



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort

Rapport final

**BRGM/RP-71882-FR**

Version 1 du 27 juin 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**Doney Clément, Lacquement Frédéric**

## Vérificateur :

Nom : JB Charlier

Fonction : Hydrogéologue

Date : 05/07/2022

Signature :

## Approbateur :

Nom : D. Salquebre

Fonction : Directeur du BRGM Alsace

Date : 08/07/2022

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



### Mots clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Doney Clément, Lacquement Frédéric** (2022) – Caractérisation géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique du Grand Belfort. Rapport final V1. BRGM/RP-71882-FR, 77 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-20/01/2022

## Synthèse

A la demande du Grand Belfort et dans le cadre de la prospection de nouvelles ressources en eau, le BRGM propose dans ce rapport de caractériser le contexte géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique en proposant un projet se découpant en deux grandes phases d'étude :

- la caractérisation et l'acquisition de données géologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture ;
- la caractérisation et l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant.

L'acquisition des données géologiques a permis d'identifier :

- la présence de zones faillées (N-S et NE-SW) pouvant être des zones préférentielles d'écoulement d'eau vertical reliant la surface du sol et le milieu souterrain ;
- Des traces de circulation d'eaux horizontales entre les bancs calcaires qui suivent l'inclinaison des couches ;
- La présence d'altération de la roche calcaire liée à la circulation d'eau à travers les formations calcaires ;
- la structure géométrique globale des calcaires décrit une vaste synforme à fond plat. L'axe de la synforme (point bas du fond plat) correspondrait globalement, à la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse tandis que les calcaires affleurants (au niveau des rives de la Savoureuse et au sud de la vallée de l'Allaine) en seraient les bordures.

Les aquifères calcaires présentant le plus gros potentiel en eau seraient potentiellement des calcaires affectés par de nombreuses failles qui recouperaient des interbancs altérés/karstifiés au niveau de l'axe de la synforme.

Pour mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, la seconde phase a été de caractériser les circulations des eaux souterraines au droit de ces aquifères calcaires à travers la mesure :

- De jaugeages de débits sur plusieurs sections de cours d'eau ;
- Des mesures de débits au droit des sources et des mesures piézométriques au droit des puits et forages ;
- La mesure de conductivités électriques (= minéralisation des eaux) des cours d'eau, des sources et fontaines.

Les campagnes de mesures de terrain ont été réalisées :

- du 20 au 23 septembre 2021 pour les basses eaux,
- du 22 au 24 février 2022 pour les hautes eaux.

Les campagnes de mesures au droit des calcaires affleurant, en rive droite de la Savoureuse, mettent en évidence un hydrosystème de type karstiques qui se caractérise par :

- des variations importantes des débits entre les basses et hautes eaux ;

- des fortes interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (zone d'apports en eaux souterraines et de pertes d'eau de surface) mises en évidence à travers les mesures de débits et de conductivités.

La nappe est donc vulnérable aux variations météorologiques et aux pollutions de surface. Cette nappe des calcaires affleurant ne répond pas pleinement aux attentes du Grand Belfort qui recherche une nouvelle ressource de qualité et qui puisse pallier à des manques d'eau liés à d'éventuelles sécheresses.

Il est donc recommandé de continuer les recherches au droit des calcaires sous couverture dont la nappe est mieux protégée face aux effets de la sécheresse et face aux pollutions de surface.

Pour pouvoir implanter un forage dans cette zone, il est recommandé par ailleurs d'affiner l'analyse structurale du sous-sol à l'aide de prospections géophysiques et d'une modélisation 3D.

## Sommaire

1. Introduction .....	9
2. La zone d'étude.....	10
3. Caractérisation géologique des calcaires du Jurassique .....	12
3.1. Objectifs .....	12
3.2. Contexte géologique .....	12
3.3. Caractérisation de la lithologie .....	14
3.4. Structures géologiques.....	17
3.4.1. <i>Géométrie des séries</i> .....	17
3.4.2. <i>Structures tectoniques</i> .....	18
3.4.3. <i>Éléments à retenir</i> .....	25
3.5. Coupes géologiques.....	25
3.6. Altération et karst .....	29
3.6.1. <i>Sensibilité à la karstification</i> .....	30
3.6.2. <i>Secteur Sud</i> .....	30
3.6.3. <i>Secteur central</i> .....	33
3.6.4. <i>Secteur nord</i> .....	36
3.6.5. <i>Les éléments à retenir</i> .....	39
3.7. Bilan.....	40
4. Caractérisation hydrogéologique des calcaires du Jurassique.....	41
4.1. Objectifs .....	41
4.2. Présentation des campagnes de terrain .....	41
4.2.1. <i>Analyses des données climatiques et hydrauliques du département lors des campagnes de prélèvements</i> .....	43
4.2.2. <i>Les outils mobilisés lors des mesures de terrain</i> .....	45
4.2.3. <i>Observations de terrain</i> .....	50
4.3. Résultats des campagnes hydrologiques .....	54
4.3.1. <i>Analyse des débits mesurés en rive droite et en rive gauche de la Savoureuse</i> 54	
4.3.2. <i>Analyse des données de débits à l'Ouest de la Savoureuse</i> .....	58
4.3.3. <i>Analyse des données de conductivité électrique à l'Ouest de la Savoureuse</i> ..	66
4.3.4. <i>Bilan</i> .....	70
4.4. Caractérisation hydrogéologique des calcaires sous couverture .....	71
5. Proposition de modélisation géologique et de prospections géophysiques .....	75
5.1. Objectifs .....	75
5.2. La géophysique par sismique réfraction .....	75
5.2.1. <i>Principe</i> .....	75
5.2.2. <i>Déroulé des profils sismiques</i> .....	75
5.3. Modèle géologique 3D .....	77
5.3.1. <i>Principe</i> .....	77
5.3.2. <i>Déroulé du modèle géologique 3D</i> .....	78
6. Conclusion .....	79
7. Bibliographie.....	81

## Liste des figures

Figure 1 – Zone d'études : Calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture .....	11
Figure 2 – Carte géologique simplifiée du territoire de Belfort issu de l' Inventaire départemental des cavités souterraines du Territoire de Belfort (BRGM, 2006) et localisation de la coupe géologique (Figure 4) .....	13
Figure 3 - Colonne stratigraphique simplifiée des terrains du Territoire de Belfort (P. Rosenthal, 2007).....	16
Figure 4 - Représentations stéréographiques des données de stratification acquises au cours de la campagne de terrain de septembre 2021. A/ calcul des pôles de stratification (points rouge : zone méridionale, points noirs : zone centrale, points vert : zone septentrionale), B/ représentation statistique des pôles de stratification).....	17
Figure 5 - Coupe géologique NNW-SSE (n°1), localisation Figure 2.....	17
Figure 6 - Carte géologique à 1/50000 de la zone d'étude montrant la présence de réseaux de failles affectant les terrains jurassiques (bleu et vert) et la partie inférieure des terrains secondaires (rose et orangé).....	18
Figure 7 - Représentation stéréographique des failles de l'ensemble des affleurements .....	19
Figure 8 – Localisation de l'affleurement FLA0026. Failles normales en relai affectant un banc de calcaire dans la carrière du lit dit la côte de Froy à l'ouest de Banvillars et représentation stéréographique des failles mesurées. ....	20
Figure 9 - Représentation stéréographique des plans de faille mesurés (traits noirs) et des pôles des plans de stratification (point rose) dans la carrière de Ragie Bergeraie (FLA0037) .....	21
Figure 10 – Localisation de l'affleurement FLA0038. Front de taille sud affecté par une série de failles normales de direction N-S avec flexuration des bancs au toit de la faille principale accompagné par un décalage des niveaux repères (rose, bleu et jaune) de l'ordre du mètre. ....	22
Figure 11 - Carte géologique à 1/50 000 avec représentations stéréographiques des failles par secteurs.....	23
Figure 12 - Carte de localisation des principales failles dans le secteur d'étude, les lettres sur chaque failles sont reportées sur les coupes géologiques .....	24
Figure 13 - Carte géologique avec report des isobathes issus du travail d'Edel 2002. En pointillés gris, zone de discontinuités majeures où la puissance des séries varie rapidement et fortement. ....	26
Figure 14 - Carte géologique à 1/50 000, localisation des points d'affleurements (point rouge, numéro FLA00XX), mesures de stratification (en jaune), localisation des forages et localisation des coupes géologiques. Les forages BSS utilisés sont également renseignés. ....	27
Figure 15 - Coupes géologiques, voir la localisation sur la carte géologique de la Figure 4 avec les niveaux repères 0 et 250 m en tireté blanc fin, les symboles drapeaux représentent les intersections entre deux coupes, les failles en trait noir et les failles supposées en tiretés épais blanc .....	28
Figure 16 – Lieu-dit Pont Sarrazin, commune de Vandoncourt, A – Extrait de la carte IGN 1/25000, B – Extrait de la carte géologique à 1/50 000 de Delle, C - Affleurement n° FLA0007, D, E et F – Affleurement n° FLA0008 .....	31
Figure 17 - Lieu-dit Ragie Bergeraie, commune de Saint-Dizier-l'Evêque, A Extrait de la carte géologique, les étoiles à trois branches au sud de l'affleurement indiquent la présence de dolines, B et C front de taille .....	32

Figure 18 – Lieu-dit La Bouloye, commune de Botans, affleurement FLA0025.....	33
Figure 19 - Affleurement FLA0016, moulin de Bermont, rive ouest de la Savoureuse, A : affleurement, B, niveau de stratification karstique avec piliers, C : niveau sortie d'eau à la base d'une barre de calcaire, D, tube karstique parallèle à la stratification.....	34
Figure 20 - Affleurement FLA0014, rive Ouest de la Savoureuse, avec réseau karstique parallèle aux surfaces de stratifications et conduits verticaux alignés sur les plans de failles .....	35
Figure 21 - Affleurement au pied de la tour du Fort de la Miotte avec conduits karstiques....	36
Figure 22 - Carrière de la côte de Froy, A : front de taille supérieur profondément altéré et affecté par la karstification, B et C altération le long des couloirs de fracturation, D détail d'un front d'altération associé à une faille.....	37
Figure 23 - Front de taille dans les calcaires massifs peu altérés, carrière de la côte de Froy .....	38
Figure 24 - Front sud de la carrière avec des marnes recouvrant les calcaires, carrière de la côte de Froy .....	39
Figure 25 – Bloc diagramme 3D représentant la synforme .....	40
Figure 26 – Localisation des points de mesures hydrologiques prévisionnels .....	42
Figure 27 – Evolution des précipitations au cours de l'année 2021-2022 (données SAFRAN – Météo-France).....	43
Figure 28 – Débit moyen journalier au droit de la station U234 5030 de La Savoureuse à Belfort .....	44
Figure 29 – Chronique des débits moyens mensuels de février et septembre au droit de la station U234 5030 de La Savoureuse à Belfort de 1963 à 2022 .....	44
Figure 30 – Mesures du débit de la Douce au courantomètre.....	46
Figure 31 – Jaugeage de la Douce au StreamPro ADCP .....	47
Figure 32 – Jaugeage au sel .....	48
Figure 33 – Jaugeage au seau du lavoir d'Urcerey.....	49
Figure 34 – Localisation des points de mesures hydrologiques de la campagne basses eaux de septembre 2021 .....	50
Figure 35 – Localisation des points de mesures hydrologiques de la campagne hautes eaux de février 2022 .....	51
Figure 36 – Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	52
Figure 37 – Localisation des zones de pertes.....	53
Figure 38 – Localisation de la résurgence du trou Gavoiillot dénommé S.Rupt dans le cadre de ce projet (source vauclusienne).....	54
Figure 39 – Graphiques boîtes à moustache illustrant la répartition des débits entre la rive gauche et la rive droite de la Savoureuse.....	55
<i>Figure 40 – Présentation des principaux bassins versant et des principales structures géologiques de la zone d'étude .....</i>	<i>57</i>
Figure 41 – Cartographie illustrant l'évolution des débits des cours d'eau, des sources et des fontaines entre les basses eaux et les hautes eaux dans la vallée de la Douce .....	59
Figure 42 – Graphiques « blocs à moustache » illustrant la répartition des débits entre les basses et hautes eaux.....	60

Figure 43 – Graphiques illustrant les différences de débits entre les basses et hautes eaux	60
Figure 44 – Graphiques comparant les débits mesurés au droit de la Douce et la pluviométrie	61
Figure 45 – Graphiques comparant les débits mesurés au droit de la Douce et la pluie efficace	62
Figure 46 – Zones d’apports et de pertes au sein de la vallée de la Douce	64
Figure 47 – Zones d’apport et de perte au sein des affluents la vallée de la Douce	65
Figure 48 – Représentation cartographique des mesures de conductivité au droit des cours d’eau, sources et fontaines	67
Figure 49 – Evolution de la conductivité au droit de la Douce de l’amont vers l’aval	68
Figure 50 – Evolution de la conductivité au droit du Rupt de l’amont vers l’aval	69
Figure 51 – Evolution de la conductivité et du débit au droit de la Douce de l’amont vers l’aval	69
Figure 52 – Evolution de la conductivité et du débit au droit du Rupt de l’amont vers l’aval	70
Figure 53 – Localisation de la cible hydrogéologique	73
Figure 54 – Localisation de la cible hydrogéologique au droit du diagramme géologique 3D	74
Figure 55 – Implantation prévisionnelle du grand profil sismique sur fond topographique (IGN 1 :25'000). Les ronds bleus sont les ouvrages/forages recensés sur la BSS en fonction de leur profondeur	76
Figure 56 – Implantation prévisionnelle du grand profil sismique sur carte géologique (feuilles Vercel et Besançon, BRGM 1:50'000). Les ronds bleus sont les ouvrages/forages recensés sur la BSS en fonction de leur profondeur	77

## Liste des annexes

Annexe 1 Résultats des campagnes de mesures	83
---	----

# 1. Introduction

En 2019, l'agglomération du Grand Belfort a sollicité la Direction Régionale du BRGM Bourgogne – Franche-Comté pour réaliser l'état des connaissances scientifiques des ressources en eaux souterraines présentes sur son territoire et identifier celles qui pourraient être intéressantes pour son Alimentation en Eau Potable (AEP).

Actuellement, l'eau utilisée pour l'alimentation du Grand Belfort provient à hauteur de 70 % des nappes alluvionnaires de la Savoureuse (Champ captant de Sermamagny) et de l'Allaine (Champ captant de Morvillars). Les 30 % restants proviennent de l'achat d'eau auprès des services de distribution d'eau voisins. Depuis ces dernières années, la tension sur les deux ressources alluvionnaires est de plus en plus forte, du fait des sécheresses de plus en plus longues et fréquentes. D'autre part, en contexte de changement climatique, une accentuation et une intensification des épisodes de sécheresse sont très probables.

Le Grand Belfort est donc à la recherche de nouvelles ressources pour renforcer et diversifier sa capacité de production en eau potable, à partir des eaux souterraines.

Ce projet fait suite à l'étude **Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives** (C.Doney, 2020 - BRGM/RP-70184-FR) dans lequel, en plus des entités alluviales de l'Allaine et de la Savoureuse, 3 autres entités hydrogéologiques présentant un intérêt pour l'exploitation en eau potable ont été mises en avant :

- les cailloutis du Sundgau ;
- les calcaires du Jurassique affleurants ;
- les calcaires du Jurassique sous couverture.

Parmi ces trois entités, les calcaires du Jurassique (c'est-à-dire aquifère des calcaires du Jurassique) est celle présentant le plus gros potentiel en termes de ressource en eau. Toutefois, les systèmes calcaires peuvent avoir des comportements hydrodynamiques très variables qui sont généralement difficiles à caractériser. La compréhension de leur fonctionnement et l'estimation de leur potentiel en terme d'exploitation pour l'AEP nécessitent l'acquisition de nouvelles connaissances.

A la demande du Grand Belfort et dans le cadre de la prospection de nouvelles ressources en eau, le BRGM a réalisé une étude du contexte géologique et hydrogéologique des calcaires du Jurassique en proposant un projet se découpant en deux grandes phases :

- la caractérisation et l'acquisition de données géologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture ;
- la caractérisation et l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques au droit des calcaires du Jurassique affleurant ;
- La proposition d'investigations géophysiques complémentaires au droit de la zone présentant le plus fort potentiel en eau souterraine.

## 2. La zone d'étude

La zone d'étude concerne les formations calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture du Territoire de Belfort. Elle correspond à une surface d'environ 190 km<sup>2</sup> (70 km<sup>2</sup> pour les calcaires affleurants et environ 120 km<sup>2</sup> pour les calcaires sous-couverture).

Les calcaires sont principalement affleurants à l'ouest de la zone d'étude, au niveau des rives de la Savoureuse et en rive gauche de l'Allaine (Figure 1).

Dans la zone couverte par la communauté de communes du grand Belfort, le Jurassique affleure :

- A l'ouest de la Savoureuse ;
- A l'est de la Savoureuse dans une zone en forme de triangle formé par les villes de Belfort à Sévenan et Egueningue ;
- Dans le secteur de Morvillars et au sud de Granvillars ;
- Au sud d'une ligne passant par Delle et Audincourt.

Ces terrains correspondent aux collines pré-jurassiennes qui s'étendent entre la région du Sundgau et la Haute-Chaîne plissée du Jura, au sud.

Les calcaires sont sous couverture à l'est de la zone d'étude. Ils s'approfondissent en s'enfonçant d'Ouest en Est sous les formations marno-argileuses du Tertiaire grâce aux jeux de failles de direction principale N-S.

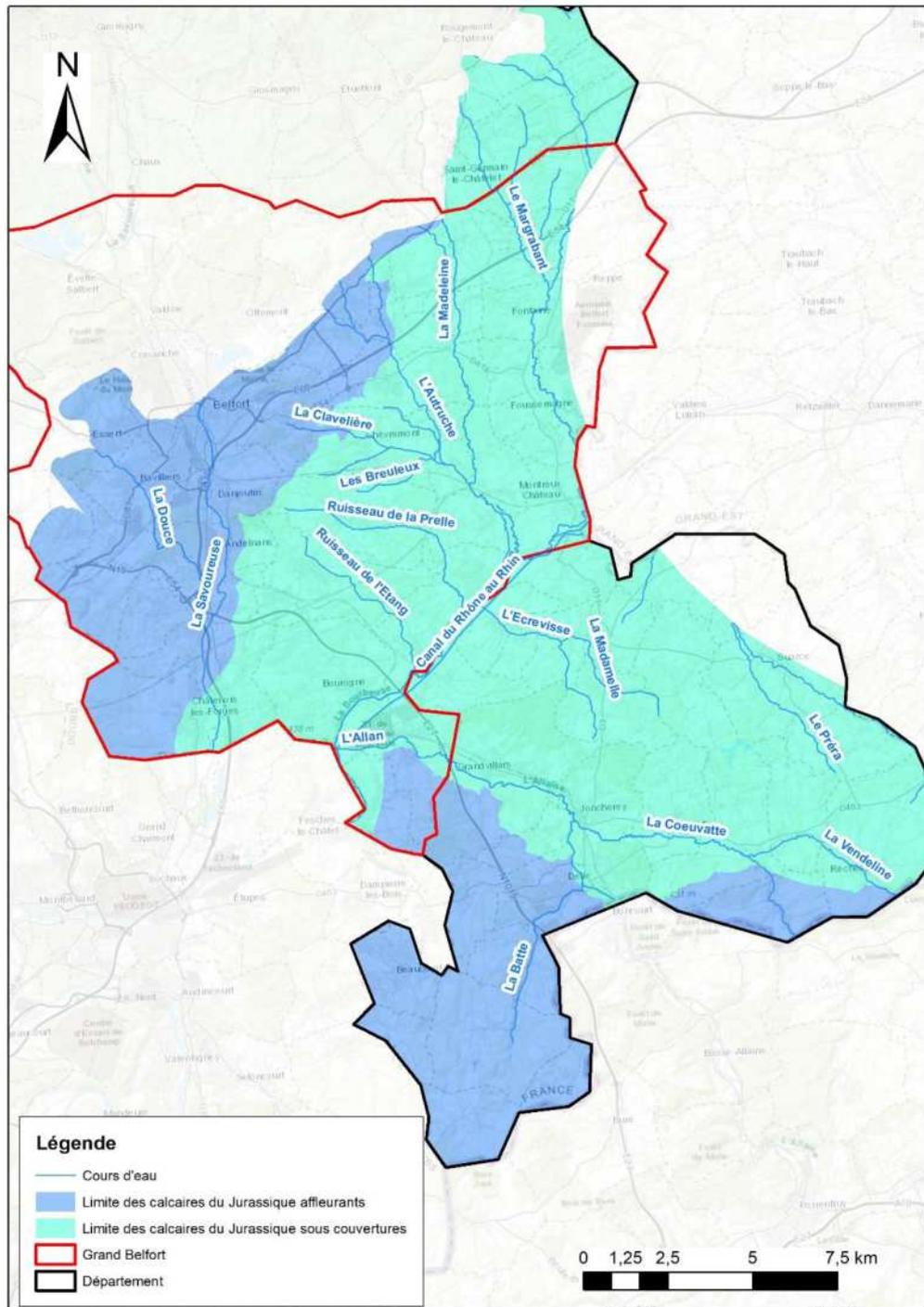


Figure 1 – Zone d'études : Calcaires du Jurassique affleurant et sous couverture

Les failles affectant les calcaires semblent jouer un rôle dans l'alimentation et le comportement des nappes d'eau souterraine circulant dans cet aquifère. Toutefois, ce rôle est difficile à apprécier.

La connaissance du contexte géologique est un facteur déterminant pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère. Une bonne connaissance de la géométrie des structures géologiques par l'étude de la nature des terrains et des structures géologiques qui les affectent, au droit de la zone d'étude permettra de préciser les conditions qui contrôlent la circulation des eaux au sein du massif rocheux afin de et de mieux appréhender le fonctionnement de cet aquifère.

## 3. Caractérisation géologique des calcaires du Jurassique

### 3.1. OBJECTIFS

L'objet de la caractérisation géologique est de rassembler l'ensemble des éléments permettant de décrire les propriétés géologiques des terrains du Jurassique à savoir :

- L'identification de la nature des terrains et leurs variations spatiales ;
- L'identification de l'altération en termes de structure et de géométrie ;
- La caractérisation des géométries des structures tectoniques ;
- La caractérisation des incertitudes.

Pour répondre à ces objectifs, l'étude géologique s'est basée sur les données disponibles et la bibliographie, une acquisition complémentaire a été nécessaire. L'ensemble des données rassemblées permettent de :

- Définir les structures géologiques (plis, failles) en terme de caractéristiques et de géométries (ponctuelles et en coupe) ;
- Identifier les altérations et le lien avec les structures (failles et lithologies) ;
- Préciser les incertitudes.

La campagne d'acquisition de données complémentaires a notamment permis la visite de 38 affleurements et la récolte de 238 mesures d'orientation de stratifications, de fractures et de failles.

Les cartes géologiques à 1/50 000 sont globalement de bonne qualité pour ce qui concerne les tracés des formations du Jurassique et de sa couverture Oligocène ainsi que des terrains quaternaires (formation lœssique, alluviale et de pente). Les données ponctuelles d'orientation ne permettent pas de réaliser des coupes facilement, les acquisitions complémentaires ont facilité leur dessin.

### 3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La cible géologique correspond aux terrains calcaires datés du Jurassique. Ces terrains sont présents dans la moitié Sud du territoire de la communauté de communes de Belfort. Sur la Figure 2, les terrains du Jurassique sont de couleur bleu. Les calcaires apparaissent au niveau de Belfort selon une direction NE-SW

La partie Est de la zone d'intérêt est masquée par des terrains plus récents de l'Oligocène et du Pliocène, pour l'essentiel de couleur jaune et orangé. De l'Ouest vers l'Est, la puissance de la couverture post-Jurassique s'accroît rapidement pour atteindre plusieurs centaines de mètres.

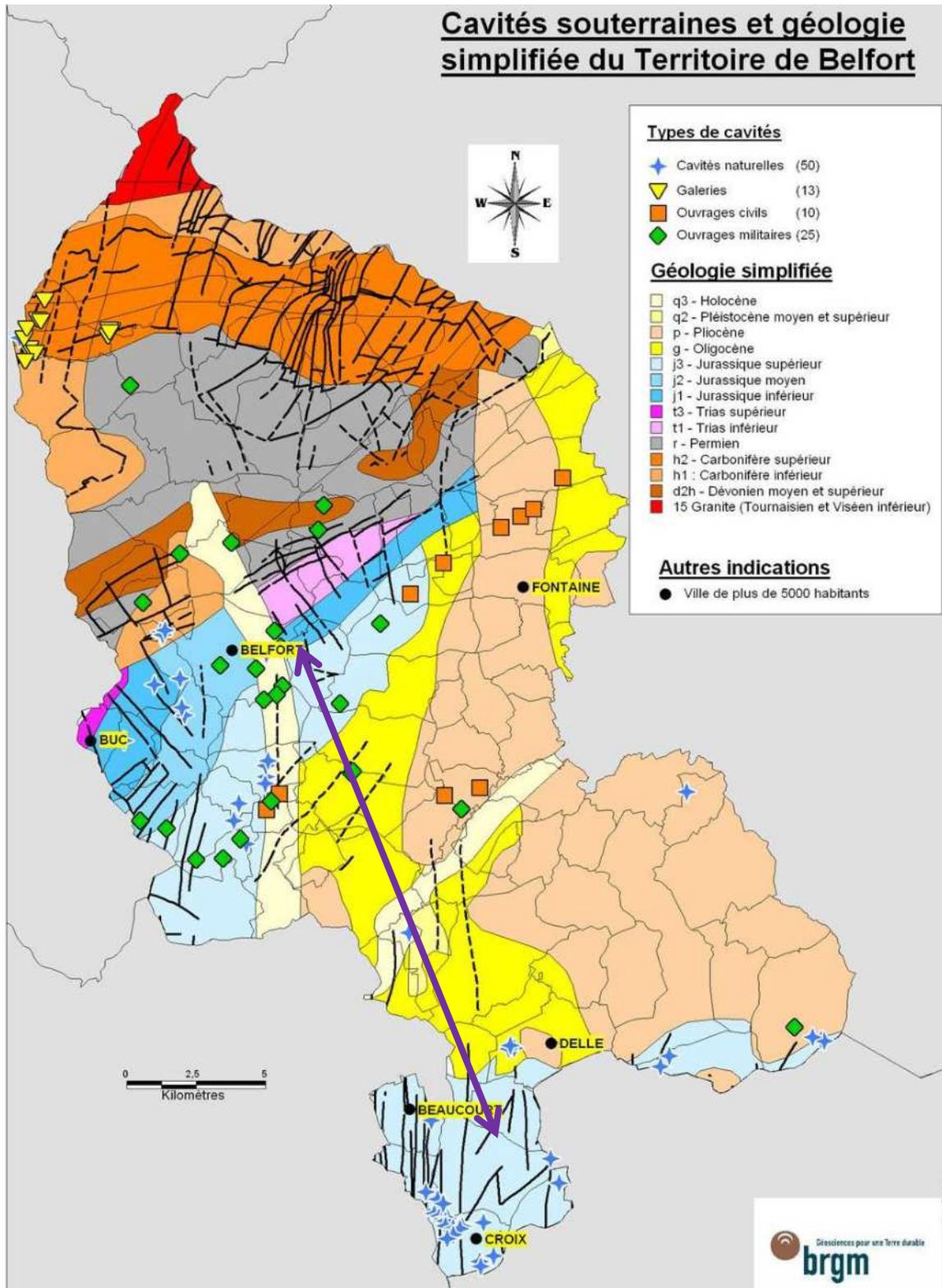


Figure 2 – Carte géologique simplifiée du territoire de Belfort issu de l'Inventaire départemental des cavités souterraines du Territoire de Belfort (BRGM, 2006) et localisation de la coupe géologique (Figure 5)

Les terrains aquifères potentiels ciblés appartiennent au Jurassique et plus particulièrement à la base du Jurassique supérieur (Argovo-Oxfordien, J4-5) et du Jurassique moyen (Bathonien –Bajocien, J1-J2). Les terrains du Jurassique sont situés sur la bordure Sud du Massif des Vosges et au Nord du front alpin où ils forment un vaste synclinal à fond plat. Dans le secteur

couvert par le territoire de la communauté de communes du grand Belfort, les terrains du Jurassique reposent en concordance sur les séries du Trias. Dans la partie Sud, les terrains sont subhorizontaux, ils se redressent au nord selon une bande NNE-SSW pour laisser apparaître les terrains plus anciens du Paléozoïque.

Au Tertiaire, une extension affecte l'ensemble de la zone depuis le fossé Rhénan au bassin de la Bresse. Sur le territoire de la communauté de communes, l'extension se marque par la présence d'un réseau de failles normales essentiellement de direction Nord-Sud et la mise en place de dépôts tertiaires dont l'épaisseur s'accroît rapidement d'Ouest en Est. La séquence s'achève avec les dépôts limono-sableux du Sundgau. **Les dépôts du Tertiaire masquent les terrains du Jurassique et ne permettent pas de définir leur géométrie sur l'ensemble de la zone d'étude.** Le Jurassique affleure sur moins de 1/3 de la surface où il est présent. Selon les secteurs, les terrains jurassiques sont plus ou moins fortement affectés par les déformations associées à cette structuration extensive. **Seules les zones où affleurent les terrains du Jurassique permettent d'identifier les effets de cette structuration du fait de leur nature calcaire massive dominante qui la rend cassante.** Les terrains du Tertiaire sont également affectés par cette structuration, toutefois la nature des terrains plus argileux et conglomératiques ne facilite en rien leur identification.

L'emprise de la zone d'étude est à cheval sur 3 feuilles géologiques à 1/50 000 (carte géologique de Belfort, carte géologique de Delle, au Sud et la carte géologique de Montbéliard, au Sud-Ouest) à laquelle s'ajoute la carte de Lure qui permet de définir les géométries des structures dans la partie Sud-Ouest (Figure 2) La carte harmonisée n'a pas été utilisée du fait des trop grandes simplifications et des suppressions de caissons réalisées dans la zone. Ces simplifications concernent notamment le Jurassique et les terrains altérés qui sont représentés de manière hétérogène entre les cartes recouvertes par la zone d'étude.

### 3.3. CARACTERISATION DE LA LITHOLOGIE

Dans le tableau ci-dessous sont rassemblés les éléments sur les épaisseurs des séries post-paléozoïques présentes dans l'emprise du projet issues des notices des cartes géologiques. Un détail pour chaque étage est fourni par carte. Sur la partie droite du tableau, un regroupement des étages est effectué en tenant compte de la répartition géographique et de la nature des terrains. Une valeur moyenne indicative de l'épaisseur des séries est fournie pour chaque groupe.

Ces éléments seront utilisés pour la réalisation des coupes géologiques. Elles seront construites avec ces valeurs moyennes. Les terrains post-jurassiques seront rassemblés au sein du caisson rose (e-g). Du fait de sa présence au sommet de la pile sédimentaire, son épaisseur est réduite car une partie des terrains est érodée.

Belfort			Lure			Delle			Montbéliard			synthèse	
étage	épaisseur (m)	épaisseur (m)	étage	épaisseur (m)	épaisseur (m)	étage	épaisseur (m)	épaisseur (m)	étage	épaisseur (m)	épaisseur (m)	étage	épaisseur (m)
Stampien - g2	?												
Oligocène - g1	>100					g1		45				e-g	
Eocène - e	?												
Kimméridgien - J8	15	120	J6	125	40	J8 - J9	170	65	J8	209	94	J6-J9	150
Séquanien - J7	105		J5C - J5M - J5CI		85	J7		105	J7		115		
Rauracien - J6	50		J5P		40	J6		60	J6		50		
Argovien - J5	20	50	J5B	265	50	J5	170	40	J5	160	70	J4-J5	160
Oxfordien - J4	40		J5		175	J4		70	J4		40		
Callovien - J3	10		J4-5 - J4		45	J3a	?	?	J3		30		
Bathonien - J2	16	136	J3B - M - J3B	210	45	J2	193	45	J2a	165	45	J1-J3	175
Bajocien - J1b	40		J2M - O		40	J1b		40	J1b		40		
Bajocien - J1a	70		J2V - J2C		80	J1a		108	J1a		50		
Aalénien - L6	80		J1		10	L			LJ		3		
Toarcien - L5	20	142	L4 - L4S	160	90				L7-8	185	120	L	175
Lias - L4	24		L2-3 - L3		40				L5-6		42		
Lias - L3-2	13		L1-2 - L2		30				L1-4		20		
Lias - L1	5		T7		20			160	T10		20		
Trias - T9-7	155		T5M - T5-6 - T6M	390	160	T	?	?	T9 - T8 - T9	80	>60	T	300
Trias - T6-5	25	270	T3-4		70								
Trias - T4	70		T3		70								
Trias - T3	10		T3GS		20								
Trias - T2 - T1	10		T1-2		50								
Permien	400	400			1000								

Tableau 1 - Tableau synthétique des épaisseurs des séries du Trias et du Jurassique issues des cartes géologiques dans la zone d'étude

La base de la série du Trias est dominée par les faciès détritiques grossiers et évolue progressivement vers des faciès argileux et carbonatés. Le sommet du Trias contient des niveaux salifères (gypse et sel à gemme). Le Jurassique est essentiellement carbonaté avec des passées argileuses plus ou moins épaisses (Toarcien, Oxfordien inférieur) de moins en moins nombreuses. Dans la colonne stratigraphique simplifiée fournie par Rosenthal (2007) (Figure 3), seules les grandes variations lithologiques sont représentées. Dans le détail, les niveaux argileux et marneux inter-stratifiés entre les séries carbonatées sont nombreux. Ces niveaux argileux forment des barrières à la circulation des eaux souterraines. Pour plus de détails sur la nature des roches, il faudra se reporter aux cartes géologiques et aux notices qui les accompagnent (carte géologique de Belfort, de Delle, de Montbéliard, et de Lure à 1/50°000).

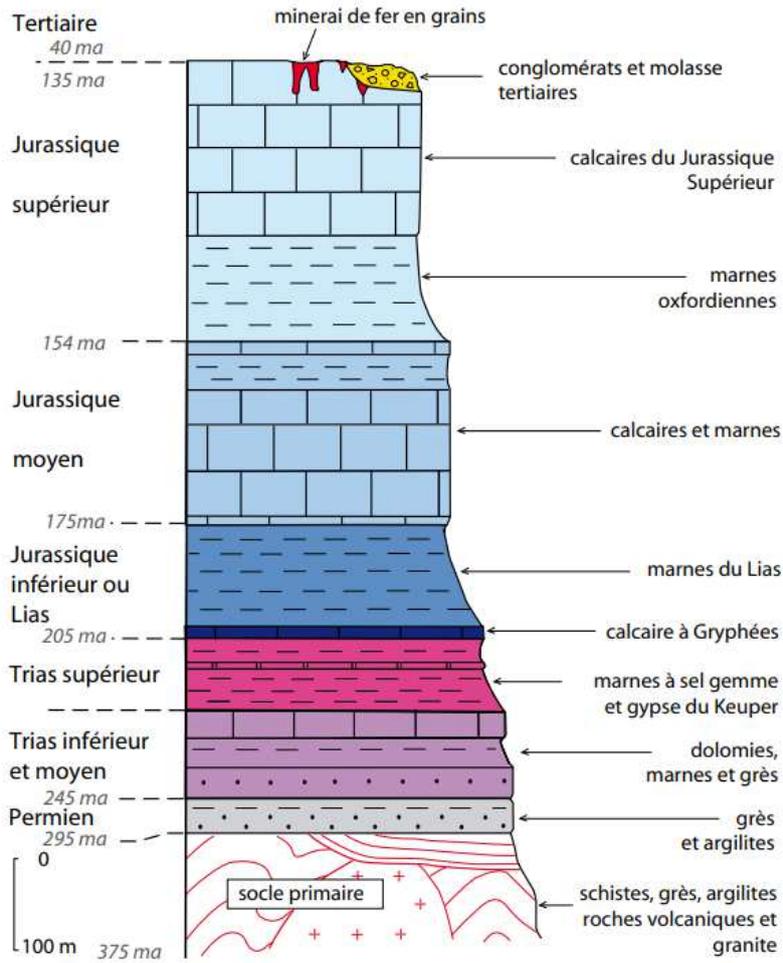


Figure 3 - Colonne stratigraphique simplifiée des terrains du Territoire de Belfort (P. Rosenthal, 2007)

### 3.4. STRUCTURES GEOLOGIQUES

#### 3.4.1. Géométrie des séries

A grande échelle, les séries du Trias et du Jurassique décrivent un monoclin dont la partie nord se redresse fortement dans les environs de Belfort (Figure 4). Les mesures de stratification réalisées lors de la campagne de terrain à l'automne 2021 montrent un pendage moyen subhorizontal pouvant présenter des variations de pendage ne dépassant pas une vingtaine de degrés. Au nord, les pendages dans la bande de Belfort se redressent pour localement se verticaliser selon une direction NNE-SSW.

La coupe géologique en Figure 5 permet de représenter de manière simplifiée la géométrie des couches géologiques depuis Belfort du Nord vers le sud. Cette coupe est réalisée à l'échelle 1/1 et ne permet pas de représenter les objets géologiques de petite dimension. Seules les principales failles sont représentées et les formations géologiques sont simplifiées en s'appuyant sur les épaisseurs fournies dans le Tableau 1. Les formations d'altération et alluviales ne sont pas représentées. **A grande échelle, les séries décrivent une vaste synforme à fond plat.** Dans le détail, mise à part les couches qui se redressent dans la partie septentrionale, la dispersion des plans affecte principalement la zone méridionale. Cette dispersion est associée à la présence de failles et de zones basculées.

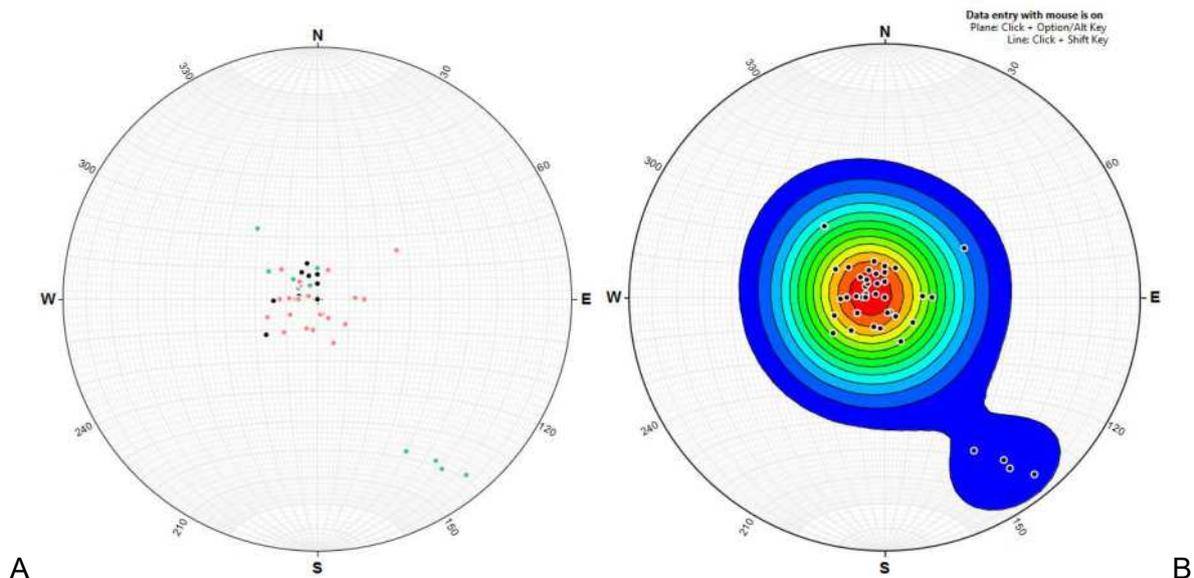


Figure 4 - Représentations stéréographiques des données de stratification acquises au cours de la campagne de terrain de septembre 2021. A/ calcul des pôles de stratification (points rouge : zone méridionale, points noirs : zone centrale, points vert : zone septentrionale), B/ représentation statistique des pôles de stratification)

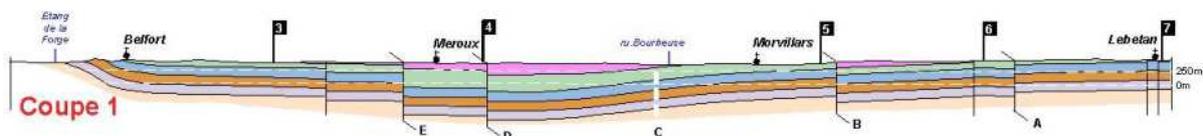


Figure 5 - Coupe géologique NNW-SSE (n°1), localisation Figure 2

### 3.4.2. Structures tectoniques

Sur les cartes géologiques à 1/50 000 (Figure 6), les terrains du Trias et du Jurassique sont affectés par de nombreuses failles essentiellement de direction N-S et NE-SW. Les terrains sus-jacents, Eocène et Oligocène sont également affectés mais dans une moindre mesure. De même direction que celles qui affectent les séries sous-jacentes, les failles sont présentes uniquement sur la bordure Est de la zone où affleurent ces terrains.

Les failles sont rectilignes et traversent les reliefs sur plusieurs kilomètres, elles sont donc subverticales. Les déplacements relatifs sur les plans de failles cartographiés sont pluri métriques. **L'ensemble du massif est affecté de manière hétérogène, les failles formant des couloirs de plusieurs kilomètres de large.**

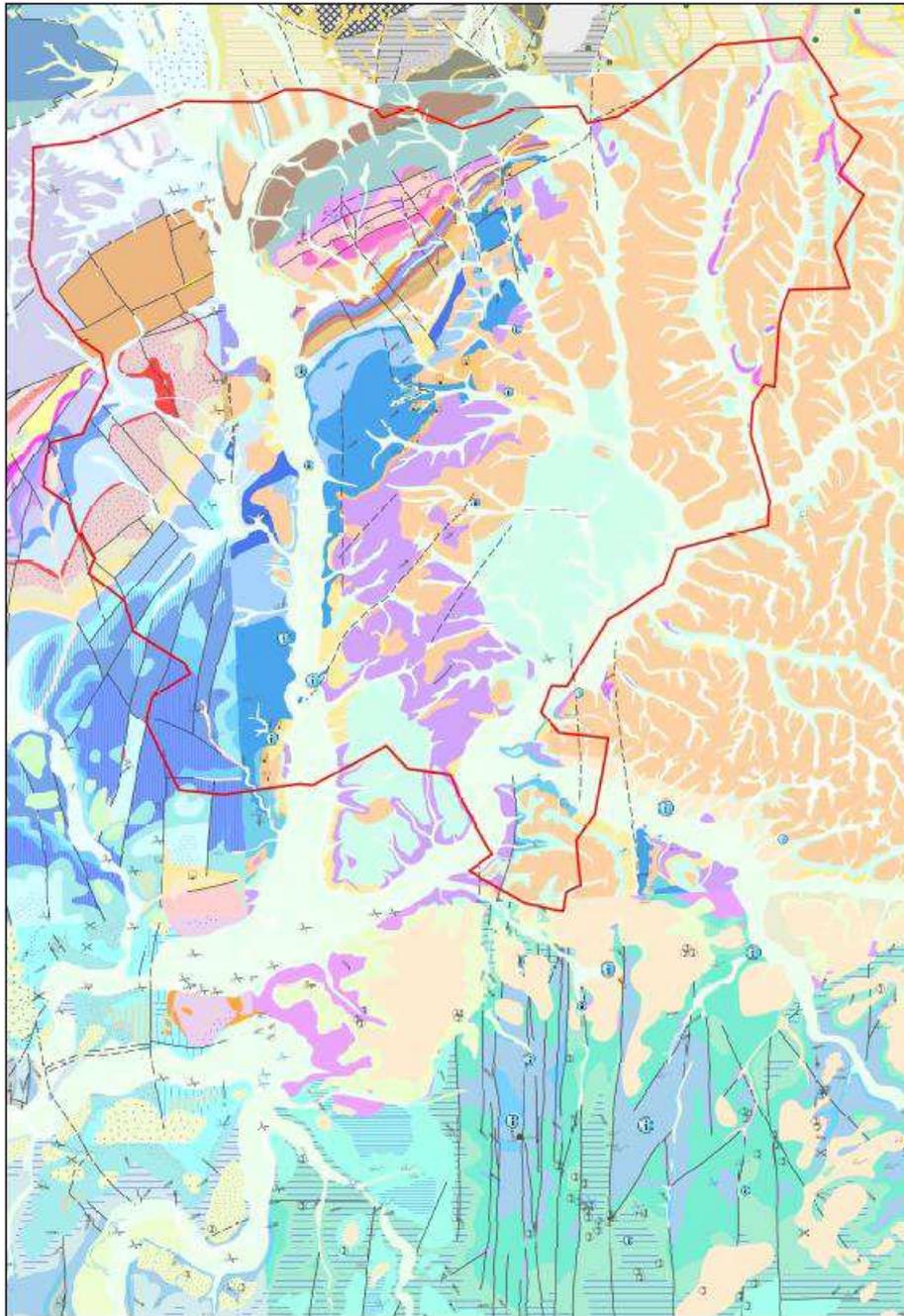


Figure 6 - Carte géologique à 1/50000 de la zone d'étude montrant la présence de réseaux de failles affectant les terrains jurassiques (bleu et vert) et la partie inférieure des terrains secondaires (rose et orange)

Les investigations de terrain permettent d'apporter des précisions sur la nature et la géométrie des structures tectoniques. La quasi-totalité des affleurements visités présentent des structures tectoniques cassantes. Sur un peu moins de 40 affleurements, ce sont plus de 192 failles qui ont été mesurées. Une représentation stéréographique de l'ensemble des failles permet de mettre en évidence que la majeure partie de celles-ci sont de direction N-S (Figure 7). Une direction secondaire apparaît de direction WNW-ESE. Les failles présentent des pendages élevés, plus de 90 % des plans mesurés sont de pendages supérieur à 80°.

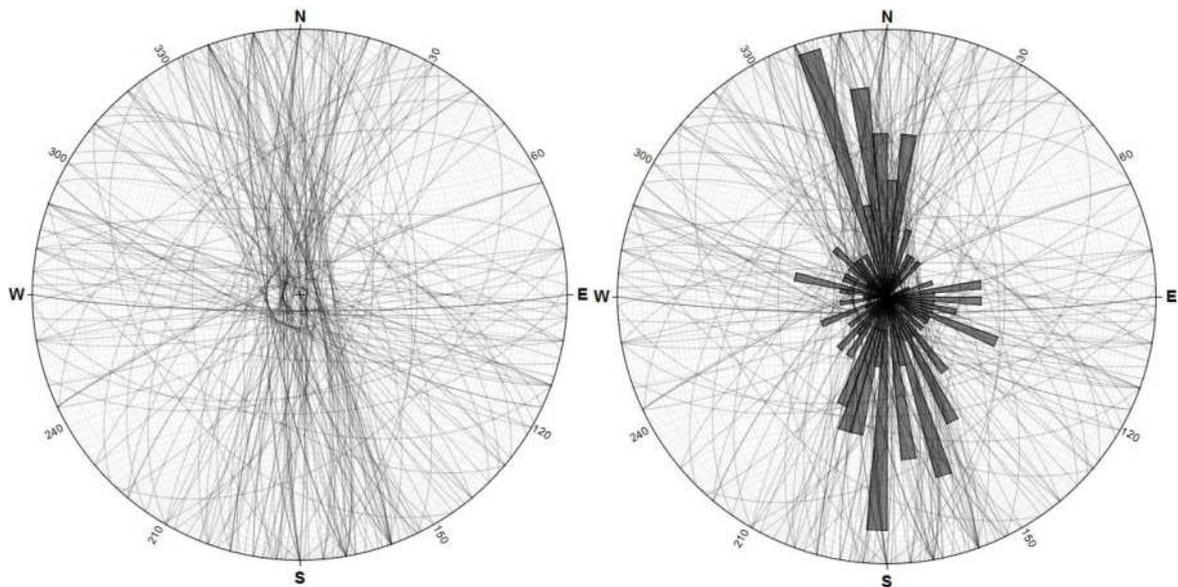


Figure 7 - Représentation stéréographique des failles de l'ensemble des affleurements

A l'affleurement, il est extrêmement difficile de définir la cinématique sur les plans de failles (= étude des mouvements des failles impactant la roche) du fait de la présence d'altération. En effet les zones de failles sont plus fortement altérées que les roches encaissantes. Cette altération masque et/ou détériore les marqueurs structuraux qui permettraient d'identifier des stries, marches d'escalier, cristallisations ..., susceptibles de caractériser les sens de déplacements sur les plans de failles. Toutefois quelques affleurements apportent de précieuses informations renseignant le contexte de mise en place de ces failles.

Le premier affleurement est situé au Nord-Ouest, c'est l'affleurement FL0026 (carrière du lieu-dit la côte de Froy). Dans cette grande carrière exploitant les calcaires du Bajocien supérieur et du Bathonien, les séries sont monoclinales avec une pente moyenne de 10° vers le SE. Il n'y a pas de faille majeure observable dans cette carrière, toutefois des réseaux de failles à faible déplacement affectent les roches. Au centre de la carrière, le décapage des roches permet de voir la surface d'un banc de calcaire affecté par une série de failles. La vue dessus de ces failles permet de caractériser les déplacements en 3 dimensions (Figure 8). On y voit plusieurs failles connectées, les directions principales sont N340-350, les directions secondaires E-W. Les failles sont toutes sub-verticales. Sur les plans de failles N-S, les déplacements sont au maximum de quelques centimètres et s'amortissent à leurs extrémités. De petites failles E-W ne montrent pas de déplacement vertical, seul un très léger décrochement senestre se devine. Ces déformations dessinent un réseau de failles en relai et de failles conjuguées suggérant un contexte décrochant transtensif (qualification d'une roche massive qui subit à la fois une contrainte extensive et une contrainte de décrochement) de direction N-S.



Figure 8 – Localisation de l’affleurement FLA0026. Failles normales en relai affectant un banc de calcaire dans la carrière du lieu-dit la côte de Froy à l’ouest de Banvillars et représentation stéréographique des failles mesurées.

Le second affleurement correspond également à une carrière et est situé au Sud de la zone d’étude, au Sud-Ouest de Saint-Dizier-l’Evêque, au niveau de la carrière de Ragie Bergeraie

et correspond au point d'affleurement FLA0037. Cette carrière exploite les calcaires du Kimméridgien inférieur. Les séries y sont inclinées vers l'Est d'environ une quinzaine de degrés. Dans le détail, les pentes varient entre 10 et 20° mais toujours vers l'Est (Figure 9). En carte, la carrière se situe dans un compartiment entre deux failles majeures et il n'y a aucune faille qui traverse la carrière. Dans la réalité, plusieurs failles sont présentes et affectent les calcaires. Les déplacements sur les plans de faille sont pluri-centimétriques à métriques, de ce fait, elles ne présentent pas un décalage suffisamment important pour être cartographiquement représentées. Afin de respecter les conditions de sécurité en carrière, les observations des failles ont été effectuées à distance. Il n'a donc pas été possible d'observer les plans de failles et caractériser les objets structuraux susceptibles d'exister (stries, cristallisations, ...) et par conséquent de définir la cinématique du plan de faille. Les directions des failles mesurées sont reportées dans un stéréogramme permettant d'illustrer les trois directions préférentielles (Figure 9). Les deux premières sont N-S et NE-SW, ce sont des failles subverticales et correspondant aux failles régionales visibles en carte (Figure 6). La dernière famille est de direction NW-SE avec des failles présentant des pendages de l'ordre d'une cinquantaine de degrés, vers le NE ou le SW. Les observations en carrière permettent de définir les sens de déplacement relatif entre les compartiments situés de part et d'autre des failles. En effet, des décalages apparents, ainsi que la flexuration des bancs au toit de la faille indique clairement des mouvements normaux sur les plans de failles. A titre d'exemple, sur le front Nord-Ouest, plusieurs failles sont présentes, l'accident principal est penté vers le SW d'environ 60° (Figure 10). Les calcaires au toit de la faille sont déformés pour dessiner un petit synclinal au sommet du front de taille, cela correspond à la flexuration des bancs accompagnant un mouvement d'affaissement du compartiment SW. Ceci est confirmé par le décalage apparent normal des bancs calcaires et marneux de l'ordre de 1 à 1.5 m.

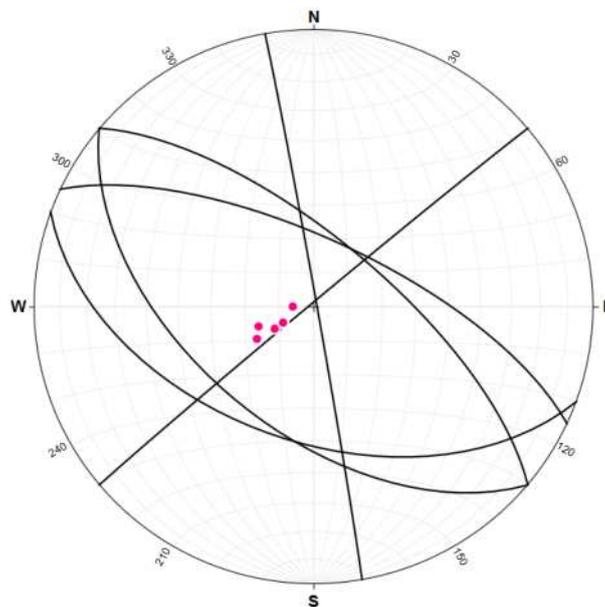


Figure 9 - Représentation stéréographique des plans de faille mesurés (traits noirs) et des pôles des plans de stratification (point rose) dans la carrière de Ragje Bergeraie (FLA0037)

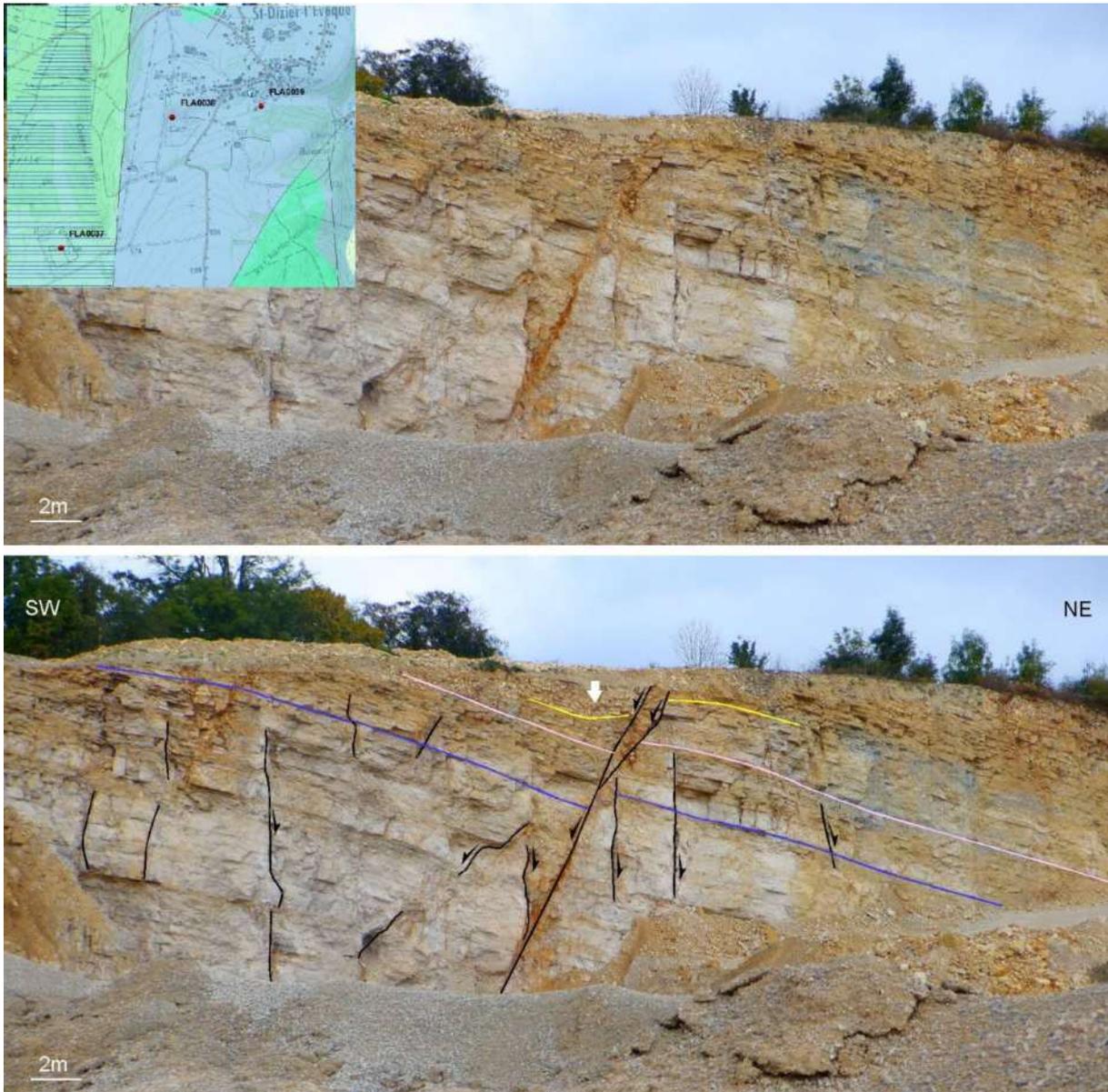


Figure 10 – Localisation de l’affleurement FLA0038. Front de taille sud affecté par une série de failles normales de direction N-S avec flexuration des bancs au toit de la faille principale accompagné par un décalage des niveaux repères (rose, bleu et jaune) de l’ordre du mètre.

A l’échelle de la zone d’étude, les directions de fracturation présentent des variations spatiales visibles sur la carte géologique. Au sein des failles mesurées sur le terrain, les représentations stéréographiques permettent de rendre compte de ces variations. Sur la carte sont définies 5 zones avec le stéréogramme correspondant (Figure 11). Si **globalement la direction principale N-S est identifiée de manière systématique, on y voit nettement des différences par secteurs**. La forte proportion de failles mesurées dans le compartiment Sud est cohérente avec la zone faillée cartographiée (secteur A). Plus au Nord, on peut regrouper les zones D et E qui présentent toutes les deux des directions dominantes NNW-SSE accompagnées par des directions NE-SW à E-W. On peut également regrouper les zones B et C car elles présentent des directions dominantes cohérentes, à savoir NNE-SSW accompagnées par des directions NW-SE.

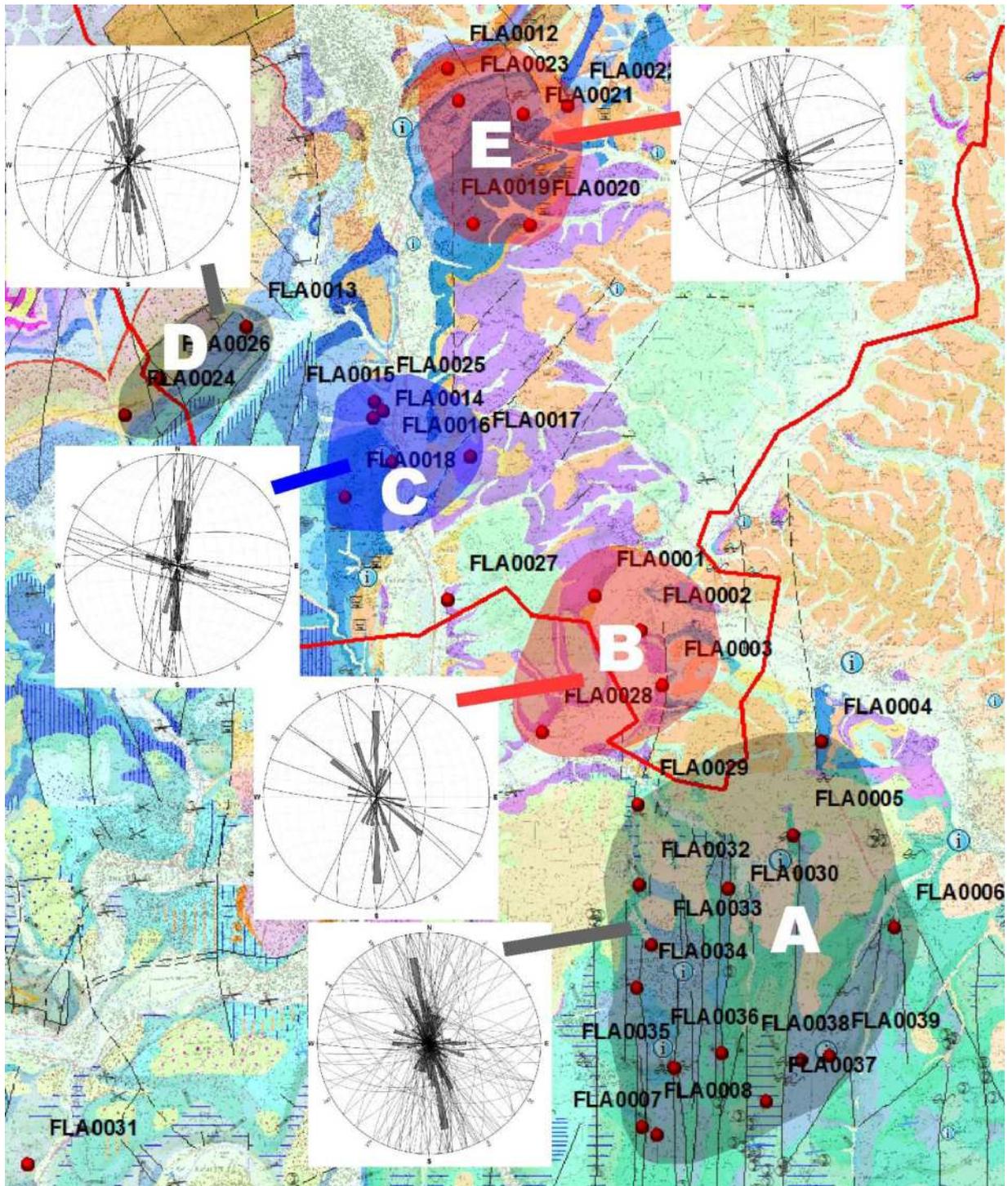


Figure 11 - Carte géologique à 1/50 000 avec représentations stéréographiques des failles par secteurs

Sur la carte en Figure 12 sont localisées les principales failles structurant la zone d'étude. Les failles sont étiquetées afin d'être localisées sur les coupes géologiques réalisées dans le chapitre suivant. Certains accidents, non présents sur les cartes géologiques, mais déduits du travail de terrain, sont représentés en pointillés.

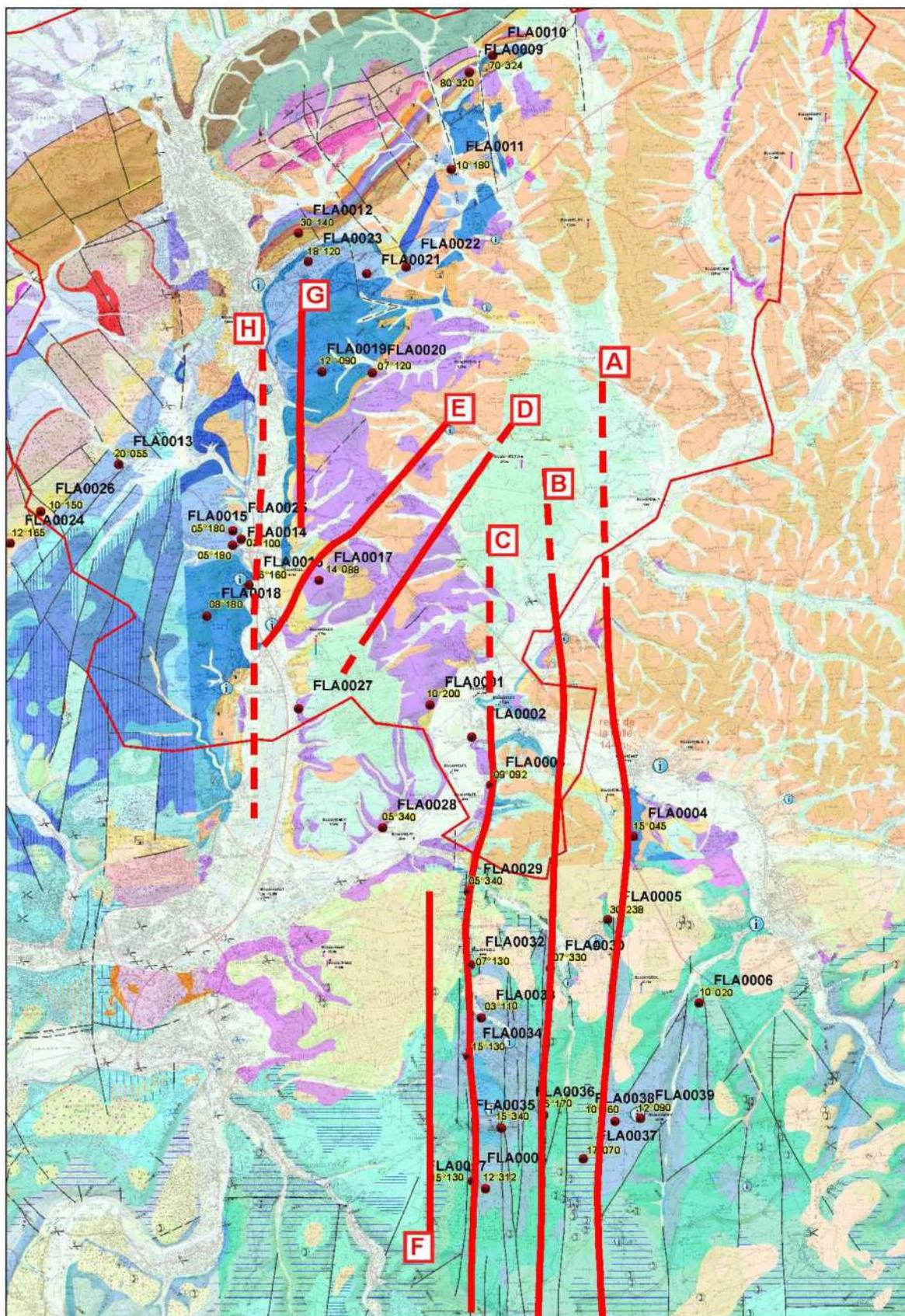


Figure 12 - Carte de localisation des principales failles dans le secteur d'étude, les lettres sur chaque failles sont reportées sur les coupes géologiques

### 3.4.3. Eléments à retenir

Les éléments à retenir concernant les structures tectoniques cassantes sont :

- Une bonne représentation des failles majeures sur les cartes à 1/50 000. Notamment dans la partie Ouest de la zone d'étude ;
- L'absence de failles cartographiées dans les terrains post-jurassiques hormis dans la partie orientale de la zone d'affleurement de ces terrains. Des failles majeures peuvent exister en profondeur et sont masquées par les terrains récents et/ou difficilement identifiables du fait de la qualité des affleurements et de la nature des terrains ;
- Une hétérogénéité dans la répartition des failles à l'intérieur de la zone d'étude. Certains secteurs étant fortement affectés, d'autres nettement moins.
- La domination des failles de directions N-S dans l'orientation des structures tectoniques affectant les séries du Jurassique.
- Une hétérogénéité dans les directions des failles selon trois domaines, depuis le Nord vers le Sud sont présents (A, B-C et D-E, voir Figure 11)
- En complément des failles majeures représentées sur les cartes géologiques, de nombreuses failles affectent les terrains Jurassique. Elles ne sont pas cartographiables car les décalages sur les plans de failles sont mineurs (centimétriques à métriques).

### 3.5. COUPES GEOLOGIQUES

Afin de définir la géométrie des structures géologiques, sept coupes géologiques ont été réalisées. Les coupes sont situées dans la partie occidentale de la zone d'étude. Elles sont bâties à partir des cartes géologiques, des observations réalisées au cours de la campagne de terrain réalisée à l'automne 2021 ainsi que des forages de la BSS<sup>1</sup>.

Dans la partie Est, le Jurassique devrait être présent à de grandes profondeurs, la puissante série éocène et oligocène masquant totalement les structures. Il n'est par conséquent pas possible d'y réaliser de coupes sans acquisitions de données complémentaires. Une étude publiée par Edel et al., en 2002, permet d'apporter des éléments de lecture concernant cette couverture. Une carte des isobathes de la base du Tertiaire est proposée. Les isobathes sont récupérées et reportées sur la carte géologique de la zone d'étude. La limite Sud est approximative montrant que cette carte est réalisée à une très grande échelle et donc est approximative à l'échelle du 1/50 000 (Figure 13). Deux points majeurs sont à retenir :

- La limite Nord-Ouest est marquée par des variations de puissance très rapides suggérant la présence de failles majeures NNE-SSW et N-S ;
- La partie Ouest montre un accroissement de l'épaisseur relativement faible jusqu'à ce qu'elle atteigne 250 mètres. Puis, vers le Nord-Est, la puissance s'accroît rapidement.

Les traits des coupes réalisées sont localisées en Figure 14, les coupes en Figure 15. Il y a deux coupes NNW-SSE et 5 coupes transversales (ENE-WSW). Les tracés des différentes coupes s'intersectent afin de pouvoir appréhender la géométrie de l'ensemble. Les coupes correspondent à :

- Coupe 1 du lac des forges à Belfort à Lebetain ;
- Coupe 2 du NW de Banvillars au SE de Beaucourt ;
- Coupe 3 transversale de Danjoutin ;
- Coupe 4 transversale de Bermont ;
- Coupe 5 transversale de Méziré ;
- Coupe 6 transversale de Dampierre les Bois ;
- Coupe 7 transversale de Beaucourt.

---

<sup>1</sup> BSS : Banque de données du Sous-Sol

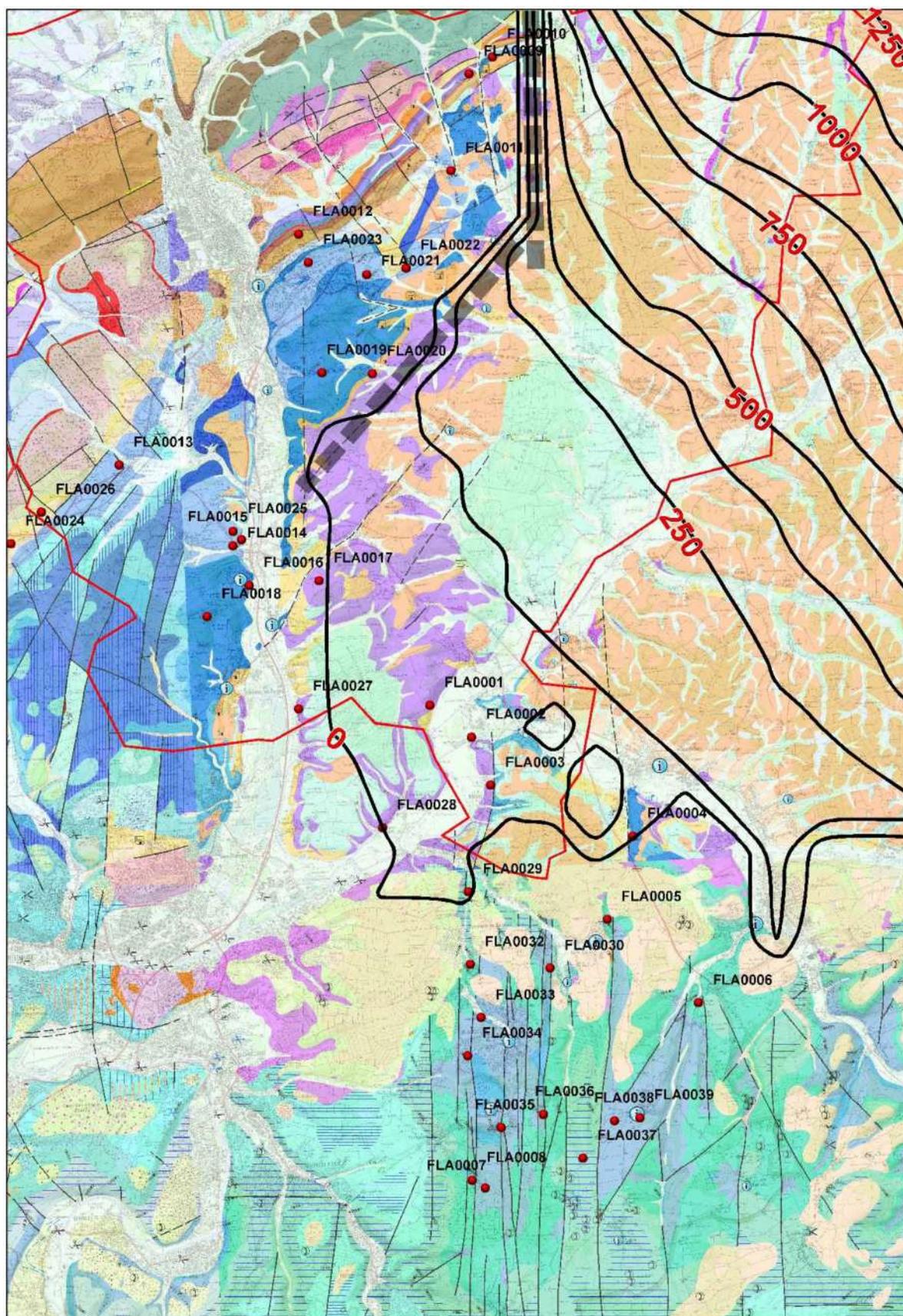


Figure 13 - Carte géologique avec report des isobathes issus du travail d'Edel 2002. En pointillés gris, zone de discontinuités majeures où la puissance des séries varie rapidement et fortement.

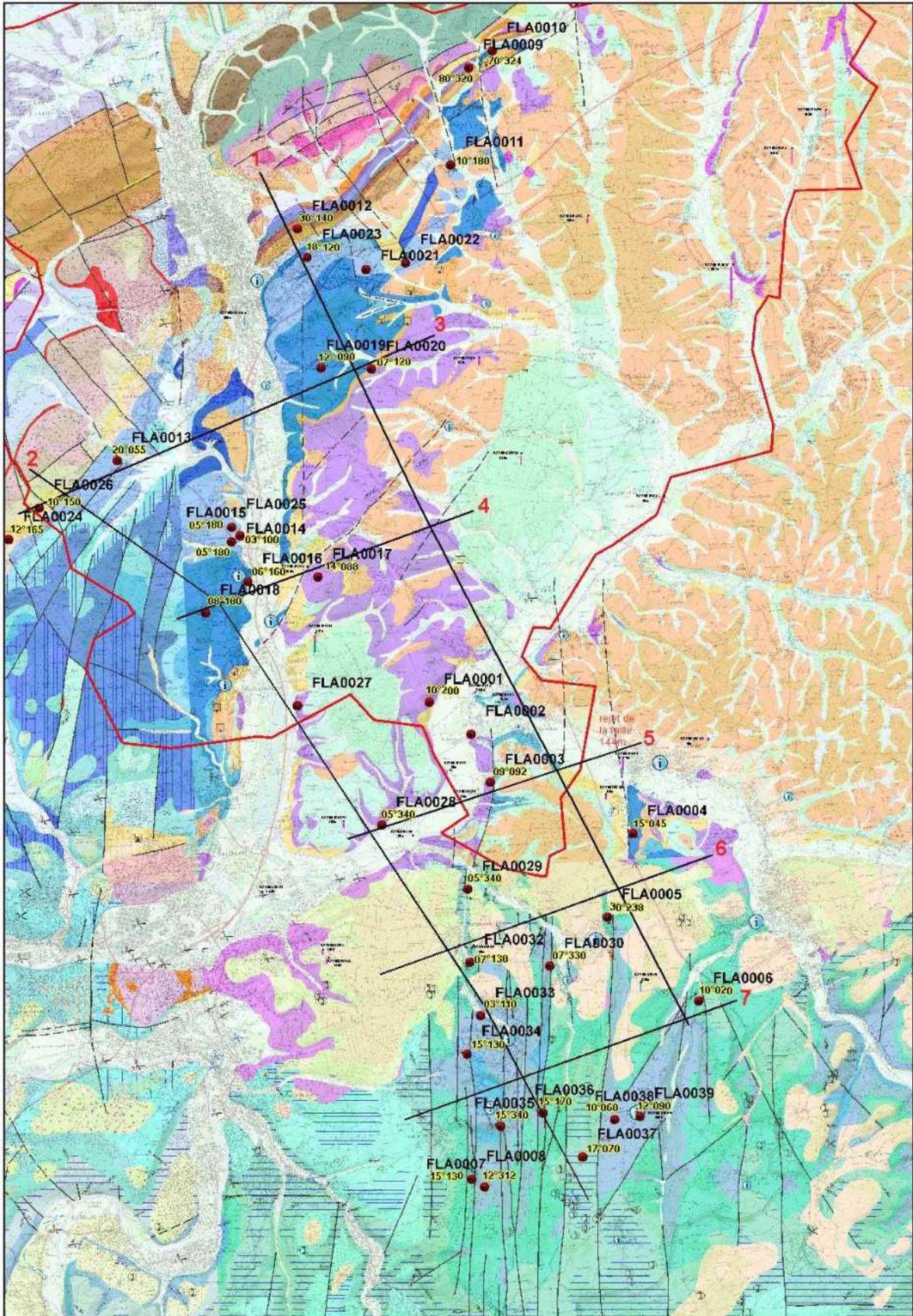


Figure 14 - Carte géologique à 1/50 000, localisation des points d'affleurements (point rouge, numéro FLA00XX), mesures de stratification (en jaune), localisation des forages et localisation des coupes géologiques. Les forages BSS utilisés sont également renseignés.

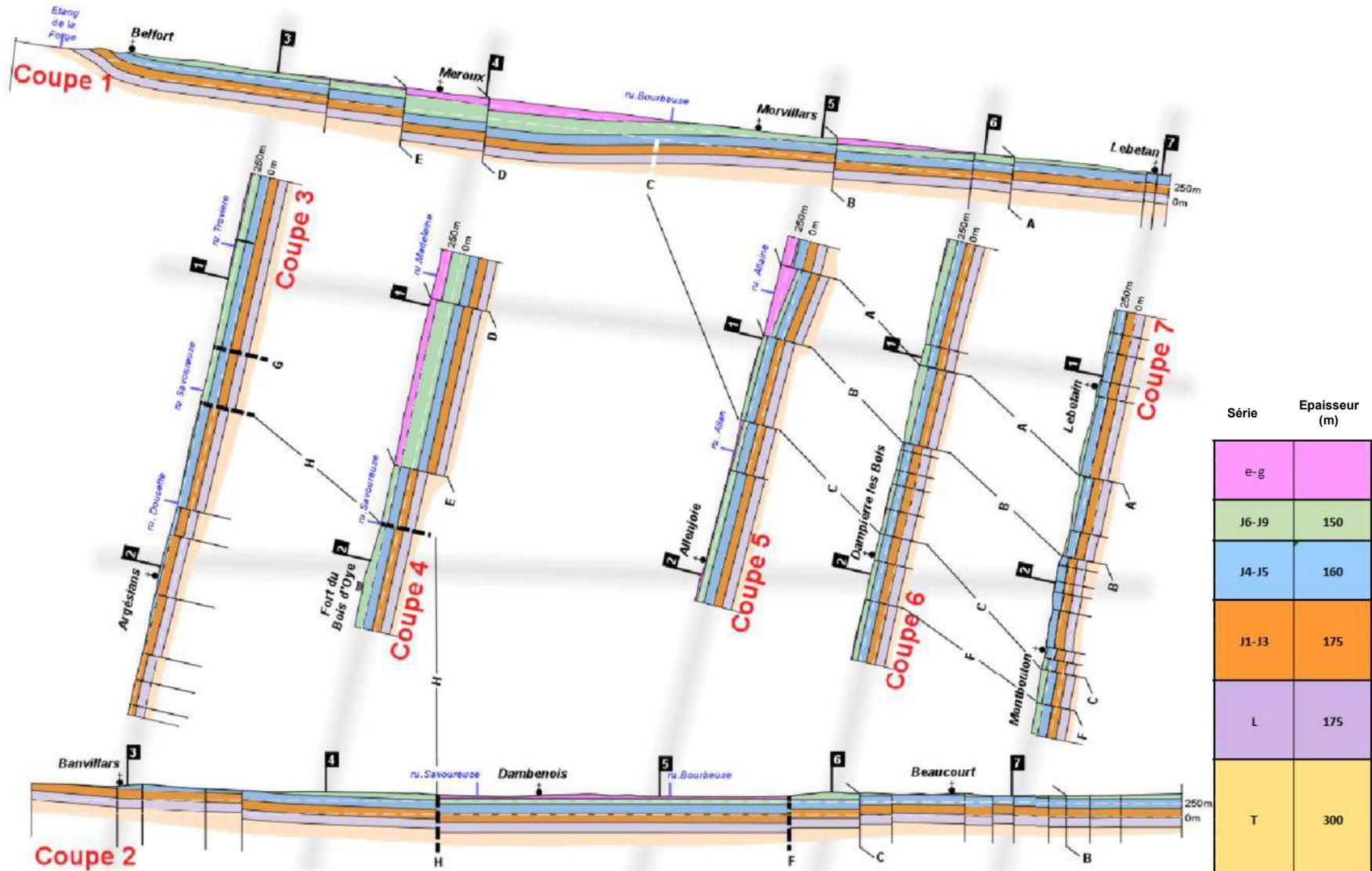


Figure 15 - Coupes géologiques, voir la localisation sur la carte géologique de la Figure 4 avec les niveaux repères 0 et 250 m en tiret blanc fin, les symboles drapeaux représentent les intersections entre deux coupes, les failles en trait noir et les failles supposées en tirets épais blanc

Sur les coupes on retrouve la pile sédimentaire simplifiée telle qu'établie dans le Tableau 1. Les symboles de drapeaux noirs avec des chiffres correspondent aux intersections entre les coupes géologiques, le chiffre correspondant au numéro de la coupe. Les lettres de A à H correspondent aux failles principales issues de la carte (cf. Figure 14). Quelques indications de localisation (ruisseau et village) sont fournies pour faciliter le positionnement. Sur chaque coupe ont été tracés comme niveau repère le 0 NGF ainsi que le niveau +250m qui figurent en traits discontinus blancs.

Les failles clairement identifiées sur les cartes géologiques sont tracées en plein (failles A à E). Lorsqu'il n'y a pas de faille représentée en carte mais que les données imposent des décalages, sont alors dessinées des failles en trait épais et pointillés, c'est le cas des failles F, G et H.

Le parti pris pour dessiner les coupes géologiques a été de faire en sorte de dessiner les séries les plus monoclinales et avec les pendages le plus faible possible, en cohérence avec ceux observés sur le terrain.

Sur la coupe 5, entre les failles A et B, les séries ont été dessinées avec un pendage vers l'Est d'une dizaine de degrés. Sur la coupe 1, c'est également le cas mais cette fois-ci vers le Nord. Cette géométrie indique que dans ce secteur, le bloc coincé entre les failles A et B soit basculé vers le NW. Cette représentation est basée sur les données disponibles, il est possible que ce secteur soit plus segmenté et que les géométries soient plus complexes.

Sur la coupe 1, entre les failles D et B, les séries sont inclinées vers le nord. Au niveau du ruisseau de la Bourbeuse, la faille C est tracée en pointillé blanc. Il a été choisi de ne pas faire de décalages dans les séries associées à cette faille qui n'a pas été caractérisée en carte. Toutefois, il est possible que celle-ci affecte les terrains du Jurassique et modifie la géométrie des couches dans ce secteur. Des investigations complémentaires doivent être effectuées pour affiner les structures.

### **3.6. ALTERATION ET KARST**

Sur les cartes géologiques, il existe des caissons indiquant la présence de terrains résultant de l'altération météorique. Sur les cartes de Delle, Lure et Belfort il n'y a pas d'information relatant leur présence, par contre sur la carte de Montbelliard est notée la présence d'argiles résiduelles correspondant à l'altération des carbonates. Les terrains affectés par cette altération correspondent aux terrains du Jurassique, de l'Eocène et de l'Oligocène. Il ne semble pas y avoir plusieurs phases d'altération, au vu des terrains affectés, elle se serait mise en place il y a moins de 23 Ma.

Au cours des levés de terrain, les phénomènes résultant de processus d'altération ont fait l'objet d'une attention particulière. Plusieurs points caractéristiques sont observables sur plusieurs sites, suggérant un phénomène global. Les éléments caractéristiques de l'altération seront décrits dans les chapitres suivants à l'aide des observations de terrain.

### 3.6.1. Sensibilité à la karstification

Les phénomènes d'altération et de dissolution entraînant la formation de karst affectent l'ensemble des niveaux carbonatés. Au sein de la pile sédimentaire, trois grands groupes sont identifiables :

- Jurassique moyen et supérieur essentiellement calcaire ;
- Lias caractérisé par des niveaux carbonatés intercalés de nombreux niveaux argileux d'épaisseur variable ;
- Séries antérieures au Jurassique essentiellement détritiques et par conséquent non affectées par ces phénomènes.

Si en surface tous les niveaux calcaires sont facilement altérables et permettent le développement d'une karstification, en profondeur ils ne réagissent pas de la même manière. Les niveaux du Jurassique moyen et supérieur montrent une certaine homogénéité face au phénomène d'altération. **C'est essentiellement la structuration avec la présence de failles et de couches inclinées qui semble générer une hétérogénéité.** Pour le Lias, la présence de niveaux argileux et marneux inter-stratifiés plus ou moins épais va constituer des barrières à l'écoulement des eaux en profondeur. De ce fait, les niveaux du Lias sont bien moins sensibles aux phénomènes de karstification en profondeur que ceux du Jurassique moyen et supérieur

### 3.6.2. Secteur Sud

Au Sud de la zone d'étude, certaines vallées entaillant le massif calcaire Jurassique présentent des morphologies particulières. Elles ne sont pas rectilignes et sont constituées par des segments linéaires d'orientation différente (A, Figure 16). Ces chemins tortueux ne sont pas cohérents avec ce que l'on rencontre habituellement dans ce type de reliefs. Les changements d'orientation semblent être associés à la géométrie des structures géologiques. En effet les changements d'orientation s'opèrent au niveau des zones de discontinuités que constituent les failles, ici d'orientation Nord-Sud (B, Figure 16). Au fond du vallon, au niveau du lieu-dit Pont Sarrazin (Affleurement FLA0007), on observe des calcaires oxfordiens affectés par des conduits karstiques avec un aven évidé (C, Figure 16). Il semblerait que la vallée corresponde à un ancien réseau karstique dont le toit se serait effondré. Vers l'Ouest, au niveau de l'affleurement FLA0008, ce sont les calcaires kimméridgiens qui sont également affectés par des karsts (D, Figure 16). On y observe des cavités aplaties dans les plans de stratification (E, Figure 16). Dans les deux cas, les plans de stratification sont inclinés vers l'Ouest de moins de 10°, c'est-à-dire dans le sens d'écoulement des eaux vers la vallée principale. Les plans de failles sont également des zones préférentielles où se développent les conduits karstiques, le fait qu'ils soient verticaux permet à l'eau de s'infiltrer facilement dans le massif (C et F, Figure 16).

Plus à l'est au niveau de la commune de Saint-Dizier-l'évêque, une carrière en activité permet un accès à la roche fraîchement découverte et de mettre en évidence l'importance des failles dans l'écoulement des eaux depuis la surface (A, Figure 17). Dans cette carrière on note la présence d'une altération supergène matérialisé par un front d'altération bien présent dans la partie supérieure des fronts de tailles. Sur la photo B, l'altération se marque par la décoloration de la roche qui passe de la couleur bleutée à orangée. On voit que le front d'altération est globalement subhorizontal. Localement ce front d'altération s'approfondit rapidement en suivant des

discontinuités. Sur la photo C, on observe que la discontinuité correspond à une faille normale avec un très faible décalage, moins de 5cm.

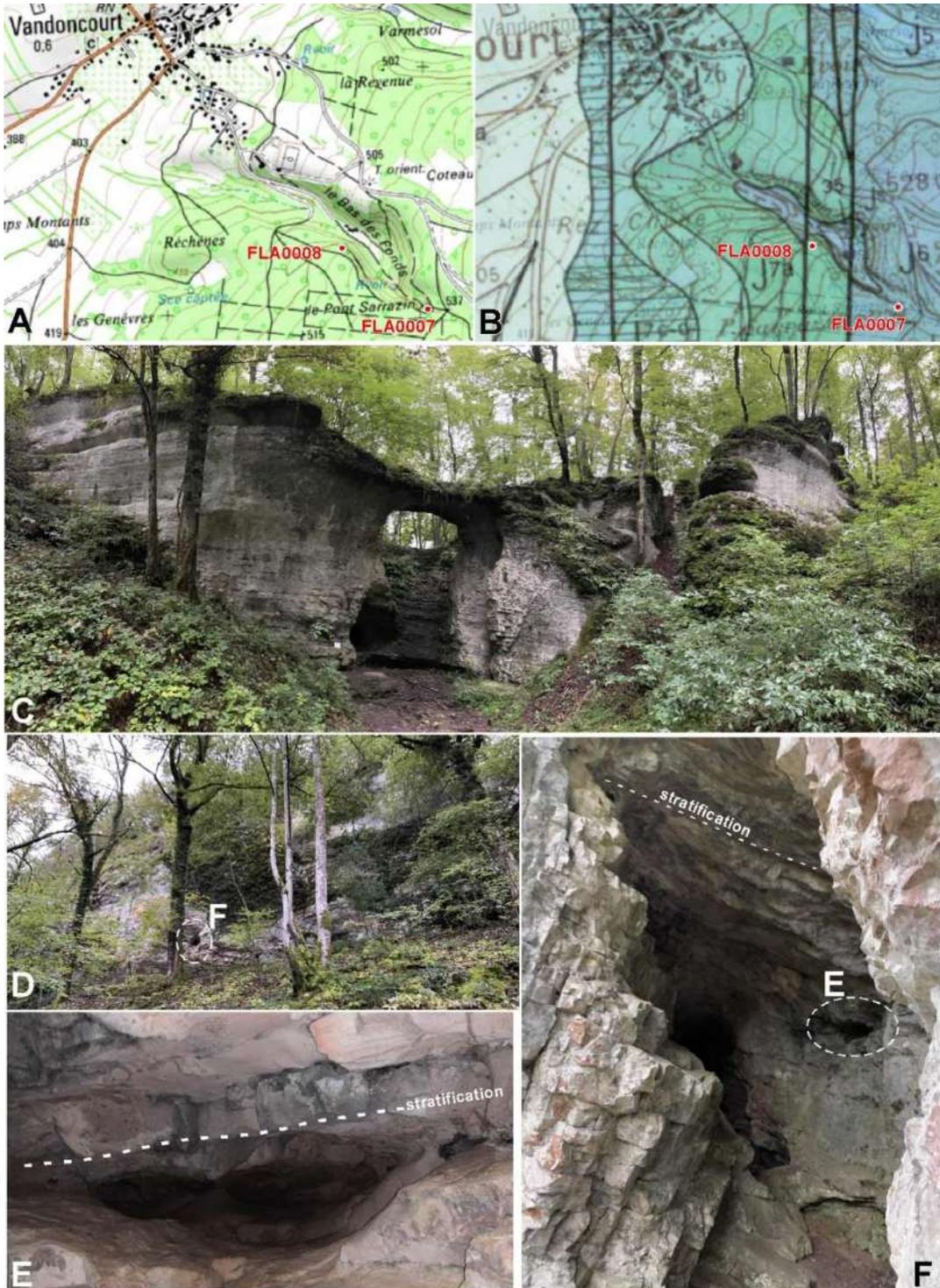


Figure 16 – Lieu-dit Pont Sarrazin, commune de Vandoncourt, A – Extrait de la carte IGN 1/25000, B – Extrait de la carte géologique à 1/50 000 de Delle, C - Affleurement n° FLA0007, D, E et F – Affleurement n° FLA0008

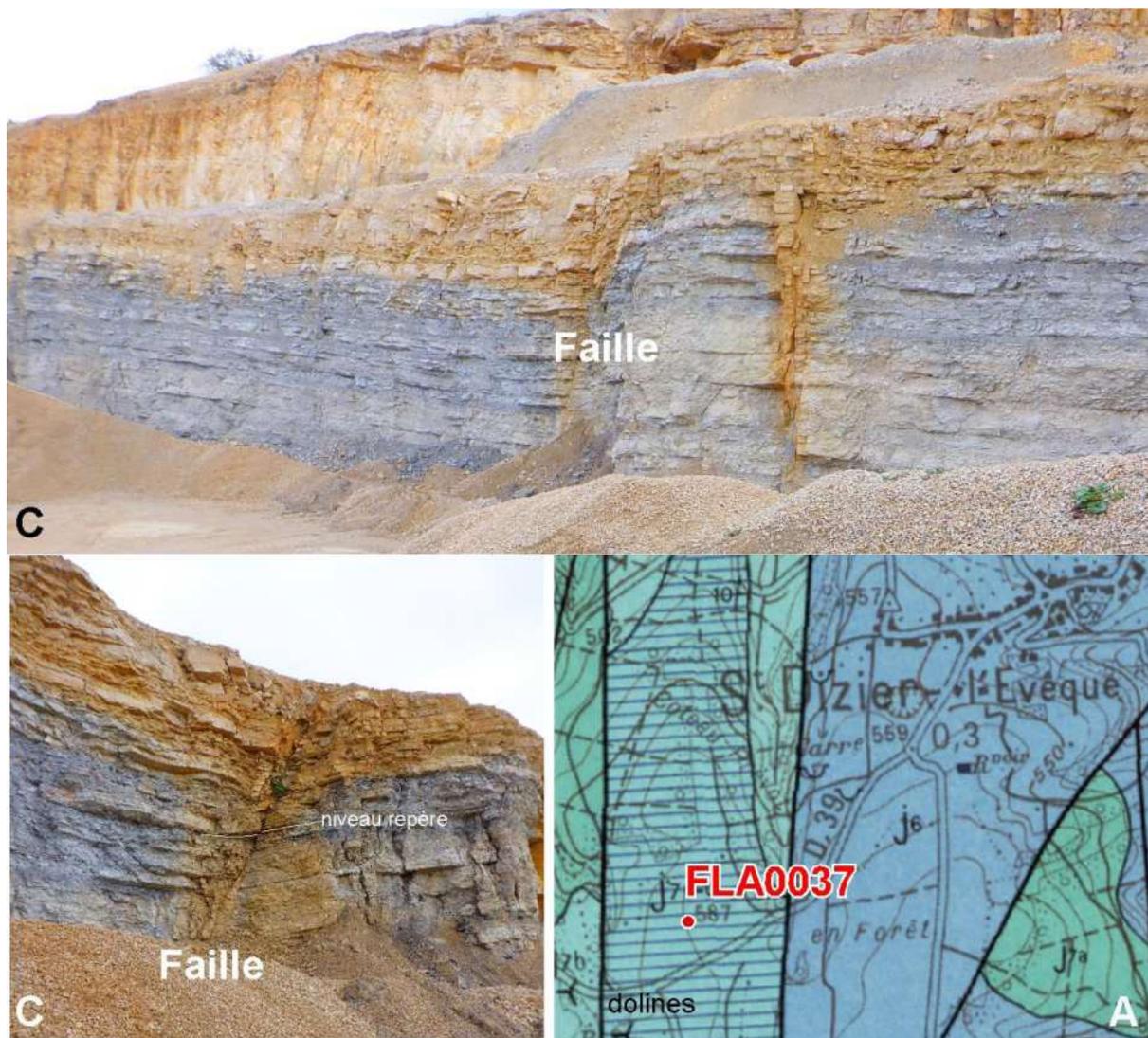


Figure 17 - Lieu-dit Ragie Bergeraie, commune de Saint-Dizier-l'Évêque, A Extrait de la carte géologique, les étoiles à trois branches au sud de l'affleurement indiquent la présence de dolines, B et C front de taille

### 3.6.3. Secteur central

Au sein de la zone centrale, plusieurs affleurements apportent des informations pertinentes sur le comportement face à l'altération.

Sur la rive ouest de la Savoureuse, les dépôts de l'Eocène et de l'Oligocène sur les terrains du Jurassique sont absents. Au niveau de l'affleurement FLA0025, des dépôts loessiques reposent en discordance sur des calcaires massifs de l'Oxfordien (Figure 18). Le contact s'effectue sur une surface érosive, subparallèle aux plans de stratifications des terrains du Jurassique. Le Jurassique n'est pas altéré. Une faille découpe la série calcaire sans affecter les loëss, elle est marquée par une zone altérée, argilisée et de couleur orangé à faible extension. Sur cet affleurement, il semblerait que le couloir faillé et les phénomènes d'altération sous les dépôts loessiques sont faiblement actifs.

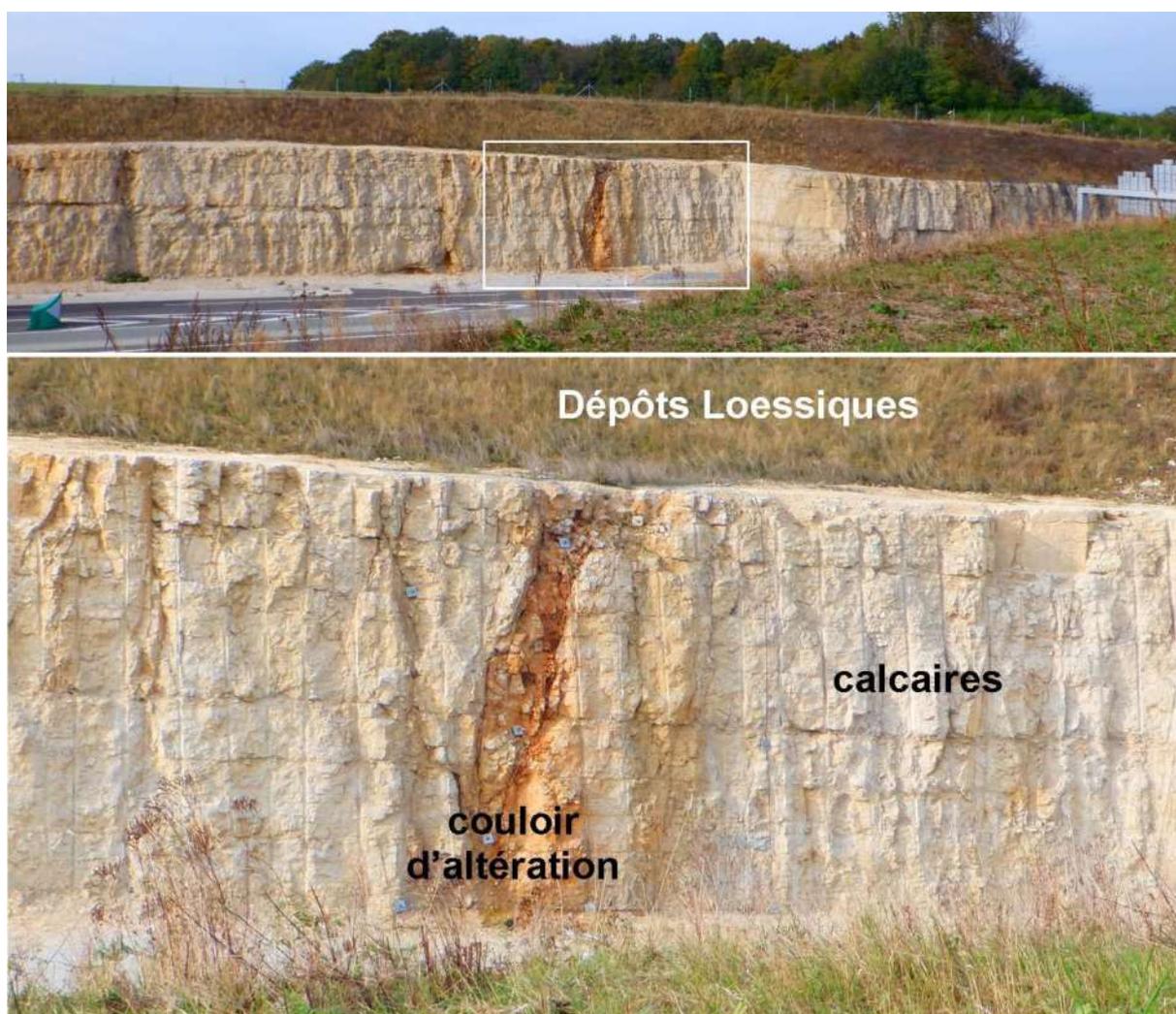


Figure 18 – Lieu-dit La Bouloye, commune de Botans, affleurement FLA0025

Plus à l'est, le long de la rive droite de la Savoureuse, au niveau de l'ancien moulin de Bermont, les calcaires du Kimméridgien forment une falaise d'un peu moins de 10 mètres de hauteur (A, Figure 19). Le moulin fonctionne avec une eau d'origine karstique. Sous la barre calcaire massive, plusieurs niveaux karstiques parallèles à la stratification existent, ils se matérialisent par des tubes et des plans ouverts permettant la circulation de l'eau (B, C et D, Figure 19).

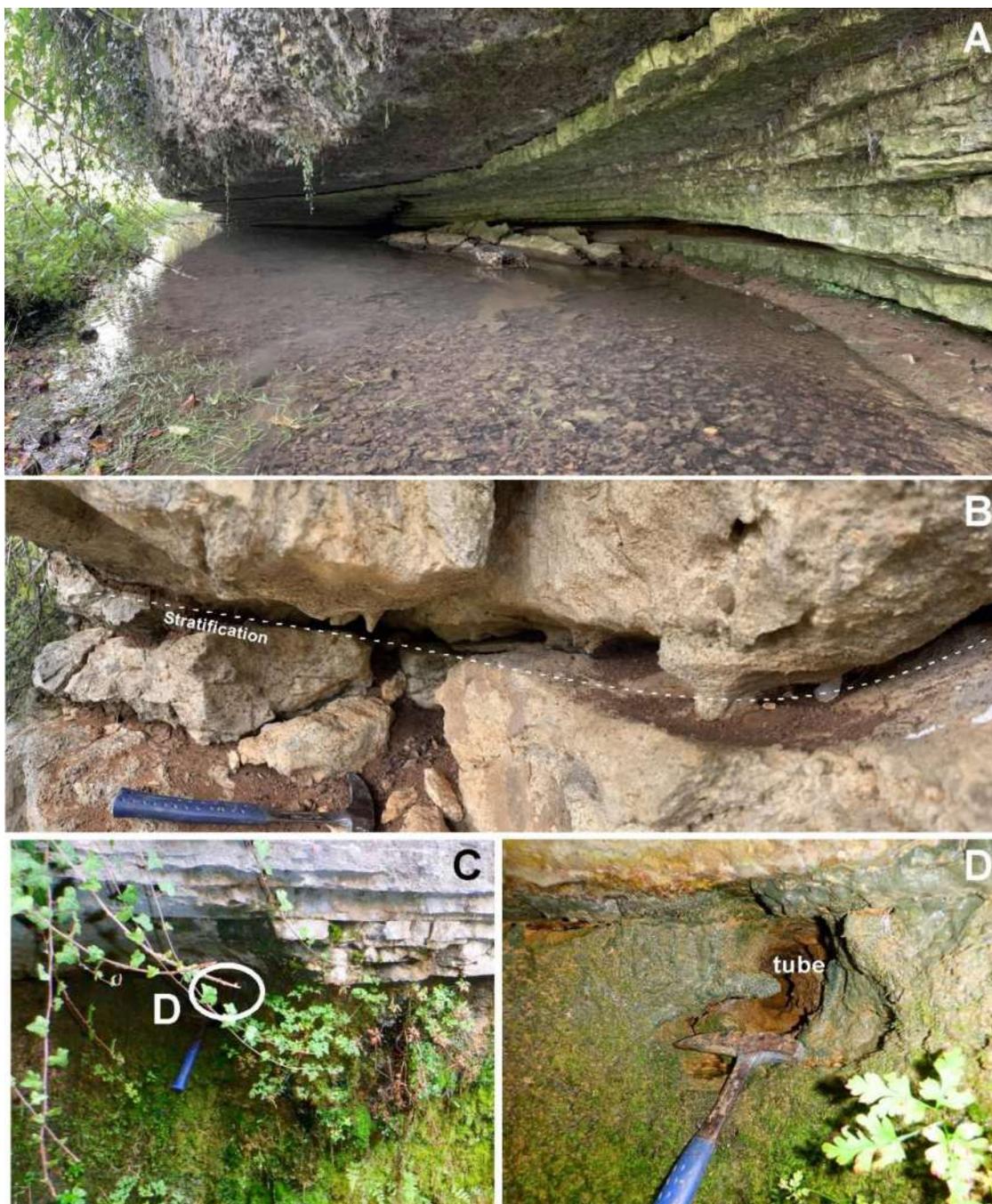


Figure 19 - Affleurement FLA0016, moulin de Bermont, rive ouest de la Savoureuse, A : affleurement, B, niveau de stratification karstique avec piliers, C : niveau sortie d'eau à la base d'une barre de calcaire, D, tube karstique parallèle à la stratification

Toujours sur la rive Ouest de la Savoureuse, au niveau de l’affleurement FLA0014 (Figure 20), de nombreuses failles subverticales affectent les calcaires du Kimmeridgien, elles sont remplies d’argiles d’altération. Localement, les plans de stratification sont ouverts avec des petits piliers indiquant la circulation d’eau.



Figure 20 - Affleurement FLA0014, rive Ouest de la Savoureuse, avec réseau karstique parallèle aux surfaces de stratifications et conduits verticaux alignés sur les plans de failles

### 3.6.4. Secteur nord

Au nord, deux affleurements clefs permettent d'identifier les éléments caractéristiques de l'altération. Au niveau du Fort de la Miotte (affleurement FLA0012), les calcaires du Jurassique Bajocien-Bathonien sont inclinés vers le SE d'une vingtaine de degrés. Au niveau du chemin de garde situé au pied de la tour et bordant la falaise nord, plusieurs conduits karstiques parallèles à la ligne de plus grande pente des calcaires ont été observés (Figure 21). La position de ces conduits karstiques indique qu'avant les intenses périodes d'érosion qui ont permis de faire que le Fort de la Miotte soit en relief, les eaux s'écoulaient depuis le nord vers le sud et traversaient le massif calcaire en suivant la pente structurale.

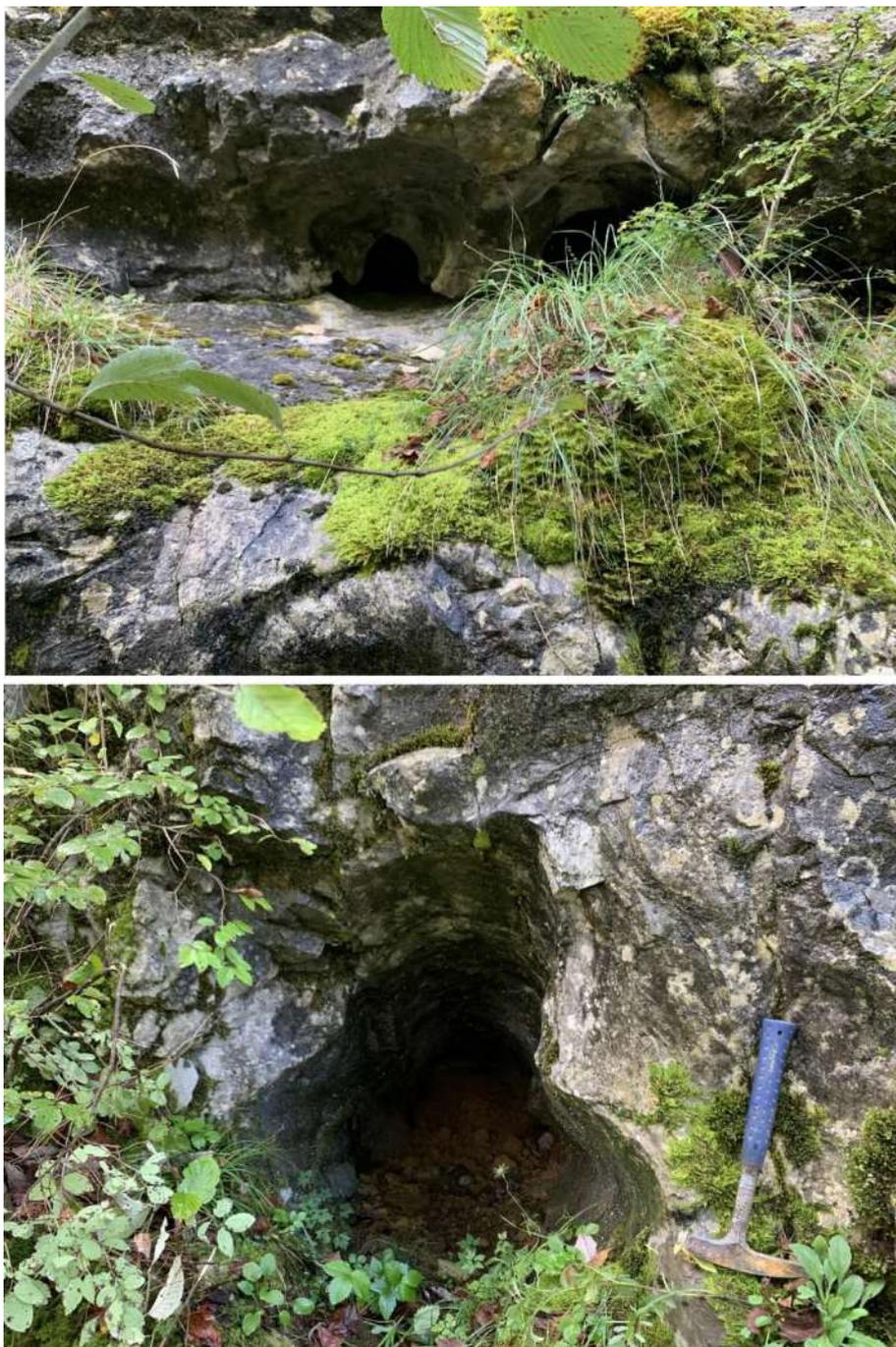


Figure 21 - Affleurement au pied de la tour du Fort de la Miotte avec conduits karstiques

Au Nord-Ouest dans la carrière du lieu-dit la côte de Froy (affleurement FL0026), les calcaires du Bajocien supérieur et du Bathonien, sont inclinés de 10° vers le SE. Ces calcaires sont affectés par une altération supergène bien visible sur les fronts de taille supérieurs. Des karsts pouvant atteindre 5 mètres de profondeur sont remplis d'argiles collantes rouges (A, Figure 22). En profondeur, la roche change de couleur pour laisser la place à des calcaires généralement bleutés (= non altérés). Au centre de la carrière, de grandes fractures sans déplacement apparent lacèrent un banc de calcaire. Le long de ces fractures la roche est de couleur orangé sur une dizaine de centimètres de part et d'autre de la fracture, cette couleur résulte d'une altération du calcaire (B, Figure 22). Lorsque la densité des fissures est plus abondante les zones d'altération deviennent coalescentes (C, Figure 22). Le détail d'une fissure à partir de laquelle se développe l'altération est illustré en Figure 22, D. Le front d'altération se propage et progressivement de manière perpendiculaire à la fissure depuis la discontinuité.

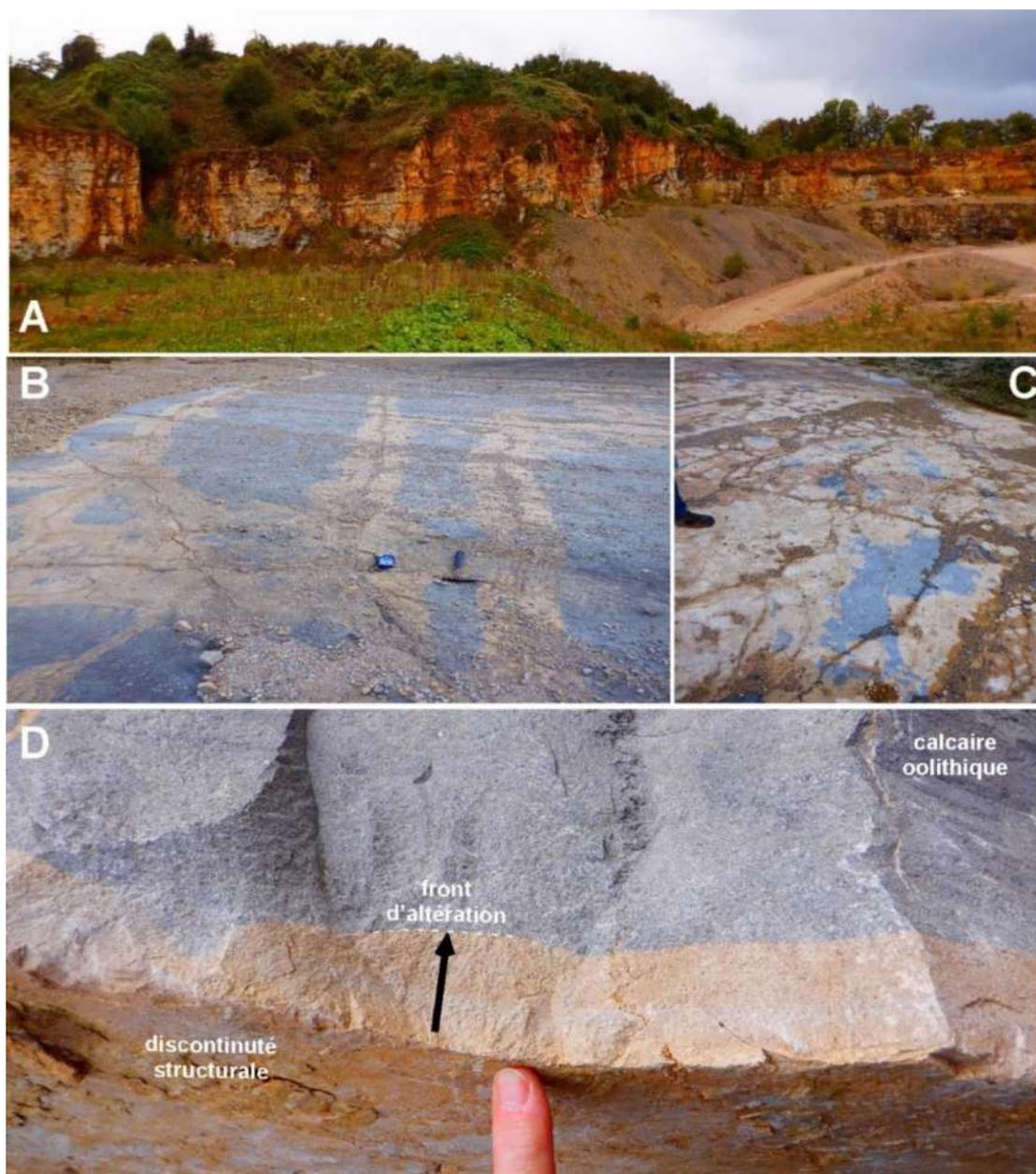


Figure 22 - Carrière de la côte de Froy, A : front de taille supérieur profondément altéré et affecté par la karstification, B et C altération le long des couloirs de fracturation, D détail d'un front d'altération associé à une faille.

Sur les fronts de taille inférieurs de la carrière, les calcaires sont en général sains. Toutefois, le long de certains plans de stratification on observe des bandes d'altérations identiques à celles observées sur les structures tectoniques vues en Figure 22. Ces bandes d'altération se développent à partir des plans de stratifications (Figure 23) et se marquent par une couleur orangée. Ces discontinuités sédimentaires semblent permettre à l'eau de transiter dans le massif parallèlement aux couches géologiques mais sans pour autant qu'il y ait le signe de karstifications.

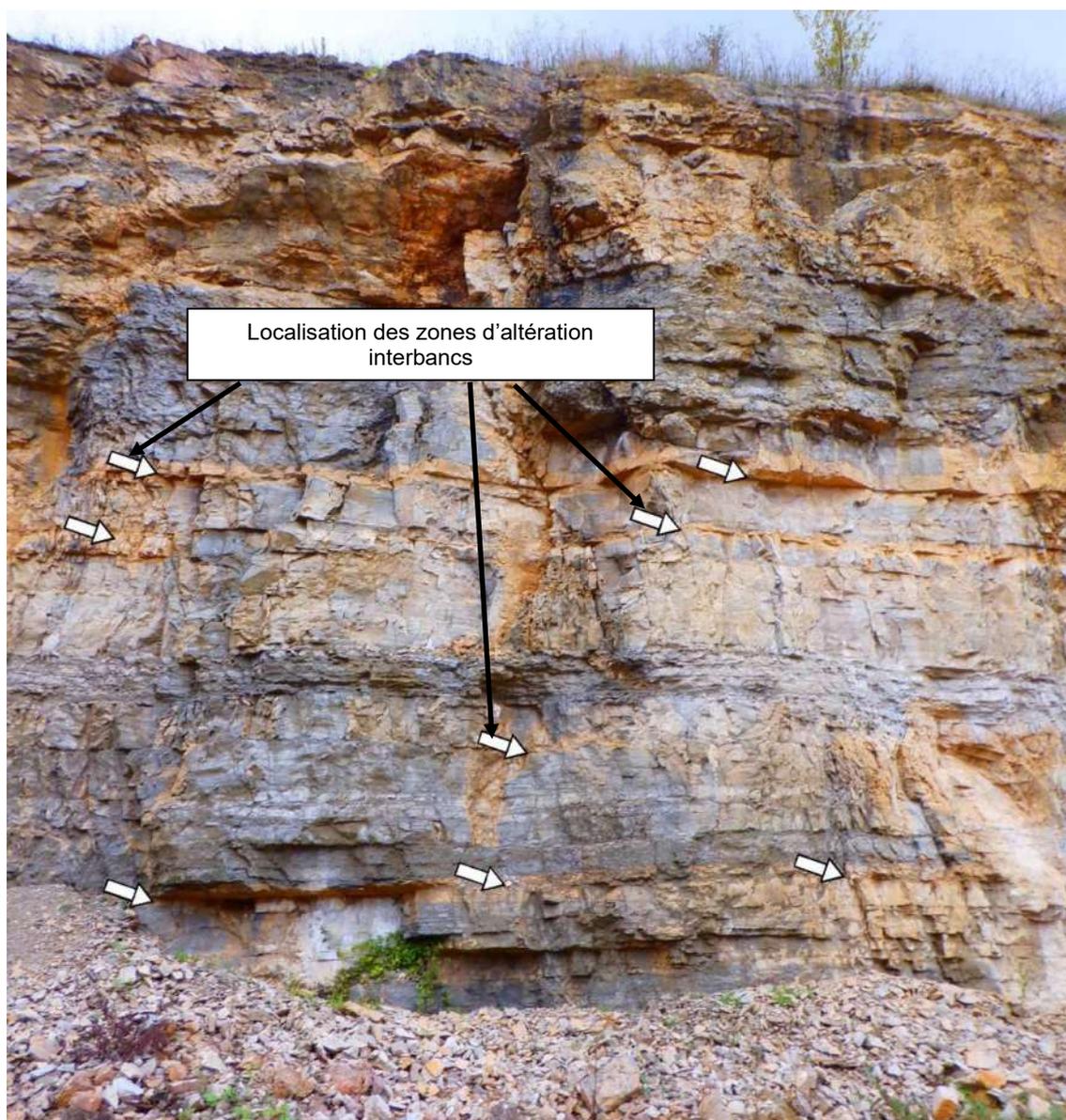


Figure 23 - Front de taille dans les calcaires massifs peu altérés, carrière de la côte de Froy

Les calcaires dans la partie Sud de la carrière ne présentent pas une altération aussi importante que celles qui affecte le reste de la carrière (A, Figure 22). Dans ce secteur les calcaires n'affleurent pas et ils sont recouverts par une couche marneuse épaisse de plusieurs mètres (Figure 24). La présence de cette couverture marneuse a dû préserver les calcaires de l'altération météorique, ce qui n'est pas le cas dans le reste de la carrière où les niveaux marno-argileux sont absents.



Figure 24 - Front sud de la carrière avec des marnes recouvrant les calcaires, carrière de la côte de Froy

### 3.6.5. Les éléments à retenir

Les terrains du Jurassique mais aussi une partie des terrains plus récents sont affectés par une altération qui n'est que très peu représentée sur les cartes géologiques. Cette altération se marque par :

- La présence de conduits karstiques associés aux structures sédimentaires (joints de stratification) et tectoniques (failles). Localement, ils atteignent la surface et peuvent être remplis par des argiles rouges ou évidés, indiquant qu'ils ont été actifs.
- L'écoulement des eaux dans le massif s'effectue dans le sens de la pente des structures sédimentaires ; le développement de conduits karstiques dans les plans de stratification se développant et facilitant les écoulements. Les failles verticales assurent essentiellement la migration verticale au travers des séries ;
- Sous couverture marneuse, argileuse ou lœssique, l'altération ne se développe pas rapidement depuis la surface, ce sont les discontinuités sédimentaires ou tectoniques qui permettent à celle-ci de se développer à partir des zones de discontinuités, mais avec un degré d'altération moindre.

### 3.7. BILAN

La caractérisation géologique des calcaires du Jurassique du territoire du Grand Belfort a permis de mettre en évidence les points suivants :

- l'observation au droit de certaines zones affleurantes de figures d'écoulements et d'altération au niveau des fracturations verticales et entre certains bancs calcaires indiquent que ces structures géologiques ont pu ou peuvent être des zones privilégiées de transfert d'eau entre la surface et le milieu souterrain.
- la structure géométrique globale des calcaires décrit une vaste synforme à fond plat. Il s'agit d'une structure en forme de vaste gouttière de direction SW-NE. Les formations peu perméables du Tertiaire ont rempli petit à petit cette synforme recouvrant en grande partie les calcaires du Jurassique. L'axe de la synforme (point bas du fond plat) correspondrait globalement, à la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse tandis que les calcaires affleurants (au niveau des rives de la Savoureuse et au sud de la vallée de l'Allaine) en seraient les bordures (Figure 25). Dans cette structure, les bancs calcaires présentent deux inclinaisons principales en direction de l'axe (= vers le SE pour la partie nord du territoire et vers le NW pour la partie sud du territoire). La synforme peut potentiellement être une zone d'intérêt pour la recherche de ressources en eau souterraines et mériterait d'être caractérisée avec plus de précision.

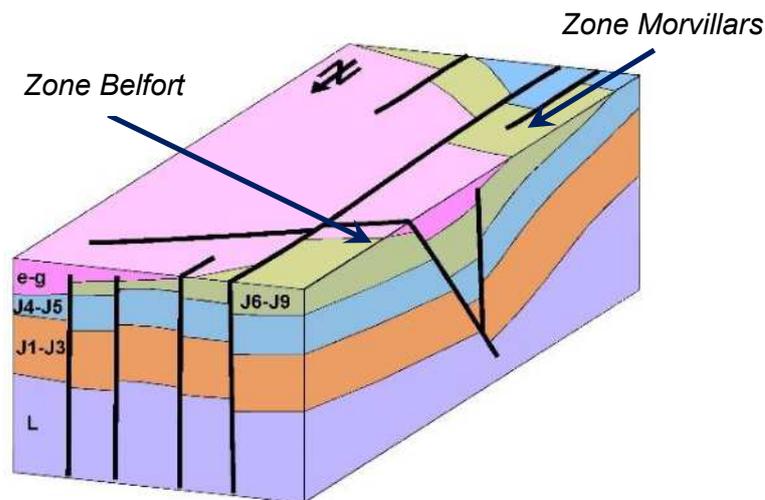


Figure 25 – Bloc diagramme 3D représentant la synforme décrite par les couches du Trias et du Jurassique affectée par des failles N-S et NE-SW

Au regard de ces éléments, la structure tectonique (failles) voir karstique et la structure géométrique (axe de la synforme) des formations calcaires jouent ou ont joué un rôle dans la recharge et les écoulements des eaux souterraines.

Pour mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, la seconde phase porte sur la caractérisation des circulations des eaux souterraines au sein de ces formations aquifères calcaires

## 4. Caractérisation hydrogéologique des calcaires du Jurassique

### 4.1. OBJECTIFS

L'étude des **Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives** (C.DONEY, 2020 - BRGM/RP-70184-FR) a montré que les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique au droit des calcaires du Jurassique sont très partielles. Cette ressource en eau est très peu exploitée malgré la présence des calcaires sur un tiers du département.

La seconde phase de ce projet, qui fait l'objet du présent rapport, doit permettre de pallier en partie à ce constat par la réalisation d'investigations de terrain sur un cycle hydrogéologique complet (basses et hautes eaux) pour développer les connaissances sur cet aquifère. Ces investigations ont été réalisées uniquement sur la zone d'affleurement des calcaires du Jurassique : eaux de surface (cours d'eau) et eaux souterraines (sources, fontaines, forages) étant plus facilement accessibles.

Les investigations de terrain ont consisté en la réalisation :

- de jaugeages de débits sur plusieurs sections de cours d'eau ;
- des mesures de débits au droit des sources et des mesures piézométriques au droit des puits et forages ;
- des mesures de la conductivité électrique (= minéralisation des eaux) des cours d'eau, des sources et fontaines.

Les mesures de débit et de piézométrie donnent des éléments de compréhension sur les flux et les mesures de conductivité donnent des éléments de compréhension sur l'origine des eaux.

L'ensemble de ces investigations de terrain permet d'améliorer l'état des connaissances et la compréhension du comportement hydrogéologique de la nappe des calcaires.

### 4.2. PRESENTATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN

Les campagnes de mesures de terrain ont été réalisées :

- du 20 au 23 septembre 2021, pour les basses eaux ;
- du 22 au 24 février 2022, pour les hautes eaux.

Préalablement aux campagnes de terrain, 66 points de mesures en basses eaux et 72 point de mesures en hautes eaux ont été présélectionnés à l'aide des données existantes :

- les cartes IGN pour la localisation des sources et des cours d'eau ;
- la BSS pour la localisation des forages d'eau (puits, piézomètres) et des sources
- des observations terrains.

Le choix des points de mesures pour les cours d'eau a été réalisé dans le but d'obtenir une vision globale de leur écoulement : de leur source jusqu'à leur exutoire. Ainsi, ils ont été implantés de telle sorte que l'on puisse détecter les apports des affluents et/ou des sources et des zones de pertes déjà connues.

La localisation des points de mesures est présentée en Figure 26.

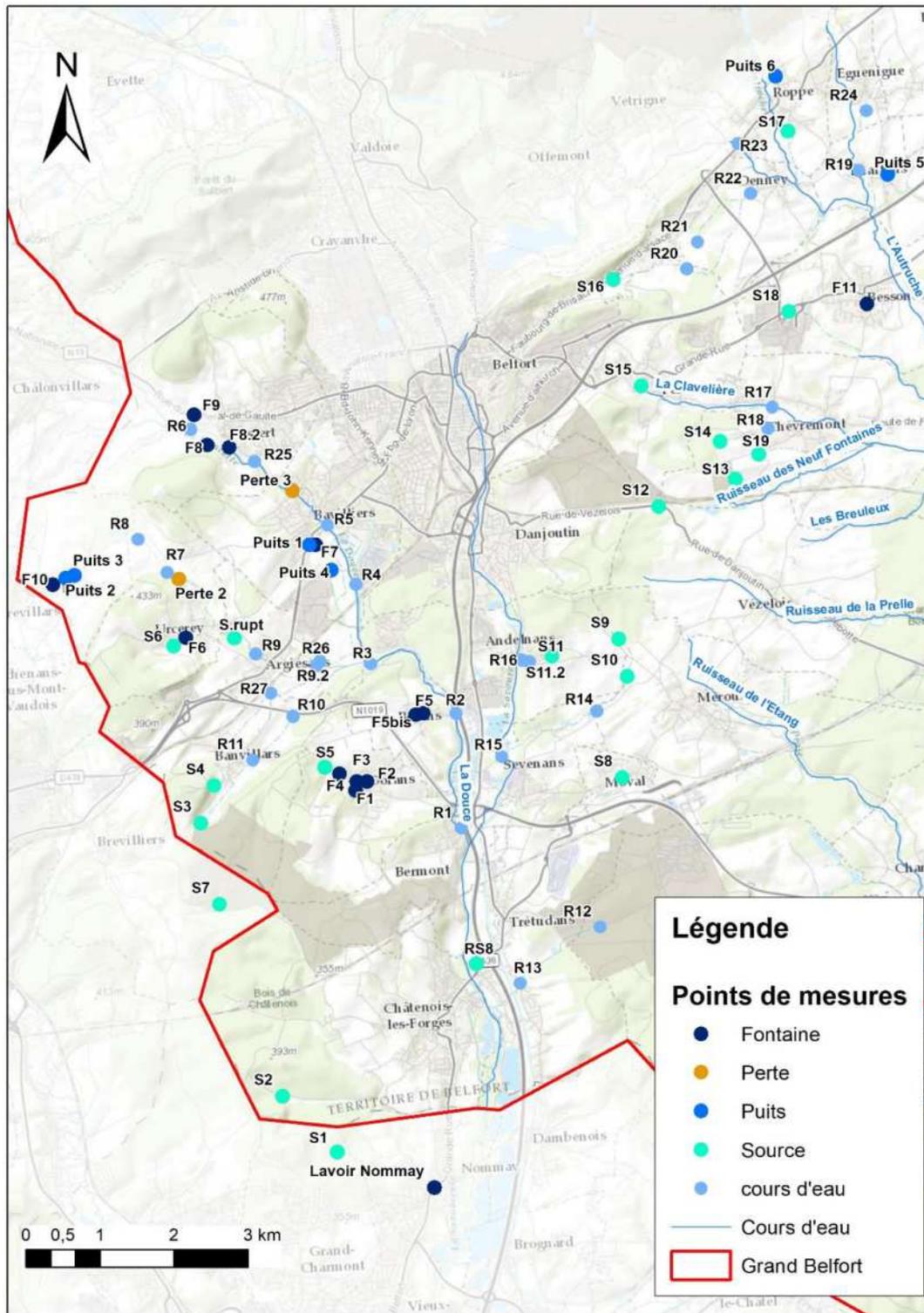


Figure 26 – Localisation des points de mesures hydrologiques prévisionnels

#### 4.2.1. Analyses des données climatiques et hydrauliques du département lors des campagnes de prélèvements

La première campagne a eu lieu au mois de septembre 2021 afin de caractériser la période hydrologique des basses eaux. L'analyse du graphique des précipitations de 2021 (Figure 27) montre que cette 1<sup>ère</sup> campagne de mesures se situe bien en période sèche, le mois de septembre étant l'un des mois les plus secs de l'année. On peut toutefois remarquer que les mois précédents (de mai à juillet 2021) ont été relativement pluvieux ce qui a pu avoir un impact sur l'hydrosystème au mois de septembre.

La seconde campagne a eu lieu au mois de février 2022 afin de caractériser la période hydrologique des hautes eaux. L'analyse du graphique des précipitations tombées en 2022 (Figure 27) montre que cette 2<sup>ème</sup> campagne de mesures se situe dans une période où les pluies sont peu abondantes.

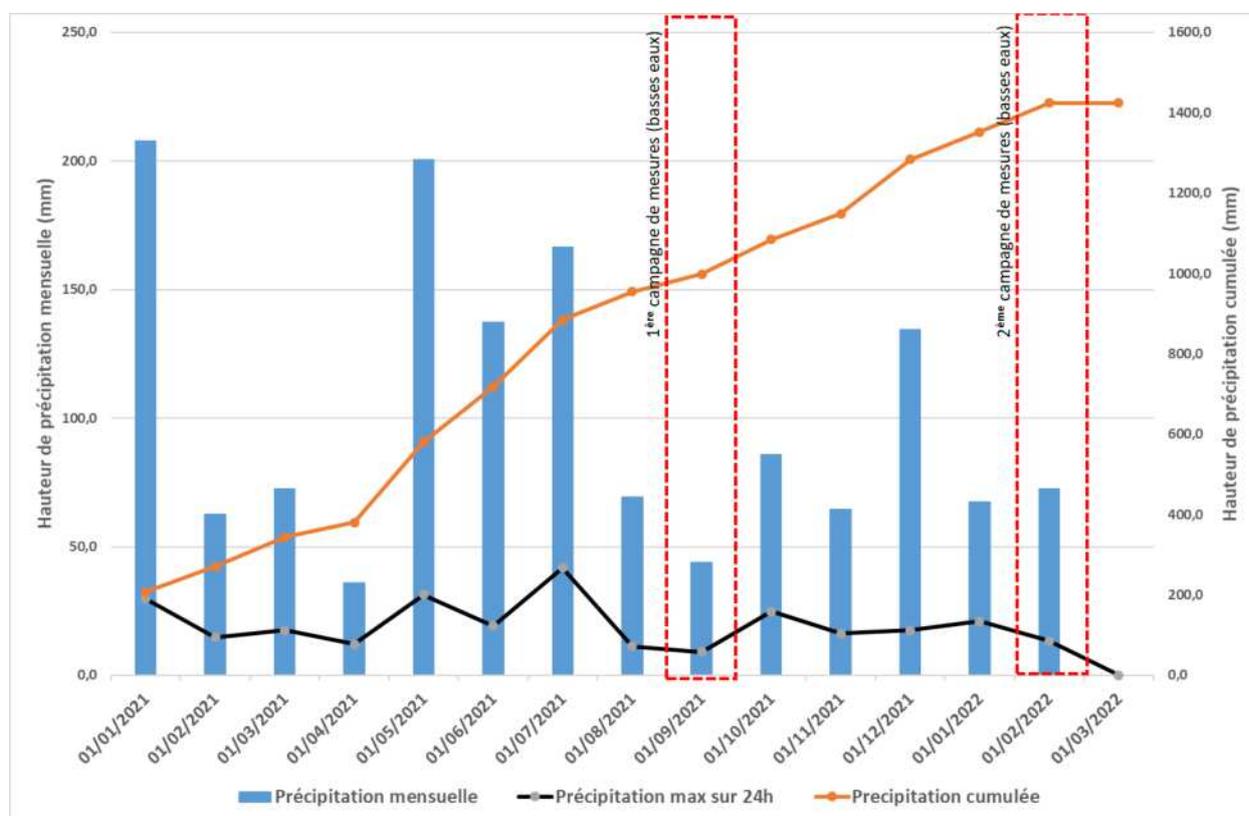


Figure 27 – Evolution des précipitations au cours de l'année 2021-2022 (données SAFRAN – Météo-France)

Afin de mieux appréhender l'état de l'hydrosystème lors des campagnes de mesures, les données de débits de la Savoureuse au droit de la station U2345030 (station de Belfort) ont été collectées pour les années 2021-2022 (Figure 28) et les moyennes mensuelles depuis la mise en service de cette station (Figure 29).

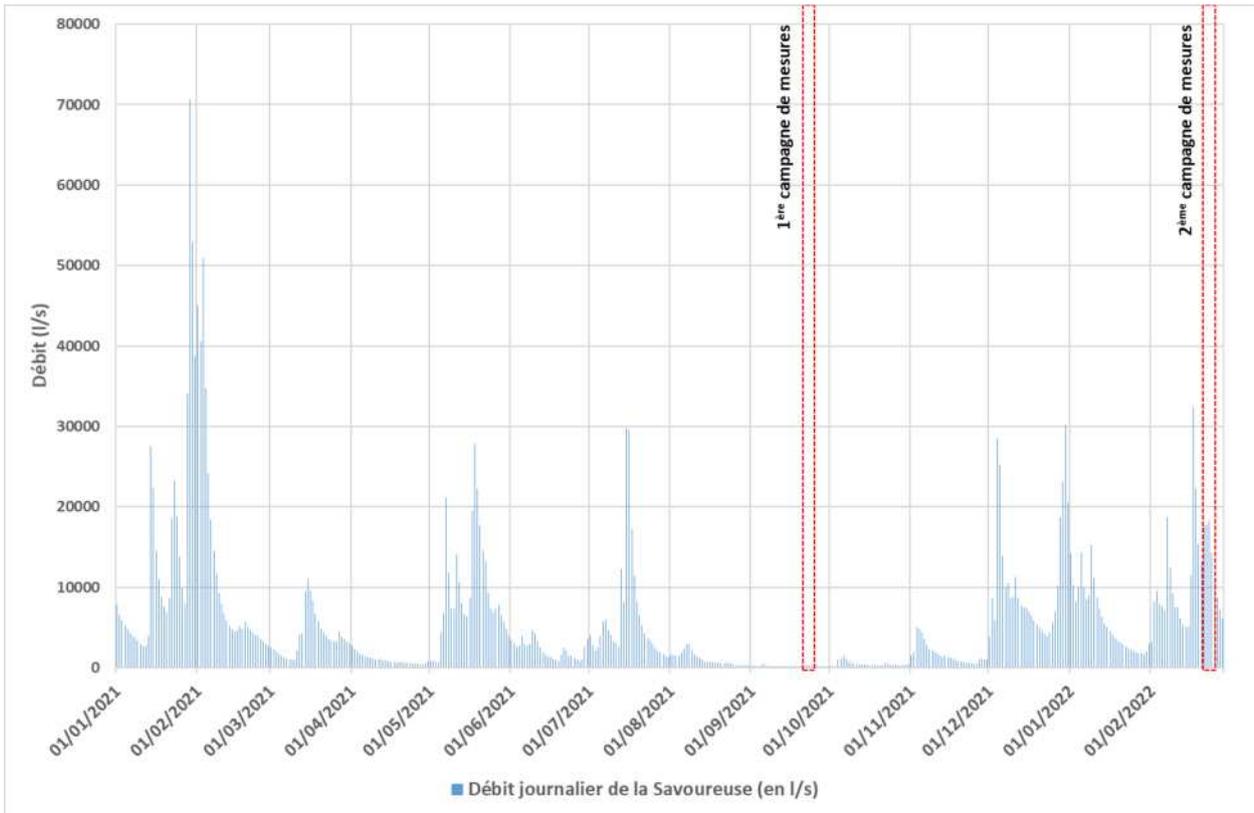


Figure 28 – Débit moyen journalier au droit de la station U234 5030 de La Savoureuse à Belfort

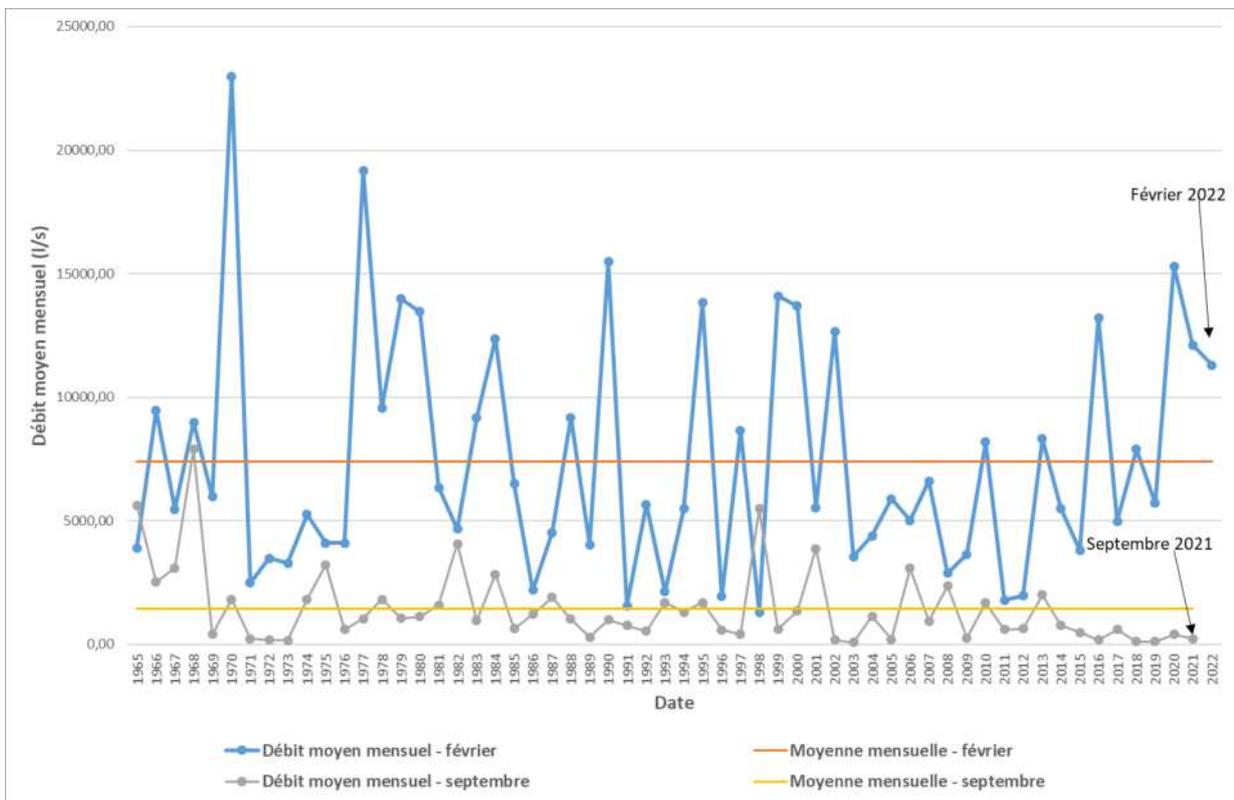


Figure 29 – Chronique des débits moyens mensuels de février et septembre au droit de la station U234 5030 de La Savoureuse à Belfort de 1963 à 2022

Lors du mois de septembre 2021, les débits mesurés au droit de la Savoureuse sont les plus bas mesurés entre le 01/01/2021 et le 01/03/2022. C'est également l'un des débits les plus faibles mesurés depuis la mise en fonction de la station hydrométrique, en dessous de la moyenne mensuelle. Le mois de Septembre 2021 semble donc représentatif des basses eaux.

D'après les données hydrométriques de la DREAL, les débits mesurés au mois de février 2022 présentent une valeur relativement élevée au regard des années passées. Elle est supérieure à la moyenne mensuelle. Ces valeurs sont cohérentes avec les observations des mois de janvier 2022 et de juin 2021. Il semble donc représentatif des hautes eaux. On peut noter que les débits du mois de février 2022 sont nettement supérieurs aux débits mesurés en septembre 2021.

#### **4.2.2. Les outils mobilisés lors des mesures de terrain**

Les mesures de débits des cours d'eau au droit de chaque section prédéfinie ont été réalisées selon différentes techniques au regard des différentes conditions rencontrées.

##### *a) Mesure de débit au courantomètre*

Le courantomètre électromagnétique est un appareil portable permettant de mesurer les vitesses d'écoulement de l'eau (Figure 30). De mise en œuvre simple et rapide, il fournit immédiatement des mesures précises et fiables pour le jaugeage des cours d'eau.

Le principe consiste en l'utilisation de l'effet Doppler ; un signal ultrasonore émis vers le bas (courantomètre de surface) ou vers le haut (courantomètre immergé) est renvoyé par les particules contenues dans l'eau. Le traitement des signaux recueillis sur des transducteurs permet de calculer les composantes de vitesse du courant.



Figure 30 – Mesures du débit de la Douce au courantomètre

*b) Mesure de débit au StreamPro ADCP*

Le Stream Pro ADCP de Teledyne RD Instruments est un Profileur Acoustique à Effet Doppler. Il permet de mesurer des débits en temps réel de cours d'eau peu profonds (> 20 cm) avec précision en quelques minutes.

Le StreamPro est positionné sur une petite embarcation flottante permettant de réaliser les mesures sans accéder à l'eau mais en étant dirigé à partir d'un pont (Figure 31).



Figure 31 – Jaugeage de la Douce au StreamPro ADCP

### c) *Mesure de débit par jaugeage au sel*

La méthode proposée dérive des travaux d'André (1960), Müller (1979) et de la Norme AFNOR (1994), et permet une estimation du débit instantané d'un cours d'eau. Le principe de la mesure de débit par dilution chimique est simple, il consiste en l'injection de manière instantanée d'une solution de concentration et de volume connus dans une zone turbulente du cours d'eau, celle-ci assurant un bon mélange de la solution injectée (Figure 32). Il convient alors de mesurer en aval de ce point l'évolution de la concentration du produit injecté dans l'eau du cours d'eau en fonction du temps.

Diverses solutions chimiques peuvent être utilisées. Toutefois, pour nos mesures, nous avons utilisé le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) en raison du faible coût de la matière première, de son caractère non polluant aux doses employées (quelques g/l) et de la simplicité de la mesure : uniquement basée sur le suivi de la conductivité électrique de l'eau. Cette technique ne nécessite pas d'équipement lourd : un seau, un récipient gradué, du sel, un conductimètre avec enregistrement des mesures à des pas de temps réduit (toutes les 5 secondes).

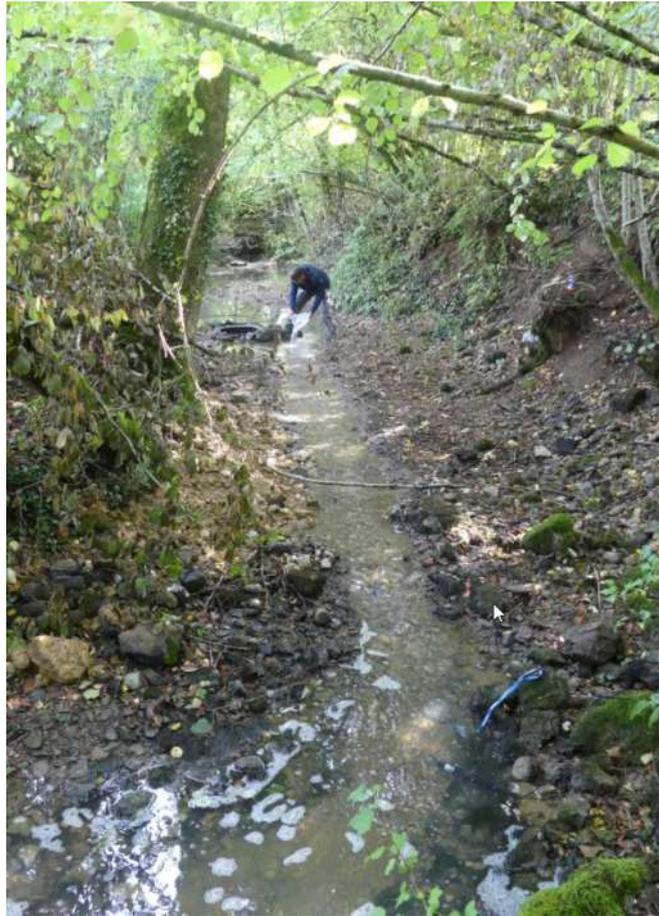


Figure 32 – Jaugeage au sel

*d) Mesure de débit des fontaines*

Le jaugeage des fontaines a été réalisé de façon classique à l'aide d'un seau gradué et d'un chronomètre (Figure 33). Afin de lever au maximum l'incertitude de la mesure, le processus a été réalisé a minima 3 fois par fontaine. La moyenne des mesures a été retenue.



Figure 33 – Jaugeage au seau du lavoir d'Urcerey

e) *Mesures de la conductivité électrique de l'eau*

Au droit de chaque station de mesure, la conductivité électrique de l'eau a été mesurée à l'aide d'un conductimètre.

La conductivité a été mesurée pour mettre en évidence les zones d'alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines. Les eaux souterraines étant plus minéralisées que les eaux de surface, les venues d'eaux souterraines au droit des cours d'eau sont souvent associées à une augmentation de la conductivité des eaux de surface.

*Remarque* : Lors de la première campagne, le nombre de mesures a été limité du fait des nombreux assècs et suite à une panne de la sonde.

f) *Mesures piézométriques*

Sur le terrain, quelques points de mesures piézométriques ont été effectués au droit des puits identifiés lors des campagnes de terrain. Toutefois, il a été constaté que la zone d'étude possédait un nombre de puits très limité ne permettant pas de réaliser d'esquisse piézométrique.

Pour rappel, les mesures piézométriques consistent en la mesure de la profondeur de la nappe d'eau souterraine par rapport au sol ou tout autre repère (ex : margelle du puits).

### 4.2.3. Observations de terrain

#### a) Couverture du réseau de mesures

Lors de la première campagne sur les 68 points de mesures prévisionnels (Figure 26) :

- 26,5% des points étaient secs ou présentaient des écoulements trop faibles pour être mesurés ;
- 9% des points n'étaient pas accessibles (notamment en zone militaire) ;
- 17% points présélectionnés n'ont pas été trouvés.

La Figure 34 localise les points de mesures lors de la campagne des basses eaux de septembre 2021.

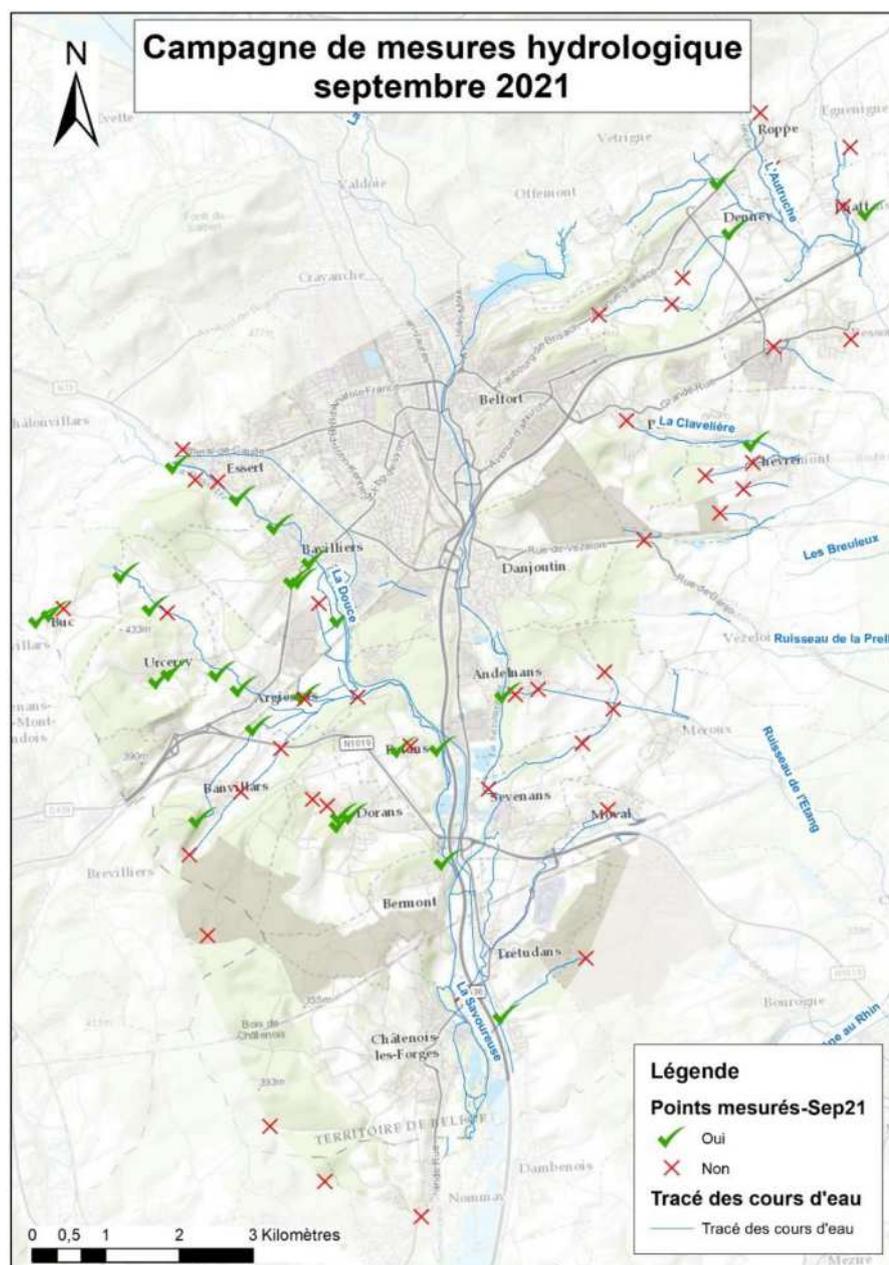


Figure 34 – Localisation des points de mesures hydrologiques de la campagne basses eaux de septembre 2021

Lors de la seconde campagne, 72 points ont été visités :

- 21% des points étaient secs ou présentaient des écoulements trop faibles pour être mesurés ;
- 5% des points n'étaient pas accessibles ;
- 11% des points n'ont pas été trouvés.

La Figure 35 localise les points de mesures lors de la campagne des hautes eaux en février 2022.

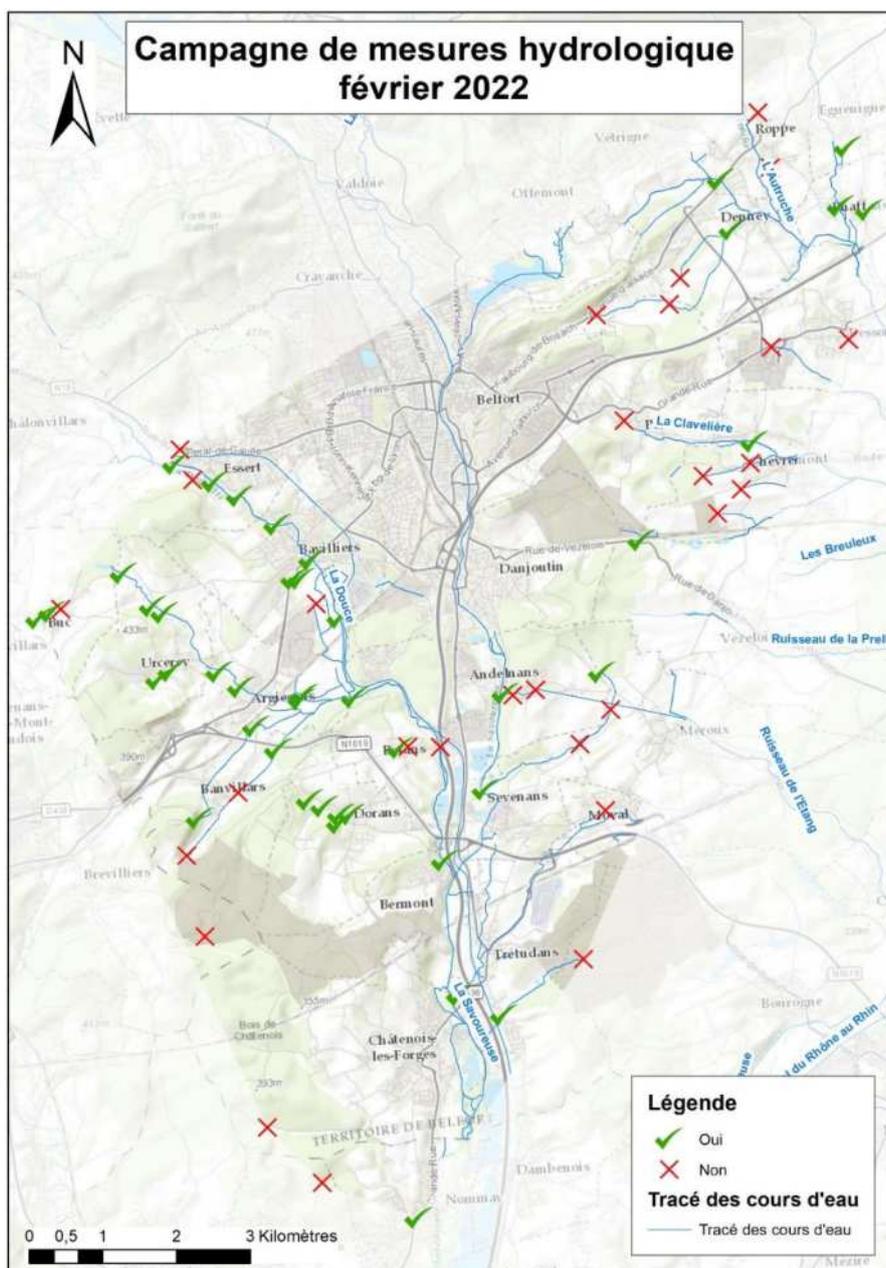


Figure 35 – Localisation des points de mesures hydrologiques de la campagne hautes eaux de février 2022

b) Réseau hydrologique

Le chevelu hydrographique entre l'Est et l'Ouest de la Savoureuse présente une organisation différente (Figure 36).

A l'Est, le chevelu semble plus dense avec de nombreux rus de faible importance dont les écoulements se dirigent, soit vers le SE en direction de la Bourbeuse (pour la partie Nord), soit vers l'E en direction de la Savoureuse (pour la partie sud).

En rive droite, le réseau hydrographique semble moins dense. Les rus de faible importance sont également présents mais en quantité moindre. La rivière de la Douce est le principal affluent de la Savoureuse. Celui-ci draine l'ensemble des rus pour ensuite se jeter dans la Savoureuse. L'ensemble des cours d'eau ont une direction vers l'E en direction de la Savoureuse (Figure 36).

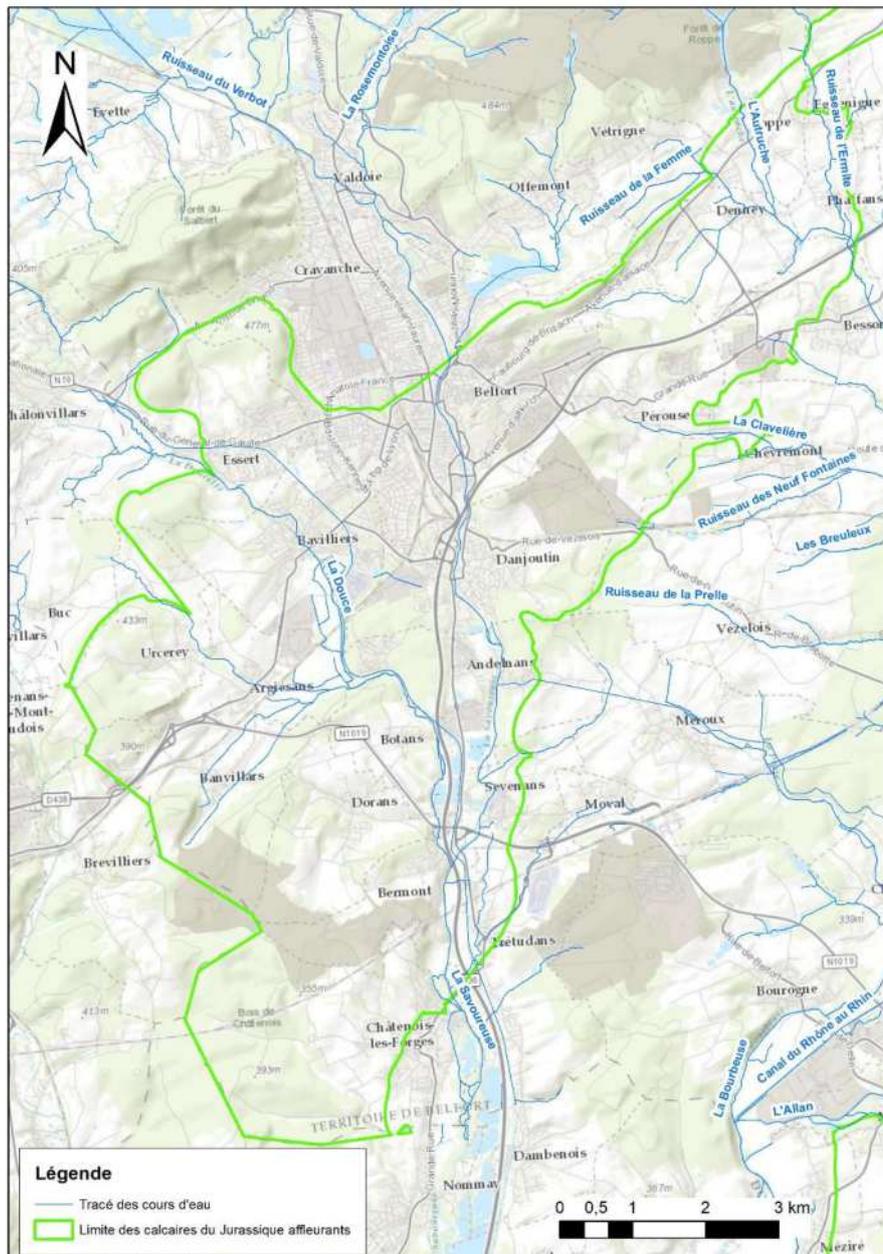


Figure 36 – Réseau hydrographique de la zone d'étude

Lors des campagnes de terrain, il a été constaté que le nombre de cours d'eau ou de sources présentant des assecs était relativement important, plus particulièrement en période de basses eaux.

En dehors de la Savoureuse, la Douce est le seul cours d'eau de taille importante s'écoulant sur les formations calcaires du Jurassique. Il a pu être noté que son écoulement pouvait être affecté par des structures anthropiques qui :

- entravent à l'écoulement par la présence de seuils, de barrages, de biefs ;
- apportent des eaux issues de stations d'épurations, de fossés, d'étangs.

### c) Formes karstiques

Lors de la campagne de terrain géologique, des réseaux karstiques plus ou moins développés ont pu être recensés. Ces observations ont été confirmées lors des deux campagnes hydrologiques. En effet, plusieurs zones de pertes et de sources karstiques ont pu être identifiées (Figure 37 et Figure 38).



Figure 37 – Localisation des zones de pertes



*Figure 38 – Localisation de la résurgence du trou Gavoiillot dénommé S.Rupt dans le cadre de ce projet (source vaclusienne)*

### **4.3. RESULTATS DES CAMPAGNES HYDROLOGIQUES**

#### **4.3.1. Analyse des débits mesurés en rive droite et en rive gauche de la Savoureuse**

Lors des campagnes de terrain, il a été constaté visuellement que le réseau hydrographique de la rive droite de la Savoureuse présentait beaucoup plus de petits cours d'eau que la rive gauche. Cette différence de réseau hydrographique semble être validée par les mesures des débits des cours d'eau et des sources, que ce soit en basses ou hautes eaux (Figure 39).

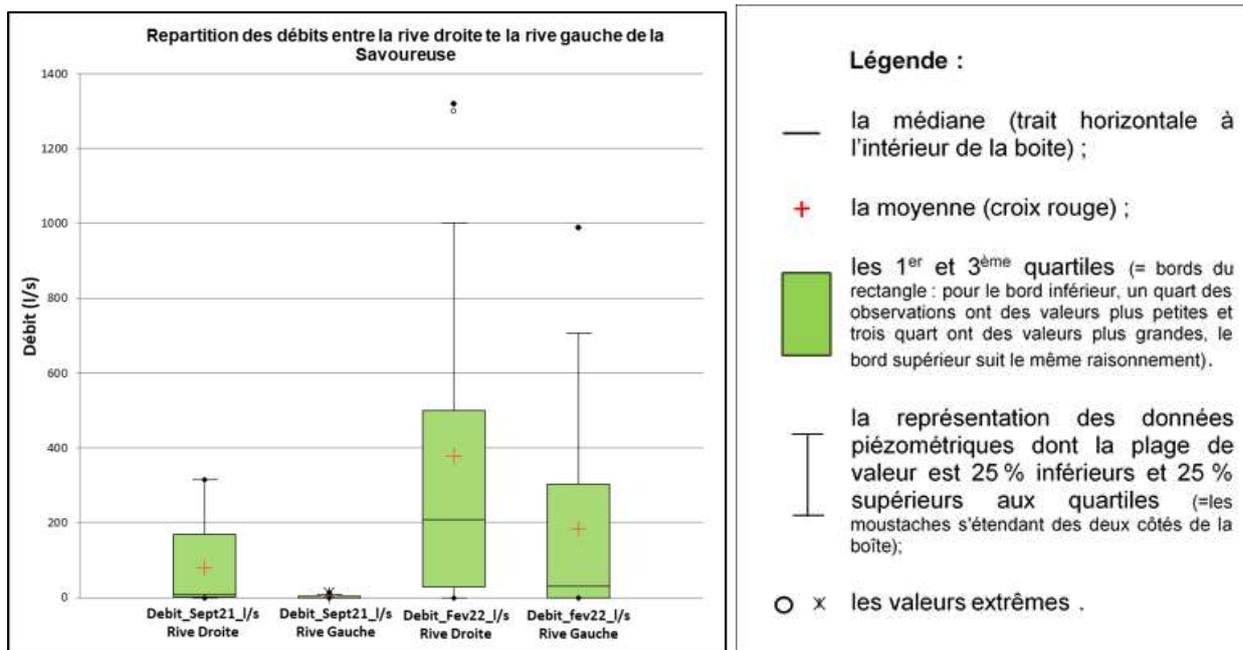


Figure 39 – Graphiques boîtes à moustache illustrant la répartition des débits entre la rive gauche et la rive droite de la Savoureuse

Le graphique de type « boîtes à moustache » permet de visualiser rapidement la répartition des débits mesurés au droit des cours d'eau entre la rive gauche et la rive droite de la Savoureuse. Ainsi, il est constaté que les débits les plus élevés sont mesurés au niveau des calcaires affleurants de la rive droite de la Savoureuse plutôt qu'en rive gauche, que ce soit en période de basses ou hautes eaux.

Cette différence de débits entre les cours d'eau de la rive droite et de la rive gauche de la Savoureuse peut être liée aux dimensions respectives des aires d'alimentation des cours d'eau et des sources mesurés. Généralement, plus l'aire d'alimentation est vaste plus le débit des sources et/ou des cours d'eau est important.

Dans les régions calcaires et plus particulièrement en zones karstiques où les interactions entre les eaux de surface et souterraines sont importantes, l'aire d'alimentation est définie par le bassin hydrogéologique dont les limites dépendent de la structure géologique et le bassin topographique qui se définit par le relief.

Le bassin hydrogéologique peut se délimiter à l'aide :

- des phénomènes structuraux : failles/pendage des terrains ;
- de la lithologie : limites entre les formations aquifères (roche perméable : calcaires) et les formations aquitards (roche peu perméable : marnes).

Le bassin topographique des cours d'eau se définit par la ligne de crête de part et d'autre du cours d'eau.

En prenant en compte ces paramètres, on constate que les cours d'eau et les sources en rive gauche de la Savoureuse, par rapport à ceux de la rive droite, présentent généralement (Figure 40) :

- Un bassin versant avec, en moyenne, des superficies plus faibles (Tableau 2),

Tableau 2 : Statistique sur la taille des bassins versants

Statistique sur la superficie des bassins versants	A l'Ouest de la Savoureuse	A l'Est de la Savoureuse
Nb. De bassin versant	32	23
Minimum	2,000	2,000
Maximum	3428,000	485,000
1er Quartile	47,750	26,500
Médiane	128,000	82,000
3ème Quartile	1038,250	152,000
Moyenne	619,469	127,957

- Un bassin hydrogéologique plus réduit dû à une surface de calcaires (aquifères) moins étendue et à la présence de failles principales N-S (cas de la zone sud) qui semblent définir une limite de partage des eaux entre la vallée de la Savoureuse et la vallée de la Bourbeuse (Figure 40). Pour rappel, les données géologiques avaient mis en évidence la présence d'une structure en synforme (=bassine) dont les calcaires affleurant de la rive gauche de la Savoureuse correspondraient à la bordure Est de la synforme, tandis que la vallée de la Bourbeuse correspondrait à son axe (cf chapitre 3.4.1).

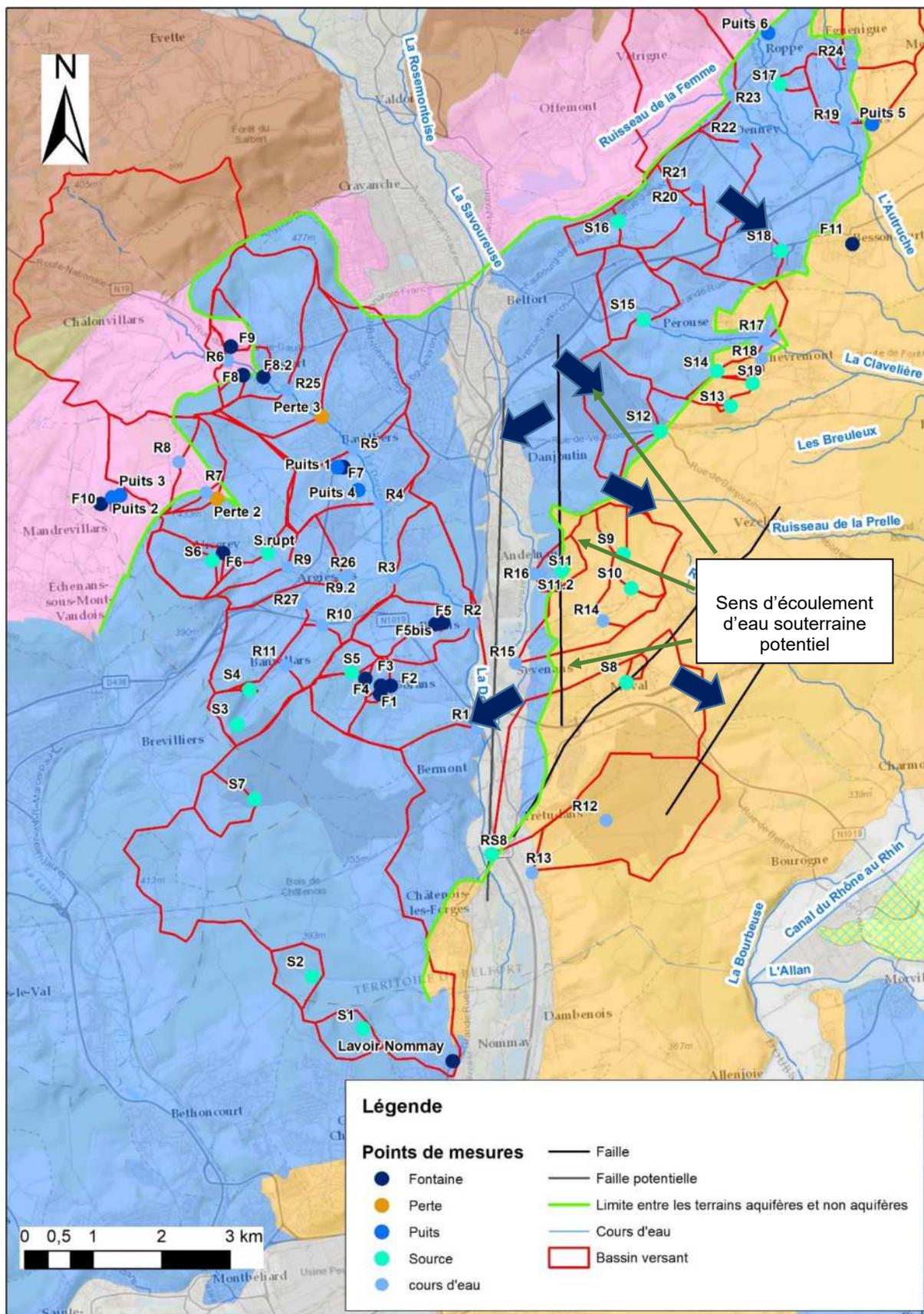


Figure 40 – Présentation des principaux bassins versant et des principales structures géologiques de la zone d'étude

Au regard de ces éléments, la zone à l'Ouest de la Savoureuse semble être la partie présentant le plus fort potentiel en termes de ressources en eau, au droit des calcaires du jurassique affleurant.

#### **4.3.2. Analyse des données de débits à l'Ouest de la Savoureuse**

##### *a) Interprétation générale*

Une analyse plus détaillée des débits mesurés au droit de la rive droite de la Savoureuse, c'est-à-dire, au niveau de la vallée de la Douce et de ses affluents a été entreprise afin de mettre en évidence :

- les variations des débits des cours d'eau entre leur amont et leur aval ;
- les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les débits mesurés sont représentés cartographiquement en Figure 41.

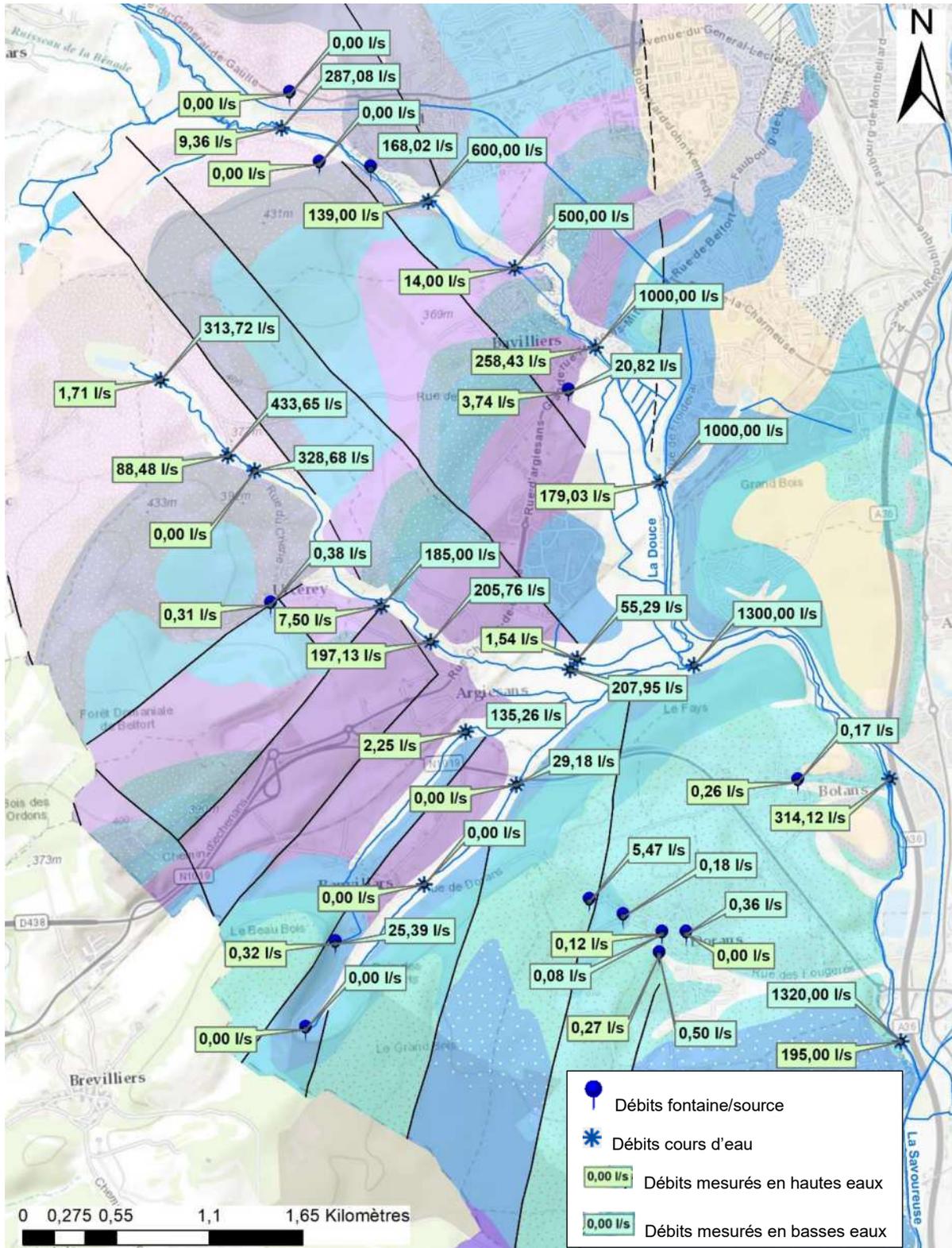


Figure 41 – Cartographie illustrant l'évolution des débits des cours d'eau, des sources et des fontaines entre les basses eaux et les hautes eaux dans la vallée de la Douce

Entre la période des basses eaux et des hautes eaux, les débits mesurés sont très différents avec une évolution nettement à la hausse lors des hautes eaux (Figure 42 et Figure 43).

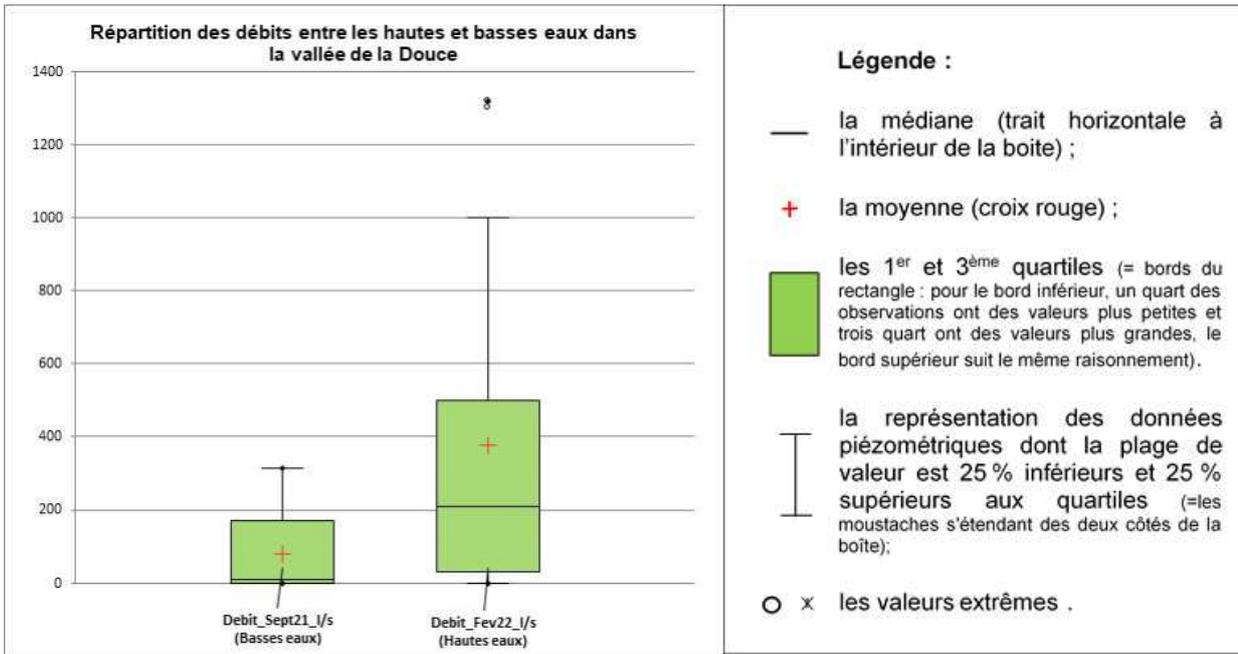


Figure 42 – Graphiques « blocs à moustache » illustrant la répartition des débits entre les basses et hautes eaux

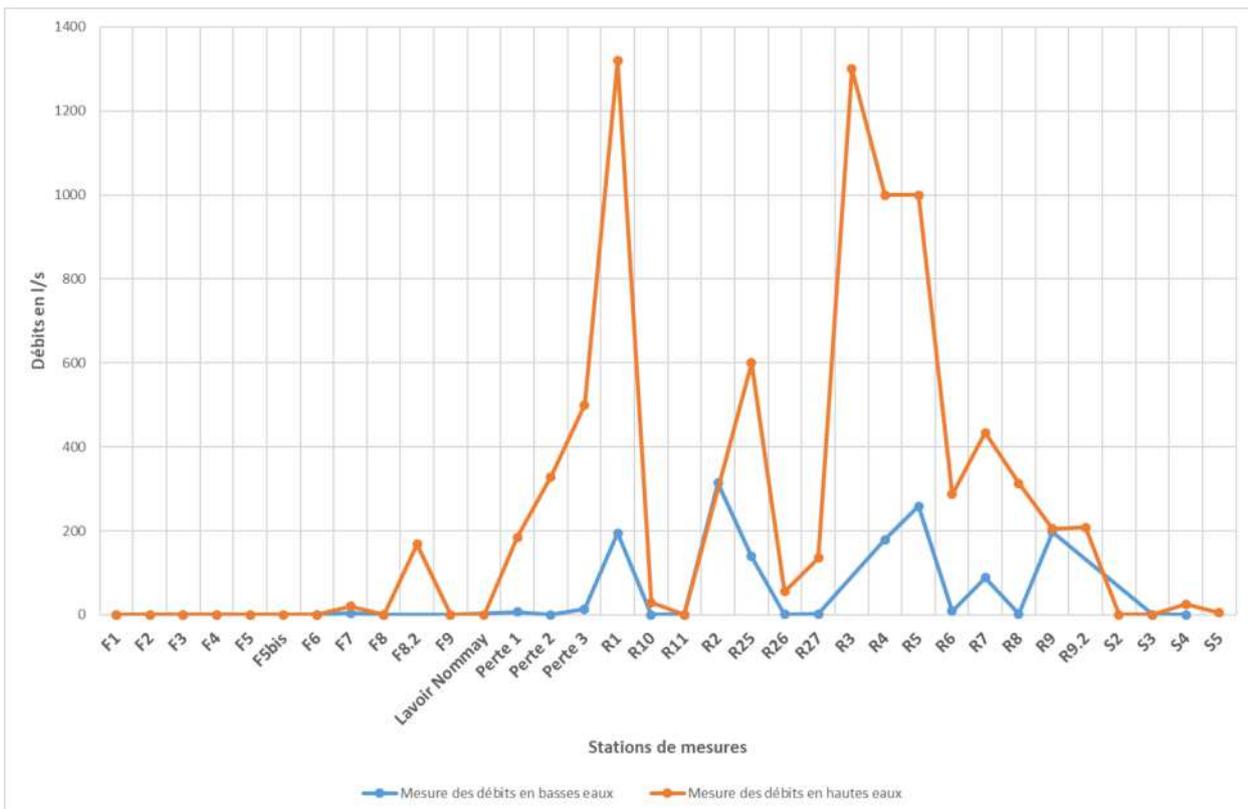


Figure 43 – Graphiques illustrant les différences de débits entre les basses et hautes eaux

Les différences de débits entre les basses eaux et les hautes eaux présentent un facteur proche de 5 pour la rivière de la Douce et de son principal affluent, le Rupt, mais peut être nettement supérieur pour les plus petits cours d'eau ou les fontaines (plus de 10).

Ce constat met en évidence une forte variabilité du fonctionnement de l'hydrosystème au droit de la vallée de la Douce et de ses affluents entre les hautes et basses eaux.

Afin de mieux caractériser ces variations de débits, il a été comparé les données de suivi hydrométrique de la Douce, réalisé par le Conseil Départemental du Territoire de Belfort, avec les données pluviométriques de Météo France (données SAFRAN) afin d'identifier de potentielles relations (Figure 44 et Figure 45).

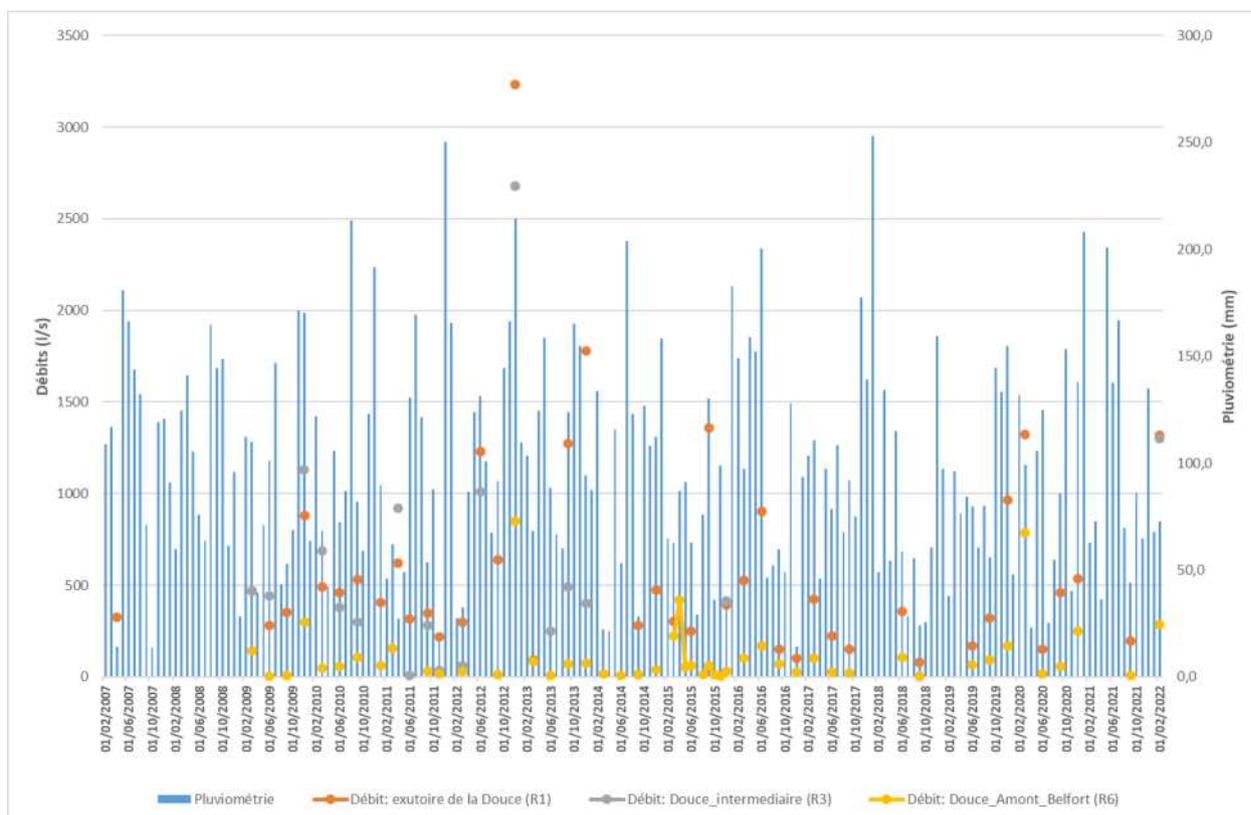


Figure 44 – Graphiques comparant les débits mesurés au droit de la Douce et la pluviométrie

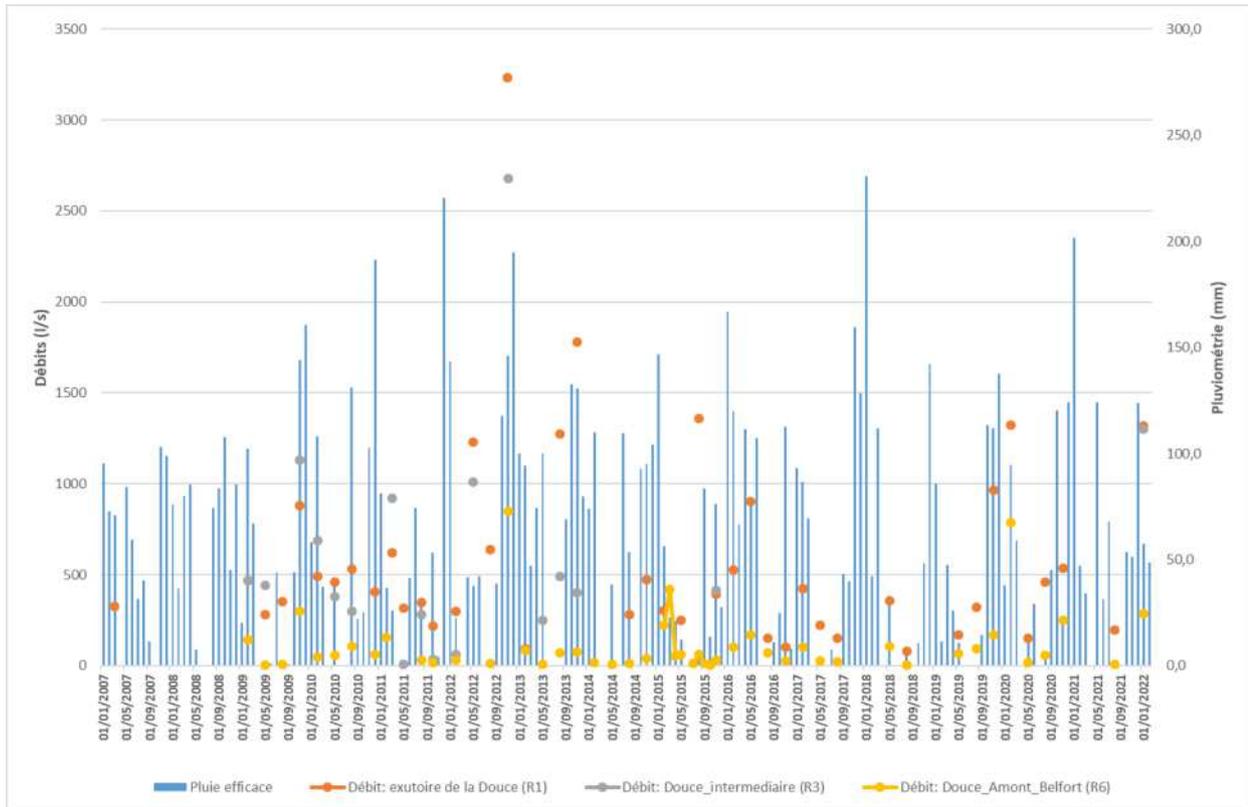


Figure 45 – Graphiques comparant les débits mesurés au droit de la Douce et la pluie efficace

L'observation des graphiques Figure 44 et Figure 45 semble montrer une certaine cohérence entre les périodes pluvieuses et les périodes à forts débits. Cependant, les tests de corrélation réalisés n'ont pas permis de mettre en évidence de correspondances précises entre ces deux variables. Toutefois, il s'avère que la chronique hydrométrique n'est pas assez longue (débute en 2007/2008, avec 4 mesures par an), le nombre de données de débit est trop faible pour réaliser une analyse précise de la relation entre les débits mesurés au droit de la Douce (zone amont, intermédiaire et aval) et la pluviométrie.

Le comportement hydrologique de la vallée de la Douce et de ses affluents semble toutefois proche de ce qui peut être observé au droit des cours d'eau s'écoulant dans les régions karstiques. La complexité du paysage karstique influence de façon importante les écoulements souterrains et de surface (= exutoire) du fait des différentes natures de vides, de leur organisation et des interconnexions entre réseaux. Ainsi, selon les vides par lesquels les eaux s'infiltrent, la vitesse de transfert est plus ou moins rapide (des écoulements lents, qui se produisent au sein des fissures et éventuellement la matrice rocheuse et des écoulements rapides, qui se produisent à travers des conduits).

L'hydrodynamisme du milieu souterrain karstique détermine l'hydrodynamisme des sources et des cours d'eau.

Pour caractériser ces types d'écoulement, il est donc nécessaire d'avoir des suivis à pas de temps réguliers et sur des périodes longues, dont nous ne disposons pas pour cette étude.

Les mesures de débits ponctuelles en basses et hautes eaux sur plusieurs sections le long des cours d'eau ainsi que les mesures de débits de sources permettent quant à elle d'identifier les échanges nappes-rivières.

*b) Interprétation des débits par tronçon de mesures*

Comme indiqué dans le chapitre ci-dessus, dans les milieux calcaires, les cours d'eau sont en relation étroite avec les eaux souterraines. Ils en sont les exutoires via les sources, des lieux d'échanges directs karst-rivière mais également des zones d'alimentation par l'intermédiaire des pertes.

Les jaugeages des cours d'eau sur plusieurs sections, associés à des mesures de conductivité, permettent d'identifier et d'évaluer ces différents échanges.

Les données de débits mesurés au droit des cours d'eau sont représentées en Figure 46 et Figure 47.

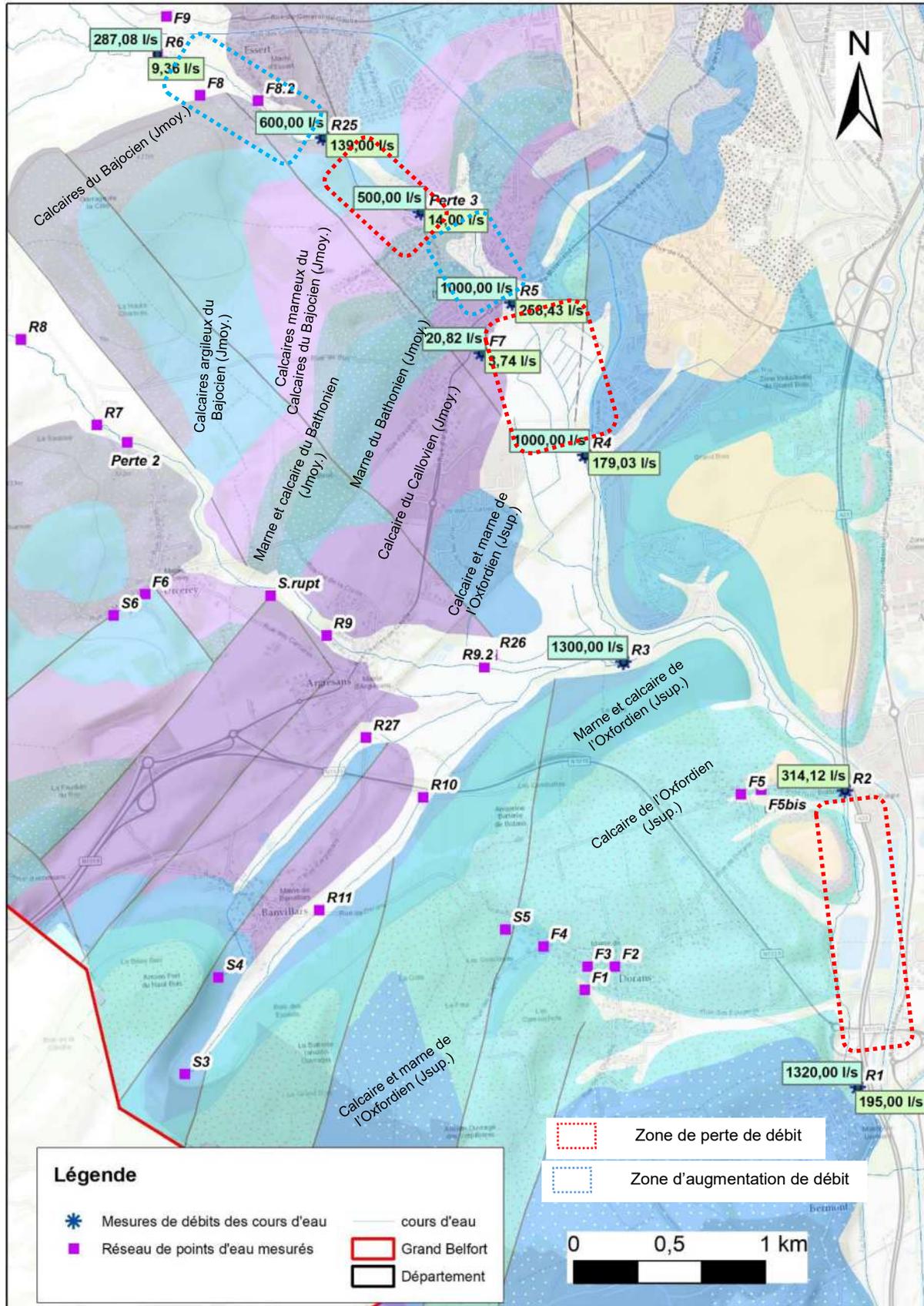


Figure 46 – Zones d'apports et de pertes au sein de la vallée de la Douce

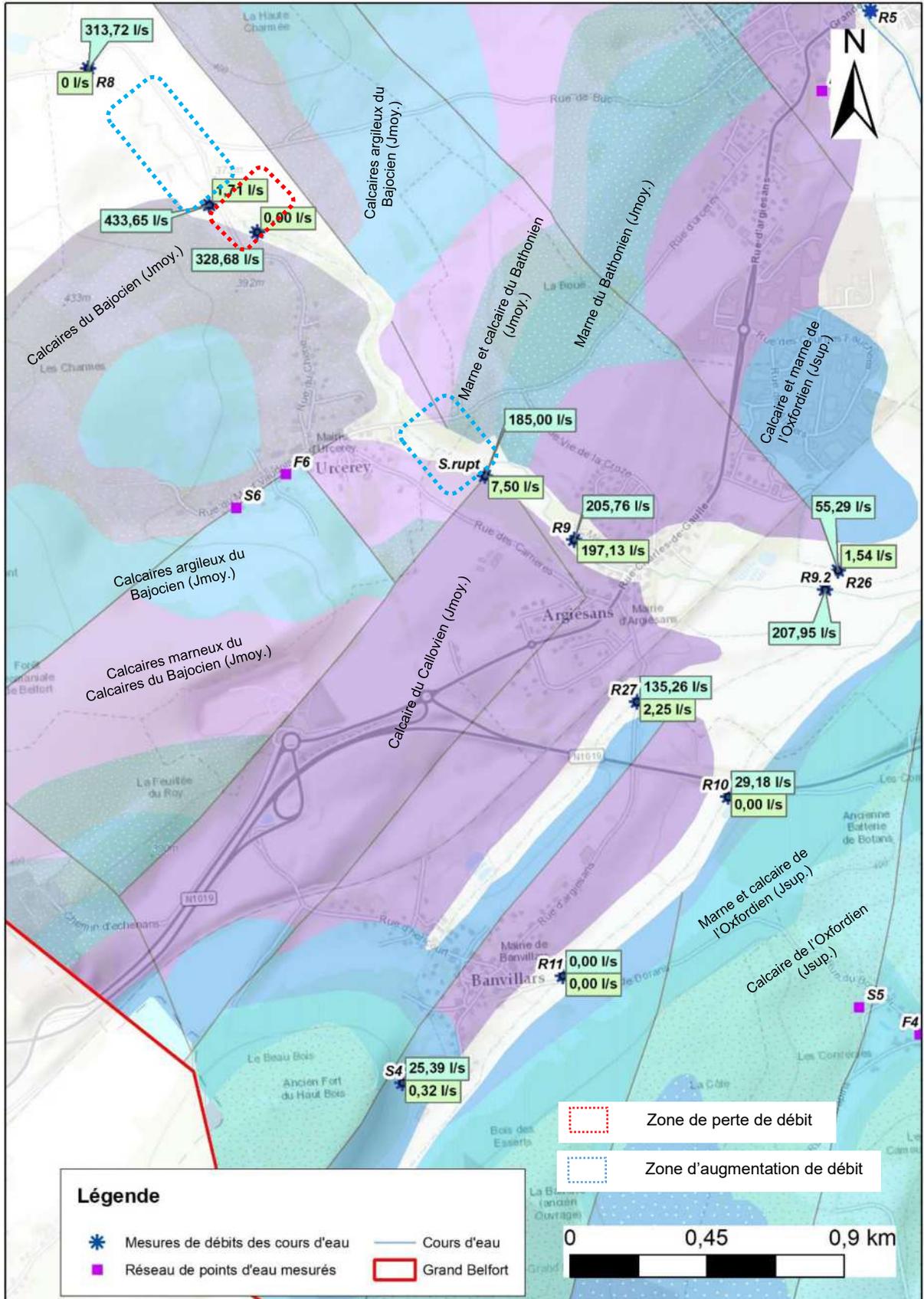


Figure 47 – Zones d'apport et de perte au sein des affluents la vallée de la Douce

Les cartographies ci-dessus montrent que la Douce et son affluent le Rupt présentent, le long de leur tracé, des zones où leur débit augmente significativement ou au contraire baisse significativement. Ces cours d'eau présentent donc des alternances de tronçons avec des pertes et des tronçons avec des apports. Il semble que ces zones de pertes et d'apport suivent une certaine logique au regard de la géologie. Les pertes se situent principalement au niveau des formations calcaires tandis que les zones d'apport se situent principalement au niveau des formations marneuses. Par contre il ne semble pas avoir de corrélation entre ces échanges hydrauliques et l'âge des formations (Jurassique supérieur ou Jurassique moyen).

Les zones de pertes avaient déjà été mises en évidence visuellement (zone d'assec) lors de la campagne des basses eaux (4.2.3). Les résultats des mesures de débits en hautes eaux valident la localisation de ces zones de pertes pour d'autres conditions hydrologiques. Ces zones de pertes sont des zones de recharge potentielle de l'aquifère calcaire sous-jacent aux cours d'eau.

Des augmentations significatives des débits sont également mises en évidence par les mesures de débits sans que celles-ci puissent être expliquées par la présence d'affluents ou de sources. Il semble donc qu'il existe des échanges hydrauliques entre les eaux de surface et les eaux souterraines au droit des cours d'eau de la Douce et du Rupt. Toutefois, cette hypothèse est à prendre avec précaution car ces cours d'eau sont influencés par l'Homme et notamment celui de la Douce qui traverse des zones urbaines. Ces apports d'eau pourraient potentiellement être d'origine anthropique.

L'analyse des données de conductivités permettra de valider ou non cette hypothèse. En milieu calcaire, les apports d'eaux souterraines dans les eaux de surface s'accompagnent souvent par une augmentation de la conductivité des eaux de surface. Les eaux souterraines étant plus minéralisées.

#### **4.3.3. Analyse des données de conductivité électrique à l'Ouest de la Savoureuse**

Pendant les campagnes de mesures de débits, des mesures de la conductivité de l'eau ont été réalisées.

Les données de conductivité mesurées lors de la campagne de hautes eaux est présentée en Figure 48.

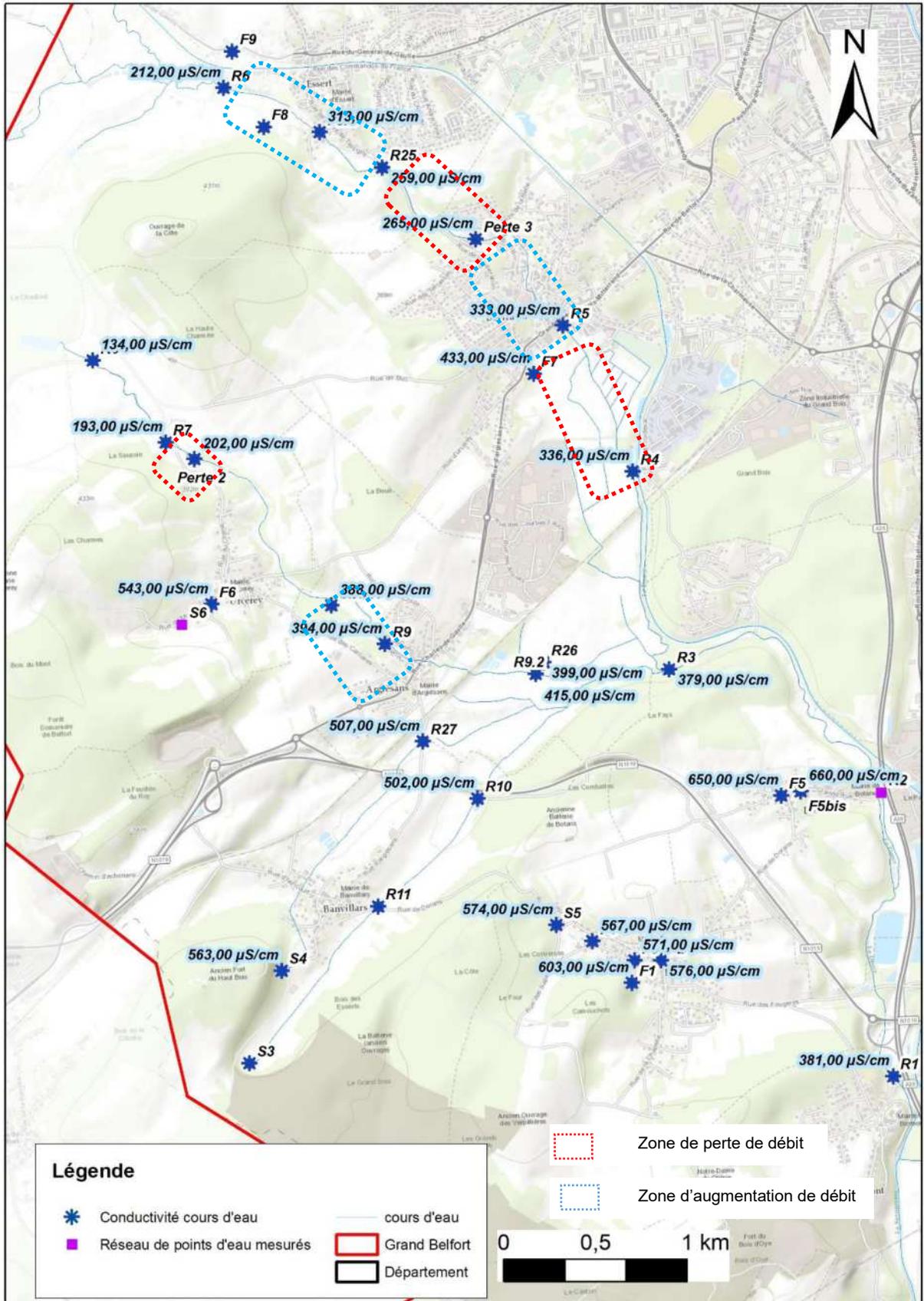


Figure 48 – Représentation cartographique des mesures de conductivité au droit des cours d'eau, sources et fontaines.

Les conductivités mesurées au droit des sources et fontaines, représentatives des eaux souterraines, présentent des valeurs comprises entre 450 et 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , hormis la source F8.2 dont la conductivité est plus faible (313  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Les conductivités mesurées au droit des cours d'eau présentent des valeurs de conductivités variables. Elles sont comprises globalement entre 150 et 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la rivière de la Douce et le ru du Rupt. Les deux rus de Banvillars présentent, quant à eux, des valeurs de conductivité plus élevées autour des 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette différence peut être liée au fait que les rus de Banvillars sont de petite taille et que les points de mesures étaient proche de leur source qui est leur principal apport en eau. Il y a donc peu d'apports d'eau de surface qui pourraient diluer la minéralisation de l'eau.

Pour les cours d'eau de la Douce et du Rupt, les valeurs de conductivité semblent augmenter de l'amont vers l'aval (Figure 49 et Figure 50). En effet, l'amont des cours d'eau de la Douce (la Doucette) et du Rupt présentent des valeurs de conductivité relativement basses avec respectivement 212  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 134  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces valeurs ne sont pas représentatives d'une eau circulant au droit des calcaires car trop faiblement minéralisée. Ces faibles valeurs de conductivité sont liées à la localisation de leur source c'est-à-dire au droit des formations argilo-marneuses du Lias qui sont moins minéralisées. De plus, le ru du Rupt est en partie alimenté dans sa partie aval par l'étang du Paquis et des fossés routiers dont les eaux sont faiblement minéralisées.

Les valeurs de conductivités ont tendance à augmenter une fois que les cours d'eau traversent le substratum calcaire. Sur certains tronçons, la conductivité présente des augmentations nettes. Cela indique vraisemblablement un drainage des aquifères calcaires du Jurassique.

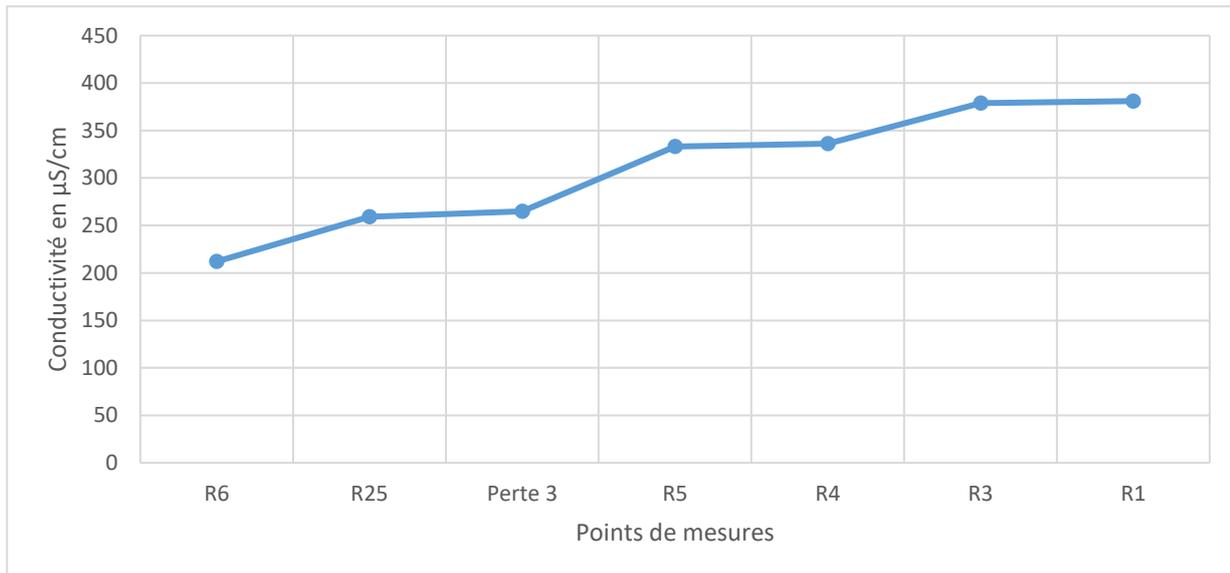


Figure 49 – Evolution de la conductivité au droit de la Douce de l'amont vers l'aval.

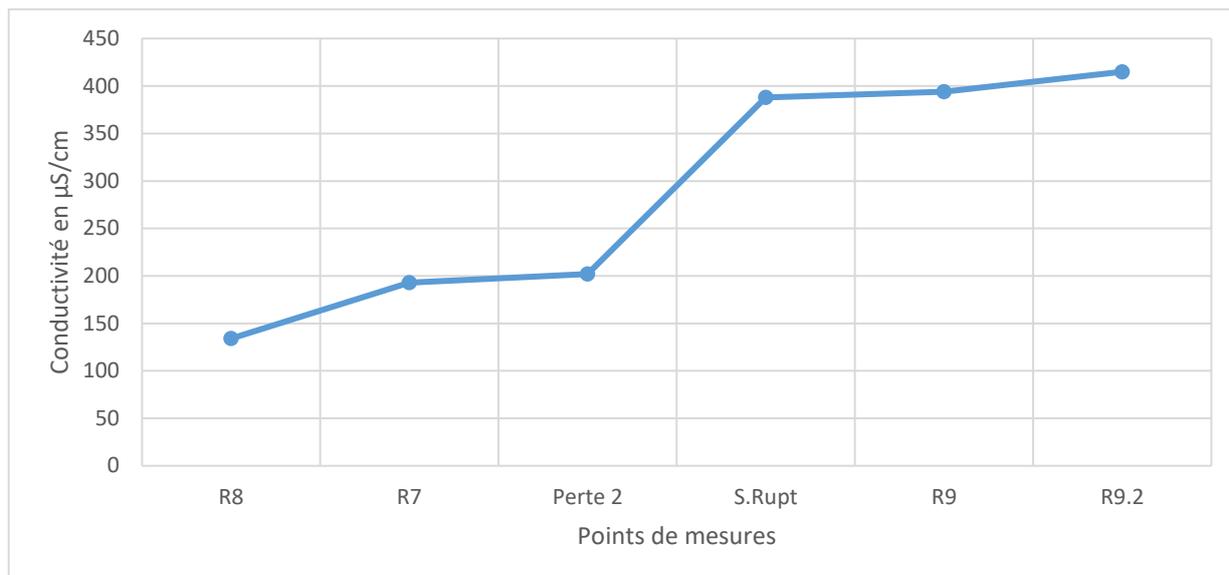


Figure 50 – Evolution de la conductivité au droit du Rupt de l'amont vers l'aval.

Les graphiques en Figure 49 et Figure 50 présentent des sursauts de conductivité au niveau des points de mesures R25, R5 et R3 pour la Douce et les points de mesure R7 et la résurgence S.Rupt (=résurgence du trou Gavoillot) pour le ru du Rupt.

La comparaison des valeurs de conductivité avec les débits (Figure 51 et Figure 52) montre que ces sursauts de conductivité sont corrélés avec les sections de cours d'eau présentant des augmentations de débit.

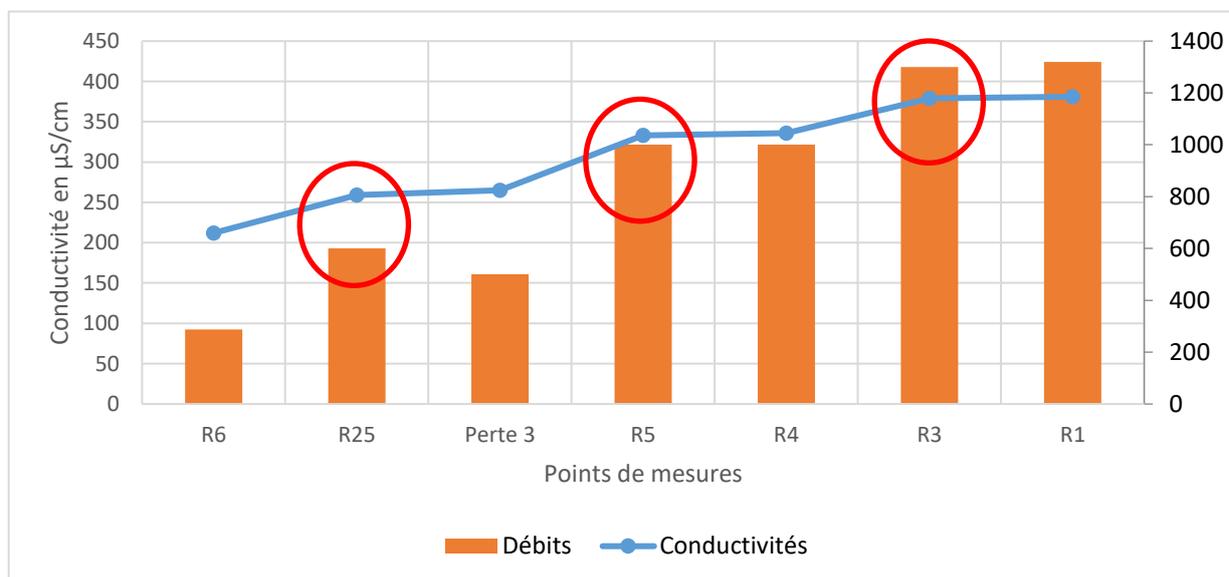


Figure 51 – Evolution de la conductivité et du débit au droit de la Douce de l'amont vers l'aval.

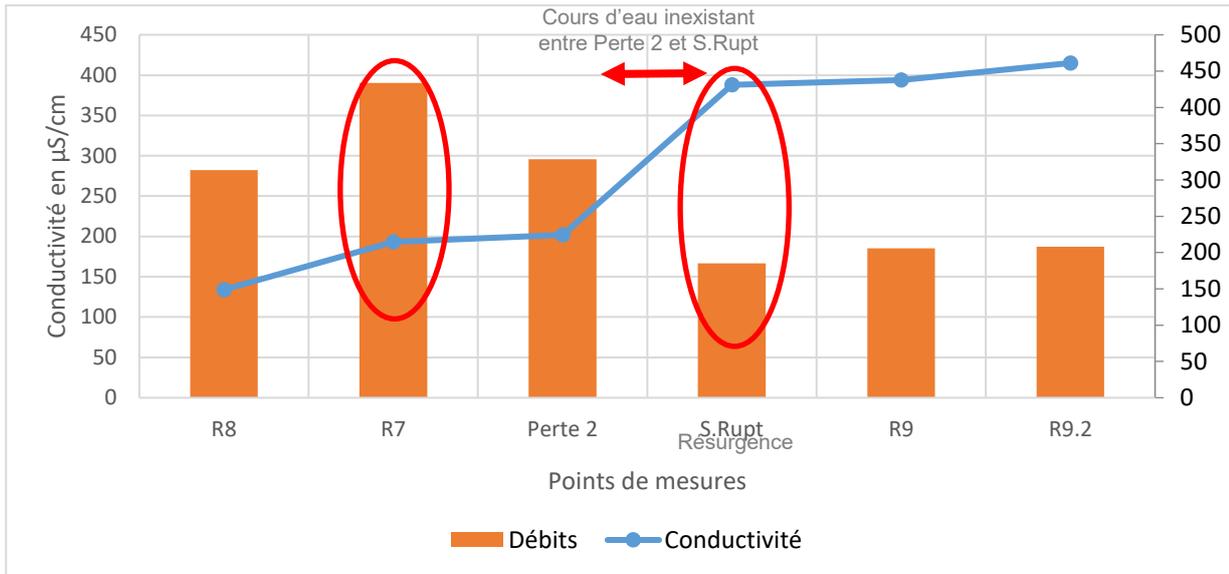


Figure 52 – Evolution de la conductivité et du débit au droit du Rupt de l'amont vers l'aval.

La mise en corrélation de l'augmentation des débits avec l'augmentation de la conductivité semble indiquer que les apports en eau ne proviennent pas d'activité anthropique mais bien de venues d'eaux souterraines (plus minéralisées et donc plus conductrices que les eaux de surface). Ces eaux souterraines participent donc bien à l'alimentation des cours d'eau de la Douce et du Rupt entraînant ainsi une augmentation de leur débit.

#### 4.3.4. Bilan

Les campagnes de mesures au droit des calcaires affleurant, à l'Ouest de la Savoureuse, mettent en évidence un hydrosystème de type karstique qui se caractérise par :

- des variations importantes des débits entre les basses et hautes eaux ;
- des échanges étroits entre les eaux souterraines et les eaux de surface (zone d'apports en eaux souterraines et de pertes d'eau de surface) mis en évidence à travers les mesures de débits et de conductivité.

Ces résultats hydrologiques confirment les observations faites lors de la campagne géologique c'est-à-dire :

- la présence de karst relativement bien développé à l'ouest de la Savoureuse, là où il y a beaucoup d'alternances de zones de pertes et d'apports ;
- que les failles sont des zones préférentielles d'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines favorisant le développement de zones d'échanges nappe/rivière et une recharge du karst profond.

Au regard de ces éléments, il semble que l'axe Banvillars/Argésians/Bavilliers présente un intérêt pour la recherche en eau souterraine au sein des formations calcaires. C'est en effet autour de cette axe que se concentrent les réseaux de failles et les observations de phénomènes karstiques.

Toutefois, le besoin du Grand Belfort est de disposer d'une nouvelle ressource en eau présentant une faible vulnérabilité aux pollutions et aux sécheresses. Au regard des nouvelles

connaissances obtenues, il semble que ces calcaires ne puissent répondre pleinement à ces attentes.

La forte variabilité de l'hydrosystème de la Douce entre les périodes de basses et hautes eaux laisse présager que les nappes dans ces formations calcaires sont fortement impactées par les phénomènes météorologiques et donc par les sécheresses.

Les échanges entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines ont été démontrés, notamment des zones de pertes, ce qui laisse présager une forte vulnérabilité des eaux souterraines (en termes de qualité) par rapport à des impacts anthropiques.

Les nappes circulant au droit de cet aquifère calcaire est donc vulnérable aux sécheresses et aux pollutions.

Il est également probable que les calcaires du Jurassique moyen, qui sont affleurants à l'ouest de la ligne Argiésans-Bavilliers et qui s'approfondissent sous les formations du Jurassique supérieur à l'Est de cette ligne, puissent être le siège d'une nappe d'eau souterraine (cf carte extrait carte géologique, coupe stratigraphique, Figure 3). Cette nappe plus profonde est potentiellement moins sensible aux variations météorologiques. Elle reste toutefois vulnérable aux pollutions de surface due à une aire d'alimentation constituée des calcaires du Jurassique moyen lorsqu'ils sont affleurants et de potentielles échanges hydrauliques avec la nappe des calcaires du Jurassique supérieur sus-jacente via les réseaux de failles (cf : coupe 2, Figure 15).

La nappe profonde circulant au droit de cet aquifère calcaire du Jurassique moyen est donc potentiellement vulnérable aux pollutions.

Malgré le potentiel des nappes des calcaires affleurant et profond à l'Ouest de la Savoureuse, la vulnérabilité de ces aquifères calcaires ne permet pas de répondre complètement aux attentes du Grand Belfort.

Il est donc proposé de continuer la recherche d'une nouvelle ressource exploitable, au droit des calcaires sous couverture.

#### **4.4. CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES CALCAIRES SOUS COUVERTURE**

Les calcaires du Jurassique sous couverture sont situés à l'est du Territoire de Belfort. Ils constituent la continuité des calcaires du Jurassique affleurants. Ces calcaires s'approfondissent en s'enfonçant sous les formations marno-argileuses du Tertiaire d'ouest en est grâce, aux jeux de failles.

Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des calcaires sous couverture sont relativement peu connues.

Toutefois, la campagne géologique de terrain réalisée lors de ce projet a permis d'appréhender globalement la structure des terrains du Jurassique composant le Territoire de Belfort. Ces terrains décrivent une vaste synforme à fond plat de direction SW-NE qui s'est rempli de terrains à dominante argilo-marneuse du Tertiaire. L'axe de cette synforme (point bas du fond plat) correspondrait globalement, en surface, à la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse. Ces

bordures correspondent aux calcaires affleurants observés au niveau des rives de la Savoureuse et en rive sud de la vallée de l'Allaine.

Cette synforme est traversée par plusieurs failles impactant les formations calcaires du Jurassique de direction NS mais également NE/SW. Ces failles sont potentiellement des zones préférentielles d'infiltration et d'écoulements d'eau souterraine. La présence d'eaux souterraines au droit des formations calcaires sous couverture est donc probable mais dépendante de la densité de failles impactant les calcaires. L'axe de la synforme quant à elle pourrait correspondre à l'axe de drainage des eaux souterraines s'écoulant au droit des calcaires sous-couverture.

La nappe des calcaires sous couverture étant relativement profonde, celle-ci présente potentiellement une plus faible sensibilité aux variations météorologiques et donc une plus faible vulnérabilité aux sécheresses que la nappe des calcaires affleurants. Même si probablement la zone de recharge de cet aquifère est principalement sur la zone des calcaires du Jurassique affleurants, une recharge depuis la couverture n'est pas à exclure.

Les formations peu perméables du Tertiaire (Marnes et argiles) recouvrant les calcaires du Jurassique favorisent la protection de la nappe face aux potentielles contaminations de surface. Cette entité hydrogéologique est probablement moins vulnérable aux pollutions de surface.

La cible hydrogéologique, dont le potentiel en eau serait le plus important et la plus pérenne, se situerait donc au droit des calcaires sous couverture à l'intersection des failles NS et NE/SW et dans l'axe de la synforme (axe de drainance horizontale).

La localisation de cette cible hydrogéologique est présentée en Figure 53 et Figure 54.

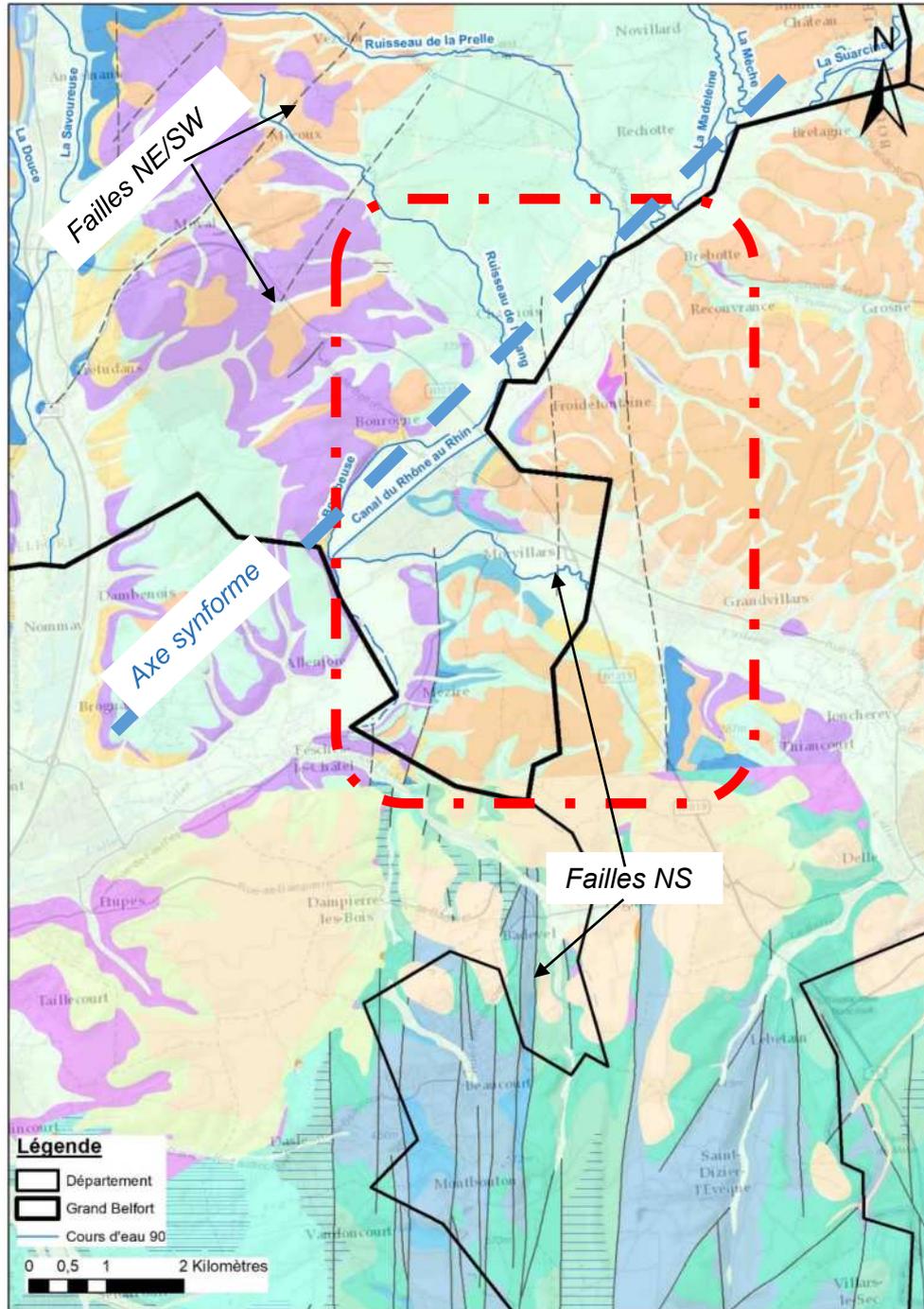


Figure 53 – Localisation de la cible hydrogéologique

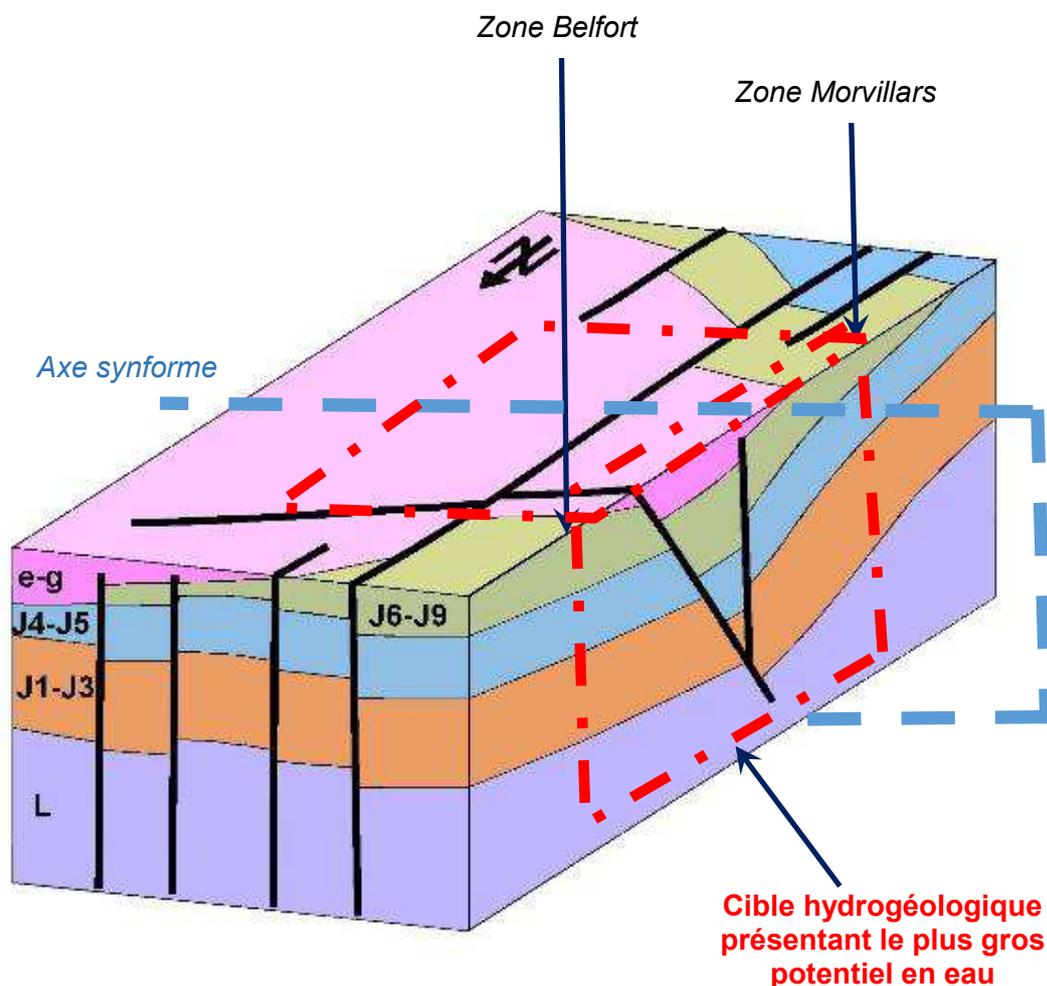


Figure 54 – Localisation de la cible hydrogéologique au droit du diagramme géologique 3D.

Comme indiqué au début de ce chapitre, les calcaires sous couverture ont fait l'objet de très peu d'études. Les entités hydrogéologiques proches de la surface et plus facilement accessibles leur étant préférées. La compréhension de la géométrie et du fonctionnement de cet aquifère reste donc limitée et mérite d'être améliorée à travers une imagerie prospective du sous-sol grâce à des campagnes géophysiques par exemple.

## **5. Proposition de modélisation géologique et de prospections géophysiques**

### **5.1. OBJECTIFS**

Le développement des connaissances du fonctionnement des calcaires du Jurassique sous-couverture doit passer par l'acquisition de nouvelles informations afin de permettre d'identifier plus précisément les grands phénomènes structuraux et tectoniques mis en évidence dans les chapitres précédents :

- représentation de l'organisation des différentes couches géologiques ;
- précision de la structure de la synforme ;
- localisation des réseaux de failles principales et secondaires.

La compréhension du fonctionnement des écoulements souterrains nécessite une meilleure connaissance structurale que peuvent apporter les acquisitions géophysiques et la modélisation géologique dont les résultats souhaités sont :

- Imager par sismique réflexion la géométrie et la structuration des formations géologiques susceptibles d'être exploitées pour la production d'eau potable ;
- Construire un modèle géologique 3D dans le but d'intégrer l'information existante, d'améliorer la compréhension du milieu pour, in fine, proposer avec une meilleure probabilité de réussite des implantations de forage de reconnaissance hydrogéologique.

### **5.2. LA GEOPHYSIQUE PAR SISMIQUE REFRACTION**

#### **5.2.1. Principe**

Les objectifs de profondeur d'investigation et les attentes en termes de connaissances structurales, associées à une complexité évidente de la zone d'étude, positionnent la méthode géophysique « sismique réflexion » devant les autres méthodes géophysiques.

La sismique réflexion consiste à envoyer des ondes acoustiques dans le sous-sol au moyen de sources vibratoires émises par des engins (type camion vibreur). Ces ondes inoffensives de très faible amplitude, largement inférieures aux seuils réglementaires, se propagent dans le sous-sol, remontent à la surface et sont enregistrées à l'aide de capteurs très sensibles. L'analyse précise des signaux enregistrés, permet aux géophysiciens et géologues de reconstruire une image des structures géologiques en profondeur.

#### **5.2.2. Déroulé des profils sismiques**

Le choix d'implantation doit permettre d'identifier les principales structures géométriques et tectoniques identifiées lors de la campagne géologique.

Les réseaux de failles et la structure de la synforme, plus particulièrement son axe doivent être recoupés par ces profils afin de localiser la zone où le potentiel en eau serait le plus important.

Afin de caractériser ces axes structuraux impactant les formations calcaires, la longueur des profils sismiques devra permettre d'atteindre les 300 à 400 premiers mètres de profondeur.

Ainsi, il est proposé de réaliser trois profils dont un d'orientation quasi Ouest—Est (P1) entre les communes de Méziré et de Grandvillars et un autre d'orientation Nord-Ouest – Sud-Est entre les communes de Vézelois et de Grandvillars. L'implantation du troisième profil dépendra des premiers résultats obtenus.

L'implantation prévisionnelle de 2 profils sismiques (sur les 3 prévus), est présentée sur la Figure 55 (carte topographique) et la Figure 56 (carte géologique). Y sont ajoutés les forages/ouvrages présents dans la base de données du sous-sol (BSS).

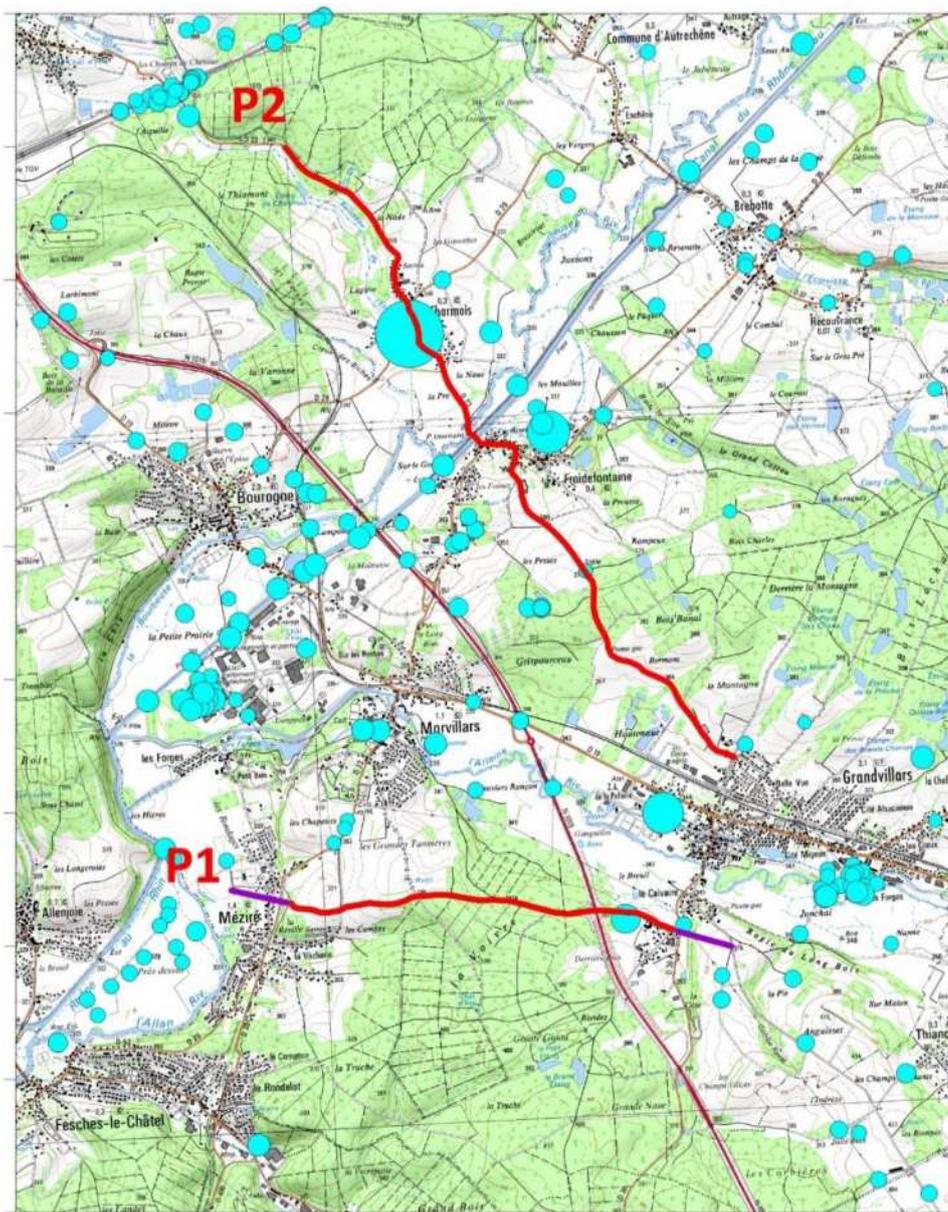


Figure 55 – Implantation prévisionnelle du grand profil sismique sur fond topographique (IGN 1 :25'000). Les ronds bleus sont les ouvrages/forages recensés sur la BSS en fonction de leur profondeur.

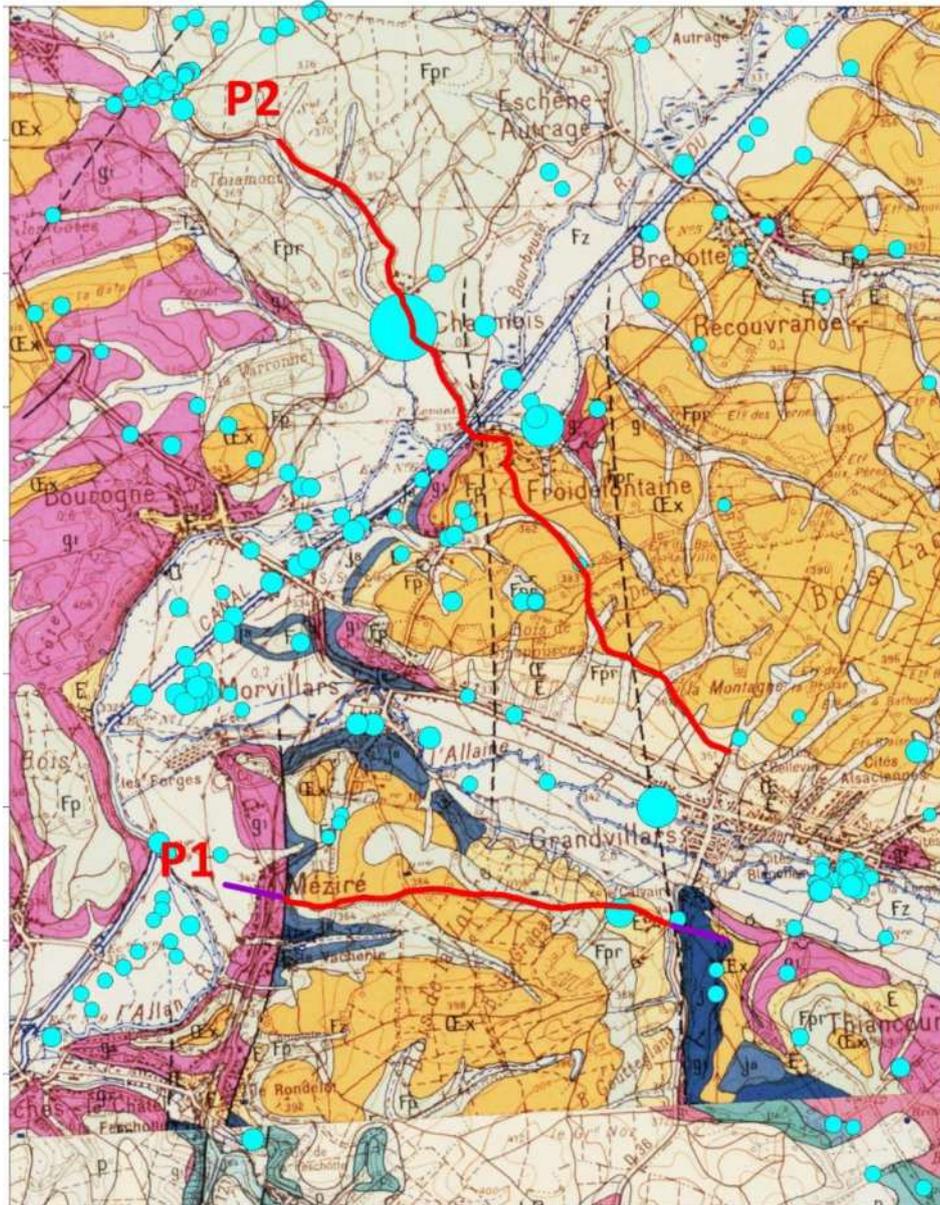


Figure 56 – Implantation prévisionnelle du grand profil sismique sur carte géologique (feuilles Vercel et Besançon, BRGM 1:50'000). Les ronds bleus sont les ouvrages/forages recensés sur la BSS en fonction de leur profondeur.

La position définitive du tracé devra être arrêtée en fonction des facilités d'accès.

### 5.3. MODELE GEOLOGIQUE 3D

#### 5.3.1. Principe

La modélisation géologique 3D est un outil qui permet de rassembler et de synthétiser toutes les données disponibles pour une meilleure représentation réaliste en 3D du contexte géologique.

Son utilité a été démontrée à travers de nombreuses approches qui ont été largement discutées dans la littérature (Calcagno et al. 2008).

Pour être pertinente, une telle modélisation 3D doit s'appuyer non seulement sur l'ensemble des connaissances et des données disponibles pour la zone d'étude (cartes, coupes, modèles de terrain, sondages, etc.) mais également sur une interprétation géologique.

Dans ce modèle pourront être intégrées, dans un même espace 3D, des données provenant de différentes sources (cartes géologique, coupes de forages, résultats géophysique), afin d'assurer une cohérence géométrique de la structure géologique étudiée.

### **5.3.2. Déroulé du modèle géologique 3D**

La réalisation du modèle géologique 3D se déroulera en deux grandes étapes :

- la première étape sera de valoriser les données géologiques acquises lors de ce projet en l'intégrant dans le modèle permettant d'approfondir la compréhension structurale de la zone d'étude. Cette étape permettra de valider ou non l'implantation finale des acquisitions sismiques ;
- La seconde étape sera d'intégrer les résultats des acquisitions sismiques au modèle géologique 3D pour ajuster ce dernier et apporter, le cas échéant, de nouveaux éléments sur la structuration du massif calcaire étudié pour in fine proposer différentes localisations d'implantation de forages de reconnaissance.

## 6. Conclusion

Le Grand Belfort est à la recherche de nouvelles ressources pour renforcer et diversifier sa capacité de production en eau potable, à partir des eaux souterraines.

Suite à l'étude des **Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives** (C.Doney, 2020 - BRGM/RP-70184-FR), les calcaires du Jurassique affleurants et les calcaires du Jurassique sous couverture ont été identifiés comme présentant un intérêt pour l'exploitation en eau potable.

Toutefois, les hydrosystèmes calcaires peuvent avoir des comportements hautement non-linéaires qui sont généralement difficiles à caractériser. La compréhension de leur fonctionnement et l'estimation de leur potentiel en termes d'exploitation pour l'AEP nécessitent l'acquisition de nouvelles connaissances.

Ainsi, il a été proposé de caractériser le contexte géologique et hydrogéologique de ces calcaires du Jurassique à travers la réalisation :

- D'une campagne de terrain géologique au droit des calcaires du Jurassique affleurant et sous-couverture qui a permis de mettre en évidence les points suivants :
  - les failles sont les principales zones de transfert d'eau vertical entre la surface et le milieu souterrain. Une fois en profondeur les eaux circulent horizontalement en suivant l'inclinaison des terrains géologiques. Cette circulation d'eau est à l'origine de l'altération des formations calcaires ;
  - la structure géométrique globale des calcaires décrit une vaste synforme à fond plat. L'axe de la synforme (point bas du fond plat) correspondrait globalement, à la vallée de l'Allan et de la Bourbeuse tandis que les calcaires affleurants (au niveau des rives de la Savoureuse et au sud de la vallée de l'Allaine) en seraient les bordures.
- d'une campagne de mesures de terrain caractérisant la ressource en eau au droit des formations calcaires du Jurassique affleurant. Cette campagne a permis de mettre en évidence que :
  - le potentiel en eau, au droit de ces calcaires affleurants, serait plus important en rive droite de la Savoureuse qu'en rive gauche ;
  - l'hydrosystème est de type karstique. Il est vulnérable aux sécheresses et à d'éventuelles pollutions de surface.

Au regard des attentes du Grand Belfort, qui recherche une ressource en eau de bonne qualité et qui puisse pallier aux éventuels effets de sécheresses sur leurs ressources actuelles, la nappe des calcaires affleurants semble posséder une ressource vulnérable aux variations climatiques et à d'éventuelles pollutions de surface.

Il est donc recommandé de continuer les recherches au droit des calcaires sous couverture, dont la nappe est mieux protégée face aux effets de la sécheresse et face aux pollutions de surface. Les données géologiques obtenues indiquent que la zone la plus intéressante se situerait au croisement entre les réseaux de failles N-S et NE-SW et l'axe de la synforme (axe de drainage potentiel des eaux souterraines). Pour pouvoir implanter un forage dans cette zone, il est nécessaire d'affiner l'analyse structurale du sous-sol à l'aide de prospections géophysiques et d'une modélisation 3D.



## 7. Bibliographie

- Bailly C., Chauve P. et Martin J. (1985) - carte géologique de Delle à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Chauve P., Martin J. et Bailly C. (1985) - Notice explicative de la feuille de Delle à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Contini D., Boullier A. et Morin D. (2000) - Notice explicative de la feuille de Lure à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Contini D., Creuzot J., Dressler M., Théobald N. (2000) – carte géologique de Lure à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Doney C. avec la contribution de Neveux A. et Brugeron A. (2020) – Connaissances de la ressource en eau souterraine du Grand Belfort et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-70184-FR
- Dörfliger N. (2010) : Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes ; BRGM RP- 58237-FR
- Edel J.B., Lutz H., Elsass P. (2002) - Socle varisque et tectoniques rhénanes dans le Fossé rhénan supérieur méridional : traitement et interprétation de la carte gravimétrique du fossé à partir du levé haute densité des MDP. Géologie de la France, n°3, p. 43-59.
- Jauffret D. (1996) – Identification des ressources en eaux souterraines profondes du Sud-Est du Territoire de Belfort - BRGM/RR-38976-FR ;
- Kerrien Y., Contini D., Kuntz G., Angely B., Laffly J.L., Kerrien Y., Landry J., Théobald N. (1972) - carte géologique de Montbéliard à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Kerrien Y., Contini D., Kuntz G., Angely B., Laffly J.L., Kerrien Y., Landry J., Théobald N. (1972) - Notice explicative de la feuille de Montbéliard à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.
- Calcagno P., Chilès JP., Courrioux G., Guillen A. (2008) - Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I – Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules
- Pascoletti Y., Chapuis H. (2022) - Connaître et quantifier les échanges hydrauliques Karst / Rivière – Recommandations méthodologiques – Retour d'expérience d'études menées sur les gorges de la Ceze (30)
- Odent B.E. (2006) – Inventaire départemental des cavités souterraines et des mouvements de terrain du Territoire de Belfort – Rapport d'avancement – BRGM/RP-54626-FR, 37 p., 3 ill., 1 ann.
- Rosenthal P. (2007) - Le Territoire de Belfort : Cadre géologique et géographique. Trafics et transits entre Vosges et Jura. Musée(s) de Belfort, 10-16p.
- Théobald N. Devantoy J. (1963) – carte géologique de Lure à 1/50 000. Editions du BRGM, Service géologique National.



# ANNEXE

## **Annexe 1 Résultats des campagnes de mesures**

(Tableur Excel ci-joint)





*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale Bourgogne – Franche-Comté**

Adresse : 27 rue Louis de Broglie – 21000 Dijon

Tél. : 03 80 72 90 40

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

