

MASTER « **H**ydrogéologie, **S**ol et **E**nvironnement »

Master (2)

Année Universitaire 2020 - 2021

# Processus hydrogéologiques d'un karst binaire sur la base d'un réseau multi-échelle (Verneau, 25)

Mémoire présenté par

**Juliette Mexler**

Stage réalisé au BRGM de Bourgogne Franche-Comté  
avec Aurélien Vallet (BRGM Dijon) et Jean-Baptiste  
Charlier (BRGM Montpellier)

## Résumé

Dans le cadre de la problématique des karst binaires, la recharge par les pertes est souvent observée mais très rarement quantifiée. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre et quantifier l'impact de la recharge par les pertes sur le comportement hydrogéologique des karst binaires. Une méthode à différentes échelles a été utilisée afin de caractériser les écoulements dans les différents compartiments de l'aquifère : la pluie, la recharge localisée, la recharge diffuse, les transferts dans les principaux réseaux de conduits (le collecteur) et les transferts jusqu'à la source.

Une telle méthode a été mise en place sur le réseau karstique du Verneau dans le massif du Jura à l'échelle horaire. Ce karst binaire typique est rechargé par 4 gouffres connectés à un réseau long de 30 km sur une surface de bassin versant de 15 km<sup>2</sup>.

Les premiers résultats concernent un calcul de bilan annuel sur une période de 30 ans montrant un système continuellement en fuite avec environ 187 mm/an de fuites (ce qui représente 21% du système). En prenant également en compte la recharge diffuse provenant de l'infiltration des sols mesurée à l'aide de lysimètres, sur une période biannuelle le comportement devient plus complexe avec un effet des saisonnalités qui entre en jeu.

Les résultats qui suivent concernent une étude d'événements de crue sur une sélection de 29 épisodes montrant un seuil de condition initial en dessous duquel le système est amené à stocker l'eau dans la matrice et au-dessus duquel le système va se vidanger lors des événements de crue. La recharge localisée représente environ 70% de la recharge totale et est principalement stockée lors des périodes de basses eaux et relarguée lors des événements de crue. Pour des conditions initiales à saturation, la recharge diffuse est activée en addition à la recharge localisée, représentant 30% de la recharge totale.

Pour finir les résultats obtenus montrent que la recharge localisée provenant des pertes joue un rôle majeur dans la régulation du système du à sa forte contribution dans le phénomène de recharge

Karst aquifers characterized by autogenic and allogenic recharge areas refer to 'binary karst' type. The allogenic recharge from stream losses is often observed, but rarely quantified. The aim of this study is to better understand and quantify the impact of allogenic recharge on the hydrogeological behavior of a binary karst aquifer. A multiscale flow monitoring is used to characterize flows in the different aquifer compartments: rainfall, allogenic recharge (losing stream discharge), autogenic recharge (water infiltration in soil lysimeters), transfers in the main conduit network (water levels in the epiphreatic zone), transfers at the karst outlet (spring discharge).

Such monitoring has been performed at an hourly time step on the karst aquifer of the Verneau spring in the French Jura's Mountains. This binary karst is recharged by 4 losing streams connected to a 30-km long conduit network over a 15 km<sup>2</sup> recharge area.

First results about a global annual water balance over a 30-yr time series show continuous losses of about 187mm/yr (21% of the system). Accounting for autogenic recharge from infiltration in lysimeter and allogenic recharge from streams at a monthly time step over a 2-yr period show a more complex behavior, with the influence of seasonal storage of allogenic recharge.

Second results about flood event analysis (selection of 29 events) show a threshold effect under low initial saturation state below which the system store water in the matrix, and above which the system is well connected favoring transfers from surface toward the outlet during the flood event. The allogenic recharge represents 70% of the total recharge, and is mostly stored during dry

periods or released during high flow periods. Under high initial saturation state, the autogenic recharge is activated in addition to the allogenic one, representing up to 30 % of the total recharge.

Finally, our results show that the allogenic recharge from stream losses play an important role in the regulation of the system due to its high contribution regarding the total recharge and regarding its seasonality.

## Remerciements

Je remercie en premier lieu toute l'équipe du BRGM de Dijon, Manuel, Alexine, Gabriella et Clément ainsi que Mélissa et Grace qui m'ont tout de suite intégré dans leur équipe. Une attention particulière à Manuel Parizot, directeur de l'antenne de Dijon pour sa confiance qu'il m'a accordé, ce qui m'a permis d'acquérir de l'indépendance lors des campagnes sur le terrain.

Je remercie également plus généralement tous les agents du BRGM avec qui j'ai été en communication. La bienveillance est une qualité que j'ai retrouvé chez toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger.

Enfin je remercie mes deux encadrants de stage (Jean-Baptiste Charlier et Aurélien Vallet), leurs avis divergents ne m'ont pas rendu la tâche facile mais grâce à eux j'ai pu développer des compétences et des connaissances sur le karst en un temps record.

Je remercie plus particulièrement Aurélien Vallet, mon encadrant principal qui m'a offert un accompagnement de grande qualité tout au long de mon stage. Son esprit critique m'a permis de développer le mien. Mon expérience au BRGM de Dijon a été extrêmement enrichissante en partie grâce à lui et j'en garderai de très bons souvenirs pendant très longtemps.

# Sommaire

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SITE ET DONNEES .....</b>	<b>2</b>
2.1.    SITE DE L'ÉTUDE .....	2
2.1.1. <i>Contexte géographique et occupation du territoire</i> .....	2
2.1.2. <i>Contexte géologique</i> .....	3
2.1.3. <i>Contexte hydrogéologique</i> .....	5
2.2.    DONNEES DISPONIBLES .....	7
2.2.1. <i>Données spatiales</i> .....	7
2.2.2. <i>Données temporelles</i> .....	7
2.3.    DONNEES ACQUISES .....	8
2.3.1. <i>Suivis continus</i> .....	8
2.3.2. <i>Mesures ponctuelles</i> .....	8
<b>3. METHODE.....</b>	<b>10</b>
3.1.    ANALYSES SPATIALES .....	10
3.1.1. <i>Evaluation qualitative de la perméabilité</i> .....	10
3.2.    ANALYSE TEMPORELLE .....	11
3.2.1. <i>Calculs de bilan</i> .....	11
3.2.2. <i>Débits classés</i> .....	13
3.2.3. <i>Analyse des évènements de crue</i> .....	13
<b>4. RESULTATS ET INTERPRETATION .....</b>	<b>15</b>
4.1.    DELIMITATION DE LA ZONE D'ALIMENTATION.....	15
4.1.1. <i>Cartographie 3D du réseau du Verneau</i> .....	15
4.1.2. <i>Evaluation qualitative de la perméabilité</i> .....	15
4.1.3. <i>Analyse structurale</i> .....	17
4.1.4. <i>Délimitation des zones d'alimentation du Verneau</i> .....	20
4.2.    ECOULEMENTS A L'ECHELLE ANNUELLE ET MENSUELLE.....	22
4.2.1. <i>Bilan annuel</i> .....	22
4.2.2. <i>Bilan mensuel</i> .....	23
4.2.3. <i>Débits classés</i> .....	24
4.3.    ECOULEMENT A L'ECHELLE EVENEMENTIELLE .....	25
4.3.1. <i>Sélection des épisodes</i> .....	25
4.3.2. <i>Relations pluie-débit</i> .....	26
4.3.3. <i>Influence des pertes</i> .....	29
4.3.4. <i>Vitesse de transfert de pression</i> .....	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>
<b>6. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>35</b>
<b>7. ANNEXES .....</b>	<b>37</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Répartition des tâches réalisées lors du stage .....	0
Figure 2 : Situation géographique du site d'étude avec présentation du réseau karstique, des pertes et de l'exutoire. Fond de carte : ortho photos .....	2
<i>Figure 3 : Carte structurale de la zone d'Ornans (Bichet et al, 2013) <sup>(5.)</sup> avec ajout de l'emplacement de la source du Verneau .....</i>	<i>3</i>
Figure 4 : Schéma structural de la zone d'étude à l'échelle locale et régionale (réalisé par Aurélien Vallet, BRGM).....	3
Figure 5 : Cartes géologiques imprimées au 1:50 000 correspondant à l'emplacement de la zone d'étude (jonction entre les cartes géologiques imprimées d'Ornans, Pontarlier, Salins-les-Bains et Quingey). Légende de la carte présentée ci-après avec la description des terrains .....	4
<i>Figure 6 : Log lithostratigraphique avec encadré en rouge correspondant aux terrains présents sur la zone d'étude (Chauve 2006) <sup>(6.)</sup> .....</i>	<i>5</i>
Figure 7 : Carte des informations hydrologiques avec représentation du réseau et emplacement des traçages historiques .....	6
Figure 8 : Etude du débit mensuel moyen à la source du Verneau en fonction du cumul mensuel de la pluie sur une période de 1998 à 2020 .....	6
Figure 9 : Présentation de l'instrumentation in situ et ex situ mise en place dans le cadre du projet sur le site du Verneau. La station DREAL (5) a installée antérieurement au projet.....	9
Figure 10 : Schéma de fonctionnement de la recharge sur le karst binaire du Verneau et composantes du bilan. ....	12
Figure 11 : Numérisation en 3D du réseau karstique du Verneau à l'aide de l'outil Qgis2threejs .....	15
Figure 12 : Rappel de la méthodologie exposée en partie 3.1.1 pour l'évaluation d'indices de karstification et présentation des résultats obtenus pour les zones de plateaux et de faisceaux aux échelles locales et régionales.....	16
Figure 13 : Coupes géologiques réalisées à l'endroit des pertes avec symbologie correspondant aux degrés de perméabilité.....	19
Figure 14 : Carte de synthèse représentant le degré de perméabilité des formations ainsi que les traits de coupes, la position du réseau et de l'altitude de la source dans les couches géologiques, et les 4 délimitations des zones d'alimentation.....	21
Figure 15 : Calcul des IGF annuels estimés à partir de 4 surfaces de zone d'alimentation : la délimitation de la zone d'alimentation, ses limites maximales et minimales ainsi que la délimitation optimisée par le calcul de bilan .....	22
Figure 16 : Calcul de bilan prenant en compte le type de recharge entre 2020 et 2021 .....	23

Figure 17 : Relation pluie débit sur les 29 évènements sélectionnés avec étude de l'influence du paramètre de surface et des conditions initiales. .... 27

Figure 18 : Corrélation entre le débit des pertes et le débit de l'exutoire..... 29

Figure 19 : (1) Coupe générale du réseau karstique du Verneau avec emplacement des sondes de surface et en souterrain. .... 32

## **Table des annexes**

**ANNEXE 1 : FONCTIONNEMENT D'UN KARST BINAIRE .....37**

**ANNEXE 2 : COURBES DE TARAGE DE VEILLE FOLLE ET JERUSALEM AVEC COURBE DE MODELISATION DES HAUTEURS DE SEUILS .....38**

**ANNEXE 3 : TABLEAU DE SYNTHESE DES PARAMETRES MESURES .....39**

**ANNEXE 4 : CANEVAS D'INTERPRETATION DE LA METHODE DES DEBITS CLASSES DE A. MANGIN .....41**

**ANNEXE 5 : TABLEAU DE FORMULE DES PARAMETRES.....42**

**ANNEXE 6 : METHODOLOGIE DE LA NUMERISATION EN 3D DU VERNEAU .....43**

**ANNEXE 7 : DETAIL DES RESULTATS OBTENUS A PARTIR DES CALCULS DE DENSITES DE DOLINE A L'ECHELLE LOCALE ET REGIONALE .....46**

**ANNEXE 8 : ETUDE DES DEBITS CLASSES A L'EXUTOIRE SUR LA CHRONIQUE DE 1970 A 2019 .....47**

**ANNEXE 9 : CORRELATION CROISEE DU DEBIT, DE LA CONDUCTIVITE, DE LA TEMPERATURE ET DE LA PLUIE...48**



# 1. INTRODUCTION

La majorité de l'eau potable provient des ressources en eau souterraines. Les pressions agricoles sur la réserve en eau souterraine ont fortement augmenté ce dernier siècle, accentuant la vulnérabilité des aquifères (Giordano, 2009) <sup>(1.)</sup>. Les karsts représentent 12 à 15% de la surface mondiale et 35% (voir plus) de la surface du territoire français. Entre 20 et 25% de la population mondiale dépend de la ressource souterraine formée par le karst (Chen et al, 2017) <sup>(2.)</sup>.

La qualité des rivières de Franche-Comté semble s'être dégradée en flèche depuis la fin des années 1960. Des mesures et observations ont permis de démontrer une dégradation des cours d'eau franc-comtois et de leurs fonctions biologiques. Ainsi des mortalités massives de salmonidés ont été recensées au cours des années 2010 et 2011 (Degiorgi et Badot, 2020) <sup>(3)</sup>. Les projets de recherches sur la compréhension du fonctionnement des systèmes karstiques et leur implication dans les processus de transfert des nutriments se sont multipliés ces dernières années.

Le principal affluent du Doubs est la Loue, bien connue pour sa source. Cependant une grande partie des systèmes karstiques du massif du Jura sont également étudiés car ils possèdent les mêmes problématiques de transfert de contaminants des parcelles agricoles vers les rivières.

Ainsi, le projet Nutrikarst, coordonné par le BRGM et ses partenaires scientifiques (Chambre d'agriculture Bourgogne Franche Comté) et financiers (Agence de l'eau) a été lancé en 2019. Le projet porte sur l'impact des activités anthropiques sur les transferts d'eau et de nutriments dans les bassins karstiques du massif du Jura. Le transfert de nutriments est étudié à partir d'un site pilote, l'hydrosystème du Verneau qui représente une configuration et structure commune aux karsts du massif jurassique. Quatre axes de recherche ont été déterminés afin de balayer l'intégralité des aspects de la problématique :

- Axe 1 : Relations à moyen-long terme entre variables hydro-climatiques, agronomiques et physicochimiques ;
- Axe 2 : Caractérisation des interactions surface/souterrain ;
- Axe 3 : Transferts de nutriments aux échelles du système karstique et du bassin ;
- Axe 4 : Porter à connaissance, notamment en accompagnant les politiques de gestion des pratiques agricoles.

Le stage proposé par le BRGM de Montpellier et de Dijon porte sur l'axe de recherche n°2 qui consiste à mieux comprendre les processus hydrogéologiques du système du Verneau à partir d'un réseau de suivi multi-échelle.

Le système karstique étudié étant situé dans une zone fortement marquée par son contexte géologique et tectonique (massif du Jura), une première partie de ce rapport est consacrée à la présentation du site d'étude. Les données disponibles et acquises grâce au réseau de suivi ont permis de développer des méthodes d'analyse spatiales et temporelles de processus hydrogéologiques. Enfin une dernière partie est portée sur les résultats obtenus qui permettent une meilleure compréhension des dynamiques inhérentes au système karstique.

## 2. SITE ET DONNEES

### 2.1. SITE DE L'ETUDE

#### 2.1.1. Contexte géographique et occupation du territoire

Le réseau karstique du Verneau est situé dans le département du Doubs (25) en Franche Comté, il fait parti des vingt réseaux souterrains explorables les plus complexes et les plus longs de France. (Prost, 2007) <sup>(4)</sup>.

La partie connue s'étend sur environ 35 km, passant sous trois communes différentes : Nans-sous-Sainte-Anne, Montmahoux et Déservillers.

Ce réseau possède 6 entrées principales (de l'amont vers l'aval) : le gouffre de la Broche, le gouffre de Jérusalem, le gouffre de la Baume des Crêtes, le gouffre du Biefs Boussets, le creux de la Vieille folle, et le Creux qui sonne. Le terme « perte » sera utilisé dans la suite du rapport car la plupart des gouffres sont actifs. L'exutoire principal constitue la source du Verneau (*Figure 2*).

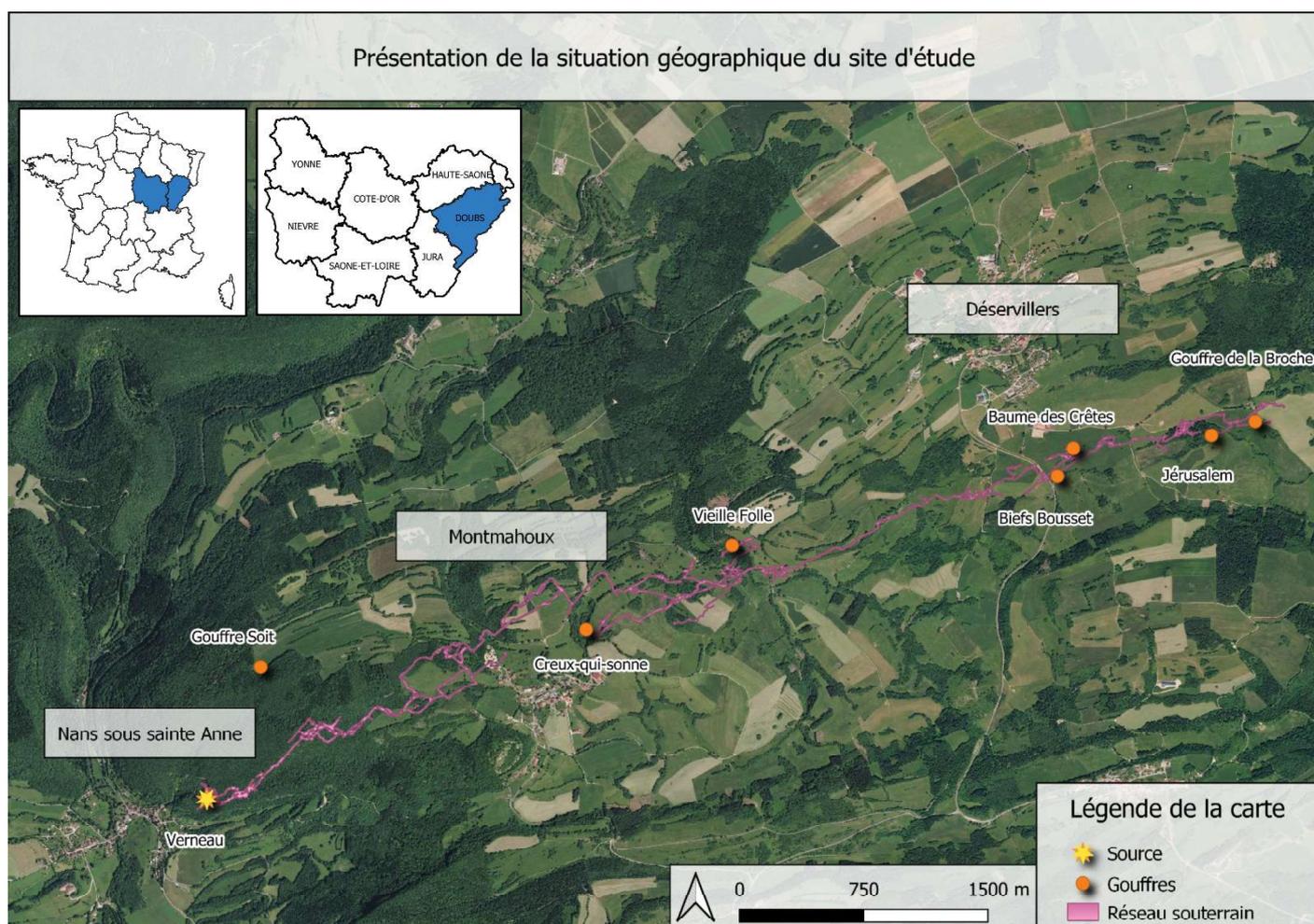


Figure 1 : Situation géographique du site d'étude avec présentation du réseau karstique, des pertes et de l'exutoire.  
Fond de carte : ortho photos

Le dénivelé du réseau est de 387m entre l'entrée la plus haute (Baume des Crêtes à 789m) et un siphon situé 18m sous l'altitude de la source du Verneau (elle-même située à 420m).

La zone d'alimentation recouvre une surface d'environ 15km<sup>2</sup> dont 72% sont consacrés à l'agriculture et l'élevage et 25% aux espaces forestiers.

## 2.1.2. Contexte géologique

### a) Schéma structural

Le massif du Jura résulte d'une compression exercée par les Alpes qui a provoqué le plissement des terrains. Le département du Doubs situé au nord du Jura montre une forte influence des massifs jurassiques, par sa séparation en deux entités paysagères : à l'est les montages des hautes chaînes et à l'ouest les plateaux.

Le secteur de Nans-Sous-Sainte-Anne se situe entre deux plateaux (le plateau d'Ornans et le plateau de Levier) séparés en oblique par le faisceau Salinois (zones d'intenses déformations plissées et faillées présentant généralement un chevauchement vers l'Ouest). Le réseau du Verneau s'est développé à l'extrémité Sud-Ouest du plateau d'Ornans au niveau de la zone plissée et faillée du faisceau salinois dont il reprend la direction (Figure 3).

Dans la suite du rapport, l'influence du schéma structural sur le comportement des formations géologiques sera étudiée. Deux zones ont été délimitées pour cette analyse : une zone à l'échelle locale permet d'étudier le comportement des formations géologiques sur le site du Verneau ; une zone plus large, à l'échelle régionale, donne une vision globale (Figure 4).

A l'échelle locale la zone de plateaux s'étend sur 36.4 km<sup>2</sup> contre 32.9 km<sup>2</sup> pour la zone de faisceaux. Au niveau régional la zone de faisceaux représente 647,2 km<sup>2</sup> contre 887,2 km<sup>2</sup> pour la zone de plateaux.

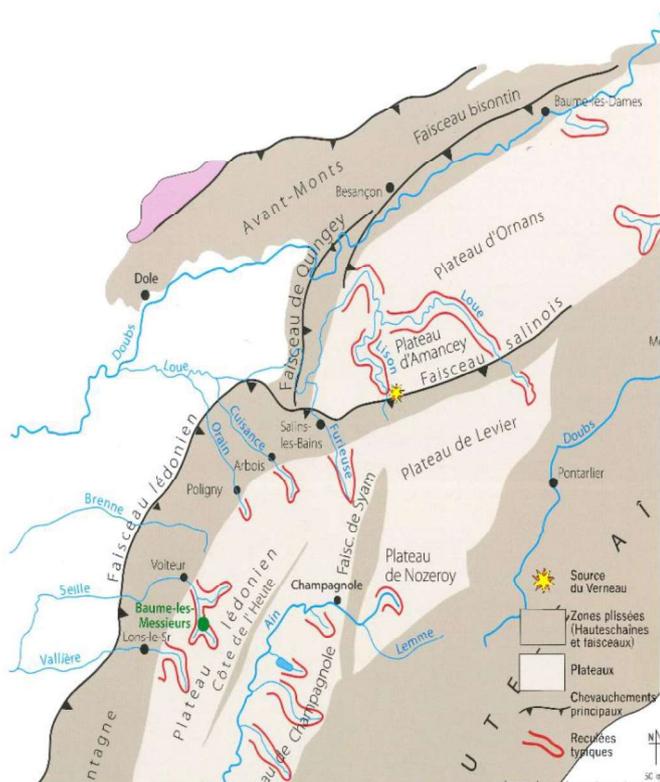


Figure 2 : Carte structurale de la zone d'Ornans (Bichet et al, 2013) <sup>(5)</sup> avec ajout de l'emplacement de la source du Verneau

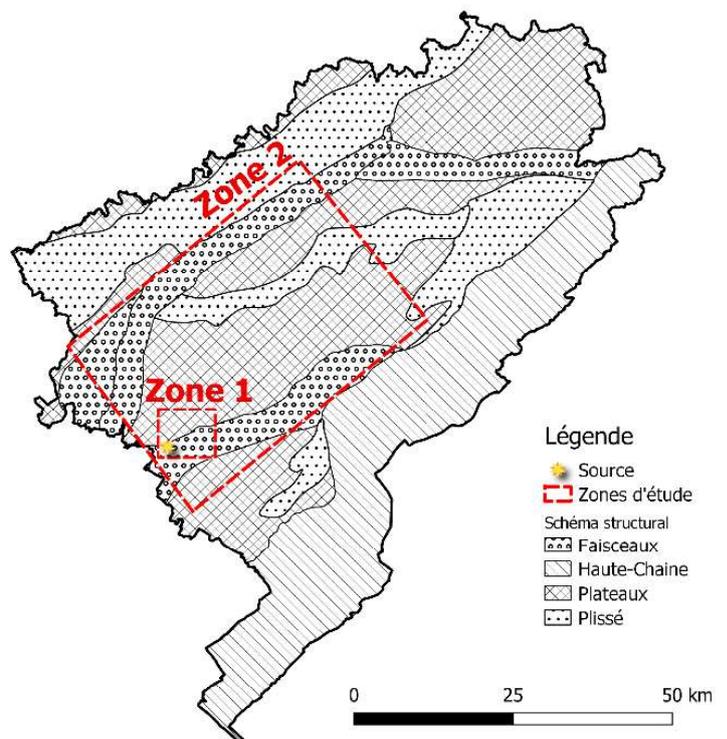


Figure 3 : Schéma structural de la zone d'étude à l'échelle locale et régionale (réalisé par Aurélien Vallet, BRGM)

## b) Formations géologiques

Le bassin du Verneau se divise en deux ensembles structuraux :

- Le plateau d'Amancey est délimité à l'est par la Loue et à l'ouest par le Lison (Figure 3). Il forme un massif calcaire du jurassique supérieur. Ce plateau est profondément entaillé par la vallée du Lison avec un encaissement d'environ 400m.
- Une puissante série marneuse, affleurant dans le faisceau salinois (Figure 5).

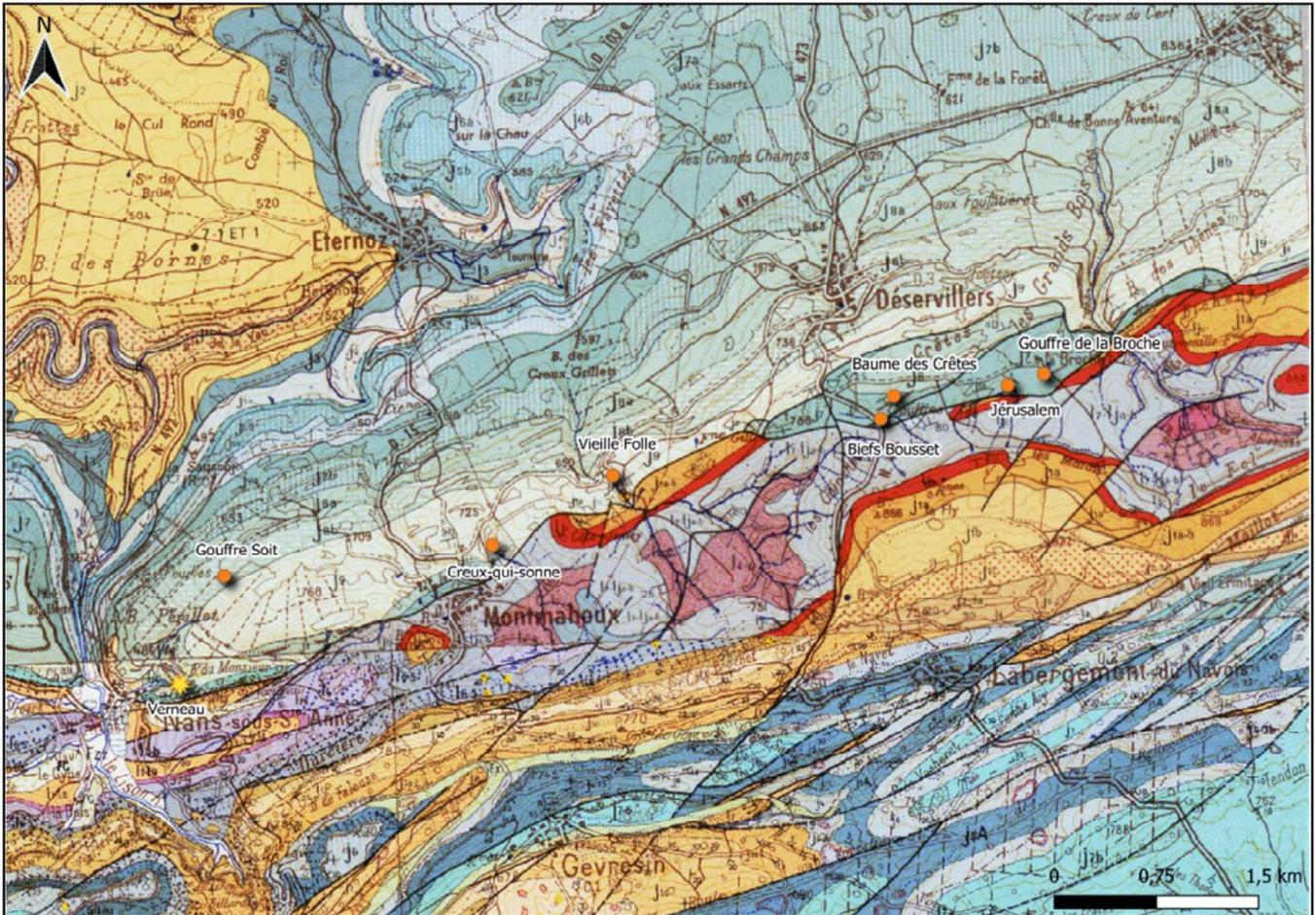


Figure 4 : Cartes géologiques imprimées au 1:50 000 correspondant à l'emplacement de la zone d'étude (jonction entre les cartes géologiques imprimées d'Ornans, Pontarlier, Salins-les-Bains et Quingey). Légende de la carte présentée ci-après avec la description des terrains.

Les formations retrouvées sur la zone d'étude sont comprises dans l'étage du Jurassique (Figure 6):

- Portlandien (j9) : Calcaires rubanés surmontant des calcaires compacts d'une épaisseur comprise entre 50 et 70m.
- Kimméridgien (j8) : Succession de calcaires et marnes, calcaire argileux d'une puissance totale de 120 m.
- Kimméridgien (j8a,j8b) : Calcaires à pâte fine en gros bancs (j8a). Lors d'affleurement isolés : présence de niveaux marneux et marno-calcaire (j8b) compris entre 150 à 170m.
- Séquanien (j7) : Ensemble de calcaires issus d'un environnement récifal compris entre 70 et 100m.
- Séquanien (série calcaire et marneuse inférieure) (j7b) : Calcaire lités et marnes compris entre 30 et 40m.

- Séquanien (série calcaire inférieure) (j7a): Calcaires, calcaires marneux et marnes à Astres. Ensemble à dominance argileuse compris entre 30 et 35m.
- Rauracien (j6a, j6): Ensemble calcaire d'une puissance totale de 80m.
- Argovien (j5b, j5a, j5): Ensemble inférieur de calcaire marneux et ensemble supérieur de calcaire siliceux sans intercalations marneuses compris entre 25 et 70m.
- Oxfordien (j4): Marnes à ammonites pyriteuses compris entre 30 et 40m.
- Callovien (j3a-j3): Calcaire à entroques bioclastiques et niveaux marneux jaunes et calcaires marneux compris entre 5 et 25m.
- Bathonien (j2-3a): Calcaire (faciès de la dalle nacrée et niveaux graveleux lumachelliques du sommet du bathonien) supérieur à 60m d'épaisseur.
- Bathonien (j2): Calcaire compact, graveleux, oolithique et bréchiques compris entre 60 et 80m.
- Bajocien supérieur (j1c, j1b): Calcaire oolithique (j1c) et marnes (j1b) compris entre 30 et 90m.
- Bajocien inférieur (j1a, j1a-b): Calcaire à entroques, et marnes à Bryozoaires dans la partie supérieure, puissance supérieur à 40m.
- Aalénien (ljc): Oolithes fergusoniennes, marnes gréseuses compris entre 8 et 15m.
- Toarcien (l4-lj): Marnes schisteuses d'une puissance totale de 200m.
- Pliensbachien (l4-6): Argiles et marno-calcaires comprises entre 40 et 80m.

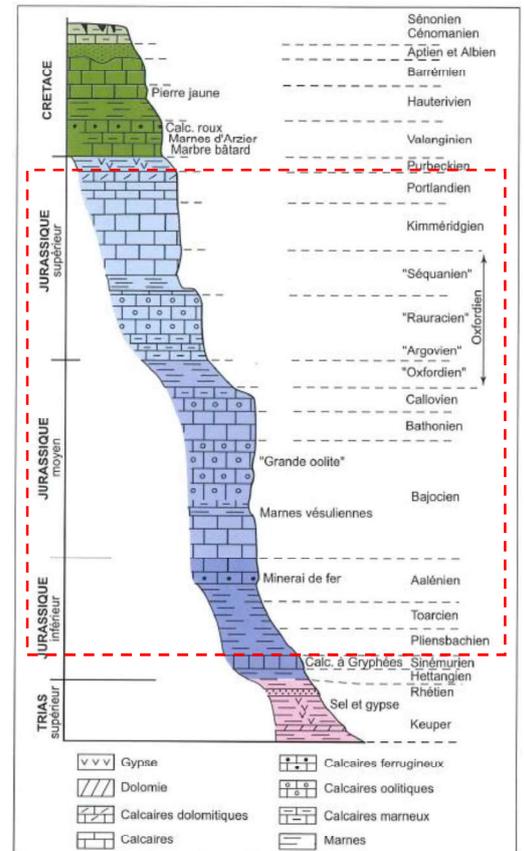


Figure 5 : Log lithostratigraphique avec encadré en rouge correspondant aux terrains présents sur la zone d'étude (Chauve, 2006) (6.)

### 2.1.3. Contexte hydrogéologique

Le réseau hydrographique de surface est principalement développé sur le bassin du jurassique inférieur. Il conflue cependant rapidement au contact des calcaires du plateau d'Amancey. Des vallées sèches sont présentes sur le bassin calcaire au nord du faisceau salinois (Figure 8).

Le ruisseau du Verneau s'écoule en direction du village de Nans-sous-Sainte-Anne pour ensuite confluer avec la source du Lison. La source du Verneau située à 420m d'altitude constitue le principal exutoire du système. Le débit moyen à la source est de 0.4 m<sup>3</sup>/s avec des débits maximaux pouvant atteindre 21 m<sup>3</sup>/s lors de crues exceptionnelles.

Le Verneau présente une période de basses eaux en été avec un débit moyen à l'étiage d'environ 0.13 m<sup>3</sup>/s. Ainsi que deux périodes de hautes eaux, une en hivers et en une moins marquée en automne montre un débit moyen de crue de 0.6 m<sup>3</sup>/s (Figure 7). Les précipitations sont réparties uniformément dans l'année avec une légère hausse en automne et au mois de mai.



Figure 7 : Etude du débit mensuel moyen à la source du Verneau en fonction du cumul mensuel de la pluie sur une période de 1998 à 2020

Des traçages ont permis de faire le lien entre les pertes présentes sur le site et la source du Verneau. Les traçages réalisés à l'est de la zone d'étude (Figure 8) permettent par la suite de délimiter la zone d'alimentation de la source du Verneau.

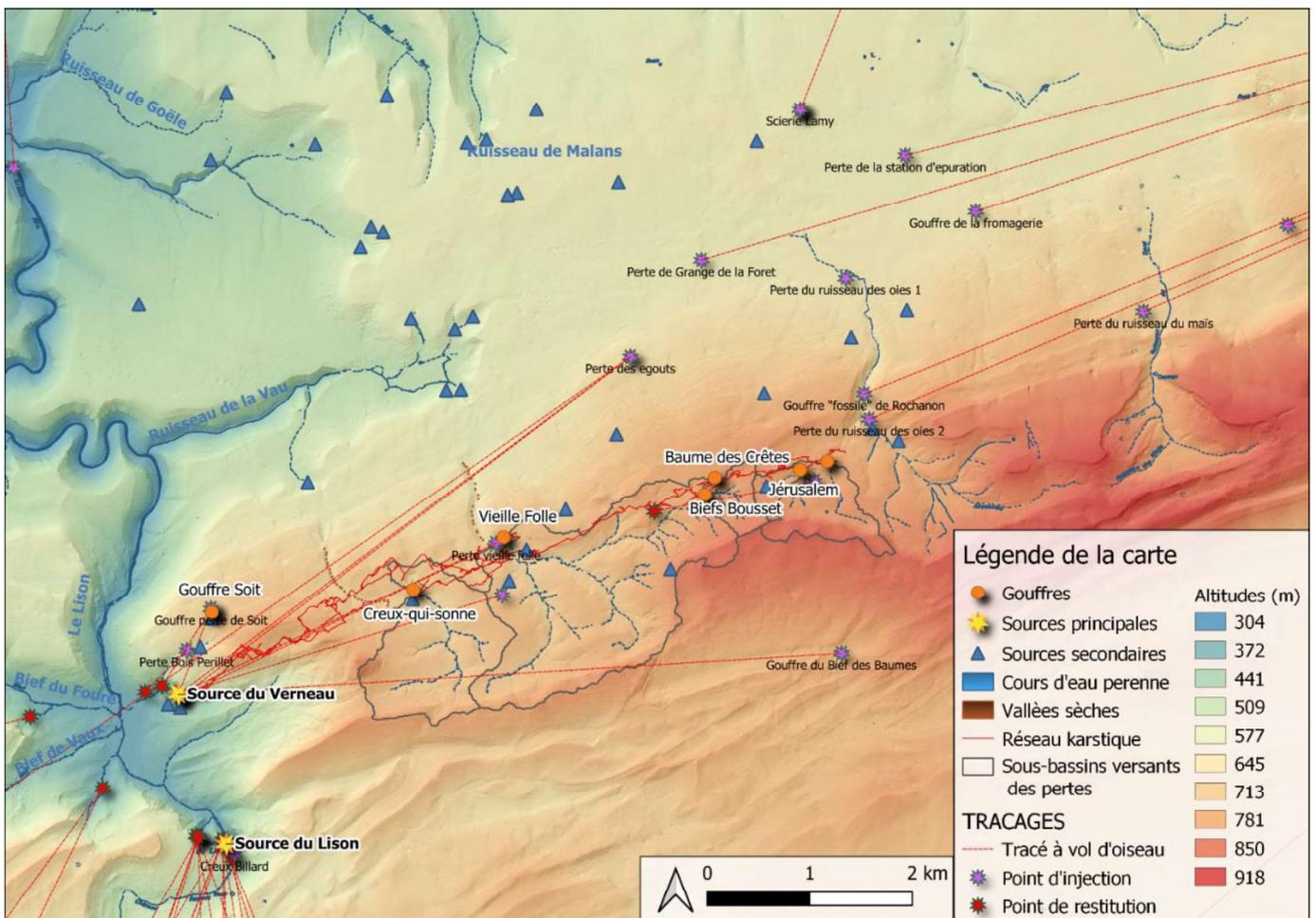


Figure 8 : Carte des informations hydrologiques avec représentation du réseau et emplacement des traçages historiques

Les 6 entrées principales (pertes) du réseau possèdent des sous-bassins versants de tailles variables :

Tableau 1 : Surfaces des sous-bassins versants des pertes

Nom de la perte	Surface du bassin versant
Gouffre de la broche	0.61 km <sup>2</sup>
Jérusalem	0.14 km <sup>2</sup>
Baume des crêtes et Biefs Boussets	0.27 km <sup>2</sup>
Vieille Folle	3.34 km <sup>2</sup>
Creux qui sonne	1.50 km <sup>2</sup>

## 2.2. DONNEES DISPONIBLES

### 2.2.1. Données spatiales

La base de données nationales cavité (BDCAV) et l'atlas des mouvements de terrains pour les effondrements/affaissements ont été consultés ([www.georisques.fr](http://www.georisques.fr))<sup>(7)</sup>.

Les inventaires réalisés par le GIPEK (Groupement pour l'Inventaire, la Prospection et l'Etude du Karst) ont été consultés (tome 3) ainsi que l'ouvrage « Le Verneau souterrain ». Ces deux ouvrages fournissent des plans ainsi que des coupes détaillées du réseau du Verneau réalisées par les spéléologues.

En complément, un inventaire des dolines a été réalisé sur la zone d'étude à l'échelle locale (terrain couplé à l'analyse du MNT).

Les données de traçages ont été extraites à partir du site carte eau de la DREAL de Bourgogne Franche-Comté (<https://cartes.ternum-bfc.fr>)<sup>(8)</sup> qui recense les traçages depuis 1900. Les données sélectionnées comprennent le point d'injection, le point de restitution du traceur ainsi que le tracé du traçage à vol d'oiseau.

Le site d'étude se trouve à l'intersection de quatre cartes géologiques imprimées au 1:50 000 du BRGM ([www.infoterre.fr](http://www.infoterre.fr))<sup>(9)</sup> : la carte de Quingey, qui englobe la plus grande partie de la zone, ainsi que les cartes de Salins les bains, Pontarlier et la carte d'Ornans.

Le MNT 1m et le MNT 25m de l'IGN ont été utilisés respectivement pour les analyses géomorphologiques par SIG et pour les tendances générales du relief.

### 2.2.2. Données temporelles

La DREAL possède une station hydrométrique au niveau de la source du Verneau qui fournit des débits horaires en m<sup>3</sup>/s. Une chronique de 20 ans a été utilisée de 1998 à 2018 dans un premier temps pour l'étude des débits classés, puis une nouvelle extraction de la banque hydro a permis une analyse haute fréquence (au pas de temps horaire) des débits sur une période plus récente allant de 2019 à 2021.

Vingt-deux stations météo France sont présentes sur le massif du Jura. La station la plus proche de la zone d'étude est la station de Levier, qui sera utilisée pour une analyse des données à l'échelle annuelle. Elle fournit des données horaires et journalières. L'évapotranspiration est récupérée à partir des données Safran au pas de temps journalier.

## 2.3. DONNEES ACQUISES

Dans le cadre du projet Nutrikarst de nombreux aménagements ont été mis en place sur le site du Verneau. Des équipements de mesure hautes fréquences ont été installés non seulement ex situ mais également in situ afin d'opérer un suivi temporel des paramètres physiques.

### 2.3.1. Suivis continus

#### a) Station météorologique

Une station météorologique a été installée par le BRGM dans le cadre de l'étude. Elle est située à Montmahoux à environ 700m d'altitude (*Figure 9*). Cette station météorologique fournit des données pluviométriques horaires qui sont récupérées tous les mois lors de la campagne de terrain mensuelle.

#### b) Sondes DIVER

La source du Verneau ainsi que deux des pertes (Vieille folle et Jérusalem) ont été équipées de sondes diver qui mesurent la pression, la conductivité ainsi que la température toutes les 15 minutes.

Les pertes de Jérusalem et de la Vieille Folle ont été sélectionnées pour être instrumentées car elles sont faciles d'accès et leur surface de zones d'alimentation encadrent celles des 3 autres (*Tableau 1*). De plus leur localisation en amont et en aval du réseau permet une meilleure spatialisation de la mesure. En plus des 3 points de surfaces, deux sondes ont été installées en souterrain en aval de Baume des Crêtes et de la Vieille folle (*Figure 9*).

#### c) Lysimètres

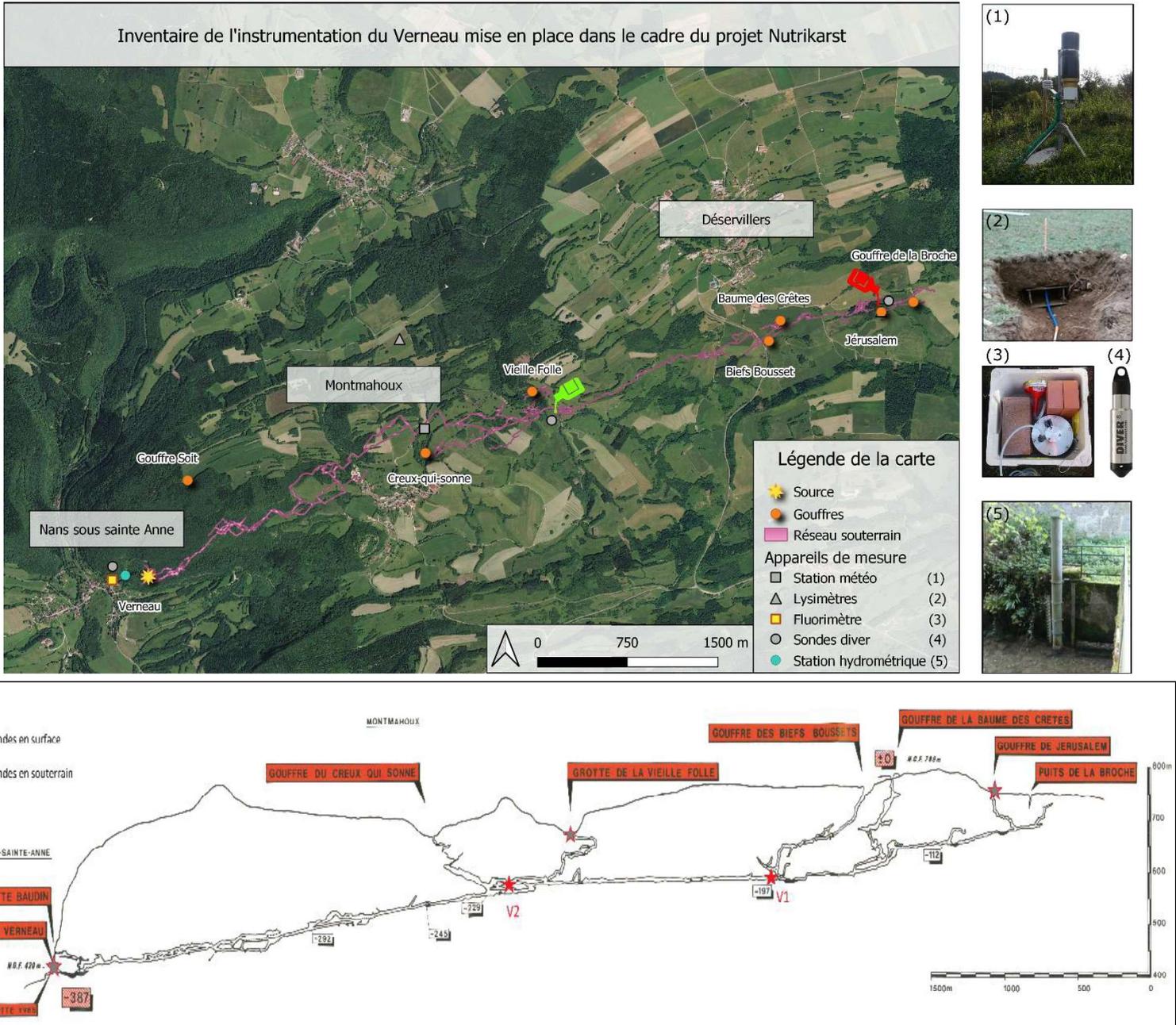
Dans le cadre du projet Nutrikarst, des lysimètres ont été installés sur les terrains calcaires afin de déterminer la dynamique du drainage sous les parcelles agricoles. Dans le cadre du stage, seul l'aspect quantitatif a été étudié. Plusieurs fois par mois (à des dates aléatoires) les volumes des lysimètres sont prélevés et mesurés (en L) ce qui permet de quantifier la part de recharge diffuse. Les lysimètres présentent une forte incertitude de mesure.

### 2.3.2. Mesures ponctuelles

#### d) Jaugeages

Des jaugeages sont réalisés lors de conditions hydrogéologiques particulières (forts débits ou période d'étiage). Les jaugeages sont réalisés au niveau de Jérusalem et Vieille folle afin de convertir les hauteurs d'eau mesurées par les sondes diver en débits grâce à une courbe de tarage (*Annexe 2*).

La synthèse des paramètres mesurés, leur localisation ainsi que la période de mesure est disponible en Annexe 3.



## 3. METHODE

### 3.1. ANALYSES SPATIALES

#### 3.1.1. Evaluation qualitative de la perméabilité

L'évaluation de la densité des dolines pour chaque formation géologique permet d'évaluer qualitativement et relativement leur degré de karstification. Plus la densité de dolines par formation est élevée plus la formation calcaire sous-jacente peut être considérée comme karstifiée et donc perméable. Une analyse différentielle pour une même formation géologique a été mise en œuvre pour différencier l'influence des zones de faisceaux (déformées et faillées) par rapport aux zones de plateaux (couches tabulaires) sur le phénomène de karstification. Les formations géologiques non significatives (dont la surface est inférieure à 3km<sup>2</sup>) n'ont pas été considérées.

Le calcul de densité de doline ainsi que d'indice de karstification sont ensuite réalisés :

- Densité de doline = (nombre d'entité karstique/aire) normalisé ensuite à 1 par rapport au maximum obtenu ;
- Indice de karstification = (nombre d'entité karstique/aire normalisée) normalisé à 1 par rapport au maximum obtenu ;
- Aire normalisée : aire de la formation géologique normalisé par rapport à la zone structurale dans laquelle elle se trouve.

Une base de données régionales des formations karstiques de surface a été produite après recherche et suppression des doublons pour les éléments localisés à moins de 5 m dans les différentes bases disponibles sur un périmètre d'étude éloigné (environ 40 km autour du site d'étude). A l'échelle du site (échelle locale), un recensement local complémentaire sur la base de cartes d'ombrage, d'accumulation du ruissellement (à partir du MNT) et d'inspection de terrain a été ajouté pour définir une base de données locales.

A partir des deux bases de données à l'échelle locale et régionale, le calcul d'indice de karstification est appliqué (*Tableau 2*). Les indices de karstification sont compris entre 0 et 1 à l'échelle locale et de 0 à 10 à l'échelle régionale (facteur 10 appliqué seulement pour des commodités de lecture).

Les indices de karstification à l'échelle régionale allant de 0 à 10 permettent dans un premier temps de classer la formation entre trois degrés de perméabilité : imperméable, semi-perméable et perméable. Cette classification est ensuite affinée avec l'évaluation des indices de karstification à l'échelle locale en créant des sous-catégories : I+ (très imperméable) < I- (peu imperméable) < S\_I (semi imperméable à imperméable) < S\_P (Semi imperméable à perméable) < P- (peu perméable) < P+ (très perméable). Cette approche donne plus de poids aux données locales car celles-ci sont plus exhaustives.

Cette évaluation de l'indice de perméabilité est ensuite confrontée aux descriptions des notices des cartes géologiques du secteur.

Tableau 2 : Correspondance entre le degré de perméabilité et les indices de karstification à l'échelle locale et régionale

	Indice de karstification		Indice de perméabilité		Indice de karstification		Indice de perméabilité		Indice de karstification		Indice de perméabilité
	REGIONAL	LOCAL			REGIONAL	LOCAL			REGIONAL	LOCAL	
IMPERMEABLE	0 — 1 — 2	0,00	I+	SEMI-PERMEABLE	3	0,0	I+	PERMEABLE	8 — 9 — 10	0,0	I+
		0,10				I-				0,1	I-
		0,20				S_I				0,2	S_I
		0,30	I-		0,3		P_S				
		0,40			S_I	0,4	P_S				
		0,50	P_S			0,5	P_S				
		0,60			P-	0,6	P-				
		0,70	P+			0,7	P-				
		0,80			P+	0,8	P+				
		0,90	P+			0,9	P+				
1,00	P+	1,0		P+							

### 3.2. ANALYSE TEMPORELLE

#### 3.2.1. Calculs de bilan

La méthode du calcul de bilan permet de quantifier les entrées et les sorties du système étudié et de déterminer si celui-ci est conservatif ou non-conservatif. Dans le cas d'un système conservatif, les flux entrants sont égaux aux flux sortants. Dans le cas d'un système non conservatif, on estime qu'il existe des échanges avec l'environnement extérieur (Le Mesnil et al, 2020) <sup>(10)</sup>.

Deux types de bilan ont été appliqués au système du Verneau en fonction des données disponibles :

- Un bilan à l'échelle annuelle basé sur la chronique globale disponible (de 1983 à 2019), qui ne différencie par le type de recharge ;
- Un bilan mensuel sur 2019-2020, faisant la différence entre la recharge diffuse et la recharge préférentielle.

##### a) Bilan annuel (sans différenciation du type de recharge)

La formule générale du calcul de bilan est la suivante :  $P = Q + ETr$

Avec Q le débit à la source converti en mm, P la pluie brute en mm et ETr l'évapotranspiration réelle. Cette formule est destinée aux bassins versants conservatifs. Le Mesnil a adapté cette formule afin de tenir compte du comportement non conservatif des bassins versants en calculant un indice I nommé IGF (interbasin groundwater flow) soit :  $I = P - Q - E^*$  si  $I < 0$  : apport d'un système extérieur et  $I > 0$  : fuite du système.

Avec  $E^* = P - Peff$  ; par cette méthode la pluie efficace est calculée en faisant la moyenne de 3 méthodes différentes (Thornwaite (1948) <sup>(11)</sup>, Dingman (2002) <sup>(12)</sup> et le modèle GR4J (Edijatno et al, 1999) <sup>(13)</sup>).

La pluie efficace est calculée à l'aide de l'outil ESPERE (Tableau 3) permettant la mise en œuvre de plusieurs méthodes d'estimation de la pluie efficace et de la recharge d'un aquifère sur la base de cycles hydrologiques (Lanini et al, 2016) <sup>(14)</sup>.

Tableau 3 : Paramètres et données à renseigner dans le logiciel ESPERE afin de simuler la pluie efficace

Paramètres initiaux	Données en entrée	Données en sortie
- Réserve utile maximale = 100 mm - Surface de l'impluvium = 15.32 km <sup>2</sup> - Coefficient d'infiltration = 0,22	- Pluie journalière en mm - Evapotranspiration journalière en mm - Température moyenne journalière en °C - Débits journaliers en m <sup>3</sup> /s	- Pluie efficace journalière en mm selon 3 méthodes (Thornwaite, 1948; Dingman, 2002; Edijatno et al., 1999)

b) Bilan mensuel (avec différenciation du type de recharge)

La méthode de bilan précédente ne prend pas en compte la spécificité du fonctionnement du karst binaire du Verneau. Soit, une recharge préférentielle qui collecte, au niveau des pertes, les eaux de ruissellement des bassin marneux et une recharge diffuse au niveau du substratum calcaire (Figure 10).

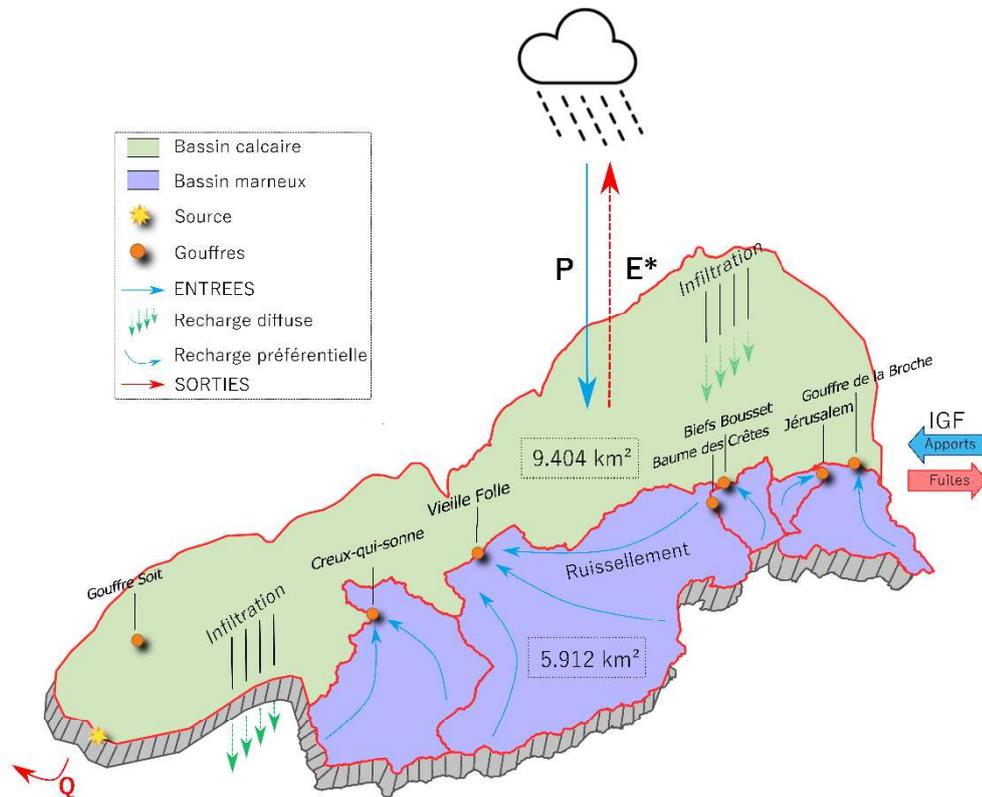


Figure 10 : Schéma de fonctionnement de la recharge sur le karst binaire du Verneau et composantes du bilan

**La recharge par les calcaires** est estimée à partir de lysimètres installés sur le site. Afin de correspondre avec la période d'analyse des données hautes fréquences, la période d'étude des lysimètres a été définie du 20/01/2020 au 10/03/2021. Les volumes (en L) sont cumulés sur le mois puis ramenés à la surface des lysimètres (0.125 m<sup>2</sup>) pour obtenir un volume en mm. Bien que les mesures soient ponctuelles, les lysimètres sont considérés comme représentatifs de l'infiltration diffuse.

**La recharge par les pertes** est estimée à partir des capteurs de pression installés à Jérusalem et Vieille folle. Ils permettent, à partir de courbe de tarage (Annexe 2), d'estimer leurs débits respectifs. Les débits des 3 pertes non instrumentées (Creux qui sonne, Biefs Boussets et Baume des Crêtes) ont été extrapolés à

partir des débits spécifiques de Vieille folle et Jérusalem. Les pertes en amont de Montmahoux possèdent des surfaces de bassins versant du même ordre de grandeur que celui de Jérusalem (*Tableau 1*). Il en est de même pour Creux qui sonne et Vieille folle situées en aval de Montmahoux. Les pertes en aval de Montmahoux ont donc été extrapolées à partir Vieille folle et celles en amont à partir de Jérusalem.

Débit total des pertes (m<sup>3</sup>/s) = [débit spécifique de Jérusalem \* (surface de Jérusalem + surface de Biefs Boussets + surface du gouffre de la Broche)] + [débit spécifique de Vieille folle \* (surface de Vieille Folle + surface de Creux qui sonne)].

**L'établissement du bilan mensuel** est réalisé en mm. Les débits à la source et aux pertes ont donc été ramenés à la surface totale du bassin versant (voir partie 4.1.4). Les données étant au pas de temps journalier, le cumul sur le mois a été réalisé en se conformant aux dates de prélèvement des lysimètres. En accord avec le principe de la méthode d'IGF établi par M. Le Mesnil, la formule de bilan a été adaptée afin de prendre en compte la différence de recharge :  $I \text{ (mm)} = V_{\text{sce}} - V_{\text{Recharge préférentielle}} - V_{\text{Recharge diffuse}}$

Avec  $V_{\text{sce}}$  le volume écoulé à la source,  $V_{\text{Recharge préférentielle}}$  le volume correspondant à la recharge préférentielle et  $V_{\text{Recharge diffuse}}$  le volume correspondant à la recharge diffuse.

### 3.2.2. Débits classés

**Le principe** de la méthode des débits classés de A. Mangin <sup>(15)</sup> a pour objectif de pointer des événements particuliers qui vont influencer les débits. Lors de l'analyse des débits en fonction de leur fréquence d'apparition, des ruptures de pentes témoignent de l'apparition de comportements hétérogènes de l'aquifère induit par un stockage momentané, une fuite ou un apport vers/en provenance d'un autre système... Le débit est compartimenté en classes de débits dont le nombre est sélectionné par l'utilisateur. Une loi statistique (loi normale) est ajustée aux données mettant en relation les classes de débits avec leur fréquence d'apparition. Une loi normale inverse est associée à la fréquence cumulée. Un graphique des classes de débits en fonction de la loi de probabilité est réalisé afin d'étudier la courbe des débits classés et des ruptures de pentes (*Annexe 4*).

**Dans le cadre de l'application de la méthode au site d'étude**, la chronique globale des débits à l'exutoire (cycles hydrologiques de 1970 à 2019) a été étudiée afin de situer le seuil de changement de régime (bas débits et forts débits) à partir des ruptures de pentes. Une deuxième analyse cycles par cycles a permis d'évaluer le comportement hydrodynamique de l'hydrosystème.

### 3.2.3. Analyse des événements de crue

#### c) Sélection des épisodes de crue

La sélection des épisodes de crue est une étape cruciale car l'analyse des données hautes fréquences est dépendante de leur définition. Dans un premier temps, un algorithme de traitement pseudo-automatique constitue un catalogue d'événements pluvieux susceptibles de produire une crue. L'utilisateur renseigne l'intervalle de temps autour du pic de pluie qu'il souhaite obtenir ainsi que le nombre d'événements. De fortes pluies n'engendrant pas nécessairement de crue, l'inventaire a été contrôlé et filtré manuellement par la suite.

A partir du catalogue d'événements initial, chaque épisode est défini à l'aide des critères suivants :

- **Début de la crue** : on estime que la crue démarre lorsque le débit de la crue diffère du débit de base.

- **Fin de la crue** : la corrélation croisée des débits en fonction de la pluie permet de déterminer le temps que met le système pour revenir à son état initial. Afin d'affiner ce critère, la même procédure de comparaison du débit avec le débit de base est réalisée.

Les formules des paramètres utilisés pour l'analyse des crues est disponible en Annexe 5.

## 4. RESULTATS ET INTERPRETATION

### 4.1. DELIMITATION DE LA ZONE D'ALIMENTATION

La délimitation de la zone d'alimentation est basée sur l'analyse couplée de la cartographie du réseau explorable du Verneau, de l'analyse des données de traçages, d'une évaluation qualitative et relative de la perméabilité et d'une analyse structurale du site .

#### 4.1.1. Cartographie 3D du réseau du Verneau

La numérisation 3D (Figure 11) du Verneau a été réalisée à partir des plans et coupes provenant du document « Le Verneau souterrain <sup>(16)</sup> ». Elle permet une visualisation dans l'espace du développement du réseau. Cette cartographie 3D a également été réalisée afin d'obtenir des coordonnées en 3D pour chaque point du réseau qui permettront par la suite de positionner l'altitude du réseau sur les coupes géologiques. La méthode employée est disponible en Annexe 6.

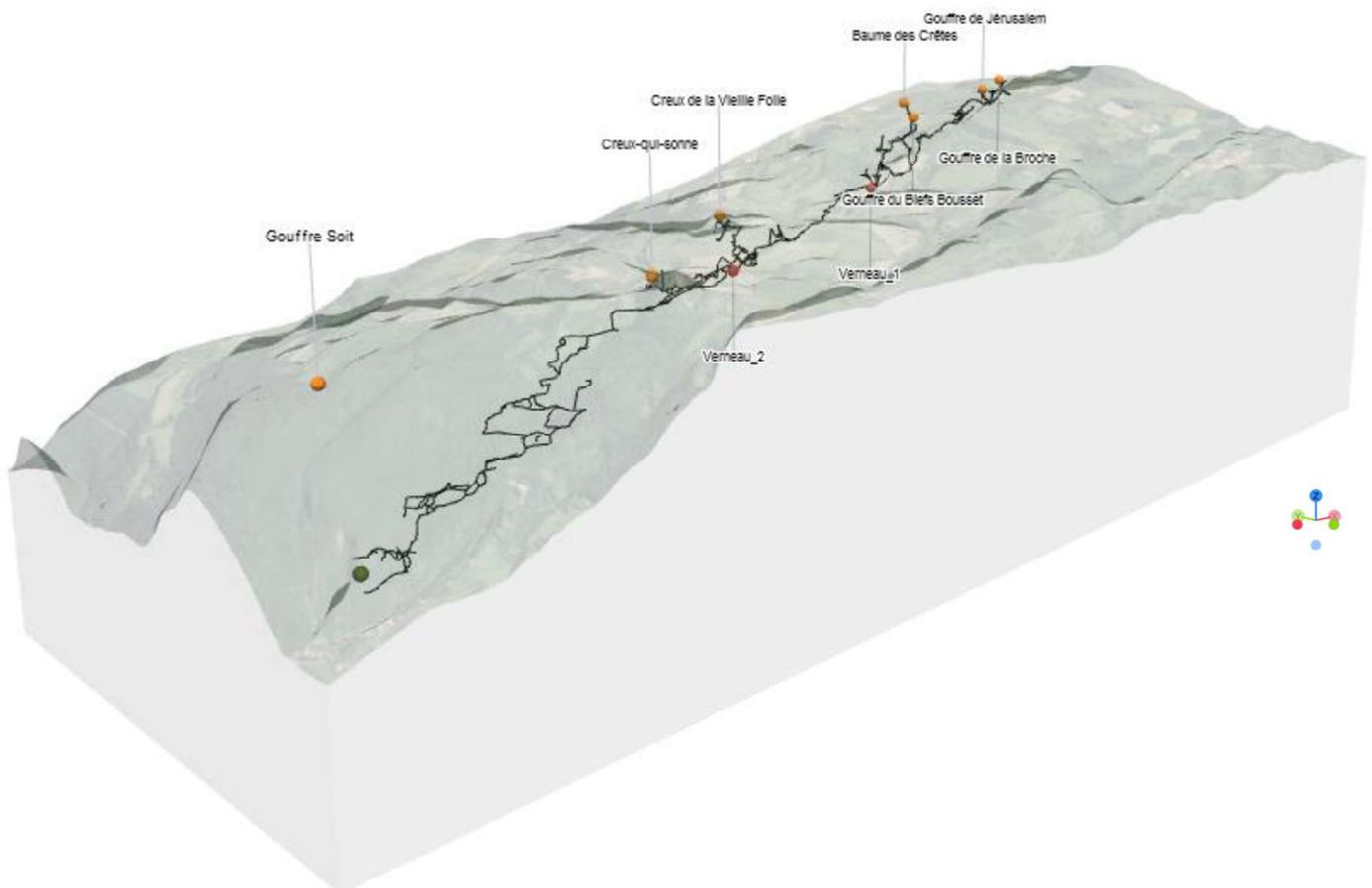


Figure 11 : Numérisation en 3D du réseau karstique du Verneau à l'aide de l'outil Qgis2threejs

#### 4.1.2. Evaluation qualitative de la perméabilité

La perméabilité a été évaluée pour l'ensemble des formations géologiques traversées par le réseau karstique du Verneau. Elle a été évaluée qualitativement sur la base de description des notices des cartes géologiques et de l'évaluation d'un indice de karstification.

Cet indice de karstification est basé sur la densité de doline par formations. Il est établi à partir d'une séparation d'échelle et de zones structurales (Figure 12).

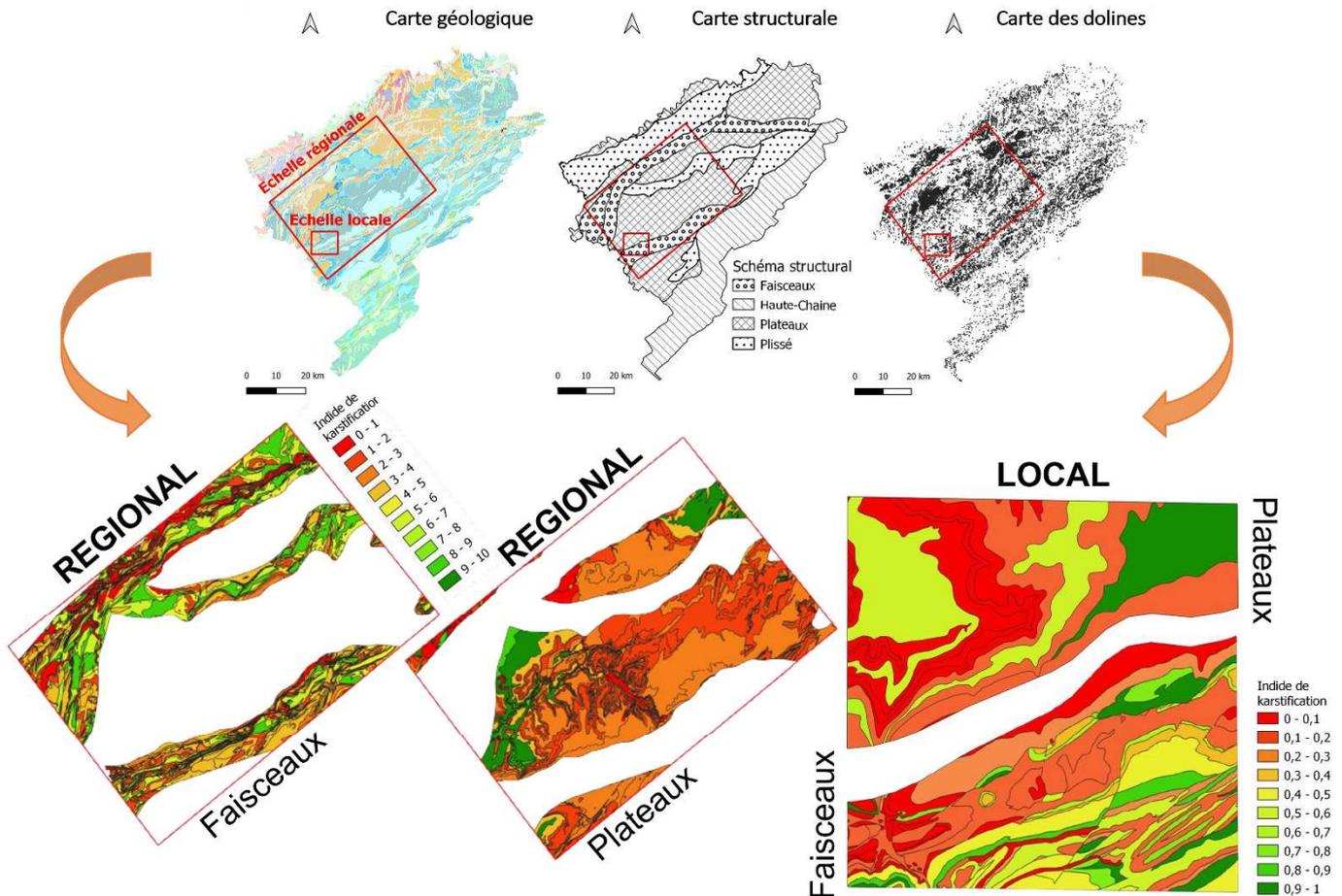


Figure 12 : Rappel de la méthodologie exposée en partie 3.1.1 pour l'évaluation d'indices de karstification et présentation des résultats obtenus pour les zones de plateaux et de faisceaux aux échelles locales et régionales

La carte de perméabilité relative (Figure 14) réalisée à partir des indices de karstification (Figure 12) et de la méthode de correspondance (Tableau 2) montre une augmentation de la perméabilité des terrains le long du faisceau salinois. Le plissement des terrains fragilise les formations géologiques et augmente en conséquence leurs perméabilités.

Les calcaires du Kimméridgien (j8a, j8b) montrent des perméabilités très faibles pour un calcaire. La méthode possédant des incertitudes il est important de comparer les résultats avec la notice géologique.

On remarque des différences de perméabilité sur certaines couches présentes sur les deux zones (Annexe 7). La même formation aurait tendance à montrer une perméabilité plus élevée en zone de faisceau car la tectonique fragilise les formations. Cependant cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée (j8a, j8b et j2). En ce qui concerne la formation j8a située au nord montre une perméabilité plus élevée que la formation j8b au sud de la limite faisceau-plateau ce qui est cependant cohérent avec la description de la notice géologique (2.1.2).

Tableau 4 : Etablissement de la perméabilité à partir des résultats de densité à l'échelle locale et régionale perméabilité (I+ = très imperméable, I = imperméable, S\_I = semi-perméable à imperméable, S\_P = semi-perméable à perméable, P = perméable, P+ = très perméable). Détails des résultats en Annexe 7

	Plateaux	Faisceaux	Lithologie à partir des notices géologiques
j9	S_I	S_I	Calcaire
j8		S_P	Calcaire, marne
j8a,j8b	S_I	I-	Calcaire, marne, marno-calcaire
j7	S_P	P-	Calcaire
j7c		S_I	Calcaire
j7b	I+		Calcaire, marne
j7a	S_I	S_I	Calcaire, calcaire marneux, marnes
j6	S_I	S_I	Calcaire, lentille marneuse
j5	I+	I-	Calcaire marneux, calcaire
j4	I+	I+	Marnes
j3a,j3	I-	S_P	Calcaire, marnes
j2-3a		S_I	Calcaire
j2	P-	P_S	Calcaire
j1c,j1b	I+	S_I	Calcaire, marnes
j1a		S_P	Calcaire, marnes
ljc		S_P	Oolithes férugineuses, Marnes
l4-ljc		S_I	Marnes
l4-6		I+	Mano-calcaire

De nombreuses formations calcaires montrent des degrés de perméabilités élevés. La méthode est donc à considérer comme indicative du degré de perméabilité.

#### 4.1.3. Analyse structurale

Cinq coupes géologiques (Figure 13) ont été positionnées perpendiculairement au réseau karstique et aux structures géologiques (faisceau Salinois), au droit des pertes principales, de façon à couvrir l'extension spatiale du réseau karstique. Sur les coupes, l'affichage de l'indice de perméabilité a été privilégié aux descriptions lithologiques pour la délimitation de la zone d'alimentation.

Le faisceau salinois se divise en deux parties :

- La partie amont (est du faisceau) : forme un synclinal perché cisailé par des failles formants des écaillés dans lesquelles se trouvent les pertes de Jérusalem et Biefs Boussets;
- La partie aval (ouest du faisceau) : constituée d'un anticlinal couché vers le nord dans lequel se trouve les pertes de la Vieille folle, Creux qui sonne et du gouffre de Soit.

Le chevauchement met en contact le jurassique moyen et le jurassique inférieur appartenant au faisceau salinois avec les calcaires du jurassique supérieur des synclinaux de la lisière méridionale du plateau d'Ormans (Aucant et al, 1985) <sup>(16)</sup>.

Sur la base de la numérisation 3D du réseau karstique du Verneau et des coupes géologiques, il est possible de mieux comprendre l'organisation du réseau du Verneau par rapport à la géologie. Dans la partie amont le réseau se développe dans le Séquanien (j7) à proximité d'un aquiclude local. A partir de Vieille folle, un changement de géométrie du réseau engendre un décalage de celui-ci vers le nord dans les calcaires du Portlandien (j9) et du Kimméridgien (j8a, j8b).

Une coupe générale (*Figure 19*) traversant l'intégralité du réseau d'est en ouest a été réalisée par les spéléologues du (Aucant et al, 1985) <sup>(16)</sup>. Elle permet de discerner une augmentation de la pente du réseau à partir de Vieille folle jusqu'à la source. Cela est directement lié au changement de géométrie du réseau. Le développement de la zone noyée se trouve donc de préférence sur la moitié aval du bassin.

Processus hydrogéologiques d'un karst binaire sur la base d'un réseau multi-échelle (Verneau,25)

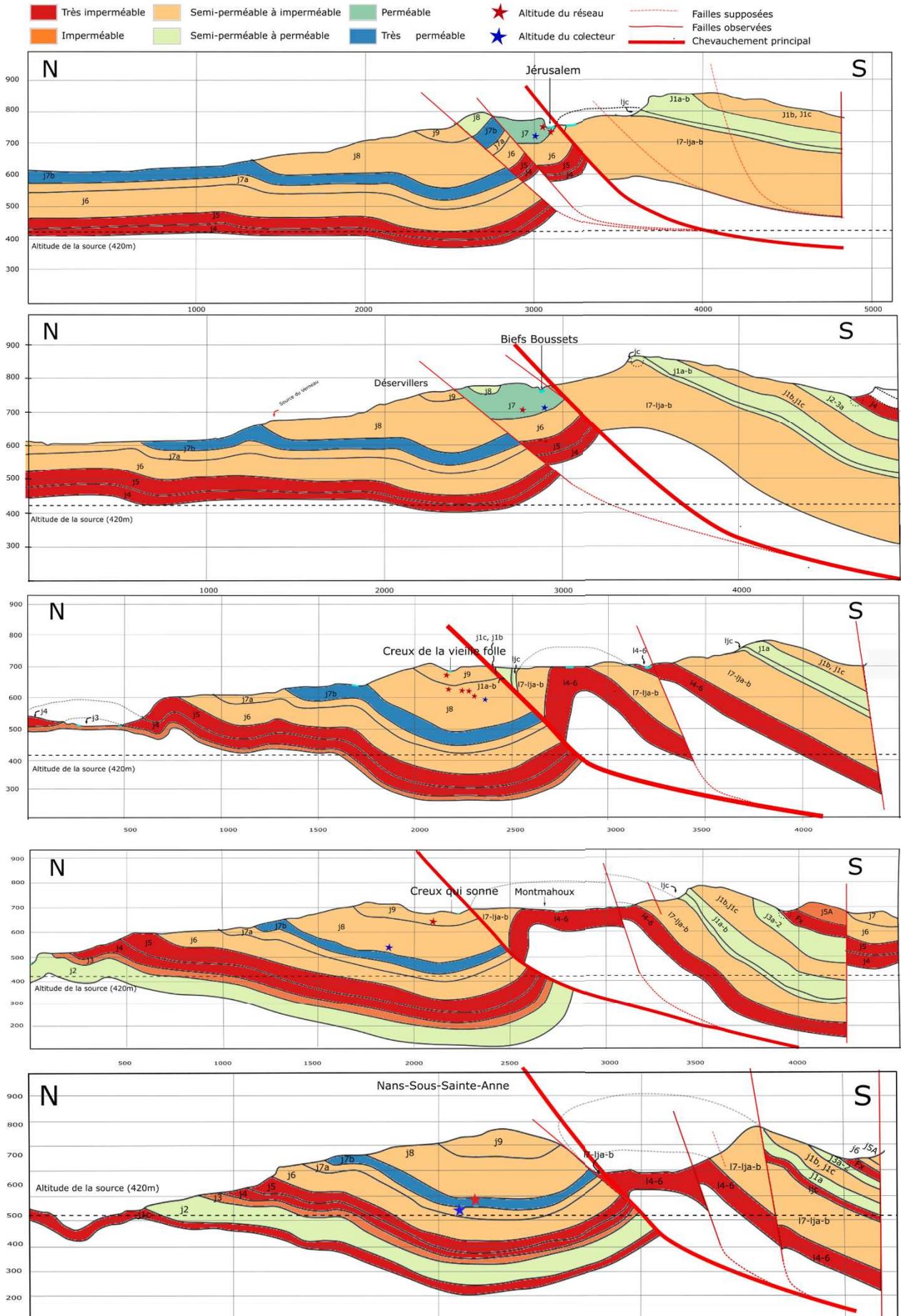


Figure 13 : Coupes géologiques réalisées à l'endroit des pertes avec symbolique correspondant aux degrés de perméabilité

#### 4.1.4. Délimitation des zones d'alimentation du Verneau

La délimitation du réservoir est basée sur différents critères géologiques et hydrogéologiques (coupes géologiques, carte de perméabilité, position du réseau souterrain, traçages...). Afin de déterminer une marge d'erreur sur la délimitation de la zone d'alimentation du Verneau, 3 zones de délimitations ont été réalisées : une zone de délimitation maximale, une zone de délimitation moyenne et une zone de délimitation minimale. La délimitation des zones d'alimentation au sud dépend exclusivement des sous bassins versant des pertes. La délimitation au nord est dépendante d'un facteur différent pour chaque zone d'alimentation.

**La zone d'alimentation maximale** se base sur l'altitude de la source sur les coupes géologiques (*Figure 13*). Le niveau de la source est positionné dans les couches j4, j5, j6 et j7a. Les marnes oxfordiennes (j4 et j5) ne pouvant pas laisser passer les flux, le bassin maximal est délimité par les calcaires de l'oxfordien (j7a et j6).

**La zone d'alimentation moyenne** dépend des couches pouvant former le réservoir. Celui-ci se situe donc dans les couches calcaires perméables et semi-perméables suivantes : j7, j7b, j8, j9. Les traçages réalisés sur la zone d'étude permettent également de comprendre la direction des écoulements souterrains. Ainsi la délimitation au Nord-Est de la zone d'alimentation a pu être placée précisément afin de ne pas prendre en compte la zone d'injection du traceur ne débouchant pas à la source et inversement.

**La zone d'alimentation minimale** se base uniquement sur les formations géologiques rencontrées par le réseau sur les coupes géologiques (*Figure 13*). Le réseau est positionné de la manière suivante suivant les couches :

- Jérusalem et Bief Boussets : j7 (calcaire du Séquanien)
- Vieille follet et Creux qui sonne : j9 (calcaire portlandien) et j8 (calcaire du Kimméridgien)
- Gouffre de Soit : j7b (calcaire du Séquanien inférieur)

Au droit de Vieille folle, Creux qui sonne et du gouffre de Soit, la délimitation du bassin minimal est évidente car elle correspond aux couches dans lesquelles se trouve le réseau. En amont de la Vieille folle, le réseau se trouve dans un aquifère (j7) en connexion avec la puissante formation du Kimméridgien (j8). Le pendage de la formation calcaire du Kimméridgien orienté vers le sud peut laisser supposer que l'eau qui s'infiltré par l'intermédiaire de cette couche a de forte probabilité de rejoindre les calcaires du Séquanien (j7).

La délimitation de la zone d'alimentation est située entre 13.9 km<sup>2</sup> et 16.5 km<sup>2</sup> avec une délimitation moyenne de 15.32 km<sup>2</sup>.

# Carte synthétique des informations utilisées pour délimiter les zones d'alimentation du bassin du Verneau

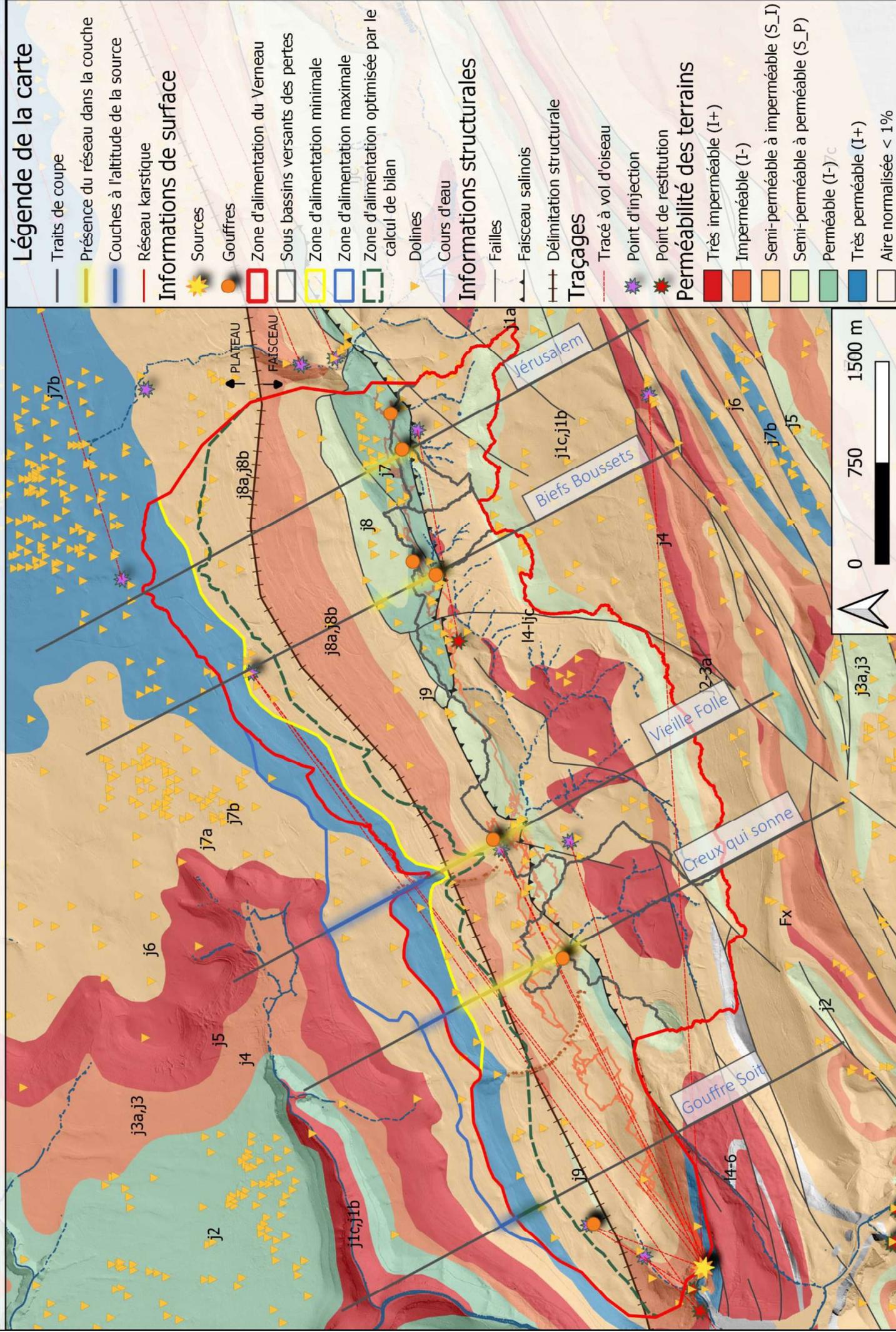


Figure 14 : Carte de synthèse représentant le degré de perméabilité des formations ainsi que les traits de coupes, la position du réseau et de l'altitude de la source dans les couches géologiques, et les 4 délimitations des zones d'alimentation

## 4.2. ECOULEMENTS A L'ECHELLE ANNUELLE ET MENSUELLE

### 4.2.1. Bilan annuel

Le bilan annuel permet de tenir compte des IGF, soit des échanges entre les bassins. En réalisant le bilan sur chaque année, le coefficient  $I$  est calculé à partir de la formule rappelée ci-après :  $I = P - Q - E^*$ . Si  $I$  est positif alors le système est en fuite et inversement, à  $I=0$ , le système est considéré comme conservatif.

**Afin de vérifier que le système n'est pas conservatif**, un calcul de bilan a été réalisé en calibrant la surface de la zone d'alimentation pour que le coefficient  $I$  soit égal à 0. La surface obtenue est de 12,60 km<sup>2</sup>. Une simulation de la zone d'alimentation optimisée sur la carte synthétique (*Figure 14*) a été réalisée. Le découpage de la zone d'alimentation optimisée se base sur la forme de la zone d'alimentation dont la limite nord a été contrainte pour correspondre à la surface optimale obtenue à partir du calcul de bilan.

La délimitation obtenue pour la zone d'alimentation optimisée par le calcul de bilan ne permet pas d'englober le traçage réalisé au nord-ouest de Biefs Boussets (*Figure 14*). De plus la formation réservoir (calcaires du j7b) est totalement en dehors de la zone. Au niveau du gouffre de Soit, de Creux qui sonne et de Vieille folle la délimitation de la zone d'alimentation optimisée exclut les couches contenant le réseau souterrain. Le système n'est donc pas conservatif à l'échelle annuelle.

**Les résultats du calcul de bilans** sont basés sur quatre surfaces différentes (*Figure 14*) : la délimitation de la zone d'alimentation, ses limites maximales et minimales ainsi que la délimitation optimisée par le calcul de bilan. Ces quatre bilans permettent d'observer l'influence du paramètre de surface (*Figure 15*).

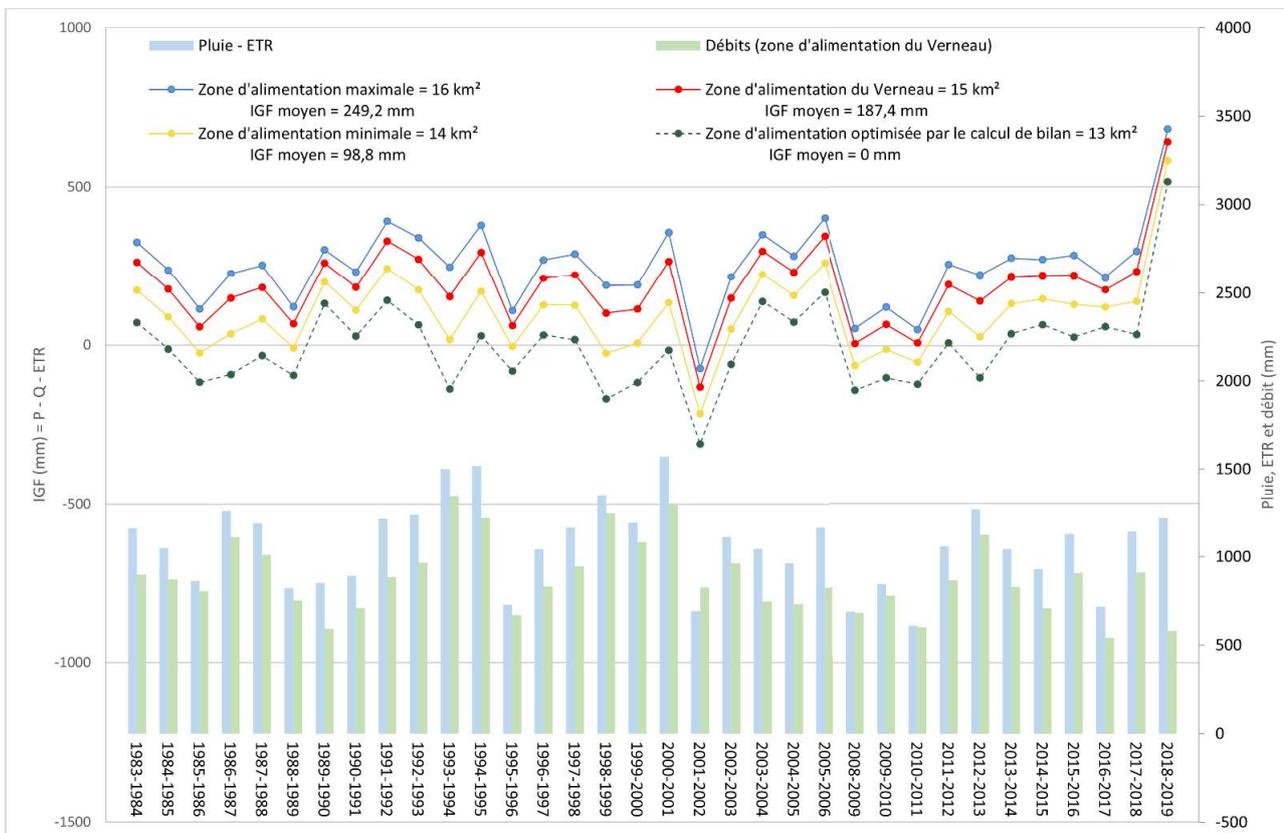


Figure 15 : Calcul des IGF annuels estimés à partir de 4 surfaces de zone d'alimentation : la délimitation de la zone d'alimentation, ses limites maximales et minimales ainsi que la délimitation optimisée par le calcul de bilan. Comparaison avec les données pluviométriques et de débits annuels.

Le système, quel que soit la surface utilisée (à l'exception de la surface optimisée par le calcul de bilan), est majoritairement en fuite (IGF moyen > 0). Plus la surface diminue, plus le bilan tend vers un équilibre. La tendance s'inverse cependant au cours de l'année 2001-2002 qui montre un débit à l'exutoire supérieur à la pluviométrie. Pour la surface moyenne de zone d'alimentation, les fuites représentent 21% du débit à la source soit 187mm/an.

Cette tendance de fuite du système peut être expliquée par le fait que le collecteur n'est pas directement contraint à l'aval par un aquiclude (Figure 13, coupe du gouffre de Soit). Il est donc possible que la source du Verneau ne capte pas toute l'eau circulant dans l'hydrosystème.

#### 4.2.2. Bilan mensuel

Le bilan réalisé à l'échelle mensuelle, à la différence du bilan annuel, prend en compte la différence de recharge entre la zone calcaire et la zone marneuse. Les lysimètres installés sur la zone d'étude ont permis de mesurer la quantité d'eau (mm) s'infiltrant sur la partie calcaire de la zone d'alimentation. Les sondes installées à Vieille folle et Jérusalem ont servi à l'extrapolation des débits des pertes afin d'obtenir un débit global représentant la recharge préférentielle. Les deux recharges calculées sont ensuite comparées au volume d'eau résurgant à la source (Figure 16).

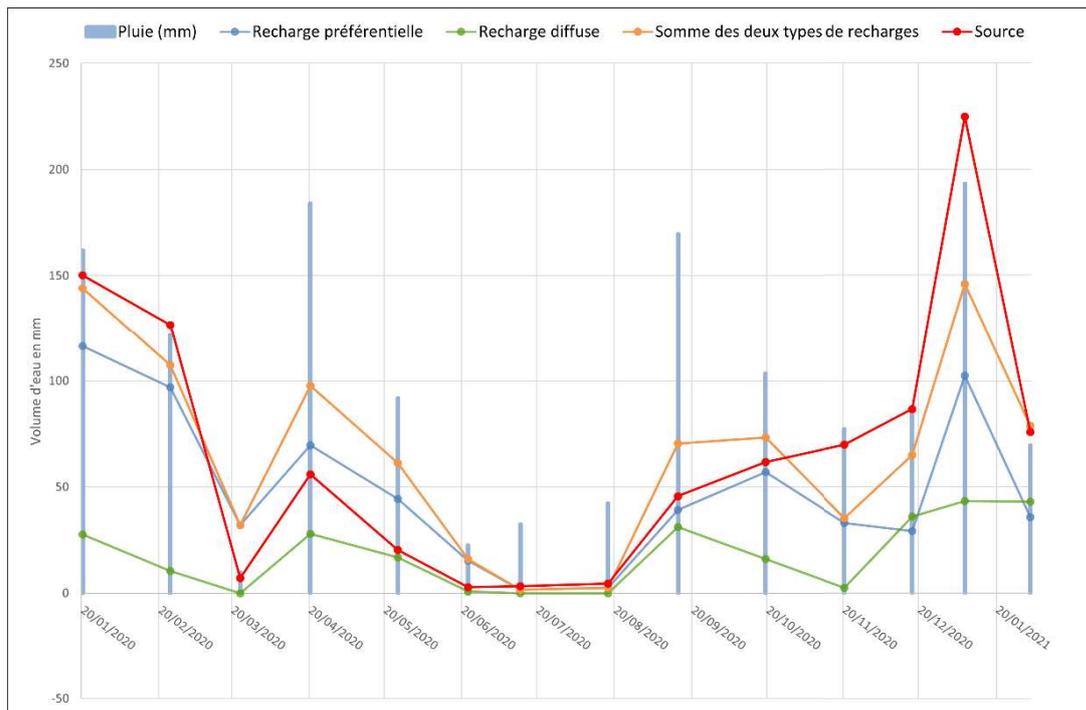


Figure 16 : Calcul de bilan prenant en compte le type de recharge entre 2020 et 2021

D'après l'incertitude liée aux lysimètres, la recharge diffuse est considérablement sous-estimée. Elle sera tout de même considérée comme telle.

La recharge diffuse représente une petite partie du volume d'eau qui sort à l'exutoire. A l'inverse, les pertes représentent environ 72% du volume à l'exutoire contre 27% pour la recharge par la surface calcaire. Les 0.5 % restant correspondent à l'indice IGF (Tableau 5).

A partir de mars 2020 le volume combinant les deux types de recharges est supérieur aux volumes produits à la source jusqu'à octobre 2020. Le système est donc en train de stocker de l'eau. Pour les mois de mars, avril et mai, l'infiltration préférentielle à elle seule est supérieure aux volumes sortant à l'exutoire. La partie

du volume produit par les pertes est donc stockée dans la matrice lors des mois pluvieux qui suivent une période sèche. Ce stock est ensuite restitué lors des mois très pluvieux qui suivent une période humide.

Tableau 5 : Estimation du volume des différentes recharges et de la source. Calcul de l'indice IGF permettant de qualifier la nature des échanges avec l'extérieur

Date	Volume de la recharge préférentielle (mm)	Volume de la recharge diffuse (mm)	Volume écoulé à la source (mm)	Cumul du volume des deux types recharges (mm)	IGF = (V <sub>Source</sub> - V <sub>cumul des deux types de recharge</sub> )	Correspondance en termes d'échanges
20/01/2020	1,16 <sup>E+02</sup>	2,76 <sup>E+01</sup>	1,50 <sup>E+02</sup>	1,44 <sup>E+02</sup>	-6,14 <sup>E+00</sup>	Apport
24/02/2020	9,70 <sup>E+01</sup>	1,05 <sup>E+01</sup>	1,27 <sup>E+02</sup>	1,07 <sup>E+02</sup>	-1,93 <sup>E+01</sup>	Apport
23/03/2020	3,20 <sup>E+01</sup>	0,00 <sup>E+00</sup>	7,16 <sup>E+00</sup>	3,20 <sup>E+01</sup>	2,49 <sup>E+01</sup>	Fuite
20/04/2020	6,97 <sup>E+01</sup>	2,80 <sup>E+01</sup>	5,60 <sup>E+01</sup>	9,77 <sup>E+01</sup>	4,17 <sup>E+01</sup>	Fuite
25/05/2020	4,45 <sup>E+01</sup>	1,68 <sup>E+01</sup>	2,03 <sup>E+01</sup>	6,13 <sup>E+01</sup>	4,10 <sup>E+01</sup>	Fuite
22/06/2020	1,54 <sup>E+01</sup>	8,00 <sup>E-01</sup>	2,92 <sup>E+00</sup>	1,62 <sup>E+01</sup>	1,32 <sup>E+01</sup>	Fuite
13/07/2020	1,71 <sup>E+00</sup>	0,00 <sup>E+00</sup>	3,37 <sup>E+00</sup>	1,71 <sup>E+00</sup>	-1,66 <sup>E+00</sup>	Apport
17/08/2020	2,57 <sup>E+00</sup>	0,00 <sup>E+00</sup>	4,58 <sup>E+00</sup>	2,57 <sup>E+00</sup>	-2,02 <sup>E+00</sup>	Apport
14/09/2020	3,92 <sup>E+01</sup>	3,12 <sup>E+01</sup>	4,57 <sup>E+01</sup>	7,04 <sup>E+01</sup>	2,47 <sup>E+01</sup>	Fuite
19/10/2020	5,71 <sup>E+01</sup>	1,62 <sup>E+01</sup>	6,18 <sup>E+01</sup>	7,33 <sup>E+01</sup>	1,15 <sup>E+01</sup>	Fuite
20/11/2020	3,29 <sup>E+01</sup>	2,40 <sup>E+00</sup>	7,00 <sup>E+01</sup>	3,53 <sup>E+01</sup>	-3,46 <sup>E+01</sup>	Apport
17/12/2020	2,92 <sup>E+01</sup>	3,60 <sup>E+01</sup>	8,68 <sup>E+01</sup>	6,52 <sup>E+01</sup>	-2,17 <sup>E+01</sup>	Apport
07/01/2021	1,02 <sup>E+02</sup>	4,34 <sup>E+01</sup>	2,25 <sup>E+02</sup>	1,46 <sup>E+02</sup>	-7,89 <sup>E+01</sup>	Apport
02/02/2021	2,67 <sup>E-01</sup>	4,30 <sup>E+01</sup>	1,11 <sup>E+00</sup>	4,33 <sup>E+01</sup>	2,83 <sup>E+00</sup>	Fuite
Somme	<b>72.2 %</b>	<b>27.3 %</b>		<b>99.5 %</b>	<b>0.5 %</b>	<b>Equilibre</b>

Les IGF représentent moins d'1% du bilan mensuel, contre 99.5% pour la recharge diffuse et préférentielle. L'approche du bilan décomposant la recharge, semble expliquer la plupart des flux sortants à la source. Des réserves se forment cependant au cours de l'année, mais elles sont restituées quelques mois plus tard. Le système semble donc être conservatif à l'échelle mensuel mais non à l'échelle annuelle. Le bilan mensuel n'est basé que sur une seule année, faut de données. Les résultats sont donc à considérer comme informatifs tant qu'une analyse sur plusieurs années n'est pas réalisée.

#### 4.2.3. Débits classés

A l'issu de l'étude de la courbe des débits classés de la chronique, deux ruptures de pentes nettes au niveau de 1.5 m<sup>3</sup>/s et 5 m<sup>3</sup>/s (*Annexe 8*) ont été observées. Le débit à 1.5 m<sup>3</sup>/s correspond à la limite entre débits faibles et débits forts, c'est à partir de ce débit que le système change de régime. Au-dessus de 5 m<sup>3</sup>/s on trouve les débits exceptionnels.

L'analyse des débits classés vient confirmer le fait que le système est majoritairement en fuite (*Annexe 8bis*). On remarque également une forte tendance du système à constituer des réserves. Cependant il est difficile de corréliser le déficit de pluie avec l'analyse des débits classés (exemple de l'année 1971-1972 qui constitue des réserves au cours d'une année fortement déficitaire en pluie). Cette difficulté d'interprétation laisse penser que la méthode n'est pas adaptée au site d'étude (cas des karsts binaires).

### 4.3. ECOULEMENT A L'ECHELLE EVENEMENTIELLE

#### 4.3.1. Sélection des épisodes

La sélection automatique a permis de sélectionner 50 évènements. A partir de la corrélation croisée entre la pluie et le débit, le temps de retour du système à son état initial est estimé à environ 40h selon la figure en Annexe 9. Cela servira à délimiter la fin de la crue.

Sur ces 50 épisodes, certains épisodes de crue se recourent. Ainsi, 46 épisodes au total ont donc été sélectionnés. Sur ces 46 épisodes, on observe 29 épisodes mono-pic et 17 épisodes multi-pics. Seulement les épisodes mono-pics sont étudiés (*Tableau 6*) :

*Tableau 6 : Présentation des 29 évènements mono-pics sélectionnés sur la chronique globale à partir des épisodes pluvieux.*

	Date du pic	Débit du pic (m3/s)	Volume de pluie (mm)		Date du pic	Débit du pic (m3/s)	Volume de pluie (mm)
Evènement 1	11/05/2020 07:00	10,8	65,53	Evènement 16	29/10/2020 11:00	2,58	16,51
Evènement 2	14/01/2021 20:00	9,58	44,704	Evènement 17	25/02/2020 23:00	0,97	23,876
Evènement 3	14/02/2020 05:00	6,74	33,53	Evènement 18	27/09/2020 20:00	0,2	16,256
Evènement 4	03/03/2020 01:00	6,1	32,004	Evènement 19	16/07/2020 21:00	0,03	19,812
Evènement 5	23/05/2020 17:00	0,72	30,986	Evènement 20	10/03/2020 19:00	2,82	21,082
Evènement 6	26/10/2020 07:00	5,39	33,02	Evènement 21	07/02/2021 15:00	1,09	18,796
Evènement 7	07/06/2020 02:00	1,18	23,876	Evènement 22	14/05/2020 05:00	1,11	12,446
Evènement 8	17/06/2020 13:00	2,03	21,59	Evènement 23	03/11/2020 20:00	0,85	12,7
Evènement 9	29/01/2020 10:00	3,22	33,528	Evènement 24	29/04/2020 15:00	0,08	14,224
Evènement 10	03/02/2021 15:00	6,49	14,224	Evènement 25	30/01/2021 20:00	2,96	10,922
Evènement 11	10/10/2020 09:00	2,08	19,558	Evènement 26	19/11/2020 18:00	0,48	11,938
Evènement 12	24/10/2020 02:00	1,58	22,098	Evènement 27	10/02/2021 14:00	2,75	14,732
Evènement 13	04/12/2020 18:00	1,27	19,812	Evènement 28	05/05/2020 11:00	0,34	10,922
Evènement 14	20/12/2020 12:00	2,77	22,352	Evènement 29	18/02/2020 03:00	0,8	10,668
Evènement 15	30/04/2020 21:00	0,42	18,034				

L'analyse du temps de transfert prend en compte les données des sondes souterraines. Les évènements survenus avant le 11 juillet 2020 à 13h (date à laquelle les sondes souterraines ont été mises en place) ont été supprimées pour former une deuxième sélection (*Tableau 7*).

Tableau 7 : Présentation des 15 mono-pics sélectionnés à partir du 11 juillet 2020

	Date du pic	Débit du pic (m <sup>3</sup> /s)	Volume de pluie (mm)		Date du pic	Débit du pic (m <sup>3</sup> /s)	Volume de pluie (mm)
Evènement 2	14/01/2021 20:00	9,58	44,704	Evènement 18	27/09/2020 20:00	0,2	16,256
Evènement 6	26/10/2020 07:00	5,39	33,02	Evènement 19	16/07/2020 21:00	0,03	19,812
Evènement 10	03/02/2021 15:00	6,49	14,224	Evènement 21	07/02/2021 15:00	1,09	18,796
Evènement 11	10/10/2020 09:00	2,08	19,558	Evènement 23	03/11/2020 20:00	0,85	12,7
Evènement 12	24/10/2020 02:00	1,58	22,098	Evènement 25	30/01/2021 20:00	2,96	10,922
Evènement 13	04/12/2020 18:00	1,27	19,812	Evènement 26	19/11/2020 18:00	0,48	11,938
Evènement 14	20/12/2020 12:00	2,77	22,352	Evènement 27	10/02/2021 14:00	2,75	14,732
Evènement 16	29/10/2020 11:00	2,58	16,51				

#### 4.3.2. Relations pluie-débit

Le système du Verneau est un système karstique réactif, censé réagir instantanément aux épisodes pluvieux. La dynamique du système est étudiée à travers la corrélation entre le débit à la source et le volume de pluie tombé lors de l'épisode (*Figure 17 A*). Le coefficient de ruissellement est également corrélé à la pluie afin de déterminer les propriétés de transfert et de stockage du système (*Figure 17 B*). L'échelle de couleur correspondant au logarithme du débit initial permet d'analyser les évènements en fonction des conditions initiales du système. Le paramètre de surface a également été étudié. Le triangle orienté vers le bas correspond à la surface minimale, celui vers le haut à la surface maximal, et le rond correspond à la surface moyenne.

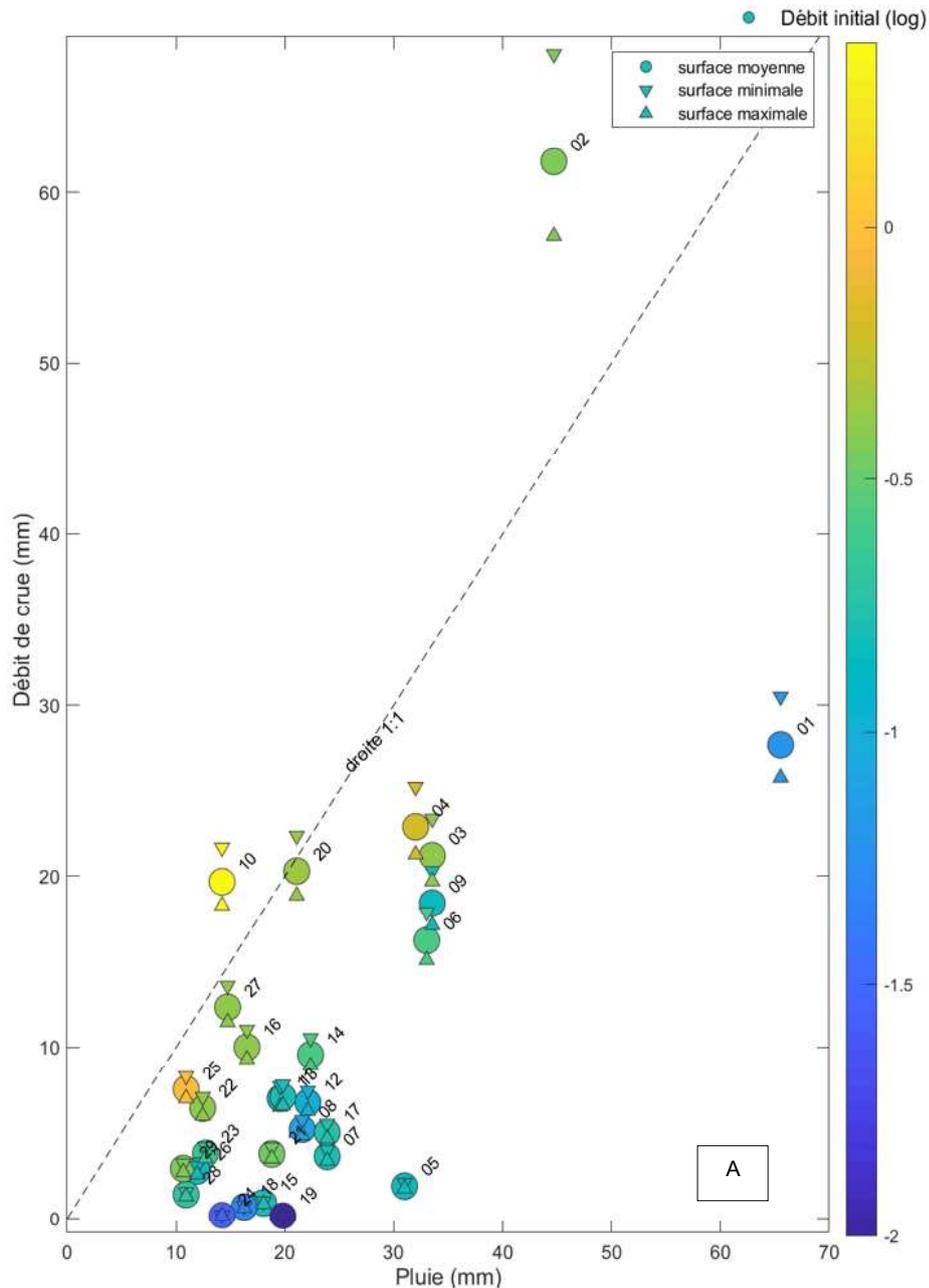


Figure 17(A) : Relation pluie débit sur les 29 événements sélectionnés avec étude de l'influence du paramètre de surface et des conditions initiales.

**Sur le graphique A**, une droite de régression linéaire a été tracée afin de déterminer le seuil à partir duquel le volume résurgent à la source dépasse le volume en entrée.

Deux événements (EV2 et EV10) sont situés au-dessus de la droite, les dates correspondantes sont le 14/01/2021 et le 03/02/2021 et correspondent à une période neigeuse qui a faussé les mesures de la station météo. Ces deux événements ne seront pas analysés par la suite car l'incertitude sur le volume de pluie à cette période est trop élevée.

Pour des conditions initiales basses (valeurs inférieures à un seuil de l'ordre de 0.15 m<sup>3</sup>/s) le volume de débit à la source est bien inférieur au volume de pluie tombé sur le bassin versant. Dans le cas contraire (pour des valeurs supérieures à un seuil de l'ordre de 0.15 m<sup>3</sup>/s) le volume de débit à la source s'apparente au volume de pluie tombé. La réponse du système semble très dépendante des conditions initiales de celui-ci qui jouent un rôle majeur sur la fonction de transfert (hautes eaux) et de stockage (basses eaux).

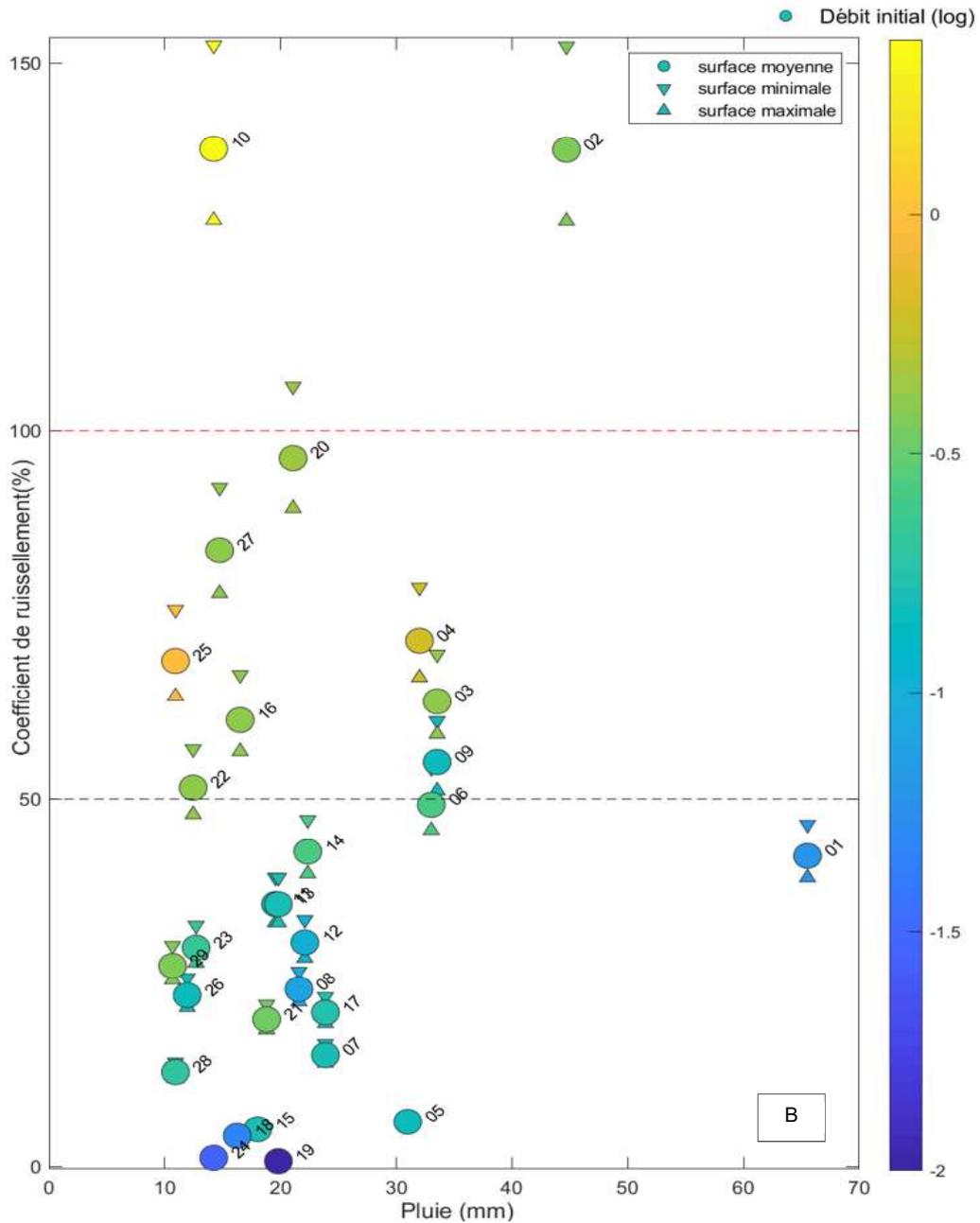


Figure 17 (B) : Relation pluie débit sur les 29 évènements sélectionnés avec étude de l'influence du paramètre de surface et des conditions initiales.

**Sur le graphique B**, sans considérer les points EV02 et EV10, de nombreux points sont situés au-dessus d'un coefficient de ruissèlement de 50%. Ces points correspondent en majeure partie à des conditions initiales supérieures à 0.15m<sup>3</sup>/s. Cela est représentatif d'un karst très connecté. Pour les points dont le coefficient de ruissèlement est inférieur à 50% ils sont majoritairement situés pour des conditions initiales inférieures à 0.15 m<sup>3</sup>/s et représentent des conditions de stock de l'aquifère ou des situations de fuite du système.

### 4.3.3. Influence des pertes

Le système du Verneau est caractérisé par son comportement de karst binaire. Les pertes jouent donc un rôle important dans la compréhension du système.

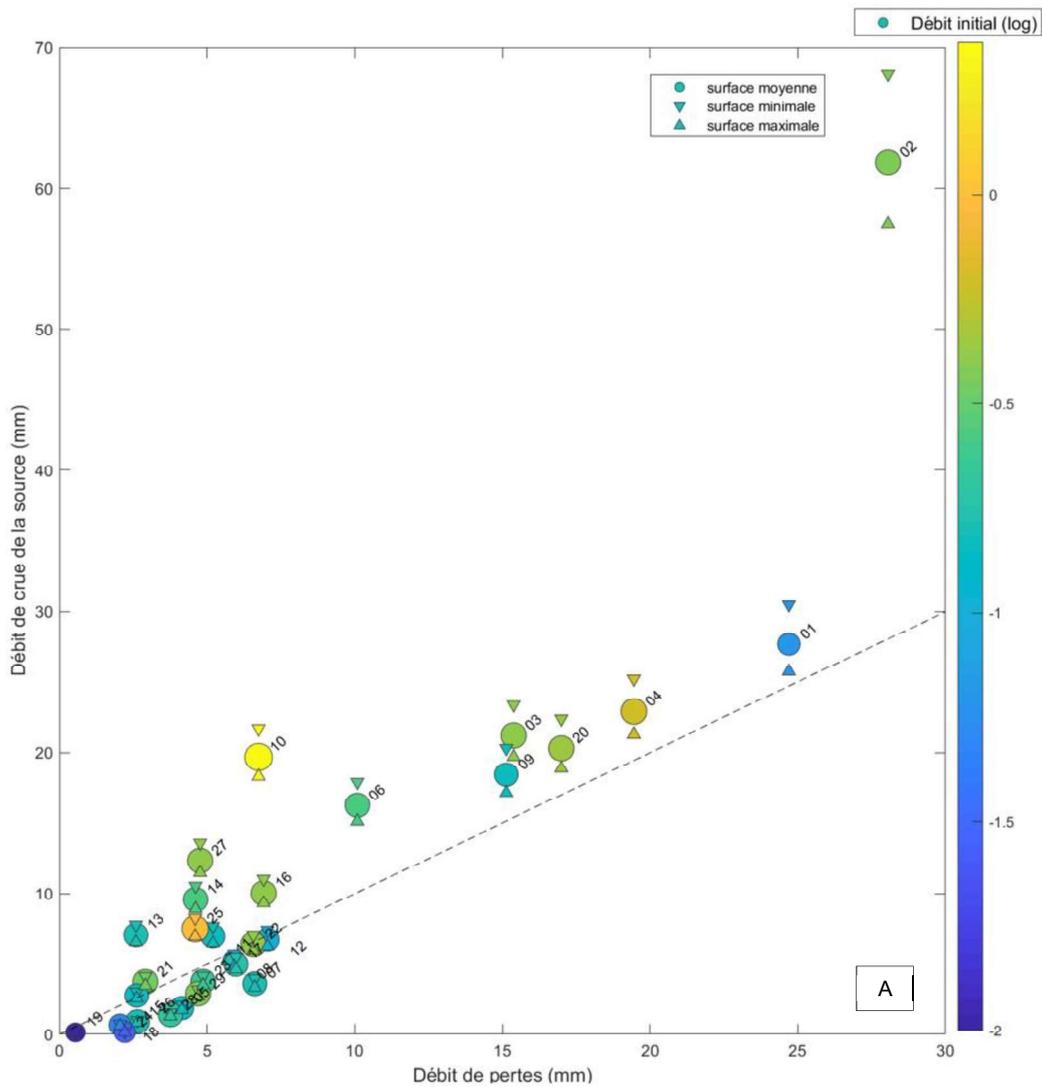


Figure 18 (A) : Corrélation entre le débit des pertes et le débit de l'exutoire

**Le graphique A** de la Figure 18 étudie le lien entre le volume produit à la source et la variable en entrée représentée par le volume produit par la totalité des pertes. Il est possible d'établir un seuil à partir duquel les pertes ne suffisent plus à expliquer l'intégralité de la réponse. En dessous de 7mm (soit 1m<sup>3</sup>/s) le volume des pertes est en partie stocké dans la matrice ; au-dessus de ce seuil le volume des pertes est entièrement vidangé et un deuxième facteur vient alimenter la source. Cela peut s'expliquer par l'activation de la recharge diffuse à partir de ce seuil à 1m<sup>3</sup>/s à la source.

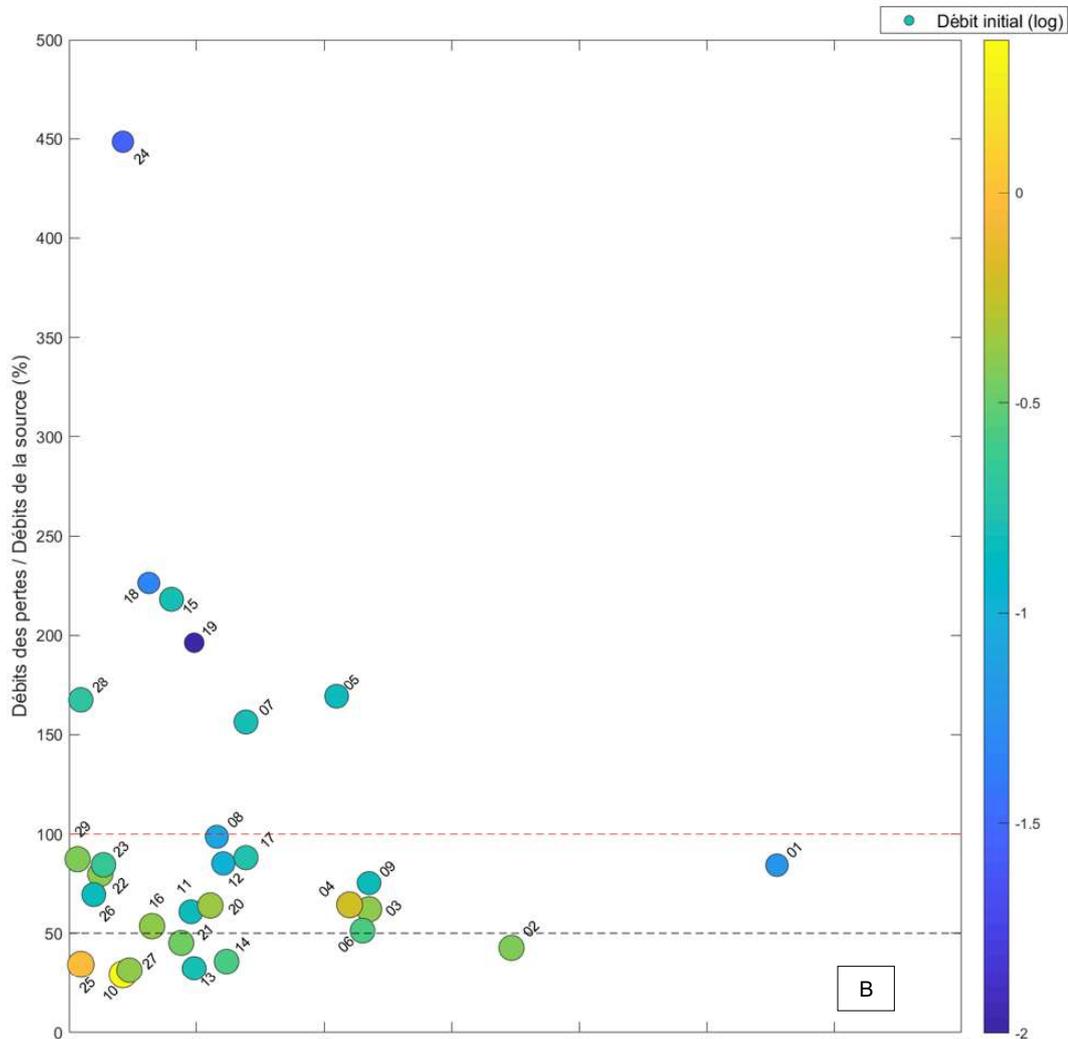


Figure 18 (B) : Corrélation entre le débit des pertes et le débit de l'exutoire

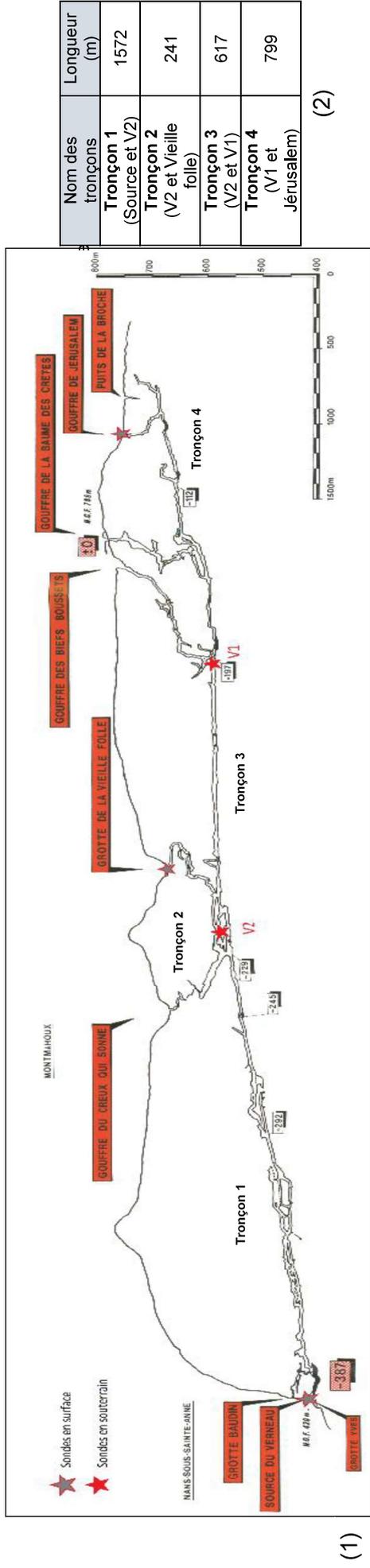
**Le graphique B**, montre différentes situations en fonction du pourcentage de coefficient de débit des pertes sur débit de la source :

- Au-dessus de 100%, les points sont situés en situation de basses eaux (conditions initiales inférieur à 0.15 m<sup>3</sup>/s). Dans ce cas-là, l'aquifère est en train de former un stock.
- A 100% la recharge diffuse (et/ou la vidange) de l'aquifère sont considéré comme nul et seulement les pertes alimentent le système.
- A 50%, la recharge diffuse (et/ou la vidange) et la recharge localisée ont le même poids sur l'influence de la recharge.
- En dessous de 50%, La recharge diffuse (et/ou la vidange) sont supérieurs à la recharge par les pertes. Cette situation est vérifiée pour 7 cas sur 29, ce qui montre que l'influence de la recharge diffuse n'est pas négligeable

#### 4.3.4. Vitesse de transfert de pression

Le transfert de pression à travers le système a été étudié à travers 4 tronçons (Figure 19). Le décalage de temps (m/h) a été calculée à partir des décalages de pic de débit maximal entre les différentes stations. Celui-ci est comparé avec les débits maximaux des stations en surface situées à l'amont : la station Vieille

folle pour les tronçons 1 et 2 et la station Jérusalem pour les tronçons 3 et 4. La 3<sup>e</sup> variable correspond aux conditions initiales de la station le plus en aval, la source.



Nom des tronçons	Longueur (m)
Tronçon 1 (Source et V2)	1572
Tronçon 2 (V2 et Vieille folle)	241
Tronçon 3 (V2 et V1)	617
Tronçon 4 (V1 et Jérusalem)	799

(2)

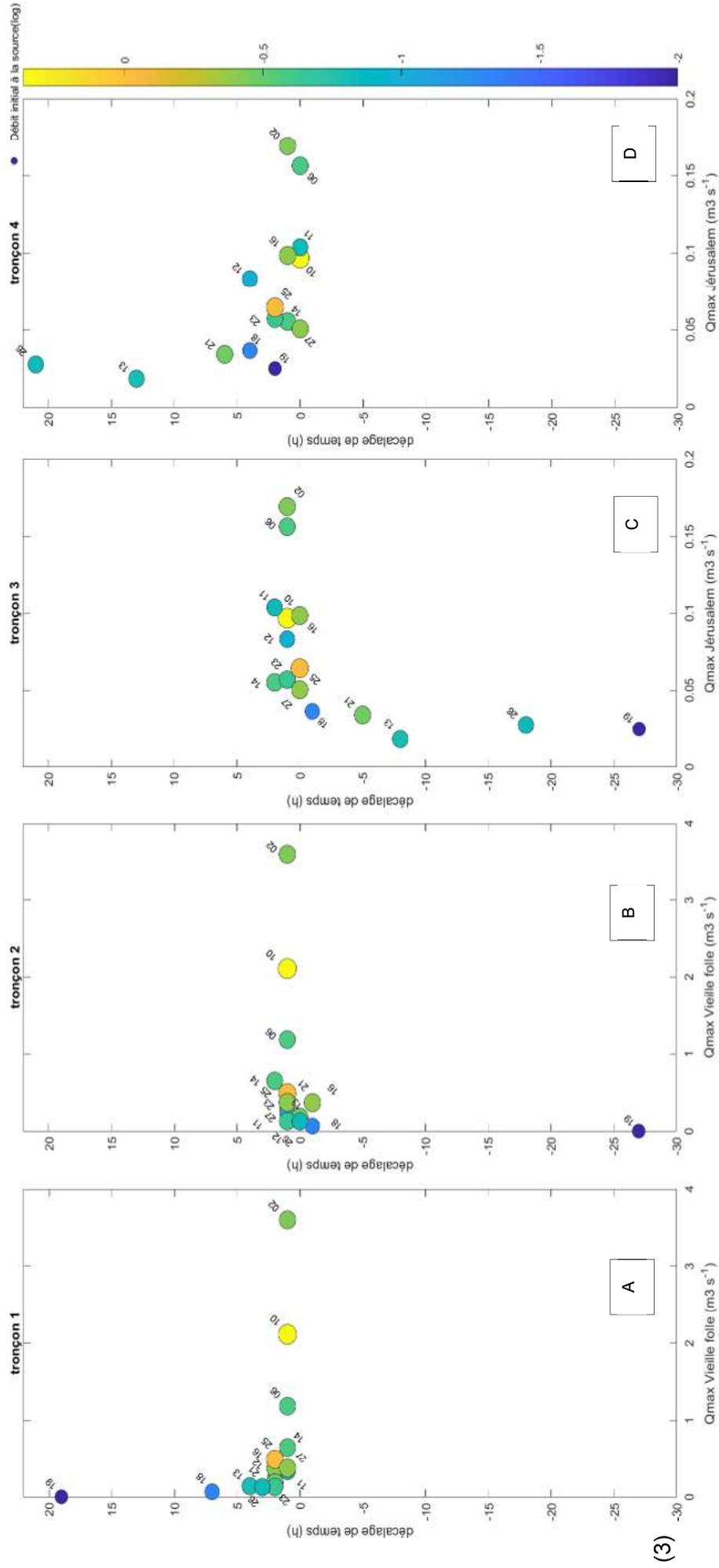


Figure 19 : (1) Coupe générale du réseau karstique du Verneu avec emplacement des sondes de surface et en souterrain.  
 (2) Tableau correspondant aux longueurs de tronçons.  
 (3) Calcul du temps de transfert de pression entre les différents tronçons de réseau.

On remarque à partir de la figure 19 que les transits dans les tronçons 1 et 4 sont en général inférieurs à 5h. Ce transit rapide vient confirmer l'hypothèse d'un karst très bien connecté. En ce qui concerne le tronçon 3 les temps de transfert négatifs sont traduits un apport conséquent de la station aval. En effet la Vieille folle possède le sous bassin versant le plus important du Verneau. Ces résultats négatifs au niveau du tronçon 3 montrent donc que la Vieille folle représente un apport conséquent du système. Le tronçon 4, en amont du système, présente des résultats de transit plutôt élevés avec des temps de transfert longs pour des conditions initiales pourtant fortes. Cette incohérence peut être expliquée par le fait que le tronçon 4 est constitué en grande partie par des affluents qui représentent des zones non saturées du système. Les écoulements en zone non saturée étant moins rapides que dans la zone saturée viennent expliquer ces temps de transfert lents.

Ces données sont encore en cours d'exploitation. Une analyse complémentaire sera effectuée afin de compléter les interprétations et d'apporter une analyse sur le transfert de masse.

## 5. CONCLUSION

L'objectif de cet axe de recherche est de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème du Verneau.

La tendance générale du système est une tendance de fuites qui a pu être observée à l'aide des différentes analyses à l'échelle annuelle (calculs de bilan et méthode des débits classés). En effet 21% du débit total ne ressort pas à la source et est évacué sous forme de fuite. L'analyse structurale a permis en partie d'expliquer ce débit manquant. En effet un changement de géométrie du réseau influençant les dynamiques du système a été observé. Le réseau situé à l'aval, au niveau de la source, n'étant pas au contact direct de l'aquiclude représente une sortie annexe à la source. De plus le pendage des couches orientées en sens inverse à la source ainsi que les nombreuses failles représentent également des zones de fuites potentielles.

Cependant ces fuites peuvent également être considérées comme du stockage dans la matrice. Afin d'avoir une idée du stockage dans la matrice, un calcul de volume de formation à partir des coupes géologiques et une estimation des perméabilités permettraient d'estimer un volume stocké par les formations réservoirs. Cela pourrait permettre d'expliquer une partie du pourcentage des fuites observé.

L'analyse du bilan mensuel, à partir de la recharge diffuse estimée et de la recharge préférentielle, a permis de faire ressortir une tendance du système. Lors de forts événements pluvieux faisant suite à une période sèche, les volumes produits par les pertes dépassent ceux résurgents à la source, laissant penser que le système est en train de former un stock. Un stock qu'il semble restituer lors de forts événements pluvieux survenant après des périodes humides ; contribuant ainsi à la formation de crues conséquentes. Cependant le bilan mensuel ne se basant que sur une seule année de chronique, les interprétations doivent être considérées comme incertaines pour le moment. De plus l'incertitude liées aux lysimètres provoquent à priori une sous-estimation de l'infiltration par la recharge diffuse.

L'analyse à l'échelle événementielle a permis d'étudier le comportement hydrodynamique du système et d'estimer certains seuils à partir desquels le système change de comportement. Effectivement le système semble changer de comportement pour un seuil correspondant à des conditions initiales de 0.15 m<sup>3</sup>/s. Sous ce seuil, le système stock l'eau dans la matrice de l'aquifère et au-dessus le système devient très bien connecté et va avoir tendance à vidanger le volume stocké en plus du volume drainé lors des fortes crues.

L'instrumentation a également permis de définir qu'à partir de 1 m<sup>3</sup>/s de débit à la source, la recharge diffuse s'activait pour participer au débit à l'exutoire. La valeur de ce seuil est en accord avec les résultats des débits classés montrant un changement de régime de l'aquifère autour de 1.5 m<sup>3</sup>/s.

La recharge diffuse semble donc également jouer un rôle important, cependant son estimation étant basée sur des appareils de mesure peu fiables il est compliqué de s'appuyer sur cette variable. Arriver à corriger cette valeur d'infiltration à partir de calcul de bilan hydrique du sol serait une première solution pour réduire l'incertitude sur cette donnée.

Le groupe du GIPEK, en plus d'avoir installé les deux sondes souterraines du BRGM, a installé plusieurs autres sondes diver à différents endroits dans le système souterrain. Une analyse complémentaire du temps de transfert à partir de tronçons plus courts permettrait également de mieux comprendre la dynamique du système et de prendre en compte l'apport des différents affluents. A partir d'une analyse des hauteurs d'eau, il serait intéressant de repérer de potentielles fuites qui pourraient expliquer en partie les 21% correspondant à l'indice IGF du bilan annuel.

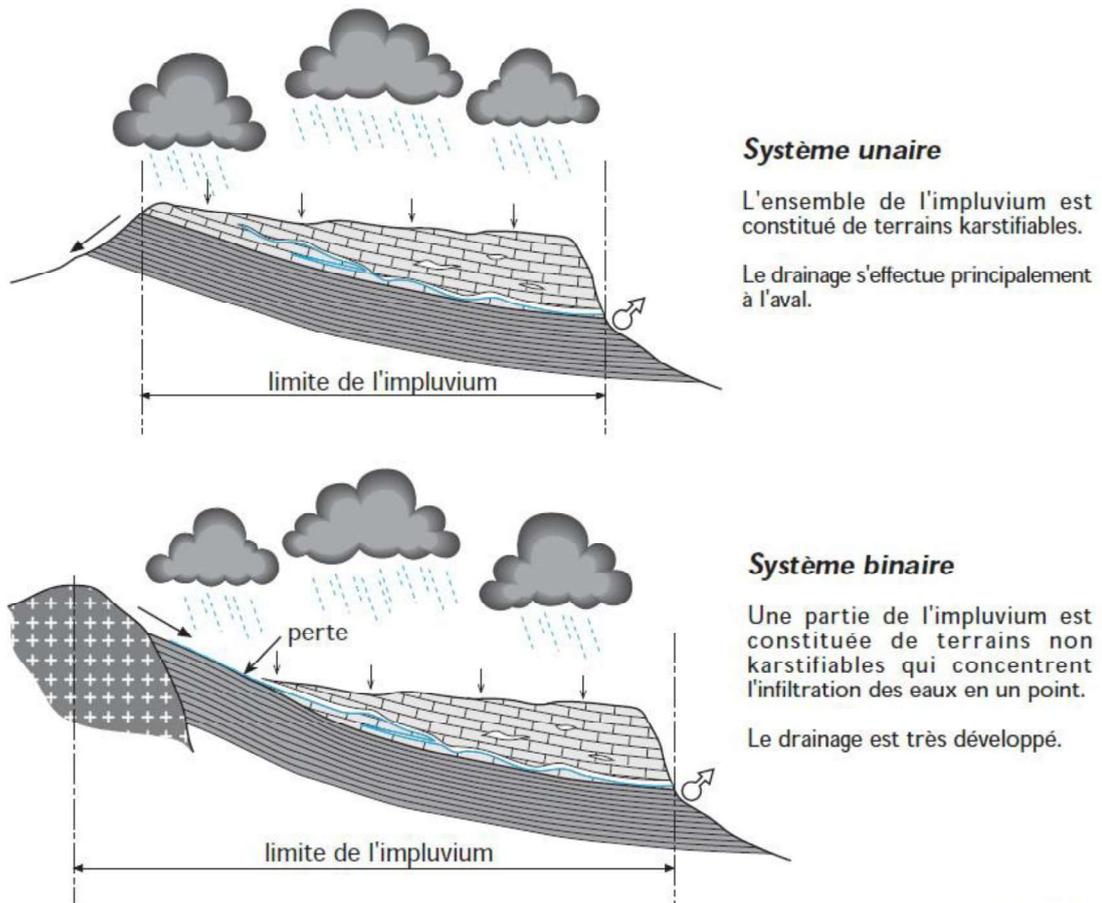
## 6. BIBLIOGRAPHIE

1. Giordano M. Global Groundwater ? Issues and Solutions. *Annu Rev Environ Resour.* Nov 2009 ; 34, 153-78.
2. Chen Z, Auler As, Bakalowicz M, Drew D, Griger F, Hartmann J, Jiang G, Moosdorf N, Richts A, Stevanovic Z, Veni G, Goldscheider N, 2017. The world karst aquifer mapping project : concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeol J*, 25 :771–785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>.
3. Degiorgi F et Badot P-M – Etude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur les bassins versants, 2020
4. Prost S, Reilé P, Villegas J-P, Le réseau du Verneau (Doubs), *Spelunca* 148, 2017
5. Bichet V, Campy M, Dercourt J, Montages du Jura : géologie et paysages, Besançon, édition Neo, 2013
6. Chauve P, Roux, J.Cl , Aquifères et Eaux souterraines en France. Chapitre IX. Jura, 2006. (Ed.), AIH-IAH, BRGM Editions, Tome 2, pp 561-590
7. Géorisques | Mieux connaître les risques sur le territoire [Internet]. [Consulté le 13 juin 2021]. Disponible sur: <https://www.georisques.gouv.fr/>
8. Carte-generaliste-bfc [Internet]. [Consulté le 22 juin 2021]. Disponible sur: <https://cartes.ternum-bfc.fr/>
9. Accueil | InfoTerre [Internet]. [Consulté le 03 Mai 2021]. Disponible sur: <http://www.infoterre.fr/>
10. Le Mesnil M, Charlier J-B, Moussa R, Caballero Y, Dörfliger N. Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes. *Journal of Hydrology*. juin 2020;585:124583.
11. Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>.
12. Dingman, S.L., 2002. In: *Physical Hydrology*, second ed. Waveland Press, pp. 575.
13. Edijatno, De Oliveira, Nascimento, N., Yang, X., Makhoulouf, Z., Michel, C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrol. Sci. J.* 44, 263–277. <https://doi.org/10.1080/02626669909492221>.
- 14.

- Lanini S, Caballero Y, Seguin J-J, Maréchal J-C. ESPERE-A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge, 2016; 54 :155-6. 15.
- Mangin, A, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse, Université de Dion, 1975. 422 pp 16.
- Aucant Y, Schnitt C, Urlacher, J-P, Le Verneau souterrain, edition SHAG, 1985. 17.
- Dörfliger N, Pinault J-L, Petit V, Jauffret D avec la collaboration de Ladouche B, Bakalowicz M, de la Vaissière R, systèmes karstiques et crues du Doubs. Méthodologie de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surface, lors d crues et d'étidages, 2004, edition BRGM, 182p.

## 7. ANNEXES

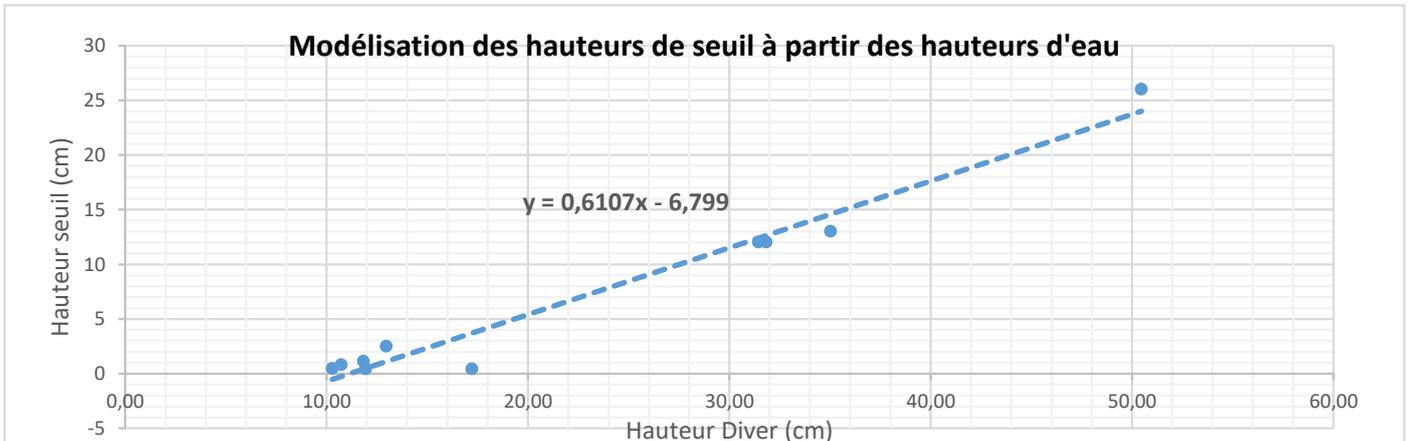
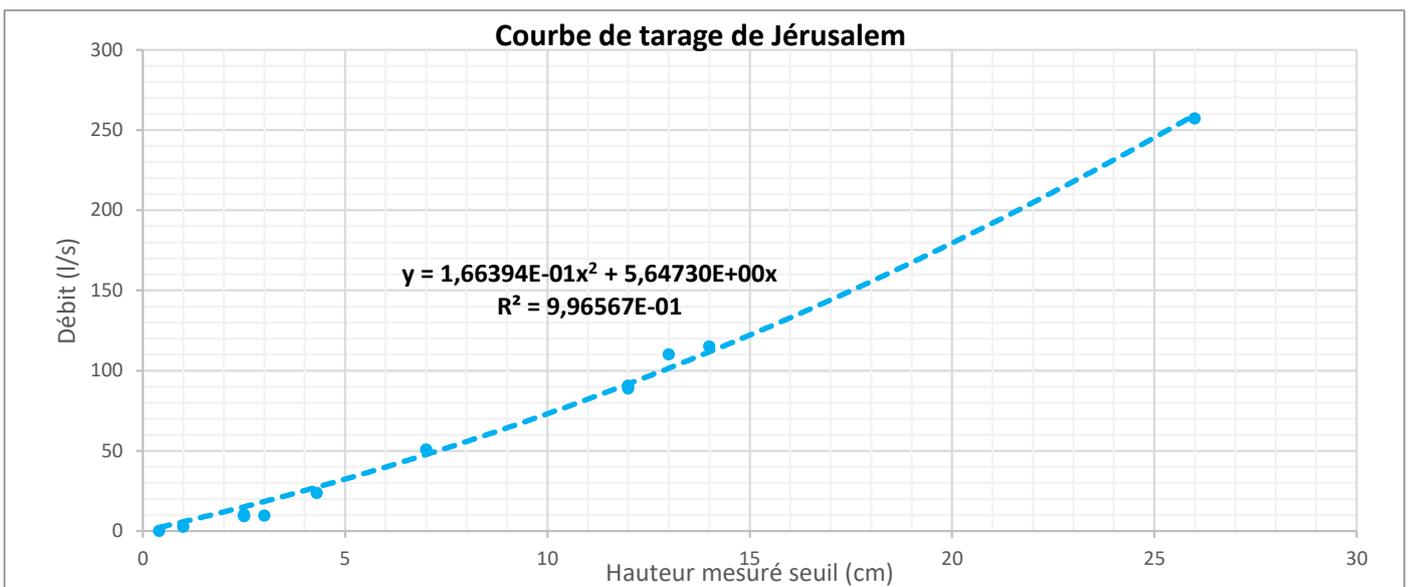
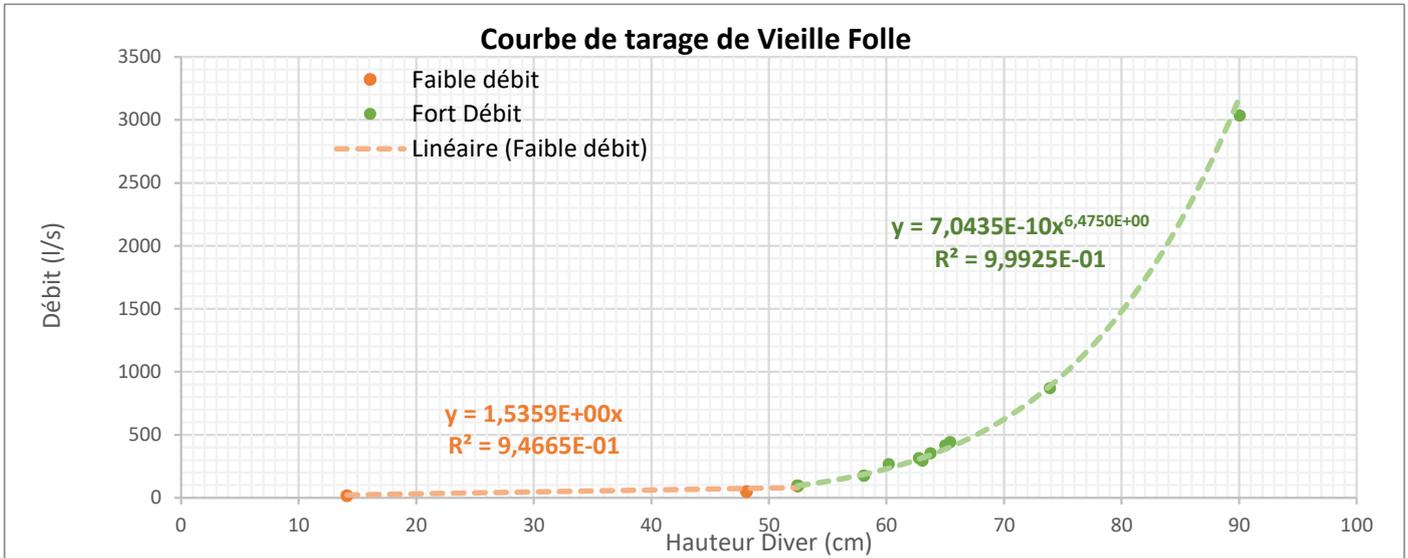
### Annexe 1 : Fonctionnement d'un karst binaire



AERMC - 1999

Annexe 1 : Fonctionnement d'un karst binaire

## Annexe 2 : Courbes de tarage de Vieille Folle et Jérusalem avec courbe de modélisation des hauteurs de seuils



Annexe 2 : Courbes de tarage de Vieille Folle et Jérusalem à partir des hauteurs de seuil observés ou modélisés

**Annexe 3 : Tableau de synthèse des paramètres mesurés**

Type d'appareil	Localisation de la sonde	Paramètre mesuré	Début et fin de la mesure disponible	Pas de temps	Utilisé où ?
<b>Sonde DIVER</b>	Source du Verneau	Pression (cm H <sub>2</sub> O)* Température (°C) Conductivité (mS/cm)	Du 16/01/2019 au 03/06/2021	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Fluorimètre</b>	Source du Verneau	Concentration des traceurs en mV.	Installé début 2019, mise en marche lors des injections de traceurs	15 minutes	Pas analysé
<b>Sonde DIVER</b>	Jerusalem	Pression (cm H <sub>2</sub> O)* Température (°C) Conductivité (mS/cm)	Du 27/11/2019 au 03/06/2021	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Sonde DIVER</b>	Vieille Folle station	Pression (cm H <sub>2</sub> O)* Température (°C) Conductivité (mS/cm)	Du 27/11/2019 au 03/06/2021	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Sonde Diver</b>	V1	Pression (cm H <sub>2</sub> O)* Température (°C) Conductivité (mS/cm)	Du 24/10/2019 au 10/03/2021. Mise en place le 11/07/2019	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Sonde Diver</b>	V2	Pression (cm H <sub>2</sub> O)* Température (°C) Conductivité (mS/cm)	Du 24/10/2019 au 09/03/2021. Mise en place le 11/07/2019	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Station météo</b>	Montmahoux	Pluie moyenne (mm), température moyenne, minimale et maximale (°C)	Du 27/11/2019 au 06/05/2021	1 heure	Analyse haute fréquence
<b>Sonde BARO DIVER</b>	Montmahoux	Pression atmosphérique (cm H <sub>2</sub> O)	Du 27/11/2019 au 06/06/2021	15 minutes	Analyse haute fréquence
<b>Station météo France</b>	Levier	Précipitation totale (mm)	Du 01/02/1943 au 01/02/2020	Mensuel, journalier et horaire	Calculs de bilan

<b>Données Safran</b>	Levier	Evapotranspiration (mm)	De 1970 à 2019	Journalier	Calculs de bilan
<b>Station DREAL</b>	Source du Verneau	Hauteurs d'eau (cm)	Du 01/01/1969 au 01/03/2021 (journalier) et du 01/03/1998 au 31/12/2018 (horaire)	Journalier et horaire	Débits classés

*Annexe 3 : Tableau de synthèse des paramètres mesurés*

## Annexe 4 : Canevas d'interprétation de la méthode des débits classés de A. Mangin

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
<b>A</b>	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	- Mise en fonctionnement de trop-plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux
			- Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
<b>B</b>	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
<b>D</b>	$\alpha_2 > \alpha_1$		- Constitution d'une réserve
<b>E</b>	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

*Annexe 4 : Canevas d'interprétation de la méthode des Débits classés de Mangin (1975)  
(source : Dörfliger et al.2004) <sup>(17)</sup>*

## Annexe 5 : Tableau de formule des paramètres

Nom	Description	Formule
Débit de base (Qb)	Débit induit par l'aquifère avant l'arrivée de la crue.	Calculé à partir de la fonction « hydrun » dans matlab.
Débit de pointe (Qx)	Le débit correspondant aux pics des évènements de crues.	Qx = Maximum (Q) Avec Q le débit à la source
Débit initial (Qini)	Correspond aux conditions de l'aquifère avant l'arrivée de la crue.	Calculé à partir du code matlab faisant intervenir le débit minimal à la source, le débit à la source lors de l'évènement de crue ainsi que le temps. Code à demander par mail à : j.mexler@brgm.fr
Volume écoulé en m3	Conversion du débit en volume écoulé lors de l'évènement	$V_{m3} = \sum Q * \Delta t$ Avec Q le débit à la source
Volume écoulé en mm (V_Q_mm)	Conversion du débit en volume écoulé lors de l'évènement	$V_{mm} = V_{m3} / A * 0.001$ Avec A : l'aire de la zone d'alimentation en m <sup>2</sup>
Ruissellement (RC)	Volume ruisselé lors de l'évènement de crue.	$RC = V_{mm} / V_{P\_mm} * 100$ Avec $V_{P\_mm} = \sum \text{Pluie en mm}$
Décalage de temps (h)	Décalage entre deux pics de débit de stations différentes	Pic de débit de la station amont – Pic de débit de la station aval au même temps t.

Annexe 5 : Tableau de formules des paramètres utilisés lors de l'analyse événementielle

# Annexe 6 : Méthodologie de la numérisation en 3D du Verneau

La numérisation 3D du réseau karstique du Verneau a été réalisée dans un premier lieu afin de mieux comprendre la structure et l'agencement du réseau. Cette numérisation couplée aux informations géologiques et hydrogéologiques permet une meilleure compréhension du système.

## 1. Sources d'informations disponibles

Pour réaliser la numérisation en 3D du réseau karstique du Verneau nous disposons de trois sources d'informations disponibles, principalement fournies par le GIPEK.

La première source d'information est le document nommé « Le Verneau souterrain » qui est un guide spéléologique de Franche-Comté réalisé en 1985. Ce guide comporte différentes rubriques inhérentes au Verneau, notamment une rubrique nommée « Description du réseau » qui décrit avec précision le réseau autour de plan et de coupes détaillées des gouffres et salles principales du réseau.

La deuxième source d'information, plus récente est le tome 3 de l'Inventaire spéléologique du Doubs réalisé en 1996. C'est un ouvrage qui, contrairement à l'autre, n'est pas centré sur le Verneau mais sur l'ensemble des systèmes karstiques du Doubs. Il dispose donc de quelques coupes et plans mais beaucoup moins nombreux que pour le Verneau souterrain.

La troisième source d'information est un tracé du réseau du Verneau au format shapefile réalisé par le GIPEK à l'aide de logiciel de spéléologie.

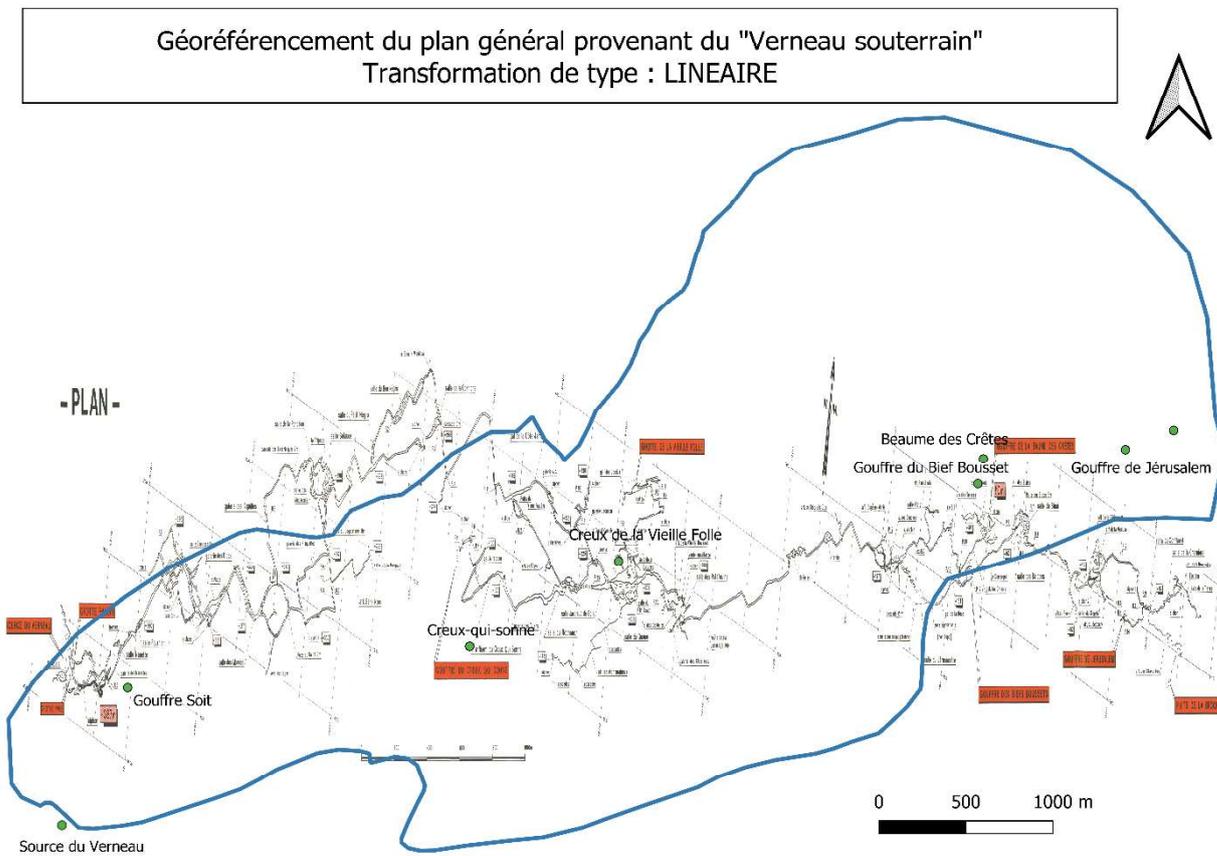
Les coordonnées des gouffres ont été extraites à partir de la base de données BDCAV. En ce qui concerne la source du Verneau, les coordonnées ont été déterminées à partir des traçages réalisés sur le Verneau. Pour plus de précision, toutes les coordonnées des gouffres (sauf les gouffres Soit et de la Broche) ont été remesurées sur le terrain et sont présentées dans le tableau qui suit. On remarque un léger décalage entre les coordonnées de la base de données et celles mesurées sur le terrain. Nous avons décidé de travailler avec les données les plus récentes que nous avons-nous même récolté.

NOM	Z	BDCAV		Terrain	
		X_L93	Y_L93	X_L93	Y_L93
Gouffre Soit	685	928792	6658267		
Creux-qui-sonne	670	930755	6658509	930757	6658495
Creux de la Vieille Folle	671	931611	6659000	931639	6659006
Gouffre du Bief Boussets	765	933673	6659453	933602	6659427
Baume des Crêtes	789	933705	6659598	933698	6659597
Gouffre de Jérusalem	753	934520	6659650	934531	6659675
Gouffre de la Broche	767	934796	6659759		
Source du Verneau	420	928415	6657473		

## 1. Géoréférencement des plans à l'aide des gouffres et de la source du Verneau

Les plans comportent des informations d'élévation spécialisées en 2D, l'objectif du géoréférencement est de référencer ces plans en fonction d'informations de surface précises afin de pouvoir attribuer une position dans l'espace à chaque points côtés des plans.

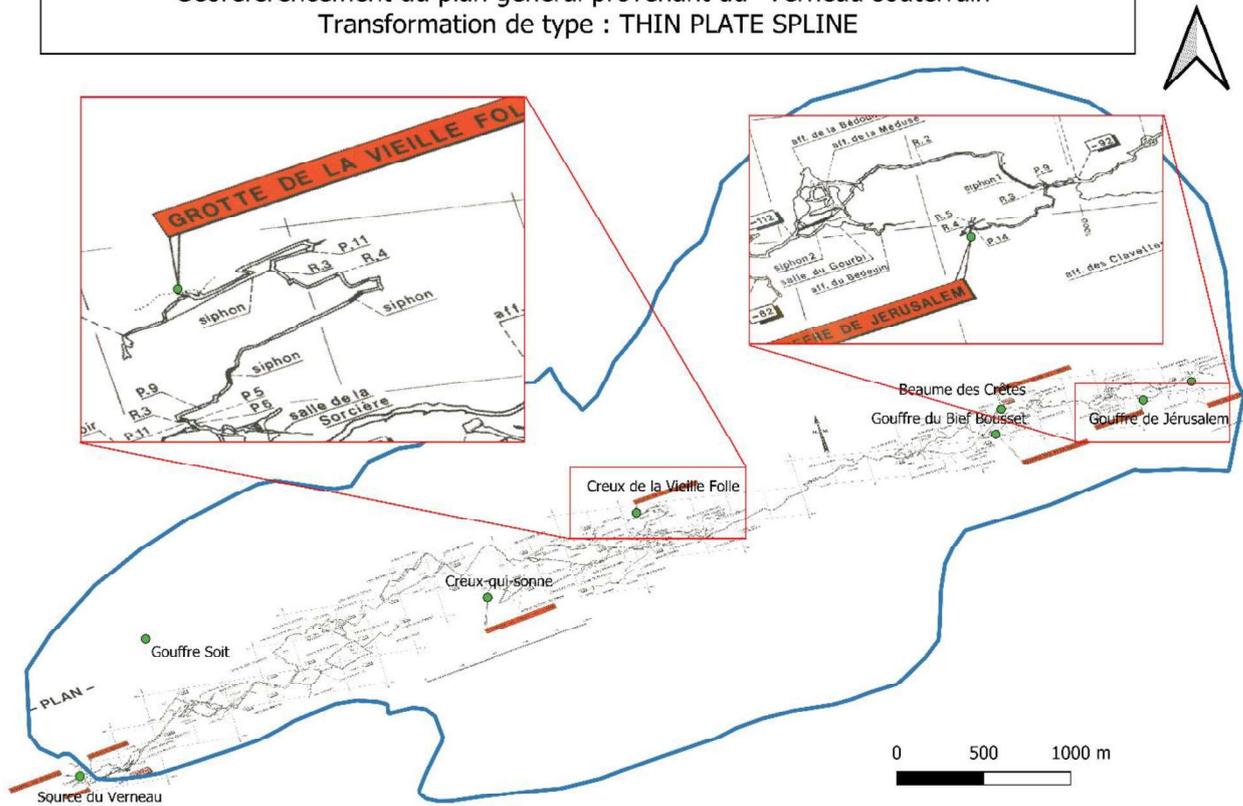
Pour réaliser ce géoréférencement le logiciel QGIS version 3.10.12 est utilisé car il dispose d'une extension « géoréférencer ». Différents types de transformations sont disponibles : linéaire, helmert, polynomiale 1, polynomiale 2, polynomiale 3, thin plate spline et projective. Dans un premier temps la transformation linéaire a été utilisée afin de ne pas déformer l'image. Le résultat du géoréférencement avec transformation linéaire est présenté dans la figure suivante :



On remarque que le géoréférencement, en utilisant une transformation linéaire, ne fait pas correspondre les informations de surfaces avec les gouffres du plan. Cela signifie donc que sans déformation de l'image le plan ne peut pas se positionner en se basant sur les informations de surface. Il est donc possible que le plan ne soit pas totalement fidèle à la réalité ou que les informations de surface soient imprécises. Il faut donc appliquer une transformation déformante à l'image pour que l'image puisse se positionner par rapport aux informations de surface. Toutes les options de transformation proposées par QGIS ont été testé et celle qui présente le résidu le plus faible a été retenue. Il s'agit de la transformation Thin plate spline. Les résidus obtenus sont de l'ordre de  $10^{-12}$  contre des résidus de l'ordre de 30 pour la transformation linéaire.

Le résultat obtenu après géoréférencement avec une transformation de type Thin Plate Spline est présenté par la figure qui suit :

Géoréférencement du plan général provenant du "Verneau souterrain"  
Transformation de type : THIN PLATE SPLINE



La transformation déformante a donc permis de faire correspondre le plan avec les informations de surface. On remarque cependant que le fait de déformer l'image a modifié l'orientation de la flèche du nord ce qui n'était pas le cas lors du géoréférencement avec la transformation de type linéaire. La même méthode a été appliquée en ce qui concerne le plan provenant du tome 3 de l'inventaire spéléologique du Doubs. Les résultats étant similaires ils ne sont pas présentés. Les plans étant maintenant géoréférencés et la transformation adéquate sélectionnée il faut choisir le plan qui sera retenu pour la digitalisation du réseau.

Un critère de précision du dessin a permis de sélectionner le plan le plus adéquat pour la numérisation 3D. Le « Verneau souterrain » dispose de plans individuels détaillés contrairement au plan provenant du Tome 3. C'est le Verneau souterrain qui a donc été sélectionné comme base de numérisation.

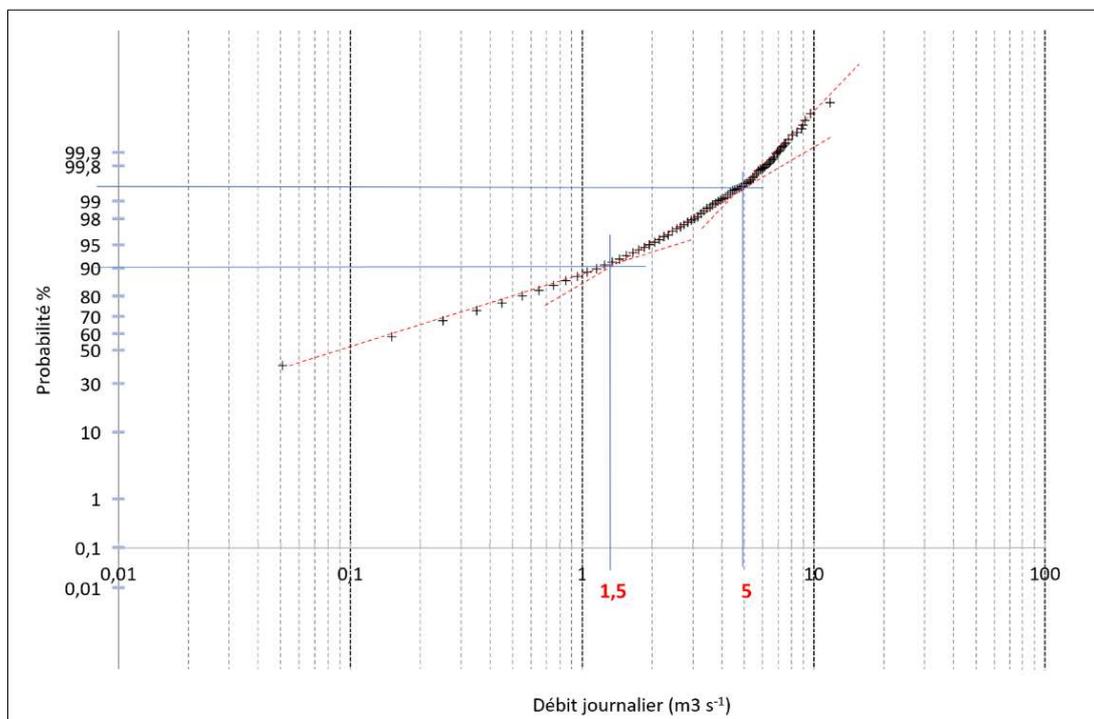
Le scan a dans un premier temps été rasterisé puis vectorisé afin de donner un réseau sous forme de vecteur de type polygones. A partir de ce polygone, le logiciel ETgeowiseards est utilisé afin d'obtenir le squelette du réseau. Le réseau doit être de type ligne pour être visualiser en 3D sous QGIS. Cependant ce passage de polygone à ligne induit une perte d'informations. En effet le réseau karstique possède des conduits très bien représentés par des lignes mais également des salles qui quant à elles sont mieux représentés par des polygones.

## Annexe 7 : Détail des résultats obtenus à partir des calculs de densités de doline à l'échelle locale et régionale

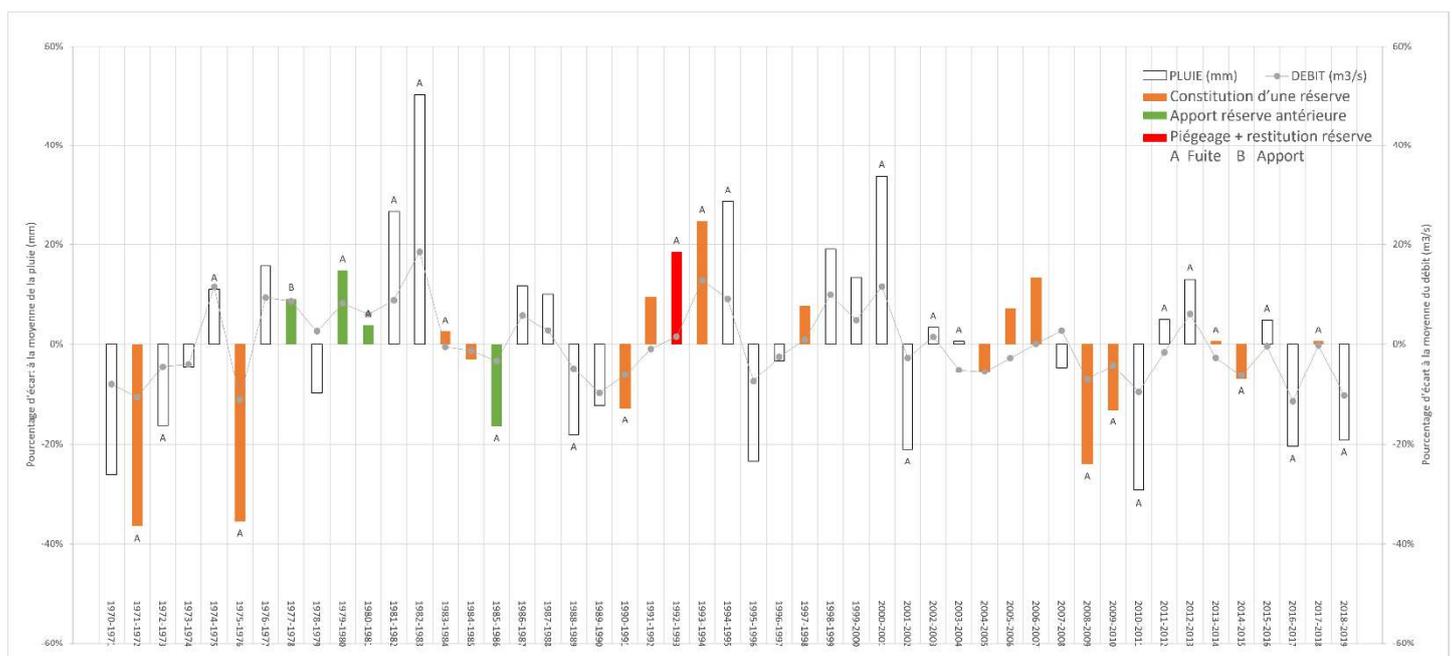
Nom	Zone de plateaux			Zone de faisceaux			Lithologie
	Densité régionale	Densité locale	Degrés de perméabilité	Densité locale	Densité régionale	Degrés de perméabilité	
j9	0,3		S_I	0,3	0,3	S_I	Calcaire
j8a,j8b	0,3	0,4	S_I	0,4	0,1	I-	Calcaire, marne, marno-calcaire
j8				0,7	0,5	S_P	Calcaire, marne
j7	0,3	0,7	S_P	0,4	0,8	P-	Calcaire
j7c				0,4	0,2	S_I	Calcaire
j7b	0,2	1,0	I+				Calcaire, marne
j7a	0,2	0,7	S_I	0,3	0,2	S_I	Calcaire, calcaire marneux, marnes
j6	0,3	0,4	S_I	0,4	0,3	S_I	Calcaire, lentille marneuse
j5	0,2	0,1	I+	0,2	0,4	I-	Calcaire marneux, calcaire
j4	0,2	0,1	I+	0,5	0,0	I+	Marnes
j3a,j3	0,4	0,1	I-	0,5	0,5	S_P	Calcaire, marnes
j2-3a				0,2	0,7	S_I	Calcaire
j2	1,0	0,7	P-	0,9	0,4	P_S	Calcaire
j1c,j1b	0,9	0,0	I+	0,6	0,3	S_I	Calcaire, marnes
j1a				0,4	0,5	S_P	Calcaire, marnes
ljc				0,3	0,6	S_P	Oolithes férugineuses, Marnes
l4-ljc				0,3	0,2	S_I	Marnes
l4-6				0,2	0,1	I+	Mano-calcaire

*Annexe 7 : Détail des résultats obtenus à partir des calculs de densités de doline à l'échelle locale et régionale avec association d'un degré de perméabilité (I+ = très imperméable, I = imperméable, S\_I = semi-perméable à imperméable, S\_P = semi-perméable à perméable, P = perméable, P+ = très perméable)*

# Annexe 8 : Etude des débits classés à l'exutoire sur la chronique de 1970 à 2019

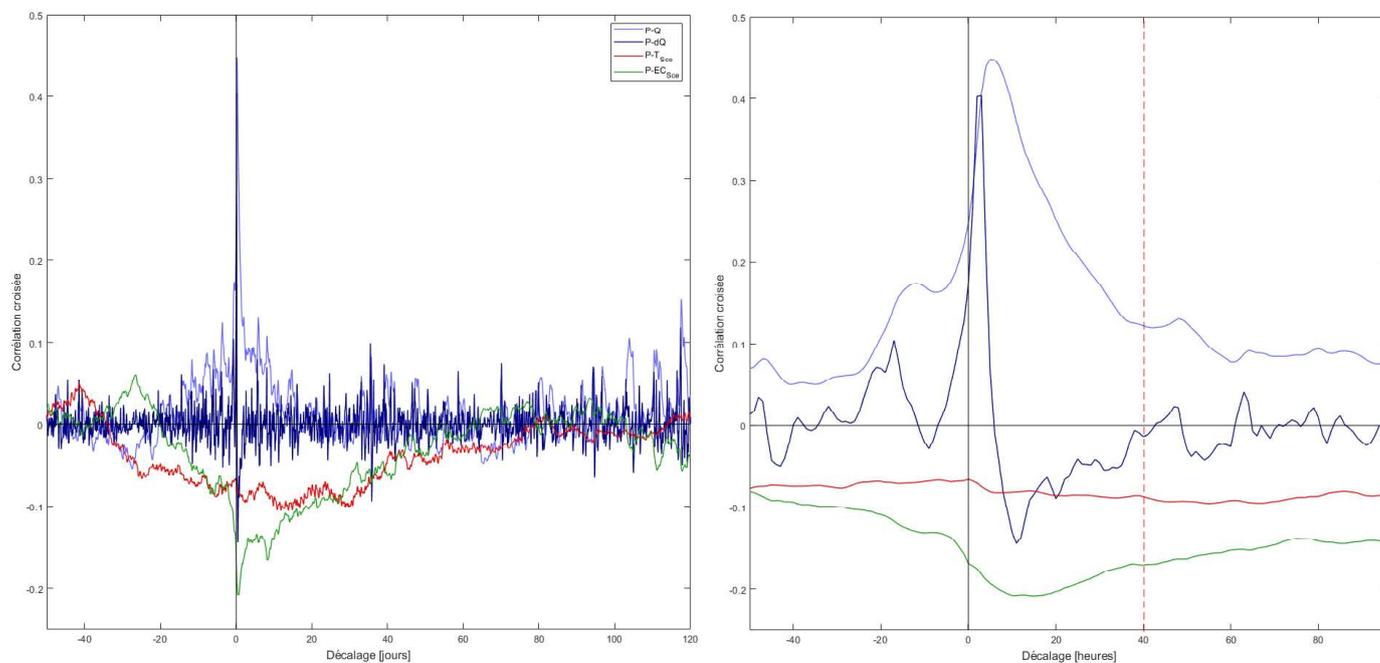


Annexe 8 : Détermination des seuils de débits à partir de la méthode des débits classés sur l'intégralité de la chronique de 1970 à 2019



Annexe 8bis : Interprétation des débits classés à l'exutoire par cycles hydrologiques de 1970 à 2019

## Annexe 9: Corrélation croisée du débit, de la conductivité, de la température et de la pluie



Annexe 9 : Corrélation croisée du débit, dérivée du débit, température et conductivité électrique en fonction de la pluie