable) ou organique (animal et plantes microscopiques) (Kale, V., 2016). Une eau dite « turbide » est souvent assimilée à une eau plus

⁶ UFC ou CFU = unités formant des colonies

⁷ NTU = nephelometric turbidity unit, unité de mesure de la turbidité

riche en germes qu'une eau claire. Les pics de turbidité sont observés lors d'évènements de précipitations importantes surtout en milieu karstique. Les particules sont en effet mobilisées et transportent avec elles des germes jouant le rôle de substrat (Dussart-Baptista & al., 2003, Pronk, 2008). La turbidité d'une eau pose aussi problème lors du traitement pour la consommation (Stevenson & Bravo, 2019) car elle limite l'efficacité de la filtration, la chloration et le traitement aux ultra-violetts (UV). Une bonne qualité de l'eau n'est donc parfois pas garantie. La turbidité est déterminée directement sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre de terrain. Il s'agit d'un tuyau fermé dans le fond et gradué sur le côté en [NTU]. Le fond jaune est doté d'une croix noire, le tuyau est rempli progressivement avec l'eau en question jusqu'à que la croix disparaisse en regardant depuis le sommet du tube. Le niveau d'eau indique donc la turbidité en [NTU]. Cette méthode permet d'obtenir un aperçu grossier de ce paramètre. Selon l'OFEV, 2003 (Thierrin & al., 2003), les exigences pour la turbidité dans les eaux souterraines est de 1 NTU, ce qui est faible surtout en contexte karstique (Pronk, 2008).

4.4 Résultats et interprétations du suivi hydrogéologique des sources, étang et ruisseau

4.4.1 Débit des sources et du ruisseau de l'Echelier

Commentaires généraux sur la météorologie

La période de mesure a débuté le 5 octobre 2018 et s'est terminée le 3 juin 2019. L'été et surtout l'automne 2018 se sont révélés particulièrement secs (Fig. 2), ce n'est qu'à partir du mois de décembre que la météo est devenue plus humide. Les premières neiges sont apparues dès le mois de novembre et un important manteau neigeux s'est développé durant les mois d'hiver avec près de 40 cm de neige. Les épisodes de fonte ont eu lieu entre décembre et avril.

Hydrogrammes à haute résolution temporelle des sources de La Scie, César-Guye, sources Mélangées et des trois Combes

Les hydrogrammes sont présentés ci-après (Fig.7-10) avec les mesures de conductivité électrique à haute résolution ou manuelles, la température manuelle ainsi que la pluviométrie et l'épaisseur du manteau neigeux. A noter que les mesures manuelles du débit sont également affichées afin de vérifier l'exactitude des hydrogrammes.

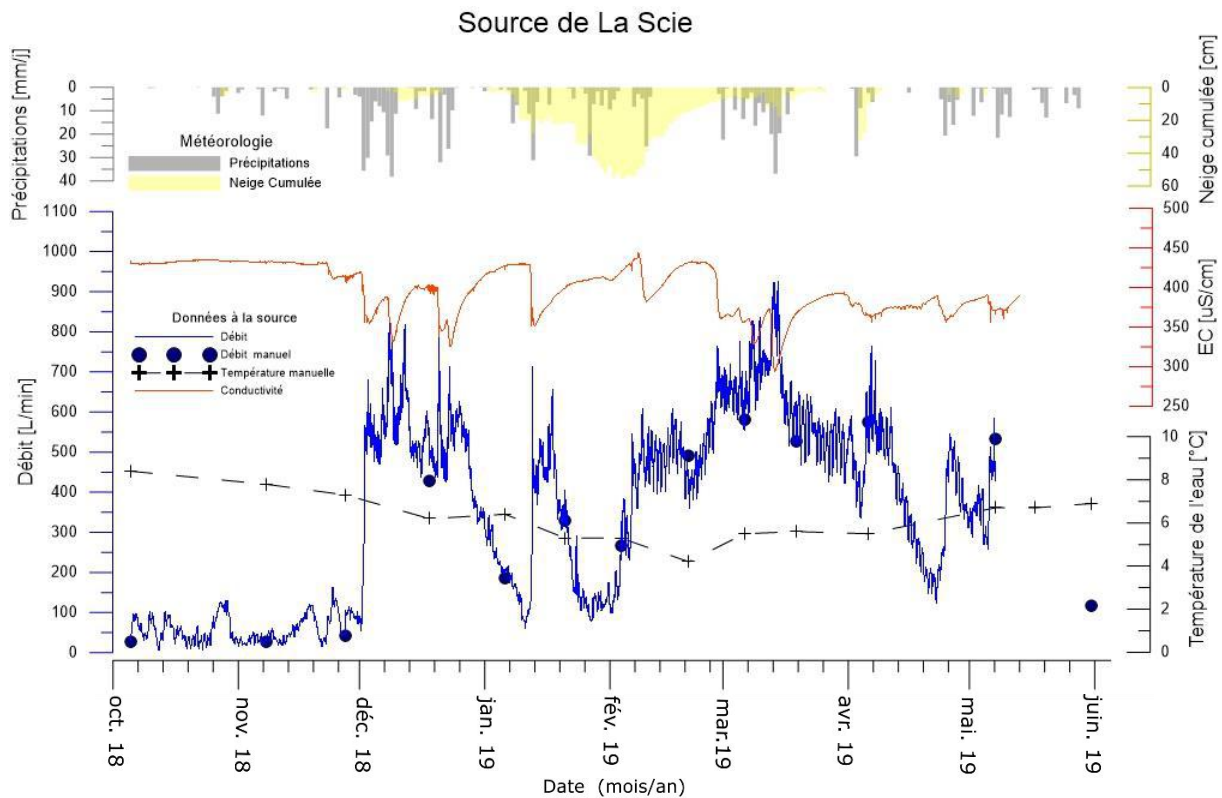


Figure 7: Hydrogramme de la source de La Scie avec conductivité électrique (EC), température, pluviométrie et épaisseur du manteau neigeux.

La courbe de tarage obtenue manuellement permet de réaliser la conversion des données de hauteur d'eau [cm] en débit [L/min] (annexe 5). La relation mathématique (ajustement) qui permet cette conversion pour la source de La Scie est la suivante (Eq.8) :

$$Q = 2.8784h^2 + 6.0515h - 58.139 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.98$$

Q : débit de la source en [L/min], h : hauteur d'eau mesurée dans la chambre en [cm]

R^2 : coefficient de détermination de la courbe approximée sans unité [-]

Un coefficient de détermination de 0.98 est proche de 1 et indique une bonne qualité de la courbe de tarage.

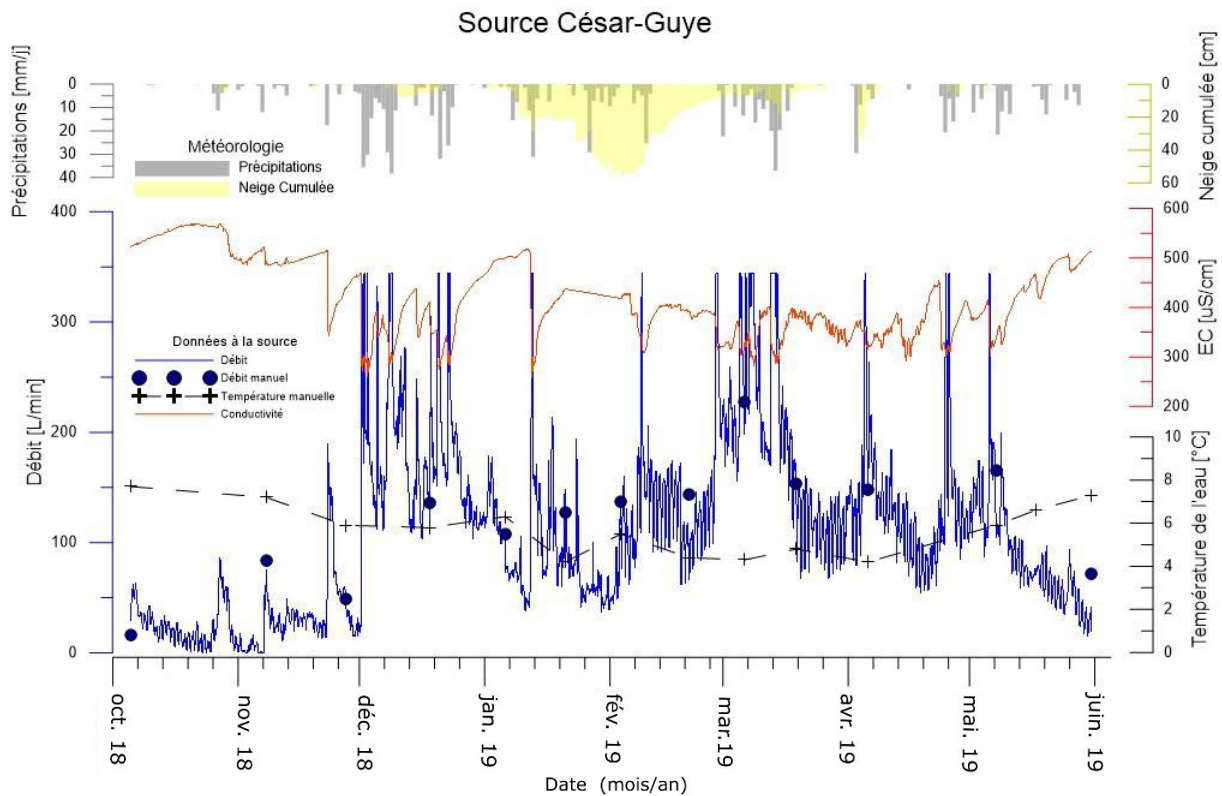


Figure 8 : Hydrogramme de la source César-Guye avec conductivité électrique (EC), température, pluviométrie et épaisseur du manteau neigeux.

Pour la source César-Guye, la courbe de tarage (annexe 5) obtenue manuellement donne la relation mathématique suivante (Eq.9) :

$$Q = 4.6234h^2 - 267.36h - 3861.1 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.94$$

Q : débit de la source en [L/min], h : hauteur d'eau mesurée dans la chambre en [cm]

R^2 : coefficient de détermination de la courbe approximée sans unité [-]

Un coefficient de détermination de 0.94 est proche de 1 mais reste cependant moins bon que celui obtenu pour la courbe de tarage de La Scie. Ceci indique que l'erreur entre les points mesurés manuellement pour l'obtention de la courbe de tarage (annexe 5) et la fonction mathématique est plus grande. En effet, la prise de mesures manuelles du débit à la source César-Guye s'est révélée plus compliquée.

Il faut indiquer que les pics de hauts débits ont été volontairement « plafonnés » à 344 L/min. Ce débit correspond à une hauteur de mesure de 38 cm d'eau dans le captage. Cette limite a été choisie arbitrairement car il semble qu'à partir d'environ 38 cm, le tuyau de sortie n'arrive plus à évacuer suffisamment l'eau. Le niveau d'eau dans la chambre peut grimper alors rapidement et ne correspondra plus à un débit significatif. Le noyage de la chambre (pic court et intense) se fait après chaque bon évènement pluvieux ou de fonte.

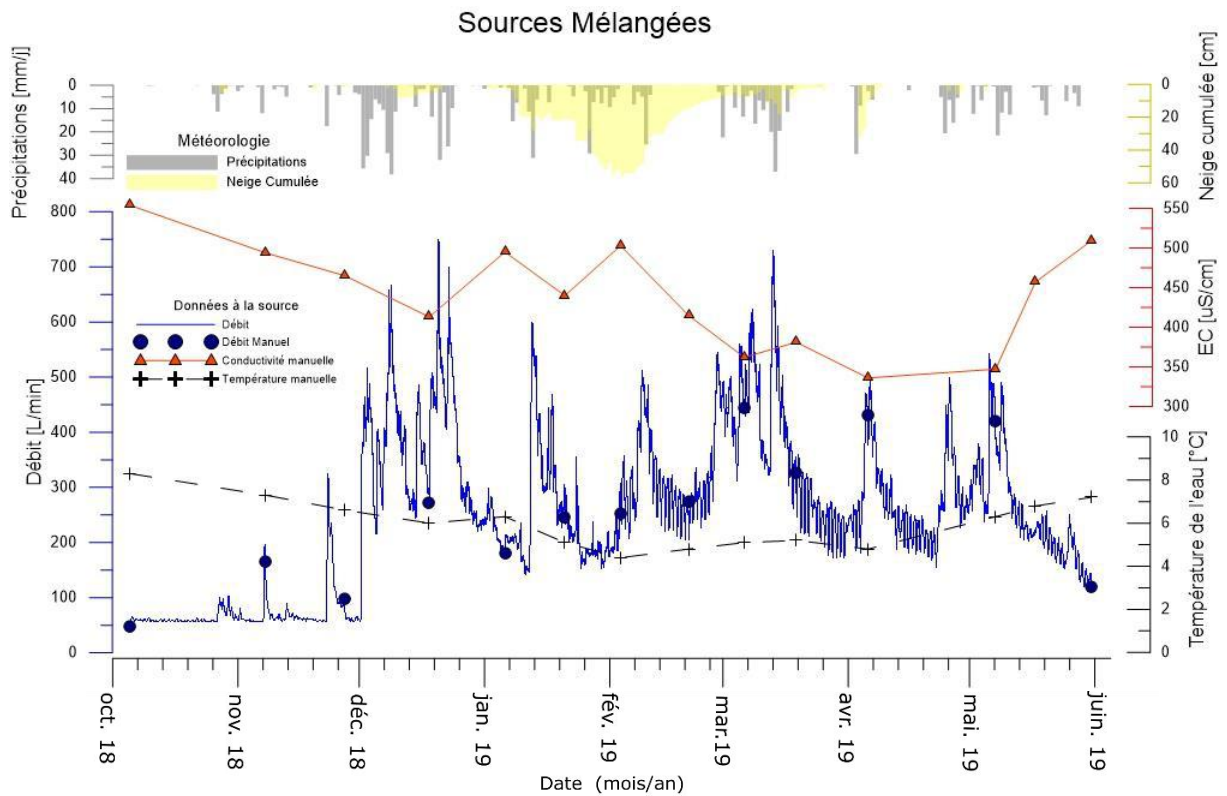


Figure 9: Hydrogramme des sources Mélangées avec conductivité électrique (EC), température, pluviométrie et épaisseur du manteau neigeux.

La courbe de tarage (annexe 5) obtenue manuellement pour les sources Mélangées donne la relation mathématique suivante (Eq.10) :

$$Q = 3.6477h^2 - 194.82h - 2657.2 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.99$$

Q : débit de la source en [L/min], h : hauteur d'eau mesurée dans la chambre en [cm]

R^2 : coefficient de détermination de la courbe approximée sans unité [-]

Un coefficient de détermination de 0.99 est très proche de 1 ce qui indique une bonne qualité de la courbe de tarage.

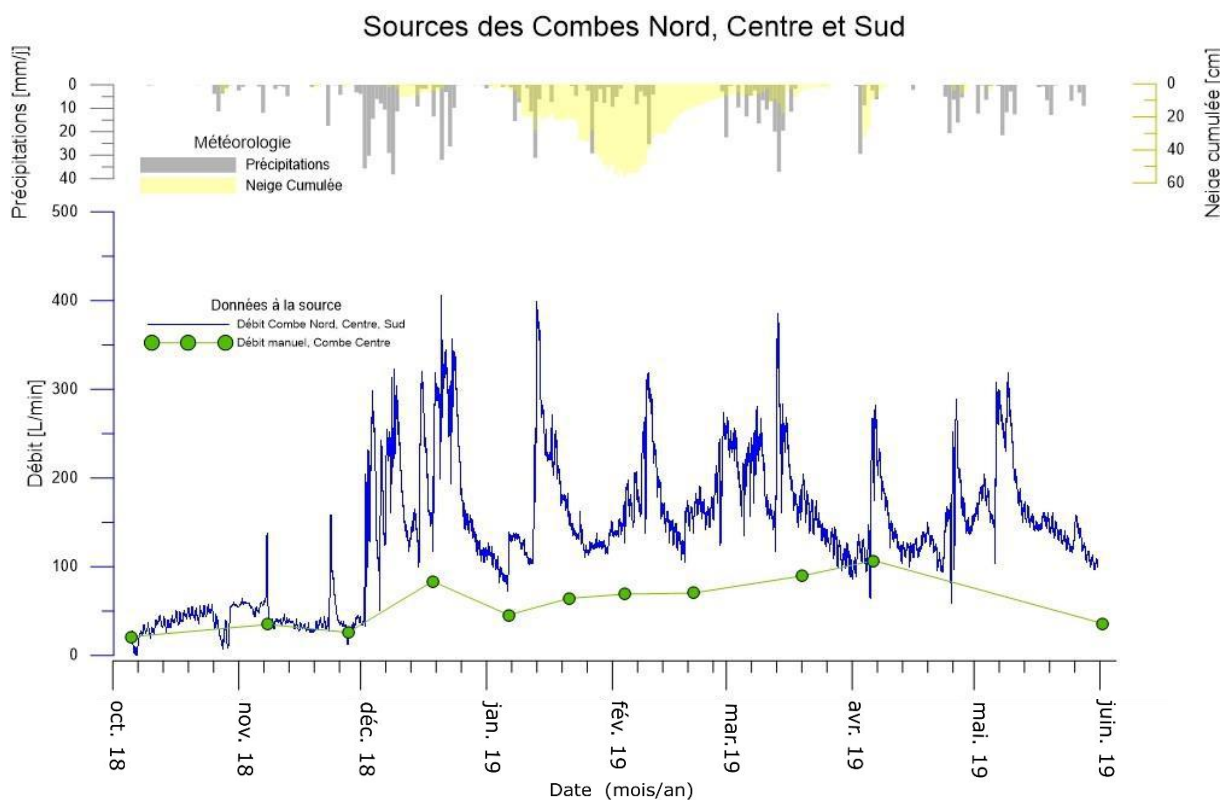


Figure 10: Hydrogramme des trois Combes avec pluviométrie et épaisseur du manteau neigeux.

L'hydrogramme réunissant les débits des trois sources des Combes ne comprend pas le débit du trop-plein de la Combe Sud.

Observations et synthèse des hydrogrammes

La variation du débit est globalement la même pour toutes les sources ou ensemble de sources, les minima ont été mesurés (Tab.7) lors de la période sèche de l'été/automne 2018 où les débits sont assez stables avec quelques variations en raison de faibles précipitations éparses. A partir du mois de décembre, suite aux premières grosses précipitations, les débits augmentent très rapidement en à peine plus d'une journée passant d'un peu plus de 50 L/min à environ 600 L/min pour La Scie, de 30 L/min à environ 350 L/min pour César-Guye, de 60 L/min à près de 540 L/min pour les sources Mélangées et de 35 L/min à près de 220 L/min pour le total des trois Combes. Le débit s'abaisse également rapidement entre la fin décembre et début janvier due au manque de précipitations et en fin janvier en raison du stockage de l'eau sous forme neigeuse. La fonte des neiges est bien marquée entre le début février et fin mars affichant les débits parmi les plus élevées (Tab.7). Les débits moyens pour ces sources varient entre 110 L/min pour la César-Guye et 340 L/min pour la source de La Scie. Cette dernière est de loin la plus productive. Le débit mesuré au trop-plein de la source de la Combe Sud varie entre 0 L/min à 870 L/min (Tab.7). En période de basses à moyennes eaux le trop-plein reste sec (annexe 6), cependant, en période de moyennes à hautes eaux il s'active. La moyenne hypothétique obtenue sur la base des observations est d'environ 200 L/min.

Tableau 7 : Débit minimum, maximum et moyen aux sources avec une incertitude de 10% sur les mesures.

	Basses eaux [L/min] (minimum mesuré)	Hautes eaux [L/min] (maximum mesuré)	Moyen [L/min]
La Scie	30 ± 3	1000 ± 100	340
César-Guye	≈10 ± 1	≈350 ± 35	110
S. Mélangées	55 ± 5	770 ± 77	250
Trois Combes	≈30 ± 3	430 ± 43	140
C. Sud trop-plein	0	870 ± 87	≈200

Chacune des sources ou ensemble de source répondent de la même manière aux conditions météorologiques tant bien en période d'étiage qu'en période de crue. En effet, le temps de réponse du système karstique par rapport aux conditions météorologiques est relativement spontané. Tous les hydrogrammes montrent des réponses très rapides aux événements pluvieux et de fonte des neiges de l'ordre de 1 à 2 jours. L'abaissement du débit est par contre plus lent allant de 1 à 2 semaines. Partout, des différences importantes entre les débits en période d'étiage et de crue de l'ordre de 14 à 35 fois ont été observées.

L'explication à ces observations tient en la nature même du système karstique, c'est-à-dire de la dualité de la porosité (conduits et matrice) (Doerfliger & al., 1999). En effet, en période de crue, les conduits karstiques vont rapidement acheminer vers les sources les eaux entrant dans le système. Au même moment, de l'eau s'infiltré et pénètre dans la matrice rocheuse. En période d'étiage, l'eau stockée dans la matrice durant la crue alimente les conduits karstiques en s'y « déchargeant » peu à peu. Les mesures de la conductivité électrique vont dans ce sens car l'eau qui transite rapidement dans les conduits en période de crue interagit moins longtemps (faible conductivité) avec la roche environnante à l'inverse de l'eau stockée dans la matrice (haute conductivité). La similitude entre les 4 hydrogrammes prouve que toutes les sources sont liées au même système karstique et que ce système est en l'occurrence bien connecté et développé.

Les hydrogrammes montrent une microvariation perceptible sous la forme d'un brouillement de la courbe à petite échelle. Cette variation est régulière sur 24 heures. Cela est dû à la variation journalière de la pression atmosphérique qui agit sur les mesures des sondes pressions. Cette variation peut être de l'ordre de 1 hPa, c'est-à-dire d'environ 1 cm de colonne d'eau et semble être mal corrigée par la sonde barométrique car très faible (précision de la sonde pression ≈ 0.5 cm). Néanmoins, les systèmes de mesures aux sources sont très sensibles, par exemple pour La Scie, une différence de 1 cm correspond, selon la courbe de tarage, à une différence de près de 100 L/min pour la conversion du niveau d'eau en débit.

Source temporaire de la Combe Sud, source du Ruisseau Sud

Ces deux sources naturelles ont été régulièrement suivies manuellement. Des estimations du débit et de leurs activités ont été réalisées (annexe 6).

Tableau 8 : Débit minimum, maximum et moyen estimé à source temporaire de la Combe Sud et de la source du Ruisseau Sud avec une incertitude de 10 % sur les mesures.

	Basses eaux [L/min] (minimum)	Hautes eaux [L/min] (maximum mesuré)	Moyen [L/min]
S. temporaire C. Sud	0	$\approx 3600 \pm 360$	-
S. ruisseau Sud	(0)	600 ± 60	(150)

La source temporaire de la Combe Sud montre une activité très variable passant de 0 L/min en période de basses à moyennes eaux à 3600 L/min en période de hautes eaux (Tab.8). Cette dernière valeur semble tout de même être une estimation excessive mais démontre néanmoins la variation importante observée.

En ce qui concerne la source du Ruisseau Sud, les débits estimés passent d'environ 6 L/min en période de moyennes eaux (annexe 6) à près de 600 L/min en hautes eaux. Malheureusement, aucune observation n'a été faite en période de basses eaux. Cependant, avec le débit estimé en moyennes eaux et sa situation géographique (50 mètres en amont du point bas des sources principales)(Tab.4), un débit hypothétique proche de 0 L/min en période de très basses eaux semble tout à fait raisonnable.

Ruisseau de l'Echelier

Le débit mesuré au ruisseau de l'Echelier à la hauteur de la station de traitement des Combes varie énormément entre la période de basses eaux (été/automne 2018) et la période de hautes eaux (annexe 6) passant de 0 L/min à 5800 L/min avec une moyenne estimée de 1000 L/min (Tab.9). La variation du débit de ce cours d'eau est très conséquente, ce qui est là aussi typique pour un milieu karstique. En période d'étiage le cours d'eau a tendance à se « perdre » dans le sous-sol avant la station des Combes car le débit y est insuffisant.

Tableau 9 : Débit minimum, maximum et moyen estimé au ruisseau de l'Echelier avec une incertitude de 10% sur les mesures.

	Basses eaux [L/min] (minimum)	Hautes eaux [L/min] (maximum mesuré)	Moyen [L/min]
Echelier	0	5800 ± 580	≈ 1000

4.4.2 Paramètres physico-chimiques

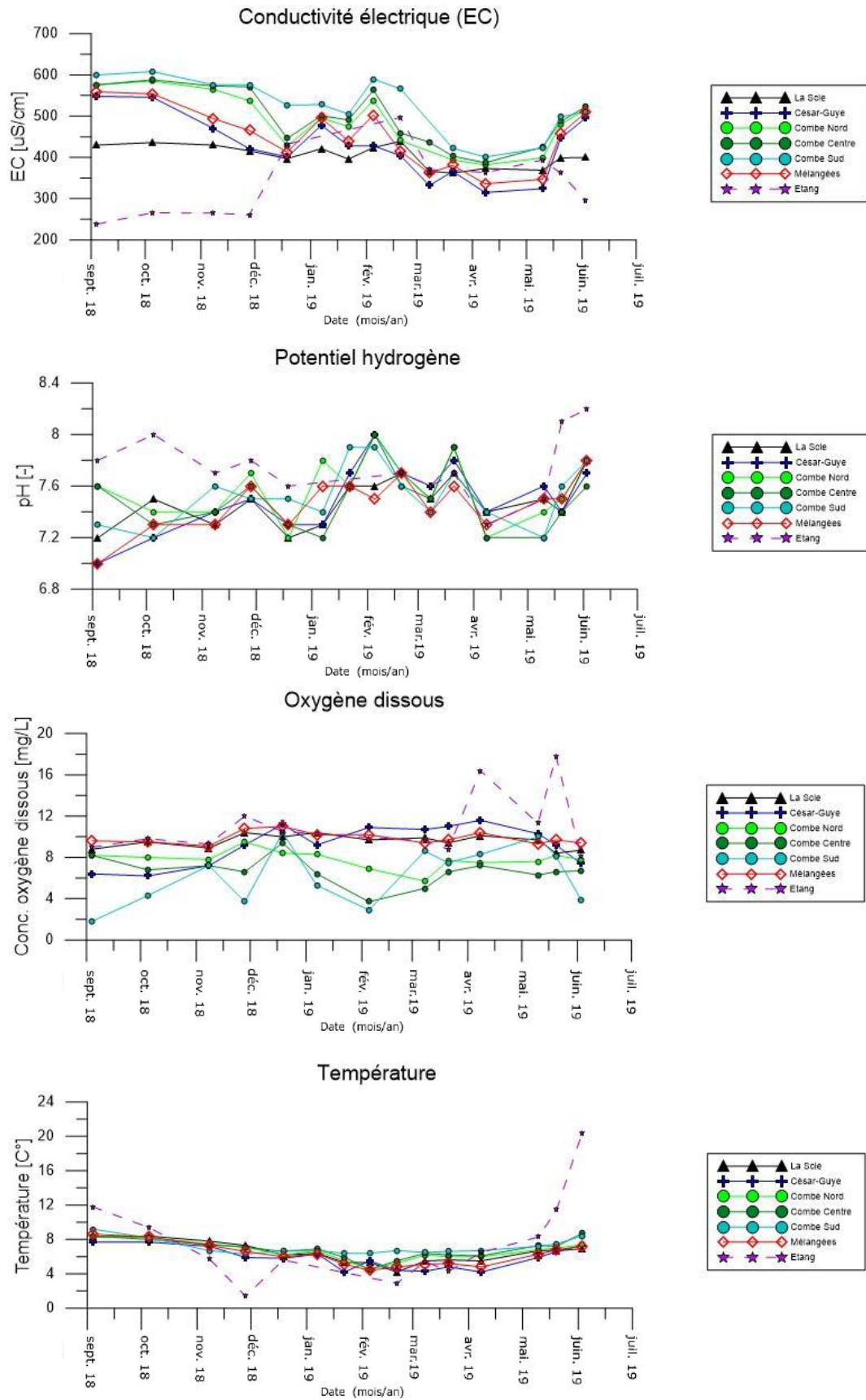


Figure 11: Graphiques montrant la variation de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous et de la température aux sources et à l'étang.

L'ensemble des données physico-chimiques (annexe 6) est résumé dans le tableau récapitulatif (Tab.10) et dans les 4 graphiques ci-dessus (Fig.11).

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des données physico-chimiques manuelles et du débit aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier

Source /objet	Débit moyen ou min à max [L/min]	Conductivité électrique min et max [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Température min et max [$^{\circ}\text{C}$]	pH min et max [-]	Taux d'oxygène min et max [mg/L]	Turbidité (NTU)
La Scie	342	362 à 439	4.2 à 8.4	7.2 à 7.8	.7 à 10.4	<5
S. Mélangées	252	336 à 559	4.4 à 8.6	7.0 à 7.8	9.1 à 11	<5
César-Guye	110	315 à 548	4.2 à 7.7	7.0 à 8.0	6.2 à 11.6	<5
Etang	-	238 à 497	1.4 à 20.3	7.3 à 8.2	8.1 à 17.8	-
Combe Nord	-	382 à 585	4.6 à 8.4	7.2 à 8.0	5.7 à 9.5	<5 à 15
Combe Centre	-	387 à 588	4.5 à 8.7	7.2 à 8.0	3.7 à 9.4	<5 à 7
Combe Sud	227	401 à 608	6.3 à 9.2	7.2 à 7.9	(1.8) à 10.4	<5 à 8
S. temp. C. Sud	0 à 3600	391 à 415	6.3 à 7.1	7.3 à 7.7	7.5 à 10.2	-
Echelier	0 à 8400	354 à 479	5.3 à 10	7.6 à 8.0	10.5 à 11.0	-
S. ruisseau Sud	(0) à 600	340 à 447	6.2 à 6.5	7.3 à 7.6	6.5 à 9.5	-

En ce qui concerne la conductivité électrique, elle se montre très stable durant la période sèche d'automne et beaucoup plus perturbée avec les variations importantes du débit. Elle varie entre 294 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 444 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la Scie, entre 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 570 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour César-Guye et entre 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les sources Mélangées. Les sources des trois Combes montrent des valeurs entre 382 et 608 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et leurs fluctuations sont similaires entre elles. La conductivité électrique des sources Mélangées se comporte de manière mixte par rapport aux sources de César-Guye et des trois Combes. La source de La Scie possède des valeurs généralement moins élevées que les autres sources mais aussi plus stables. Sur les graphiques (Fig.7, 8, 9, 11), la variation de la conductivité électrique est étroitement liée à la variation du débit. En période de basses eaux, elle tend à augmenter alors qu'en période de hautes eaux elle s'abaisse. L'exemple le plus parlant est visible lors de la baisse régulière du débit en fin décembre/début janvier, à ce moment-là, la conductivité électrique monte régulièrement puis elle chute avec la remontée du débit de mi-janvier. Elle est influencée par le temps de résidence que passe l'eau dans le système karstique. Ceci explique pourquoi les conductivités sont plus élevées en basses eaux (p.e. période automne) qu'en hautes eaux (p.e. fonte des neiges mi-février / fin mars). La différence observée entre la source de La Scie et les autres sources (trois Combes et César-Guye) tant au niveau des valeurs que des fluctuations laisse penser que le bassin versant doit être différent avec un temps de résidence plus court dans le système karstique pour La Scie.

L'eau de l'étang des Sagnes est moins conductrice lors de la période de basses eaux avant les premiers gros évènements pluvieux de début décembre. Puis, suite à ces évènements, la

conductivité augmente passant de 260 à 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et redescend en mai/juin avec l'abaissement des débits aux sources. L'étang est alimenté d'une part par les eaux de surfaces et d'autres parts par le trop-plein de la source de la Combe Sud, par la source temporaire de la Combe Sud et par le Ruisseau Sud en hautes eaux. Les connections des eaux souterraines sont peu connues mais pour le moins très probables en raison de l'emplacement de l'étang au cœur des 4 sources (César-Guye, Combe Nord, Centre et Sud). L'explication de ses variations est la suivante : en période de basses eaux, l'étang est essentiellement alimenté par des eaux de surface (pluies) mais en période de hautes eaux, l'influence des eaux souterraines plus chargées devient plus importante. A noter que la fonte des neiges de mi-février/ fin mars a baissé la conductivité électrique en raison de son apport important en eau de surface.

Le potentiel hydrogène de l'eau des sources varie entre 7 et 8, elle est donc légèrement basique. Globalement le pH augmente avec l'arrivée de l'hiver jusqu'à mi-février/ mars puis a tendance à redescendre jusqu'au milieu du printemps et à remonter à la fin du printemps en mai/juin. L'eau de surface avant de s'infiltrer dans l'aquifère est acidifiée par le CO_2 dissous qu'elle contient. En pénétrant dans l'aquifère, l'eau dissout les roches carbonatées. En raison de l'équilibre chimique des carbonates, l'eau atteint alors un pH légèrement basique (Fetter, 2001). L'augmentation hivernale pourrait s'expliquer par l'activité photosynthétique réduite chez les végétaux (acidification des plantes)(Kale, 2016). Le pH de l'eau de l'étang se distingue de l'eau des sources en raison de son contact direct avec l'atmosphère et avec les plantes mais aussi de par l'origine diverses de ses eaux.

Le taux d'oxygène dissous varie entre 4 mg/L et 12 mg/L pour les eaux souterraines et entre environ 9 mg/L et 18 mg/L pour l'étang. Ce taux est similaire et stable pour les trois sources de La Scie, César-Guye et Mélangées. Concernant les eaux des trois Combes, il est plus variable et globalement moins oxygéné par rapport aux autres sources. Cela est vraisemblablement lié à l'activité de ces sources. La source de la Combe Sud, en période de basses eaux, est peu active avec un brassage réduit de l'eau dans le captage, ce qui explique les taux faibles mesurés notamment en automne et en juin. Il est normal de constater que les eaux souterraines sont globalement moins oxygénées que l'eau de l'étang.

Concernant la température, les mesures relevées aux sources sont toutes semblables et varient de la même façon en accord avec les fluctuations saisonnières. Les minima ont été mesurés en février alors que les maxima ont été mesurés en septembre 2018 passant d'une moyenne de 4.5 à 8.5 °C. L'eau de l'étang est en revanche beaucoup plus sensible aux fluctuations saisonnières avec un minimum de 1.4 °C et un maximum de 20.3 °C. Cependant ces mesures sont délicates car l'eau de l'étang a été prélevée à sa surface. Surface, qui par ailleurs, s'est retrouvée gelée durant plusieurs mois.

La turbidité mesurée manuellement s'est toujours révélée <5 NTU pour les sources de La Scie, César-Guye et sources Mélangées (Tab.10). A la source de la Combe Nord, des valeurs de

turbidité entre 5-15 NTU ont été mesurées plusieurs fois. La source de la Combe Centre et de la Combe Sud n'ont dépassé qu'une seule fois les 5 NTU avec respectivement 7 NTU et 8 NTU (Tab.10).

Les mesures de conductivité électrique, pH, oxygène et température au ruisseau de l'Echelier, à la source temporaire de la Combe Sud et à la source du Ruisseau Sud n'ont été réalisées que quelques fois à titre indicatif. Les données à la source temporaire de la Combe Sud sont très similaires aux données de la Combe Sud en raison de leur proximité, l'eau est identique et s'évacue en période de hautes eaux à l'aide de ce « trop-plein » naturel. Les données à la source du Ruisseau Sud ne révèlent pas de grandes surprises avec des valeurs restant dans la moyenne des autres sources. Les mesures au ruisseau de l'Echelier révèlent une conductivité électrique et un pH dans la moyenne des sources et de l'Étang. La température et le taux d'oxygène sont tout même plus élevés qu'aux sources en raison du brassage et de son contact ouvert avec l'atmosphère.

4.4.3 Hydrochimie

Les résultats des analyses hydrochimiques (annexe 7) des sources et de l'étang sont présentés à l'aide de 3 types de graphiques, le premier est un graphique de Piper (Fig.12), le second est un graphique de Schoeller (Fig.13) et le troisième type présente la variation temporelle (Fig.14) de chacune des espèces mesurées. Des balances ioniques ont été réalisées afin de vérifier la qualité des mesures, leurs erreurs (annexe 7) a toujours été < 5% ce qui est tout fait acceptable (Fetter, 2001).

Classification des eaux souterraines - Diagramme de Piper

La représentation des données hydrochimiques (ions majeurs) dans le diagramme trinéaire de Piper (Fig.12) permet de définir un hydrofaciès (Fetter, 2001), autrement dit une classification générale des eaux analysées. Cette classification est établie à partir des concentrations relatives en ions majeurs de l'eau (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et CO_3^{2-}). Pour une question de lisibilité du diagramme, seules les analyses des eaux prélevées le 5 octobre 2018, le 21 mars 2019 et le 20 mai 2019 sont affichées. Ces trois dates permettent néanmoins d'observer si des variations hydrochimiques saisonnières existent.

Selon le diagramme (Fig. 12), tous les points sont regroupés au même endroit en montrant peu d'écart. Cela est révélateur de la stabilité des proportions en ions majeurs dans les eaux des sources et de l'étang. La classification en ces points indique une eau de type calcique et bicarbonaté (Fetter, 2001). Elle correspond tout à fait à l'environnement calcaire de Pierre Jaune de Neuchâtel dans lequel évoluent les eaux souterraines analysées.

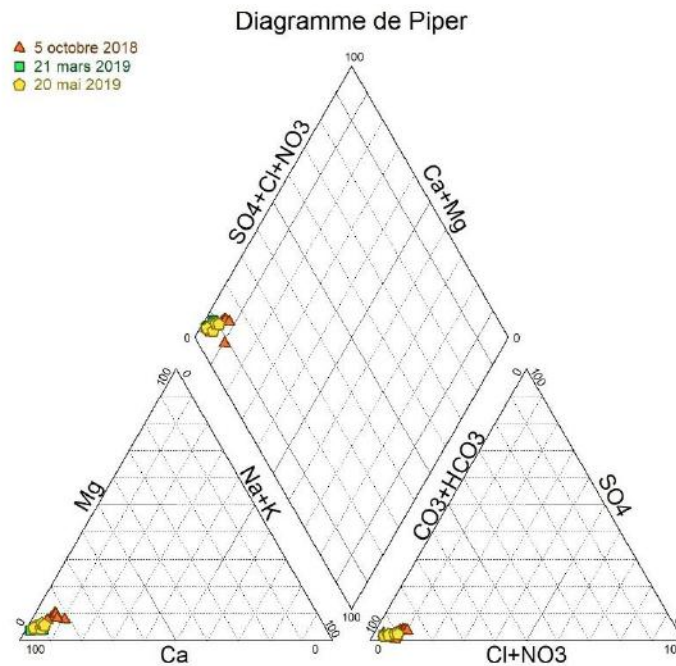


Figure 12: Diagramme de piper pour les analyses à trois périodes distinctes, 5 octobre 2018, 21 mars 2019 et 20 mai 2019.

Comparaison des concentrations en ions majeurs – Diagramme de Schoeller

Ce type de diagramme permet de comparer les concentrations en [mg/L] et [meq/L] des ions d'intérêt entre eux et entre les différents points d'observation. Les trois diagrammes ci-dessus présentent les concentrations mesurées aux sources et à l'étang à trois moments distincts : le 5 octobre 2018, le 21 mars 2019 et le 20 mai 2019.

Les trois diagrammes de Schoeller montrent des résultats d'analyses assez similaires entre les sources et les saisons. De manière générale sur les trois diagrammes (Fig. 13), les courbes sont très regroupées pour ce qui est du Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CO_3^{2-} et NO_3^- et indique une certaine homogénéité hydrochimique entre les sources elles-mêmes et l'étang au travers les saisons. Néanmoins, sur le diagramme du 5 octobre, les courbes de La Scie et de l'étang s'écartent tout de même du reste des sources avec des concentrations plus faibles. Concernant les ions Na^+ , K^+ et Cl^- les différences entre les sources est plus marquée, elles restent néanmoins régulières entre les saisons. Les différences relatives entre les ions mesurés restent semblables dans le temps, cependant les concentrations changent.

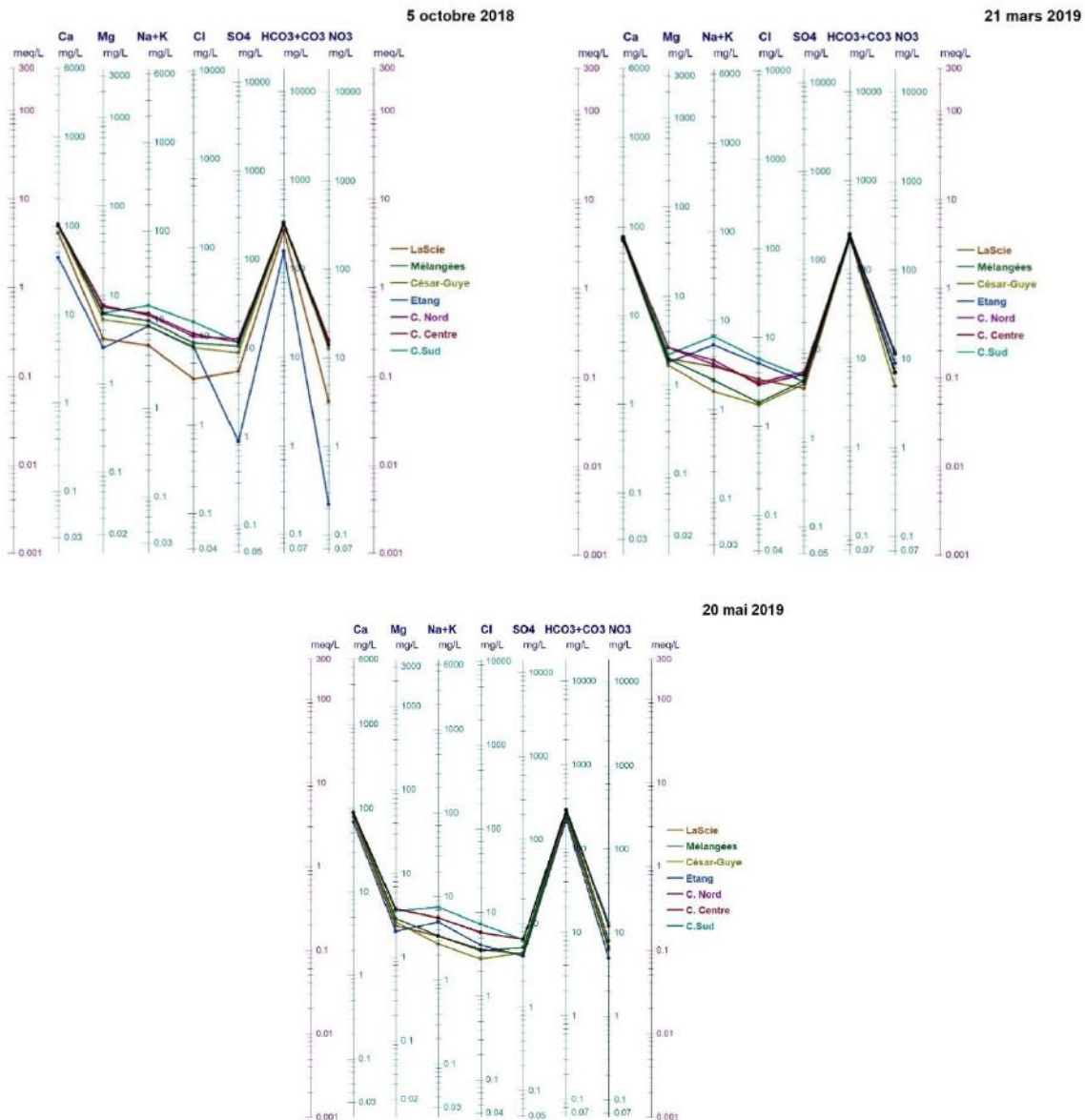


Figure 13: Diagramme de Schoeller du 5 octobre 2018, 21 mars 2019 et du 20 mai 2019.

Variations temporelles des concentrations ioniques

Des échantillonnages de l'eau aux sources et à l'étang ont été réalisés tout au long de l'étude du 5 octobre 2018 au 20 mai 2019 (Fig. 14).

Carbonate et calcium (HCO_3^- , Ca^{2+})

Les espèces dominantes pour toutes les sources sont clairement le carbonate HCO_3^- et le calcium Ca^{2+} (Fig. 14). Le carbonate ne fluctue que légèrement dans le temps avec un creux se dessinant durant les mois d'hiver et de printemps. Les sources montrent toutes des courbes similaires avec des concentrations variant entre 225 mg/L à 330 mg/L sauf exception de la source de La Scie plus stable et moins riche en carbonate (environ 250 mg/L). La concentration en calcium varie de la même manière que le carbonate mais entre 75 et 105 mg/L. Ces

variations semblent correspondre avec les variations du débit et par conséquent avec le temps de résidence de l'eau.

En ce qui concerne le carbonate dans l'eau de l'étang, celui-ci augmente passablement durant les mois froids (novembre à avril) puis s'abaisse et se stabilise avec le printemps (à partir d'avril). Le calcium varie de 45 mg/L à 85 mg/L avec une légère remontée pendant les mois froids suivie d'un abaissement.

Anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , Br^-)

Le chlorure **Cl** est détecté dans toutes les sources et dans l'étang. Sa concentration varie entre 2 mg/L et 25 mg/L. La concentration maximale semble élevée, des pics distincts de concentrations sont observables à la Combe Sud et à l'étang notamment.

Le sulfate **SO₄²⁻** montre une concentration qui varie de la même manière à toutes les sources en s'abaissant à partir du mois de novembre/décembre et remonte légèrement à la fin du printemps. Sa concentration varie entre 4 mg/L et 13 mg/L pour les sources et entre 0.9 mg/L à 6 mg/L pour l'étang.

Le nitrate **NO₃⁻** montre une concentration qui varie de manière indépendante entre les sources et l'étang. Elle varie entre 3 mg/L et 17 mg/L pour les sources. A titre indicatif, le taux le plus bas a été mesuré à la source de La Scie alors que le taux le plus élevé a été mesuré à la source de la Combe Sud. En ce qui concerne l'étang, la concentration varie entre <1 mg/L et 16 mg/L.

Le phosphate **PO₄³⁻** a été quelques fois détecté avec des concentrations <1 mg/L. Le brome **Br** et le nitrite **NO₂⁻** ont été détectés quelques rares fois avec des concentrations très basses <0.3 mg/L.

Cations (Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+)

Le magnésium **Mg²⁺** montre une concentration qui varie de la même manière entre toutes les sources de 2 mg/L à 7 mg/L. Pour l'étang la concentration varie entre 2 mg/L à 3 mg/L.

Le potassium **K⁺** montre une concentration qui varie de manière similaire entre toutes les sources de < 1 mg/L à 10 mg/L avec quelques exceptions pour la Combe Sud. Pour l'étang la concentration varie entre 2 mg/L à 6 mg/L.

Le sodium **Na⁺** a été détecté dans toutes les sources et l'étang. Sa concentration varie de 1 mg/L à 16 mg/L pour les sources et de 3 mg/L à 9 mg/L pour l'étang. La concentration maximale semble élevée, des pics distincts de concentrations sont observables à la Combe Sud et à l'étang et sont corrélés avec les pics de chlorure. Une contamination au sel de cuisine lors de la prise d'échantillons en est vraisemblablement la cause (jaugeage au sel).

L'ammonium NH_4^+ a été détecté fréquemment dans de nombreuses sources avec des concentrations allant de 0 mg/L à 2 mg/L. Le taux le plus élevé a été mesuré à la source de la Combe Sud.

Les résultats des analyses hydrochimiques de la source temporaire de la Combe Sud et du ruisseau de l'Echelier (annexe 7) ne sont pas présentés sur ces graphiques car ils n'ont été prélevés qu'une seule fois le 21 mars 2019. Les résultats hydrochimiques à la source temporaire de la Combe Sud sont très proches des résultats de la Combe Sud. Cela est cohérent en raison de la proximité des deux sources. Et les résultats du ruisseau de l'Echelier à la station des Combes sont également proches des résultats de l'étang à la même date, cela est cohérent car l'étang en période de hautes eaux alimente en partie le ruisseau.

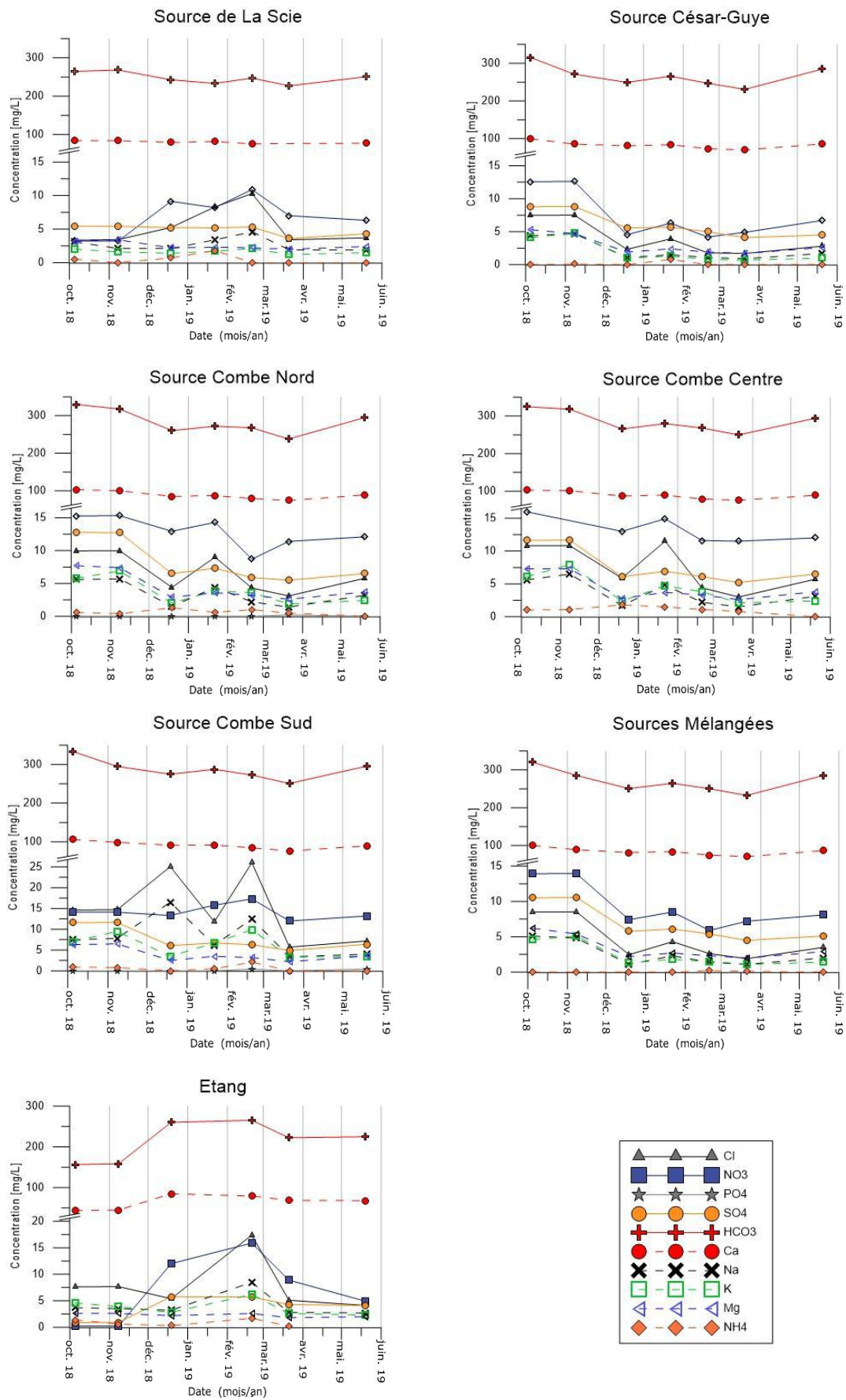


Figure 14: Variation temporelle de la concentration ionique aux sources et à l'étang.

Qualité hydrochimique des eaux souterraines et de surface

Comme les mesures de la conductivité électrique de l'eau l'indiquent, les eaux souterraines sont plus minéralisées en période d'étiage qu'en période de crue. Cela est tout à fait visible sur les graphiques des variations temporelles des espèces ioniques.

L'eau est riche en carbonate et calcium en raison de sa circulation au travers les couches rocheuses de type calcaire de la Pierre Jaune de Neuchâtel. La présence de sulfate, de magnésium en de faibles proportions s'explique aussi par la géologie traversée, ces espèces sont communes dans les roches carbonatées. Le potassium et le sodium proviennent vraisemblablement des argiles des bancs marneux traversant la Pierre Jaune de Neuchâtel ou encore des Marnes d'Hauterive (Rigassi & Jaccard, 1995). Cependant, les pics excessifs du sodium corrélés avec le chlorure est bien d'origine anthropogénique due à une erreur de manipulation lors des échantillonnages. Le chlorure peut aussi provenir en partie de l'activité agricole en amont des sources (Matthey, 1994).

La présence de nitrates s'explique d'une part naturellement par la minéralisation de la matière organique azotée et d'autre part en raison de l'épandage d'engrais fermier en amont des sources. La concentration naturelle ne dépasse pas 5 mg/L or, les valeurs mesurées aux sources dépassent régulièrement cette valeur (Gilli & al., 2016). Néanmoins, les valeurs maximales mesurées restent bien inférieures au seuil de 40 mg/L autorisé pour l'eau potable selon l'OPBD de 2016. Le taux en ammonium dépasse plusieurs fois la valeur maximale autorisée pour l'eau potable de type réduit (0.5 mg/L) et oxydé (0.1 mg/L) selon l'OPBD de 2016. La source de La Scie et de César-Guye n'ont dépassé qu'une fois la valeur limite de type réduit avec respectivement 1.8 mg/L et 0.8 mg/L (annexe 7). Les sources de la Combe Nord, Centre et Sud ont dépassé plusieurs fois cette limite. Globalement, la meilleure qualité hydrochimique des eaux des sources au point de vue des nitrates et de l'ammonium (moyenne) sont la source de La Scie et de César-Guye (Tab.11). Alors qu'une qualité médiocre, surtout au point de vue de l'ammonium est visible aux trois Combes (Tab.11).

Tableau 11 : Moyenne des nitrates et ammonium aux sources avec seuil légal (selon OPBD de 2016) et incertitude associée à chaque mesure.

	Seuil	Erreur +/-	La Scie	César-Guye	S. Mélangées	C. Nord	C. Centre	C. Sud
NO₃⁻ [mg/L]	40	< 0.1	6.8	7.4	9.3	12.9	13.5	14.2
NH₄⁺ [mg/L]	0.5 (réduit) et 0.1 (oxydé)	0.5	0.4	0.1	0.0	0.6	1.1	0.6

4.4.4 Microbiologie et turbidité

Les résultats des analyses microbiologiques pour les bactéries *Escherichia Coli*, les entérocoques et les germes aérobies mésophiles (GAM) sont présentés sous la forme d'un tableau (Tab.12) en même temps que les exigences légales pour l'eau potable de l'OPBD de 2016. Les rapports d'analyses sont disponibles en annexe (annexe 8).

Les valeurs de concentrations des bactéries et germes ont été classées en 4 catégories définies arbitrairement à l'aide de couleurs. Les valeurs en vert répondent aux exigences légales de l'OPBD, les valeurs en jaune indiquent une eau faiblement détériorée, les valeurs en orange indiquent une eau moyennement détériorée et les valeurs en rouge indiquent une eau fortement détériorée.

L'incertitude des mesures des analyses microbiologiques standards dépend de la répétabilité. Cette dernière est considérée comme étant égal à $0.25 \log_{10} N$. N est le nombre de microorganismes mesurés. Ainsi la limite inférieure est de $10^{\log_{10} N - 0.25}$ et la limite supérieure est de $10^{\log_{10} N + 0.25}$. Par exemple, avec une mesure de 100 microorganismes ($=10^2$), la limite inférieure sera de $10^{1.75}$ ($=56$) et la limite supérieure de $10^{2.25}$ ($=178$). L'incertitude n'est donc pas régulière et varie avec le nombre de microorganismes mesurés dans un échantillon.

Globalement, la source de La Scie a la meilleure qualité d'eau du point de vue microbiologique, quasiment toutes les valeurs répondent aux exigences de l'OPBD ou les dépassent légèrement (GAM et *E. Coli*). L'eau à la source César-Guye est de plutôt bonne qualité montrant des valeurs d'eau non-détériorée et surtout faiblement détériorée. Les sources de la Combe Nord, Centre et Sud excèdent largement les exigences de l'OPBD à plusieurs périodes de mesures et pour les trois paramètres microbiologiques mesurés. L'eau de la Combe Sud obtient d'ailleurs le plus mauvais score (>3000 UFC/100 ml) avec de nombreuses valeurs d'eau fortement détériorées. Parmi ces trois sources, une seule valeur répond aux exigences de l'OPBD. L'eau de l'étang obtient un score très médiocre, ce qui n'est pas étonnant pour une eau de surface stagnante mais qui reste tout de même meilleure qualité par rapport à l'eau de la Combe Sud.

Tableau 12 : Résultats des analyses microbiologiques aux sources et à l'étang.

Exigences microbiologiques pour l'eau potable au captage non traité, selon l'ordonnance sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD)


Paramètre	Valeurs maximales (UFC)	Référence analytique/ Méthode
Germes aérobies mésophiles (GAM)	100/ml ou 10/0.1ml	EN/ISO 6222
<i>Escherichia Coli</i> (E. Coli)	nd/100ml	EN/ISO 9308-1
Entérocoques	nd/100ml	EN/ISO 7899-2


UFC : Unité formant des colonies
nd : non-décelé


Résultats des analyses

Lieu	Code	Paramètre	Résultat par date de prélèvement			Unité
			20.02.2019	10.05.2019	03.06.2019	
La Scie	CAF1	GAM	147	29	20	[UFC/ml]
			16	5	6	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	2	1	nd	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	nd	nd	nd	[UFC/100 ml]
Sources Mélangées	CAF2	GAM	>300	138	111	[UFC/ml]
			76	15	15	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	80	9	7	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	14	nd	1	[UFC/100 ml]
César-Guye	CAF4	GAM	95	206	134	[UFC/ml]
			9	29	13	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	1	7	7	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	1	2	nd	[UFC/100 ml]
Etang	CAF5	GAM	>300	233	>300	[UFC/ml]
			162	28	85	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	77	22	10	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	21	2	76	[UFC/100 ml]
Combe Nord	CAF6	GAM	>300	192	118	[UFC/ml]
			134	21	18	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	>150	32	3	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	42	5	nd	[UFC/100 ml]
Combe Centre	CAF7	GAM	>300	173	112	[UFC/ml]
			216	20	13	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	>150	29	3	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	42	1	1	[UFC/100 ml]
Combe Sud	CAF8	GAM	>300	>300	>300	[UFC/ml]
			>300	127	87	[UFC/0.1 ml]
		<i>E. Coli</i>	>150	143	14	[UFC/100 ml]
		Entérocoques	>150	53	13	[UFC/100 ml]

 Valeurs répondant aux exigences : **non détérioré**

 Valeurs excédant les exigences : **faiblement détérioré**
100 à 300 [UFC/ml] pour GAM, 1 à 10 [UFC/100 ml] pour E.Coli & Entérocoques (seuil défini arbitrairement)

 Valeurs excédant les exigences : **moyennement détérioré**
300 à 1000 [UFC/ml] pour GAM, 10 à 100 [UFC/100 ml] pour E.Coli & Entérocoques (seuil défini arbitrairement)

 Valeurs excédant les exigences : **fortement détérioré**
> 1000 [UFC/ml] pour GAM, > 100 [UFC/100 ml] pour E.Coli & Entérocoques (seuil défini arbitrairement)

Informations complémentaires :

date	météorologie	température air [°C]	régime hydrologique
20.02.2019	sec/ manteau neigeux	-8 à +8	moyennes à hautes eaux
10.05.2019	pluvieux	+6 à +14	moyennes à hautes eaux
03.06.2019	sec à faibles pluies	+6 à +23	basses eaux

Temporellement, mis à part pour l'eau de l'étang, la meilleure qualité d'eau en terme de microbiologie est visible dans les prélèvements du 3 juin 2019. La qualité entre les prélèvements du 10 mai 2019 et 3 juin 2019 sont assez semblables. A l'inverse, la plus mauvaise qualité pour pratiquement l'ensemble des sources sauf César-Guye est visible dans les prélèvements du 20 février 2019. La variation de la qualité microbiologique de l'eau est explicable de par le régime hydrologique des sources, l'activité agricole en amont et l'activité de la végétation. La qualité de l'eau semble être meilleure en basses eaux (3 juin) qu'en hautes eaux à la fonte des neiges pour le 20 février et suite à des événements pluvieux pour le 10 mai. L'épandage d'engrais se fait en général au printemps après la fonte des neiges et lors de périodes pluvieuses. Les taux les plus élevés ont été mesurés le 20 février alors qu'ils étaient plutôt attendus pour le 10 mai après l'épandage d'engrais (après la fonte des neiges) dont les dates ne sont pas connues. Cette différence est peut-être explicable par l'activité végétale qui reste en dormance durant les mois d'hiver et se réveille avec l'arrivée du printemps. Cette activité n'est pas négligeable sur la qualité des eaux souterraines (Thueller, 2014). Il y aurait donc une filtration plus importante par les végétaux au printemps.

Les sources des trois Combes (Combe Nord, Centre et Sud) sont plus touchées que les autres sources. Ces captages, à l'inverse des deux autres sources, récupèrent l'eau dans des drains horizontaux, il n'est pas impossible que ces drains captent également de l'eau provenant de la surface. Si tel est le cas, ces sources seraient beaucoup plus vulnérables qu'imaginer au départ. Les sources de la Combe Nord et Centre sont également proches de prairies exploitées et de l'étang. Le développement d'algues, l'étanchéité du couvercle en fonte, la présence de fissures et une eau quasiment stagnante en basses eaux (Combe Sud et Nord) témoignent de la vétusté de ces captages. Le brassage de l'eau y est réduit par rapport aux infrastructures de La Scie et de la César-Guye (exfiltration depuis le fond) due à la configuration en drains avec un fond constamment fermé et noyé.

La source de La Scie se situe au pied du plateau de La Maison Neuve. La qualité supérieure de son eau pourrait être expliquée par une origine différente par rapport aux autres sources (César-Guye, Combe Nord, Centre et Sud). En effet, le plateau de la Maison Neuve, comparée au plateau des Bourquins, comprend une surface forestière plus importante et par conséquent, une surface agricole plus faible. Cette configuration influence directement la protection naturelle des eaux souterraines (Thueller, 2014).

5 Epaisseur de la couverture protectrice – campagne géophysique

5.1 Description et but de la campagne géophysique

Selon la carte géologique (Rigassi & Jaccard, 1995), la moraine jurassienne est indiquée comme absente sur les lambeaux de Pierre Jaune de Neuchâtel au plateau des Bourquins et à La Maison Neuve. Le but de la campagne géophysique électrique (electrical resistivity tomography : ERT) est alors de déterminer avec une bonne résolution la répartition spatiale et l'épaisseur de la couverture protectrice composée de la couverture pédologique et de la moraine jurassienne.

La campagne géoélectrique (traînée électrique et sondage vertical) menée par Matthey, B. (1994) lors de l'établissement des zones de protection ne donne qu'une idée de l'épaisseur de la couverture protectrice. La profondeur d'investigation de la trainée électrique employée pour la cartographie des résistivités n'atteint que 80 cm en donnant une valeur de résistivité apparente et non une valeur de résistivité vraie. La méthode du sondage vertical (VES) a aussi été employée et permet, quant à elle, de déterminer la résistivité vraie et l'épaisseur des couches cependant, elle n'a été utilisée qu'à 4 endroits.

La méthode automatisée de la tomographie de résistivité électrique (ERT) utilisée lors de notre campagne permet de connaître la répartition des résistivités vraies dans le sous-sol jusqu'à une profondeur de plus de 10 m via des pseudo-sections (image 2D) et ainsi de déterminer la profondeur exacte des dépôts du Quaternaire. De plus, les données géologiques des 3 sondages réalisés par Preisig, G. en 2017 et de la fosse pour l'essai de traçage complètent les observations des tomographies. Le but secondaire de cette campagne est de déterminer la présence de fractures, de phénomènes de karstification et éventuellement l'épaisseur de la Pierre Jaune de Neuchâtel.

5.2 Méthodes d'application géoélectrique – tomographie de résistivité électrique

5.2.1 Théorie et base physique de la géoélectrique

L'épaisseur et la répartition de la couverture protectrice (moraine jurassienne + couverture pédologique) sur le plateau des Bourquins à La Côte-aux-Fées ont été déterminées à l'aide de la géophysique et plus précisément à l'aide de la géoélectrique permettant d'observer la résistivité électrique apparente du sous-sol à un point donné. La résistivité électrique d'un matériau exprime la capacité de ce dernier à s'opposer au passage du courant électrique. Elle n'est pas directement mesurée mais calculée à partir de la résistance qui elle est mesurée dans le sous-sol. La relation physique entre les deux est décrite par la loi d'Ohm (Eq.11) :

$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{L}{S} \quad (11)$$

R : résistance du milieu traversé par le courant en ohm [Ω]

U : tension électrique en [V], I : intensité du courant en [A]

ρ : résistivité en [Ωm], L : longueur du milieu traversé en [m], S : surface de la section transversale en [m^2]

La résistivité apparente du milieu traversé étant l'unique inconnue, elle est calculée de la manière suivante en tenant compte d'un facteur géométrique (Eq.12) :

$$\rho_a = \frac{S}{L} * \frac{U}{I} = K * R_a \quad (12)$$

R_a : résistance apparente en [Ω], ρ_a : résistivité apparente en [Ωm]

L : longueur en [m], S : surface de la section transversale en [m^2]

U : tension électrique en [V], I : intensité du courant en [A]

K : facteur géométrique dépendant du dispositif d'investigation en [m]

La résistivité mesurée du sous-sol est une résistivité dite « apparente » du fait de l'hétérogénéité du sous-sol en termes de lithologie, porosité et teneur en eau. En effet, la valeur de cette résistivité exprime un mélange des résistivités vraies propres à chaque couche ou hétérogénéité traversée. Les résistivités vraies et l'épaisseur des couches peuvent être retrouvées grâce à la méthode de l'inversion qui est décrite plus loin dans ce chapitre.

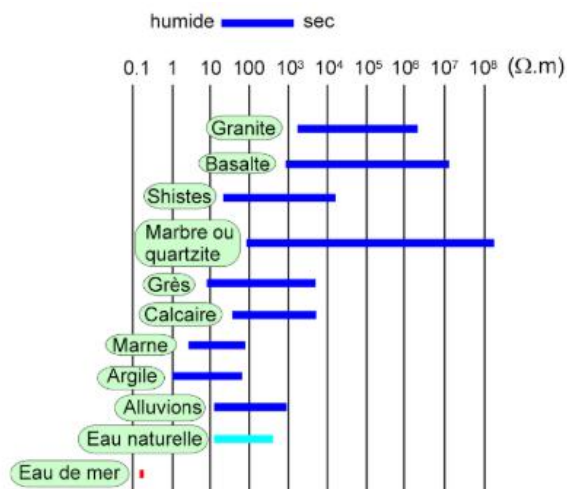


Figure 15 : Résistivité des différents matériaux géologiques et de l'eau. Tiré du livre "Géophysique appliquée pour tous 1 : méthodes électriques, Volume 1" de Florsch, N., Muhlach, F.

Les matériaux argileux et mouillés (Fig.15) ont tendance à bien conduire le courant en raison de la grande mobilité des charges électriques, par conséquent des résistivités apparentes faibles vont y être mesurées. Dans le cas de matériaux meubles grossiers tels que des graviers ou de roches saines (calcaire, granite, basalte etc.) et sèches, la mobilité des charges est réduite. Par conséquent, les résistivités apparentes y seront élevées. Des cas plus complexes existent comme les roches altérées, fissurés ou karstifiées. Le karst peut montrer de nombreuses hétérogénéités rendant l'interprétation des données délicate due à la présence d'un épikarst développé, de cavités et de fissures remplies de matériaux argileux, de vide ou d'eau. Néanmoins, la méthode de l'ERT (tomographie de résistivité électrique) est facile à mettre en œuvre et permet de couvrir une large zone. Dans notre cas, un contraste visible entre la moraine jurassienne à composante argileuse et le calcaire de l'Hauterivien supérieur doit être perceptible.

5.2.2 Application et dispositif de mesure

La mesure de la résistance s'effectue à l'aide de quatre électrodes métalliques plantées dans le sol et d'un appareil de mesure appelé résistivimètre. Ces électrodes sont disposées le long d'une ligne droite imaginaire, deux d'entre elles servent à l'envoi du courant électrique (nommée A et B) et les deux autres servent à sa mesure (nommée M et N). Il existe plusieurs dispositions des électrodes telles que la disposition Wenner, Schlumberger et dipôle-dipôle (Fig. 16). Selon le type d'investigation (observation de la variation verticale ou horizontale), certaines dispositions sont privilégiées. Dans notre cas, un dispositif mixte Wenner-Schlumberger a été utilisé.

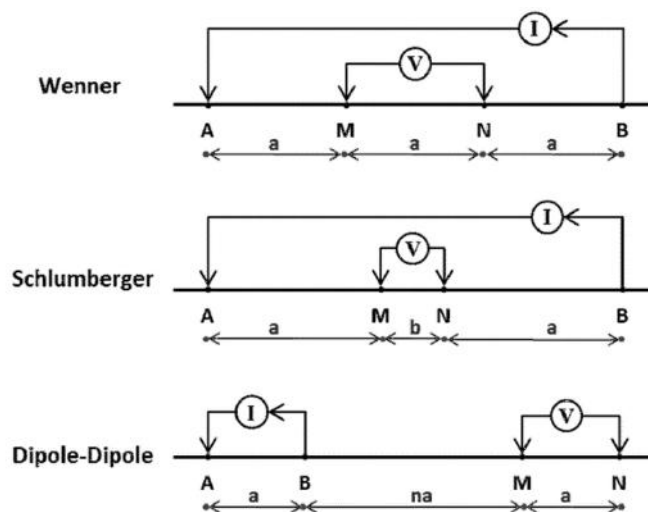


Figure 16 : Dispositif Wenner, Schlumberger et Dipôle-Dipôle, tiré de Garofalo, F. (2014).

La profondeur maximum d'investigation dépend de l'écartement des électrodes. Dans le dispositif Wenner-Schlumberger, la profondeur d'investigation équivaut à environ $1/5$ de l'écartement des électrodes de mesures AB. La tomographie de la résistivité électrique (ERT) est une application automatisée de mesure de la résistance (Fig. 17). Cette application combine deux méthodes de mesure à savoir ; le sondage vertical électrique (VES = vertical

electrical sounding) et la traînée électrique. Le sondage vertical est, comme son nom l'indique, une méthode d'investigation verticale. Le dispositif d'électrodes est d'abord rapproché vers le point d'investigation puis progressivement écarté vers l'extérieur pour investiguer les couches inférieures. En mesurant les variations de la résistivité apparente avec la profondeur, il est possible par inversion de déterminer la résistivité vraie et l'épaisseur de chaque couche traversée. Pour la traînée électrique, il s'agit d'une méthode d'investigation horizontale qui se fait en déplaçant l'ensemble du dispositif le long d'une ligne droite, la profondeur d'investigation reste constante et ne donne que la valeur de résistivité apparente. La tomographie (ERT) offre donc une investigation complète le long d'une ligne droite à une longueur et profondeur prédéfinie. Le résultat final donne un profil (pseudo-section) en 2 dimensions des résistivités apparentes et vraies des matériaux traversés.

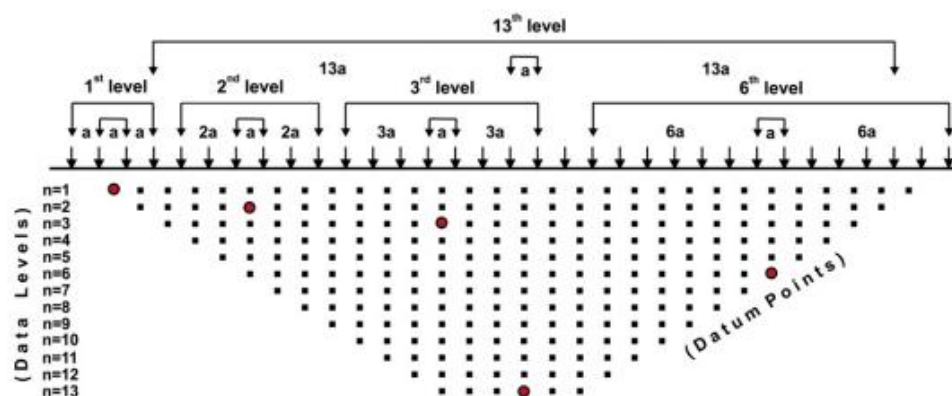


Figure 17 : Tomographie de résistivité électrique (ERT) avec dispositif Wenner-Schlumberger selon Ekinci, Y. L. et al. (2013).

Lors de la campagne géoélectrique, un résistivimètre (IRIS INSTRUMENT modèle Syscal Junior), 4 bobines de câbles et 72 piquets (électrodes) métalliques ont été mis à disposition. La pseudo-section est réalisée en disposant les électrodes avec un espacement régulier (max. 5 m) le long d'une ligne droite et connectées au résistivimètre via les câbles. L'espacement donne la résolution de la pseudo-section, plus l'espacement est réduit plus la résolution sera grande et inversement. Dans notre cas, 17 profils de 213 mètres (72 électrodes) et 105 mètres (36 électrodes) ont été réalisés avec un espacement de 3 mètres. Deux logiciels fournis par le fabricant (IRIS INSTRUMENT) ; *Electre II* et *Prosys II* servent à configurer et à charger sur le résistivimètre les pseudo-sections ainsi qu'à télécharger, après mesure, les données sur l'ordinateur.

Les données brutes sont ensuite traitées par inversion à l'aide du logiciel *Res2Dinv* de la firme GEOTOMO SOFTWARE. La méthode d'inversion consiste à retrouver les résistivités vraies du sous-sol à partir des résistivités apparentes (Dubois & al., 2010). En d'autres termes, le logiciel cherche une répartition spatiale des résistivités vraies capable de produire la même réponse de résistivités apparentes que celles mesurées sur le terrain. Il compare ensuite les résistivités apparentes mesurées avec celles modélisées pour calculer l'erreur du modèle. Plusieurs itérations (6 ou 7 itérations) sont nécessaires pour réduire au maximum cette erreur notée

« Abs. error » sur le modèle. L'erreur est acceptable en dessous de 5% (Geotomo Software, 2010). Néanmoins il existe plusieurs solutions pour expliquer les mêmes données (résistivités apparentes mesurées). Les valeurs de résistivités (apparentes et vraies) sont mesurées et calculées en des points précis dans le sous-sol, le logiciel de traitement va produire une pseudo-section 2D continu (modèle) par interpolation de ces valeurs. Une fois la pseudo-section des résistivités vraies calculées, une interprétation géologique et hydrogéologique des données est alors possible sur la base de connaissances géologiques régionales préalables (p.e. carte géologique, sondage). Les données topographiques obtenues à l'aide du modèle numérique de terrain (MNT) sont également traitées par le logiciel pour convertir les points de mesure en altitudes.

5.2.3 Réalisation de la carte de l'épaisseur de la couverture protectrice

La première étape pour la conception de la carte des épaisseurs consiste à interpréter sur chaque pseudo-section ERT la limite géologique entre la moraine jurassienne et la Pierre Jaune de Neuchâtel sous-jacente. Une fois les profils interprétés, la distance entre la surface topographique du modèle et la limite de l'interface moraine/Pierre Jaune est simplement mesurée sur le modèle en tenant compte de son échelle. Cette distance a été mesurée à chaque emplacement d'électrodes du profil. Lorsque les pseudo-sections ne montrent pas la présence de moraine jurassienne, la couverture protectrice est considérée comme absente ($E=0$).

La seconde étape est l'extraction des coordonnées X/Y nécessaire à l'élaboration de la carte des épaisseurs. Sur le logiciel *ArcGis vers. 10.6*, il est possible d'extraire les coordonnées de chaque électrode avec un espacement de 3 m en connaissant la position des profils ERT. Un fichier texte contenant les coordonnées X/Y et l'épaisseur E de la couverture protectrice à chaque électrode est alors produit.

La troisième étape consiste à élaborer la carte de l'épaisseur de la couverture protectrice grâce à l'interpolation des données récoltées sur les pseudo-sections et regroupées dans le fichier texte. Cette carte a été conçue avec le logiciel de géostatistique *Surfer vers. 13* de la firme GOLDEN SOFTWARE. Plusieurs méthodes de géostatistiques sont proposées par le logiciel, dans notre cas la méthode du krigeage (kriging) a été utilisée du fait qu'elle offre une continuité spatiale et linéaire au modèle. Ces caractéristiques permettent de produire une carte convenable par rapport aux attentes. Une anisotropie de l'interpolation a été indiquée au logiciel afin de tenir compte du sens d'écoulement probable de la masse glaciaire en direction du Nord-Est.

5.3 Résultats et interprétations de la campagne ERT

Les résultats de la campagne géoélectrique ERT sont présentés sous la forme de profils de résistivités vraies (pseudo-section) avec interprétation ainsi qu'une carte finale de l'épaisseur de la couverture protectrice (moraine jurassienne et couverture pédologique) sur le plateau des Bourquins. La campagne géoélectrique s'est déroulée à partir du mois de décembre 2018

jusqu'au mois de mars 2019, c'est-à-dire durant la période hivernale avant l'essai de traçage au mois d'avril.

La disposition des profils géoélectriques ERT (annexe 9) recouvre quasiment l'entier du plateau des Bourquins (13 profils de A à M) afin de créer une carte de l'épaisseur de la couverture protectrice avec une bonne résolution. Trois profils ERT (annexe 10) et trois sondages à la tarière (S1, S2, S3) (annexe 11.1-3) réalisés par Preisig G. (2017) s'ajoutent pour compléter les données de la campagne. Les données géologiques de la fouille creusée pour l'essai de traçage (F1) du 16 avril 2019 (annexe 11.4-5) sont aussi disponibles. D'autres profils (4 profils de N à Q) ont été réalisés à La Maison Neuve afin d'obtenir une idée sur la présence d'une couverture protectrice à cet endroit étant donné qu'il n'existe aucune information disponible à ce sujet.

Les contrastes de résistivités mettent en évidence les différentes structures géologiques constituantes du sous-sol. L'observation de ces contrastes, qui se traduisent par un changement rapide des résistivités sur les profils, ont permis de déterminer les gammes de valeurs de résistivités associées à chaque structure géologique. Les limites de résistivités sont déterminées comme suit :

- Pierre Jaune de Neuchâtel (Hauterivien sup.) : **> 80 – 100 Ω m**
- Marnes d'Hauterive (Hauterivien inf.) : **< 60 – 80 Ω m**
- Moraine jurassienne : **< 80 – 100 Ω m**

Ces gammes de valeurs correspondent bien à la théorie (Fig.15) et à la géologie locale. Selon les observations aux sondages et dans la fosse (annexe 11), la moraine jurassienne est globalement graveleuse avec une matrice silto-argileuse. L'argile par rapport aux autres matériaux géologiques conduit bien le courant alors que les graviers sont plutôt résistifs. Les matériaux lors de la creuse de la fosse étaient humides même après plusieurs semaines sans pluie mais aucune venue d'eau n'a été observée. Des valeurs maximales entre 80 et 100 Ω m semblent appréciables pour une moraine de ce type. Les Marnes d'Hauterive et la moraine jurassienne ont des gammes de résistivités semblables cependant, stratigraphiquement, les marnes sont censées se retrouver en dessous des calcaires de la Pierre Jaune de Neuchâtel à l'inverse de la moraine qui doit se retrouver au-dessus. Il est indiqué dans la notice de l'atlas géologique suisse (Rigassi & Jaccard, 1995) que la Pierre Jaune de Neuchâtel peut présenter quelques intercalations plus marneuses ne dépassant pas les 10 cm d'épaisseur.

5.3.1 Investigation sur le plateau des Bourquins

Sur le Mont-du-Bec, les profils A, B, C, E et une partie des profils D et F (Fig.18, 19) montrent que le substrat rocheux (Pierre Jaune) y est subaffleurant même si localement il semble y avoir des épaisseurs de couverture protectrice de 1 à 2 m. Le profil D montre néanmoins une épaisseur importante de moraine jurassienne à l'Ouest (8 à 9 m) (annexe 9). Une zone large de 21 à 30 m et plus conductrice est observée sur les deux profils transversaux A et C (Fig.18). Au vue de la forme et de la « verticalité » de cette zone, il ne s'agit vraisemblablement pas de

dépôts morainiques. L'hypothèse la plus probable est qu'il s'agisse d'une zone très fracturée et saturée en eau orientée dans le sens de l'axe du synclinal de La Côte-aux-Fées. De plus, cette zone correspond exactement à l'alignement d'un léger vallonnement (dépression) visible à la surface (annexe 12). Sur les profils C et D (Fig.18), des zones très hétérogènes ne montrant aucune continuité géologique particulière ont été interprétées comme des zones karstifiées pouvant contenir des fractures ou conduits avec des argiles ou de l'eau expliquant les résistivités globalement basses par rapport à la moyenne de la Pierre Jaune observée. A noter que l'extrémité Sud du profil C se situe juste au-dessus de la source du Ruisseau Sud. Les profils E et F (Fig.19) font apparaître transversalement et longitudinalement une continuité à résistivités faibles (≈ 30 à $100 \Omega m$) et plane plongeant vers le Nord-Est. Cette continuité semble être « coincée » entre deux autres continuités planes à hautes résistivités interprétées comme la Pierre Jaune de Neuchâtel. Une explication à cela serait la présence d'une ou plusieurs intercalations marneuses dans la Pierre Jaune de Neuchâtel (Rigassi & Jaccard, 1995).

Aux Bourquins-de-Bise, les profils G, H (Fig.19) et 1, 2 (Preisig, 2017) montrent que la Pierre Jaune de Neuchâtel est majoritairement subaffleurante sauf à l'Ouest (profil H) et au centre proche du hameau (profil 1 et 2) où la couverture protectrice semble atteindre des épaisseurs de 3 à 4 m. La limite géologique Marnes d'Hauterive/ Pierre Jaune est bien visible et correspond à la carte géologique en surface (annexe 9). L'épaisseur de la Pierre Jaune semble s'affiner à l'Ouest des Bourquins-de-Bise au point de quasiment disparaître (profil H). L'hypothèse d'une érosion glaciaire de la Pierre Jaune est plausible car il semble aussi y avoir des dépôts superficiels à faible résistivités (≈ 50 à $70 \Omega m$). Les profils I et J (Fig.20), au Sud-Est des Bourquins-de-Bise, montrent des hétérogénéités diverses. Le premier type d'hétérogénéité, visible sur les profils I,J (Fig.20) et C (Fig.18), est vertical à subvertical avec des résistivités faibles de l'ordre de ≈ 30 à $80 \Omega m$, il est interprété comme étant une fracture ou un conduit karstique rempli d'eau ou d'argile d'environ 6 m de largeur. Il s'agit vraisemblablement de la même formation sur les trois images car ces hétérogénéités s'alignent dans le prolongement d'une dépression orientée Sud-Ouest Nord-Est au Sud du plateau (annexe 12). Le second type d'hétérogénéité semble correspondre à des zones karstifiées en raison du désordre des champs de résistivité. Une continuité des résistivités en surface du profil J est interprétée comme de la moraine jurassienne avec près de 6-7 m.

Aux Bourquins-de-Vent, sur le profil K (Fig.20), la présence d'une couverture protectrice épaisse jusqu'à 9-10 m est marquée par une continuité à faible résistivité de ≈ 30 à $70 \Omega m$ sur une autre continuité à plus grande résistivité de ≈ 100 à $200 \Omega m$ correspondant à la Pierre Jaune de Neuchâtel. Les Marnes d'Hauterive sont aussi visibles en-dessous de la Pierre Jaune avec des résistivités de ≈ 20 à $60 \Omega m$ et correspondent à la limite Marnes d'Hauterive/ Pierre Jaune sur la carte géologique (annexe 9). Cette configuration est observable également sur le profil L (Fig.20) mais avec une épaisseur de couverture plus faible jusqu'à 6 m. Sur le profil M (Fig.21), le plus à l'Ouest, une alternance claire entre des continuités à faibles résistivités et à

hautes résistivités est perceptible. Ce profil recoupe, selon la carte géologique (annexe 9), la limite Marnes d'Hauterive/ Pierre Jaune. Cette alternance s'expliquerait donc par la transition géologique des deux unités (Rigassi & Jaccard, 1995).

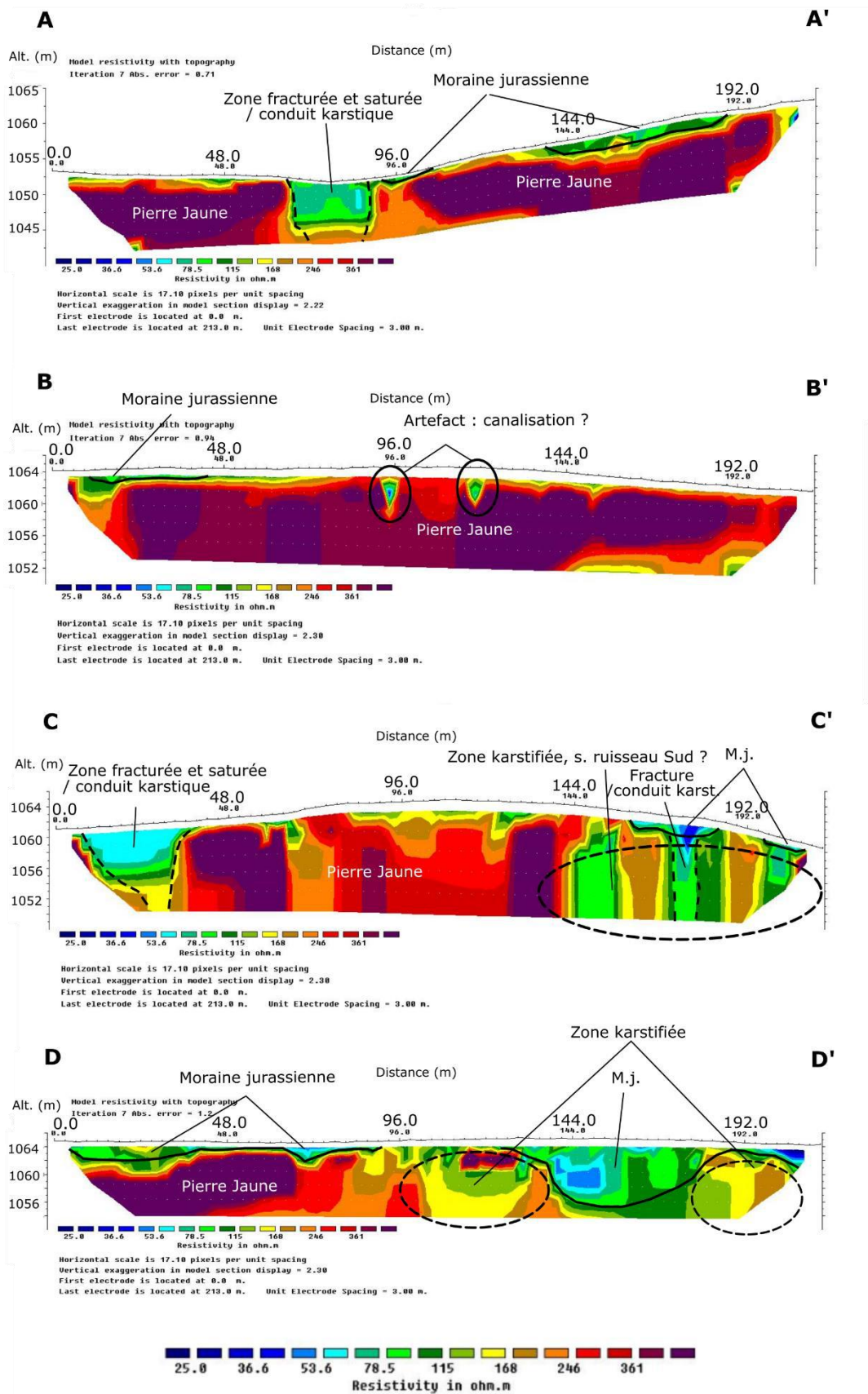


Figure 18 : Profils ERT A-D sur le plateau des Bourquins.

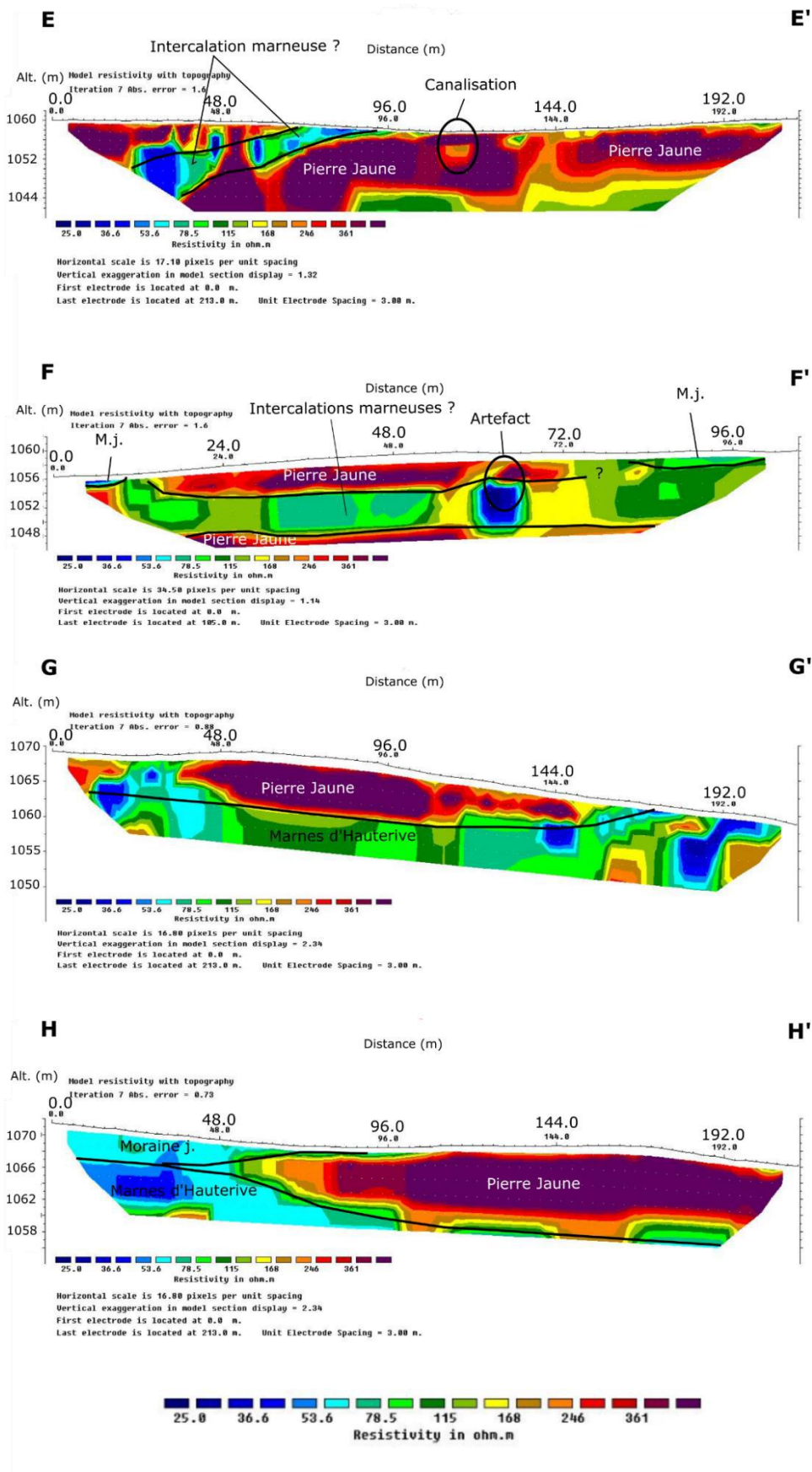


Figure 19 : Profils ERT E-H sur le plateau des Bourquins.

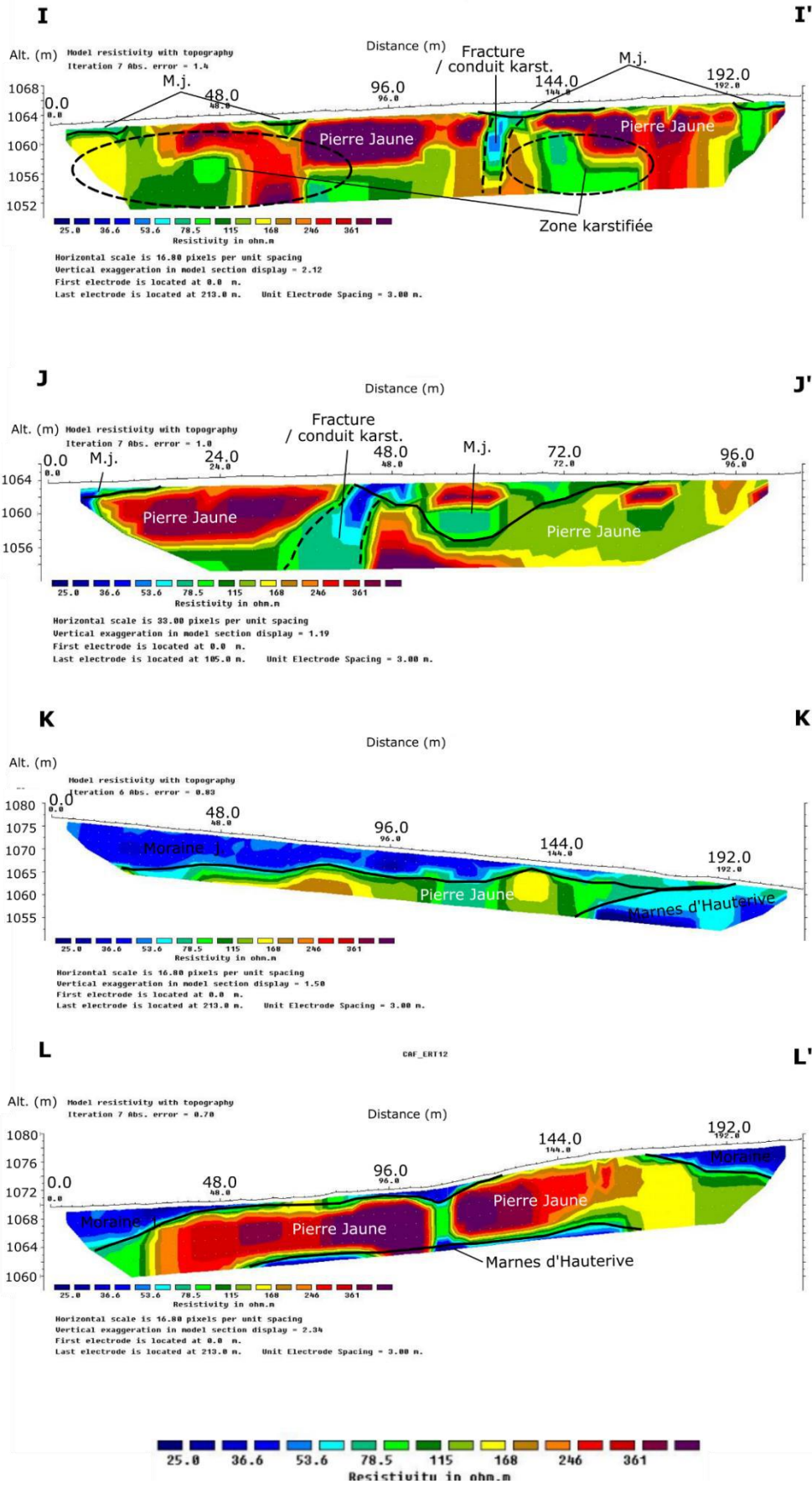


Figure 20 : Profils ERT I-L sur le plateau des Bourquins.

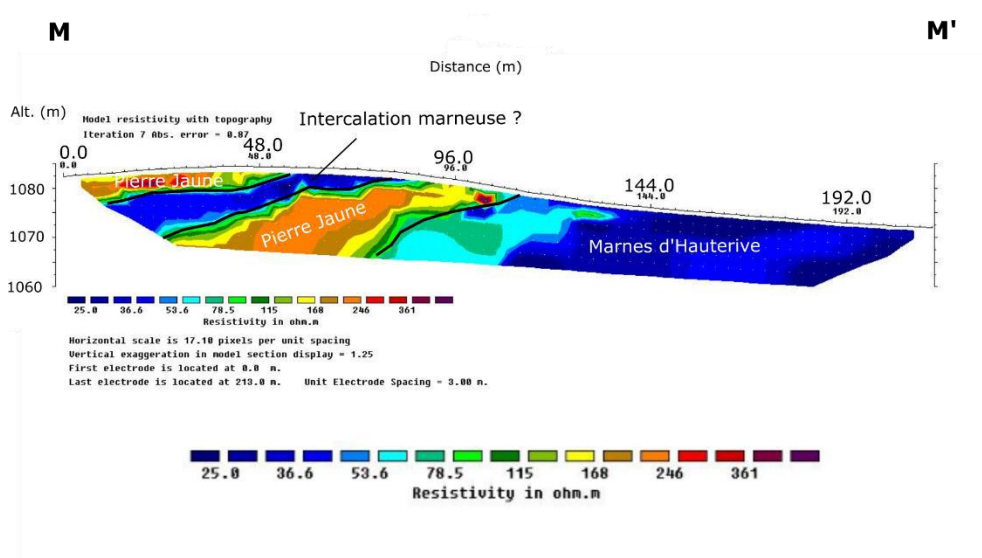


Figure 21 : Profil ERT M sur le plateau des Bourquins.

De manière générale sur le plateau des Bourquins (Fig.22, annexe 13), l'épaisseur de la moraine jurassienne et par conséquent de la couverture protectrice est quasiment inexistante sur le Mont-du-Bec et sur la partie Nord-Ouest des Bourquins-de-Bise. Une épaisseur non-négligeable (1-4 m) est observée proche du hameau des Bourquins-de-Bise même. Deux zones montrent une épaisseur importante au Sud du plateau et aux Bourquins-de-Vent. Cette importance d'épaisseur semble indéniable concernant les Bourquins-de-Vent (Fig.20) mais par contre plus discutable pour ce qui est du Sud du plateau (Fig.18) car le résultat semble très ponctuel. Un sondage à la tarière mécanique permettrait de confirmer ces interprétations. Globalement, les résultats des ERT concordent bien avec les observations effectuées par Matthey, B. en 1994 lors de sa campagne géophysique.

Le Mont-du-Bec, en plus d'être proche des sources, est dépourvu de couverture protectrice (Fig.22), ce qui rend plus vulnérable les eaux souterraines dans cette zone qu'aux Bourquins-de-Vent. La mise en évidence de fractures et de zones karstifiées indique la présence de chemins préférentielles pour les eaux souterraines mais aussi plus rapides. L'épaisseur de la Pierre Jaune de Neuchâtel sur le plateau des Bourquins s'affine vers l'Ouest et au Nord du plateau comme observée sur les profils ERT (Fig.18-21). En effet, l'épaisseur passe de plus de 30-40 m au Mont-du-Bec selon les observations directes des flancs du plateau à seulement 5-8 m vers les Bourquins-de-Vent selon les ERT.

Carte de l'épaisseur de la couverture protectrice sur le plateau des Bourquins à La Côte-aux-Fées.

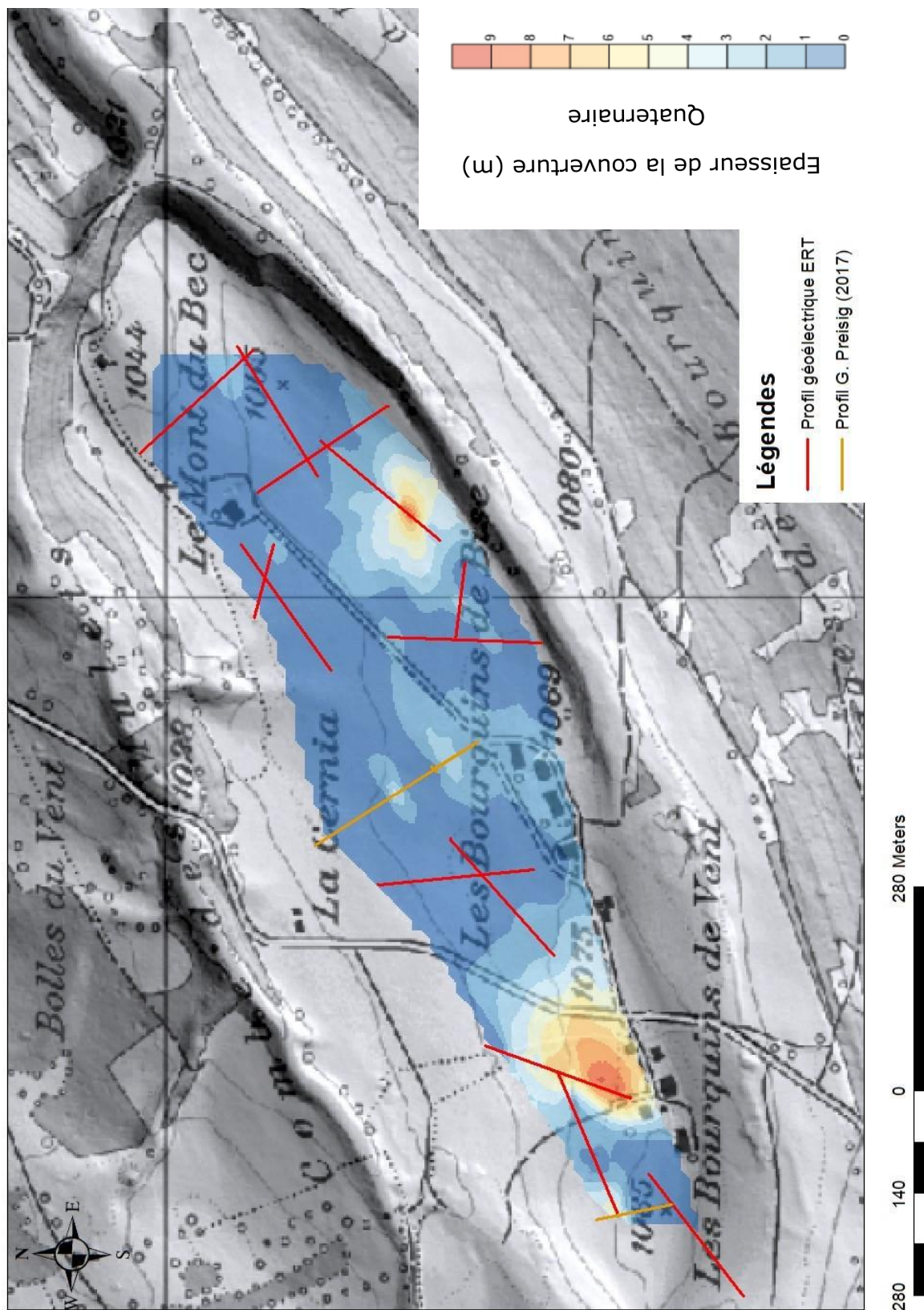


Figure 22 : Carte de l'épaisseur de la couverture protectrice (moraine jurassienne + couverture pédologique) sur le plateau des Bourquins.

5.3.2 Investigation à La Maison Neuve

Les investigations menées à La Maison Neuve se résument à 4 profils ERT (N, O, P, Q), malheureusement, aucune donnée de sondage ou fosse n'est disponible à cet endroit.

Sur les profils N et O (Fig.23, annexe 9), les résistivités calculées au sommet de La Maison Neuve sont globalement hautes avec $> 115 \Omega\text{m}$ ce qui est interprété comme de la Pierre Jaune de Neuchâtel. En revanche, en descendant dans la dépression du profil O les résistivités s'abaissent et se situent entre ≈ 20 à $80 \Omega\text{m}$ montrant une continuité en surface. Cela est interprété comme étant la présence d'une couverture protectrice avec une épaisseur allant jusqu'à environ 6 m. Le profil N présente une hétérogénéité subverticale de résistivités basses allant de ≈ 35 à $80 \Omega\text{m}$ et est interprétée comme étant une fracture ou un conduit karstique vertical.

Les profils P et Q (Fig.23, annexe 9) sont situés plus à l'Est de La Maison Neuve mais aussi plus bas. Comme précédemment, ces deux profils montrent la présence de la Pierre Jaune parfois subaffleurante dans la pente (profil P). Dans le replat, une continuité de résistivités basses en surface est visible (≈ 30 à $80 \Omega\text{m}$) ce qui est traduit comme la présence d'une couverture protectrice de maximum 4 m. Une hétérogénéité subverticale de résistivités basses est présente sur le profil P et est interprétée comme étant une fracture ou un conduit karstique vertical.

La campagne géophysique en ce lieu met donc en évidence la présence d'une couverture protectrice située sur les replats et dépressions et non au sommet de La Maison Neuve.

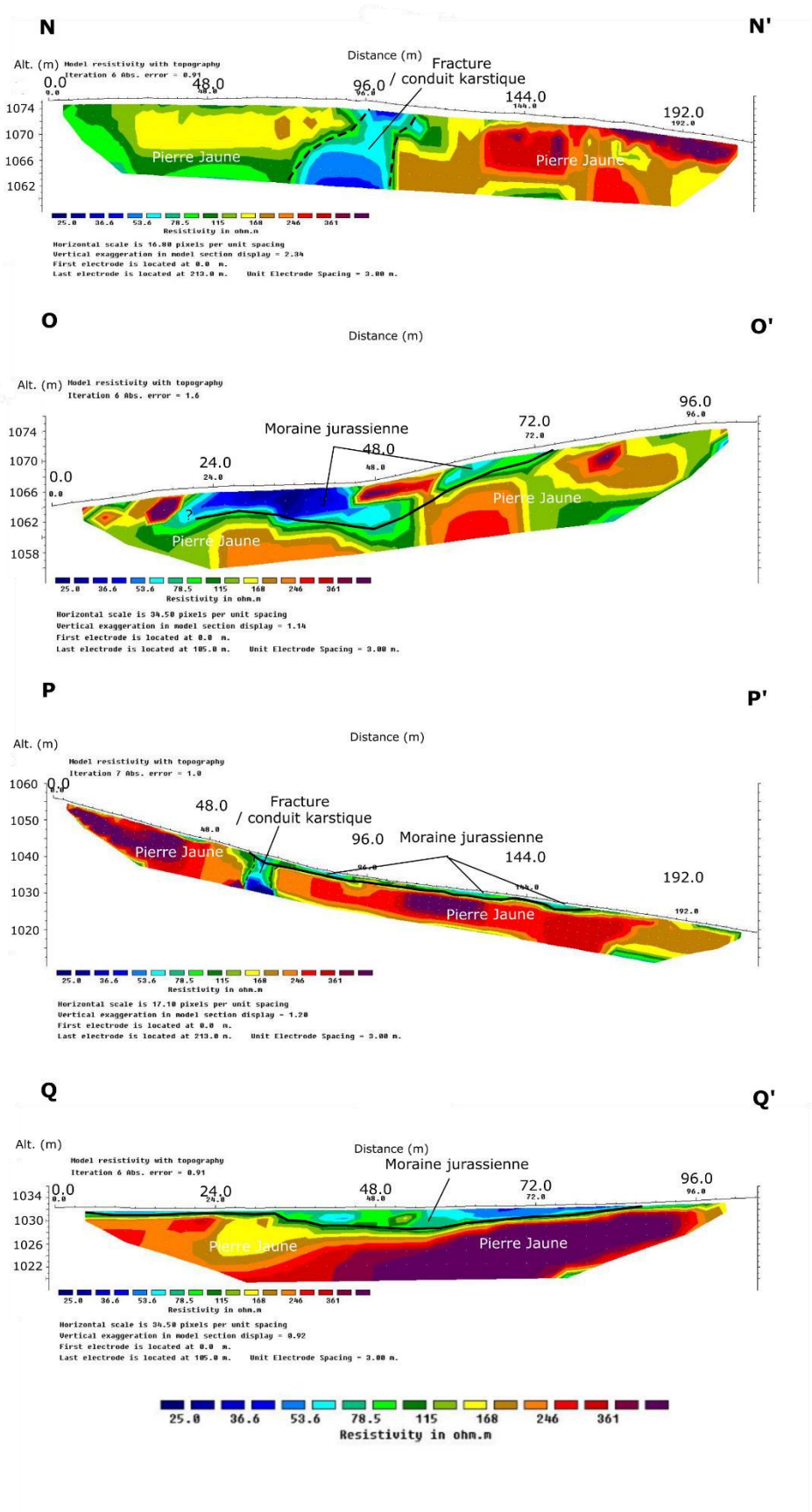


Figure 23 : Profils ERT N-Q à La Maison Neuve.

6 Caractérisation de la capacité filtrante de la moraine jurassienne : essais d'infiltration et essai de traçage

6.1 Description et buts des essais d'infiltration et de traçage

Comme observé dans le chapitre précédent, la répartition spatiale et l'épaisseur de la couverture protectrice sur le plateau des Bourquins est hétérogène. Les données géologiques des sondages et de la fosse (annexe 11) indiquent aussi un changement lithologique latéral de la moraine jurassienne. Ces variations ont une influence sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sous-sol et sur sa filtration naturelle au travers les couches (Fetter, 2001). Deux types d'essai ont été réalisés sur le plateau des Bourquins afin d'évaluer la capacité filtrante de la couverture protectrice. Il s'agit de l'essai d'infiltration et l'essai de traçage.

6.2 Méthodes et applications des essais

6.2.1 Essais d'infiltration

L'infiltration désigne deux phénomènes lorsqu'un sol reçoit des averses ou est noyé à sa surface. Il s'agit d'abord du remplissage des interstices des couches superficielles puis de la pénétration de l'eau jusqu'à la nappe grâce à la gravité et aux forces de succion (Musy et al., 1991). L'infiltration dépend notamment de la nature du sol (p.e. porosité, structure), de son contenu en eau, de la végétation et de la topographie (Musy et al., 1991).

Dans le but d'évaluer la conductivité hydraulique saturée K_{sat} de la première couche du sous-sol (la couverture pédologique), des essais d'infiltration ont été effectués sur le plateau des Bourquins en trois lieux distincts. Le premier au Mont-du-Bec où la couverture protectrice semble absente, le deuxième aux Bourquins-de-Vent où la couverture est épaisse (5-10 m) et la dernière aux Bourquins-de-Bise avec une épaisseur de couverture intermédiaire (1-2 m). Ces essais donnent une première indication sur la capacité filtrante de l'eau au travers la zone insaturée de la couverture pédologique jusqu'aux couches sous-jacentes. D'après les sondages réalisés par Preisig G. (2017) et la fosse pour l'essai de traçage, l'épaisseur de la couverture pédologique varie entre ≈ 50 à 70 cm sur le plateau des Bourquins.



Figure 24: Infiltromètre à double anneau avec mètre pour la mesure du niveau d'eau.

L'essai d'infiltration consiste à mesurer la descente verticale de l'eau en fonction du temps à l'aide d'un infiltromètre. L'infiltromètre se présente sous la forme d'un double anneau concentrique (Fig. 24) dont le diamètre respectif pour l'anneau interne et externe est de 30 cm et 45 cm. Ce double anneau est disposé à $\approx 15-20$ cm de profondeur pour être encastré et éviter les fuites d'eau latérales. La mesure de la hauteur du niveau d'eau est réalisée dans l'anneau interne. L'anneau externe est lui aussi noyé et sert à diriger verticalement les flux de l'anneau interne, sans cela, les flux risqueraient d'être dirigés latéralement par succion et par conséquent, les résultats seraient faussés.

Avant les mesures, le double anneau est préalablement noyé pendant 1 heure de temps pour « imbiber » le terrain. Lorsque la vitesse de descente de l'eau ($dH/dt = \text{infiltrabilité}$) est régulière cela signifie qu'un état d'équilibre est atteint et que la couche sous-jacente à notre essai est saturée (Fetter, 2001). En effet, un « bulbe » de saturation (Carter et al., 2007) se crée en-dessous du point d'infiltration et le flux se stabilise. A ce moment-là, l'infiltrabilité est égale à la conductivité hydraulique saturée d'après la loi de Darcy (Eq.13), car le gradient hydraulique est vertical et vaut $dh/dz = -1$.

$$I = q = -K_{sat} * \frac{dh}{dz} = K_{sat} \quad (13)$$

I : infiltrabilité en [m/s], q : vitesse de Darcy en [m/s]

K_{sat} : conductivité hydraulique saturée en [m/s], dh/dz : gradient hydraulique sans unité [-]

L'observation détaillée des dépôts de la couverture combinée avec les essais d'infiltration permet de donner une idée de la vitesse de transit d'un contaminant au travers lorsque ceux-ci sont saturés. Pour cela un simple calcul avec la loi de Darcy (Eq.13) et la porosité du milieu suffit (Eq.14) tel que :

$$v_{réelle} = \frac{q}{n_e} \quad (14)$$

q : vitesse de Darcy en [m/s], $v_{réelle}$: vitesse réelle en [m/s]

n_e : porosité efficace sans unité [-]

Le gradient hydraulique est égal à -1 étant donné que la circulation d'eau est verticale. Ainsi par simplification et fusion de l'équation 13 et 14 l'égalité suivante est posée (Eq.15) :

$$v_{réelle} = \frac{K_{sat}}{n_e} \quad (15)$$

$v_{réelle}$: vitesse réelle en [m/s]

K_{sat} : conductivité hydraulique saturée en [m/s], n_e : porosité efficace sans unité [-]

6.2.2 Essai de traçage double

Dans notre cas, l'essai de traçage consiste à observer le passage aux sources d'un traceur (colorant, sels, etc.) préalablement injecté en amont. Les caractéristiques du passage du traceur donnent de nombreuses informations sur le système aquifère et sur la capacité de filtration.

Méthodes d'injection

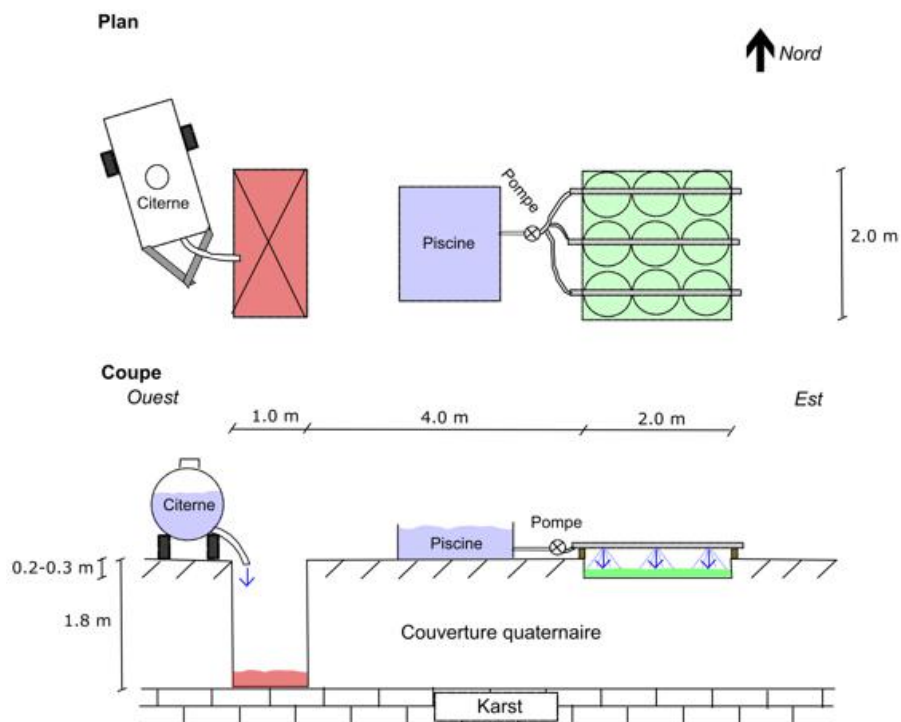


Figure 25: Schéma du dispositif d'injection des deux traceurs aux Bourquins-de-Bise vue en plan et en coupe

L'essai de traçage comparatif a pour but d'observer et de quantifier l'effet protecteur de la couverture à l'aide de deux injections simultanées avec deux méthodes d'injection instantanées différentes au même endroit. L'essai a eu lieu le 16 avril 2019 à 9h00 avec des conditions météorologiques plutôt sèches dans les deux semaines précédant l'injection. Le lieu d'injection aux Bourquins-de-Bise a été choisi en fonction de l'épaisseur de la couverture déterminée lors de la campagne géophysique. Il fallait s'assurer d'avoir une épaisseur de couverture entre 1 et 2 mètres pour des raisons pratiques. La première raison est basée sur l'hypothèse que, si une faible couverture de 1-2 m est capable de protéger les eaux souterraines, alors tous ce qui est supérieur à 1-2 m le seront également. La deuxième raison est, qu'à partir d'un mètre de couverture à faible conductivité hydraulique comme attendu (moraine à composante silto-argileuse), il y a le risque que le traceur reste « piégé » et prenne beaucoup de temps à traverser les dépôts.

Deux méthodes d'injection ont été employées (annexe 14). La première méthode consiste à simuler la pénétration d'un contaminant depuis la surface suite à de fortes pluies. Pour cela, de l'uranine liquide a été injecté sur une surface carrée de 2x2 m (4 m²) à l'aide d'un arrosoir et d'un système d'arrosage (Fig.25). Ce système d'arrosage, conçu spécialement à cet effet, est constitué de trois tubes métalliques perforés et filetés pour accueillir une buse à chaque trou. Un total de 9 buses orientées contre le sol est nécessaire pour arroser l'entier des 4 m². Les trois tubes ont été disposés à 60-70 cm du sol et étaient reliés à une pompe de jardin les alimentant en eau. Deux piscines jouant le rôle de réservoirs ont été nécessaires pour alimenter le système avec 2.5 m³. Afin d'éviter des pertes en eau et de traceur par ruissellement, le terrain a été creusé à 20-30 cm. La seconde méthode a joué le rôle de « contrôle », en effet de la sulforhodamine B a directement été injectée dans une fosse de 1.8 m de profondeur pour atteindre l'épikarst (Fig.25) et faire abstraction des dépôts morainiques. Un volume de 3 m³ d'eau stockée dans une citerne a été employé.

Pour les deux méthodes, un volume d'eau de « mouillage » du sol et un volume de « rinçage » a dû être prévu. Le « mouillage » sert à imbiber et à saturer le terrain avant l'injection, cette étape est importante car elle évite au traceur d'être trop absorbé par les dépôts meubles et favorise ainsi son passage. Le rinçage a lieu quant à lui après l'injection et sert à « pousser » le traceur afin d'éviter qu'il ne s'égare dans les interstices. Tant bien le mouillage que le rinçage sont essentiels à la réussite d'un essai de traçage.

Les traceurs ont été choisis suivant leurs caractéristiques propres et leurs interactions avec le milieu. Les traceurs fluorescents sont intéressants car il montre peu d'interaction avec le milieu, le risque de bruit de fond est réduit et ils s'utilisent en de faibles quantités. Ils possèdent des spectres d'excitation et d'émission différents entre eux. Néanmoins, certains traceurs comme le groupe des rhodamines ont des spectres très proches qui peuvent perturber les mesures de concentrations basé sur la fluorescence. Pour cela, lors de l'utilisation de deux ou plusieurs traceurs, il faut privilégier des colorants avec des spectres bien distincts comme c'est le cas pour l'uranine et la sulforhodamine B. Selon le *guide*

pratique de l'utilisation des traceurs en hydrogéologie (Schudel & al. 2002), l'uranine présente deux grands avantages : il est conservatif et il a une limite de détection très basse (0.001 ppb = 0.001 µg/L) cependant il est très sensible à la lumière naturelle. La sulforhodamine B a par contre une limite de détection plus élevée (0.01 ppb = 0.01 µg/L) et montre une absorption forte. L'uranine étant conservatif, elle a été privilégiée pour l'essai diffus malgré sa dégradation à la lumière.

Les quantités à injecter dépendent du type d'aquifère et des conditions de l'injection, elles doivent être calculées ou estimées sur la base des connaissances du système aquifère. Il existe de nombreuses formules disponibles pour le calcul de la masse de traceur à injecter. Dans notre cas, le calcul proposé par le *guide pratique de l'utilisation des traceurs en hydrogéologie* (Schudel & al. 2002) a été retenu (Eq.16, Tab.13).

$$M = \alpha * L * A \quad (16)$$

M = masse à injecter en [g]

α = facteur de correction du traceur en [g/m]. Uranine $\alpha = 1$, Sulforhodamine B $\alpha = 4$

L = distance à vol d'oiseau entre le point d'injection et le lieu de sortie suspecté en [m]

A = facteur d'ajustement aux conditions de l'aquifère sans unité [-]

Tableau 13 : Facteur A d'ajustement aux conditions de l'aquifère tiré du « guide pratique de l'utilisation des traceurs en hydrogéologie (Schudel et al. 2002) ».

Aquifère à porosité d'interstices	Aquifère fissuré	Aquifère karstique
perméabilité $K > 10^{-3}$ m/s : $A = 0.25 \cdot \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$	en général : $A = 0.2 - 2$	en général : $A = 0.2 - 1$
perméabilité K entre 10^{-3} et 10^{-4} m/s : $A = 0.5 \cdot \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$	pour un angle de propagation probable de plus de 60° : $A = 2 - 4$	si liaison karstique d'une perte de cours d'eau vers la source : $A = 10 \cdot (Q/100)^{0.93}$ (Q : débit de la source en m ³ /s)
perméabilité $K < 10^{-4}$: $A = \text{épaisseur de l'aquifère [m]}$		

Il est spécifié dans le guide pratique que la quantité à injecter dans la zone non-saturée est à multiplier par 2 ou 3. Cela est aussi valable pour une injection dans un sol à composante argileuse. La masse injectée pour les deux traceurs est calculée avec les paramètres suivants :

Masse Uranine : avec $\alpha = 1$, $L = 1300$, $A = 0.6$

$$M = \frac{1g}{m} * 1300 m * 0.6 * 2 \approx 1500g$$

La distance L de 1300 m équivaut à la distance entre le point d'injection et la source étudiée la plus éloignée à savoir la source de La Scie. Une valeur de 0.6 (moyenne) pour le facteur A a été choisi car il s'agit d'un aquifère karstique sans liaison directe d'une perte de cours d'eau vers la source. Le tout est multiplié par 2 car l'injection a lieu en milieu non-saturé.

Masse Sulforhodamine B : avec $\alpha = 4$, $L = 1300$, $A = 0.6$

$$M = \frac{4g}{m} * 1300 m * 0.6 \approx 3000g$$

La distance L de 1300 m équivaut à la distance entre le point d'injection et la source étudiée la plus éloignée à savoir la source de La Scie. Une valeur de 0.6 (moyenne) pour le facteur A a été choisie car il s'agit d'un aquifère karstique sans liaison karstique d'une perte de cours d'eau vers la source. Aucune multiplication n'est faite car l'injection a eu lieu directement dans l'épikarst, le traceur est supposé rejoindre rapidement la nappe phréatique. Une valeur de $M = 3000$ g semble tout de même excessif au vue de l'étendue de l'essai. Pour cette raison, il a été décidé de ne prendre que 1000 g.

$$M = 1000g$$

L'ensemble des données de l'injection est résumé dans le tableau ci-dessous afin d'avoir un aperçu globale (Tab.14).

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des données d'injection.

Type	Traceur	Quantité	Etat	Lieu d'injection	Date et heure	Durée	Volume injecté
Diffus/ Instant.	Uranine	1.5 Kg	liquide	Bourquins de Bise (526'801/ 189'577)	16.04.19 9h00	3h	2.5 m ³ (1 m ³ pour mouiller et 1.5 m ³ pour rincer)
Fosse/ Instant.	SulfoB	1.0 Kg	poudre	Bourquins de Bise (526'798 / 189'574)	16.04.19 9h00	2h40	3 m ³ (1 m ³ pour mouiller et 2 m ³ pour rincer)

Surveillance du passage du traceur aux sources

La surveillance du passage des deux traceurs aux sources a débuté directement après l'injection à l'aide de 4 méthodes d'échantillonnage et mesure distinctes. Deux types de méthodes existent : d'une part les méthodes quantitatives dont le but est de mesurer la concentration du traceur en fonction du temps et d'autre part les méthodes qualitatives dont le seul but est d'observer le passage ou non d'un traceur à une source. Les méthodes utilisées sont listées ci-après :

1. Echantillonnage manuel - quantitatif
2. Echantillonnage automatique avec échantillonneur automatique - quantitatif
3. Fluorimètre de terrain - quantitatif
4. Fluocapteur au charbon actif – qualitatif

Echantillonnage manuel et échantillonnage automatique

L'échantillonnage manuel est la méthode quantitative la plus simple, elle consiste à prélever dans des bouteilles en plastique PE-HD sombres de 25 ml un échantillon d'eau si possible avec un intervalle de temps régulier entre chaque échantillonnage. L'échantillonnage a été fait d'abord tous les jours puis tous les 2 à 4 jours voir plus en s'approchant du terme. L'échantillonnage automatique a été réalisé à l'aide d'un échantillonneur automatique. Il s'agit d'un appareil avec un pas temps et un volume d'échantillonnage programmable contenant 24 bouteilles. Les bouteilles pleines sont récupérées et leurs contenus sont transvasés dans des bouteilles en plastique PE-HD sombres. Le pas de temps a d'abord été réglé pour échantillonner toutes les heures puis toutes les 2 à 6 heures. Des échantillons d'eau à blanc ont été prélevés manuellement à toutes les sources quelques jours avant l'injection. La conservation des échantillons est assurée dans les bouteilles sombres et à l'abri de la lumière naturelle (UV) (Thierrin & al., 2003).

Les échantillons sont analysés en laboratoire à l'aide d'un spectrofluorimètre de laboratoire (PERKIN-ELMER modèle LS-50B). Cet appareil utilise le principe de la fluorescence pour mesurer la concentration des molécules de traceur. La fluorescence est la propriété d'une molécule à émettre de la lumière suite à l'excitation d'un électron par absorption d'un photon. Lorsque l'électron retourne à son état fondamental de basse énergie, un photon est alors émis. Le spectrofluorimètre utilise une lampe à xénon pour l'excitation des spectres du domaine UV-Vis (200 à 800 nm) et la lumière émise par la fluorescence peut être mesurée jusqu'à 900 nm à l'aide d'un détecteur de lumière (Fig.26) (Deyres, 2007).

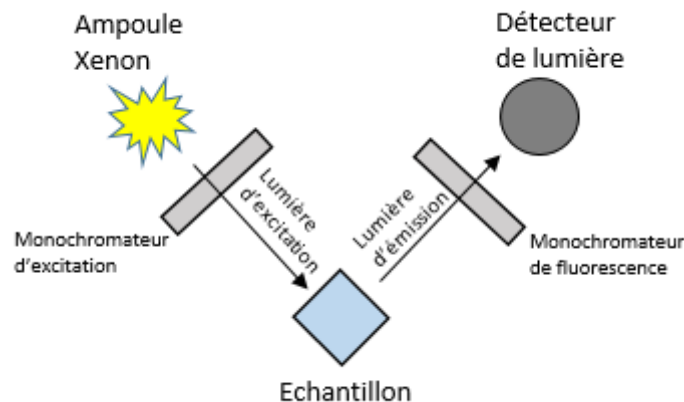


Figure 26: Schéma d'un spectrofluorimètre modifié d'après Deyres S. (2007).

Les spectres d'excitation (absorption maximale) et d'émission (fluorescence) sont propres à chaque traceur fluorescent (Tab.15) et permettent ainsi leur identification. La méthode du double-balayage consiste à faire varier dans une gamme de longueur d'onde définie la longueur d'onde employée pour l'excitation et l'émission, de cette façon il est possible d'identifier avec certitude les traceurs en question.

Tableau 15 : Spectre d'excitation et d'émission pour l'uranine et la sulforhodamine B d'après Schudel et al. (2002).

Traceur	Spectre d'excitation [nm]	Spectre d'émission [nm]
Uranine	490	515
Sulforhodamine B	561	586

La concentration d'un traceur est calculée grâce à l'intensité du pic sur le spectrographe⁸ et à l'aide d'un facteur de conversion défini à partir de standards. L'intensité est mesurée en millivolt [mV] par le détecteur de lumière (photodiode). Des dilutions doivent être réalisées lorsque la tension dépasse les 1000 mV. L'uranine et la sulforhodamine B possèdent des spectres bien distincts ce qui évite toutes interférences lors de la mesure au spectrofluorimètre (pas de recouvrements des spectres). La sulforhodamine B possède néanmoins un désavantage, sa longueur d'onde est la même que la turbidité.

Spectrofluorimètre de terrain

Le spectrofluorimètre de terrain (ALBILLIA modèle GGUN- FL30) est un appareil compact développé au Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel (Fig.27). Il utilise le même principe que le spectrofluorimètre de laboratoire. Il permet la mesure *in-situ* de la concentration de traceurs fluorescents avec des pas de temps très faible (min : 2 secondes) et donc avec une très grande résolution. Dans notre cas une résolution de 5 minutes a été choisie et suffit amplement pour l'analyse des données.



Figure 27: Spectrofluorimètre de terrain GGUN-FL30, à droite le lecteur de données avec batterie, au milieu la sonde et à gauche le câble de connexion.

L'appareil est constitué d'une sonde et d'un lecteur de données alimenté par une batterie (Fig. 27). Les deux sont reliés à l'aide d'un câble étanche. La sonde possède 4 ampoules d'excitation

⁸ Graphique affichant la longueur d'onde [nm] vs intensité de la fluorescence [mV]

nommée L1, L2, L3, L4 et en lien avec 4 détecteurs de lumière. Chaque ampoule émet une longueur d'onde d'excitation bien précise propre à chaque traceurs (Fig.28), à savoir 470 nm pour l'uranine (L1), 525 nm pour le groupe des rhodamines (L2), 365 nm pour le tinopal ou l'acide aminé G (L3) et 660 nm pour la turbidité (L4). La sonde doit être entièrement plongée dans l'eau pour qu'elle circule au travers un tube de verre central où les mesures ont lieu.

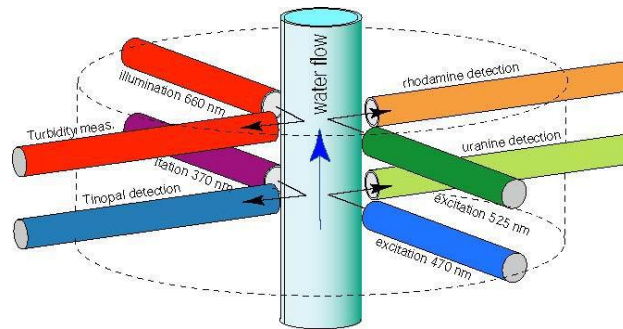


Figure 28: Construction de la sonde de mesure du spectrofluorimètre de terrain d'après Schnegg et al (2003).

Un fichier de calibration (CALBRAT.DAT) est mis à disposition par le fournisseur et permet à l'appareil de corriger les données des ampoules L1 à L4 lors de la mesure. Néanmoins, il est préférable d'effectuer une calibration avant la mesure à l'aide d'une solution à concentration connue de traceur ou bien simultanément à la mesure grâce à la prise d'échantillons manuels. Cette dernière option a été privilégiée. Les analyses en laboratoire des échantillons manuels sont considérés comme exactes et il suffit par la suite d'ajuster les mesures automatiques avec ces mesures en appliquant un facteur de correction.

Les données ont régulièrement été téléchargées durant la période de mesure jusqu'à la restitution quasiment complète des deux traceurs c'est-à-dire le 10 mai 2019. Les sondes ont néanmoins été disposées quelques jours avant le lancement de l'essai afin de mesurer le bruit de fond de l'eau sans traceur. L'extraction et le traitement des données de la sonde sur ordinateur se font à partir du logiciel *FLUO* (Schnegg, 2008). Les données brutes sont récupérées sur la carte mémoire de l'appareil. A partir de ces données et du fichier de calibration, le logiciel génère en premier lieu un fichier montrant les données en [mV] pour chaque ampoule (L1 à L4) avec lequel il est possible de générer un second fichier des données en [ppb]. Ce dernier est utilisé pour l'établissement des courbes de restitution. L'interface du logiciel permet de visualiser directement les données sur un graphique et de connaître l'état actuel de l'essai de traçage sur le terrain.

Fluocapteur

La méthode du fluocapteur est qualitative c'est-à-dire qu'elle permet uniquement de savoir si un passage du traceur a eu lieu ou non à une source. Le fluocapteur se présente sous la forme d'un sachet de tissu renfermant du charbon actif en granulés. Il est installé de manière à rester complètement plongé dans l'eau mesurée durant toute la durée de l'essai. Le charbon actif est une matière capable d'absorber et de conserver le traceur fluorescent.

Après l'essai, le charbon actif est d'abord séché au four, puis 5 g sont immergés pendant plus de 24 heures dans un mélange éthanol-ammoniac de 20 ml. Ce mélange permet l'extraction des traceurs. La solution est ensuite analysée au spectrofluorimètre de laboratoire et indique la présence ou non de traceur.

Mise en place du système de la surveillance

Tableau 16 : Système de surveillance de l'essai de traçage. SpF : Spectrofluorimètre de terrain, EA : Echantillonneur automatique, EM : Echantillon manuel, Fc : fluocapteur.

Lieu de surveillance	Dispositif de mesure		Lieu de surveillance	Dispositif de mesure
La Scie	SpF + EM + Fc		Combes Nord	EM + Fc
César-Guye	SpF + EM + Fc		Source Ruisseau Sud	EM + Fc
Sources mélangées	EA		Source des Raies	Fc
Combes Sud	EM + Fc		Source Annens Ouest	Fc
Combes Centre	EM + Fc			

Deux spectrofluorimètres de terrain et un échantillonneur automatique étaient à disposition lors de cet essai. Les spectrofluorimètres ont été placés dans la source de La Scie et de César-Guye en raison de leur intérêt particulier dans le cadre de cette étude (Tab.16). L'échantillonneur automatique a été installé au déversoir des sources Mélangées (Tab.16). De cette façon, un recouvrement complet de moyenne à haute résolution est obtenu pour les sources principales de La Scie, César-Guye et des trois Combes (Combe Nord, Centre et Sud).

Des échantillons manuels ont été prélevés à toutes les sources sauf à la source des Raies et Annens Ouest qui sont d'un intérêt secondaire. Des fluocapteurs ont été placés à toutes les sources au cas où du traceur n'aurait pas été détecté par les méthodes qualitatives.

Traitement des données à hautes concentrations sur les spectrofluorimètres

Les concentrations mesurées aux sources de la César-Guye et des trois Combes (Combe Nord, Centre et Sud) se sont révélées très élevées. Par exemple, à la source César-Guye des valeurs de plus de 500 ppb pour l'uranine et de plus de 300 ppb pour la sulforhodamine B ont été observées. De telles concentrations vont au-delà de la capacité de mesure des spectrofluorimètres (saturation).

Pour l'analyse des échantillons manuels cela ne pose pas de problèmes particuliers, il suffit de diluer l'échantillon par un facteur connu (p.e. 10 ou 100 fois) pour permettre la mesure. La concentration réelle est retrouvée en multipliant la valeur mesurée par le facteur de dilution tel que (Eq.17) :

$$C_{réel} = C_{mesurée} * D \quad (17)$$

$C_{réelle}$: concentration réelle en [ppb]

$C_{mesurée}$: concentration mesurée en [ppb], D : facteur de dilution

Par contre, cela est plus problématique pour le spectrofluorimètre de terrain pour lequel aucune dilution n'est possible, l'appareil était saturé pour l'uranine mais pas pour la sulforhodamine B. En revanche, de trop grandes concentrations d'uranine perturbent la mesure de la sulforhodamine B sur l'ampoule (L2) prévue à cet effet. Néanmoins une solution existe pour pallier à ces problèmes. Les 4 ampoules présentent dans le spectrofluorimètre de terrain montrent des sensibilités différentes vis-à-vis des traceurs. Même si la concentration en uranine sature l'ampoule (L1) prévue spécialement, l'ampoule mesurant l'acide aminé G (L3) capte un signal. En temps normal cette ampoule n'est pas assez sensible mais à des concentrations élevées d'uranine elle est perturbée sans être pour autant saturée. Comme aucune acide aminé G n'a été injectée, le signal observé sur l'ampoule L3 correspond uniquement à la perturbation provoquée par l'uranine. A partir des mesures d'intensité effectuées par l'ampoule L3 et du rapport de l'intensité des ampoules L1/L3 il est possible de retrouver les valeurs d'intensité mesurées en [mV] pour l'uranine tel que $L1_{calc} = L3 * (L1/L3)$. Le rapport L1/L3 est déterminé à partir du fichier de calibration (CALIBRAT.DAT) de l'appareil. Ce fichier présente pour chaque traceur des valeurs d'intensité en [mV] mesurés aux ampoules L1 à L4 avec une concentration de traceur connue.

L'intensité de l'ampoule L2 propre à la sulforhodamine B est obtenue en 2 étapes. Premièrement il faut connaître l'influence de l'uranine $L2_{ur}$ sur la mesure de l'ampoule L2, pour cela il suffit d'utiliser les valeurs d'intensité de l'uranine et le rapport de l'intensité des ampoules L1/L2 (fichier de calibration) pour calculer les valeurs $L2_{ur} = L1_{calc} / (L1/L2)$. Pour finir il faut soustraire l'intensité propre à l'uranine aux valeurs mesurées par l'ampoule L2 tel que $L2_{sul} = L2 - L2_{ur}$, de cette manière l'intensité de l'ampoule L2 due uniquement à la sulforhodamine B est obtenue.

Une fois que les valeurs sont retrouvées pour l'uranine et la sulforhodamine B, il suffit de les convertir en unité de concentration [ppb]. Les valeurs en [ppb] pour la source de La Scie, César-Guye et sources Mélangées sont corrigées par soustraction du bruit de fond appelé « baseline » et par multiplication d'un facteur de correction afin de faire correspondre ces valeurs avec les valeurs d'échantillonnage manuel.

Toutes ces manipulations sont illustrées à l'aide d'un exemple complet dans l'annexe 15. A noter que ces manipulations, sauf pour le bruit de fond et le facteur de correction, sont valables uniquement pour des valeurs de concentrations élevées des traceurs, en effet, à de faibles concentrations, l'ampoule L3 n'est pas assez sensible. En revanche les données originales elles sont tout à fait exploitables. Ainsi il a fallu « reconstruire » une courbe de

restitution à partir des données originales pour les faibles concentrations et à partir des données transformées ou calculées pour les hautes concentrations.

Méthodes de calculs

Les résultats d'analyses permettent l'établissement de courbes de restitution, il s'agit d'une courbe présentant la concentration du traceur en fonction du temps. De multiples informations sur le comportement hydrodynamique d'un système aquifère sont disponibles à partir de ces courbes. Les informations les plus importantes sont notamment le temps et la vitesse d'arrivée des premières molécules de traceur, le temps et la vitesse du pic c'est-à-dire de la concentration maximale, le taux de restitution et la forme de courbe (p.e. nombre de pics, étalement). Si la forme de la courbe s'y prête, les données hydrodynamiques telles que la dispersivité, le coefficient de dispersion et le temps de transit moyen peuvent être calculés. Les dimensions des conduits karstiques comme la surface de la section transversale et le rayon hydraulique peuvent être estimés et procurent quelques informations complémentaires sur le réseau karstique. Pour cela, il faut partir de l'hypothèse que ces conduits sont complètement saturés.

Le temps d'arrivée t_{arr} et le temps du pic t_{pic} sont directement récupérés sur la courbe de restitution. A partir de ces temps et de la distance entre le point d'injection et le point de mesure la vitesse d'arrivée v_{arr} et la vitesse du pic v_{pic} sont calculées de la manière suivante (Eq.18) :

$$v_{arr} = \frac{x}{t_{arr}} \text{ et } v_{pic} = \frac{x}{t_{pic}} \quad (18)$$

v_{arr} et v_{pic} : vitesse d'arrivée et de pic du traceur en [m/h]

t_{arr} et t_{pic} : temps d'arrivée et de pic du traceur en [h]

x : distance à vol d'oiseau entre le point d'injection et le point de mesure en [m]

A partir de la vitesse du pic et du débit moyen à la source, la surface de la section transversale d'un conduit karstique hypothétique saturé est calculée selon l'équation suivante (Eq.19) :

$$S = \frac{Q_{moyen\ source}}{v_{pic}} \quad (19)$$

S : surface de la section transversale du conduit karstique saturé en [m²]

$Q_{moyen\ source}$: débit moyen à la source en [m³/s], v_{pic} : vitesse de pic du traceur en [m/s]

En admettant que le conduit karstique ait une section transversale ronde, le rayon hydraulique est alors aisément calculé (Eq.20) :

$$r_h = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (20)$$

r_h : rayon hydraulique du conduit karstique saturé en [m]

S : surface de la section transversale du conduit karstique saturé en [m²]

Le taux de restitution est la fraction exprimée en pourcentage de la masse de traceur injecté passée au point de mesure durant toute la durée de l'essai de traçage (Eq.21).

$$R\% = \frac{M_{restituée}}{M_{injectée}} \quad (21)$$

R : taux de restitution en %

$M_{restituée}$: masse de traceur restituée au point de mesure en [g]

$M_{injectée}$: masse totale de traceur injectée en [g]

La masse injectée est connue et la masse restituée est calculée à partir de l'intégrale de la courbe de restitution et du débit à la source (Eq.22). Comme le débit est variable, il est compris dans l'intégrale. L'intégration de la courbe de restitution est représentée à l'aide d'une courbe cumulée de restitution. Il s'agit d'un graphique montrant le taux de restitution en fonction du temps.

$$M_{restituée} = \int_{t=0}^{\infty} Qc(t)dt \quad (22)$$

$M_{restituée}$: masse de traceur restituée au point de mesure en [g]

Q : débit à la source en [L/min]

$c(t)$: concentration du traceur en fonction du temps en [(g/L)*min]

La dispersion est le phénomène de dilution d'un contaminant ou traceur avec l'eau présente dans l'environnement traversé. La dispersion longitudinale a lieu dans le sens principal du courant et est provoqué, dans les eaux souterraines, par des mécanismes hydrodynamiques à l'échelle de la porosité (Fetter, 2001).

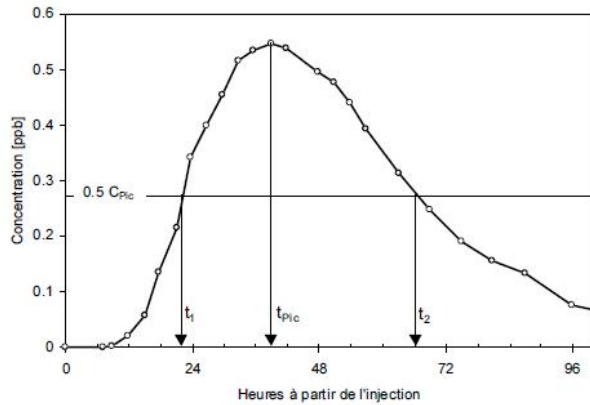


Figure 29: Méthode graphique C_{pic} sur la courbe de restitution tiré du « guide pratique de l'utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie » (Schudel et al., 2002).

Le coefficient de dispersion, la dispersivité et le temps de transit moyen procurent des informations importantes à la compréhension des mécanismes hydrodynamiques dans un aquifère donné. Ils sont estimés à partir de la méthode de calcul *Méthode C_{pic}* proposé par le guide pratique (Schudel & al., 2002). Graphiquement, cette méthode consiste à tirer une barre horizontale à la moitié de la concentration maximale ($0.5 * C_{pic}$) et à déterminer respectivement le temps t_1 et t_2 à partir de l'intersection de la courbe avec cette barre (pente montante et descendante) (Fig.29).

Dans une première étape, à l'aide des temps t_1 et t_2 et du temps du pic t_{pic} les paramètres ϕ_1 et ϕ_2 sont calculés de la manière suivante (Eq.23) :

$$\phi_1 = \frac{t_{pic}}{t_1} \text{ et } \phi_2 = \frac{t_{pic}}{t_2} \quad (23)$$

ϕ_1 et ϕ_2 : paramètres de calcul

t_{pic} : temps du pic en [j], t_1 et t_2 : temps défini à la moitié de la concentration maximale en [j]

Le paramètre de dispersion pour la branche montante (avec ϕ_1) et la branche descendante (avec ϕ_2) permet de caractériser l'asymétrie de la courbe et est calculé de la manière suivante (Eq.24) pour chacune des deux branches :

$$\frac{D_L}{v_{moy} * x} = \frac{(1 - \phi)^2}{4\sqrt{\phi[\ln(2 * \phi^2) + 2 * (1 - \phi)] * [\phi * \ln(2 * \phi^2) + 2 * (1 - \phi)]}} \quad (24)$$

$D_L/v_{moy} * x$: paramètre de dispersion sans unité [-]

D_L : coefficient de dispersion long. en [m^2/j], v_{moy} : vitesse moyenne à vol d'oiseau en [m/j]

x : distance entre le point d'injection et le point de mesure en [m]

ϕ : paramètres de calcul pour la branche montante (ϕ_1) et descendante (ϕ_2) sans unité [-]

Dans une seconde étape, le temps de transit moyen de l'ensemble des molécules de traceur est calculé à l'aide du paramètre de dispersion moyen des deux branches et du temps du pic de la manière qui suit (Eq. 25) :

$$t_{moy} = t_{pic} * \left[\sqrt{1 + \left(4 * \frac{D_L}{v_{moy} * x}\right)^2} + 4 * \frac{D_L}{v_{moy} * x} \right] \quad (25)$$

t_{moy} : temps de transit moyen en [j], t_{pic} : temps du pic en [j]

$D_L/v_{moy}*x$: paramètre de dispersion sans unité [-]

Dans une dernière étape, grâce au paramètre de dispersion et au temps de transit moyen calculés préalablement, la vitesse de transit moyen (Eq.26), la dispersivité longitudinale (Eq.27) et enfin le coefficient de dispersion longitudinal (Eq.28) sont calculés de la manière suivante :

$$v_{moy} = x/t_{moy} \quad (26)$$

v_{moy} : vitesse de transit moyenne à vol d'oiseau en [m/j]

t_{moy} : temps de transit moyen en [j]

x : distance entre le point d'injection et le point de mesure en [m]

$$\alpha_L = \left(\frac{D_L}{v_{moy} * x} \right) * x \quad (27)$$

α_L : dispersivité longitudinale en [m]

$D_L/v_{moy}*x$: paramètre de dispersion sans unité [-]

x : distance entre le point d'injection et le point de mesure en [m]

$$D_L = \alpha_L * v_{moy} \quad (28)$$

D_L : coefficient de dispersion longitudinale en [m²/j]

α_L : dispersivité longitudinale en [m], v_{moy} : vitesse de transit moyen à vol d'oiseau en [m/j]

Lors d'un essai de traçage multiple, la courbe de restitution classique ne permet pas toujours une comparaison immédiate des concentrations des traceurs injectés. Pour pallier à cela, il suffit de normaliser la concentration mesurée par la masse injectée de la manière suivante (Eq.29) :

$$C_{i\text{ norm}} = \frac{C_i}{M} \quad (29)$$

$C_{i\text{ norm}}$: concentration normalisée au moment i en [ppb/Kg]

C_i : concentration au moment i en [ppb], M : masse injecté en [Kg]

Cette transformation doit être appliquée à tous les points de mesure pour la courbe de restitution de chaque traceur.

6.3 Résultats et interprétations des essais d'infiltration et de l'essai de traçage

6.3.1 Essais d'infiltration et caractérisation lithologique de la couverture protectrice

Les essais d'infiltration ont été réalisés à l'aide du double-anneau à l'emplacement du Mont-du-Bec, des Bourquins-de-Vent et des Bourquins-de-Bise. Un autre essai d'infiltration sans double-anneau a eu lieu directement dans la fosse creusée à l'occasion de l'essai de traçage lors de l'injection pour mesurer la conductivité hydraulique saturée de l'épikarst (Tab.17).

Les trois essais effectués sur la couverture pédologique révèlent un sol à composante silto-argileuse, aéré et toujours la présence de graviers et galets calcaires. Dans la classification USCS, ce sol est classé CL-ML. La conductivité hydraulique de la couverture pédologique varie entre 5×10^{-6} m/s à 10^{-5} m/s. Le sol est donc légèrement perméable, l'infiltration s'est faite sans grandes difficultés. Pour ce qui est de l'épikarst, une conductivité hydraulique plus élevée de $\approx 10^{-4}$ m/s indique une bonne perméabilité imputable à un comportement aquifère. L'eau dans la fosse est descendue très rapidement lors des mesures. Contrairement aux 3 autres essais, celui-ci a duré moins de 30 min et a été répété une deuxième fois pour valider le premier résultat. Une telle conductivité est très probable pour un milieu altéré comme l'épikarst cependant, les flux latéraux à une telle échelle (fosse) ne sont pas négligeables ce qui a tendance à surestimer (Carter & al., 2007) la valeur de conductivité hydraulique obtenue.

Tableau 17 : Résultats des essais d'infiltration de la première couche de couverture pédologique et de l'épikarst sur le plateau des Bourquins.

Lieu et coordonnées CH1903/LV03	Date	Description sol (0 à 20 cm)	Ep. couverture [m]	Durée d'infiltration [min]	Ksat [m/s]
Mont du Bec (527189 /190035)	26.03.19	La couverture pédologique. Silto-argileux, légèrement sableux, cohésif. Couleur brune à brun un peu jaunâtre. Sol aéré, nombreux vers de terre et quelques racelles. Quelques graviers et cailloux calcaires.	< 1	180	1.3x10⁻⁵
Bourquins de Vent (527189 /190035)	26.03.19	La couverture pédologique. Silto-argileux avec quelques graviers/galets de pierre jaune. Couleur brune. Sol aéré, présence de racelles et de vers de terre.	9.0 - 10.0	150	5.0x10⁻⁶
Bourquins de Bise (526341/189379)	28.03.19	La couverture pédologique. Silto-argileux, granuleux un peu cohésif. Présence de quelques racelles, graviers et galets arrondis altérés. Egalement blocs décimétriques.	1.5 – 2.0	200	1.5x10⁻⁵
Bourquins de Bise (526798 /189574)	16.04.19	Epikarst dans le fond de fosse. Roche altérée de Pierre Jaune. Nombreux cailloux et blocs (diamètre 5-30 cm) dans matrice argileuse gris-beige légèrement jaunâtre.	1.8	18	1.3x10⁻⁴

La creuse de la fosse destinée à l'injection de traceur a permis d'obtenir un visuel direct avec la moraine jurassienne et l'épikarst (annexe 11.5). La couverture protectrice à cet endroit est constituée d'une première couche de \approx 45 cm de couverture pédologique silto-argileuse contenant quelques cailloux et graviers jurassiens. Il s'ensuit une couche de 85 cm de moraine jurassienne de couleur jaunâtre composée essentiellement de silt graveleux mais légèrement argileux avec un passage plus graveleux et accompagné de quelques cailloux et blocs décimétriques. A noter que des brachiopodes bien préservés dans la matrice ont été retrouvés. Cette couche se termine par des dépôts plus argileux et appauvris en graviers et cailloux. Enfin la dernière couche observée est définie comme étant l'épikarst car elle contient de très nombreux blocs et cailloux de Pierre Jaune de Neuchâtel emprisonnés dans une

matrice argileuse de couleur gris-beige. Aucune venue d'eau n'a été observée lors de la creuse, il s'agit donc bien d'un milieu non-saturé.

Tableau 18 : Calcul du temps de transit au travers la couverture protectrice en variant la conductivité hydraulique et la porosité.

Constante				
E [m]	1.3			
dh/dz [-]	1			
Variable				
K [m/s] mesuré	1.5*10⁻⁵			
n [-]	0.1	0.2	0.3	0.4
v [m/s]	1.5*10 ⁻⁴	7.5*10 ⁻⁵	5.0*10 ⁻⁵	3.8*10 ⁻⁵
temps [h]	2.4	4.8	7.2	9.6
K [m/s] hyp.	0.5*10⁻⁴			
n [-]	0.1	0.2	0.3	0.4
v [m/s]	5.0*10 ⁻⁴	2.5*10 ⁻⁴	1.7*10 ⁻⁴	1.3*10 ⁻⁴
temps [h]	0.7	1.4	2.1	2.9
K [m/s] hyp.	1.0*10⁻⁵			
n [-]	0.1	0.2	0.3	0.4
v [m/s]	1.0*10 ⁻⁴	5.0*10 ⁻⁵	3.3*10 ⁻⁵	2.5*10 ⁻⁵
temps [h]	3.6	7.2	10.8	14.4
K [m/s] hyp.	0.5*10⁻⁵			
n [-]	0.1	0.2	0.3	0.4
v [m/s]	5.0*10 ⁻⁵	2.5*10 ⁻⁵	1.7*10 ⁻⁵	1.3*10 ⁻⁵
temps [h]	7.2	14.4	21.7	28.9
K [m/s] hyp.	1.0*10⁻⁶			
n [-]	0.1	0.2	0.3	0.4
v [m/s]	1.0*10 ⁻⁵	5.0*10 ⁻⁶	3.3*10 ⁻⁶	2.5*10 ⁻⁶
temps [h]	36.1	72.2	108.3	144.4

Plusieurs hypothèses de conductivité hydraulique et de porosité des dépôts observés lors de la creuse sont testés et donne une gamme de valeurs pour le temps de transit au travers la couverture protectrice (Tab.18). L'épaisseur de la couverture E et le gradient hydraulique dh/dz restent constants. Sur le tableau (Tab.18), la première valeur de la conductivité hydraulique est celle mesurée à l'aide de l'infiltromètre à double-anneau aux Bourquins-de-Bise (lieu d'injection). Les autres valeurs sont purement arbitraires et sont basées sur les observations lithologiques. La porosité efficace est variée entre 10 à 40 % en restant des valeurs plausibles dans le cas des dépôts observés.

Les valeurs des temps de transit obtenues avec la conductivité hydraulique mesurée aux Bourquins-de-Bise (1.5×10^{-5} m/s) donnent une gamme variant de 2 à 10 heures. Pour une conductivité hydraulique supposée de 0.5×10^{-4} m/s, le temps de transit varie entre 0.5 à 3 heures. A l'inverse une conductivité hydraulique de 10^{-6} m/s donne une gamme variant de 36

à 144 heures. L'essai de traçage du 16 avril 2019 a montré un temps d'arrivée de 48 à 72 heures sur l'ensemble des sources principales mesurées. L'hypothèse d'une conductivité hydraulique plus petite ou égale à 10^{-6} m/s est donc pratiquement écartée car il faut également compter le temps transit dans le karst. Une conductivité hydraulique de 0.5×10^{-4} m/s semble très élevée pour la nature des dépôts traversés. Une valeur entre **10^{-6} m/s** et **10^{-5} m/s** paraît être une bonne approximation en accord avec les résultats de l'essai de traçage et les données lithologiques.

6.3.2 Essais de traçage double

Les résultats de l'essai de traçage sont présentés sous la forme de courbes de restitution et de courbes cumulées. Seules les sources de La Scie, César-Guye et les sources Mélangées sont étudiées en détails. Concernant les autres sources, le manque de données ne permet pas d'analyses précises mais elles sont présentées à titre indicatif. L'ensemble des résultats d'analyse des échantillons manuels et des courbes de restitution sont présentés dans l'annexe 16.

Source de La Scie

La source de La Scie a été surveillée à haute résolution temporelle pour les deux traceurs. Sur le graphique ci-dessous (Fig.30), les données à haute résolution de la sulforhodamine B ne sont pas représentées car d'importantes divergences entre les mesures manuelles et automatiques ont été observées. Par contre les mesures manuelles et automatiques de l'uranine concordent très bien.

La courbe de restitution de la sulforhodamine B a tout de même été interprétée malgré sa faible résolution. Les résultats des analyses sont à prendre avec prudence. La courbe montre la présence de deux pics principaux (Fig.30), le second étant le plus élevé. Le temps d'arrivée des premières molécules (Tab.19) de traceurs est de 3 jours alors que le temps du pic principal est de 13 jours avec une concentration maximale de 2.2 ppb. Le pic semble être corrélé avec l'augmentation du débit à la source. La vitesse d'arrivée est de 18 m/h ce qui est une valeur typique pour un système karstique. Pour finir le taux de restitution estimé est de 2% ce qui est faible.

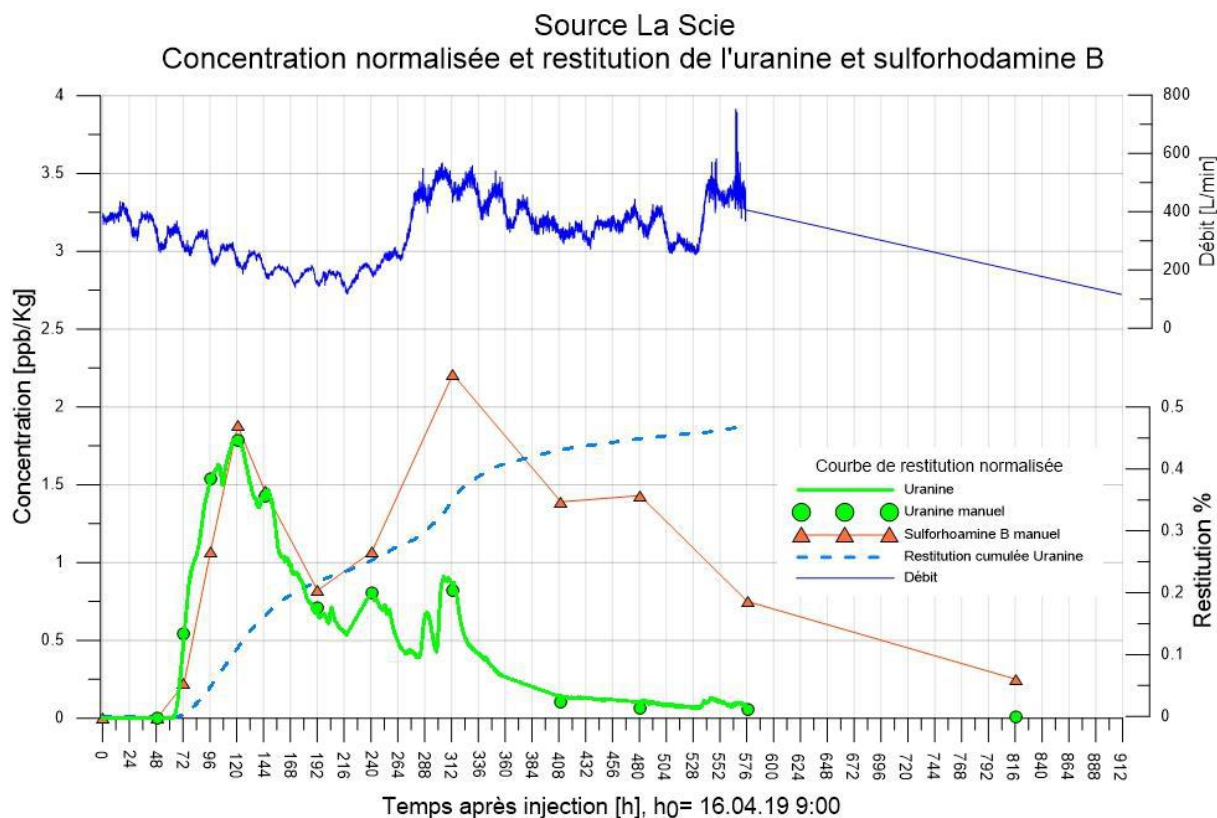


Figure 30: Courbes de restitution normalisée et courbe cumulée à la source de La Scie.

Tableau 19 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulée. Valeurs manuelles notées en italique.

Traceur	Restitution %	t. arrivée [h] / [j]	t. pic [h] / [j]	v. arrivée [m/h]	v. pic [m/h]	Conc. max [ppb]
SulfoB	2	72.8/3.0	313.3/13.0	18.3	4.3	2.2
Uranine	0.5	63.3/2.6	123.6/5.2	21.0	10.7	2.7

La courbe de restitution de l'uranine présente un seul pic principal (Fig.30) suivit deux plus petits pics avant la rechute complète de la concentration. Le temps d'arrivée des premières molécules (Tab.19) de traceurs est de 2.6 jours alors que le temps du pic principal est de 5.2 jours avec une concentration (max) de 2.7 ppb. Le deuxième petit pic semble corrélé avec la montée du débit à la source. La vitesse d'arrivée est d'environ 21 m/h typique pour un système karstique. Le taux de restitution est de 0.5 % ce qui est très faible en particulier pour le karst où des taux beaucoup plus élevés peuvent être attendus.

Les deux courbes de restitution montrent des similitudes comme la présence de deux pics marquées (Fig.30) et les temps d'arrivée. Sur la courbe de restitution normalisée (Fig.30), les premiers pics pour les deux traceurs se superposent très bien. Le taux de restitution reste faible pour les deux traceurs (Tab.19), cependant ce taux est plus faible pour l'uranine.

Pour le dimensionnement du conduit karstique, les deux paramètres suivant ont été calculés :

- Surface de la section transversale S : **1.6 m²**
- Rayon hydraulique r_h : **0.7 m**

Ces résultats semblent surévalués par rapport à la taille de source sans être excessifs. Cependant, il faut tenir compte du retard pris par le traceur dans la zone non saturée ce qui réduit la vitesse du pic et par conséquent augmente la surface de la section transversale et le rayon hydraulique. De ce fait, ces chiffres peuvent être revus à la baisse.

Source César-Guye

La source César-Guye a été surveillée à haute résolution pour les deux traceurs. Sur le graphique (Fig.31), les mesures manuelles et les mesures automatiques concordent très bien.

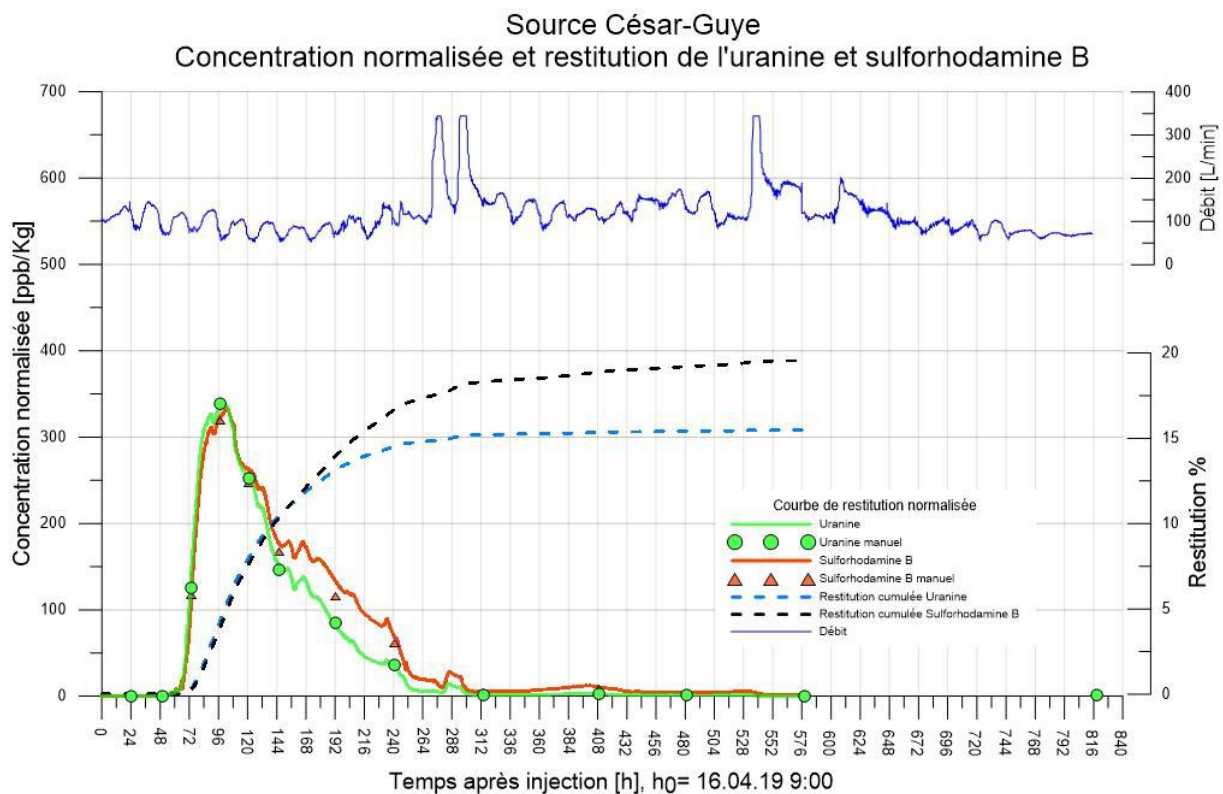


Figure 31: Courbes de restitution normalisée et courbe cumulée à la source César-Guye.

Tableau 20 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulée.

Traceur	Restitution %	t. arrivée [h] / [j]	t. pic [h] / [j]	v. arrivée [m/h]	v. pic [m/h]	Conc. max [ppb]
SulfoB	20	52.5/2.2	102.8/4.3	16.8	8.6	334.3
Uranine	15	51.9/2.2	101.9/4.2	16.9	8.6	506.2

Les deux traceurs montrent des courbes de restitution normalisées (Fig.31) similaires à un seul pic avec une montée rapide et une chute plus lente. Elles sont semblables pour les deux traceurs, cependant un léger effet de « tailing » est perceptible pour la sulforhodamine B. Le temps d'arrivée de la sulforhodamine B et de l'uranine est de 2.2 jours (Tab.20) alors que le temps du pic est de 4.2-4.3 jours. La vitesse d'arrivée est alors quasiment la même pour les deux traceurs à savoir de 16.8-16.9 m/h. Ces derniers ont par conséquent un comportement très similaire cependant le taux de restitution n'est pas le même. Il est de 20 % pour la sulforhodamine B alors que pour l'uranine il n'atteint que les 15 %. Les vitesses d'arrivée sont rapides en particulier pour l'essai diffus (uranine) mais reste normale pour un milieu karstique (conduits).

Le dimensionnement du conduit karstique donne les valeurs suivantes pour les deux paramètres :

- *Surface de la section transversale S : 0.7 m²*
- *Rayon hydraulique r_h : 0.5 m*

Les résultats obtenus semblent réalistes mais comme dans le cas de la source de La Scie, il faut tenir compte du retard pris par le traceur dans la zone non saturée. Ces chiffres peuvent donc être revus à la baisse.

Le temps et la vitesse de transit moyen (Tab.21) sont très proches. La dispersivité et le coefficient de dispersion sont par contre plus élevés pour la sulforhodamine B que pour l'uranine ce qui traduit un étalement de la courbe plus marquée pour la sulforhodamine B (tailing).

Tableau 21 : Temps de transit moyen, vitesse moyenne, dispersivité longitudinale et coefficient de dispersion longitudinale.

Traceur	t. moyen [h] / [j]	v. moyen [m/j]	αL [m]	DL [m ² /j]
SulfoB	125.1/5.2	168	43.3	7271.2
Uranine	117.7/4.9	179.5	31.8	5705.6

L'ensemble des paramètres de calculs et des résultats sont disponibles dans l'annexe 16.2.

Sources Mélangées

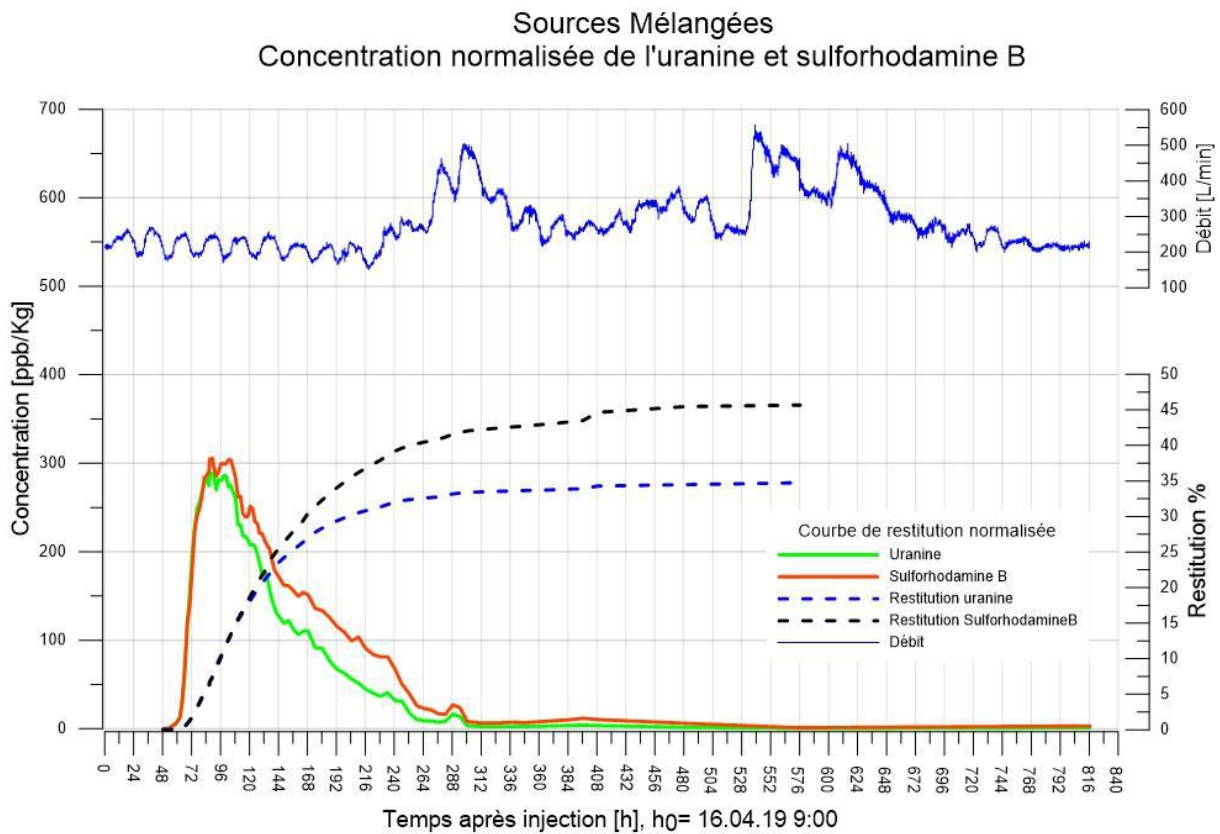


Figure 32 : Courbes de restitution normalisée et courbe cumulée aux sources Mélangées.

Tableau 22 : Tableau récapitulatif des données d'analyses des courbes de restitution et cumulées.

Traceur	Restitution %	t. arrivée [h] / [j]	t. pic [h] / [j]	v. arrivée [m/h]	v. pic [m/h]	Conc. max [ppb]
SulfoB	46	52.5/2.2	88.5/3.7	26.1	15.5	305.3
Uranine	35	49.5/2.1	88.5/3.7	27.6	15.5	433.4

Le mélange des sources (César-Guye et trois Combes) a été surveillé avec une résolution moyenne à l'aide de l'échantillonneur automatique pour les deux traceurs. Il n'y a donc pas de mesures manuelles disponibles. Comme pour la source César-Guye, les deux traceurs montrent des courbes de restitution normalisées (Fig.32) similaires à un seul pic avec une montée abrupte et une chute plus lente. Elles sont semblables pour les deux traceurs avec un pic de même intensité en [ppb/Kg], cependant un léger effet de « tailing » est visible pour la sulforhodamine B.

Le temps d'arrivée de la sulforhodamine B et de l'uranine est de 2.1-2.2 jours (Tab.22) alors que le temps du pic est de 3.7 jours. La vitesse d'arrivée est alors quasiment la même pour les deux traceurs à savoir de 26.1-27.6 m/h. Cette vitesse est plus élevée qu'à la source de La Scie et César-Guye cependant elle est biaisée du fait que l'eau passe par des canalisations avant

d'arriver au point de mesure. Les deux traceurs ont un comportement très similaire sauf pour le taux de restitution. Il est de 46 % pour la sulforhodamine B alors que pour l'uranine il n'atteint que les 35 % ce qui est élevé mais pas excessif pour un milieu karstique. Les concentrations maximales sont par contre moins élevées qu'à la source de César-Guye (Tab.22).

Le dimensionnement du conduit karstique n'a pas été réalisé du fait que les eaux des Sources Mélangées proviennent de quatre sources bien distinctes et que la vitesse du pic est faussée en raison du passage de ces eaux dans une canalisation artificielle avant mesure.

La dispersivité de l'uranine aux sources Mélangées est similaire à la dispersivité de l'uranine à la source César-Guye (Tab.23), cependant le coefficient de dispersion est beaucoup plus grand. Cela est dû à la vitesse de transit moyen qui est aussi plus élevé car les deux sont liés par la relation suivante : $D_L = \alpha_L * v_{moyen}$.

L'ensemble des paramètres de calculs et des résultats sont disponibles dans l'annexe 16.2.

Tableau 23 : Temps de transit moyen, vitesse moyenne, dispersivité longitudinale et coefficient de dispersion longitudinale.

Traceur	t. moyen [h] / [j]	v. moyen [m/j]	α_L [m]	DL [m ² /j]
SulfoB	-	-	-	-
Uranine	97.1/4.0	338	31.9	10769.8

Source de la Combe Nord, Centre et Sud

La mesure de la concentration de traceur est faite à partir d'échantillons manuels. En raison de la faible résolution disponible, les taux de restitution n'ont pas été calculés. Les vitesses approximatives d'arrivée et de pic sont respectivement de 16 m/h et 11 m/h. Les concentrations mesurées sont présentées graphiquement dans l'annexe 18.

Les temps/vitesses d'arrivée et de pics sont les mêmes pour les deux traceurs aux trois sources, cela est dû à la faible résolution (1 jour) qui ne permet pas de distinguer avec plus de précision. La concentration la plus élevée parmi toutes les sources a été mesurée à la source de la Combe Centre avec 467 ppb pour la sulforhodamine B et 743 ppb pour l'uranine. La source de la Combe Sud s'est révélée être la moins concernée des trois Combes. Les concentrations aux trois sources et pour chacun des deux traceurs ont évolué de manière très semblable (annexe 16.2 & 18).

Source des Raies, Annens Ouest et Ruisseau Sud

Les méthodes d'échantillonnage qualitatif au charbon actif ont permis de connaître la présence ou l'absence d'un passage de traceur aux sources. La seule source concernée par

l'essai de traçage est la source des Raies à Buttes (NE), dans les autres sources Annens Ouest et Ruisseau Sud aucune trace n'a été décelée (annexe 16.2).

Synthèse et interprétations générales

Pratiquement toutes les sources surveillées ont répondu positivement à l'essai de traçage sauf la source d'Annens Ouest et du Ruisseau Sud. Cela démontre que le système karstique est généralement bien connecté entre le point d'injection et les sources (Fig.33).

Globalement, pour chacune des sources, les deux traceurs se comportent de la même manière avec des temps d'arrivée similaires et une très bonne superposition des pics sur les courbes normalisées (Fig.30-32). Elles montrent toutes un seul pic dominant (annexe 18) à l'exception de la source de La Scie pour la sulforhodamine B. Un comportement similaire entre les deux traceurs et les sources indiquent une voie de cheminement unique par exemple via les mêmes conduits karstiques. Il s'agit vraisemblablement du même réseau qui relie les sources César-Guye et des trois Combes étant donné que les temps d'arrivée et de pics sont très proches. Une remontée de la concentration en corrélation avec le débit est marquée par un 2^{ème} pic raide à environ 300 h pour la source de la Scie et par un léger pic à environ 290 h pour la source César-Guye et les sources Mélangées. Cette remontée est probablement due à la poussée du traceur piégé dans la zone vadose avec l'arrivée de précipitations.

En comparaison avec la source César-Guye et les sources des trois Combes, la source de La Scie est clairement moins concernée par l'essai de traçage en affichant des taux de restitution très faibles. Ces résultats combinés avec sa situation géographique laisse à penser que son bassin versant se situe plutôt à La Maison Neuve alors qu'il est certain que le bassin versant de César-Guye et des trois Combes concerne surtout le plateau des Bourquins.

Le taux de restitution totale est de 48 % pour la sulforhodamine B et de 35.5 % pour l'uranine. Cela signifie que $100 - 48 = 52$ % de sulforhodamine B et $100 - 35.5 = 64.5$ % d'uranine se sont soit écoulés ailleurs, soit restés emprisonnés (absorption) dans la zone vadose dans les couches superficielles ou encore dans l'épikarst par exemple. Le taux de restitution de l'uranine a toujours été plus faible que celui de la sulforhodamine B. En considérant les deux traceurs comme ayant un comportement similaire (dégradation, absorption), le pourcentage de traceur retenu par la couverture protectrice est de $48 - 35.5 = 12.5$ %. Cela signifie par conséquent que la couverture protectrice constituée de moraine jurassienne et de couverture pédologique à un effet réduit sur la filtration de l'eau. Toutefois, les traceurs ont bel et bien des comportements différents à la lumière et en interactions avec le sous-sol. La sulforhodamine B étant très facilement absorbée, il se pourrait que le pourcentage de retenu puisse être revue à la hausse.

Résultats de l'essai de traçage double du 16 avril 2019

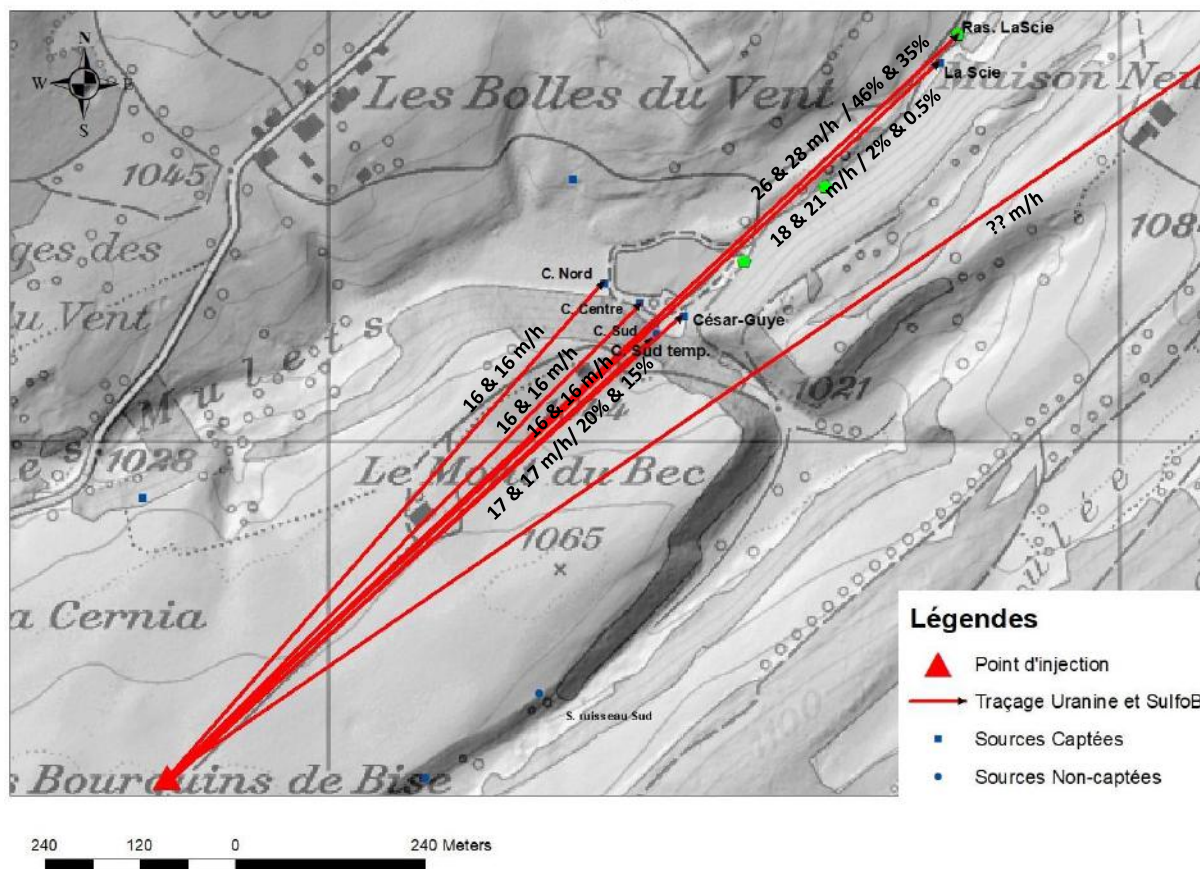


Figure 33: Carte synthétique de l'essai de traçage double avec vitesse d'arrivée aux sources. Deux vitesses et parfois deux taux de restitution indiqués, les premiers pour la sulforhodamine B (S) et les seconds pour l'uranine (U) tel que « S & U m/h / % & U% ».

Pour les trois sources surveillées attentivement, le temps d'arrivée et du pic sont très rapprochés à l'échelle de la courbe, en effet le premier pic apparaît entre 1 et 2 jours après le passage des premières molécules de traceurs. Le pic est donc très raide lors de sa montée. Par contre, la chute de la concentration est plus lente et le léger « tailing » observé sur les courbes de la sulforhodamine B est vraisemblablement dû au retard pris par le traceur à cause d'un effet d'adsorption et désorption dans l'épikarst par exemple. Ce traceur est connu pour sa tendance forte à l'absorption (Schudel & al., 2002).

Les temps/vitesses d'arrivée et de pic entre la sulforhodamine B et l'uranine sont identiques ou sinon l'uranine montre une légère avance (Fig.33). Cette observation est contre-intuitive au premier abord étant donné que le traceur de l'essai diffus (uranine) est censé être plus lent en raison des dépôts superficiels à traverser. Une hypothèse avancée est que la sulforhodamine B injectée dans la fosse ait pris du retard pour rejoindre la zone phréatique d karst dans l'épikarst. En effet, il est su que l'épikarst peut agir comme un aquifère perché (Doerfliger & al., 1999) et ainsi ralentir la progression du traceur. Il faut rappeler que les deux essais ne sont pas exactement situés au même endroit mais avec environ 4 m d'écart. De plus,

il est démontré que le passage du traceur au travers la couverture protectrice peut se faire rapidement en moins de 3 jours. La variation spatiale du karst à petite échelle a donc des conséquences visibles.

Le dimensionnement des conduits karstiques situent la surface des sections transversales autour du mètre carré. Même si les chiffres semblent légèrement surévalués, ils permettent de situer grossièrement la géométrie du réseau karstique. Les résultats correspondent tout de même à l'ordre de grandeur attendu pour un aquifère de petite envergure.

Pour terminer la source des Raies s'est révélée positive à l'essai pour les deux traceurs (annexe 19). Deux hypothèses peuvent expliquer cela. La première est que les traceurs rejoignent les aquifères plus profonds du Malm (Jurassique) en passant par le ruisseau de l'Echelier étant donné qu'il est alimenté par les sources. Il est connu que ce ruisseau, avant de rejoindre la rivière de Le Buttes, se perd plusieurs fois dans le karst. La seconde hypothèse est que des infiltrations sous-aquifères rejoignent des systèmes karstiques plus profonds. Dans son rapport, Matthey, B. (1994) suggère qu'une partie de l'eau s'infiltrant sur le plateau des Bourquins est capable de rejoindre les calcaires du Jurassique supérieure (Malm) en traversant les alternances marno-calcaire du Crétacé inférieure considérées comme aquitard. Une telle affirmation semble réaliste, en effet selon le rapport d'un essai de traçage du centre d'hydrogéologie (Simeoni, 1976), une autre connexion hydrogéologique existe entre l'emposieu situé à côté de l'étang des Sagnes aux Bolles-du Vent (CH1903 527297/ 190250) et la source des Raies (Tab.4) et du Tronc (CH1903 530920/192345) dans la vallée de Buttes. A noter que la source du Ruisseau Sud n'est pas concernée par l'essai de traçage, son bassin versant est donc limité sur le plateau des Bourquins

7 Modèle conceptuel

7.1 Délimitation et épaisseur de l'aquifère

Le bassin versant hypothétique a été établi sur la base de la géologie locale en respectant les affleurements de la Pierre Jaune de Neuchâtel, de l'emplacement de faille et sur la base des résultats d'essais de traçage (connexions hydrogéologiques) (annexe 20).

Pour entrer plus en détails, le bassin versant hypothétique correspond aux lambeaux de la Pierre Jaune à l'endroit du plateau des Bourquins et de La Maison Neuve. Les éboulis de pentes adjacents sont compris dans cette surface du fait qu'une connexion hydrogéologique évidente existe entre les deux lambeaux selon l'essai de traçage. La limite Nord-Est est définie par le passage d'une faille décrochante senestre marquée topographiquement par une dépression. Le lambeau des Châteaux n'est pas compris dans le bassin versant car il est déconnecté (hydro-)géologiquement des autres lambeaux (Fig.3) par les Marnes d'Hauterive à comportement aquitard.

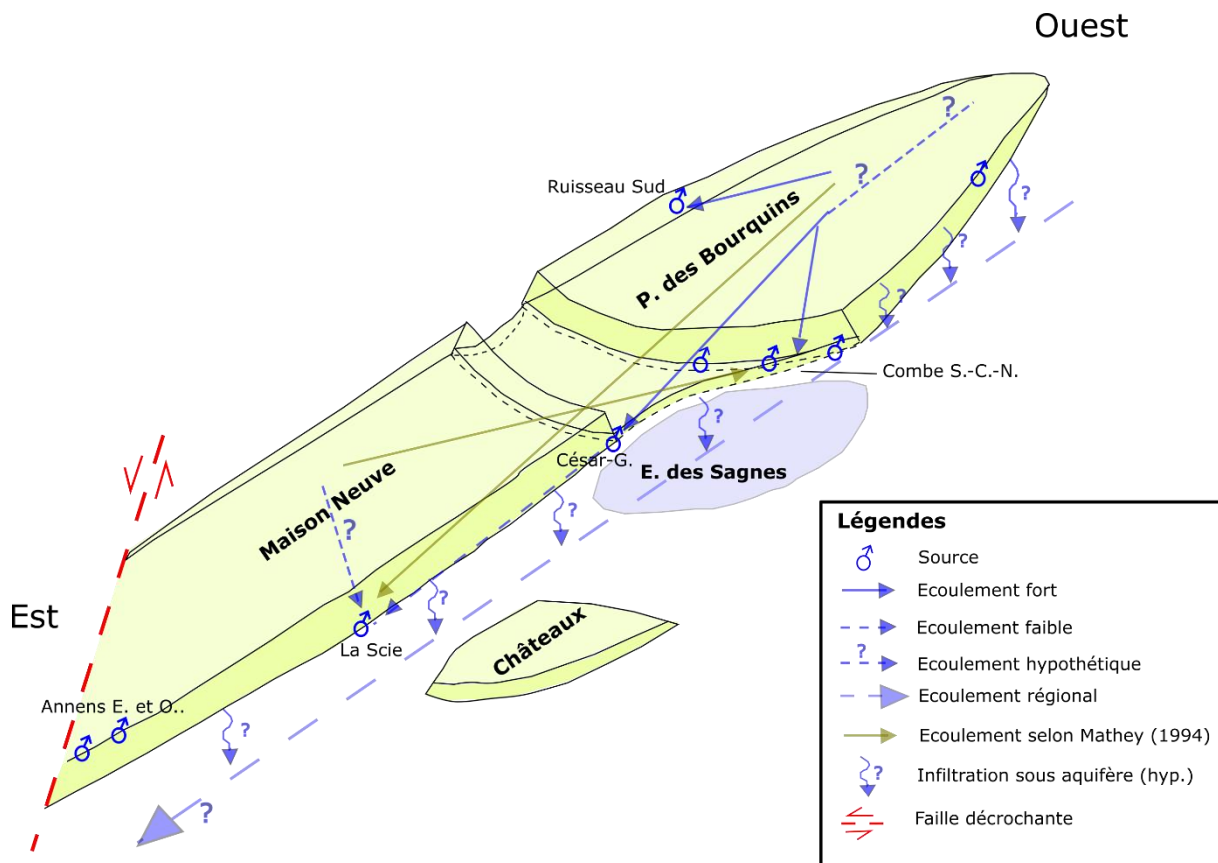


Figure 34 : Modèle synthétique de l'aquifère basée sur les observations géologiques et les essais de traçage. Le lambeau des Châteaux est indiqué mais n'est pas compris dans le système aquifère étudié.

Avec l'observation de la géologie locale (annexe 1.2 & 2) et des données géophysiques (Fig.18-22 & 23), il est possible de définir l'épaisseur de l'aquifère et sa variation (Fig.34). Sur le plateau des Bourquins, l'aquifère (Pierre Jaune) atteint son épaisseur maximale au Mont-du-Bec avec ≈ 50 m et s'affine en allant vers l'Ouest et sur la bordure Nord. Topographiquement

à l'Est et au Nord-Est du plateau, les pentes en bordure sont très raides ($>45^\circ$) et hautes de $\approx 30-40$ m alors qu'à l'Ouest les pentes sont beaucoup moins prononcées ($<45^\circ$) voir absentes. A la Maison Neuve, l'épaisseur maximale de l'aquifère est $\approx 40-50$ m et s'affine vers le Sud-Est. Les pentes dans la bordure Nord et Ouest sont aussi très raides ($>45^\circ$) et hautes de $\approx 30-40$ m.

Les connexions des sources avec l'aquifère sont représentées (Fig.34) grâce aux résultats des essais de traçage de la présente étude et ceux réalisés pour l'établissement de la zone de protection (Matthey, 1994 & 1995). Le modèle ci-dessus (Fig.34) suppose la présence d'un écoulement local dans les lambeaux de Pierre Jaune de Neuchâtel et régional dans les formations du Malm par infiltration au travers les Marnes d'Hauterive. Cette dernière affirmation reste cependant hypothétique et demande à être vérifiée.

Le niveau piézométrique exact n'a pas pu être défini en raison de l'hétérogénéité du karst et en l'absence d'infrastructures accessibles permettant sa mesure (piézomètre, puits). L'emplacement des sources pérennes et temporaires peuvent néanmoins donner une indication sur le niveau piézométrique local. De plus, ce dernier est en général subhorizontal dans les systèmes karstiques en raison de la forte porosité de la zone saturée.

7.2 Modèle d'écoulement dans le karst

A partir des connaissances issues de la littérature et des observations de terrain lors de la surveillance aux sources et des essais de traçage, un modèle général d'écoulement des eaux souterraines dans l'aquifère est proposé (Fig.35).

Ouest

Est

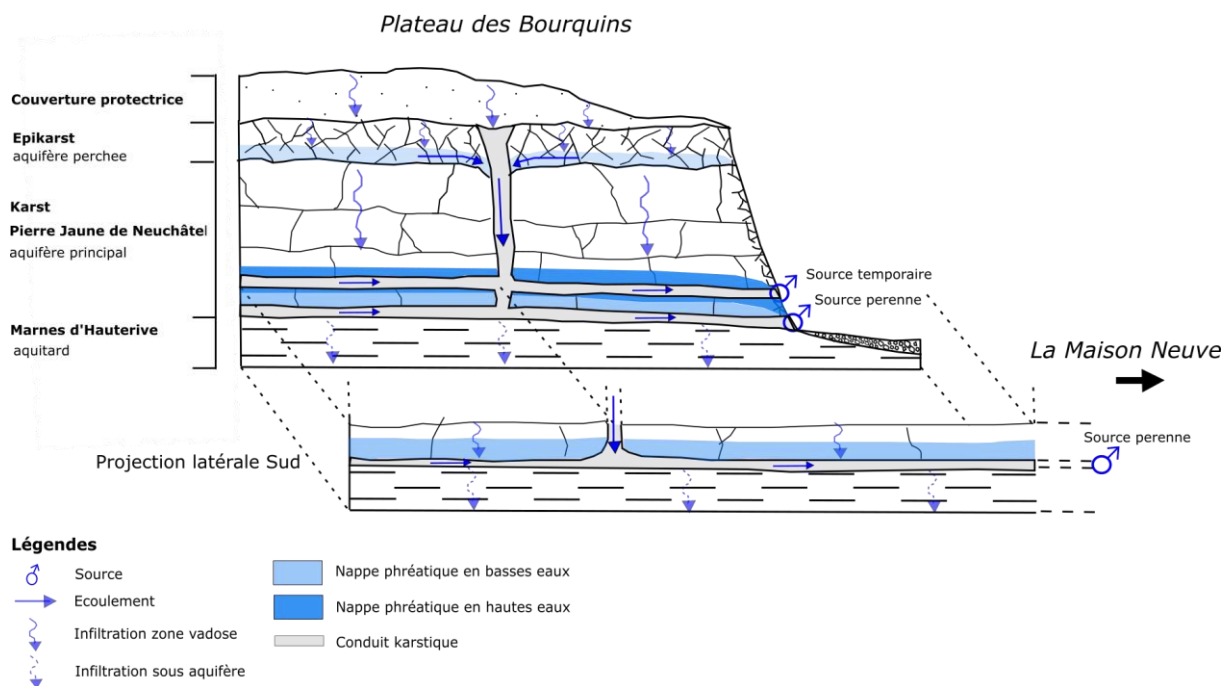


Figure 35: Modèle d'écoulement des eaux souterraines aux Bourquins-de-Bise avec une projection pour la connexion à La Maison Neuve inspiré de Jeannin et Grasso (1995). Sans échelle.

En atteignant le sol, l'eau de pluie traverse par infiltration les dépôts de la couverture protectrice pour atteindre l'épikarst. L'épikarst est une zone sujette à une altération prononcée avec de nombreuses fractures ce qui lui procure une conductivité hydraulique élevée néanmoins la roche « saine » sous-jacente est moins perméable. Pour cette raison, cette zone est capable d'agir comme un aquifère perché dirigeant les flux horizontalement vers des points d'infiltrations concentrées, des fractures ou conduits par exemple (Doerfliger & al., 1999). L'essentiel des flux au travers le karst a lieu au travers les conduits, cependant la faible porosité de la matrice calcaire permet le passage de flux plus lents. Le modèle (Fig.35) présente un système de drainage de basses eaux où les sources sont actives tout au long de l'année (pérenne) et un système de hautes eaux où des sources sont actives temporairement lors de la période de crue. L'aquifère est limité par l'interface marne/calcaire bien que des flux aux travers les Marnes d'Hauterive semblent existés selon les essais de traçage de Matthey B. (1994) et de Simeoni G. (1976).

Afin de représenter la connexion du système avec les sources au pied de La Maison Neuve (César-Guye et La Scie), une projection latérale Sud montre la continuité du réseau karstique vers l'Est (Fig.35). A noter que la zone de l'étang constitue un point bas par rapport au plateau des Bourquins et que la topographie du « couloir » séparant ce dernier et La Maison Neuve remonte vers le Sud (Fig.3).

7.3 Bilan hydrogéologique

7.3.1 Méthodes et hypothèses pour l'établissement du bilan

Le bilan hydrogéologique de l'aquifère établit la balance entre les flux d'eau entrants et sortants de celui-ci. Il permet également de calculer la surface du bassin versant drainée par les sources et de vérifier ou de démentir les hypothèses hydrogéologiques de départ. Le calcul du bilan se base sur la relation suivante (Eq.30) qui indique que les précipitations tombées à la surface du bassin versant équivalent à la somme du ruissellement, de l'infiltration, de l'évapotranspiration et de la variation du stockage dans l'aquifère.

$$P = R + I + ET + \Delta S \quad (30)$$

P : précipitations

R : ruissellement de surface, I : infiltration ou recharge de l'aquifère

ET : évapotranspiration, ΔS : variation du stockage

Lorsque les précipitations (P) atteignent le terrain, une partie ruisselle à la surface, une autre s'évapotranspire (ET) et la dernière partie s'infiltré dans le sous-sol (I). La variation du stockage (ΔS) exprime un gain ou une perte d'eau stockée dans l'aquifère. En général, sous l'hypothèse d'un état d'équilibre permanent, la variation du stockage est proche de 0 après environ 1 année (Gilli & al., 2016). En partant du principe que la variation du stockage (ΔS) s'approche

de 0 pour l'ensemble de la durée des mesures (octobre 2018 à mai 2019), l'égalité suivante doit être satisfaite (Eq.31) :

$$Q_{entrants} = Q_{sortants} \quad (31)$$

$Q_{entrants}$: flux entrants dans l'aquifère, $Q_{sortants}$: flux sortants de l'aquifère

Les flux entrants dans l'aquifère étudié sont représentés par l'infiltration I (recharge) des eaux de pluies ou de fonte des neiges. Les flux sortants sont mesurés aux sources principales, le suintement est négligé car rarement observé sur le lieu d'étude. A partir de l'infiltration et des mesures du débit aux sources, l'aire d'alimentation des sources est calculée de la manière suivante (Eq. 32) :

$$A_{bv} = \frac{Q_{total\ sources}}{I} \quad (32)$$

A_{bv} : Surface du bassin versant en [m²]

$Q_{total\ sources}$: Débit total d'eau passée aux sources en [m³/an], I : Infiltration cumulée en [m/an]

Dans le cas de cette étude, le bilan hydrogéologique de l'aquifère est calculé à partir des données météorologiques de *MétéoSuisse* (climap) récoltées à la station de mesure de l'Auberson à 1100 m d'altitude. Seules les données de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) sont disponibles. Le ruissellement, l'infiltration ne sont pas directement mesurés, ils sont soit calculés ou bien estimés. A noter que la station de l'Auberson met à disposition deux valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP), l'une calculée à partir de l'équation de Primault (1962) (formule empirique) et l'autre à partir de l'équation de Penman-Monteith (FAO) (formule physique). Les deux valeurs obtenues sont très différentes (Primault : 121 mm et PM : 243 mm) et la valeur de Primault semble faible pour la région. La valeur obtenue avec l'équation de Penman-Monteith a été retenue car plus cohérente. Elle paraît donner de meilleurs résultats selon une étude de la Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tanikon (Calanca & al., 2011). Dans notre cas, la valeur de l'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être utilisée telle quelle car elle se rapproche de la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETP_≈ETR) qui exprime la quantité d'eau évaporée en tenant compte des propriétés du sol et du milieu (Gilli & al., 2016).

7.3.2 Résultats et calculs du bassin versant

Les précipitations mesurées montent à 905 mm de colonne d'eau pour la période du 5 octobre 2018 au 10 mai 2019 ce qui correspond en 7 mois à près de 70 % des précipitations de la dernière année en cours (juin 2018 à juin 2019) (Tab.25). L'évapotranspiration réelle (ETR) est de 243 mm de colonne d'eau ce qui correspond à 27% des précipitations (Tab.25). Elle est donc légèrement sous-estimée par rapport à l'approximation générale pour la Suisse d' $ETR =$

$1/3 P$, ce qui semble tout à fait normal en raison de l'altitude et de la période de mesure durant les mois froids.

L'infiltration est estimée sur la base du calcul du bassin versant de l'ensemble des sources. En faisant varier le taux d'infiltration I , la surface du bassin versant calculé varie aussi. De cette manière, la surface du bassin versant calculée est comparée avec la surface du bassin versant « géologique » (affleurements de l'Hauterivien supérieur), lorsque les deux sont suffisamment proches, le taux d'infiltration I est alors considéré comme correctement estimé (Tab.24).

Tableau 24 : Recherche du taux d'infiltration I à l'aide du calcul du bassin versant.

Taux I %	P [mm]	I [mm]	Surface BV estimé [m ²]	Surface BV calculé [m ²]	Différence BV %
33	905	301	803000	958355	+19
40	905	362	803000	798629	-0.5

Dans notre cas, il est estimé à 40% des précipitations soit 362 mm de colonne d'eau durant la période de mesure. Par conséquent, l'infiltration est plus importante que le tiers ce qui paraît logique en milieu karstique et avec des dépôts morainiques relativement perméables ($K \approx 1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s) et peu épais. Toutefois, des taux nettement plus élevés sont attendus dans les régions karstiques dépourvues de couverture protectrice et avec la présence de points d'infiltration préférentiels tels que des dolines, gouffres et lapiez. Par comparaison, sur le site d'étude à La Côte-aux-Fées, il y a donc moins de recharge rejoignant les eaux souterraines et plus de ruissellement de surface. La couverture du Quaternaire favorise donc une infiltration diffuse plus lente mais aussi un taux plus faible. De part ces constatations, il est évident que les zones de faibles épaisseurs de couverture protectrice comme au Mont-du-Bec sont sujettes à des taux d'infiltrations plus importants par rapport aux zones de grandes épaisseurs au Bourquins-de-Vent.

Avec 40 % d'infiltration, la surface du bassin versant calculée est de 798629 m² pour l'ensemble des sources (Tab.25) et donne une différence tout fait satisfaisante vis-à-vis de la surface du bassin versant hypothétique (géologique) avec 0.5 % d'erreur (Tab.24).

Quant au ruissellement, il est simplement obtenu par soustraction telle que $R = P - I - ETR$. Le ruissellement est donc de 300 mm de colonne d'eau soit de 33 % des précipitations (Tab.25).

Les bassins versant ont aussi été calculés indépendamment pour la source de La Scie, César-Guye et le groupe des trois Combes et Ruisseau Sud (Tab.25). Le bassin versant de la source de La Scie est de 294478 m² et est bien supérieure à la surface géologique de La Maison Neuve (225700 m²) ce qui indique que cette source draine forcément une partie du plateau des

Bourquins comme confirmé par les essais de traçage. Le bassin versant des trois Combes et de la source du Ruisseau Sud est de 406793 m² et celui de César-Guye est de 95358 m². Le total des deux donne une surface de 502151 m² avec une différence de -8% par rapport à la surface géologique du plateau des Bourquins (545500 m²). Il semble alors que la source de La Scie ait un bassin versant étendu entre La Maison Neuve et une partie du plateau des Bourquins. Le bassin versant de César-Guye et des trois Combes est principalement situé sur le plateau des Bourquins et une partie de La Maison Neuve comme observé par Matthey, B. (1994).

Tableau 25 : Bilan hydrogéologique et calculs du bassin versant pour l'ensemble des sources et chaque source individuellement.

Bilan hydrogéologique et calcul du bassin versant pour la période du 5 octobre 2018 au 10 mai 2019 (212 jours)

Abréviation :

P : précipitations ETR : évapotranspiration Q : débit aux sources Vtot : volume d'eau passé aux sources
I : infiltration R : ruissellement BV: bassin versant S : surface BV

Aquifère : bilan hydrogéologique et bassin versant

P [mm]	I [mm]	ETR [mm]	R [mm]	Qtot moyen [L/min]	Vtot [m3]	S. estimée [m2]	S. calculée [m2]
905.3	362.0	243.1	300.2	920	289200.0	803000	798629

Différence BV % -0.5

Calcul du bassin par source individuellement

Source	Code	I [mm]	Qtot moyen [L/min]	Vtot [m3]	S. calculée [m2]	% S.
La Scie	CAF1	362	340	107360	296478	37.1
César-Guye	CAF 4	362	110	34530	95358	11.9
Combe N.+ C.+ S.+ R. Sud	CAF 6-8 +11	362	470	147300.0	406793	50.9
Total					798629	100.0

Les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques ainsi que la balance des flux entrants et sortants sont schématisés dans la figure ci-dessous (Fig.36) :

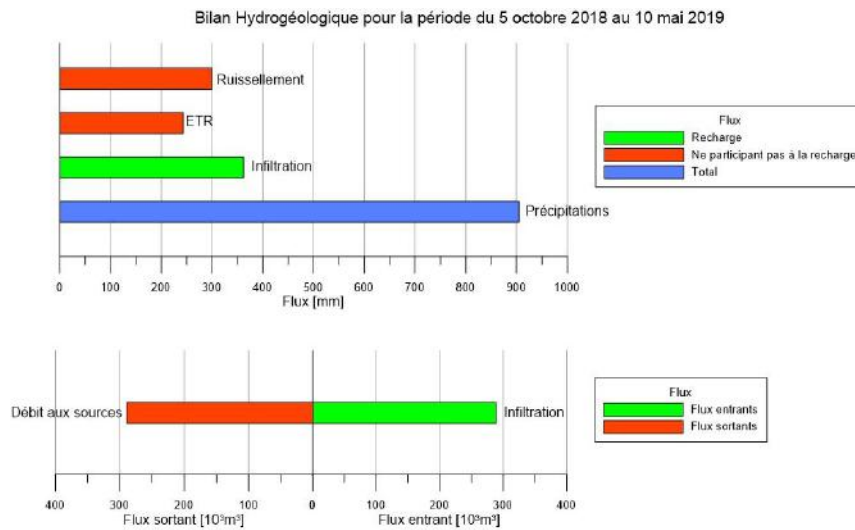


Figure 36 : Bilan hydrogéologique pour l'ensemble des sources mesurées.

7.4 Estimation de la porosité efficace du massif karstique

La porosité efficace n_e de la zone saturée du massif karstique est estimée en observant la descente du niveau piézométrique en période sèche. Elle est calculée en connaissant la différence du niveau piézométrique dans la nappe Δh au début et à la fin de la descente, le volume total d'eau passé aux sources V_w durant la période d'étiage et la surface du bassin versant (Eq.33) :

$$V_w = n_e * A * \Delta h \quad \text{et} \quad n_e = \frac{V_w}{A * \Delta h} \quad (33)$$

V_w : volume d'eau dans la zone saturée/ volume d'eau passé aux sources en [m³]

n_e : porosité efficace sans unité [-], A : surface du bassin versant en [m²], Δh : différence du niveau en [m]

Dans notre cas, la source temporaire de la Combe Sud était en hautes eaux le 10 mai 2019 puis une baisse progressive du débit et du niveau piézométrique a été observé jusqu'à l'assèchement complet de cette source et du trop-plein de la Combe Sud le 3 juin 2019. Les résultats suivants ont été obtenus en faisant varier la différence du niveau piézométrique Δh dans une gamme de valeurs correspondant aux observations sur le site (Tab.26) :

Tableau 26: Estimation de la porosité efficace en variant l'épaisseur saturée.

V_w [m ³]	A [m ²]	Δh [m]	n_e
32141	800000	1	4%
32141	800000	2	2%
32141	800000	3	1%

Il semble que la porosité efficace soit en tout cas inférieure à 5 %, ce qui est faible mais raisonnable. Les conduits karstiques ne représentent qu'un petit volume par comparaison au reste de l'aquifère (matrice rocheuse).

8 Synthèse et discussions

La surveillance à haute résolution des sources a permis d'observer en détail leurs comportements hydrodynamiques vis-à-vis des fluctuations météorologiques et saisonnières. Le débit des sources réagit rapidement à la suite d'évènements de précipitations ou de fonte des neiges mais la décrue est plus lente. Toutefois, il ne suffit que de quelques semaines sèches pour observer une baisse conséquente des débits. Les hydrogrammes démontrent que la source de La Scie est de loin la source la plus productive alors que la source César-Guyé affiche un débit moyen environ 3 fois moindre.

En ce qui concerne la qualité hydrochimique et microbiologique, les meilleures sources sont d'abord la source de La Scie puis la source de César-Guyé. En revanche, les sources de la Combe Nord, Centre et Sud affichent des résultats médiocres. Les nitrates ont toujours été détectés avec des concentrations inférieures à 20 mg/L alors que le seuil fixé par l'OPBD de 2016 est de 40 mg/L. Du point de vue de la microbiologie, les sources de La Scie et César-Guyé affichent les taux les plus faibles mais ne correspondent pas tout à fait aux exigences légales. La qualité supérieure de la source de La Scie par rapport aux autres sources est vraisemblablement due à son bassin versant situé à La Maison Neuve. Le recouvrement forestier y est plus important que sur le plateau des Bourquins et l'activité agricole y est réduite.

La campagne de géophysique a démontré que la répartition spatiale et l'épaisseur de la couverture protectrice est très variable sur le plateau des Bourquins. La couverture semble absente à l'Est sur le Mont-du-Bec alors que l'épaisseur maximale est de quasiment 10 m à l'Ouest aux Bourquins-de-Vent. Évidemment, cela impacte directement la vulnérabilité des eaux souterraines sous-jacentes. L'observation lithologique, les essais d'infiltration et l'essai de traçage indiquent que les dépôts morainiques additionnés de la couverture pédologique retiennent mal le passage de l'eau au travers. Lors de l'essai de traçage diffus (simulation de précipitations), le traceur a montré peu de difficultés à s'infiltrer dans le sol. En effet, une conductivité hydraulique moyenne de l'ordre de $1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s a été estimée.

L'essai de traçage double a procuré des résultats étonnants. Les deux expériences affichent des temps d'arrivée très similaires de 2 à 3 jours alors que leurs configurations d'injection étaient fondamentalement très différentes. L'hypothèse la plus plausible est que le traceur ait transité lentement dans l'épikarst depuis la fosse avant de rejoindre le réseau karstique. Les vitesses maximales de transit calculées sont de l'ordre de 20 m/h alors qu'elles varient entre 29 et 74 m/h pour l'essai de traçage de Matthey, B. (1994). Les valeurs obtenues lors de notre essai sont probablement plus proche de la réalité car le volume d'eau utilisé lors de l'injection est de 3 m³ contre 289 m³ pour l'essai réalisé en 1994 ce qui est excessif. Les taux de restitution démontrent bien un effet protecteur de la couverture protectrice avec une retenue du traceur d'environ 13 %. A noter que les conditions de l'essai diffus simulent une pluie avec

une lame d'eau de 600 mm, ce qui n'est pas très réaliste mais nécessaire à la poussée du traceur.

L'essai de traçage, l'hydrochimie et le calcul du bilan hydrologique affirment que le bassin versant de la source de La Scie est situé principalement à la Maison Neuve à l'inverse de la source César-Guye et des trois Combes où le bassin versant concerne principalement le plateau des Bouquins.

9 Conclusions et recommandations

Les principaux objectifs de cette étude ont été atteints. Premièrement, le régime hydrodynamique des sources et la qualité de leurs eaux ont pu être évalués. Dans un deuxième temps, l'étude a permis d'estimer concrètement la répartition et l'épaisseur de la couverture protectrice et d'en déduire les zones les plus vulnérables. Enfin, l'efficacité d'une faible couverture à protéger les eaux souterraines a été évaluée

Globalement, la source de La Scie est la plus adaptée tant du point de vue qualitatif que quantitatif. Cette affirmation est une bonne nouvelle étant donné qu'il s'agit de la seule source actuellement exploitée. Toutefois en période d'étiage, son débit est insuffisant pour alimenter l'entier de la commune de La Côte-aux-Fées. La source César-Guye livre une eau de bonne qualité mais son débit ne permettrait pas de pallier à ce manque. Cette situation est paradoxale du fait que c'est en période sèche que le débit de la source est trop faible pour combler les besoins ($\approx 180 \text{ m}^3/\text{j}$). Néanmoins, elle permettrait de compléter en partie ce manque en augmentant la production en eau potable de la commune.

Les résultats de l'essai de traçage indiquent que les eaux souterraines sur le plateau des Bourquins restent vulnérables malgré la présence d'une épaisseur de 1.3 m de couverture protectrice sur le lieu de l'injection aux Bourquins-de-Bise. La majeure partie du plateau possède une épaisseur de couverture de moins de 2 m ce qui n'est pas suffisant pour garantir la qualité des eaux souterraines face à des contaminations d'origine agricole en surface. La zone de protection S2 est donc parfaitement justifiée à ces emplacements comme sur le Mont-du-Bec et le Nord du plateau des Bourquins. Cependant, à l'Ouest du plateau où l'épaisseur est conséquente, la zone de protection S2 pourrait être réévaluée à l'aide d'études complémentaires et éventuellement reclassée en zone de protection S3.

Cette étude relève encore plusieurs interrogations pouvant être éclaircies à l'aide d'études additionnelles. L'efficacité de la protection des eaux souterraines aux Bourquins-de-Vent est inconnue car l'épaisseur de la couverture protectrice y est importante et sa distance aux sources est plus grande vis-à-vis des essais de traçage précédents. Un nouvel essai de traçage diffus à cet endroit permettrait de connaître l'effet protecteur d'une couverture épaisse. L'essai de traçage du 16 avril 2019 affirme la connexion entre le plateau des Bourquins et la source des Raies à Buttes (NE). Cette connexion a deux explications possibles : la première est le passage de l'eau par le biais du ruisseau de l'Echelier alimenté par les sources du plateau des Bourquins et la seconde est l'infiltration d'eaux souterraines au travers les Marnes d'Hauterive. Là aussi un essai de traçage dans le ruisseau lèverait cette incertitude. Enfin, les échantillonnages destinés à l'analyse microbiologique de l'eau n'ont été réalisés que trois fois entre février et mai, il serait judicieux de faire de telles observations sur l'ensemble de l'année tous les mois en période de hautes eaux par exemple ou suite à l'épandage d'engrais. Ces analyses peuvent être complétées avec des mesures continues de la turbidité pour tenter d'établir une corrélation avec la qualité microbiologique des eaux. L'essai de traçage diffus a

permis de simuler une pluie avec une lame d'eau de 600 mm et a fonctionné avec succès, toutefois, cet essai n'est pas représentatif des conditions hydrologiques naturelles. La prochaine étape est la réalisation d'un tel essai mais avec des conditions plus réalistes, c'est-à-dire avec une lame d'eau plus petite de 100 mm par exemple sur une période de temps prolongée de plusieurs jours.

La qualité des eaux des sources peut être améliorée en limitant l'épandage d'engrais lors de précipitations abondantes sur les zones de faibles épaisseurs de la couverture protectrice et situées proche des captages comme c'est le cas pour le Mont-du-Bec et les prairies bordant l'étang des Sagnes. Le réseau de captage mériterait une remise en état en ce qui concerne l'étanchéité des chambres de captage et de la tuyauterie pour éviter les intrusions d'eau depuis la surface.

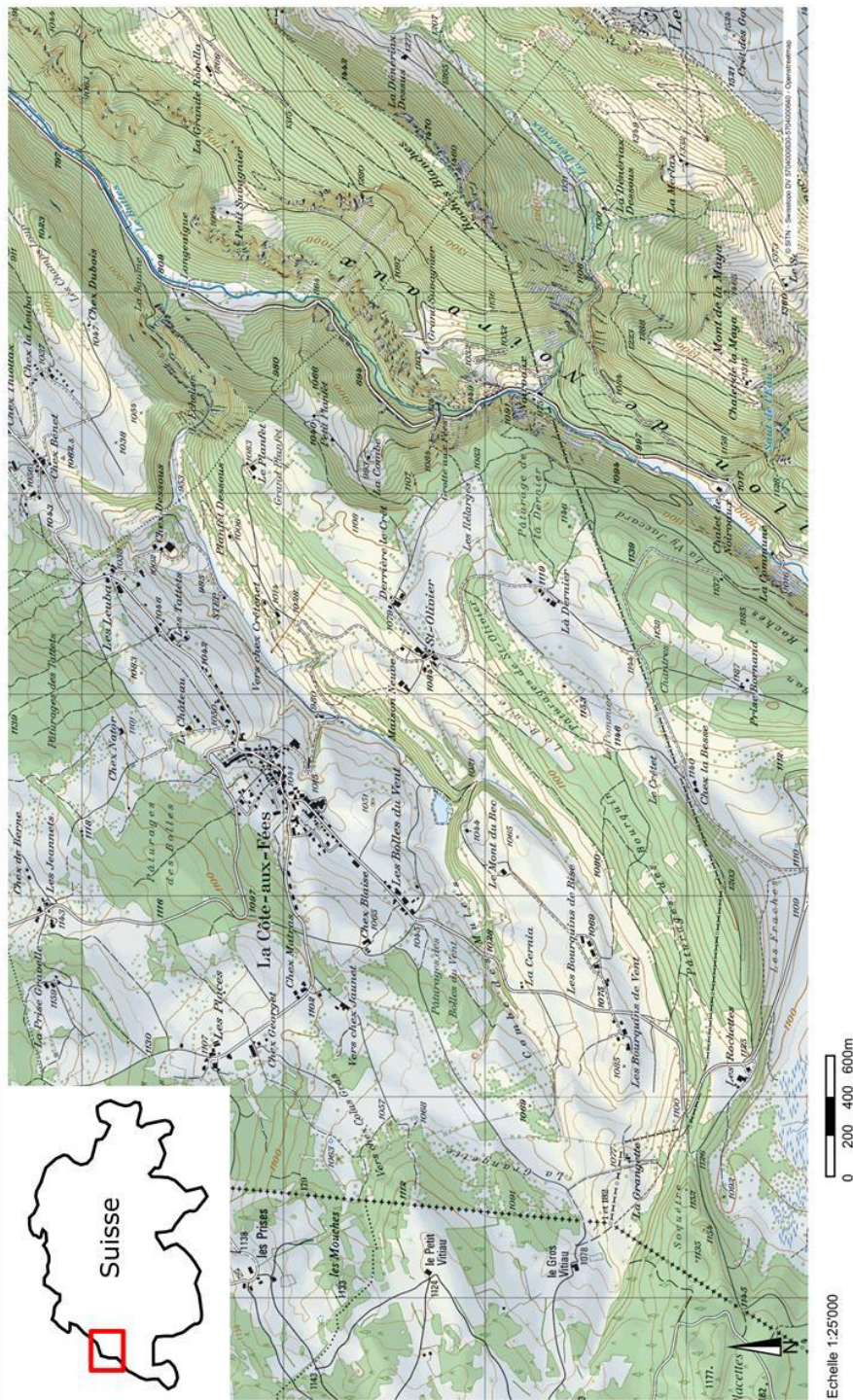
Bibliographie

1. Brühlmann, F., Conrad, R., Haldimann, P., Kempf, T., (2004). *Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique*. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP). Berne, Suisse. 141.
2. Carter, M. R., Gregorich, E. G. (2007) *Soil Sampling and Methods of Analysis 2nd Edition*. CRC Press, Boca Raton, USA. 1264.
3. Deyres S., (2007). *Guide méthodologique d'analyses de traceurs fluorescents par spectrométrie*. Travail de diplôme, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Suisse.
4. Doerfliger, N., Jeannin, P. Y., Zwahlen, F. (1999) *Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)*. *Environmental Geology* 39, 165-176.
5. Doerfliger, N., Zwahlen, F. (1998). *Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Application to groundwater protection zone: practical guide*. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP). Berne, Suisse. 56.
6. Dubois, J., Diament, M., Cogné, J-P. (2010) *Géophysique, cours et exercices corrigés. 4^{ème} édition*. Dunod, Paris, France. 256.
7. Dussart-Baptista, L., Massei, N., Dupont, J.-P., Jouenne, T., (2003). *Transfer of bacteria-contaminated particles in a karst aquifer : evolution of contaminated materials from a sinkhole to a spring*. *Journal of Hydrology* 284, 285-295.
8. Ekinci, Y. L., Türkeş, M., Demirci, A. & Erginal, A. E. (2013) *Shallow and deep-seated regolith slides on deforested slopes in Çanakkale, NW Turkey*. *Geomorphology* 201. 70-79.
9. Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology 4th Edition*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA. 598.
10. Field, M. S. (2005). *Assessing Aquatic Ecotoxicological Risks Associated with Fluorescent Dyes used for Water-Tracing Studies*. *Environmental and Engineering Geoscience* vol. XI, 4, 295–308.
11. Florsch, N., Muhlach, F. (2018) *Géophysique Appliquée pour tous 1 : méthodes électriques. Vol.1* Iste Editions, London, UK. 196.
12. Garofalo, F. (2014) *Physically constrained joint inversion of seismic and electrical data for near-surface application*. Thèse de doctorat, Politecnico di Torino, Italie. 151.
13. Geotomo Software (2010). *Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner (α, β, γ), dipole-dipole, inline pole-pole, pole-dipole equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays on land, water and cross-borehole surveys*. Geoelectrical Imaging 2D & 3D GEOTOMO SOFTWARE. Malaysia.
14. Gilli, E., Mangan, C., and Mudry, J. (2016) *Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications. 4^{ème} édition*. Dunod, Paris, France. 356.
15. Goldscheider, N. (2005) *Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany*. *Hydrogeology Journal* 13, 555-564.
16. Jeannin, P.-Y. (1998). *Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques*. Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Suisse. 237.
17. Kale, V. (2016) *Consequence of Temperature, pH, Turbidity and Dissolved Oxygen Water Quality Parameters*. *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol.* Vol. 3, 8, 186-190.
18. Kiraly, L.(1973).*Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel*. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 96, 11-15.
19. Kranjc, A.(1997). *Tracer in Hydrology : Proceedings of the 7th International Symposium on Water Tracing*. Taylor and Francis, London, UK. 464.
20. La Côte-aux-Fées, commune (2019). Page web officiel de la commune de La Côte-aux-Fées. Site internet : www.lacote-aux-fees.ch
21. MacDonald, A. M., Maurice, L., Dobbs, M. R., Reeves, H. J. & Auton, C. A. (2012) *Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment*. *Journal of Hydrology* 434-435, 130-141.
22. Malard, A., Jeannin, P.-Y.(2013). *SWISSKARST : Aquifères karstiques de Suisse. Une approche pour une meilleure gestion et exploitation des eaux souterraines karstiques*. *Aqua and Gas* 7-8, 22-27.
23. Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution (Groundwater vulnerability to contamination). Base de la cartographie*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

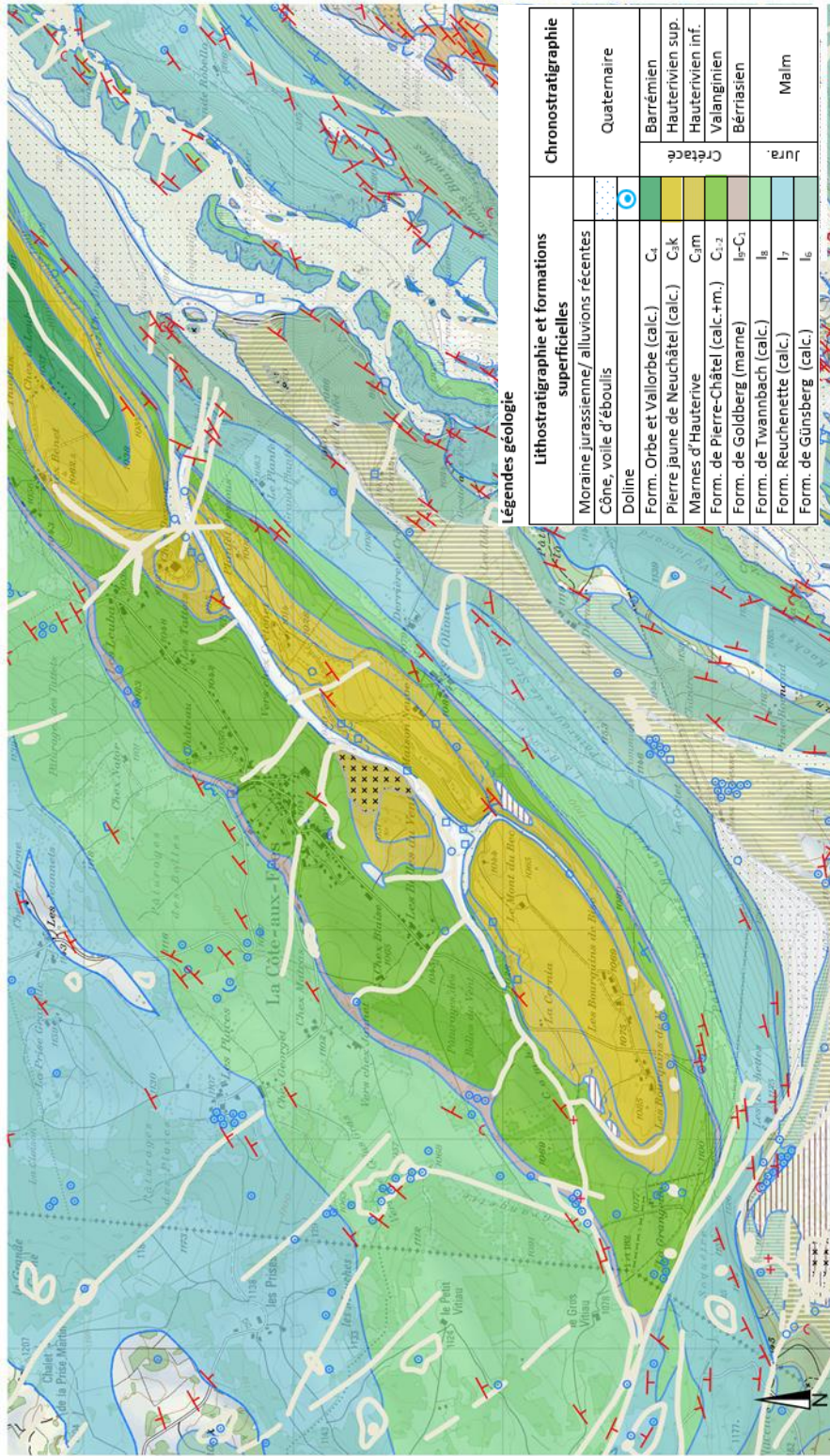
- Orléans, France.
24. Matthey, B. (1994) *Commune de La Côte-aux-Fées. Délimitation des zones de protection des sources. Rapport technique*. Bernard Matthey Ingenieurs Conseils SA. Suisse.
 25. Matthey, B. (1994) *Commune de La Côte-aux-Fées. Délimitation des zones de protection des sources. Essai de coloration complémentaire dans l'étang - le 12 octobre 1995. Rapport technique*. Bernard Matthey Ingenieurs Conseils SA. Suisse.
 26. Matthey, B. (1995) *Commune de La Côte-aux-Fées. Délimitation des zones de protection des sources. Essais de coloration complémentaires: Bolles du Vent (Châteaux) - le 24 avril 1995, Ruisseau des Combes - le 1 mai 1995. Rapport technique*. Bernard Matthey Ingenieurs Conseils SA. Suisse.
 27. Météosuisse (2018-2019) *Climap : portail de données météorologiques*. Office Fédéral de Météorologie et Climatologie, Météosuisse.
 28. Musy, A., Soutter, M.(1991) *Physique du sol*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse. 348
 29. Moore, R. D., Richards, G., Story, A. (2008). Electrical conductivity as an indicator of water chemistry and hydrologic process. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 11(2), 25-29.
 30. OEAUX (1998). *Ordonnance sur la protection des eaux*. Berne, Suisse.
 31. OPBD (2016). *Ordonnance du département fédéral de l'intérieur (DFI) sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public*. Berne, Suisse.
 32. Perrin, J., Pochon, A., Jeannin, P. Y., Zwahlen, F. (2004) *Vulnerability assessment in karstic areas: Validation by field experiments*. *Environmental Geology* 46, 237-245.
 33. Calanca, P., Smith, P., Holzkamper, A., Ammann, C. (2011). *L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie*. *Recherches agronomiques suisse* 2, 176-183.
 34. Pochon, A., Zwahlen, F., (2003). *Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique*. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP) et Office fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG). Berne, Suisse. 83.
 35. Preisig, G. (2017) *Caractérisation géophysique et géologique au lieu-dit "Le Mont du Bec", commune de La Côte-aux-Fées. Rapport Technique*. Université de Neuchâtel. Suisse.
 36. Pronk, M. (2008) *Origin and behaviour of microorganisms and particles in selected karst aquifer systems*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse. 179.
 37. Rigassi, D., Jaccard, M.(1995). *Atlas géologique de la Suisse, feuille 1182 Ste-Croix, carte géologique*. Swisstopo, Wabern/Bern, Suisse.
 38. Schnegg, P.-A., Flynn, R. (2003) *Online field fluorimeters for hydrogeological tracer tests*. *Isotope und Tracer in der Wasserforschung*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Wissenschaftliche Mitteilungen, Institut für Geologie 19. 29-36.
 39. Schnegg, P.-A. (2008) *Manuel d'utilisation du fluorimètre de terrain GGUN-FL*. Albillia sàrl.
 40. Schudel, B., Biaggi, D., Dervev, T., Kozel, R., Müller, I., Henning Ross, J., Schindler, U. (2002) *Utilisation des traceurs en hydrogéologie. Guide pratique*. Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG). Berne, Suisse.
 41. Service d'information du territoire neuchâtelois (SITN), (2018-2019). Géoportail, site internet : www.sitn.ne.ch.
 42. Simeoni, G. (1976) *Rapport essai de traçage aux Bolles du Vent - synclinal de La Côte-aux-Fées/NE. Rapport technique*. Université de Neuchâtel, Institut de Géologie, Centre d'Hydrogéologie.
 43. Sinreich, M., Pochon, A. (2015) *Standardized approach for conducting tracing tests in order to validate and refine vulnerability mapping criteria*. *Environmental Earth Sciences* 1, 131-137.
 44. Stevenson, M., Bravo, C. (2019) *Advanced turbidity prediction for operational water supply planning*. *Decision Support Systems* 119, 72-84.
 45. Thierrin, J., Steffen, P., Cornaz, S., Vuataz, F.D., Balderer, W., Looser, M. (2003). *Echantillonnage des eaux souterraines. Guide pratique. L'environnement pratique*. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage OFEFP, Société Suisse d'Hydrogéologie (SSH). Berne, Suisse. 82.
 46. Thüler, L. (2014) *Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse. 183.
 47. Vrba, J., Zaporovec, A. (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, Hannover, Netherlands.

Annexes

Annexe 1 : Situation et géologie régionale à La Côte-aux-Fées (NE)



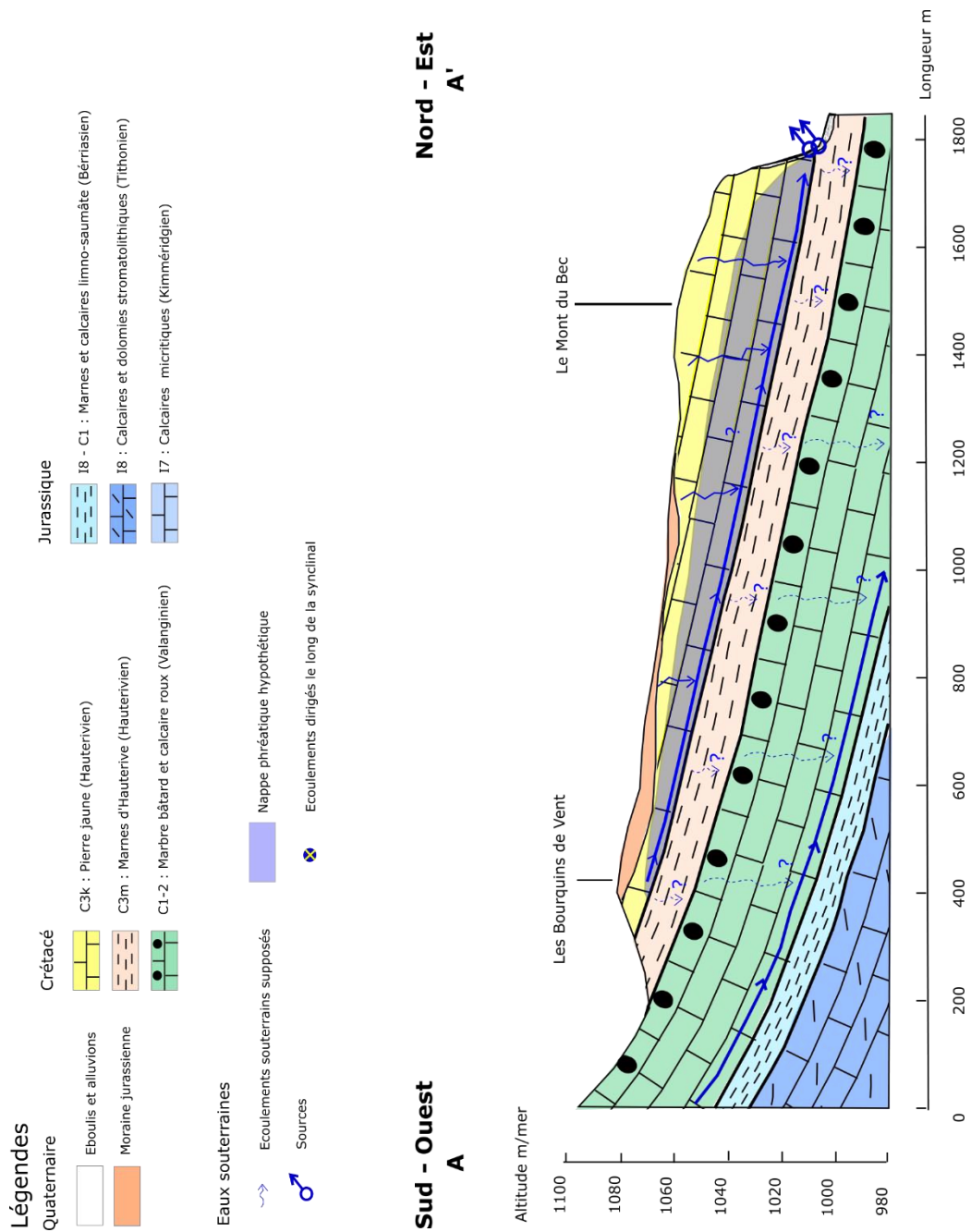
Annexe 1.1: Carte topographique modifiée, tirée du géoportail du canton de Neuchâtel (SITN).



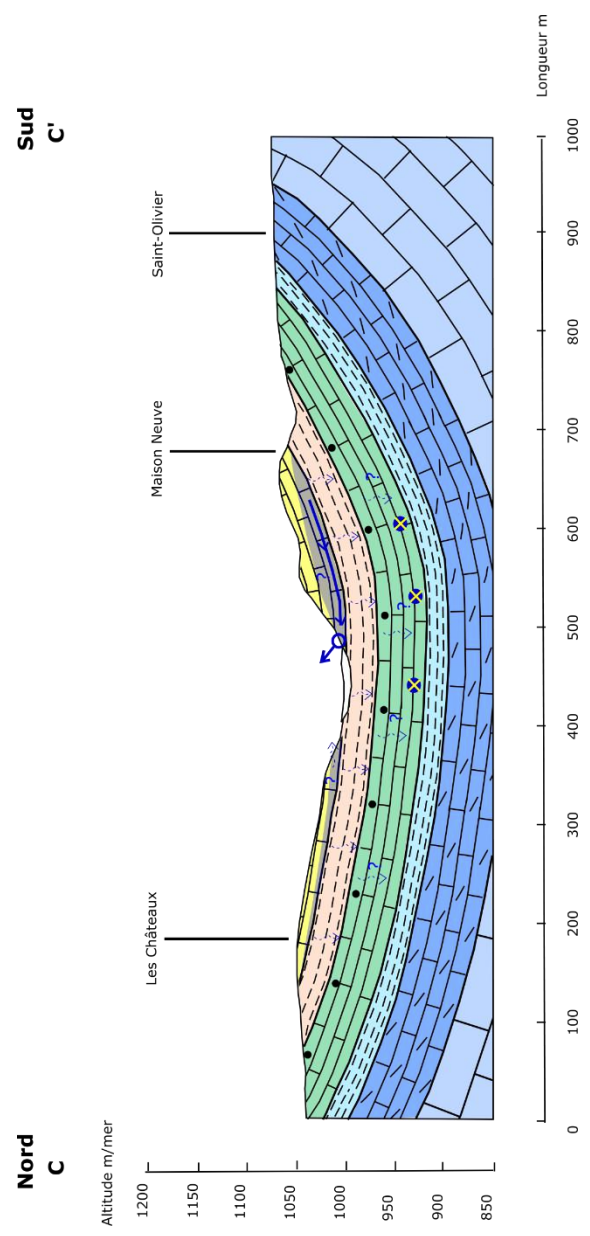
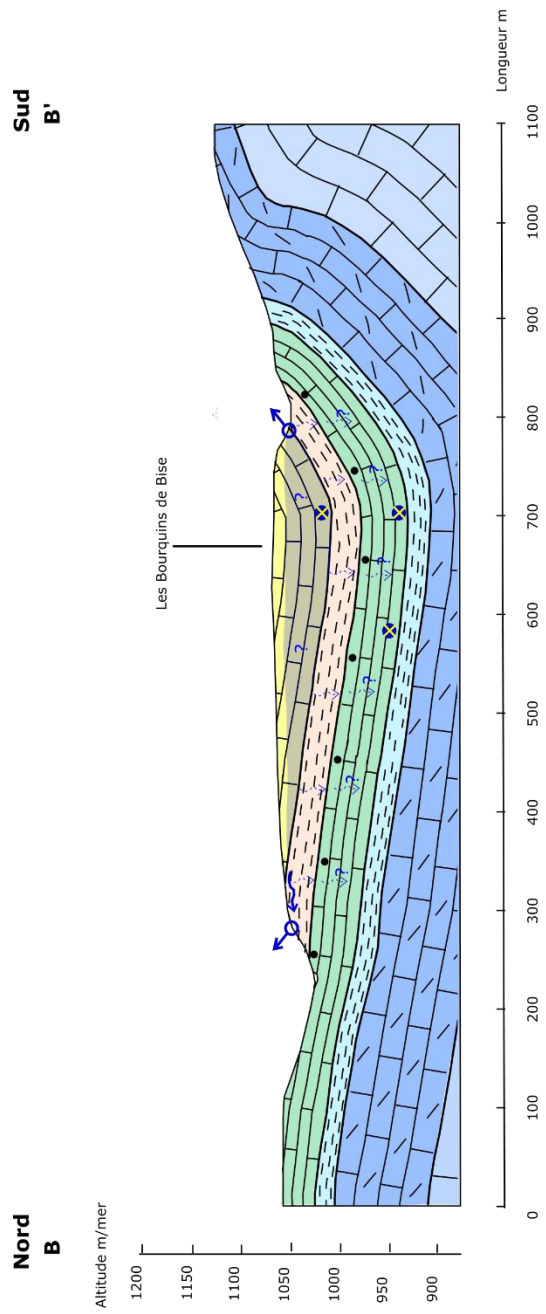
Informations dépourvues de foi publique. Bien que ces renseignements aient été recueillis avec soin, aucune garantie n'est donnée quant à l'exactitude et la mise à jour des données de cette carte ou ce plan.

Annexe 1.2: Carte géologique à La Côte-aux-Fées, tirée du géoportail du canton de Neuchâtel (SITN).

Annexe 2 : Coupes géologiques AA', BB' et CC' avec interprétations hydrogéologiques

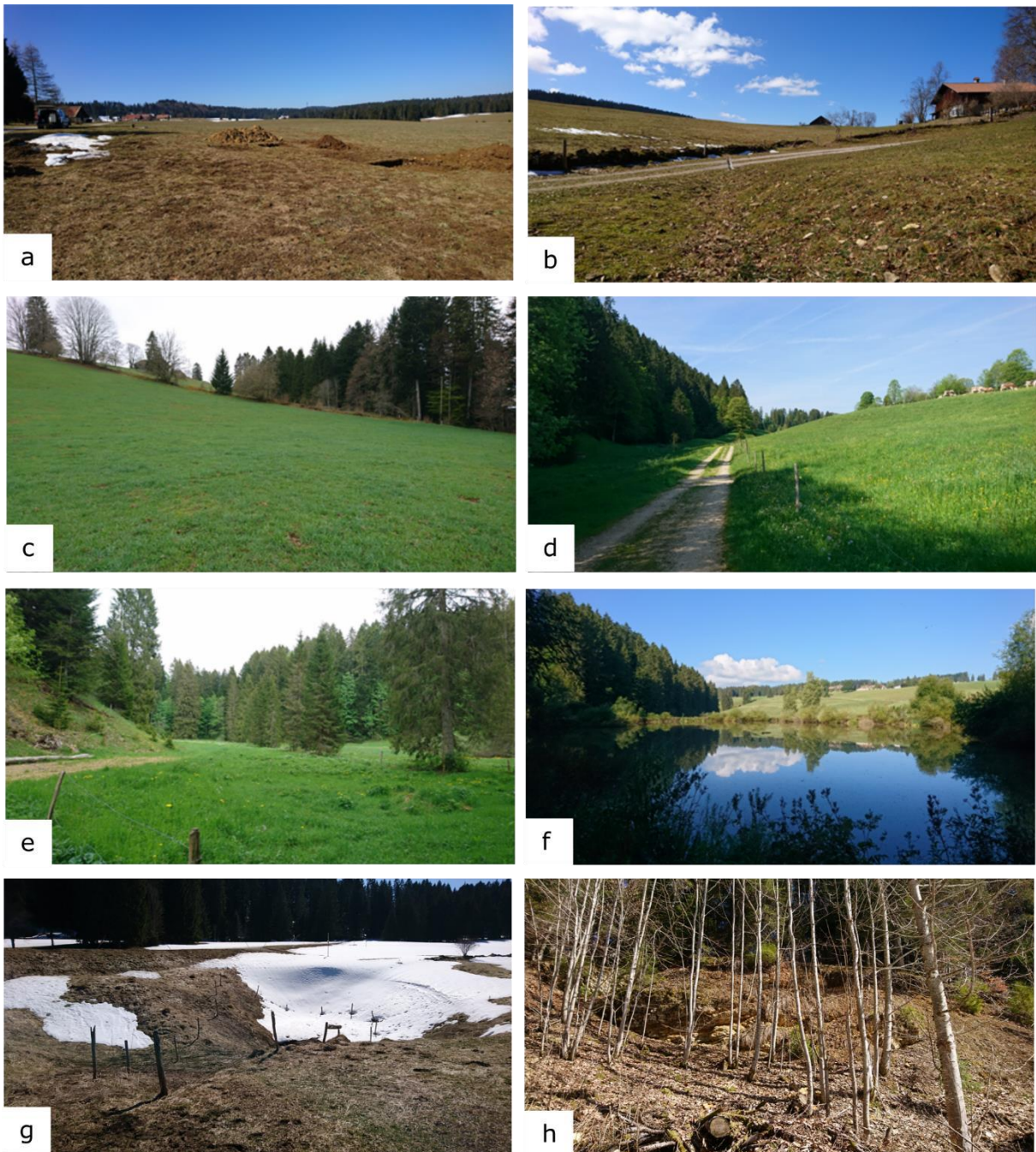


Annexe 2.1 : Coupe géologique longitudinale AA' avec interprétation hydrogéologiques à La Côte-aux-Fées. Exagération verticale : 5 fois.



Annexe 2.2 : Coupes géologiques transversales BB', CC' avec interprétations hydrogéologiques à La Côte-aux-Fées. Sans exagération verticale.

Annexe 3 : Photos du site d'étude



Annexe 3: Photos du site d'étude. a) Plateau des Bourquins depuis les Bourquins-de-Bise, b) Mont-du-Bec, c) La Maison Neuve pris depuis le Nord-Est, d) Route amenant à l'étang des Sagnes depuis la station des Combes, photo prise depuis la chambre de rassemblement de La Scie, e) Zone humide et parfois inondée au Sud entre le plateau des Bourquins et La Maison Neuve, f) Etang des Sagnes, g) Doline en périphérie du lambeau des Bourquins, vers les Bourquins-de-Vent, située sur les Marnes d'Hauterive (CH1903 526361/189194), h) Affleurement de la Pierre Jaune de Neuchâtel (ancienne carrière) sur la face Est de la Maison Neuve (CH1903 527585/190040).

Annexe 4 : Photos des captages des sources



Annexe 4 : Photos des captages et des systèmes de surveillance des sources. a) Chambre de rassemblement de La Scie, à droite eau de la source de La Scie se déversant dans la chambre, en haut tuyau en PVC acheminant les sources Mélangées en dehors de la chambre, en bas tube plastique blanc vertical pour sonde de pression, b) En haut à droite chambre de rassemblement de La Scie et sortie du tuyau PVC des sources Mélangées dans le déversoir gris. En bas à gauche ruisseau de l'Echelier, c) Déversoir avec sonde pression pour la mesure du débit des sources Mélangées, d) Chambre de captage de La Scie, e) Chambre de captage de La Scie avec tuyau PVC orange pour l'évacuation des eaux vers la chambre de rassemblement de la Scie, f) Chambre de captage de César-Guye, g) Chambre de captage de César-Guye avec tuyau PVC orange pour l'évacuation.



Annexe 4 : Photos des captages et systèmes de surveillance des sources. h) Chambre de captage de la Combe Nord, i) Chambre de captage de la Combe Nord en période d'étiage avec le tuyau des drains à l'air, j) Chambre de captage de la Combe Nord en hautes eaux avec les drains submergés, k) Chambre de captage de la Combe Centre, l) Chambre de captage de la Combe Centre en période d'étiage avec le tuyau des drains à l'air, m) Chambre de captage de la Combe Centre en hautes eaux avec les drains submergés, n) A droite chambre de captage de la Combe Sud et à gauche source temporaire de la Combe Sud, o) Trop-plein actif et fuite du captage de la Combe Sud.



p



q



r



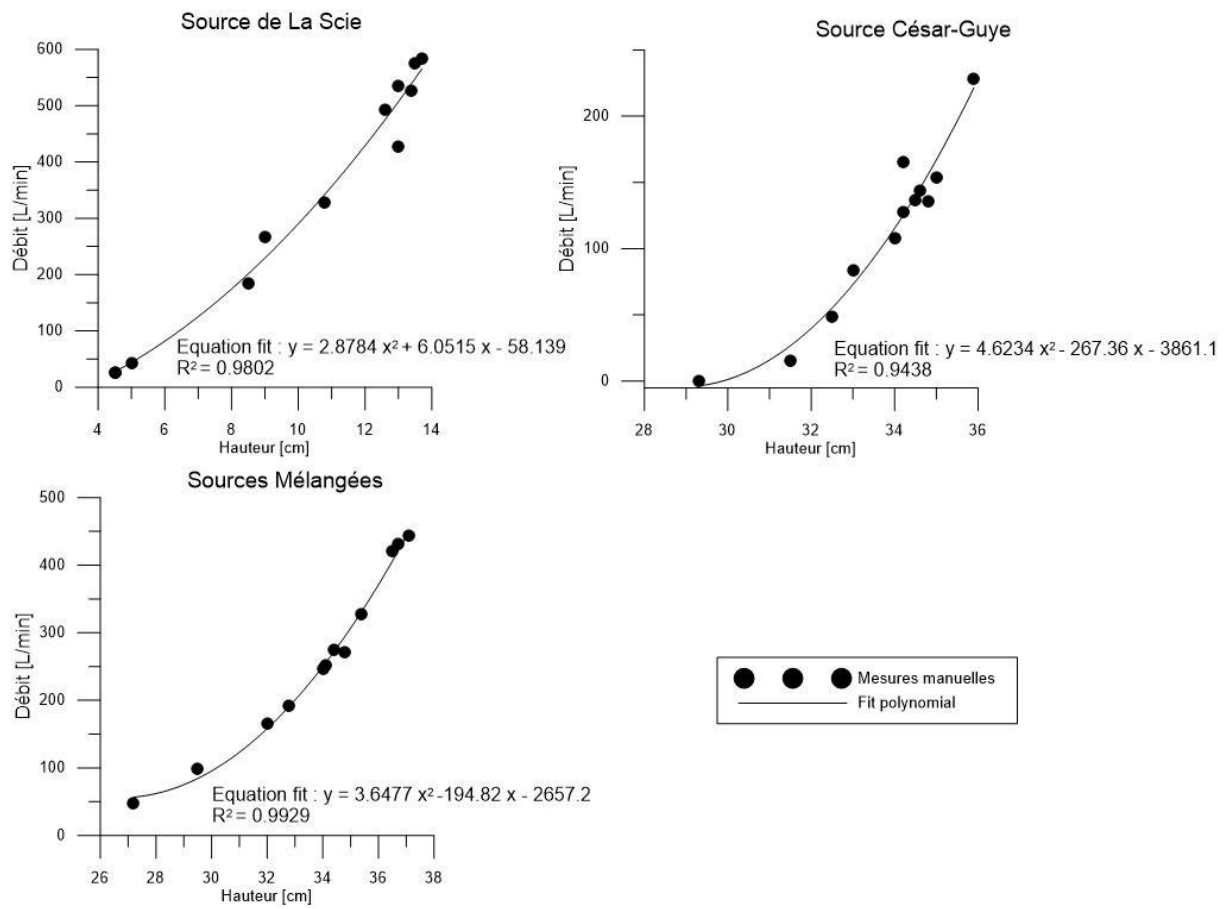
s



t

Annexe 4 : Photos des captages et systèmes de surveillance des sources. p) Source temporaire de la Combe Sud en période de hautes eaux, q) Source du Ruisseau Sud, r) A gauche, emplacement de la source du ruisseau Sud indiqué par la flèche rouge et à droite sur le replat silhouette sombre et ondulant du ruisseau s'écoulant vers l'Est, s) Captage de la source d'Annens Ouest, t) Source des Raies à Buttes, derrière « l'île ».

Annexe 5 : Courbe de tarage pour les sources de La Scie, César-Guye et sources Mélangées (déversoir)



Annexe 5: Courbes de tarage obtenues à partir de mesures manuelles pour la source de La Scie, César-Guye et sources Mélangées (déversoir).

Annexe 6 : Résultats de la campagne de mesures physico-chimiques et du débit

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
La Scie	CAF1	04.09.2018	27.0	430	8.3	7.2	8.8
		05.10.2018	27.0	436	8.4	7.5	9.5
		08.11.2018	26.4	430	7.8	7.3	8.9
		28.11.2018	42.6	416	7.3	7.5	10.4
		19.12.2018	427.2	397	6.2	7.2	10
		07.01.2019	184.8	421	6.4	7.3	10.4
		22.01.2019	328.2	396	5.3	7.6	-
		05.02.2019	265.8	424	5.3	7.6	9.7
		20.02.2019	492.0	439	4.2	7.7	-
		08.03.2019	582.0	366	5.5	7.5	9.9
		21.03.2019	526.2	362	5.6	7.7	9.4
		08.04.2019	576.0	373	5.5	7.4	10.1
		10.05.2019	534.0	369	6.7	7.5	9.7
		20.05.2019	-	399	6.7	7.4	0.4
03.06.2019	116.1	400	6.9	7.8	8.7		

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
S. Mélangées	CAF2	04.09.2018	60.0	559	8.6	7	9.6
		05.10.2018	48.0	554	8.3	7.3	9.5
		08.11.2018	165.0	494	7.3	7.3	9.1
		28.11.2018	99.0	465	6.6	7.6	10.8
		19.12.2018	271.8	413	6	7.3	11
		07.01.2019	181.2	495	6.3	7.6	10.2
		22.01.2019	247.2	440	5.1	7.6	-
		05.02.2019	252.0	503	4.4	7.5	10.2
		20.02.2019	274.2	415	4.8	7.7	-
		08.03.2019	444.0	362	5.1	7.4	9.4
		21.03.2019	327.0	381	5.2	7.6	9.7
		08.04.2019	430.8	336	4.8	7.3	10.4
		10.05.2019	420.0	347	6.3	7.5	9.3
		20.05.2019	-	457	6.8	7.5	9.7
03.06.2019	120.1	509	7.2	7.8	9.4		

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
César-Guye	CAF4	04.09.2018	-	548	7.7	7	6.4
		05.10.2018	15.6	546	7.7	7.2	6.2
		08.11.2018	83.4	470	7.2	7.4	7.2
		28.11.2018	48.6	421	5.9	7.5	9.2
		19.12.2018	135.6	401	5.8	7.3	11.2
		07.01.2019	108.0	478	6.3	7.3	9.2
		22.01.2019	127.8	428	4.2	7.7	-
		05.02.2019	136.8	428	5.5	8	10.9
		20.02.2019	144.0	404	4.4	7.7	-
		08.03.2019	228.0	332	4.3	7.6	10.7
		21.03.2019	153.6	366	4.8	7.8	11
		08.04.2019	147.6	315	4.2	7.4	11.6
		10.05.2019	165.6	324	5.9	7.6	10.3
		20.05.2019	-	446	6.6	7.4	9.2
03.06.2019	71.9	496	7.3	7.7	7.4		

Etang	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
E. des Sagnes	CAF5	04.09.2018	-	238	11.8	7.8	9
		05.10.2018	-	266	9.4	8	9.8
		08.11.2018	-	265	5.7	7.7	9.3
		28.11.2018	-	261	1.4	7.8	12
		19.12.2018	-	432	5.6	7.6	10.5
		07.01.2019	-	-	-	-	-
		22.01.2019	-	-	-	-	-
		05.02.2019	-	-	-	-	-
		20.02.2019	-	497	2.9	7.7	-
		08.03.2019	-	370	5.4	7.6	9.6
		21.03.2019	-	369	4.3	7.7	8.8
		08.04.2019	-	363	6.5	7.3	16.4
		10.05.2019	-	394	8.3	7.5	11.3
		20.05.2019	-	362	11.5	8.1	17.8
03.06.2019	-	296	20.3	8.2	8.1		

Annexe 6 : Résultats des mesures manuelles physico-chimiques et du débit aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier.

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
C. Nord	CAF6	04.09.2018	-	576	8.4	7.6	8.2
		05.10.2018	-	585	8.2	7.4	8
		08.11.2018	-	565	7.5	7.4	7.8
		28.11.2018	-	537	7.1	7.7	9.5
		19.12.2018	-	428	6.2	7.2	8.4
		07.01.2019	-	495	6.7	7.8	8.3
		22.01.2019	-	475	5.5	7.6	-
		05.02.2019	-	538	4.6	8	6.9
		20.02.2019	-	441	5.2	7.7	-
		08.03.2019	-	-	6.2	7.5	5.7
		21.03.2019	-	394	6	7.9	7.7
		08.04.2019	-	382	6	7.2	7.5
		10.05.2019	-	399	6.8	7.4	7.6
		20.05.2019	-	480	7	7.5	8.2
03.06.2019	-	516	7.4	7.8	7.8		

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
C. Centre	CAF7	04.09.2018	-	576	8.4	7.6	8.2
		05.10.2018	21	588	8	7.3	6.8
		08.11.2018	34.8	573	7.4	7.4	7.2
		28.11.2018	25.8	571	7.1	7.6	6.6
		19.12.2018	83.4	446	6.6	7.3	9.4
		07.01.2019	45.6	501	6.9	7.2	6.4
		22.01.2019	64.2	491	5.9	7.6	-
		05.02.2019	69	563	4.5	8	3.7
		20.02.2019	70.2	459	5.5	7.6	-
		08.03.2019	-	437	6.4	7.5	5
		21.03.2019	89.4	403	6.2	7.9	6.6
		08.04.2019	106.8	387	6.1	7.2	7.2
		10.05.2019	-	425	7.3	7.2	6.3
		20.05.2019	-	487	7.2	7.4	6.6
03.06.2019	36.0	523	8.7	7.6	6.7		

Source	Code	Date	Q [L/min] trop-plein	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
C. Sud	CAF8	04.09.2018	0	600	9.2	7.3	1.8
		05.10.2018	0	608	8.2	7.2	4.3
		08.11.2018	0	576	6.7	7.6	7.2
		28.11.2018	0	576	6.3	7.5	3.7
		19.12.2018	0	527	6.7	7.5	10.4
		07.01.2019	0	528	6.7	7.4	5.3
		22.01.2019	-	505	6.4	7.9	-
		05.02.2019	138	590	6.4	7.9	2.9
		20.02.2019	276	566	6.7	7.6	-
		08.03.2019	451.8	-	6.5	7.4	8.6
		21.03.2019	435.6	422	6.6	7.7	7.5
		08.04.2019	720	401	6.7	7.4	8.3
		10.05.2019	870	423	7.2	7.2	10
		20.05.2019	60	498	7.5	7.6	8.1
03.06.2019	-	511	8.4	7.8	3.9		

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
S. temp. C.Sud	CAF9	21.03.2019	360	412	6.6	7.7	7.5
		08.04.2019	1680	391	6.3	7.3	9.6
		10.05.2019	3600	415	7.1	7.3	10.2
		20.05.2019	-	-	-	-	-
		03.06.2019	0	-	-	-	-

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
Echelier	CAF10	04.09.2018	0	-	-	-	-
		05.10.2018	0	-	-	-	-
		08.11.2018	0	-	-	-	-
		28.11.2018	0	-	-	-	-
		19.12.2018	0	-	-	-	-
		07.01.2019	0	-	-	-	-
		22.01.2019	0	-	-	-	-
		05.02.2019	-	-	-	-	-
		20.02.2019	-	-	-	-	-
		08.03.2019	5856.0	-	-	-	-
		21.03.2019	1293.0	364	5.3	-	10.7
		08.04.2019	1909.2	354	6.4	-	-
		10.05.2019	7980.0	385	9.3	7.6	10.5
		20.05.2019	200.0	419	7.9	-	-
03.06.2019	41.9	479	9.5	8.4	10.6		

Source	Code	Date	Q [L/min]	Conductivité [uS/cm]	Température [°C]	pH [-]	O2 [mg/L]
S. ruisseau Sud	CAF11	10.05.2019	600	340	6.5	7.6	9.5
		20.05.2019	60	422	6.2	7.3	8.2
		03.06.2019	6	447	6.2	7.6	6.5

Annexe 6 : Résultats des mesures manuelles physico-chimiques et du débit aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier.

Annexe 7 : Résultats des analyses hydrochimiques

Erreur des balances ioniques des analyses hydrochimiques en %

	La Scie	César-Guye	Combe Nord	Combe Centre	Combe Sud	S. Mélangées	S. temporaire C. Sud	Etang	Echelier
05.10.2018	0.8	0.6	0.0	0.5	0.1	0.8	-	1.1	-
08.11.2018	0.5	0.4	0.2	1.4	3.1	1.2	-	2.4	-
19.12.2018	1.0	0.8	0.8	0.4	0.0	1.0	-	0.9	-
22.01.2019	2.8	1.9	1.3	1.2	1.0	1.8	-	-	-
20.02.2019	4.6	4.6	3.2	3.7	2.1	4.2	-	4.3	-
21.03.2019	3.6	4.0	2.9	3.5	4.0	3.7	3.5	3.0	3.9
20.05.2019	2.7	3.6	3.7	3.6	3.9	3.2	-	3.0	-

Code	Date	Anions						Cations					
		Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	PO3 [mg/L]	PO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]
CAF1	05.10.2018	3.33	n.a.	3.24	n.a.	n.a.	264.74	3.1	0.5	2.0	3.2	84.1	
	08.11.2018	3.44	n.a.	3.23	n.a.	n.a.	268.15	2.1	n.a.	1.6	3.4	84.1	
	19.12.2018	5.24	n.a.	9.14	n.a.	n.a.	242.78	2.1	0.7	1.4	2.2	79.3	
	22.01.2019	8.3	n.a.	8.2	n.a.	n.a.	233.38	3.4	1.8	1.7	2.3	81.5	
	20.02.2019	10.3	n.a.	10.9	n.a.	n.a.	247.29	4.6	n.a.	2.1	2.2	75.8	
	21.03.2019	3.4	n.a.	7.0	n.a.	n.a.	227.04	1.9	n.a.	1.2	2.0	69.1	
20.05.2019	3.7	n.a.	6.3	n.a.	n.a.	250.83	4.3	n.a.	1.5	2.4	77.3		

Code	Date	Anions						Cations					
		Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	PO3 [mg/L]	PO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]
CAF2	05.10.2018	8.51	n.a.	13.93	n.a.	n.a.	320.01	5.1	n.a.	4.6	6.2	99.9	
	08.11.2018	8.53	n.a.	13.95	n.a.	n.a.	285.24	4.8	n.a.	5.1	5.4	89.1	
	19.12.2018	2.46	n.a.	7.42	n.a.	n.a.	250.71	1.1	n.a.	1.3	2.2	81.6	
	22.01.2019	4.3	n.a.	8.5	n.a.	n.a.	264.50	2.3	n.a.	1.8	2.7	84.0	
	20.02.2019	2.6	n.a.	5.9	n.a.	n.a.	250.23	1.4	0.2	1.5	2.3	74.8	
	21.03.2019	1.9	n.a.	7.2	n.a.	n.a.	232.53	1.1	0.1	1.1	2.0	70.9	
20.05.2019	3.5	n.a.	8.1	n.a.	n.a.	285.36	2.0	n.a.	1.4	2.9	86.8		

Code	Date	Anions						Cations					
		Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	PO3 [mg/L]	PO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]
CAF4	05.10.2018	7.49	n.a.	12.58	n.a.	n.a.	315.13	4.4	n.a.	4.1	5.3	99.4	
	08.11.2018	7.51	n.a.	12.61	n.a.	n.a.	270.96	4.7	0.1	4.8	4.7	85.6	
	19.12.2018	2.32	n.a.	4.54	n.a.	n.a.	249.25	1.1	n.a.	1.0	1.9	81.0	
	22.01.2019	3.9	n.a.	6.3	n.a.	n.a.	265.60	1.5	0.8	1.3	2.4	83.7	
	20.02.2019	1.8	n.a.	4.2	n.a.	n.a.	246.93	1.1	n.a.	0.8	1.9	73.5	
	21.03.2019	1.7	n.a.	4.9	n.a.	n.a.	230.83	0.9	n.a.	0.7	1.7	70.1	
20.05.2019	2.8	n.a.	6.7	n.a.	n.a.	284.26	4.5	n.a.	1.0	2.6	85.9		

Code	Date	Anions						Cations					
		Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	PO3 [mg/L]	PO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]
CAF5	05.10.2018	7.62	n.a.	0.22	n.a.	n.a.	156.65	3.7	1.4	4.6	2.6	43.7	
	08.11.2018	7.68	n.a.	0.21	n.a.	n.a.	158.60	3.5	0.6	3.9	2.6	45.0	
	19.12.2018	5.39	n.a.	12.00	n.a.	n.a.	260.23	3.2	0.3	2.8	2.2	85.0	
	22.01.2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	20.02.2019	17.4	n.a.	15.9	n.a.	n.a.	285.35	8.5	1.7	6.2	2.6	79.3	
	21.03.2019	5.1	0.2	8.9	n.a.	n.a.	222.53	2.8	0.2	2.6	1.8	69.0	
20.05.2019	4.1	0.1	4.9	n.a.	n.a.	224.85	2.7	n.a.	2.3	2.0	68.1		

Annexe 7 : Résultats des analyses hydrochimiques aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier et erreurs des balances ioniques.

Source	Code	Date	Anions										Cations			
			Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	NO3 [mg/L]	PO3 [mg/L]	SO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	
C. Nord	CAF6	05.10.2018	9.95	n.a.	n.a.	15.29	n.a.	12.75	329.76	5.6	0.6	5.8	7.7	103.0		
		08.11.2018	9.99	n.a.	n.a.	15.31	n.a.	12.74	317.57	5.7	0.4	6.9	7.4	99.9		
		19.12.2018	4.40	n.a.	n.a.	12.95	n.a.	6.51	260.35	1.5	1.3	2.0	2.9	85.0		
		22.01.2019	9.0	n.a.	n.a.	14.3	n.a.	7.3	271.94	4.4	0.6	3.9	3.6	87.2		
		20.02.2019	4.3	n.a.	n.a.	8.7	n.a.	5.9	267.55	2.2	1.0	3.6	3.2	79.4		
		21.03.2019	3.1	0.2	n.a.	11.4	0.2	5.5	237.90	1.4	0.5	1.9	2.6	74.1		
20.05.2019	5.8	n.a.	n.a.	12.1	n.a.	6.5	295.00	3.2	n.a.	2.4	3.7	89.0				
			Anions										Cations			
Source	Code	Date	Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	NO3 [mg/L]	PO3 [mg/L]	SO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	
C. Centre	CAF7	05.10.2018	10.80	n.a.	n.a.	15.97	n.a.	11.62	324.89	5.6	1.0	6.1	7.3	102.8		
		08.11.2018	10.81	n.a.	n.a.	16.03	n.a.	11.66	318.17	6.5	1.1	7.9	7.3	101.3		
		19.12.2018	5.86	n.a.	n.a.	13.00	n.a.	6.09	265.60	1.7	1.8	2.4	2.8	87.1		
		22.01.2019	11.5	n.a.	n.a.	14.9	n.a.	6.9	279.87	4.8	1.5	4.7	3.7	89.3		
		20.02.2019	4.4	n.a.	n.a.	11.6	n.a.	6.1	268.15	2.2	1.1	3.8	3.3	79.4		
		21.03.2019	3.0	n.a.	n.a.	11.5	n.a.	5.2	249.98	1.5	0.8	2.1	2.6	75.9		
20.05.2019	5.7	n.a.	n.a.	12.0	n.a.	6.5	294.14	3.1	n.a.	2.4	3.8	88.9				
			Anions										Cations			
Source	Code	Date	Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	NO3 [mg/L]	PO3 [mg/L]	SO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	
C. Sud	CAF8	05.10.2018	14.65	n.a.	n.a.	14.09	n.a.	11.61	333.67	7.5	0.9	7.0	6.3	105.9		
		08.11.2018	14.67	n.a.	n.a.	14.11	n.a.	11.63	295.24	7.8	0.8	9.5	6.5	98.7		
		19.12.2018	25.06	n.a.	n.a.	13.31	n.a.	6.07	274.87	16.5	n.a.	3.5	2.5	91.0		
		22.01.2019	11.8	n.a.	n.a.	15.8	n.a.	6.7	287.55	6.2	0.5	6.7	3.5	91.7		
		20.02.2019	26.0	n.a.	n.a.	17.3	0.4	6.3	272.55	12.5	2.1	9.9	3.2	84.2		
		21.03.2019	5.7	n.a.	n.a.	12.0	n.a.	4.9	250.95	3.4	n.a.	3.3	2.2	76.3		
20.05.2019	7.2	n.a.	n.a.	13.2	n.a.	6.4	296.10	4.0	n.a.	3.5	3.6	89.3				
			Anions										Cations			
Source	Code	Date	Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	NO3 [mg/L]	PO3 [mg/L]	SO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	
S. temp. C.Sud	CAF9	21.03.2019	5.0	n.a.	n.a.	11.2	n.a.	4.8	250.22	3.0	n.a.	2.8	2.2	76.9		
			Anions										Cations			
Source	Code	Date	Cl [mg/L]	NO2 [mg/L]	NO3 [mg/L]	Br [mg/L]	NO3 [mg/L]	PO3 [mg/L]	SO4 [mg/L]	TAC [mgHCO3/L]	Na [mg/L]	NH4 [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Ca [mg/L]	
Echelier	CAF10	21.03.2019	3.5	n.a.	n.a.	8.0	n.a.	4.4	224.48	2.1	0.1	1.8	1.8	68.3		

Annexe 7 : Résultats des analyses hydrochimiques aux sources, à l'étang et au ruisseau de l'Echelier.

Annexe 8 : Rapports d'analyses microbiologiques



Dr Giona Preisig
Centre d'hydrogéologie et de géothermie
Université de Neuchâtel
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

Boudry, le 4 mars 2019

Rapport d'analyses 20190304/B025a

Concerne analyse de 7 échantillons d'eau selon votre demande du 20.02.2019
Prélèvements par vos soins le 20.02.2019
Livraison des échantillons par vos soins le 20.02.2019 à 16h00

Début / fin d'analyse 20.02.2019 / 23.02.2019
Méthodes d'analyse ISO 4833-1 / 16649-1 / 7899-2
Commentaires résultats transmis par courriel le 04.03.2019

Analyses bactériologiques standards

Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF1 La Scie	20.02.2019	B025a_01	Germes aérobies mésophiles	147 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	16 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	2 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [CFU/100 mL]
CAF2 Déversoir	20.02.2019	B025a_02	Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	76 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	80 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	14 [CFU/100 mL]
CAF4 César	20.02.2019	B025a_03	Germes aérobies mésophiles	95 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	9 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	1 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	1 [CFU/100 mL]
CAF5 Etang	20.02.2019	B025a_04	Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	162 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	77 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	21 [CFU/100 mL]

CFU colonies formant des unités
n.d. non décelé

Page 1/2

fcm-lab Sàrl
Rue Louis-Favre 2
CH-2017 Boudry

Tél.: +41 (0)32 721 25 52
info@fcm-lab.ch
www.fcm-lab.ch

Relation bancaire: BCN, Neuchâtel
IBAN: CH08 0076 6000 1021 9729 4
TVA: CHE-463.775.586 TVA

Analyses bactériologiques standards				
Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF6 C. Nord	20.02.2019	B025a_05	Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	134 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	> 150 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	33 [CFU/100 mL]
CAF7 C. centre	20.02.2019	B025a_06	Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	216 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	> 150 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	42 [CFU/100 mL]
CAF8 C. Sud	20.02.2019	B025a_07	Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/mL]
			Germes aérobies mésophiles	> 300 [CFU/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	> 150 [CFU/100 mL]
			Entérocoques	> 150 [CFU/100 mL]

CFU colonies formant des unités

Analyses bactériologiques complémentaires				
Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF6 C. Nord	20.02.2019	B025a_05	<i>Escherichia coli</i>	19 [CFU/10 mL]
CAF7 C. centre	20.02.2019	B025a_06	<i>Escherichia coli</i>	23 [CFU/10 mL]
CAF8 C. Sud	20.02.2019	B025a_07	Germes aérobies mésophiles	88 [CFU/10 ⁻² mL]
			Germes aérobies mésophiles	5 [CFU/10 ⁻³ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	103 [CFU/10 mL]
			Entérocoques	18 [CFU/10 mL]

CFU colonies formant des unités

Les résultats se limitent aux échantillons tels que présentés à leur arrivée au laboratoire. Des compléments d'information et les incertitudes de mesure peuvent être obtenus sur demande. Toute reproduction partielle ou modification du présent rapport d'analyses doit être approuvée par fcm-lab Sàrl.



Dr Michiel Pronk
fcm-lab Sàrl

Page 2/2

Centre d'hydrogéologie et de géothermie
 Université de Neuchâtel
 Dr Giona Preisig
 Rue Emile-Argand 11
 CH-2000 Neuchâtel

Boudry, le 10 mai 2019

Rapport d'analyses 20190510/B025b

Concerne analyse de 7 échantillons d'eau selon votre demande du 06.05.2019
Prélèvements par vos soins le 06.05.2019
Livraison des échantillons par vos soins le 06.05.2019 à 17h00

Début / fin d'analyse 06.05.2019 / 09.05.2019

Méthodes d'analyse ISO 4833-1 / 16649-1 / 7899-2

Commentaires résultats transmis par courriel le 10.05.2019

Analyses bactériologiques standards

Des cription	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF1 La Scie	06.05.2019	B025b_01	Germes aérobies mésophiles	29 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	5 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	1 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [UFC/100 mL]
CAF2 S. mélangées	06.05.2019	B025b_02	Germes aérobies mésophiles *	138 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	15 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	9 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [UFC/100 mL]
CAF4 César-Guye	06.05.2019	B025b_03	Germes aérobies mésophiles	206 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	29 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	7 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	2 [UFC/100 mL]
CAF5 Etang	06.05.2019	B025b_04	Germes aérobies mésophiles	233 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	28 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	22 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	2 [UFC/100 mL]

UFC unité formant colonie
 n.d. non décelé
 * présence de colonies envahissantes

Page 1/2

Analyses bactériologiques standards				
Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF6 C. Nord	06.05.2019	B025b_05	Germes aérobies mésophiles	192 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	21 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	32 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	5 [UFC/100 mL]
CAF7 C. centre	06.05.2019	B025b_06	Germes aérobies mésophiles	173 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	20 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	29 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	1 [UFC/100 mL]
CAF8 C. Sud	06.05.2019	B025b_07	Germes aérobies mésophiles	> 300 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	127 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	143 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	53 [UFC/100 mL]

UFC : unité formant colonie

Les résultats se limitent aux échantillons tels que présentés à leur arrivée au laboratoire. Des compléments d'information et les incertitudes de mesure peuvent être obtenus sur demande. Toute reproduction partielle ou modification du présent rapport d'analyses doit être approuvée par fcm-lab Sàrl.



Dr Michiel Pronk
fcm-lab Sàrl

Dr Giona Preisig
 Centre d'hydrogéologie et de géothermie
 Université de Neuchâtel
 Rue Emile-Argand 11
 CH-2000 Neuchâtel

Boudry, le 7 juin 2019

Rapport d'analyses 20190607/B025c

Concerne	analyse de 7 échantillons d'eau selon votre demande du 03.06.2019
Prélèvements	par vos soins le 03.06.2019
Livraison des échantillons	par vos soins le 03.06.2019 à 14h30

Début / fin d'analyse	03.06.2019 / 06.06.2019
Méthodes d'analyse	ISO 4833-1 / 16649-1 / 7899-2
Commentaires	résultats transmis par courriel le 07.06.2019

Analyses bactériologiques standards

Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF1 La Scie	03.06.2019	B025c_01	Germes aérobies mésophiles	20 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	6 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	n.d. [UFC/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [UFC/100 mL]
CAF2 S. mélangées	03.06.2019	B025c_02	Germes aérobies mésophiles	111 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	15 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	7 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	1 [UFC/100 mL]
CAF4 César-Guye	03.06.2019	B025c_03	Germes aérobies mésophiles	134 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	13 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	7 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [UFC/100 mL]
CAF5 Etang	03.06.2019	B025c_04	Germes aérobies mésophiles *	> 300 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	85 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	10 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	76 [UFC/100 mL]

UFC unité formant colonie
 n.d. non décelé
 * présence de colonies envahissantes

Page 1/2

Analyses bactériologiques standards				
Description	Date & heure de prélèvement	N° échant. laboratoire	Paramètre	Résultat
CAF6 Combe Nord	03.06.2019	B025c_05	Germes aérobies mésophiles	118 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	18 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	3 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	n.d. [UFC/100 mL]
CAF7 Combe centre	03.06.2019	B025c_06	Germes aérobies mésophiles *	112 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	13 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	3 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	1 [UFC/100 mL]
CAF8 Combe Sud	03.06.2019	B025c_07	Germes aérobies mésophiles *	> 300 [UFC/mL]
			Germes aérobies mésophiles	87 [UFC/10 ⁻¹ mL]
			<i>Escherichia coli</i>	14 [UFC/100 mL]
			Entérocoques	13 [UFC/100 mL]

UFC unité formant colonie
 n.d. non décelé
 * présence de colonies envahissantes

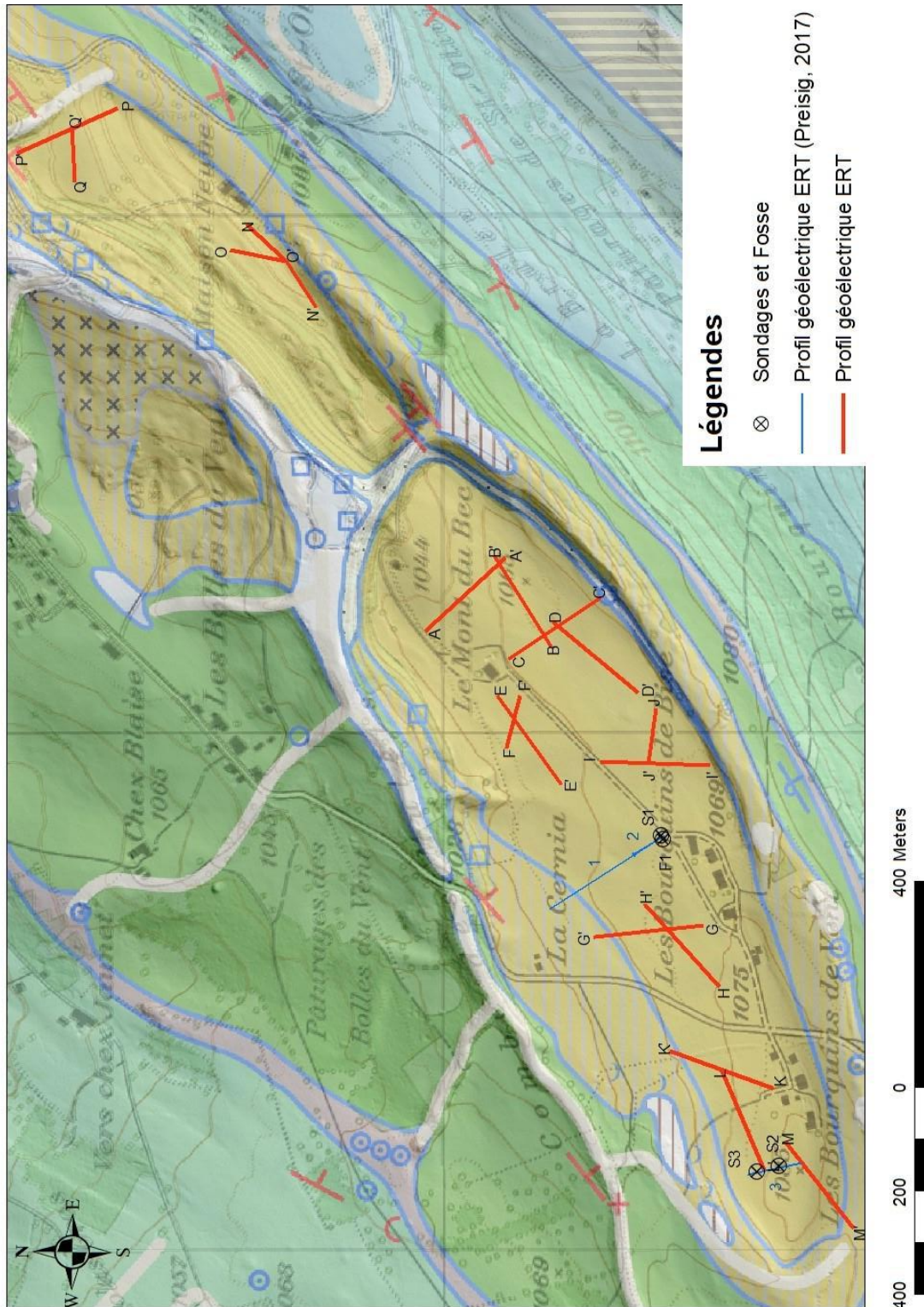
Les résultats se limitent aux échantillons tels que présentés à leur arrivée au laboratoire. Des compléments d'information et les incertitudes de mesure peuvent être obtenus sur demande. Toute reproduction partielle ou modification du présent rapport d'analyses doit être approuvée par fcm-lab Sàrl.



Dr Michiel Pronk
fcm-lab Sàrl

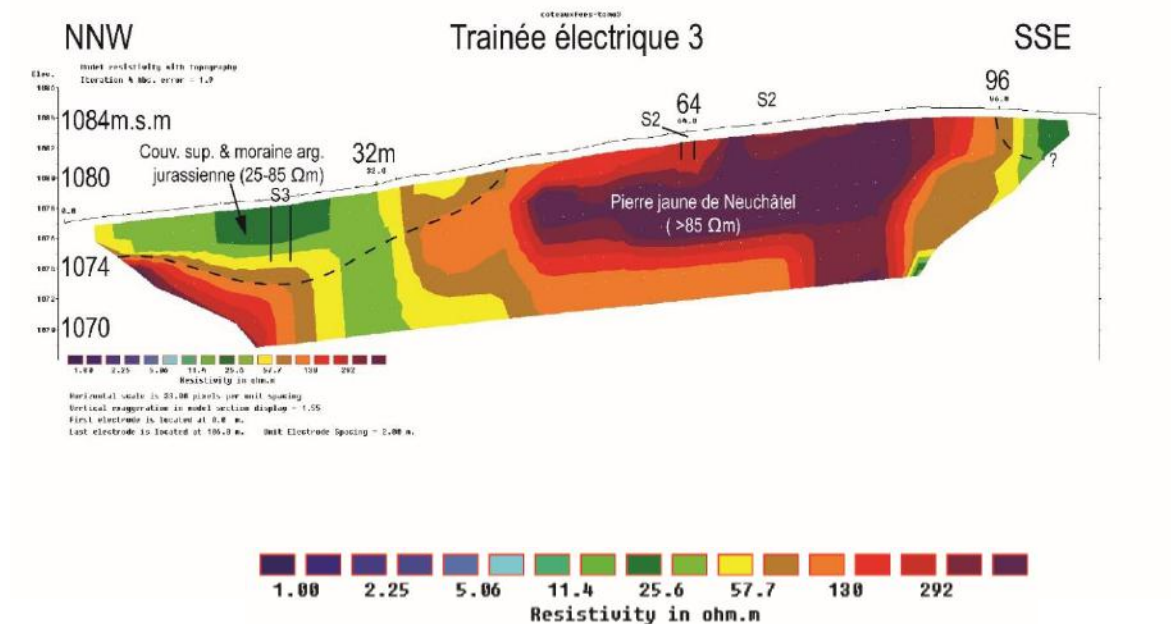
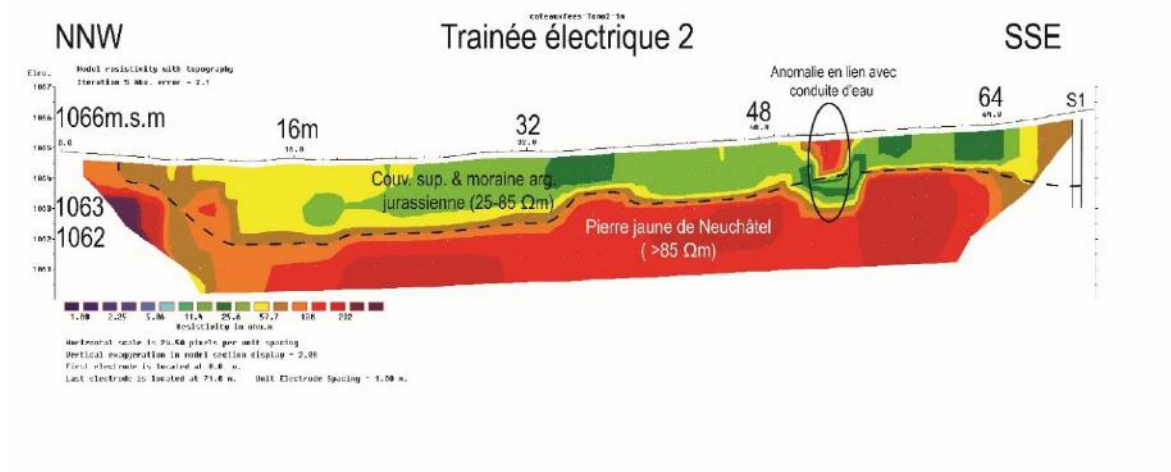
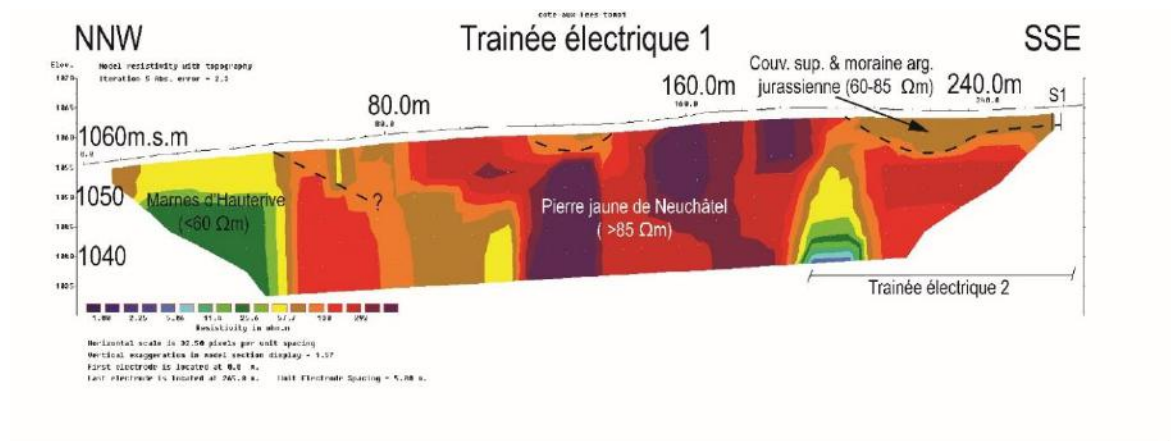
Annexe 9 : Disposition des profils géoélectriques ERT sur la carte géologique.

Carte de la disposition des profils géoélectriques ERT et sondages à La Côte-aux-Fées









Annexe 9 : Disposition des profils géoélectriques ERT de la campagne géophysique et de Preisig G. en 2017.

Annexe 10 : Profils géoélectriques ERT par Preisig G. (2017)



Annexe 10 : Profils géoélectriques ERT par Preisig G. (2017) sur le plateau des Bourquins.

Annexe 11 : Logs de sondages et de fosse sur le plateau des Bourquins

Commune de La Côte-aux-Fées Sondages à la tarière mécanique au Mont du Bec		Forage: S1					
Centre d'hydrogéologie et de géothermie Université de Neuchâtel Rue Emile-Argand 11, CH-2000 Neuchâtel		Profondeur: 3.0m Localisation: Les Bourquins de Bise Coordonnées: 2°52'808 / 1°18'578 Altitude: env. 1065.2 m.s.m. Date d'exécution: 21.06.2017					
Ø + méthode de forage	Description lithologique et géotechnique	Interprétation géologique	Profondeur des limites [m]	Figurés	USCS ou RQD, pentages % recup < 100	Hydrogéologie, essais géotechniques, hydrogéologiques, équipement	
0-1, tarière méc., Ø 60mm	Terre végétale brun foncé, essentiellement silt argileux avec sable.	Couv. sup.	0.70		CL-ML	éch.1: 1.50-1.70	
	Gravier silteux avec sable (bien trié); particules anguleuses, peu cohésif, quelques galets d'origine jurassienne.	Moraine argileuse jurassienne	1.10		GM		
	Silt avec sable (fin), argile et quelques graviers mal arrondis (anguleux) d'origine jurassienne. Matériel de teinte jaunâtre-blanchâtre. Peu cohésif.		1.60		ML / SM		
1-3, tarière méc., Ø 50mm	Silt argileux avec quelques graviers et galets anguleux, d'origine jurassienne, assez compact. Pâte argileux-calcaire de teinte jaunâtre	Toit altéré - Pierre jaune de Neuchâtel	2.20		CL-ML		éch.2: 2.40-2.50
	Galets et graviers d'origine jurassienne (origine: Pierre jaune de Neuchâtel), anguleux avec sable fin et silt, peu cohésif.		2.80		GM		
	Idem mais avec argile, silt et sable.	3.00		GC			
	Fin du forage					Pas d'eau	


Annexe 11.1 : Sondage S1 d'après Preisig G. (2017).

Commune de La Côte-aux-Fées
Sondages à la tarière mécanique au Mont du Bec

Forage: S2

Profondeur: 1.0m
Localisation: Les Bourquins de Vent
Coordonnées: 2°52'165 / 1°18'349
Altitude: env. 1082.6 m.s.m.
Date d'exécution: 21.06.2017

Centre d'hydrogéologie et de géothermie
Université de Neuchâtel
Rue Emile-Argand 11, CH-2000 Neuchâtel

Ø + méthode de forage	Description lithologique et géotechnique	Interprétation géologique	Profondeur des limites [m]	Figurés	USCS ou RQD, pendages	% recup < 100	Hydrogéologie, essais géotechniques, hydrogéologiques, équipement
0-1, tarière méc., ø 60mm	Terre végétale brun foncé, essentiellement silt argileux avec sable. Compacté par le forage.	Couv. sup.	0.50		CL-ML		Pas d'eau
	Roche, calcaire blanc à jaunâtre, lité avec bancs cm à dm, stratification sub-horizontale, assez massive.	Pierre jaune de Neuchâtel	1.00		0-5° SE		


Annexe 11.2 : Sondage S2 d'après Preisig G. (2017).

Commune de La Côte-aux-Fées
Sondages à la tarière mécanique au Mont du Bec


Forage: S3

Profondeur: 3.60m
Localisation: Les Bourquins de Vent
Coordonnées: 2°52'153 / 1°18'388
Altitude: env. 1078.3 m.s.m.
Date d'exécution: 21.06.2017

Centre d'hydrogéologie et de géothermie
Université de Neuchâtel
Rue Emile-Argand 11, CH-2000 Neuchâtel

Ø + méthode de forage	Description lithologique et géotechnique	Interprétation géologique	Profondeur des limites [m]	Figurés	USCS ou RQD, pentages	% recup < 100	Hydrogéologie, essais géotechniques, hydrogéologiques, équipement
0-3m, tarière méc., Ø 60mm	Terre végétale brun foncé, essentiellement silt argileux avec sable. Compacté par le forage.	Couv. sup.	0.60		CL-ML		Pas d'eau
	Argile silteuse de teinte jaunâtre-blanchâtre avec quelques graviers et galets anguleux et d'origine jurassienne	Moraine argileuse jurassienne	1.10		CL		
	Argile graveleuse, compacte, de teinte jaunâtre-blanchâtre, origine jurassienne, particules anguleuse.		2.50		CL / GC		
	Gravier argileux - silteux avec sable et galets, teinte jaunâtre-blanchâtre, particules anguleuses d'origine jurassienne, compact.		3.00		GC-GM		
	Silt avec sable fin, quelques graviers (anguleux), peu cohésif, teinte jaunâtre-blanchâtre, assez compact.		3.60		ML		
Fin du forage							
3-3.6m, tarière méc., Ø 40mm							

Annexe 11.3 : Sondage S3 d'après Preisig G. (2017).

Situation : Bourquins-de-Bise		Coordonnées (CH1093/LV03) : 526'798 / 189'574 Alt. 1065 m		Méthode : fouille Date : 12.04.19 Relevé par : R.Farine	
LOG					
Prof. [m]		Ep. [m]	Lithologie	USCS	Interprétation
0.00		0.46	Matériau silto-argileux légèrement sableux. Présence de racines et quelques cailloux et graviers jurassiens. Jusqu'à 0.22 m matériau de couleur brune et peu compact. A partir de 0.22 m matériau plus rougeâtre, plus compact et moins de racines. Pas de venues d'eau.	CL-ML	Couverture pédologique
0.46		0.72	Silt graveleux un peu sableux accompagné de quelques cailloux et de blocs décimétriques ($\varnothing_{\max} = 15$ cm) jurassiens. Matrice très cohésive et de couleur jaune. Présence de nombreux brachiopodes intacts dans matrice. A partir de 0.85 m, passage plus graveleux prononcé. Pas de venues d'eau.	ML GP-GM	Moraine jurassienne
1.18		0.14	Matériau silto-argileux cohésif et de couleur gris-beige légèrement teinté de jaune. Graviers et cailloux rares. Pas de venues d'eau.	CL-ML	Moraine jurassienne
1.32		0.48	Graviers fin à grossier accompagné de gros blocs ($\varnothing_{\max} = 30$ cm) de calcaire gris (pierre jaune) dans une matrice argileuse de couleur gris-beige. Pas de venues d'eau.	GP-GC	Transition couverture - épikarst
1.80					

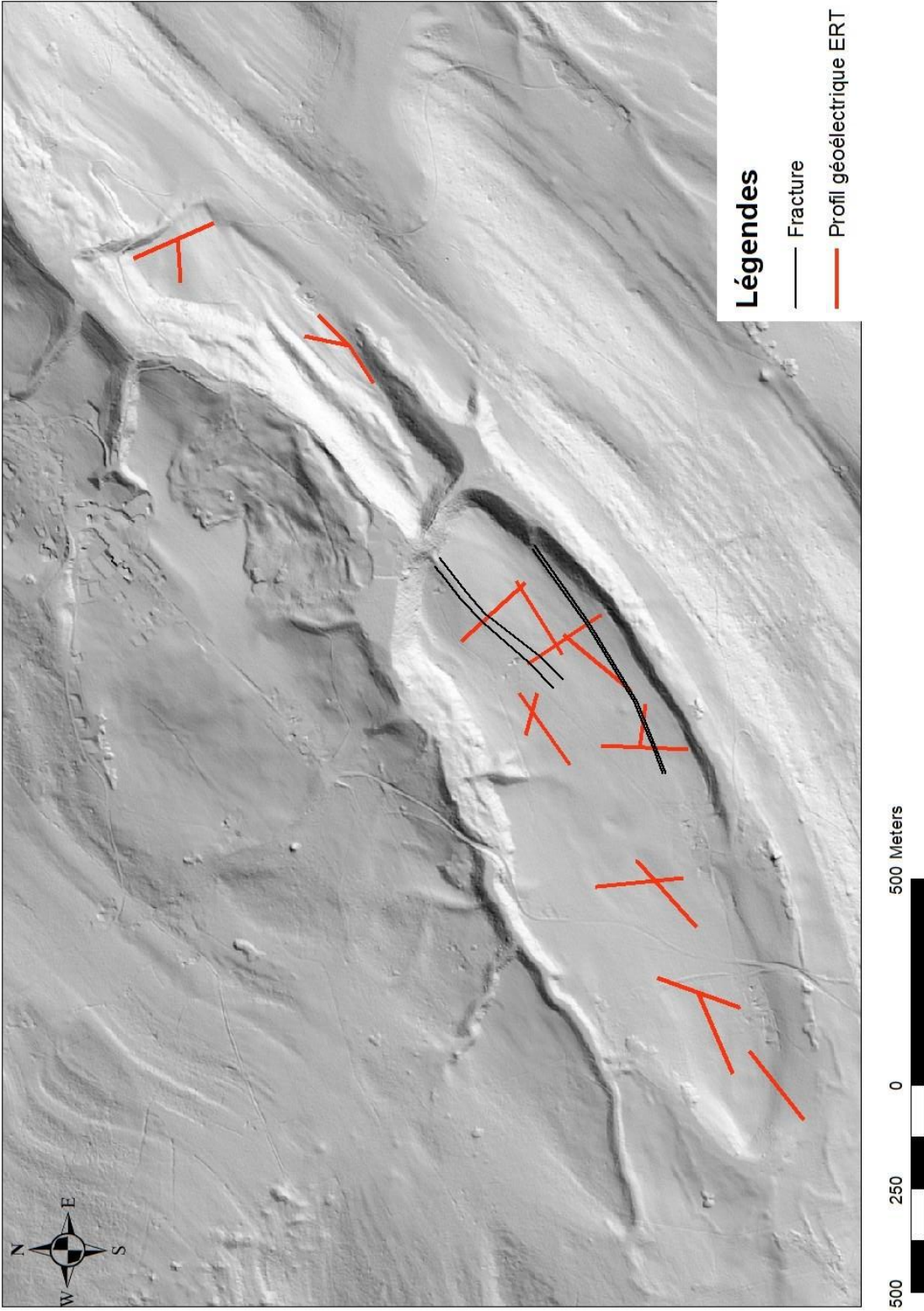
Annexe 11.4 : Données géologiques de la fouille F1 creusée pour l'essai de traçage du 16 avril 2019.



Annexe 11.5 : Données géologiques de la fouille F1 creusée pour l'essai de traçage du 16 avril 2019.

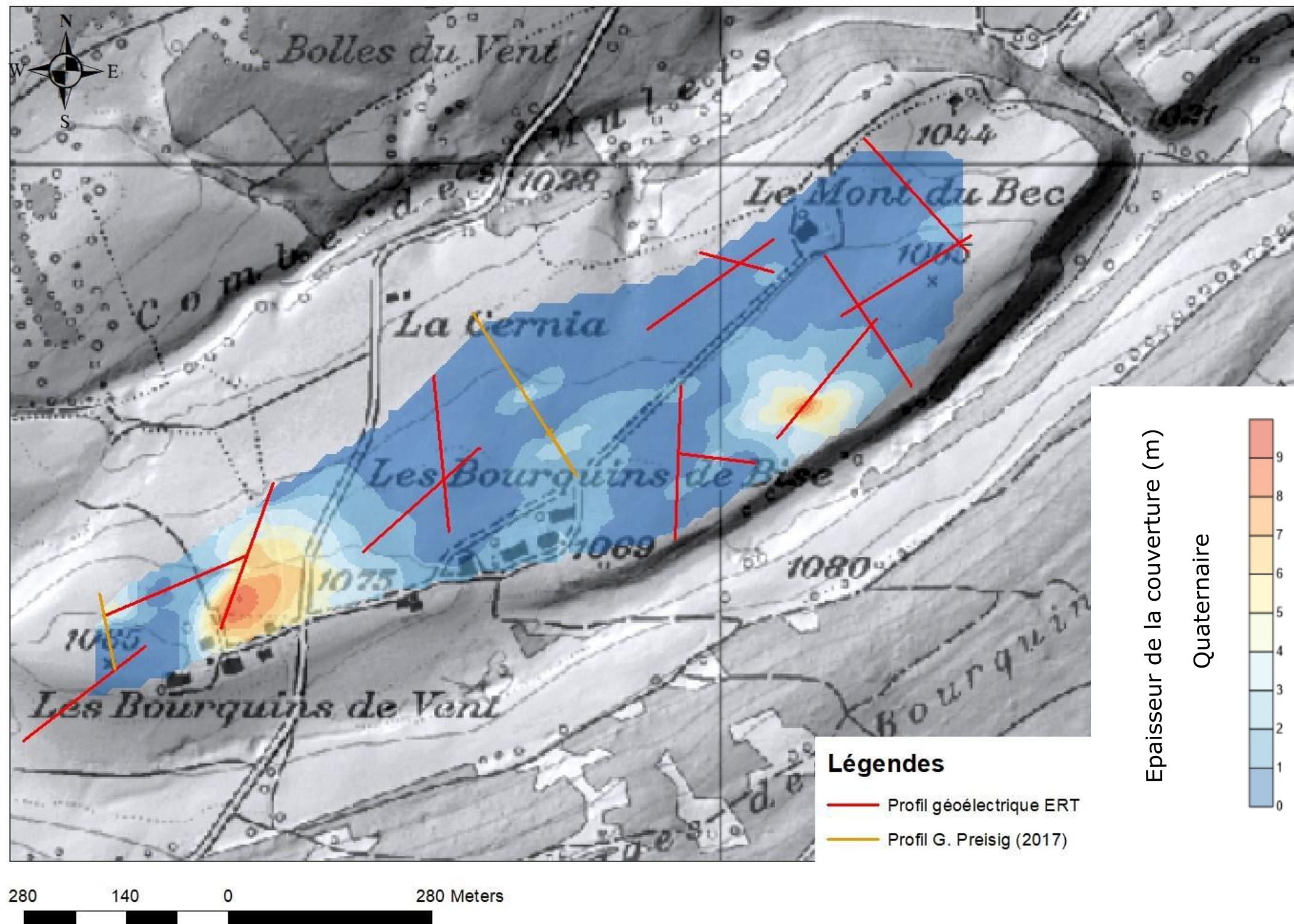
Annexe 12 : Modèle numérique de terrain avec disposition des fractures déterminée par ERT

Modèle numérique de terrain avec disposition des fractures déterminées par ERT



Annexe 12 : Modèle numérique de terrain (MNT) avec fractures déterminées par la campagne géoélectrique et disposition des profils ERT.

Carte de l'épaisseur de la couverture protectrice sur le plateau des Bourquins à La Côte-aux-Fées.



Annexe 14 : Injection de l'essai de traçage



Annexe 14 : Injection de l'uranine et de la sulforhodamine B lors de l'essai de traçage le 16 avril 2019.

Annexe 15 : Etapes de récupération des données du spectrofluorimètre de terrain

Cette annexe présente la méthodologie appliquée pour la récupération des données d'uranine et de sulforhodamine B à partir des mesures de l'ampoule amino acide G (L3) et du fichier de calibration (CALIBRAT.DAT). La méthodologie est présentée à l'aide d'un exemple tiré des données à la source César-Guye.

1. Calculs des rapports d'intensité des ampoules L1/L3 et L1/L2

Le fichier de calibration correspond à l'appareil avec le numéro de série 605 et donne les valeurs de calibration suivante ;

Tableau a : Données de calibration du fichier CALIBRAT.DAT 605 pour l'uranine.

Ampoule (fct)	Interaction avec [mV]		Correction [mV]
	Eau	Uranine	
L1 (ur.)	2.96	2486.11	2483.15
L2 (sulfoB)	1.38	76.77	75.39
L3 (aag)	0.17	14.27	14.1

L'eau a une influence sur la mesure des ampoules, il est nécessaire de corriger cela. Le calcul des rapports L1/L3 et L1/L2 (Eq. a et b) est réalisé à partir des valeurs corrigées de l'uranine, tel que :

$$\frac{L1}{L3} = \frac{2483.15}{14.1} = 176.1 \quad (a)$$

$$\frac{L1}{L2} = \frac{2483.15}{75.39} = 32.9 \quad (b)$$

2. Calculs et corrections des valeurs d'intensité en [mV] mesurées

Tableau b : Calculs et corrections de l'intensité de l'uranine sur l'ampoule L1 et de la sulforhodamine B sur l'ampoule L2.

Valeurs brutes mesurées à chaque ampoule				
Ampoule	L1	L2	L3	L4
Fct de détection	U	S	A	Turb.
Mesures	2486	1338	98.4	21
Valeurs calculées et corrigées pour chaque traceur				
Traceur	L3cor	L1calc	L2ur	L2sul
Baseline	11.5	-	-	-
Formule	L3-11.5	L3cor * L1/L3	L1calc / (L1/L2)	L2-L2ur
Résultats	86.9	15296.9	464.4	873.5

Cette étape consiste, dans un premier temps, à déduire l'intensité hypothétique de l'ampoule L1 (L1calc) à partir de l'intensité de l'ampoule L3. Cette dernière nécessite d'abord une correction (L3cor) avant sa conversion en « L1 » en soustrayant le bruit de fond. Dans un

second temps, l'influence de l'uranine sur l'intensité de l'ampoule L2 (L2ur) est calculée puis soustraite à l'intensité de l'ampoule L2 (L2) donnant alors uniquement l'intensité propre à la sulforhodamine B (L2sul).

3. Conversion des données d'intensité en [mV] en données de concentration en [ppb]

La dernière étape consiste à transformer ces données calculées et corrigées en données de concentrations.

Pour cela la formule ci-dessous s'applique (Eq.c) :

$$C = (Lx_{cor} * F_{calib}) - B \tag{c}$$

$$C = \left((Lx - Lx_{calibEau}) * \frac{100}{(Lx_{calib} - Lx_{calibEau})} \right) - B$$

C : Concentration du traceur en [ppb]

Lx_{cor} : Intensité corrigée de l'ampoule Lx en [mV]

F_{calib} : Facteur de correction d'après le fichier de calibration sans unité [-]

B : Bruit de fond de l'eau en [ppb]

Lx : Intensité mesurée de l'ampoule Lx en [mV]

Lx_{calib} : Intensité de l'ampoule Lx pour la calibration en [mV]

Lx_{calibEau} : Intensité de l'ampoule Lx pour la calibration dans l'eau propre en [mV]

Le bruit de fond de l'eau sur le site d'étude est estimé à partir des mesures antérieures à l'essai de traçage, d'où la nécessité de démarrer l'appareil avant l'expérimentation.

Des disparités peuvent exister entre les mesures manuelles et les mesures automatiques de l'appareil. En considérant les mesures de laboratoire comme exactes, un facteur de correction (Eq.d) est appliqué aux valeurs automatiques afin de les faire correspondre au mieux avec les mesures manuelles.

$$F = \frac{C_{t,manuelle}}{C_{t,auto}} \tag{d}$$

$$C_{autoCor} = C_{auto} * F$$

F : Facteur de correction sans unité [-]

C_{t,auto} : Concentration automatique du traceur au temps t en [ppb]

C_{t,manuelle} : Concentration manuelle du traceur au temps t en [ppb]

C_{auto} : Concentration automatique du traceur en [ppb]

C_{autoCor} : Concentration automatique du traceur corrigée en [ppb]

Pour en revenir à notre exemple (Tab.c) les valeurs suivantes sont obtenues :

Tableau c : Conversion des données d'intensité en données de concentration.

Traceur	Intensité [mV]	Baseline [mV]	Facteur F [-]	Conc. [ppb]
Uranine	15296.9	0	0.83	504.4
SulfoB	873.5	8.9	0.28	330.5

Annexe 16 : Résultats et analyses de l'essai de traçage

Résultats des analyses d'échantillons manuels au fluorimètre de laboratoire

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
La Scie	CAF1	18.04.2019 09:50	0.00	0.00
		19.04.2019 09:50	0.81	0.25
		20.04.2019 09:30	2.31	1.23
		21.04.2019 09:45	2.67	2.16
		22.04.2019 10:00	2.13	1.68
		24.04.2019 09:15	1.07	0.95
		26.04.2019 10:00	1.21	1.24
		29.04.2019 10:15	1.23	2.55
		03.05.2019 10:55	0.15	1.61
		06.05.2019 09:30	0.10	1.65
		10.05.2019 09:30	0.08	0.87
		20.05.2019 09:45	0.01	0.28

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
César-Guye	CAF4	17.04.2019 09:20	0.00	0.00
		18.04.2019 10:30	0.03	0.00
		19.04.2019 10:30	188.00	134.79
		20.04.2019 10:15	508.17	367.54
		21.04.2019 10:10	378.09	284.97
		22.04.2019 10:30	219.75	192.40
		24.04.2019 09:30	127.82	133.44
		26.04.2019 09:30	53.32	71.00
		29.04.2019 11:00	3.00	5.55
		03.05.2019 09:45	4.69	9.18
		06.05.2019 10:30	1.75	3.84
		10.05.2019 11:40	0.31	0.79
		20.05.2019 10:00	1.70	2.98

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
C. Nord	CAF6	17.04.2019 10:10	0.00	0.00
		18.04.2019 11:17	0.31	0.12
		19.04.2019 11:00	661.92	411.21
		20.04.2019 10:10	159.76	122.63
		21.04.2019 10:00	108.78	100.93
		22.04.2019 11:15	61.91	64.28
		24.04.2019 10:05	33.32	36.95
		26.04.2019 10:20	18.67	21.02
		29.04.2019 11:55	3.80	7.00
		03.05.2019 10:10	5.84	10.76
		06.05.2019 11:00	3.49	7.70
		10.05.2019 12:20	0.39	0.98
		20.05.2019 12:20	1.26	1.76

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
C. Centre	CAF7	17.04.2019 10:00	0.00	0.00
		18.04.2019 11:10	0.39	0.09
		19.04.2019 11:40	743.10	467.86
		20.04.2019 10:55	170.58	138.71
		21.04.2019 10:20	115.39	104.61
		22.04.2019 11:10	65.33	70.90
		24.04.2019 10:00	33.03	40.72
		26.04.2019 10:15	22.37	23.43
		29.04.2019 11:45	4.99	8.62
		03.05.2019 10:55	6.62	12.22
		06.05.2019 11:55	3.90	8.31
		10.05.2019 12:10	0.53	1.17
		20.05.2019 12:10	1.38	1.79

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
C. Sud	CAF8	17.04.2019 09:55	0.00	0.00
		18.04.2019 11:05	28.31	18.31
		19.04.2019 10:30	295.21	226.09
		20.04.2019 10:10	179.66	141.53
		21.04.2019 10:00	103.98	119.83
		22.04.2019 10:55	71.84	85.09
		24.04.2019 09:35	49.28	64.55
		26.04.2019 09:35	12.45	17.79
		29.04.2019 11:00	3.38	6.46
		03.05.2019 09:45	3.03	2.00
		06.05.2019 10:30	2.50	4.11
		10.05.2019 11:55	0.46	0.71
		20.05.2019 10:20	1.81	1.48

Source	Code	Date/Heure	Concentration [ppb]	
			Uranine	Sulfo B
R. Sud	CAF11	17.04.2019 10:30	0.00	0.00
		18.04.2019 11:45	0.00	0.00
		19.04.2019 11:20	0.00	0.00
		20.04.2019 11:30	0.00	0.00
		21.04.2019 10:45	0.00	0.00
		22.04.2019 11:40	0.00	0.00
		24.04.2019 10:20	0.00	0.00
		26.04.2019 10:40	0.00	0.00
		29.04.2019 12:15	0.00	0.00
		03.05.2019 10:25	0.00	0.00

Annexe 16.1 : Résultats des analyses des échantillons manuels aux sources.

Tableau récapitulatif de l'essai de traçage double du 16 avril 2019

Paramètre de l'injection		Traceur	Zone de l'aquifère	Lieu d'injection	Coord. (CH1903/LV03)	Date injection (td)	Durée [h]	Masse in. [g]	Vol. rinçage [m3]
Méthode	Traceur	vadoses, épikarst	Bourquins de Bise	526798 / 189574	16.04.2019 09.00	2,6	1000	3	
Conc./instantané	urinaire	vadoses, couverture	Bourquins de Bise	526801 / 189577	16.04.2019 09.00	3	1500	2,5	

emarque : valeur manuelle en italique.

Résultats avec surveillance haute résolution (fluorimètres de terrain et échantillonneur automatique)

Source	Code	Traceur	Distance [m]	Restitution %	t. arrivée [h/j]	v. arrivée [m/h]	t. pic [h/j]	v. pic [m/h]	Conc. max [ppb]
La Scie	CAF1	sulfo B	1330	2	72,8 / 3,0	313,3 / 13,0	18,3	4,3	2,2
		urinaire	1326	0,5	63,3 / 2,6	123,6 / 5,2	21	10,7	2,7
César-G	CAF4	sulfo B	880	20	52,5 / 2,2	102,8 / 4,3	16,8	8,6	334,3
		urinaire	876	15	51,9 / 2,2	101,9 / 4,2	16,9	8,6	506,2
Mél.	CAF2	sulfo B	1372	46	52,5 / 2,2	88,5 / 3,7	26,1	15,5	305,3
		urinaire	1368	35	49,5 / 2,1	88,5 / 3,7	27,6	15,5	433,4

Résultats avec surveillance basse résolution (manuel)

Source	Code	Traceur	t. arrivée [h/j]	t. pic [h/j]	v. arrivée [m/h]	v. pic [m/h]	Conc. max [ppb]
C. Nord	CAF6	sulfo B	50,3 / 2,1	74 / 3,1	16	11	411,2
		urinaire	50,3 / 2,1	74 / 3,1	16	11	661,9
C. Centre	CAF7	sulfo B	50,2 / 2,1	74,7 / 3,1	16	11	467,7
		urinaire	50,2 / 2,1	74,7 / 3,1	16	11	743,1
C. Sud	CAF8	sulfo B	50,1 / 2,1	73,5 / 3,1	16	11	226,1
		urinaire	50,1 / 2,1	73,5 / 3,1	16	11	295,2

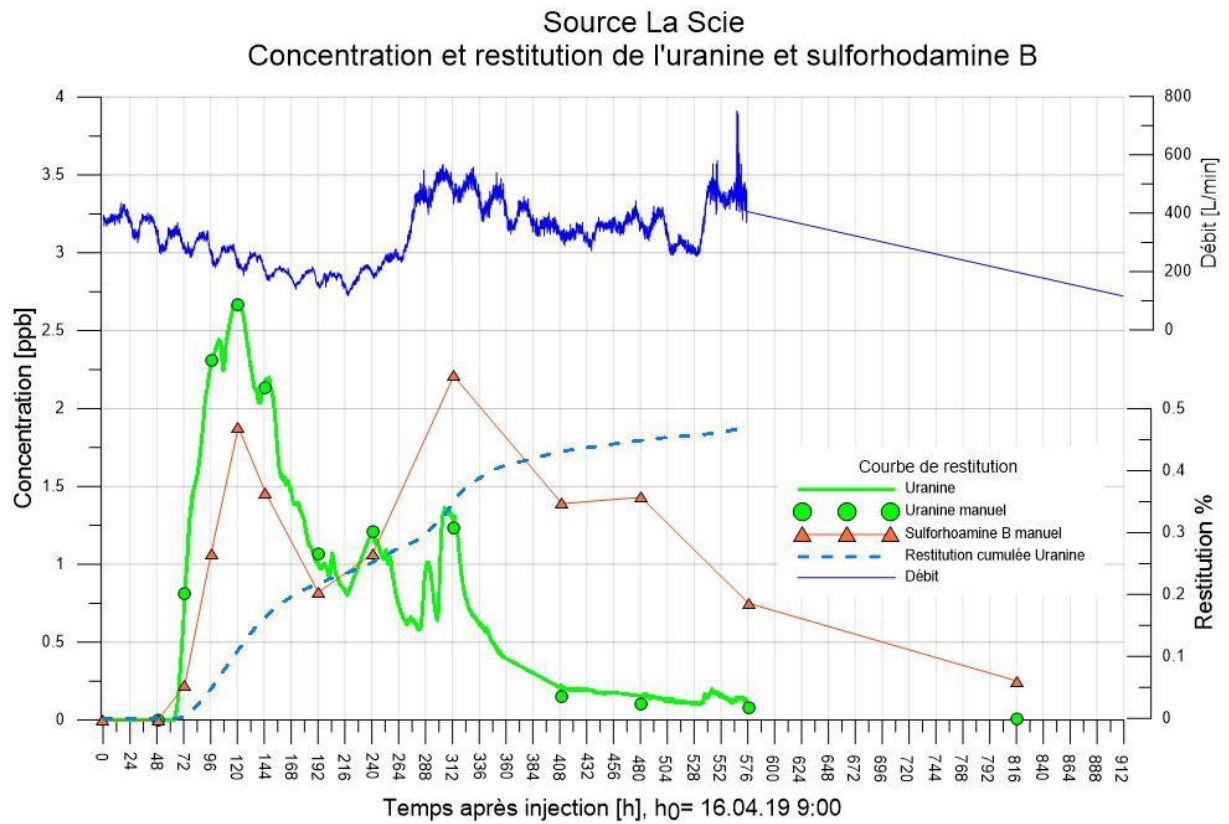
Résultats avec surveillance qualitative (fluocapteur)

Source	Code	Traceur	Conc. [ppb]	Présence
Rales	-	sulfo B	97	détecté
		urinaire	7	détecté
Annens O.	-	sulfo B	0	n.d.
		urinaire	0	n.d.
Ruis. Sud	-	sulfo B	0	n.d.
		urinaire	0	n.d.

Calculs temps de transit moyen et dispersivité

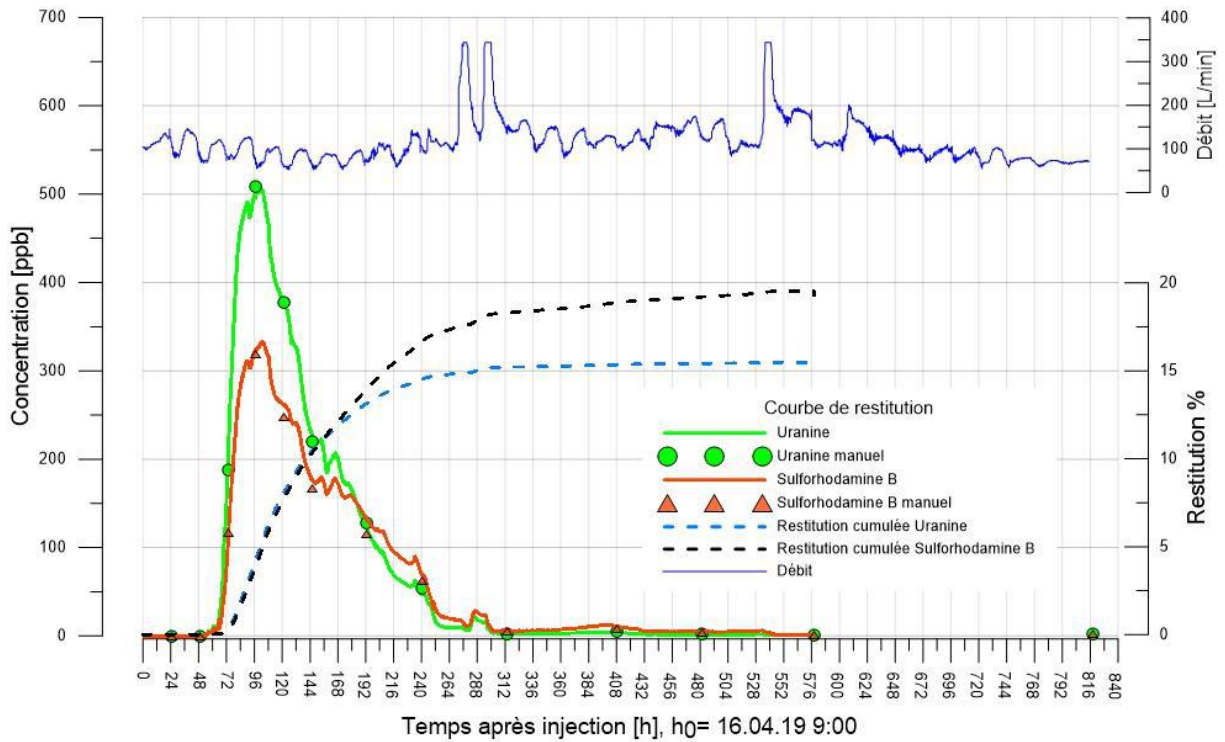
Source	Code	Traceur	t1 [h]	t2 [h]	phi1 [-]	phi2 [-]	dx/(v*x) moy	t. moyen [h/j]	v. moyen [m/j]	aL [m]	DL [m2/j]
César-G	CAF4	sulfo B	76,2	157	1,35	0,66	0,049	125,1 / 5,2	168	43,3	7271,2
		urinaire	74,9	140,3	1,36	0,73	0,036	117,7 / 4,9	179,5	31,8	5705,6
Mél.	CAF2	sulfo B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		urinaire	70	116	1,26	0,76	0,023	97,1 / 4,0	338	31,9	10769,8

Annexe 17 : Courbes de restitution à la source de La Scie, César-Guye et sources Mélangées



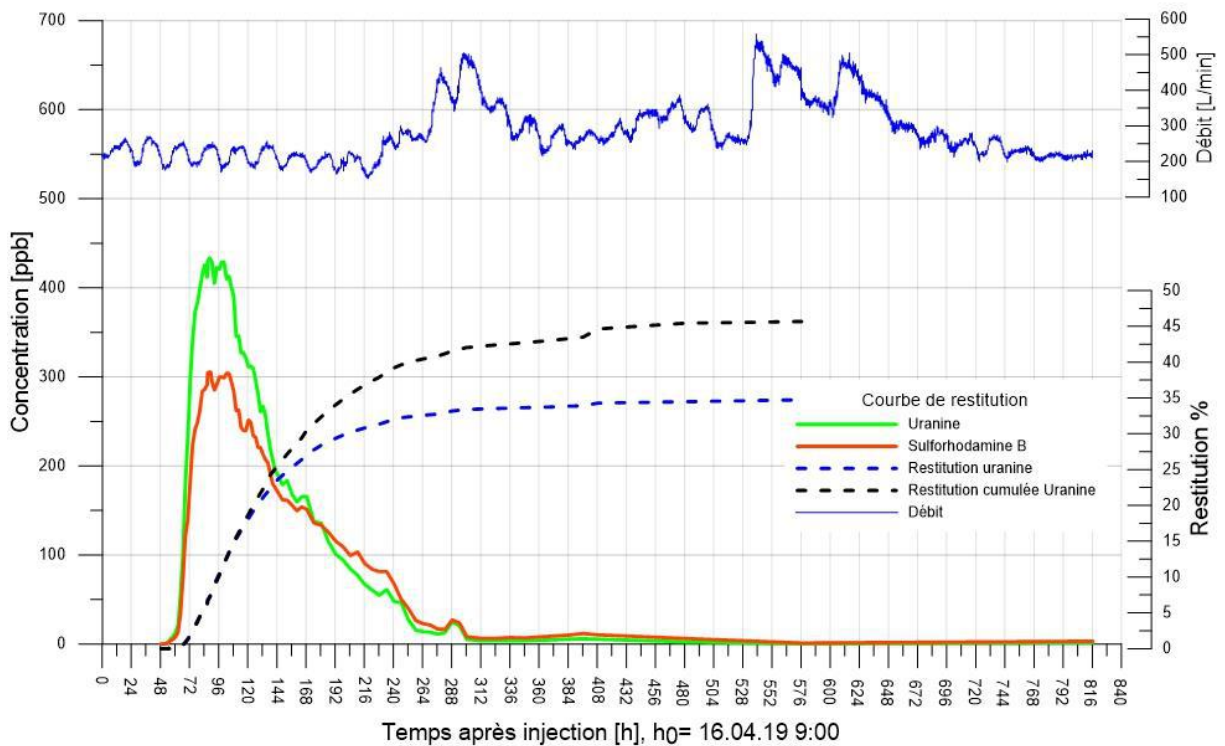
Annexe 17 : Courbes de restitution avec courbes cumulées.

Source César-Guye
Concentration et restitution de l'uranine et sulforhodamine B



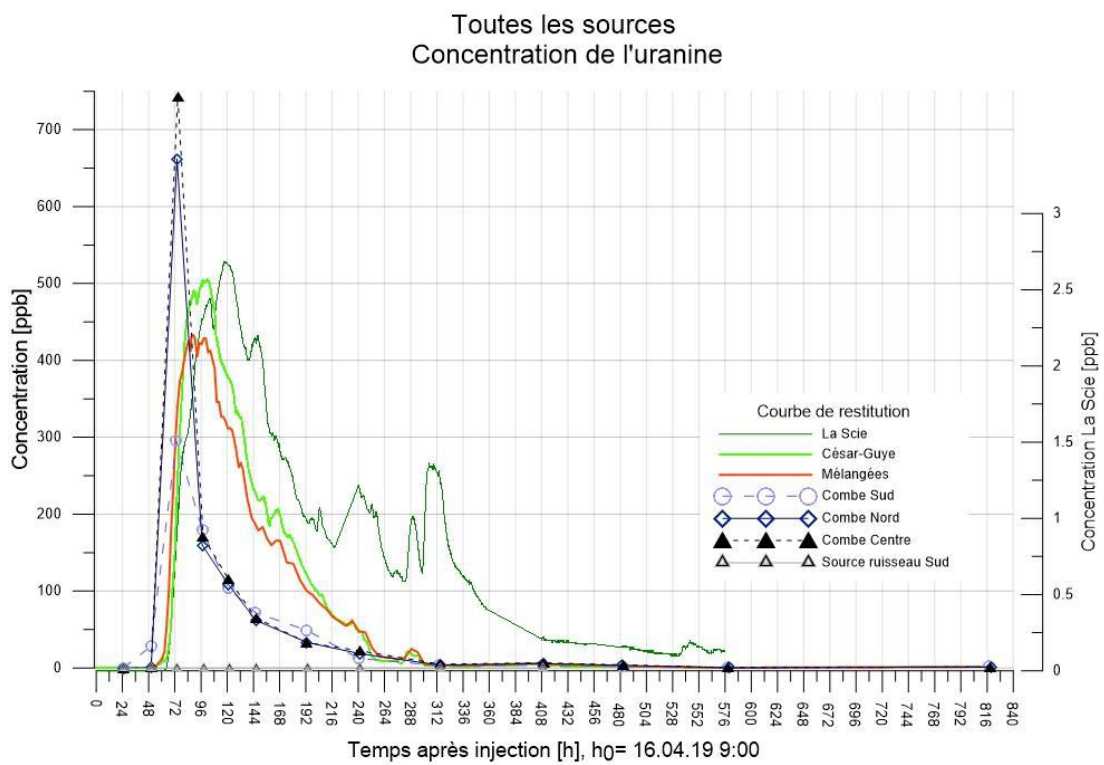
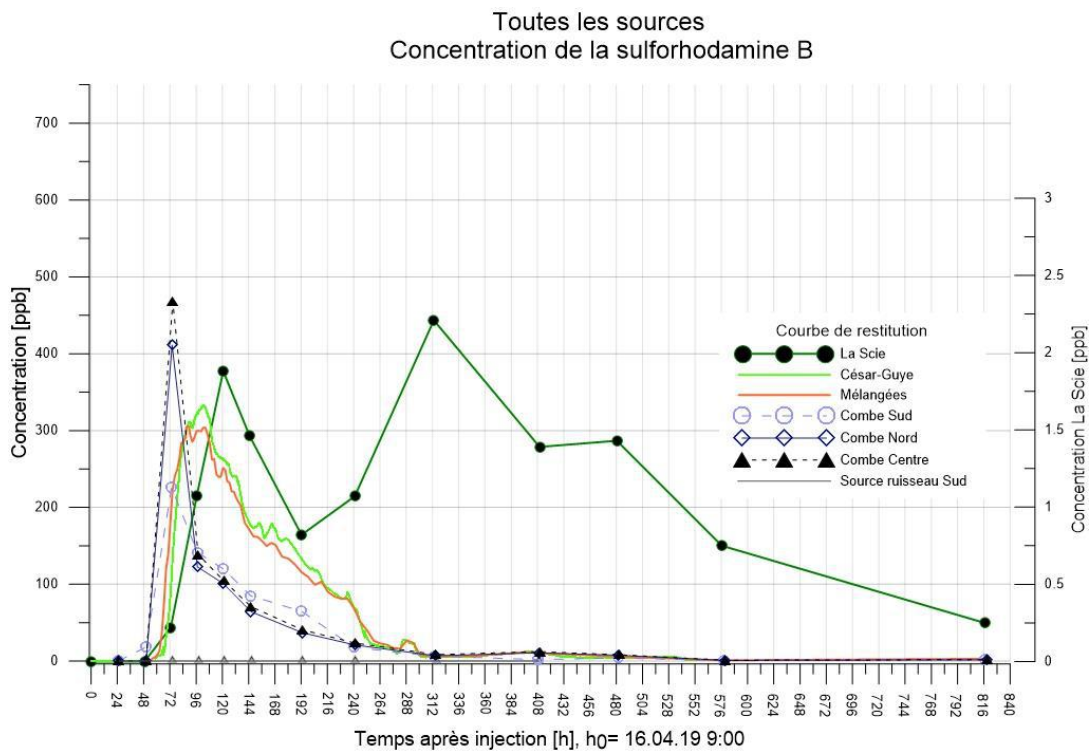
Annexe 17 : Courbes de restitution avec courbes cumulées.

Sources Mélangées
Concentration et restitution de l'uranine et sulforhodamine B



Annexe 17 : Courbes de restitution avec courbes cumulées.

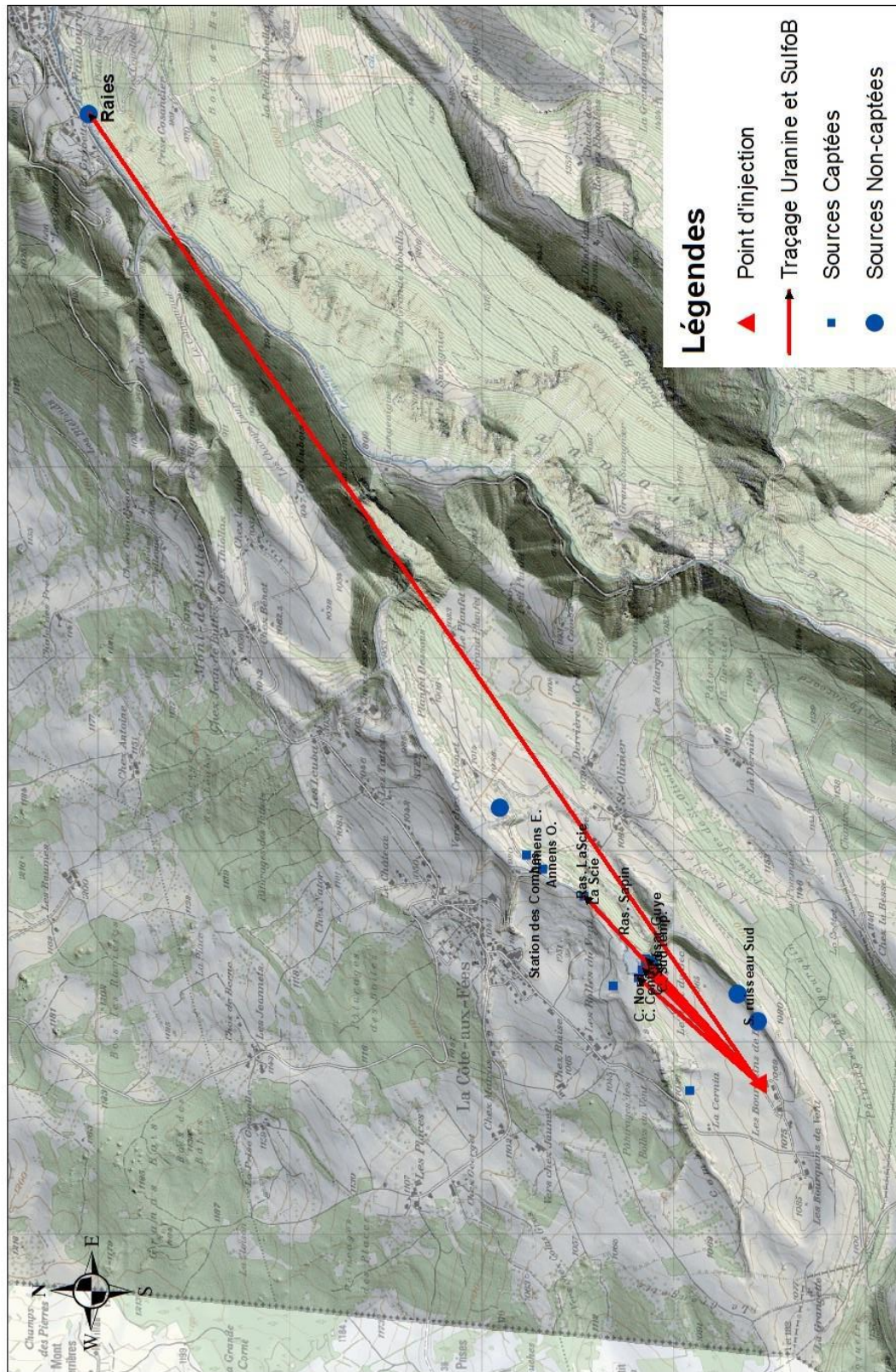
Annexe 18 : Courbes de restitution sulfurhodamine B et uranine pour toutes les sources



Annexe 17 : Courbes de restitution de la sulfurhodamine B et de l'uranine pour toutes les sources.

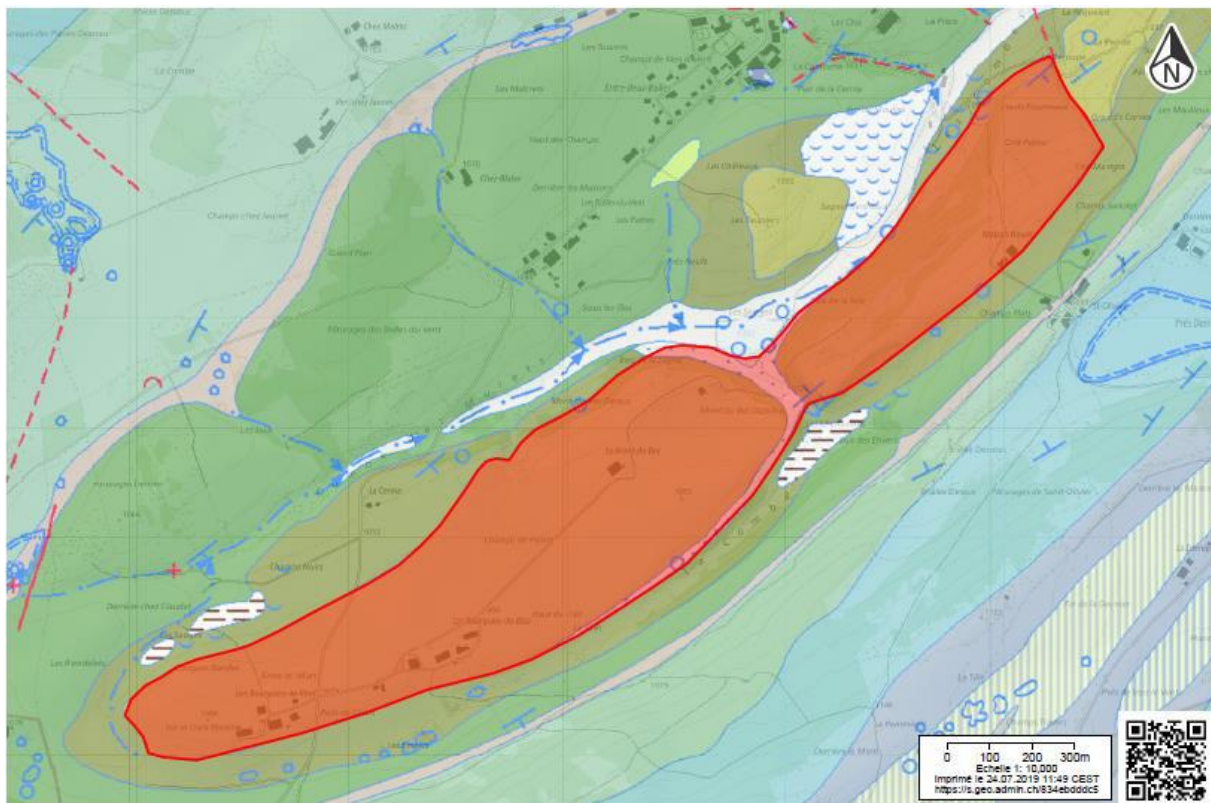
Annexe 19 : Carte synthétique de l'essai de traçage à l'échelle régionale

Résultats de l'essai de traçage double du 16 avril 2019, à l'échelle régionale



Annexe 19 : Carte synthétique de l'essai de traçage à l'échelle régionale.

Annexe 20 : Carte géologique avec bassin versant hypothétique



Annexe 20 : Carte géologique avec le bassin versant hypothétique basé sur la géologie.