

HYDROGÉOLOGIE / KARST

Étude hydrogéologique d'aménagement en milieu karstique

Projet d'aménagement quartier Polygones
25000 Besançon

Octobre 2022

D2021-081

Références dossier

Nom du dossier	Etude hydrogéologique d'aménagement en milieu karstique – Quartier Polygones, 25 000 Besançon
Réf. dossier	D2022-081
Client	Grand Besançon Métropole

Contrôle qualité

Version	Date	Rédacteur	Vérificateur	Commentaires
01	27/10/2022	REILÉ Benoît	-REILÉ Pascal	Version 01

Liste de diffusion

Nom destinataire	Organisme/Société	Nom destinataire	Organisme/Société
Mr FIORI	GBM		
Mr OBIN	GBM		



Villa Saint Charles
25720 BEURE
Agglomération du Grand Besançon
tel : + 33 (0)3 81 51 89 76
fax : + 33 (0)3 81 51 27 11
mail : pascal.reile@cabinetreile.fr

Études / Réhabilitation de sites pollués

Décharges
Analyses de toxicité
Pollution de nappes
Études simplifiées des Risques
Sites industriels
Détail des risques

Reconnaitances géologiques

Géologie d'exploration
Forages d'exploration & production
Ressources naturelles
Géomorphologie
Énergies renouvelables
Risques naturels
Géothermie
Géophysique
Expertise du Karst
Topographie souterraine

Milieu naturel / Milieu piscicole

Réhabilitation de cours d'eau
Continuité écologique
Hydrobiologie
Plans d'eau
Qualité de l'eau
Tourbières

Assainissement

Étude STEP
Lagunage
Assainissement individuel
Carte de zonage

Hydrogéologie, Ressources en eau potable

Développement des ressources
Traçages hydrogéologiques
Études et suivis de forages
Essais de pompage
Vulnérabilité des eaux souterraines
Spécificité des ressources en milieu karstique
Périmètres de protection

Hydro-électricité & Hydraulique

Aménagements hydrauliques
Modélisation des écoulements
Étude d'inondabilité
Réhabilitation d'ouvrage en rivière
Gestion de barrages
Passes à poissons

Législation de l'environnement

Dossiers d'incidence Loi sur l'Eau
Études d'impacts
Déclaration d'utilité publique
Déclaration d'intérêt général
Plan de prévention des risques d'inondation
ICPE



SOMMAIRE

1. Contexte général du projet.....	5
1.1. Localisation du projet	5
1.2. Description générale du projet	5
2. Occupation des sols.....	7
2.1. État actuel	7
2.2. Évolution de l'occupation des sols (étude diachronique).....	9
3. Méthodologie générale.....	11
4. Contexte géologique & hydrogéologique	12
4.1. Contexte géologique	12
4.2. Contexte hydrogéologique	22
5. Caractérisation de l'aléa karstique	56
5.1. Investigations géotechniques.....	56
5.2. Inventaires existants de l'aléa	58
5.3. Diagnostic soutirages.....	60
5.4. Diagnostic dépression/doline	66
5.5. Analyse de densité des indices karstiques	70
5.6. Diagramme décisionnel de l'aléa karstique	71
5.7. Zonage proposé de l'aléa karstique et des contraintes additionnelles d'aménagement	72
6. Préconisations/Prescriptions.....	75
6.1. Constructibilité.....	75
6.2. Gestion des Eaux Pluviales	77
TABLE DES MATIÈRES.....	80
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	83
ANNEXES.....	86



Préambule

Le sous-sol calcaire du massif du jura est par nature sujet à la karstification et donne lieu à l'organisation d'importantes circulations d'eaux souterraines.

La karstification du sous-sol est un phénomène continu qui peut donner lieu à des désordres en surface par la formation d'affaissements ou de cavités franches.

L'identification de tels désordres nécessitent un diagnostic hydrogéologique, et la prescription d'investigations géotechniques complémentaires si des infrastructures à risque devaient se trouver à proximité.

La présente étude permet de caractériser l'aléa karstique du quartier Polygones à Besançon afin d'adapter les aménagements projetés.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 4/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

1. Contexte général du projet

1.1. Localisation du projet

Le projet se localise sur la commune de Besançon (25000), préfecture du département du Doubs, en région Bourgogne-Franche-Comté (Cf. Figure 2).

Il se situe au nord-est du quartier de Saint-Ferjeux, sur des anciens terrains militaires, dans le quartier dit « Polygones » à l'adresse complète suivante.

Tableau 1 – Adresse complète du projet et parcelles cadastrales

Adresse complète	Avenue Clémenceau, 25000 Besançon
Parcelles cadastrales	204, 280, 282, 171

1.2. Description générale du projet

La métropole souhaite aménager ce secteur d'environ 9 ha situé entre la rue de Dole au sud et l'avenue Clémenceau au nord par un mixte de logements d'habitation.



Collectifs
R+4 - R+3+a



Intermédiaires
R+2

(photo-montage étude ECR)



Maisons de ville
R+1



Figure 1 – Plan général du projet présenté par le Maître d'Ouvrage

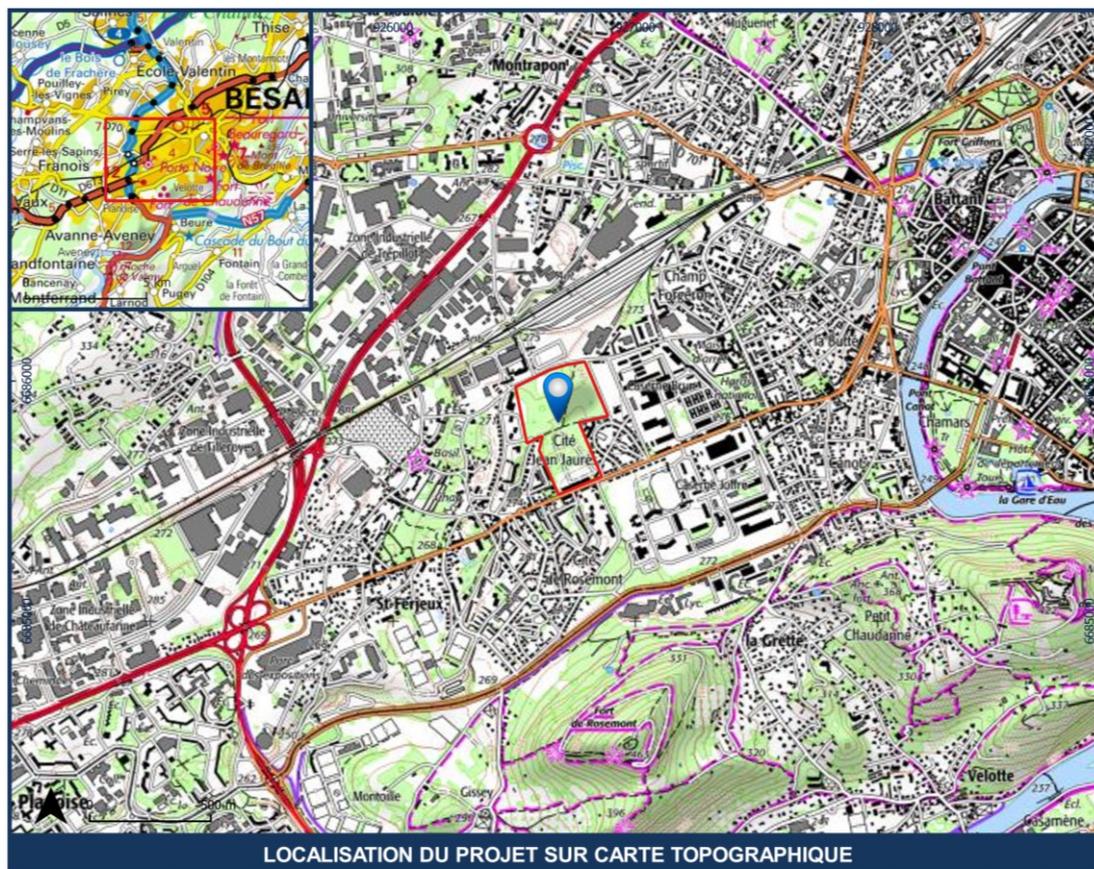


Figure 2 – Localisation sur plan topographique et plan cadastral

2. Occupation des sols

2.1. État actuel

L'occupation des sols actuelle des parcelles correspond à des friches et de boisements, issus d'une reconquête naturelle d'anciens espaces aménagés, notamment dans la partie nord de la parcelle (Cf. Figure 3).

Des anciennes plateformes de bâtiments/parking subsistent dans le secteur sud, et un bâtiment en état borde la limite sud de parcelle le long de la rue de Dole.

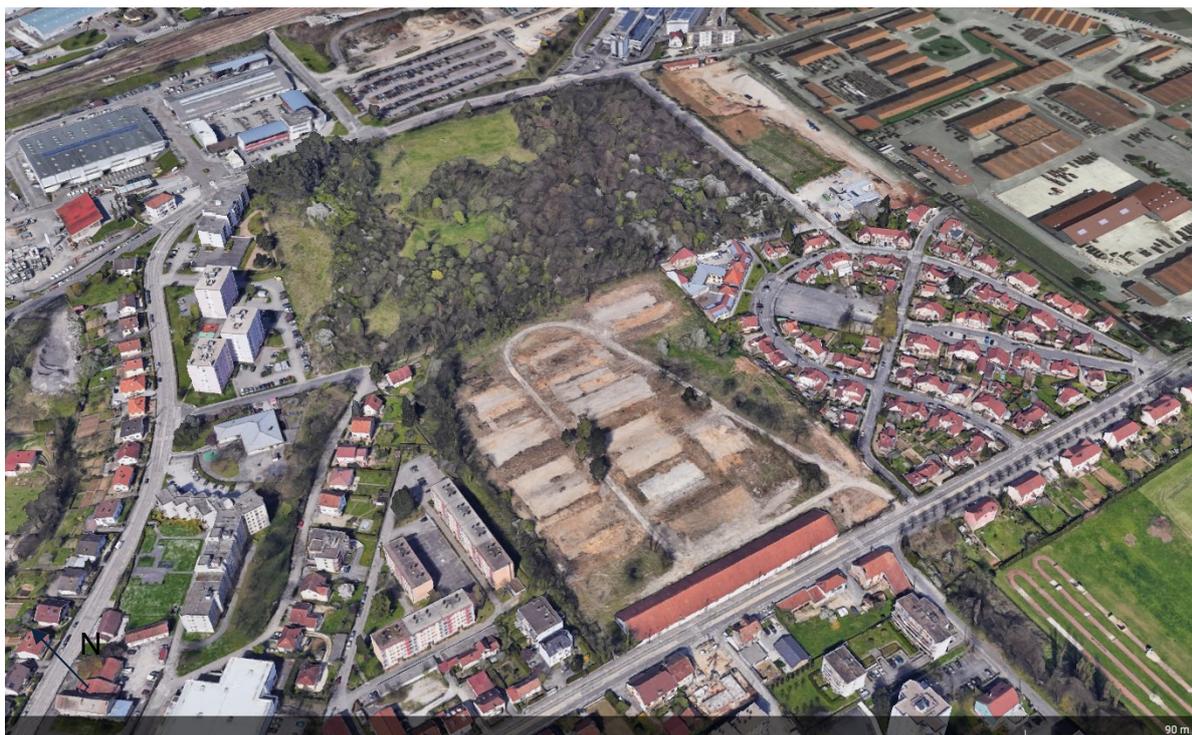


Figure 3 - Vue générale de la parcelle concernée par le projet (Google Earth)

Des prises de vues géoréférencées ont été réalisées à la page suivante pour mieux appréhender l'environnement général du projet (Cf. Figure 4, p 8).



PHOTO N°1



PHOTO N°2



PHOTO N°3



CARTE DE LOCALISATION DES PRISES DE VUE

Figure 4 – Photographies de l'environnement général du projet

2.2. Évolution de l'occupation des sols (étude diachronique)

A l'exception de la destruction des bâtiments dans le secteur sud et d'une mise en dépôts de déchets ménager dans le secteur nord, l'occupation des sols de la parcelle a été relativement peu modifiée depuis 80 ans au regard de l'évolution de l'agglomération de Besançon durant toute cette période.

Les photographies aériennes ne permettent pas d'identifier la présence de dépressions (apparentées à des possibles dolines), ou de soutirage.

Tableau 2 - Évolution de l'occupation des sols de la parcelle concernée par le projet d'aménagement

Année	Occupation des sols
1940	Parcelle Nord à l'état naturel excepté route d'accès NE-SW Parcelle sud aménagée par bâtiments militaires Carrière dans secteur Nord-Est avec front de taille en limite de propriété
1984	+ extension du front de taille de la carrière dans le secteur Nord-Est, remblayé + décharge de déchets dans le secteur Nord entre l'ancienne route d'accès NE-SW et le front de taille de l'ancienne carrière + extension/modification de bâtiments dans secteur sud
2020	+ végétalisation des dépôts de la décharge et de l'ancienne route d'accès NE-SW + destruction des bâtiments secteurs sud à l'exception du bâtiment actuel longeant la rue de Dole en limite sud de la parcelle. + végétalisation des plateformes des anciens bâtiments détruits.



Figure 5 – Étude diachronique sur photographies aériennes

Étude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081	Grand Besançon Métropole	Page 10/91

3. Méthodologie générale

Le diagnostic de l'aléa karstique repose sur l'analyse des différentes données disponibles et à la définition de l'aléa karstique selon les 9 critères d'analyses de l'arbre décisionnel suivant.

Tableau 3 – Description des critères de l'arbre décisionnel de l'aléa karstique

CRITÈRES	CONCLUSIONS des différentes investigations et critères
LITHOLOGIE	<u>Contexte karstique</u> : Est-ce que le projet se situe sur une lithologie favorable au développement karstique ? S'agit-il d'une karstification de surface ou sous-couverture ?
HYDROGÉOLOGIE & VULNÉRABILITÉ Infra. > Karst Karst > Infra.	<u>Karstogénèse</u> : Est-ce qu'une karstification avérée est identifiée au droit du projet ou à sa proximité par la présence d'indices endo-karstiques (cavités), d'exutoires karstiques (sources) ?
	<u>Vulnérabilité</u> : Est-ce que l'aquifère constitue une ressource en eau vulnérable par son exploitation pour l'alimentation en eau potable, ou d'autres usages sensibles ?
	<u>Piézométrie</u> : Est-ce qu'un aquifère est présent avec une piézométrie susceptible de compromettre le projet de construction par remontée de nappe ?
INDICES KARSTIQUES INVENTAIRE & CARACTÉRISATIO	<u>Inventaire(s)</u> : Quel aléa karstique est défini pour la parcelle du projet dans les bases de données publiques ?
	<u>Dépressions & Dolines</u> : Est-ce que le projet se situe sur une parcelle présentant une dépression topographique dans l'état actuel ou passé ? Est-ce que les phénomènes identifiés caractérisent la présence avérée d'une doline (indice karstique) ?
	<u>Soutirages & Affaisements</u> : Est-ce que le projet se situe sur une parcelle présentant un soutirage ou affaissement dans l'état actuel ou passé ? Est-ce que les phénomènes identifiés caractérisent la présence avérée d'un indice karstique ?
	<u>Densité d'indices</u> : Quelle est la densité d'indices karstiques dans le secteur du projet ? Quel aléa est lié à cette densité apparente ?
ACTIVITÉS D'AFFAISSEMENT & HYDRAULIQUE	<u>Géotechnique</u> : Est-ce que l'indice karstique présente une activité d'affaissement observable en surface ou en profondeur, actuel ou passé ? Est-ce que les investigations géotechniques ont mis en évidence des indices de karstification ou de décompaction localisées ?
	<u>Ruissellement</u> : Est-ce que l'indice karstique présente des signes d'activités de concentration des écoulements ?
	<u>Rétention/Infiltration</u> : Est-ce que l'indice présente des signes de rétention ou d'infiltration des eaux ?
	<u>Ouvrage hydraulique</u> : Est-ce que l'indice karstique ou ses abords présente un aménagement pour la gestion hydraulique des écoulements/infiltrations ?
DÉFINITION ALÉA KARSTIQUE	Conclusion des différents critères et définition de l'aléa karstique.

4. Contexte géologique & hydrogéologique

4.1. Contexte géologique

4.1.1. Contexte général

Le projet se localise dans le secteur Est de la carte géologique de Besançon (n°502, 1/50000, BRGM).

Le projet se développe sur l'unité structurale du plateau de Besançon (Cf. Figure 6). Il s'agit d'une structure monoclinale (non plissée) possédant un léger pendage vers le sud. Cette unité est encadrée par deux secteurs fortement plissés caractérisés par le faisceau de Besançon et le faisceau des Avant-Monts. Le plateau de Besançon est composé principalement des calcaires du Bajocien et du Bathonien, surplombant les marnes du Trias et du Lias (Jurassique inférieur). Ces niveaux marneux de nature imperméables sont intercalés par des niveaux perméables de faible puissance (grès du Rhétien) et des bancs calcaires continus qui peuvent être le siège de circulations karstiques (dolomie, calcaires à Gryphées). Des sources peu importantes proviennent de ces niveaux, mais en général le toit marneux constitue un niveau de base imperméable pour les calcaires du Jurassique moyen.

D'après la carte géologique de Besançon (Feuille n°502 - BRGM), le projet se situe sur les formations du Bathonien (j2), qui se caractérisent par des calcaires massifs micritiques et orientés selon un pendage sub-tabulaire. La présence de marnes de Champforgeron et de formations d'alluvions anciennes de l'Aar-Doubs n'est pas à exclure.

Le secteur se situe à l'ouest d'une faille supposée méridienne d'axe NNE-SSW se développant entre le quartier de Saint-Claude et le secteur de la Malcombe.

D'après les levés structuraux les plus proches réalisés par P.Rolin (université de Franche-Comté), les formations calcaires présentent un pendage de 5° orienté vers le NW (N85-5°NW), mesuré sur l'affleurement calcaire de la Malcombe.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 12/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

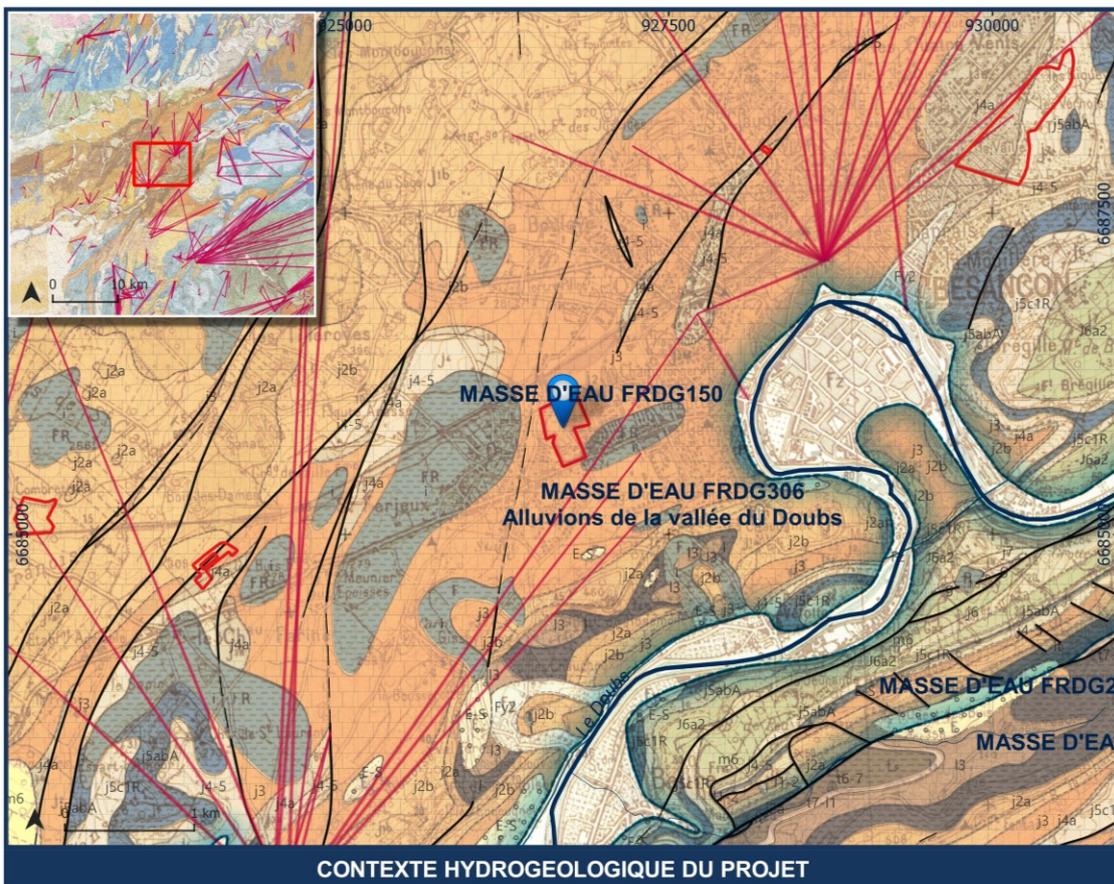
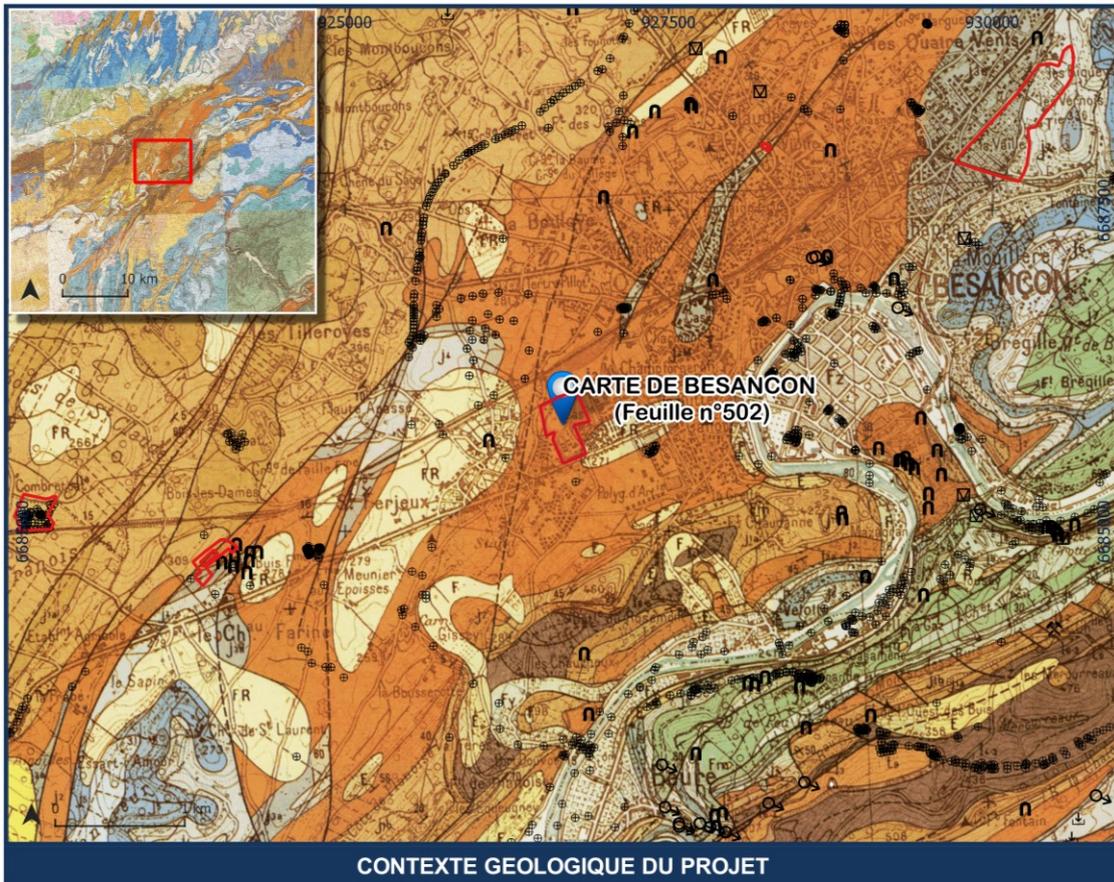


Figure 6 – Contexte hydrogéologique du site étudié

4.1.2. Investigations complémentaires de terrain

4.1.2.1. Levés structuraux de surface

Des levés structuraux complémentaires (5 levés) ont été réalisés sur les affleurements calcaires situés dans le secteur nord-ouest de la parcelle entre la Rue de l'abbé Grégoire et l'avenue Clémenceau.



Figure 7 - Photographie de l'affleurement calcaire Rue de l'Abbé Grégoire (front ancienne carrière)

L'ensemble des levés confirme le pendage sub-tabulaire des calcaires du Bathonien (j2) avec un léger pendage d'environ 2 à 6° à orientation globalement Est-Nord-Est (N150-5°NE). Les différents levés sont annotés dans la cartographie de l'altitude du toit du substrat calcaire par interprétation des données géophysiques (Figure 11, p20).

4.1.2.2. Investigations géotechniques (fouilles à la pelle & forages)

Les études géotechniques ont nécessité la réalisation des investigations suivantes :

- 21 fouilles à la pelle (PM1 à PM21) jusqu'à des profondeurs maximales de 4.00 mètres
- 2 piézomètres (PZ1 et PZ2) jusqu'à des profondeurs d'environ 50 mètres

4.1.2.2.1. Fouilles à la pelle

L'ensemble des fouilles n'ont pas permis d'atteindre le substrat sous-jacent, mais uniquement les formations de recouvrement (remblais anthropiques avec déchets, formations superficielles d'argiles de décalcification).

Les coupes des fouilles démontrent un niveau d'anthropisation très hétérogène avec des niveaux de remblais variés et déchets atteignant jusqu'à 4.0 mètres de profondeur.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 14/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

	BESANCON (25) Renouvellement urbain du quartier Polygone Ville de Besançon	(Contrat 2501466)
	Date : 22/11/2021	Machine : Pelle mécanique

1/20

Forage : PM14

EXGTE 3.22/GTE

Prof. (m)	Lithologie	Eau	Outil	Tenue des parois	Photo
0	Terre végétale argileuse 0,10 m				
	Argiles beiges à éléments calcaires 0,40 m				
	Enrobés 1,00 m				
1					
2	Sables argileux noirâtres à cailloux calcaires et éléments anthropiques (blocs béton)		Pelle mécanique	Médiocre	
3					
4			4,00 m		

Figure 8 - Illustration de la fouille à la pelle en milieu anthropisé (PM14, ECR)

4.1.2.2.2. Piézomètres

La réalisation des piézomètres PZ1 et PZ2 a permis de faire le levé complet de la stratigraphie au droit du projet (Cf. Figure 9 et Figure 10 des pages suivantes).

Les coupes de sondage démontrent la présence d'importantes épaisseurs d'argiles de décalcifications qui paraissent anormales au regard de la connaissance du secteur, ainsi que la présence d'indices forts de karstification caractérisés par des remplissages argileux d'échelle métrique au sein des formations calcaires.

Les coupes de sondages présentent la succession lithostratigraphique suivante :

- Formations de remblais de 0.0 à 1.50 m
- Niveaux hétérogènes d'argiles de décalcification :
 - de 1.5 m jusqu'à 18.0 m sur PZ1
 - de 1.4 m à 2.20 m sur PZ2
- Calcaires :
 - PZ1 de 18.0 m à 51.4 m avec niveaux karstifiés et remplissages argileux de 32.3 m à 33.8 m (ép. : 1.5 m), et de 37.2 m à 42.8 m (ép. : 5.6 m)
 - PZ2 de 2.20 m à 50.0 m avec niveaux karstifiés et remplissages argileux de 7.8 m à 10.3 m (ép. : 2.5 m), et de 21.1 m à 26.2 m (ép. : 4.9 m)

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Lithologie »

KARSTIFIABLE : les terrains sous-jacents sont composés de calcaires favorables au développement karstiques, sous-couverture de formations d'argiles de décalcification.

	BESANCON (25) Renouveau urbain du quartier Polygone Ville de Besançon	Contrat 2501466
	Date : 15/11/2021	Machine : ECOFORE CE 403

1/150 Forage : PZ1 EXGTE 3.22/LB2EPF580FR

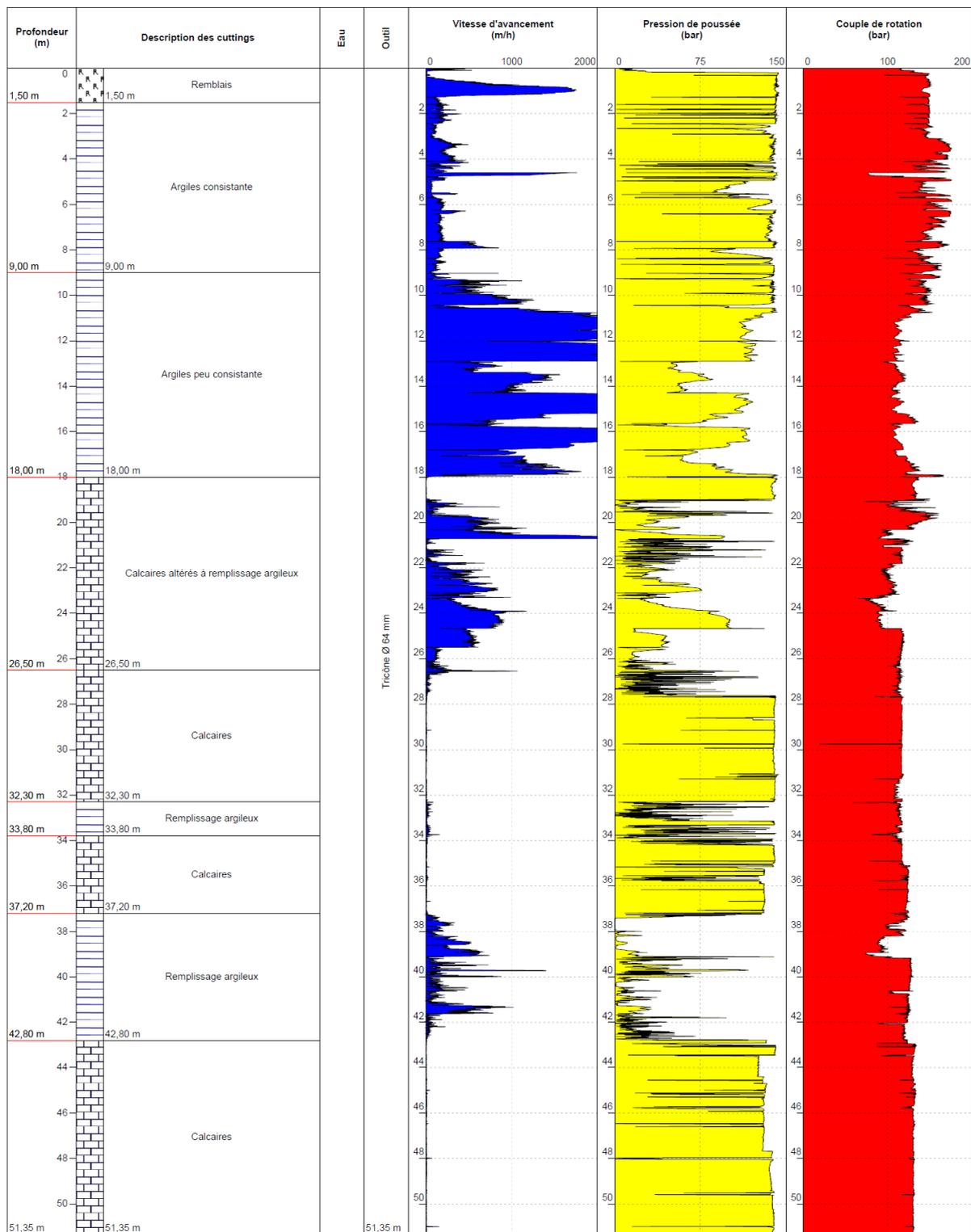


Figure 9 - Coupe de sondage du piézomètre PZ1 (ECR)

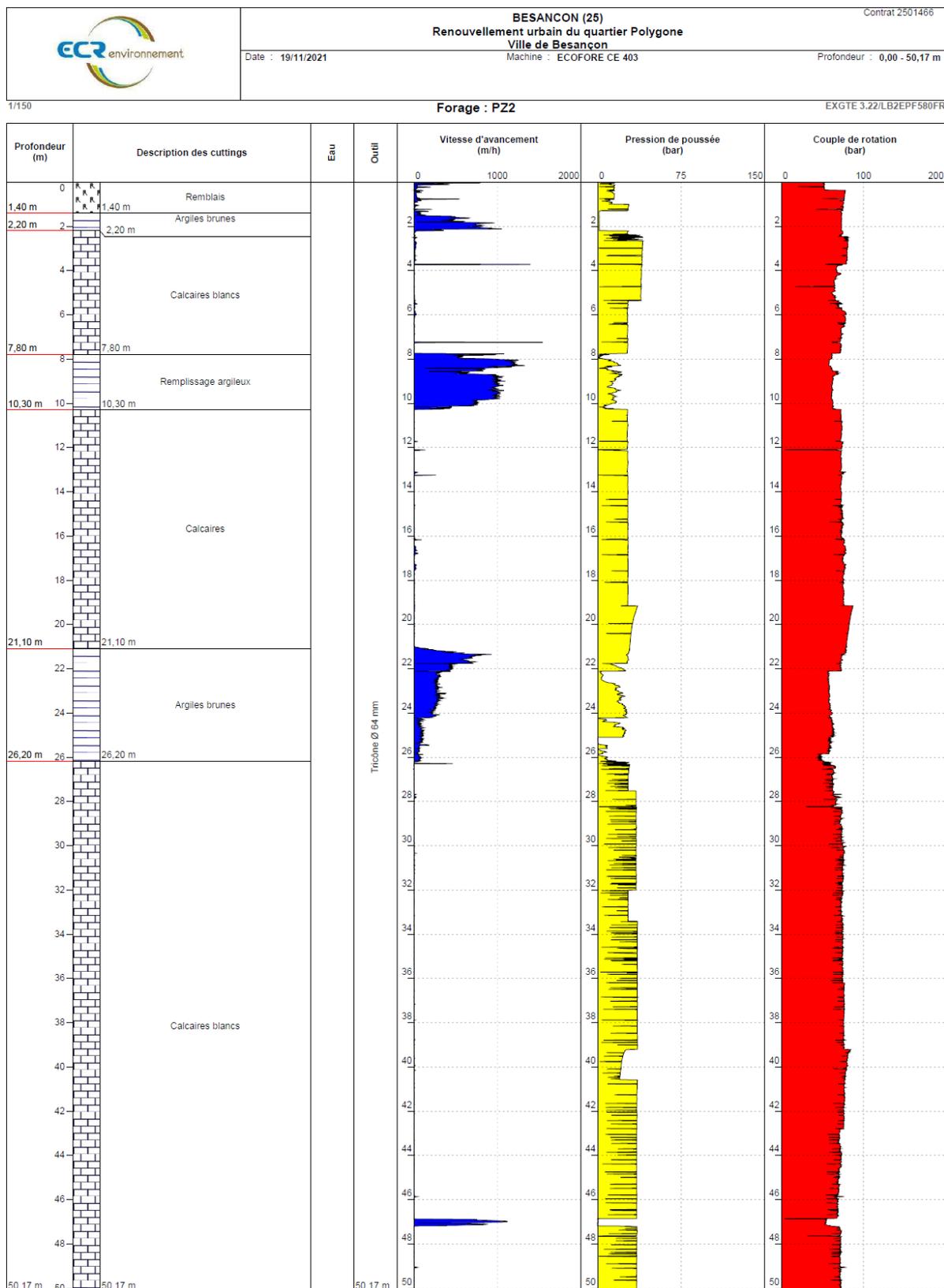


Figure 10 - Coupe de sondage du piézomètre PZ2 (ECR)

4.1.2.1. Investigations géophysiques

Des investigations géophysiques ont été réalisées par ECR pour rendre compte de l'état d'altération du substrat calcaire, et des épaisseurs d'argiles de décalcification, compte-tenu du contexte particulier de karstification et d'anthropisation mis en évidence par les différentes investigations préliminaires. Au total 14 profils de géophysique par tomographie électrique (de A à N) ont été réalisés sur le secteur.

L'implantation des profils couvre l'ensemble de la parcelle mais ne présente pas d'organisation apparente, rendant très compliqué toute interprétation inter-profils. Le maillage est irrégulier, et implique des distorsions dans les interpolations linéaires. La présentation altimétrique des profils est hétérogène, et certains profils, sans nivellement absolu, ont dû faire l'objet d'un post-traitement du nivellement selon les données LIDAR fournies par GBM. L'interprétation des profils et les zonages en résultant doivent donc être pris avec précaution, même si cela permet de dégager certaines tendances et d'identifier des anomalies marquées.

Pour rendre compte de la profondeur du substrat calcaire, une carte d'altitude du toit du substrat calcaire (Cf. Figure 11) et une carte d'isopacité des formations superficielles (Cf. Figure 12) ont été réalisées sur la base des profils de levés géophysique et de l'interprétation d'un « substrat calcaire sain » établi selon une résistivité supérieure ou égale à 200-300 Ohms.

Les interprétations cartographiques permettent d'établir les points suivants :

- **La carte altimétrique du toit du substrat calcaire montre clairement les zones affleurantes ou sub-affleurantes dans le secteur nord-ouest et sud-est de la parcelle.** Les levés structuraux (pendage) des affleurements ont été reportés sur la carte.
- **Une importante dépression s'observe dans le secteur nord au niveau de la zone remblayée où les formations superficielles peuvent atteindre près d'une vingtaine de mètres.** La présence de cette dépression sous-couverture, et d'une doline inventoriée et visible dans le quart nord-est de la parcelle pose la question de leur continuité. Un paragraphe spécifique s'attache à décrire et à caractériser cette zone dépressionnaire et la doline adjacente (Cf. §5.4, p 66).
- **Dans le secteur sud on observe des zones de forte variabilité altimétriques des calcaires, avec des formations superficielles pouvant atteindre une vingtaine de mètres de profondeur jouxtant des zones au calcaire sub-affleurant.** Un soutirage d'origine inconnu est présent sur cette zone le long du profil géophysique E et fait l'objet d'un diagnostic spécifique (Cf. §5.3, p60). Dans ce secteur, l'ensemble des résultats de sondages témoignent d'un environnement épikarstique et endokarstique assez développé, peu commun sur le territoire de Besançon.



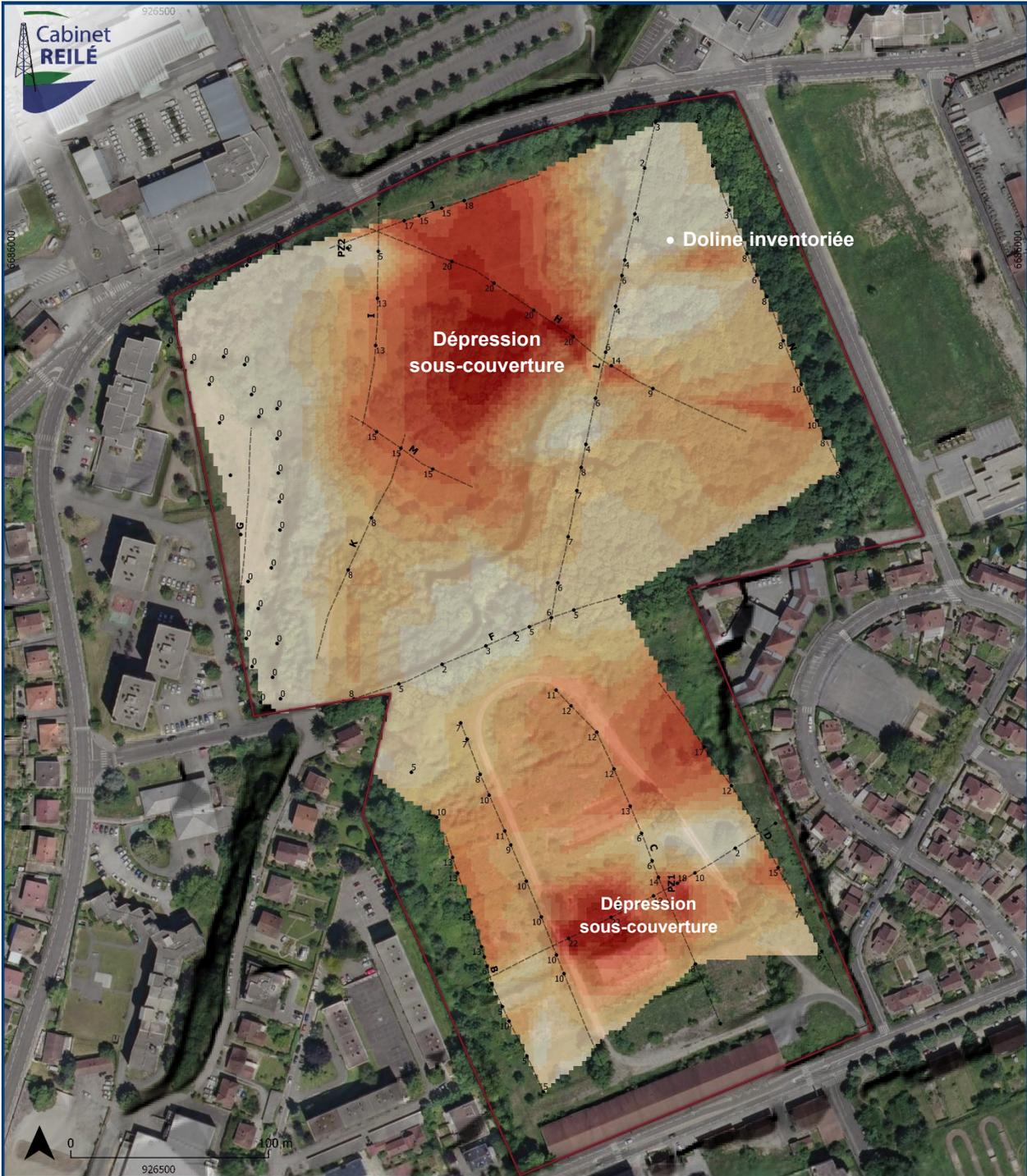
ALTITUDE DU SUBSTRAT CALCAIRE (interprétation géophysique)



<ul style="list-style-type: none"> ┆ Levé pendage calcaires • Points altitude calcaires (m NGF) --- Profils géophysiques 	<p>Altitude du toit calcaire (m NGF)</p> <ul style="list-style-type: none"> 246.4 251.2 256 	<ul style="list-style-type: none"> 260.8 265.6 270.4 275.2
---	--	--

EPSG:2154, 22/10/2022

Figure 11 - Altitude du toit du substrat calcaire (m NGF) et levés structuraux sur affleurements



PROFONDEUR DU SUBSTRAT CALCAIRE (interprétation géophysique)

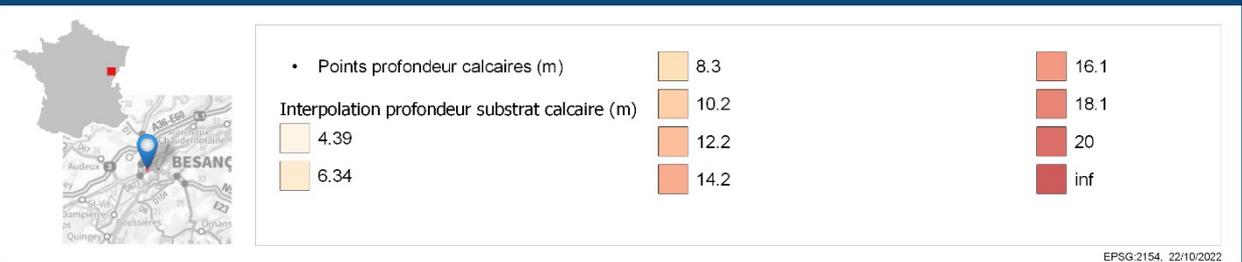


Figure 12 – Carte de profondeur du substrat calcaire (ie. isopacité des formations superficielles : altérations et de remblais anthropiques) par interprétation des levés géophysiques et de forages.

4.2. Contexte hydrogéologique

D'un point de vue général, la nature des circulations d'eau dans un sous-sol calcaire, - *comme c'est le cas dans le massif du Jura* - est de type karstique. La roche massive est très peu perméable, mais il existe une perméabilité secondaire de drains où l'eau s'écoule à grande vitesse. Ces drains proviennent de la dissolution du calcaire provoquée par le CO₂ contenu dans l'eau météorique qui s'infiltré et circule le long des diaclases et joints de stratification. Le drainage souterrain est organisé suivant un réseau de vides qui concentre progressivement les écoulements pour être ensuite rejetés vers un exutoire.

Plus spécifiquement, le projet se localise dans la masse d'eau souterraine des « calcaires Jurassiques des Avant-Monts » (FRDG150). Il se développe à la limite des bassins d'alimentation des sources d'Avanne à l'ouest et de la source de la Mouillère à l'est. Aucun réseau hydrographique de surface n'est identifiable sur ce secteur. Les eaux s'écoulent et se concentrent principalement en direction de la dépression située au nord-est de la parcelle et s'infiltrent ensuite dans les formations superficielles d'argiles de décalcification pour rejoindre l'aquifère karstique sous-jacent. Les eaux sont ensuite restituées au bassin hydrographique du Doubs par le biais des émergences majeures du secteur.

4.2.1. Inventaire des traçages

Pour rendre compte des circulations souterraines, plusieurs traçages ont déjà été réalisés à proximité du projet :

- **Traçages du piézomètre de la Grette** sur la commune Besançon, réalisé par Idéaux en 2021 qui indique une restitution à la source d'Avanne avec une vitesse de transit d'environ 120 m/h.
- **Traçages du Gouffre militaire** sur la commune de Besançon, réalisé par le Cabinet Reilé en Mai 2020 qui indique une restitution à la source d'Avanne avec une vitesse de transit d'environ 62 m/h.
- *(Traçages de Caserne Vauban (D809) sur la commune de Besançon réalisé par GEOTEC le 30/01/2009 qui indique une restitution à Source résurgence d'Avanne, de la Mouillère, et de Battant, sans indication de vitesse apparente de transit – résultats suspects, et non considérés)*
- **Traçages de Caserne Vauban** sur la commune de Besançon réalisé par le Cabinet Reilé en Juillet 2020 qui indique une restitution à Source Battant avec une vitesse de transit d'environ 30 m/h.

Les essais de traçage réalisés dans le secteur démontrent bien la présence d'un karst fonctionnel avec des vitesses de transit modérées à fortes, et dont l'essentiel des circulations souterraines se dirigent vers le système de la résurgence d'Avanne. Une bascule des écoulements s'esquisse plus à l'est aux abords de la Rue Louis Pergaud, avec des écoulements orientés vers les systèmes de la Mouillère et plus localement de la source Battant.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 22/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

4.2.2. Traçage - Fouille à la pelle F4, Avenue Clémenceau

4.2.2.1. Modalités

Un traçage a été réalisé dans une fouille à la pelle réalisée le long de l'Avenue Clémenceau à Besançon, afin de déterminer l'exutoire des circulations d'eau souterraine provenant de la perte.

La campagne de traçage a été initiée le mercredi 24 Novembre 2021 avec l'injection de 5 kg Fluorescéine dans la fouille à la pelle F4 entre 10h30 et 13h30.

La campagne de traçage a fait l'objet d'un programme de surveillance sur 12 points d'intérêt, composés de 9 points sur eaux souterraines (ou apparentées) et de 3 points sur eaux de surface. Le tableau ci-dessous synthétise les points de suivi, leurs caractéristiques ainsi que leur niveau et moyens de surveillance (Cf. Tableau 4).

Tableau 4 - Liste des points de surveillance et des moyens associés

#	ID	Nom des points de surveillance	Type	Commune	Niveau de surveillance				
					FLUOCAPTEUR		PRÉLÈVEMENT EAU		FLUORI-MÈTRE
					permanent	périodique	Manuel	Auto	
1	AVAN	Source d'Avanne	Source	Besançon	•	•	•		•
2	LAV	Source du lavoir	Source	Avanne	•	•	•		
3	DO-DEVER	Doubs à l'aval de la source du lavoir	Cours d'eau	Avanne	•	•	•		
4	DO-INTER	Doubs à l'aval de la source du lavoir	Cours d'eau	Avanne					
5	MOUI	Source de la Mouillère	Source	Besançon	•		•		
6	BAT	Source Battant	Source	Besançon	•		•		
7	GAUL	Doubs Pont Charle de Gaulle	Cours d'eau	Besançon	•		•		
8	PZ-POLY	PZ1 Polygones	Forage	Besançon	•				•
9	PZ-TECH	PZ1 Planoise « Local technique »	Forage	Besançon	•				
10	PZ-VOLT	PZ2 Planoise « Collège Voltaire »	Forage	Besançon	•				
11	PZ-PISC	PZ3 Planoise « Piscine Lafayette »	Forage	Besançon	•				•
12	PZ-FAM	PZ5 Grette « Collège Ste.-Famille »	Forage	Besançon	•				



Figure 13 – Photographies des opérations d'injection de traceur au point n°1

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 24/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

4.2.2.2. Synthèse des résultats

Les résultats de suivi démontrent que la réapparition avérée de Fluorescéine a été constatée à environ 5 km au sud-ouest à la source d'Avanne et la source du Lavoir, ainsi que sur tous les points dans le Doubs à l'aval de ces deux émergences (points de restitution secondaires). Compte tenu des différents supports de résultats, et de leur croisement, le niveau de confiance de ce résultat est **très élevé (10/10)**

Tableau 5 - Synthèse des résultats sur les différents supports de suivi, et niveau de confiance

Support de suivi	Résultats (Positif/Négatif)	Date (si positif)
Blanc sur charbon	NEGATIF	-
Observation	POSITIF	29/11/2021 13:00
Prélèvement d'eau	POSITIF	29/11/2021 13:00
Charbon actif périodique	POSITIF	29/11/2021 16:30 > 29/11/2021 13:00
Charbon actif permanent	POSITIF	
Fluorimètre	POSITIF	28/11/2021 19:00 > 30/11/2021 00:00
Résultat (niveau de confiance) : exutoire	POSITIF (10/10) : système Source Avanne/Lavoir	

Avec une distance au point d'injection d'environ 4 500 mètres, et un temps de restitution compris entre 105 et 150 heures, **la vitesse apparente de restitution est comprise entre 30 et 43 m/h, avec une vitesse médiane (au pic de restitution) de l'ordre de 39 m/h.**

Aucune courbe de restitution n'a pu être réalisé du fait de l'absence de mesure des flux sortants aux points d'émergence.

Tableau 6 – Synthèse des résultats sur les différents supports de suivi, et niveau de confiance

< INJECTION	Nom point d'injection	Fouille à la pelle F4, Polygones		
	Adresse	Avenue Clémenceau, 25000 Besançon		
	Coordonnées (R93_L93)	X	926 604 m	Y
< RESTITUTION	Nom point restitution	Système source Avanne/source lavoir		
	Adresse	8 Grande Rue, 25720 AVANNE		
	Coordonnées (R93_L93)	X	924 554 m	Y
PARAMETRES	Distance injection>restitution	4 500 m		
	Dénivelé (Alti. Inj / Alti. – Rest.)	-30 m (INJ. 265 m NGF – REST. 235 m NGF)		
	Durées restitution	Début : +105h	Pic : +115h	Fin : +150h
	Vitesses apparentes	Max. : 43 m/h	Méd. : 39 m/h	Min. : 30 m/h

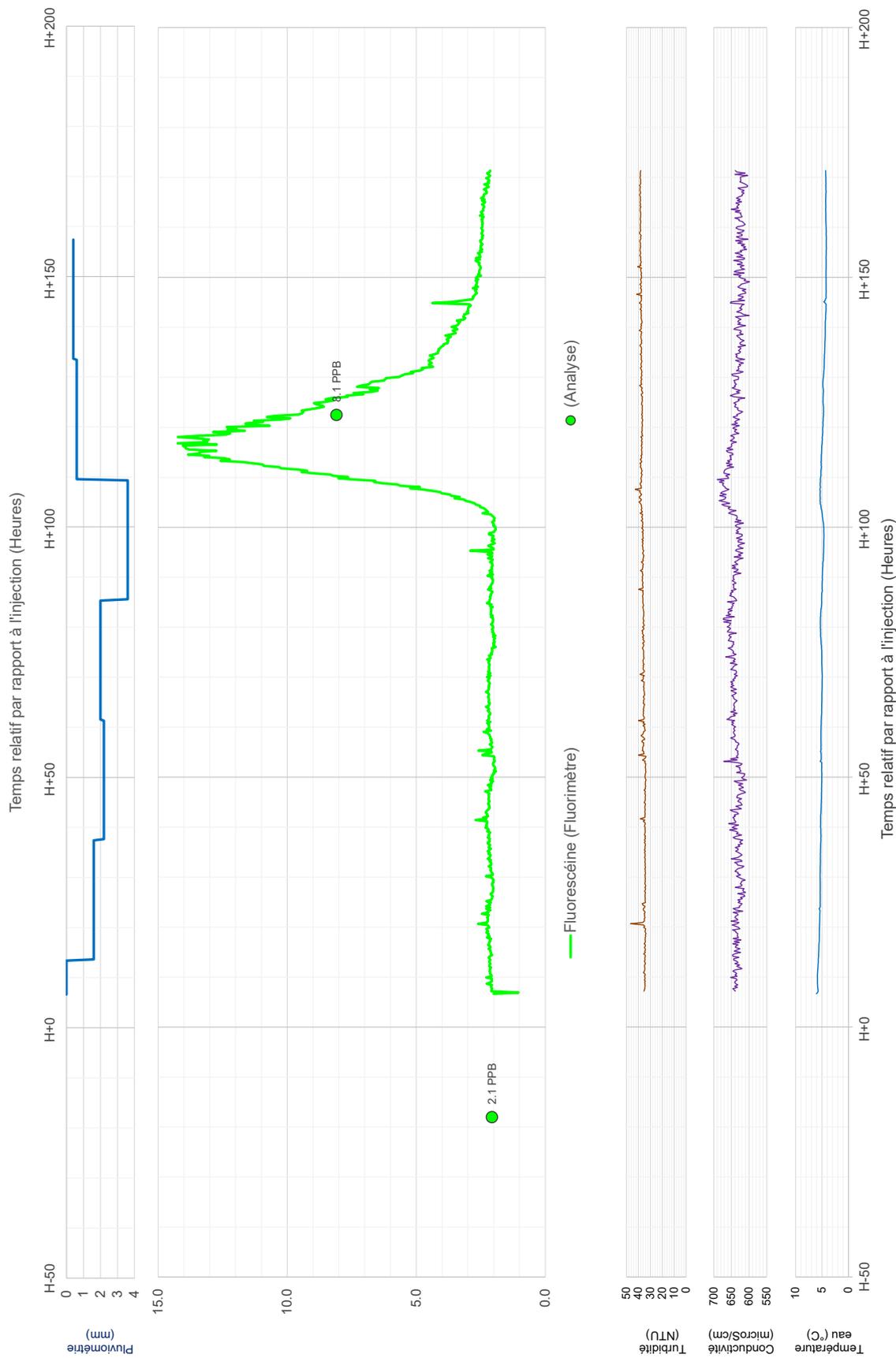


Figure 14 – Résultats de suivi au fluorimètre - source d'Avanne (LAV)

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone		Grand Besançon Métropole		Page 26/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		



Figure 15 - Cartographie des résultats de la campagne de traçage sur fond orthophotographique & IGN

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone			Page 27/91
	REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081

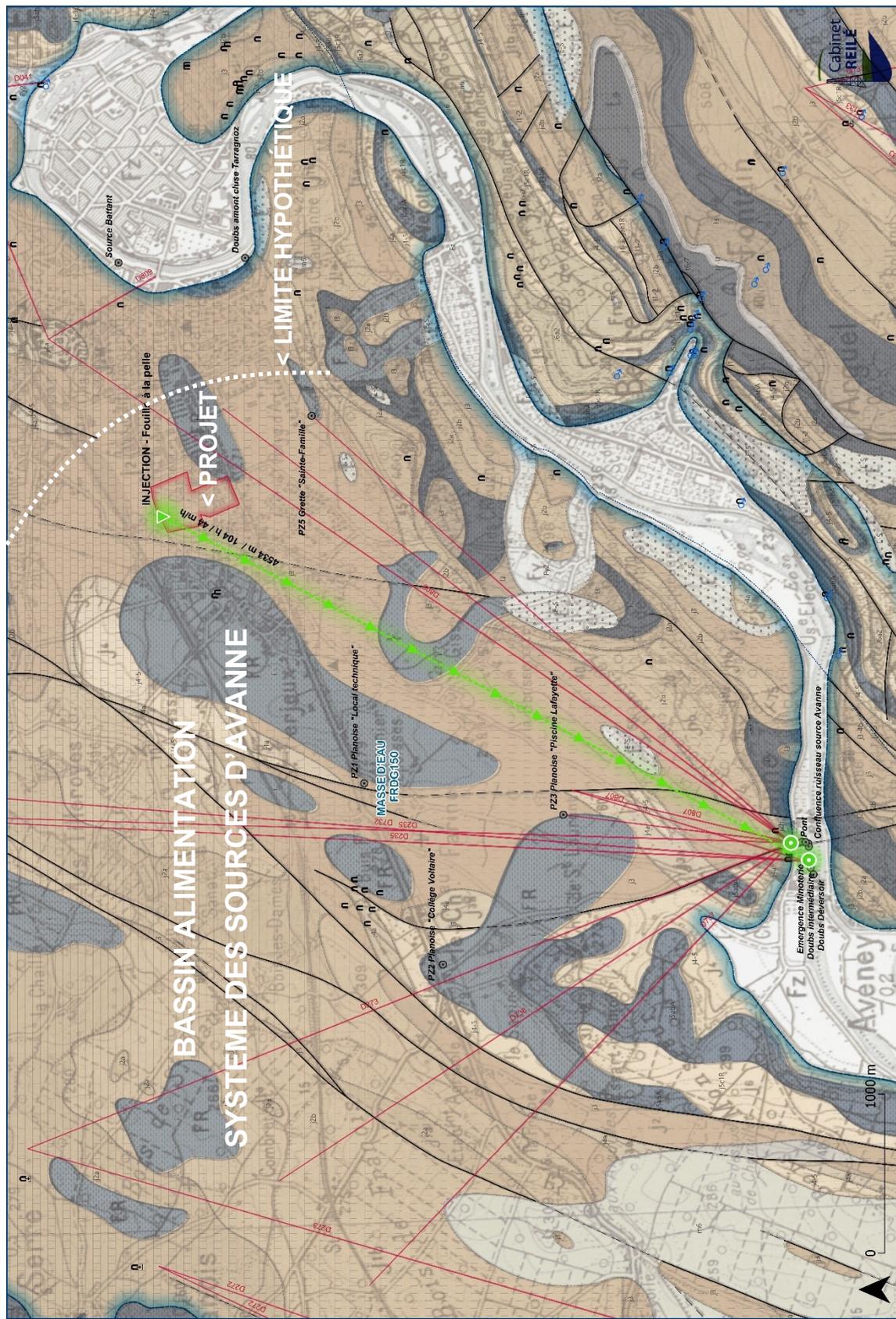


Figure 16 - Cartographie des résultats de la campagne de traçage sur fond géologique, et hypothèses de circulations souterraines

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone REILÉ Benoît	27/10/2022	Page 28/91
	D2021-081	Grand Besançon Métropole

4.2.3. Réseau karstique avéré

4.2.3.1. Inventaire des cavités et sources karstiques du secteur

De nombreux indices karstiques sont renseignés sur le secteur étudié. Il s'agit notamment, et de façon non exhaustive des cavités et sources karstiques suivantes.

Sources karstiques

- **Sources d'Avanne, exutoire avéré du secteur d'étude, impénétrable**
- Source de la Mouillère, source vauclusienne majeure au centre-ville de Besançon avec un développement de 90m jusqu'à une profondeur de 52 m
- Source Battant, source modeste située en rive droite du Doubs à l'amont du pont Battant, impénétrable
- Source Billecul, source modeste située en rive droite du Doubs à l'aval du pont de la République et canalisée par le réseau d'eau pluvial du Boulevard Diderot, impénétrable

Cavités & Soutirages

- **Effondrement 29 rue de Dole, impénétrable**
- **Effondrement carrefour de la rue de Dole, impénétrable**
- **Effondrement parking rond-point de Saint-Ferjeux, impénétrable**
- **Grotte abris de la basilique de Saint-Ferjeux, impénétrable**
- Cavité à la butte, Rue de Dole, impénétrable
- Gouffre des Compteurs, sous le parking de la chambre du commerce, avec un développement et une profondeur de 18 m
- Gouffre de la caserne du 60 RI, développement et profondeur de 4 m
- Gouffre des Beaux-Arts, développement et profondeur de 10 m

Aucune cavité d'intérêt permet d'accéder à un réseau karstique fonctionnel à proximité du projet. Les gouffres des Beaux-arts et des compteurs présentent la typologie de cavité la plus probable potentiellement présente sous le projet avec une composante verticale en zone vadose prépondérante jusqu'à des profondeurs maximales de 30 mètres.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 29/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		



Figure 17 – Photographie aérienne du gouffre des Beaux-Arts

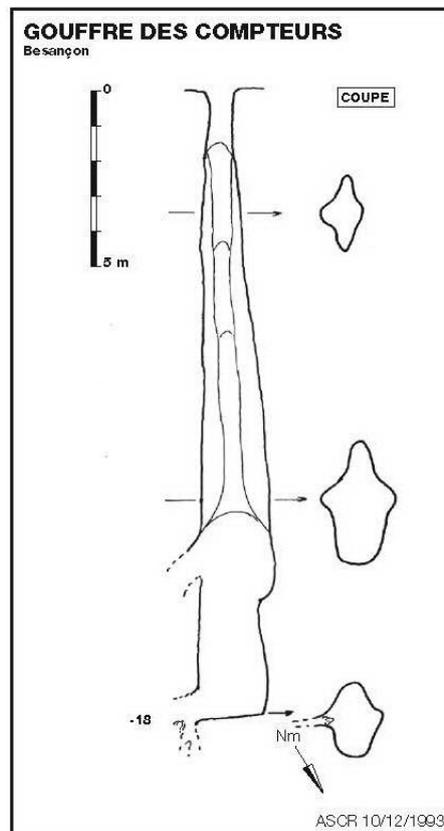


Figure 18 - Topographie du gouffre des compteurs (Asso. Spéléo du Canton de Rougemont, GIPEK)

4.2.3.1. Sources d'Avanne (exutoire du secteur)

Systèmes des sources d'Avanne

L'essentiel du système des sources d'Avanne diffuse à travers les alluvions du Doubs, avec un niveau de trop-plein permettant le déversement de la source d'Avanne en période de moyennes/hautes eaux.

Le secteur d'émergence du système des sources d'Avanne est situé dans un compartiment encadré par 2 failles d'orientation nord-sud, nettement observables par un recul de la ligne de falaises, et correspondant à la zone broyée de ces axes tectoniques. La zone broyée la plus à l'ouest est sans doute à l'origine de l'émergence principale dite « source du lavoir », située sous la Minoterie et permettant l'émergence de la zone noyée au niveau de base à une altitude d'environ 232.0 m (NGF) ; tandis que la zone broyée la plus à l'est est dans l'alignement directe du porche de la source d'Avanne qui émerge à une altitude de 235.0 m (NGF) et jouant le rôle de trop plein de ce système en période de moyennes/hautes eaux

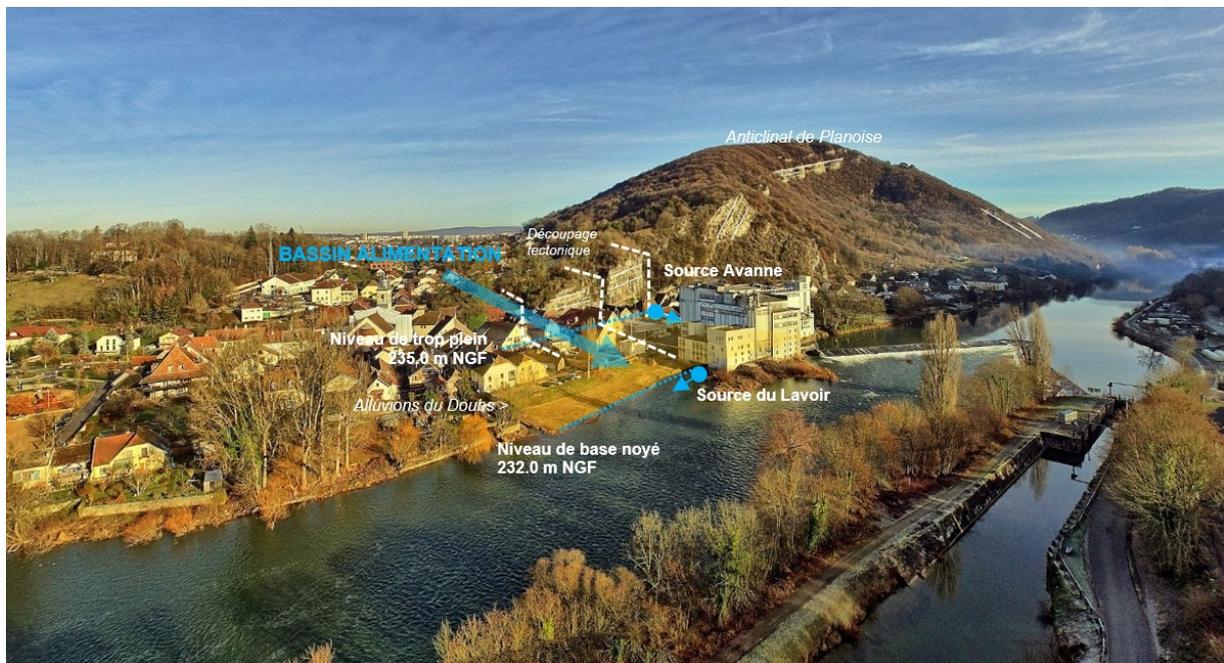


Figure 19 – Photomontage de l'organisation des sources d'Avanne (Photo JGS25, modifiée)

4.2.3.2. Critère décisionnel « Karstogénèse »

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Hydrogéologie », sous-critère « Karstogénèse »

KARSTOGÉNÈSE AVANCÉE: le secteur présente un développement karstique avéré avec des cavités fossiles au développement à prépondérance verticale, et des exutoires identifiés et fonctionnels.

4.2.4. Piézométrie

4.2.4.1. Localisation des dispositifs de suivi

Le suivi piézométrique au droit du projet permet de déterminer le niveau de base de l'aquifère karstique sous-jacent, d'observer ses fluctuations, et d'adapter le cas échéant les contraintes/modalités constructives de la zone.

Au droit du site seul le PZ1 fait l'objet d'un suivi piézométrique. Suite à un effondrement du puits, le piézomètre PZ2 n'a pas pu être équipé et n'est pas suivi. En complément, un suivi piézométrique a été réalisé sur le piézomètre PZ5 situé au niveau du Collège Sainte-Famille (piézomètre réalisé précédemment lors de l'étude de l'aménagement du quartier de la Grette).

Tableau 7 – Liste des points et des équipements de suivi environnemental

ID	Point de suivi	Paramètres	Équipements
1	PZ1 Avenue Clémenceau	Niveau piézométrique de l'aquifère karstique	Mesure en continu, Sonde de pression absolue MICRO-DIVER + Baromètre DIVER
2	PZ5 Sainte-Famille		
3	PZ2	Effondré, abandonné	

4.2.4.2. Modalités métrologiques

Le suivi en continu de niveau d'eau par sondes de pression absolue comprend l'installation de sondes enregistreuses autonomes de pression et de température de type Micro-Diver® (Schlumberger) sur les points d'observation, et l'installation d'une sonde barométrique et de température atmosphérique Baro-Diver® (compensation des variations météorologiques) à proximité de la zone d'étude.

Les mesures ont été réalisées avec un pas de temps de 6 heures avec une incertitude de mesure d'environ +/- 10 mm.

Un suivi complémentaire par mesures manuelles a été réalisé à chaque relevé des sondes au moyen d'une sonde piézométrique à ruban avec une incertitude de mesure d'environ +/- 5 mm.



Figure 20 – Carte de localisation des points de suivi de paramètres environnementaux



Photographie du piézomètre PZ1



Photographie du piézomètre PZ5

Figure 21 – Photographies des points de suivi

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone			 Grand Besançon Métropole	Page 34/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

4.2.4.3. Description des ouvrages

4.2.4.3.1. Piézomètre PZ1

Le piézomètre PZ1 a été réalisé le 15 Novembre 2021 dans le cadre de la présente étude.

Le forage atteint une profondeur d'environ 51.40 mètres pour atteindre l'altitude du niveau de base du Doubs et des aquifères du secteur. Il a été réalisé par la technique du rotary à l'aide d'un tricône de diamètre 64 mm de la surface jusqu'à sa profondeur maximale.

La coupe de sondage établie par ECR (Cf. ANNEXE **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, p**Erreur ! Signet non défini.**) indique l'interprétation litho-stratigraphique suivante :

- Remblais du Terrain Naturel à -1.50 m
- Argiles de décalcification (Terra Rossa) de -1.50 m à -18.00 m
- Calcaires altérés de -18.00 à -32.30 m
- Calcaires avec remplissages métriques d'argiles de -32.30 m à -51.35 m

Il a été demandé un ouvrage crépiné sur toute la hauteur basale jusqu'à la base des argiles de décalcification, d'un décanteur à la base, et d'une cimentation de tête avec bouche à clé. Le détail de l'équipement du forage n'est pas mentionné. L'ouvrage est protégé d'un capot de protection ancré dans une margelle béton. Le capot est verrouillé par un cadenas d'artilleur.

4.2.4.3.2. Piézomètre PZ5

Le piézomètre PZ5 a été réalisé par ECR en 2020 dans le cadre de l'étude concernant l'aménagement du quartier de la Grette.

Le forage atteint une profondeur d'environ 50.50 m pour atteindre l'altitude du niveau de base du Doubs et des aquifères du secteur. Il a été réalisé en 2 phases :

- Forage rotary à l'aide d'un tricône 120 mm (4''^{3/4}) de la surface jusqu'à -4.20 mètres
- Forage roto-percussion à la technique du marteau fond de trou à l'aide d'un taillant de diamètre 115 mm (4''^{1/2}) de -4.20 m jusqu'à sa profondeur maximale.

La coupe de sondage établie par ECR (Cf. ANNEXE A-I, p87) indique l'interprétation litho-stratigraphique suivante :

- Couche de forme et de roulement de 0.00 à à -0.40 m
- Argiles brunes de décalcification (Terra Rossa) de -0.40 m à -3.60 m
- Calcaires altérés de -3.60 m à -17.20 m
- Calcaires à patine bleu de -17.20 m à -21.00 m
- Remplissage d'argiles à « cailloutis brun » de -21.00 m à -26.00 m
- Calcaire à patine bleu/blanc de -26.00 m à -50.50 m
- Calcaires altérés de -18.00 à -32.30 m
- Calcaires avec remplissages métriques d'argiles de -32.30 m à -51.35 m

Le piézomètre a été équipé de la façon suivante

- Tubage PVC plein 80/90 mm (OD/ID) de 0.00 à 5.50 m
- Tubage crépiné 80/90 mm slots 1mm de 5.50 à 50.50 m.
- Bouchon de fond point PVC. Nota : il n'est pas fait mention de la présence d'un décanteur.

L'annulaire du puits/tubage:

- bouchon de tête ciment, de densité non mentionnée de 0.00 m à - 0.50 m
- bouchon d'argiles de -0.5 m à -1.2 m
- massif de gravier de -1.2 m à -48.50 m

Le piézomètre traverse les calcaires du Jurassique moyen jusqu'au niveau de base du Doubs à une altitude d'environ 207.00 m (NGF).

Le niveau de remplissage d'argile à cailloutis brun -21.00 m à -26.00 m correspond vraisemblablement à un remplissage « sidérolithique » composé de cailloutis centimétriques brun à noir composés d'oxydes de fer et manganèse (pisolithes ferrugineuses), enchâssés dans une matrice argileuse. **Ce remplissage constitue un indice d'une karstification avérée au droit de l'ouvrage.** Il correspond en effet au lessivage d'une latéritique Éocène qui est venu se piéger dans des conduits karstiques pour les colmater tout ou partie.

Aucune remontée d'eau n'a été constatée lors de la foration. Le niveau piézométrique a été identifié à une profondeur de 30.3 mètres à la livraison de l'ouvrage, puis à des profondeurs comprises entre 20 et 28mètres de profondeur lors du suivi hydrogéologique.

4.2.1. Piézomètres de référence

4.2.1.1.1. Inventaire des ouvrages de la masse d'eau

Les chroniques piézométriques de ouvrages précédemment décrits ne permettent pas la détermination des niveaux de référence par analyse statistique, compte tenu de leur plage de suivi trop court (inférieur ou égal à 12 mois). La détermination des niveaux de référence nécessite une inter-comparaison de ces chroniques à un piézomètre de référence localisé dans la même masse d'eau et comprenant une chronique plus longue permettant des projections temporelles de plus long-terme.

Les données seront donc comparées et extrapolées *-après vérification des limites d'application-* à partir d'un piézomètre localisé dans la même masse d'eau des « Calcaires jurassiques des Avants-Monts » (FRDG150) à Montferrand-le-Château (25397).

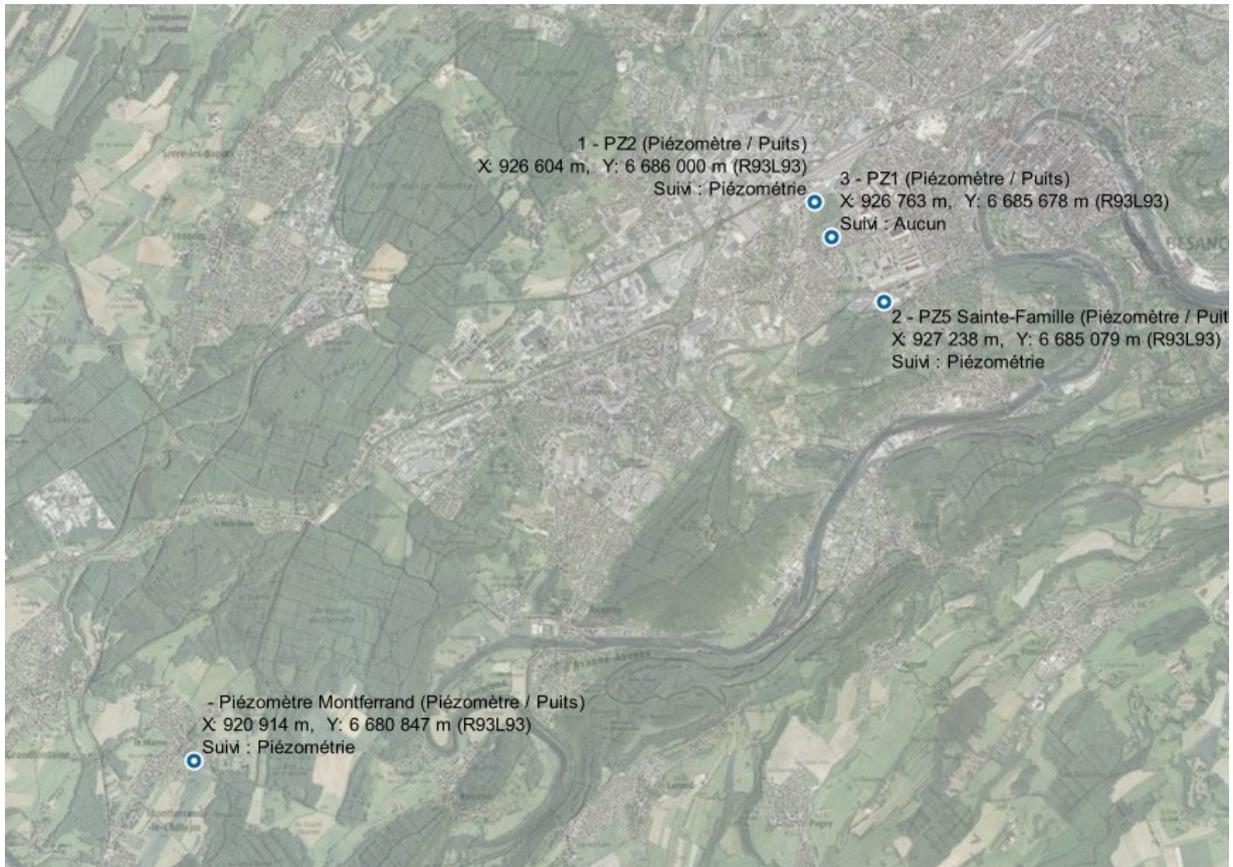


Figure 22 - Localisation des piézomètres de références de la masse d'eau dans laquelle s'inscrit le projet

4.2.1.1.2. Caractéristiques de l'ouvrage de référence

Le piézomètre BSS001JGNA situé sur la commune de Montferrand le château se situe au lieu-dit « la marne », au niveau du couvent éponyme, à environ 6 km au sud du projet.

Il s'agit d'un ouvrage situé dans le Bathonien moyen, qui atteint un niveau de « marnes blanches » à une profondeur d'environ 80.0 mètres. L'avant trou présente un diamètre de 3 mètres sur 12 mètres, et a été tubé en 6" jusqu'à une profondeur d'environ 80.0 mètres.

La date d'exécution du forage aux alentours de 1950. Le suivi de chantier réalisé par un sourcier ne permet pas d'établir précisément les modalités d'exécution, ni la coupe

lithologique précise de l'ouvrage. Les indications sont d'ailleurs données par le témoignage de la « mère économe » du couvent. Cependant, au regard du contexte géologique, il est tout à fait vraisemblable que l'ouvrage soit localisé à la base du Bathonien et qu'il ait atteint le toit de l'aalénien inférieur composé de marnes sableuses et micacées, dites « marnes blanches ».

Le piézomètre de référence se localise dans la même masse d'eau que celle du projet.

4.2.1.1.3. Modalités de mesure & QA/QC des données

Le suivi piézométrique de l'ouvrage est réalisé depuis le début par un enregistreur numérique doté d'une télétransmission, avec une mesure selon un pas de temps horaire fixe. L'incertitude de la mesure n'est pas mentionnée. Les données sont ensuite moyennées selon un pas de temps journalier.

La chronique de suivi piézométrique journalier de cet ouvrage s'étend du 28/05/2007 jusqu'à aujourd'hui (avec une vingtaine de jours de décalage : temps de saisie, et validation des données).

La chronique présente des lacunes fin 2007. Seules 5 mesures sont mentionnées comme « incorrectes » ou « incertaines » dans la chronique de mesures. L'ensemble de ces données non validées ne seront pas intégrées à l'analyse statistique.

La chronique contient des lacunes dans ses données aux périodes suivantes :

- du 02/08/2000 au 01/09/2000
- du 11/01/2001 au 01/08/2001
- du 21/07/2003 au 26/08/2003
- du 05/01/2005 au 01/02/2005
- du 01/01/2017 au 17/01/2007

La chronique de mesures exploitable représente près de 15 ans de mesures, avec 5493 données journalières (à date du 12/09/2022).

Sur l'ensemble de sa chronique le piézomètre présente des fluctuations maximales d'une dizaine de mètres (9.72 m) entre le niveau des plus Hautes eaux connues du 17/07/2021 (NPHEc 245.1m NGF) et le niveau des Plus Basses Eaux connues du 08/10/2009 (NPBEc 235.28 m NGF).

Sur la période de suivi de novembre 2021 à Septembre 2022, le niveau piézométrique a fluctué d'environ 6.60 m entre une altitude de 235.30 m et 241.90 m (NGF).

La chronique présente une dynamique annuelle, avec une période d'autocorrélation de 12 mois.

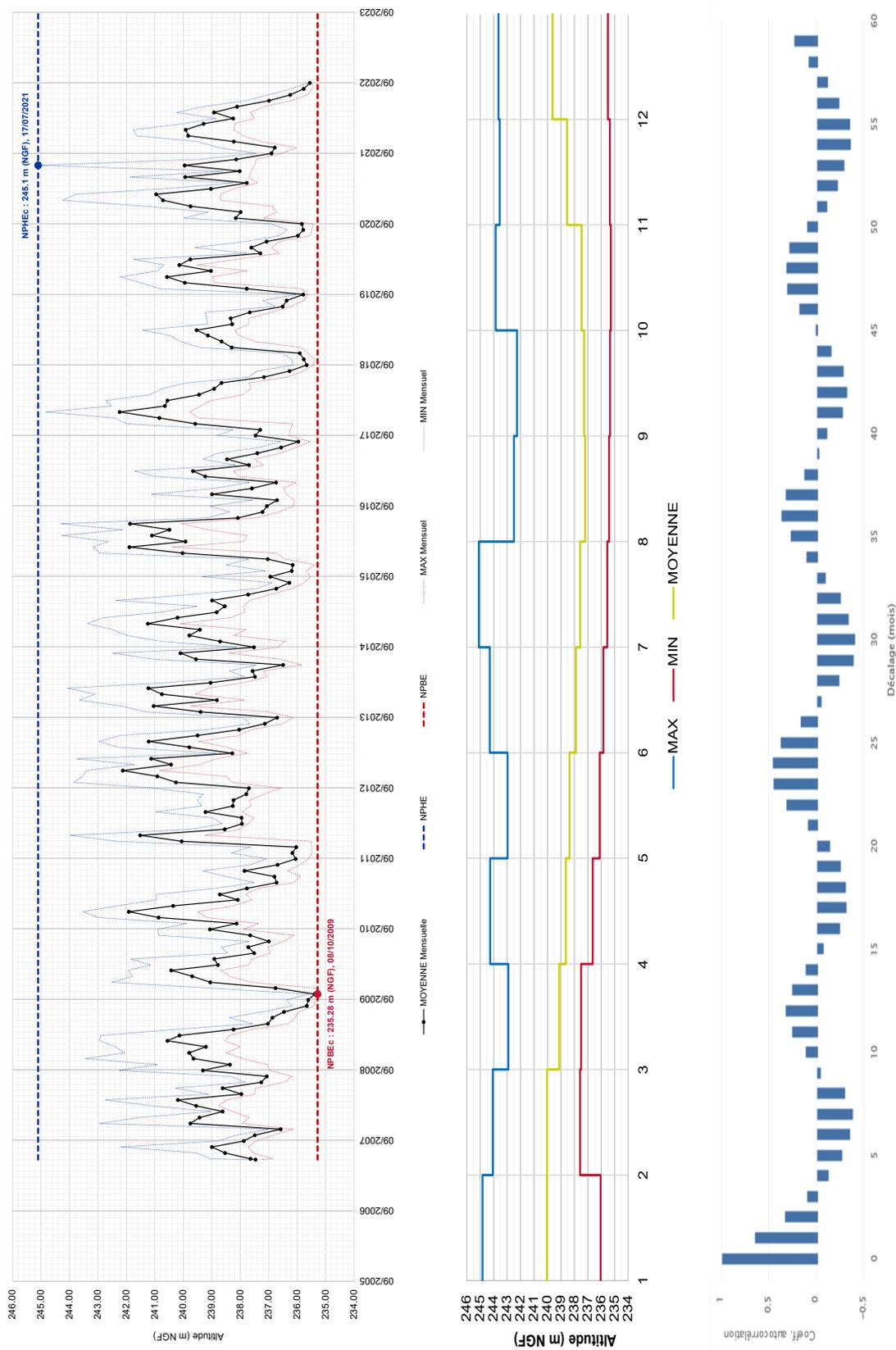


Figure 23 – Caractéristiques piézométriques de l'ouvrage de référence (d'après données BRGM). De haut en bas : chronique piézométrique avec NPHEC NPHEC, piézométrie mensuelle moyenne, graphique d'autocorrélation

4.2.2. Résultats de suivi

La chronique piézométrique s'étend du 07/02/2022 au 12/09/2022. La chronique contient une lacune de données entre le 04/05/2022 et le 06/05/2022 pour les piézomètres PZ2 et PZ5, suite à un problème d'export de données des sondes de pression.

Les chroniques piézométriques des piézomètres PZ2 et PZ5 sont assez similaires. On observe cependant une réactivité plus faible du piézomètre PZ2 (Clémenceau) en comparaison du piézomètre PZ5 (Sainte-Famille) qui s'avère très sensible à chaque épisode pluvieux.

Sur l'ensemble de la chronique le niveau d'eau des ouvrages a fluctué d'environ 5.0 mètres entre les altitudes 244.0 m et 248.7 m (NGF). Les piézomètres du projet présente des fluctuations assez proches des mises en charge du piézomètre de référence à Montferrand-le-château.

Au droit du projet (PZ2) la zone non saturée (ZNS) se développe sur une vingtaine de mètres jusqu'à une altitude d'environ 249.0 m (NGF). Elle surmonte une zone épinoyée comprise entre 20.0 et 25.0 mètres de profondeur, puis d'une zone noyée se développant à partir d'une profondeur de 25 mètres (245.0 m NGF).

La zone noyée se développe à environ 6 mètres au-dessus du niveau de base du Doubs à la gare d'eau (239.0 m NGF), et environ 10 mètres au-dessus du niveau de base de l'exutoire à la source d'Avanne (235.0 m NGF).

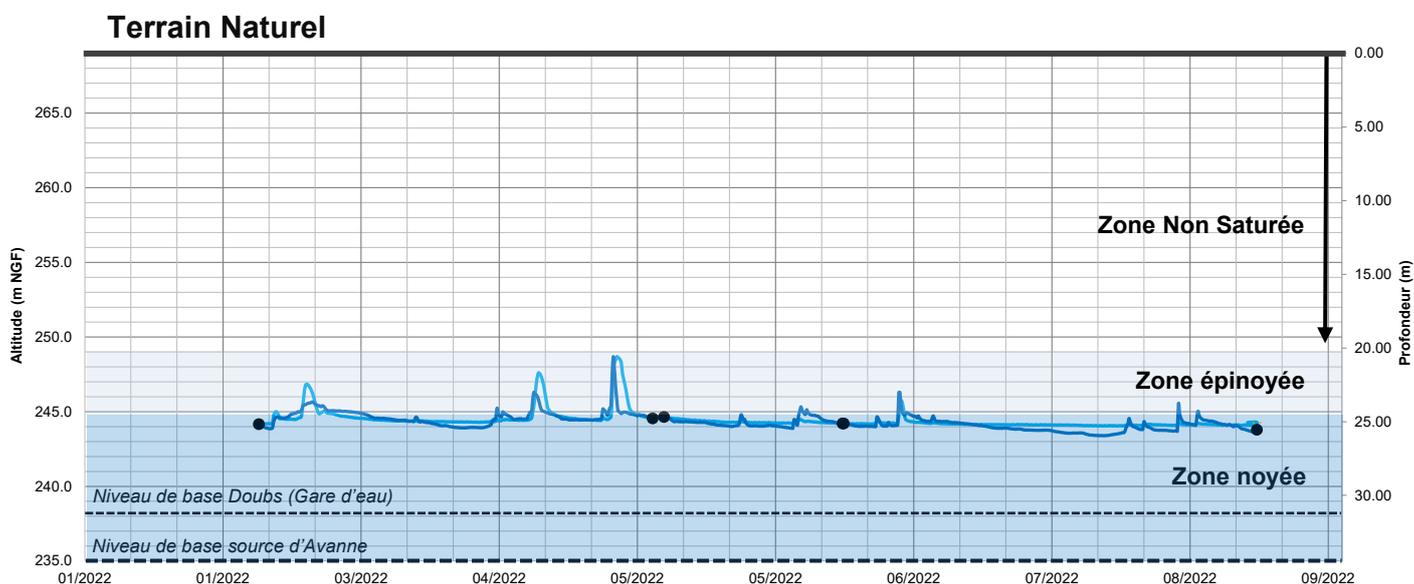


Figure 24 – Chroniques piézométriques et organisation de la zone aquifère au droit du projet (bleu clair, PZ2 Clémenceau ; bleu foncé, PZ5 Ste Famille).

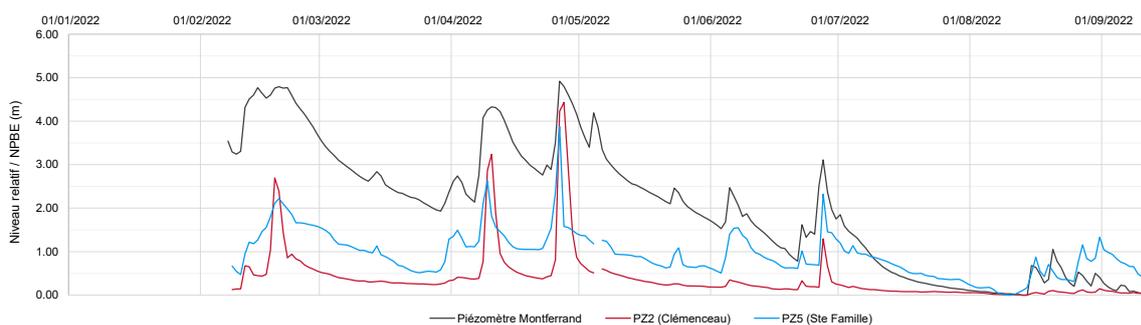


Figure 25 – Comparaison des amplitudes des chroniques piézométriques.

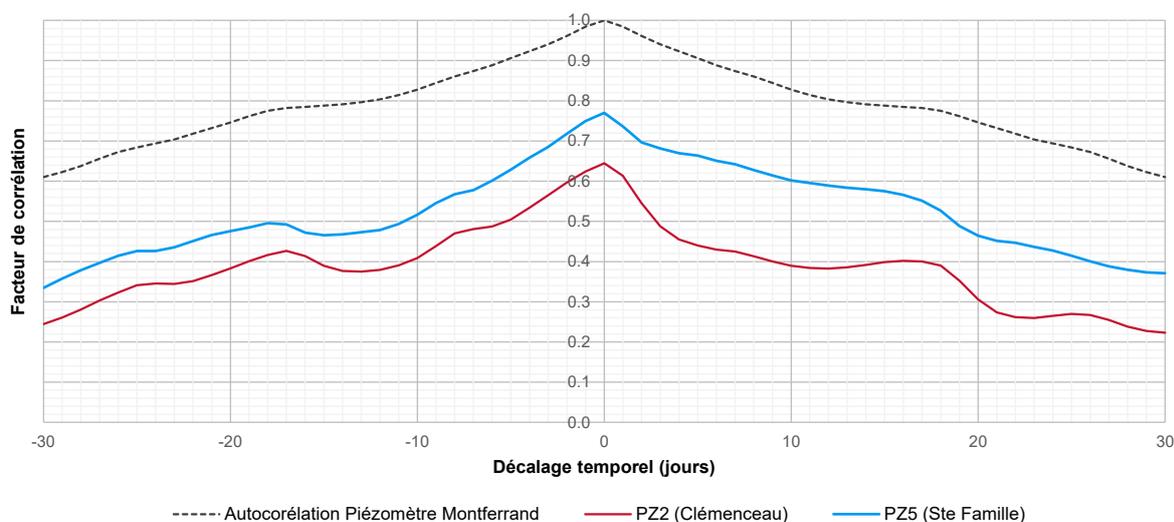


Figure 26 - Corrélogramme croisé des chroniques piézométriques au droit du projet (PZ2 et PZ5) par rapport au piézomètre de référence à Montferrand-le-Château.

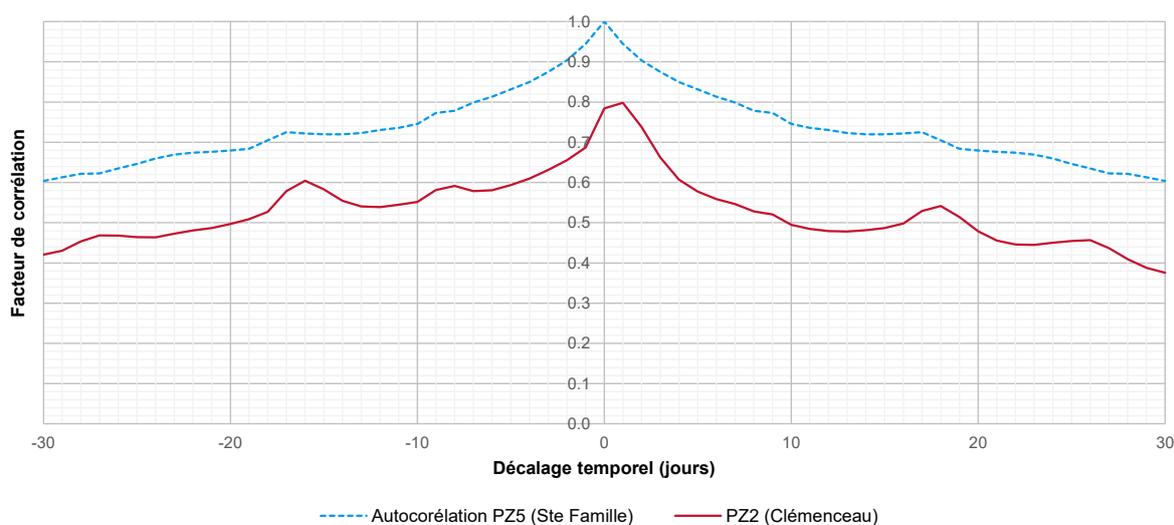


Figure 27 – Corrélogramme croisé du piézomètre PZ5 (Clémenceau) par rapport au piézomètre PZ2 (Ste Famille).

Corrélations croisées au piézomètre de référence

Le corrélogramme croisé entre le piézomètre Avenue Clémenceau et le piézomètre de référence de Montferrand-le-Chateau (Cf. Figure 26, **courbe rouge**) montre une corrélation de leur chronique avec un **coefficient maximal de corrélation de 0.64 sans décalage temporel** (les fluctuations observées au piézomètre Avenue Clémenceau sont synchrones aux fluctuations observées au piézomètre de Montferrand-le-Chateau).

Le corrélogramme croisé entre le piézomètre de Sainte-Famille et le piézomètre de référence de Montferrand-le-Chateau (Cf. Figure 26, **courbe bleu**) montre une corrélation de leur chronique avec un **coefficient maximal de corrélation de 0.77 sans décalage temporel** (les fluctuations observées au piézomètre de Sainte-Famille sont synchrones aux fluctuations observées au piézomètre de Montferrand-le-Chateau).

Corrélations croisées des piézomètres du projet

Le corrélogramme croisé entre le piézomètre de Sainte-Famille et celui de l'Avenue Clémenceau (Cf. Figure 26, **courbe verte**) montre une corrélation de leur chronique avec un **coefficient maximal de corrélation de 0.80 avec un très faible décalage temporel** (les fluctuations observées au piézomètre de Sainte-Famille sont légèrement postérieures aux fluctuations observées au piézomètre de l'Avenue Clémenceau).

La corrélation importante des chroniques des piézomètres au voisinage du projet et du piézomètre de Montferrand-le-Chateau en période de hautes-eaux, leur appartenance à la même masse d'eau, et leur relative proximité géographique, permet une extrapolation statistique entre ces ouvrages.

Pour la suite de l'étude, le piézomètre PZ5 (Sainte-Famille) sera utilisé comme référence pour les niveaux piézométrique au droit du projet. En effet, il est représentatif des fluctuations observées au piézomètre PZ2 (Clémenceau), et présente une meilleure corrélation aux fluctuations observées au piézomètre de référence de Montferrand.

4.2.1. Niveaux de référence

4.2.1.1. Comparaison des niveaux piézométriques

Les niveaux piézométriques ont été comparés en prenant en compte le déphasage temporel au coefficient de corrélation maximal entre le piézomètre de référence et le piézomètre PZ5 (Sainte-Famille).

L'ajustement des données les plus pertinentes (élimination des extrêmes) permettent d'établir une régression polynomiale d'ordre 2 avec un coefficient d'ajustement R^2 de 0.77.

Les coefficients de la régression seront utilisés pour extrapoler les niveaux calculés de l'ouvrage de référence à l'ouvrage du projet.

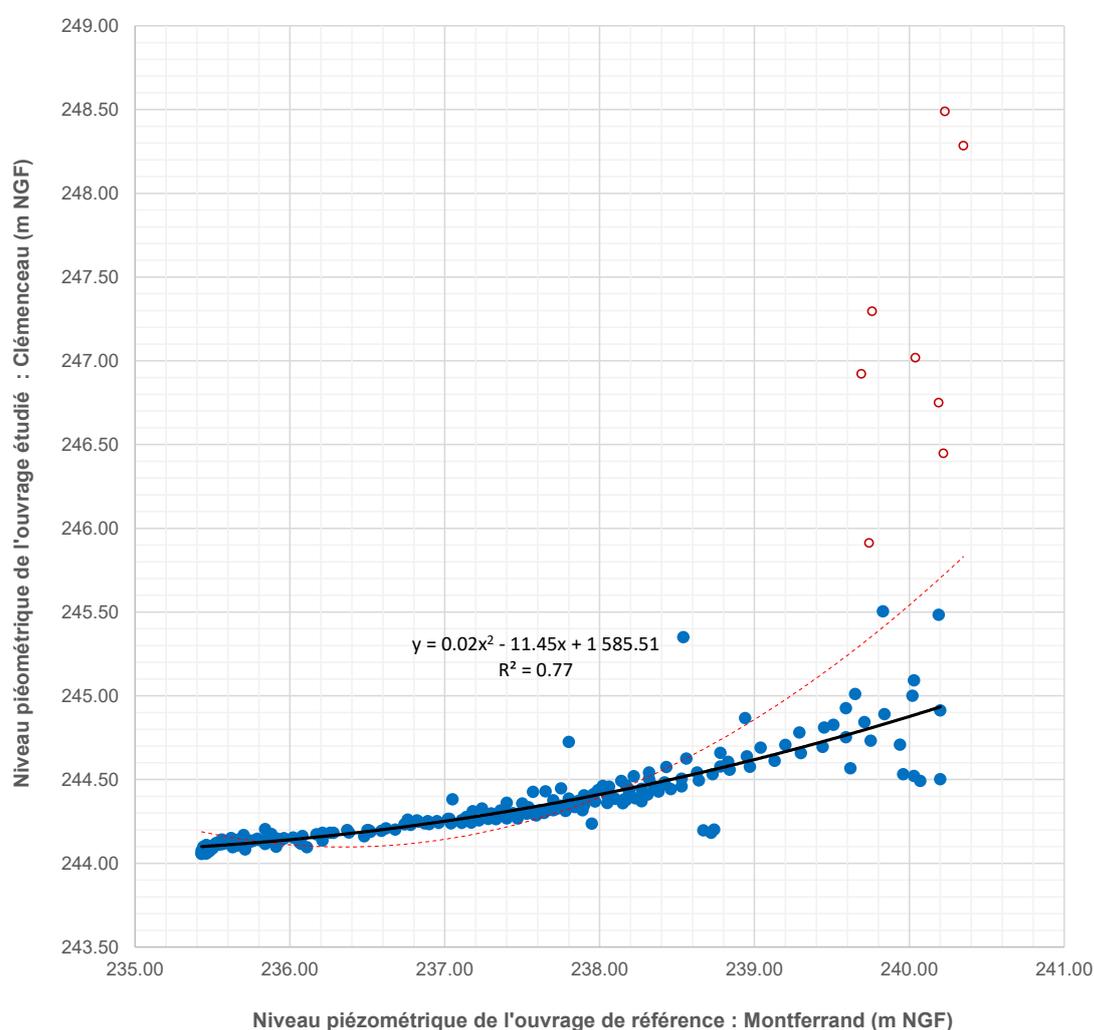


Figure 28 – Comparaison des niveaux piézométriques de l'ouvrage du projet et de l'ouvrage de référence avec le déphasage temporel au coefficient maximal de corrélation

4.2.1.2. Variation moyennes mensuelles (VM)

Les niveaux moyens mensuels du piézomètre du projet sont extrapolés à partir des niveaux moyens observés au piézomètre de référence à Montferrand-le-Château et de leur application au piézomètre PZ5 (Sainte-Famille).

Selon la chronique du piézomètre de Montferrand-le-Château, La période des plus basses eaux annuelles est observée au cours des mois de Juillet à Octobre, tandis que la période des plus hautes eaux annuelles est observée au cours des mois de Décembre à Février.

L'extrapolation des données de Montferrand-le-Chateau au site de Polygone donne un niveau moyen mensuel en hautes eaux de 244.90 m (NGF) au mois de Février, et un niveau moyen mensuel des basses eaux de 244.22 m (NGF) au mois de Septembre (Cf. Figure 29). Ces cotes correspondent à une profondeur d'environ 25 mètres au-droit du projet.

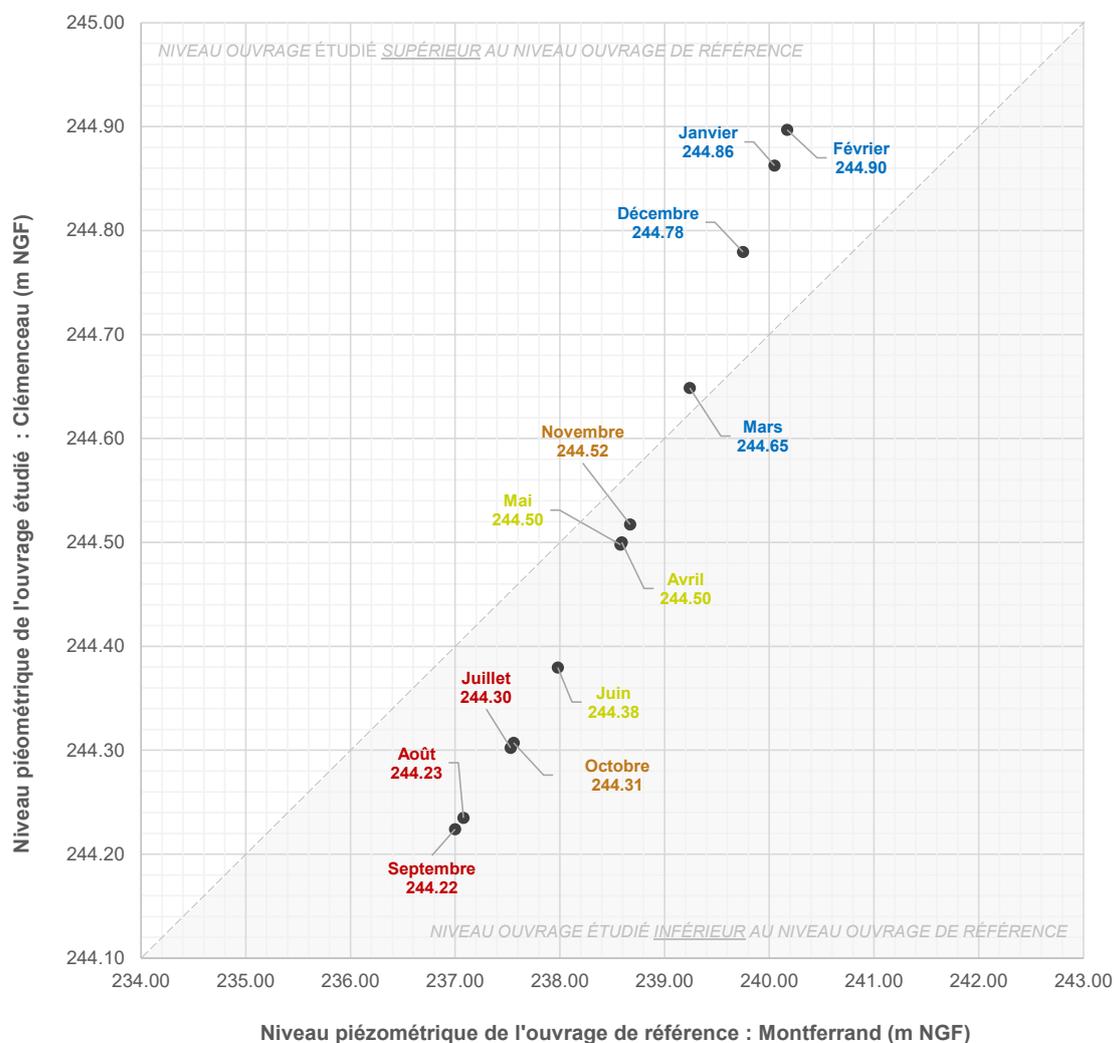


Figure 29 – Projection des niveaux moyens mensuels au droit du projet

Tableau 8 – Niveaux moyens mensuel au piézomètre de référence de Montferrand-le-Château et extrapolation au piézomètre au projet

	NIVEAUX MOYENS MENSUELS	
	Montferrand (Réf.)	Projet (calculé)
Janvier	240.05	244.86
Février	240.17	244.90
Mars	239.24	244.65
Avril	238.59	244.50
Mai	238.58	244.50
Juin	237.98	244.38
Juillet	237.53	244.30
Août	237.08	244.23
Septembre	237.00	244.22
Octobre	237.56	244.31
Novembre	238.67	244.52
Décembre	239.75	244.78

4.2.1.1. Niveaux de référence mensuels

Les niveaux de références sont établis pour le projet à partir de l'ensemble des relevés piézométriques disponibles ou acquises lors de l'étude, et de la comparaison à des piézomètres représentatifs de la masse d'eau étudiée. La définition des niveaux de référence pour le projet seront définis par analyse empirique et statistique, dans leur stricte limite d'application.

Niveaux exceptionnels

Pour définir les niveaux exceptionnels, un ajustement statistique selon la loi de Gumbel a été réalisé sur la base de la chronique du piézomètre de Montferrand-le-Château (Cf. Figure 30, p46). Les données des extremums annuels présentent une variabilité indépendante, et permettent d'utiliser l'ajustement statistique.

Avec un R_2 de 0.94, l'ajustement des occurrences de Hautes Eaux annuelle de cette chronique est acceptable. Il permet une prédiction des niveaux piézométriques pour un temps de retour maximal de 48 ans.

Au droit du projet, selon ces projections, le niveau de référence pour une occurrence annuelle d'une fréquence de retour de 48 ans est d'environ 247.5 m NGF.

Tableau 9 – Définition des niveaux de remontée de nape en fonction de leur récurrence

	Fréquence de retour				
	1/2	1/5	1/10	1/20	1/48
Ouvrage de référence	243.11	244.07	244.70	245.31	246.07
Variation vs HE annuelles	2.9	3.9	4.5	5.1	5.9
Extrapolé ouvrage projet	245.96	246.40	246.71	247.03	247.46
Variation vs HE annuelles	1.1	1.5	1.8	2.1	2.6

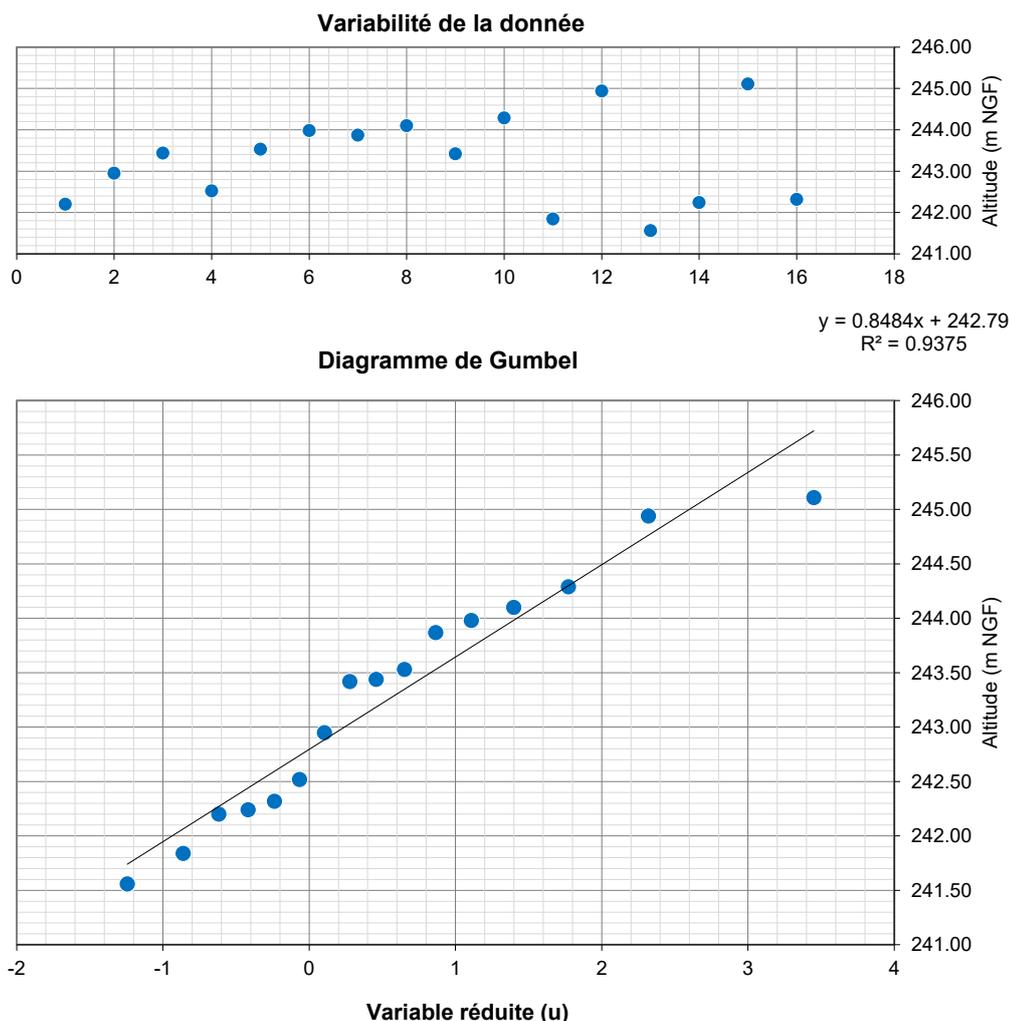


Figure 30 – Ajustement de Gumbel selon la méthode graphique au piézomètre de référence de Montferrand-le-Château.

4.2.1.2. Critère décisionnel « Piézométrie »

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Hydrogéologie », sous-critère « Piézométrie »

FAVORABLE : le secteur ne présente pas de risque de remontée de nappe de l'aquifère karstique sous-jacent. Au regard du projet actuel aucune étude piézométrique complémentaire n'est recommandée, sauf si des projets de construction avec des niveaux de sous-sols enterrés de plus de 10 mètres devaient être réalisés (altitudes inférieures ou égales à 259 m NGF).

Compte tenu de l'épaisseur importante d'argiles de décalcification sur certains secteurs, des nappes perchées et des circulations désordonnées au sein des horizons altérés ne sont pas à écarter. Toute identification de venues d'eau pendant la réalisation des projets devra faire l'objet d'un diagnostic hydrogéologique pour identifier ces venues et établir des solutions constructives.

4.2.2. Essais d'infiltration

4.2.2.1. Localisation

Des essais d'infiltrations à grande échelle a été réalisé sur deux zones d'infiltration afin d'en évaluer leurs capacités et les modalités de gestion des eaux pluviales du secteur.

Les 4 essais ont été localisés dans les zones de la trame verte centrale du projet en vue d'une éventuelle gestion intégrée des eaux pluviales.



Figure 31 - Localisation des essais d'infiltration

4.2.2.2. Méthode

L'injection a été réalisée dans des tranchées réalisées à la pelle mécanique pour atteindre des profondeurs comprises entre 2.60 m et 3.10 m. Les essais d'infiltration ont été réalisés à l'aide d'une citerne d'eau de 15 m³ avec une capacité d'injection comprise entre 50 et 100 L/s.

La mise en charge du point de rejet des eaux a été suivi par l'installation d'une sonde de pression absolue installée dans un tube PVC avec crépines fendues à sa base, complétée d'un suivi à l'aide d'une mire à lecture manuelle (Cf. Figure 33, p50, et Figure 34, p51).

En complément, un suivi a été réalisé sur le piézomètre adjacent à la zone d'injection pour observer l'éventuelle mise en charge de l'aquifère sous-jacent. Le piézomètre a été équipé d'une sonde de pression et complété d'un suivi à la sonde piézométrique manuelle.



Figure 32 – Photographies des opérations de fouilles à la pelle en préparation des essais d'infiltration

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 48/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

4.2.2.3. Déroulé des opérations

Pour les fouilles F1 et F2, les essais d'infiltration ont été réalisés le 23/11/2021 entre 08h30 et 09h35 :

- **Fouille F1 :**
 - Première injection dans la fouille à 08h29
 - Suivi de l'infiltration jusqu'à 09h10
- **Fouille F2 :**
 - Première injection dans la fouille à 08h57
 - Suivi de l'infiltration jusqu'à 09h35

Pour les fouilles F3 et F4, les essais d'infiltration ont été réalisés le 24/11/2021 entre 10h15 et 11h22 :

- **Fouille F3 :**
 - Première injection dans la fouille à 10h14
 - Suivi de l'infiltration jusqu'à 10h23
- **Fouille F4 :**
 - Première injection dans la fouille à 10h26
 - Suivi de l'infiltration jusqu'à 11h22



Figure 33 – Photographie d'ensemble de l'organisation de l'essai d'infiltration



Figure 34 – Photographie d'ensemble de l'organisation de l'essai d'infiltration

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 51/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

4.2.2.1. Résultat & interprétation des essais

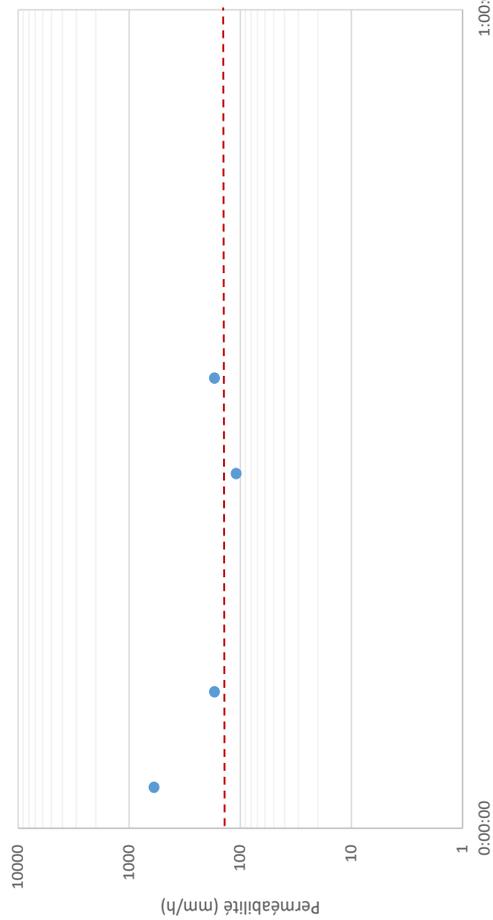
Les 4 essais d'infiltration présentent les résultats suivants :

- Fouille n°1 : diminution du niveau d'eau d'environ 30 mm en 12 minutes (150 mm/h), soit une perméabilité d'environ 4.2×10^{-5} m/s.
- Fouille n°2 : diminution du niveau d'eau d'environ 80 mm en 38 minutes (126 mm/h), soit une perméabilité d'environ 3.5×10^{-5} m/s.
- Fouille n°3 : diminution du niveau d'eau d'environ 70 mm en 9 minutes (466 mm/h), soit une perméabilité d'environ 1.3×10^{-4} m/s.
- Fouille n°4 : diminution du niveau d'eau d'environ 50 mm en 4 minutes (750 à 1000 mm/h), soit une perméabilité d'environ 2.7×10^{-4} m/s.

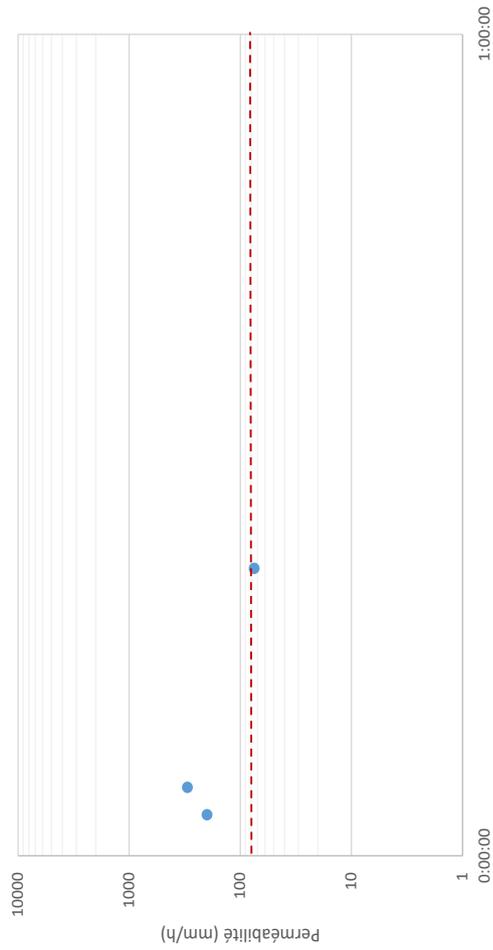
Aucune mise en charge n'a été observée dans les 2 piézomètres de contrôle.

Tableau 10 – Synthèse des essais d'infiltration sur le projet

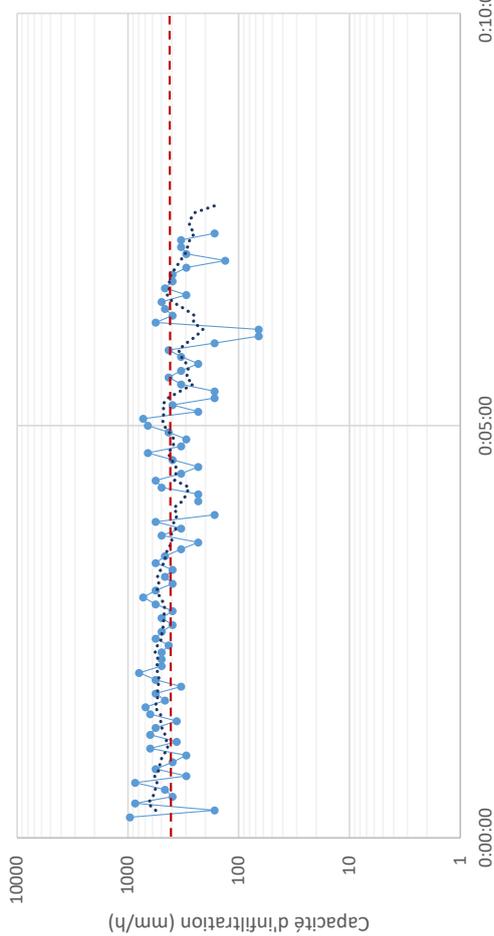
Fouille	Longueur	Largeur	Profondeur	Surface	Perméabilité
Fouille n°1	3.80 m	1.10 m	2.70 m	4.18 m ²	4.2×10^{-5} m/s
Fouille n°2	2.00 m	1.10 m	2.60 m	2.2 m ²	3.5×10^{-5} m/s
Fouille n°3	2.00 m	1.10 m	2.50 m	2.2 m ²	1.3×10^{-4} m/s
Fouille n°4	2.00 m	1.10 m	3.10 m	2.2 m ²	2.7×10^{-4} m/s



ESSAIS FOUILLE F1



ESSAIS FOUILLE F2



ESSAIS FOUILLE F4

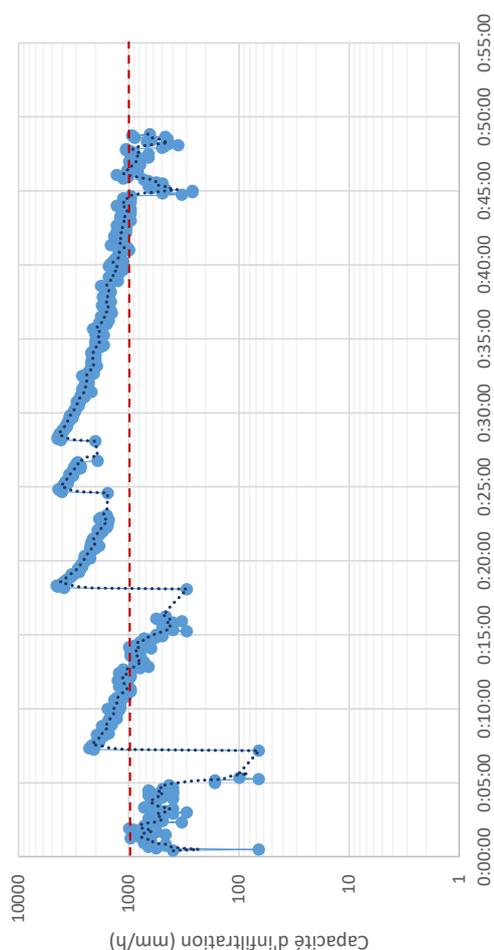


Figure 35 – Graphiques d'évolution des capacités d'infiltration des différentes fouilles

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081	Grand Besançon Métropole	Page 53/91

Les 4 essais d'infiltration démontrent de très faibles capacités d'infiltration avec des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} m/s incompatibles avec la gestion des eaux pluviales d'un tel projet dans les configurations de l'essai (profondeurs superficielles).

La gestion des eaux pluviales devra être réalisée au cas par cas pour chacun de projets afin de limiter les rejets au réseau avec notamment :

- L'évaluation des capacités d'infiltrations dans le substrat dans les zones de faible recouvrement Il s'agira notamment d'identifier des zones d'épaisseur de recouvrement faible avec un substrat calcaire proche, et suffisamment fracturé pour permettre des niveaux d'infiltration suffisants.
- L'évaluation des capacités d'infiltration par forage profond dans le substrat sous-jacent.

Percolations/circulation à l'interface remblais/argiles de décalcification

La mise en charge dans la fouille F1 a provoqué des circulations à l'interface remblais/terra rossa qui ont atteint la fouille F2 située à une dizaine de mètres.

Ce phénomène illustre parfaitement ce qui se passerait en cas de mauvaise gestion des eaux pluviales du secteur avec un épanchement et une diffusion latérale des écoulements, suivis de probables phénomènes de suffosion néfastes pour les fondations de constructions. LEs modalités de gestion des eaux pluviales devront se conformer aux prescriptions énoncées (Cf. §6, p75).

4.2.2.1. Critère décisionnel « Rétention/Infiltration »

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Rétention/Infiltration »

DÉFAVORABLE : les essais d'infiltrations présentent de très mauvaises capacités d'infiltration dans les formations superficielles d'argiles de décalcification, avec de surcroit des risques de suffosion en cas d'utilisation pour la gestion des eaux pluviales.

Aucun test n'a été réalisé dans les horizons affleurants de calcaires, et nécessitera des investigations complémentaires.



Figure 36 – Illustration des percolations à l'interface remblais/argiles de décalcification entre la fouille F1 et F2.

5. Caractérisation de l'aléa karstique

5.1. Investigations géotechniques

Une étude géotechnique de type G1 a été réalisée par le bureau d'étude ECR sur la parcelle concernée par le projet. L'étude a nécessité la réalisation des investigations suivantes :

- « 10 essais au pénétromètre type DPSH-B (PN1 à PN10) descendus entre 2.40 (Refus) et 6.00 m de profondeur ;
- 21 sondages de reconnaissance géologique à la pelle mécanique (PM1 à PM21) descendus entre 0.05 et 4.00 m de profondeur ;
- 2 piézomètres (PZ1 et PZ2) descendus à environ 50 mètres de profondeur. »

La carte de localisation des essais géotechniques réalisés sur la parcelle sont annexées au présent dossier (Cf. ANNEXE A-II, p88).

Les investigations ont permis d'identifier des « indices karstiques et d'importants remplissages argileux au droit du site » (ECR).

Argiles de décalcification

« Cette formation est constituée d'argiles plus ou moins calcareuses et marneuses de couleur orangée, ocre et brun clair, à passées sableuses et/ou à blocs. Elle a été observée au droit des sondages PZ1, PZ2, PM3 à PM9, PM20 et PM21 jusqu'à [des profondeurs] 1.20 à 18.00m/TA et présente une compacité faible à moyenne » (ECR).

D'un point de vue hydrogéologique, il s'agit d'argiles de décalcification des calcaires, dites « Terra Rossa », qui constituent des formations superficielles et d'altération dans les zones karstiques. Leur épaisseur est assez exceptionnelle (jusqu'à 18.0 m) et peu commune pour le secteur pour lequel des épaisseurs de quelques mètres sont observées. **La suraccumulation de TerraRossa pourrait éventuellement s'expliquer par la position sommitale du secteur, sans réseau hydrographique de surface, avec des pentes faibles ne permettant pas (ou peu) l'érosion de ces formations mais favorisant leur hydrolyse, ET/OU d'une zone d'importante fracturation et d'altération importante des calcaires.**

Karstification des calcaires

« La décompression se matérialise sous la forme soit d'une fracturation (rocher nfruiable), soit d'une karstification (remplissage argileux). Nous avons récapitulé dans le tableau suivant la profondeur du toit du substratum calcaire et l'état de décompression observé dans les sondages destructifs équipés d'un piézomètre » (ECR).

Soutirages superficiels

Lors des investigations de terrain, 3 soutirages ont été constatés sur le secteur.

La présence de ces soutirages ont fait l'objet d'investigations et d'un diagnostic spécifique pour chacun d'entre eux afin de déterminer leur lien (ou non) avec des mécanismes karstiques (Cf. §5.3, p60).

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 56/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

Sondage	Prof. toit du rocher calcaire (m/TA)	Etat de décompression général						
		Quasi-nul jusqu'à 19.20 m/TA	Moyen à fort jusqu'à 26.50 m/TA	Quasi-nul jusqu'à 32.30 m/TA	Moyen jusqu'à 33.80 m/TA	Quasi-nul jusqu'à 37.20 m/TA	Moyen à fort jusqu'à 42.80 m/TA	Quasi-nul jusqu'à 51.35 m/TA
PZ1	18.00							
PZ2	2.20	Quasi-nul jusqu'à 7.80 m/TA	Fort jusqu'à 10.30 m/TA	Quasi-nul jusqu'à 21.10 m/TA	Moyen à fort jusqu'à 26.20 m/TA	Quasi-nul jusqu'à 50.17 m/TA		

Figure 37 – État de décompression du substratum calcaire. « Remarque : la description des terrains traversés et la position des interfaces comportent des imprécisions ou des interprétations inhérentes à la méthode de forage en petit diamètre ». (ECR)

5.1.1. Critère décisionnel « Géotechnique »

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Géotechnique »

DÉFAVORABLE : l'étude géotechnique a mis en évidence la présence d'épaisseurs importantes d'argiles de décalcification, de soutirages, et d'importantes zones décompactées dans le substrat calcaire.

Des préconisations constructives ont été établies par ECR pour chacune des configurations géologiques en présence.

5.2. Inventaires existants de l'aléa

5.2.1.1. Atlas des mouvements de terrains (DDT)

Un atlas des mouvements de terrains a été réalisé à l'échelle du département. Ce document a pour vocation de constituer « [...] pour les autorités compétentes, un outil d'aide à la décision dans le cadre de la mise en œuvre de la politique de prévention des risques naturels, et dans un souci d'aménagement durable du territoire. »

« L'atlas cartographique [...] pourra être associé à des mesures de prévention adaptées à chaque phénomène et à son niveau d'aléa. Ces mesures seront déclinées à plusieurs niveaux : définition du droit du sol (documents d'urbanisme), application du droit du sol (autorisations d'urbanisme), mesures de réduction de la vulnérabilité portées à la connaissance des maîtres d'ouvrages. »

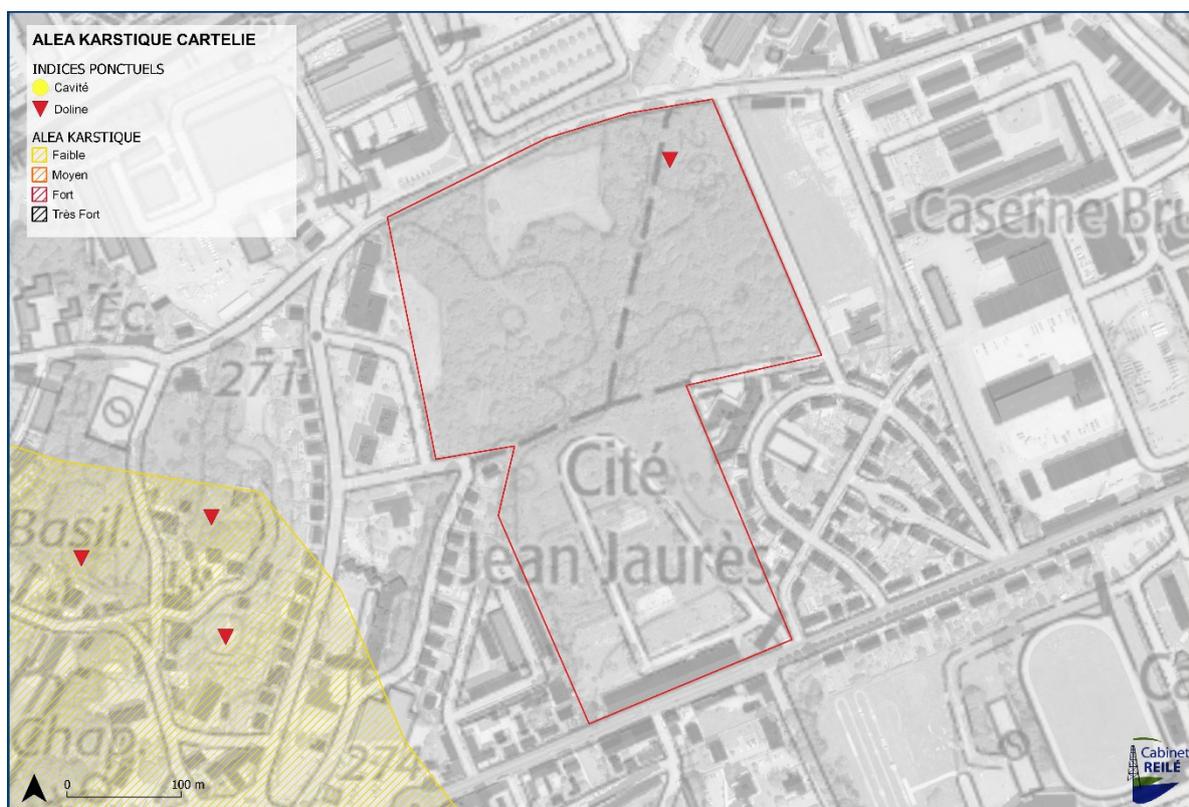


Figure 38 - Localisation du projet selon l'atlas des mouvements de terrain et de l'aléa karstique (export CARTELIE)

L'atlas mentionne la présence d'une doline dans le secteur nord-est du projet et caractérise toute la zone du projet en dehors de tout aléa karstique. Plus au sud-ouest, le quartier de Saint-Ferjeux présente de nombreux indices karstiques constitués majoritairement de dolines et d'une cavité inventoriée (abri de la basilique). Ce secteur est classé en aléa karstique « FAIBLE ».

NOTA : l'atlas des mouvements de terrains donne un inventaire indicatif et non exhaustif de l'aléa karstique. Il nécessite localement des études ou analyses complémentaires pour affiner l'aléa karstique, notamment dans les zones de transition entre zonages ou en bordure d'indices avérés.

5.2.1.2. PLU Besançon (GBM)

Un zonage complémentaire de l'aléa karstique a été réalisé en 2019 par le CABINET REILÉ dans le cadre de la révision du PLU de Besançon. Le projet se trouve dans une zone à aléa « FAIBLE » en léger chevauchement à l'Ouest avec la zone d'aléa « MOYEN » du quartier de Saint-Ferjeux.

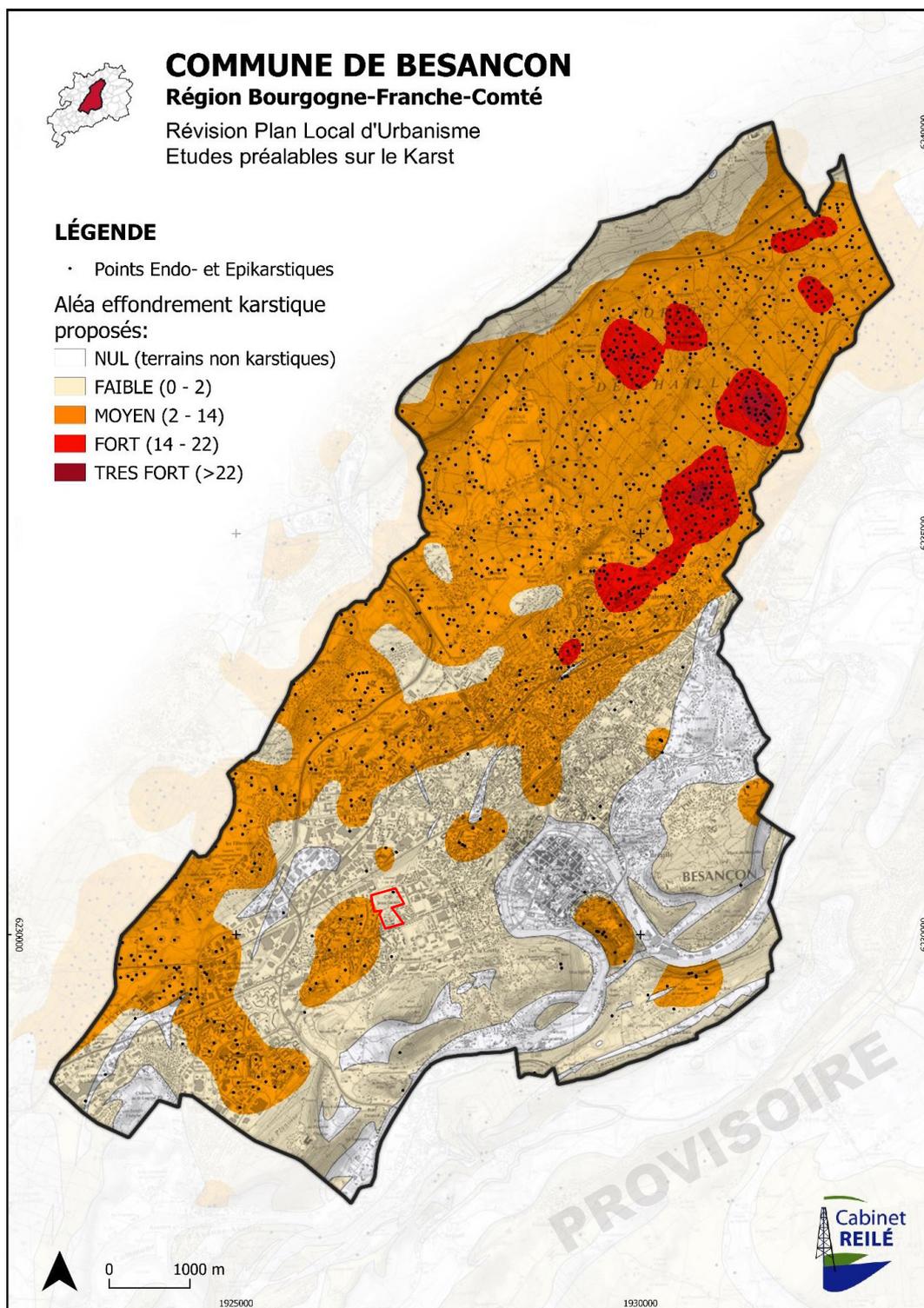


Figure 39 - Localisation du projet sur la cartographie de l'aléa karstique de Besançon (Cabinet Reilé)

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 59/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

5.3. Diagnostic soutirages

5.3.1. Localisation des soutirages

Au cours des investigations géotechniques par ECR, 3 soutirages ont été identifiés sur le site. Ils se situent dans le secteur sud de la parcelle.



Figure 40 - Photographie des soutirages identifiés lors des investigations géotechniques (ECR)

5.3.1. Analyse diachronique

D'après les anciennes photographies aériennes du secteur, les soutirages se localisent sous les anciens bâtiments ou en bordure de voirie (Cf. Figure 41).

La localisation de ces soutirages en milieu très anthropisé et leur développement superficiel (inférieur à 1.00 m de profondeur), ne permettent pas d'écarter leur nature anthropique (conséquence de l'effondrement de conduites, ou d'anciens « flash » de canalisation qui apparaissent dorénavant en surface).

La présence de ces soutirages nécessitera des investigations hydrogéologiques complémentaires pour caractériser leur nature.

5.3.1.1. Fonctionnalité hydraulique

Aucune fonctionnalité hydraulique n'a pu être identifiée pour les différents soutirages. Seul l'aménagement de la zone serait en mesure d'activer une fonctionnalité hydraulique pour ces éléments.

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 60/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		



Figure 41 – Carte de localisation des soutirages, analyse diachronique sur orthophotographies (revoir localisation précise soutirages)

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone		Grand Besançon Métropole		Page 61/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

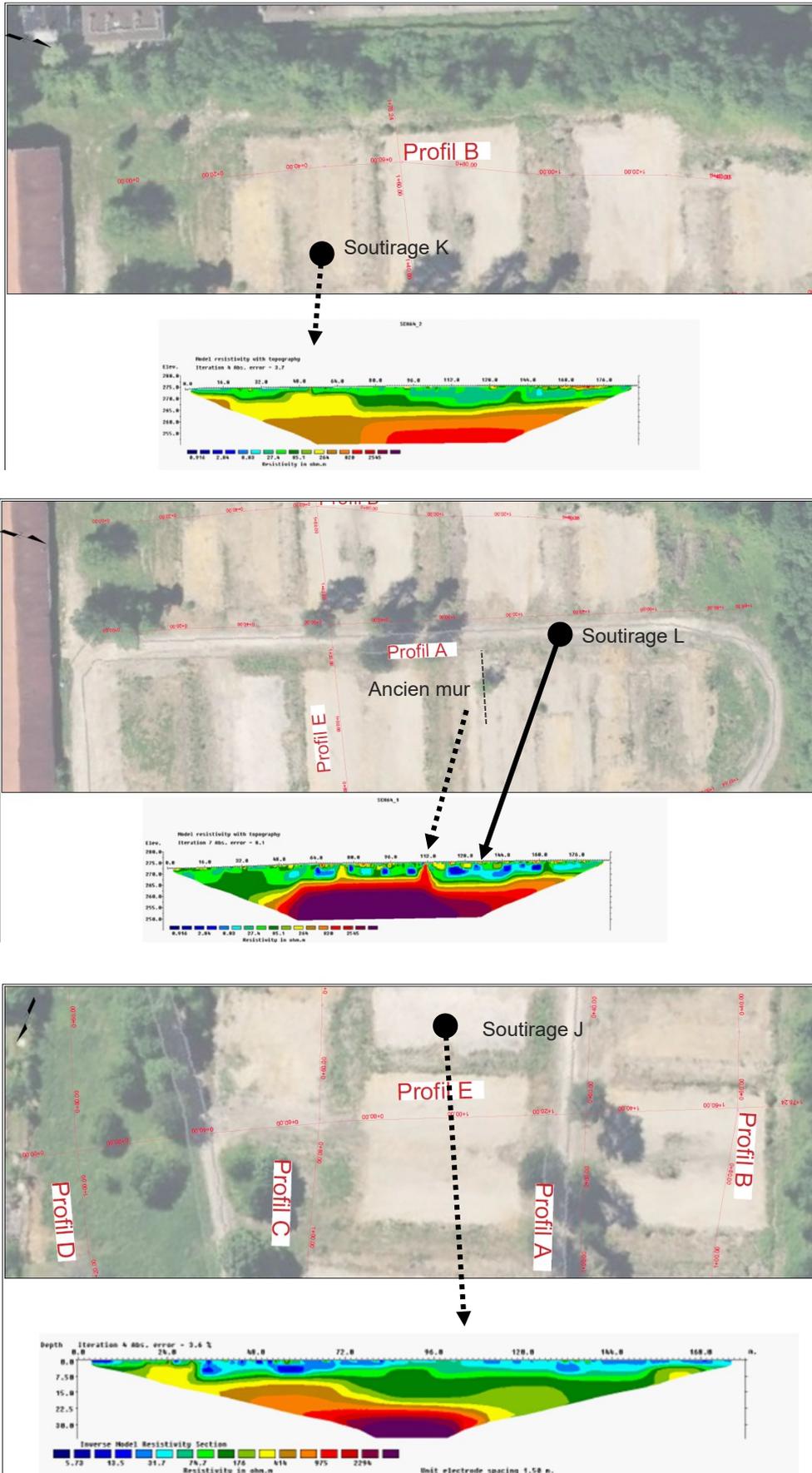


Figure 42 - Localisation des soutirages sur profils géophysiques (ECR, modifié)

5.3.1.1. Critère décisionnel « Indice karstique »

DIAGRAMME DÉCISIONNEL

Critère « Indice karstique »

Il est difficile d'établir la nature karstique de ces soutirages au regard de leur faible développement, et de leur localisation dans une zone au passif anthropique.

Il est recommandé la réalisation par un hydrogéologue d'investigations complémentaires afin de mieux caractériser ces indices et leur éventuel impact sur les aménagements futurs. En l'absence de caractérisations précises, un périmètre de 20 mètres en aléa karstique fort sera considéré autour de chacun des soutirages.

5.3.2. Identification des enjeux

Les soutirages se localisent dans la friche des anciens bâtiments détruits du site. Aucun enjeu n'est actuellement identifié. Dans le futur les parcelles aménagées, les études complémentaires permettront de lever ou non l'aléa, et, le cas échéant, d'adapter les aménagements à leur présence

Aucune infrastructure à enjeu n'est localisée actuellement dans un rayon de 20 mètres autour des zones de soutirage. Il est recommandé de ne pas installer d'installation dans ce périmètre avant toute levée ou confirmation de l'aléa.

Tableau 11 – Proximité des infrastructures identifiées & enjeux associés

Infrastructure	Distance	Enjeux
Actuel : friches	Immédiat	Inexistant
Futur : parcelle aménagée	5 m	En fonction du projet
	10 m	
	20 m	

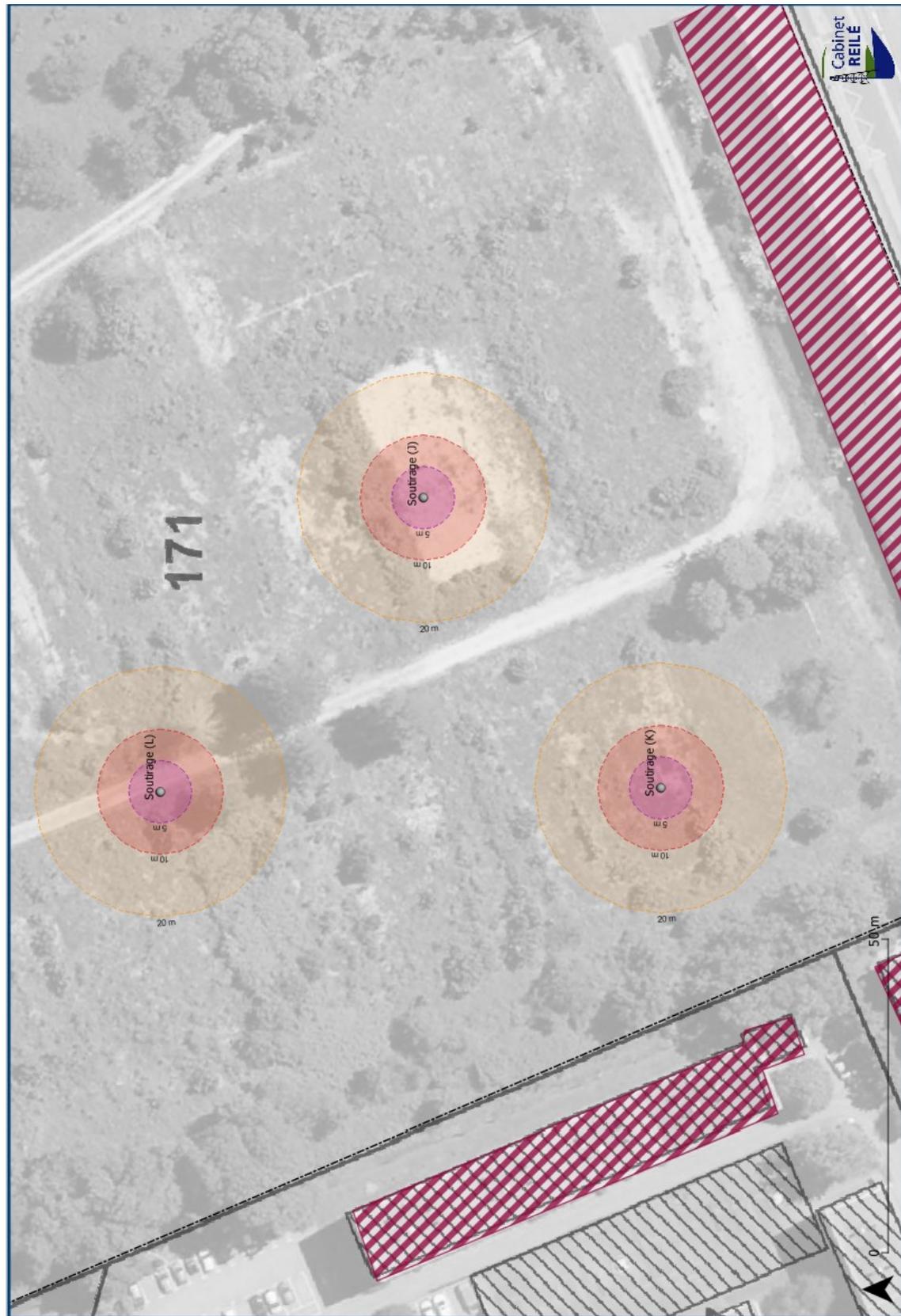


Figure 43 - Cartographie des infrastructures à risque et de leur proximité aux soutrages

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone		Grand Besaçon Métropole		Page 64/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

5.3.3. Recommandations/Aménagements

5.3.3.1. Sécurisation

Une sécurisation des pourtours des affaissements est recommandée à une distance de 5 mètres pour identifier chaque zone de risque.

5.3.3.2. Investigations complémentaires

Des investigations complémentaires sont nécessaires pour établir l'origine de ces soutirages et différencier l'origine anthropique d'un réel soutirage par le karst sous-jacent. Il pourrait s'agir graduellement d'une recherche d'archives des réseaux sous-jacents, d'une investigation de détection de réseaux métalliques, d'investigations géophysiques, de fouilles à la pelle, de caractérisations géotechniques de recherche d'indices de décompaction. Toutes ces investigations devront répondre à la problématique hydrogéologique de caractérisation de l'indice. Elles pourront être mises en œuvre en fonction des enjeux à proximité de ces indices.

5.3.3.3. Stabilisation/Confortement

En fonction des résultats des investigation, les zones de soutirage pourront faire l'objet de plusieurs types d'aménagement en fonction des besoins/contraintes de l'aménageur.

L'aménagement dépendra notamment des modalités de gestion des eaux pluviale du projet (exemple : utilisation en point de rejet suite à la mise au jour d'une zone karstique sous-jacente favorable à l'infiltration). Tous les aménagements devront répondre aux contraintes hydrogéologiques et géotechniques des abords du soutirage.

En l'absence d'aménagement, si l'indice est la conséquence d'un mécanisme karstique, sa surface et son volume augmentera lentement par érosion régressive (affaissements successifs sur ses abords) jusqu'à atteindre un angle de talus stabilisé.

5.4. Diagnostic dépression/doline

Une dépression est visible au nord-est de la parcelle. Celle-ci a été identifiée comme étant une doline dans l'ensemble des inventaires disponibles (CARTELIE, et compléments Karst PLU GBM).



Figure 44 - Photographie panoramique de la dépression

Dans sa partie ouest, la dépression est partiellement remblayée par un ensemble de déchets anthropiques/remblais inertes et ne permet pas d'établir son étendue précise sous-couverture. Sur le terrain, la dépression est parfaitement visible sous couvert forestier, et se trouve clairement délimitée par le talus de remblais.



Figure 45 – Limite ouest de la dépression avec la ligne de talus de remblais/déchets

Un fossé se développe le long du chemin forestier traversant la parcelle de part en part, depuis la rue de l'abbé Grégoire jusqu'à la doline. Le fossé ne présente pas de fonctionnalité hydraulique apparente, mais son fonctionnement en période pluviométrique exceptionnelle n'est pas écarté. L'ensemble des écoulements potentiels sont donc dirigés vers la dépression pour y être infiltrés. Aucun autre exutoire de surface ne permet l'évacuation des eaux, il s'agit donc d'un petit bassin endoréique.



Figure 46 – Photographie du fossé drainant le long du chemin forestier

Une analyse de la morphologie de la dépression a été réalisée sur la base des données LIDAR fournies par GBM.

D'après les analyses topographiques, la dépression se développe selon 2 lobes distincts :

- **Un lobe interne** délimité par l'altitude 264.80 m (NGF) représentant une surface totale d'environ 3 000 m². Ce lobe interne est scindé en 2 parties nord/sud par un cordon vraisemblablement anthropique qui masque l'étendue sous-jacente de la dépression.
- un **lobe externe** délimitée par l'altitude 265.80 m et représentant une surface totale d'environ 7 500 m². Ce lobe externe permet l'atterrissage topographique de la dépression

Ces critères de délimitation seront repris dans le cadre de l'analyse de l'aléa karstique de la doline.

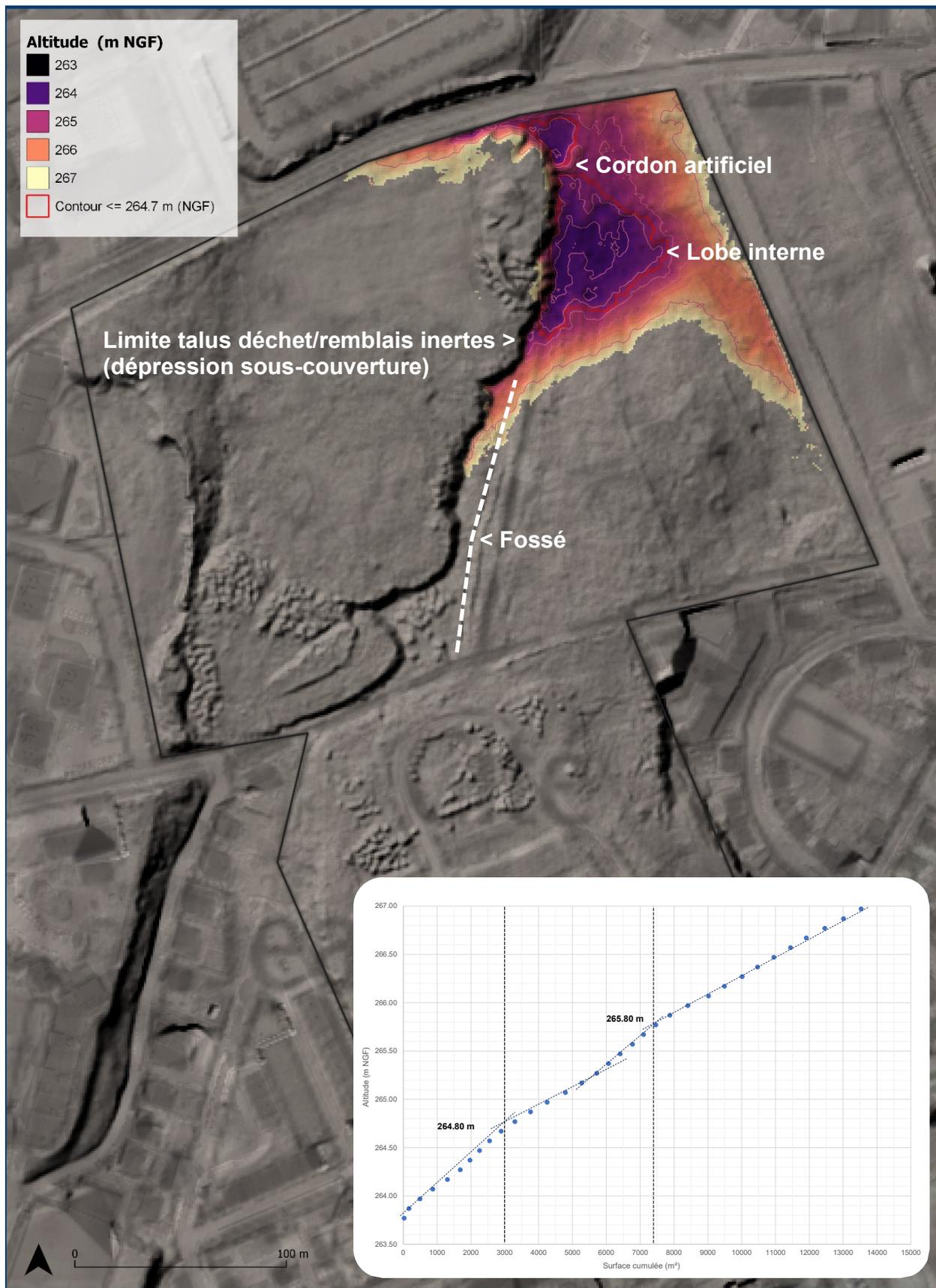


Figure 47 - Analyse morphologique de la dépression visible en surface

Pour rappel, l'analyse des données géophysiques (Cf. §4.1.2.1, p19) a permis par d'identifier la présence de 2 dépressions sous couverture. La nature de ces dépressions n'est pas totalement établie, mais **la dépression jouxtant la doline inventoriée pourrait constituer un ensemble continu beaucoup plus large** (la doline inventoriée ne serait que la partie superficielle d'un plus grand ensemble centré plus à l'ouest).

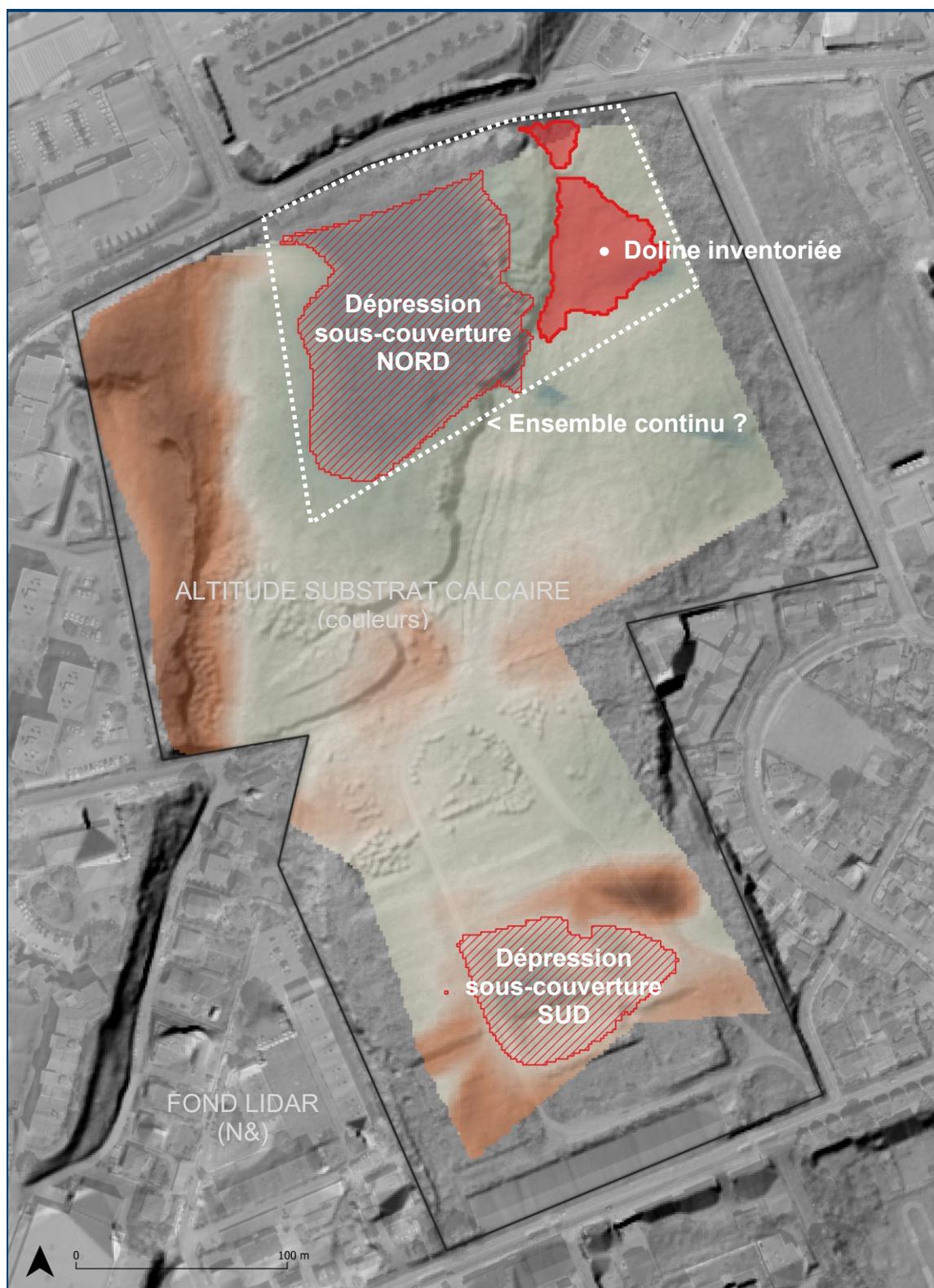


Figure 48 – Cartographie des dépressions en surface et sous-couverture

5.5. Analyse de densité des indices karstiques

Une cartographie de la densité des indices karstiques a été réalisée sur la base de l'ensemble des inventaires publics disponibles et des connaissances locales. Les soutirages indifférenciés (J, K, L) n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. **Le projet se situe dans un secteur d'aléa moyen avec une densité d'indices comprise entre 2 et 4 dans un rayon de 500 m. La découverte récente d'un soutirage sur la zone militaire a modifié vers l'est les contours de l'aléa moyen du PLU.**



Figure 49 - Cartographie de la densité d'indices karstiques

5.6. Diagramme décisionnel de l'aléa karstique

5.6.1. Caractérisation de l'aléa karstique

D'après l'ensemble des éléments recueillis au cours des différentes investigations, les critères de définition de l'aléa karstique du secteur étudié sont synthétisés dans l'arbre décisionnel suivant.

Tableau 12 - Diagramme décisionnel aléa karstique

CRITÈRES	CONCLUSIONS
LITHOLOGIE	<u>Contexte karstique</u> : Le projet se développe des formations d'argiles d'altération recouvrant un substrat calcaire. Le secteur est propice à une karstification directe ou sous-couverture.
HYDROGÉOLOGIE & VULNÉRABILITÉ Infra. > Karst Karst > Infra.	<p><u>Karstogénèse</u> : Le secteur présente une karstogénèse avancée avec la présence de nombreux indices dans le secteur : soutirages, dolines du quartier St-Ferjeux, quelques cavités fossiles. Le système des sources d'Avanne a été identifiée par traçage comme exutoire des eaux du projet avec des vitesses de transit caractéristiques d'un réseau fonctionnel.</p> <p><u>Vulnérabilité</u> : l'aquifère karstique n'est pas exploité pour l'alimentation en eau potable. La ressource en eau ne présente pas de vulnérabilité plus grande que celle inhérente à ses caractéristiques intrinsèques (aquifère karstique).</p> <p><u>Piézométrie</u> : Le niveau piézométrique se situe à 25m de profondeur et correspond au niveau de base de la source d'Avanne et plus largement du Doubs. Aucun risque de remontée de nappe n'est envisagé pour le projet.</p>
INDICES KARSTIQUES INVENTAIRE & CARACTÉRISATION	<p><u>Inventaire(s)</u> : Selon les inventaires disponibles, le projet est localisé dans une zone avec un aléa karstique inexistant (CARTELIE) à moyen (GBM), avec la présence d'une doline au nord-est de la parcelle.</p> <p><u>Dépressions & Dolines</u> : La présence d'une doline au nord-est de la parcelle partiellement remblayée par une décharge est confirmée par l'ensemble des levés de terrain et données publiques disponibles.</p> <p><u>Soutirages & Affaisements</u> : La parcelle présente une suspicion de 3 soutirages de 1.0 mètre de profondeur dans les remblais de la cité Jean-Jaures. La nature anthropique des soutirages est privilégiée au regard des investigations, mais leur attribution à un phénomène karstique n'est pas écartée.</p> <p><u>Densité d'indices</u> : La densité d'indices exo- et endo-karstiques dans le secteur est représentative d'un aléa karstique moyen et confirme le niveau d'aléa des inventaires existants.</p>
ACTIVITÉS D'AFFAISSEMENT & HYDRAULIQUE	<p><u>Géotechnique</u> : Les investigations géotechniques ont permis d'identifier d'importants recouvrement d'argiles de décalcification (jusqu'à 18mètres) et d'indices de décompactage du substrat calcaire. Les soutirages présentent une activité d'affaissement faible, sans identification d'axe de suffosion particulier.</p> <p><u>Ruissellement</u> : aucune activité de ruissellements majeurs sur le secteur. Présence d'un fossé sans activité hydraulique apparente. Concentration mineure des écoulements vers la doline au nord-est.</p> <p><u>Rétention/Infiltration</u> : les essais d'infiltrations présentent de très mauvaises capacités d'infiltration dans les formations superficielles d'argiles de décalcification</p> <p><u>Ouvrage hydraulique</u> : aucun ouvrage d'infiltration aménagé actuellement</p>
ALÉA KARSTIQUE	Au regard de ces éléments, nous confirmons que le projet se développe dans une zone karstique avec un ALÉA KARSTIQUE MOYEN À TRÈS FORT impliquant des difficultés à sa constructibilité et à la gestion des eaux pluviales.

5.7. Zonage proposé de l'aléa karstique et des contraintes additionnelles d'aménagement

5.7.1. Aléa karstique

Au regard des différentes investigations et des doctrines en vigueur, il est proposé les zonages et critères de délimitation suivants :

- **Zonage des soutirages et de leurs abords :**
 - **Aléa Très Fort** : périmètre immédiat d'une expression endo- exo-karstique ajouté d'un périmètre de 5 mètres (incertitude géoréférencement)
 - **Aléa Fort** : périmètre réglementaire de 20 mètres selon la doctrine régionale de gestion des mouvements de terrain
- **Zonage de la doline :**
 - **Aléa Très Fort** : Fond de la doline inventoriée sous l'altitude 264.80 m NGF (lobe interne de la doline selon analyse géomorphologique)
 - **(Aléa Très Fort, sous couverture)** : contour arbitraire de la zone remblayée de la doline selon le contour de l'aléa très fort + morphologie arbitraire de la dépression
 - **Aléa Fort** : bordure de la doline sous l'altitude 265.80 m NGF (lobe externe de la doline avec atterrissage topographique)
 - **(Aléa Fort, sous couverture)** : contour arbitraire de la zone remblayée de la doline selon le contour de l'aléa fort + morphologie apparente de la dépression + contour de la dépression identifiée au nord par géophysique.
 - **Aléa Moyen** : atterrissage topographique de la doline au nord-est sous l'altitude 267.00 m NGF
 - **(Aléa Moyen, sous couverture)** : contour arbitraire de l'atterrissage topographique de la zone remblayée de la doline jusqu'au contour de l'aléa moyen de la densité des indices karstiques + contour de la dépression identifiée au sud par géophysique
- **Zonage du reste de la parcelle :**
 - **Aléa Moyen** : sur la moitié ouest de la parcelle justifiée par une densité d'indices karstiques compris entre 2 et 14 dans un rayon de 500 m
 - **Aléa faible** : sur le reste de la parcelle justifié par la présence d'un substrat calcaire à potentiel karstique et dont la densité d'indices karstiques est inférieure à 2 dans un rayon de 500 m
- **Zonage du risque de suffosion :**
 - **Aléa moyen** : ensemble des terrains avec recouvrement d'argiles de décalcification, à l'exception des zones de calcaire affleurant au nord-ouest de la parcelle.

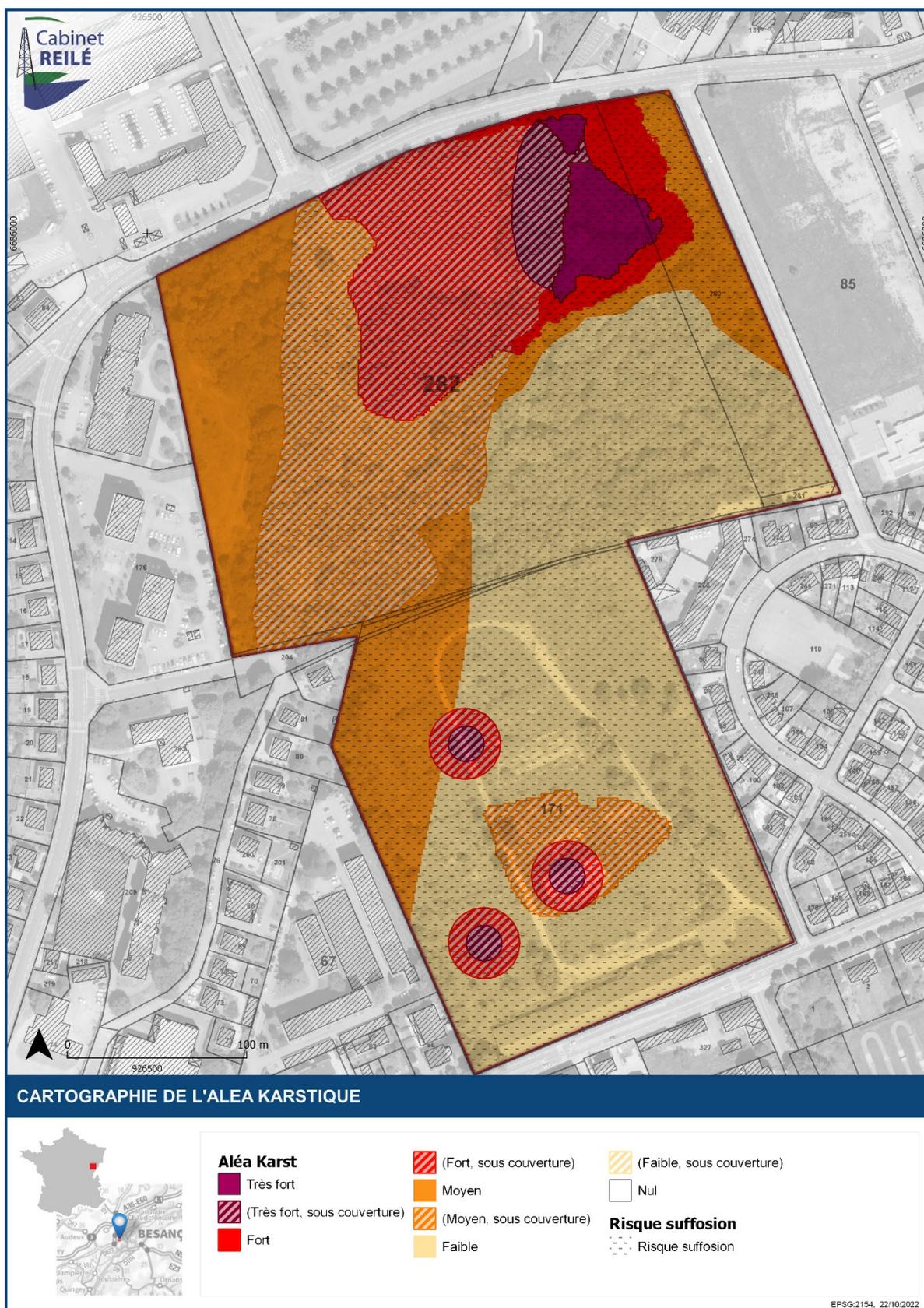


Figure 50 - Zonage proposé de l'aléa karstique et des prescriptions associées

5.7.2. Contraintes additionnelles d'aménagement

En complément, sont proposées des zones prescriptives additionnelles, avec les critères de délimitation suivants :

Infiltration des eaux pluviales

- **Pour l'ensemble du site : interdiction d'infiltrer les eaux pluviales à la parcelle sur l'ensemble du projet sans étude hydrogéologique préalable en lien avec la gestion des eaux pluviales envisagée (identification de zones favorables, investigations complémentaires, essais d'infiltration localisés, prise en compte des avoisinants).** Cette contrainte forte se justifie au regard de la nature particulièrement exceptionnelle du secteur présentant une karstification complexe, très hétérogène, et de niveaux d'altération exceptionnellement importants.
- **Zonage des secteur favorables à l'infiltration :**
 - **Très favorable** sur la zone de l'ancienne carrière jusqu'à l'ancien front de taille (calcaire affleurant et remblayé) -sous réserve d'étudier l'impact d'un tel rejet vis-à-vis des bâtiments avoisinants-
 - **Favorable** sur la zone de calcaires sub-affleurants au nord-ouest de la parcelle
 - **Assez favorable** dans la zone de l'ancienne doline partiellement comblée (secteur inconstructible, zone d'infiltration externe à aménager, volume naturel de stockage dans la gestion des eaux pluviales)
 - **Peu favorable** sur le reste de la parcelle (sous réserve d'études complémentaires pouvant identifier des zones plus favorables)
 - **Défavorable** dans la zone remblayée (sauf mise à jour d'éléments favorables lors d'investigations complémentaires)

6. Préconisations/Prescriptions

6.1. Constructibilité

6.1.1. Modalités constructives (techniques de construction)

RAPPEL : le diagnostic hydrogéologique n'a pas vocation à caractériser les modalités de constructibilité d'une parcelle, mais uniquement à ses éventuelles adaptations vis-à-vis de la doctrine d'aménagement en milieu karstique, et vis-à-vis des modalités retenues pour la Gestion des Eaux Pluviales et l'Assainissement Non Collectif.

Une étude géotechnique a été réalisée par le bureau d'étude ECR dans le cadre du projet d'aménagement. **Les aménageurs devront se référer à cette étude pour leurs projets d'aménagement.** La constructibilité du projet présenté est possible d'un point de vue géotechnique, sous réserve de la prise en compte des préconisations énoncées.

6.1.2. Modalités hydrogéologiques d'aménagements en milieu karstique (impact sur le milieu et les aménagements)

D'après les doctrines d'aménagement en milieu karstique, des règles de l'art en vigueur, et des conclusions des investigations de terrain, il est proposé pour chacune des zones identifiées (sous réserve de validation du service instructeur) des modalités d'aménagement suivantes :

-  **INCONSTRUCTIBILITÉ STRICTE du fond de la doline** avec possibilité de réalisation des aménagements suivants : ouvrages hydrauliques de gestion des eaux pluviales
-  **(INCONSTRUCTIBILITÉ STRICTE / PROVISOIRE) du fond de la doline remblayée et des abords des soutirages** nécessitant une étude spécifique levant/précisant l'aléa de ces zones.
-  **CONSTRUCTIBILITÉ SOUS CONDITIONS des abords de la doline** nécessitant une étude spécifique complémentaire précisant l'aléa et les modalités constructives
-  **(CONSTRUCTIBILITÉ SOUS CONDITIONS / PROVISOIRE) des abords de la doline remblayée + contours dépressions sous-couverture identifiées par géophysique + abords des soutirages indifférenciés** nécessitant une étude spécifique complémentaire précisant l'aléa et les modalités constructives
-  **CONSTRUCTIBILITÉ SOUS CONDITIONS du reste de la parcelle** des zones d'aléa moyen et d'aléa faible avec risque de suffosion (en pointillés)
-  **INTERDICTION STRICTE des dispositifs d'infiltration à la parcelle** dans la zone remblayée par la décharge.
- INFILTRATION SOUS CONDITION de la réalisation d'une étude hydrogéologique préalable** sur le reste des parcelles :
 -  Zone d'infiltration très favorable
 -  Zone d'infiltration favorable

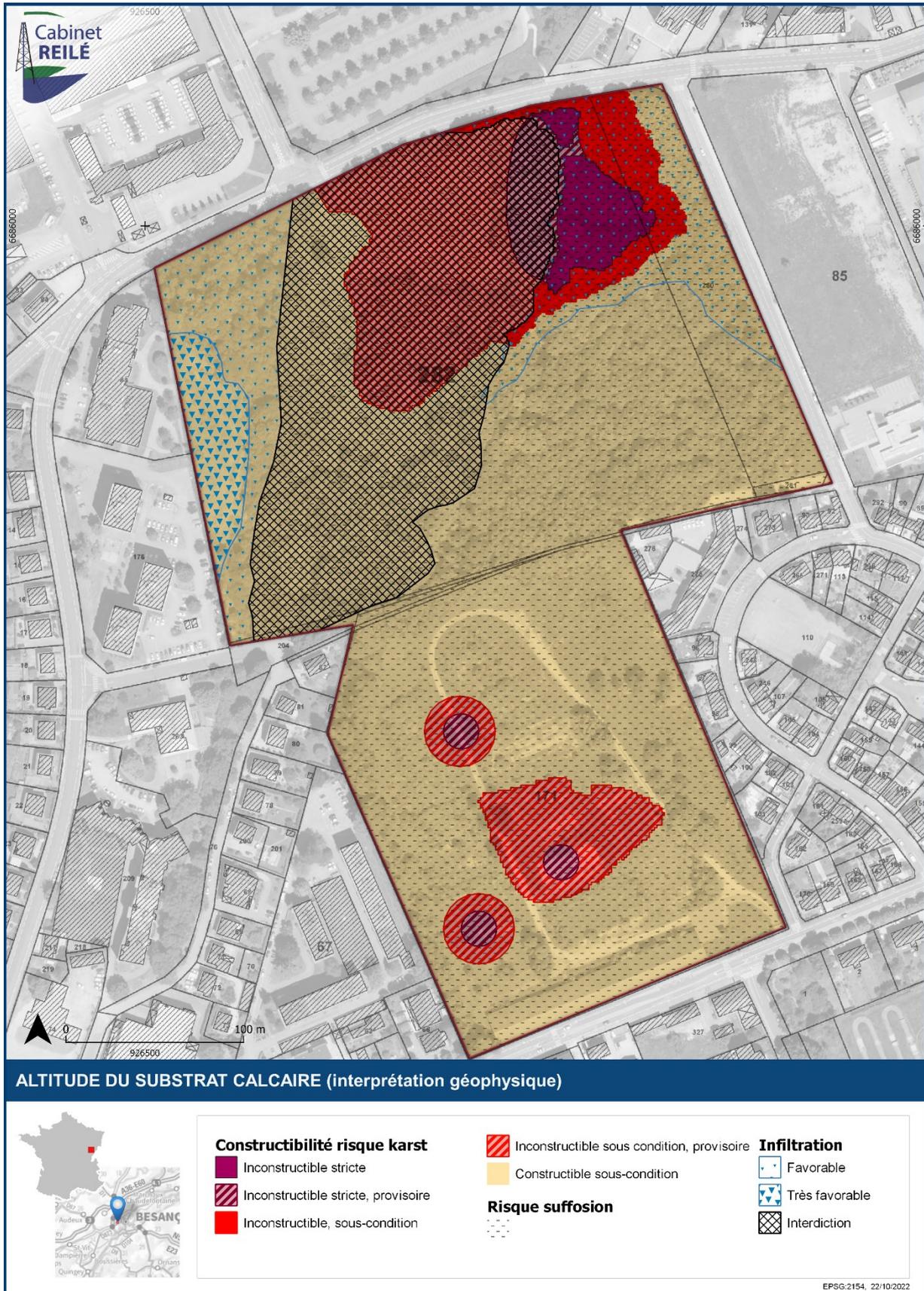


Figure 51 – Proposition de zonage des prescriptions d'aménagement au regard du contexte karstique

6.2. Gestion des Eaux Pluviales

6.2.1. Code de l'environnement

Le projet présente un bassin versant total (augmenté de la surface du bassin versant naturel intercepté) d'environ 126 300 m². Au regard du code de l'environnement, le projet est supérieur à 10 000 m² et nécessitera la constitution d'un dossier de déclaration au titre de la loi sur l'eau et de la nomenclature IOTA.

La déclaration de rejet au titre de la loi sur l'eau ne fait pas l'objet du présent dossier.

6.2.2. Modalités présentées par le porteur de projet & Préconisations

6.2.2.1. Gestion des eaux pluviales externes

Aucun bassin versant naturel externe n'est intercepté par le projet. Le Bassin Versant concerné est composé uniquement du drainage des surfaces du projet.

6.2.2.2. Gestion des eaux pluviales internes

Aucune configuration de la gestion interne des eaux pluviales n'est encore précisée par le Maître d'Ouvrage. **Au regard des éléments développés dans l'étude et du projet d'aménagement au stade esquisse, il est proposé une organisation de la gestion des eaux pluviales selon une configuration hybride (gestion centralisée + à la parcelle).**

Il est privilégié l'utilisation de 2 zones centralisées dédiées à l'infiltration au nord-ouest et nord-est du projet compte tenu des autres secteurs peu favorables à une gestion à la parcelle. Ces deux zones correspondent respectivement à l'ancienne carrière remblayée très favorable à l'infiltration, et à l'ancienne doline assez favorable à l'infiltration et à la gestion de volumes de stockage de la zone (cette zone est d'autant plus utile dans ce cas de figure qu'elle est peu favorable à sa constructibilité). Leur capacité d'infiltration devra faire l'objet de tests. En complément, des points de rejets secondaires par infiltration en surface ou par forage permettraient une gestion à la parcelle pour chaque secteur.

Il est proposé de scinder la zone en 5 îlots avec une gestion spécifique des eaux pluviales. La délimitation des îlots A, B, et C correspondent au découpage proposé dans l'esquisse du projet, avec une trame verte centrale. Deux îlots ont été scindés dans le quart nord-est du projet (îlot D et E) afin de conserver un axe libre vers l'ancienne doline pour y aménager des ouvrages paysagers de gestion des eaux pluviales (noues imperméables de stockage/régulation végétalisées en série avec ouvrages régulateurs – Cf. ANNEXE A-IV, p90).

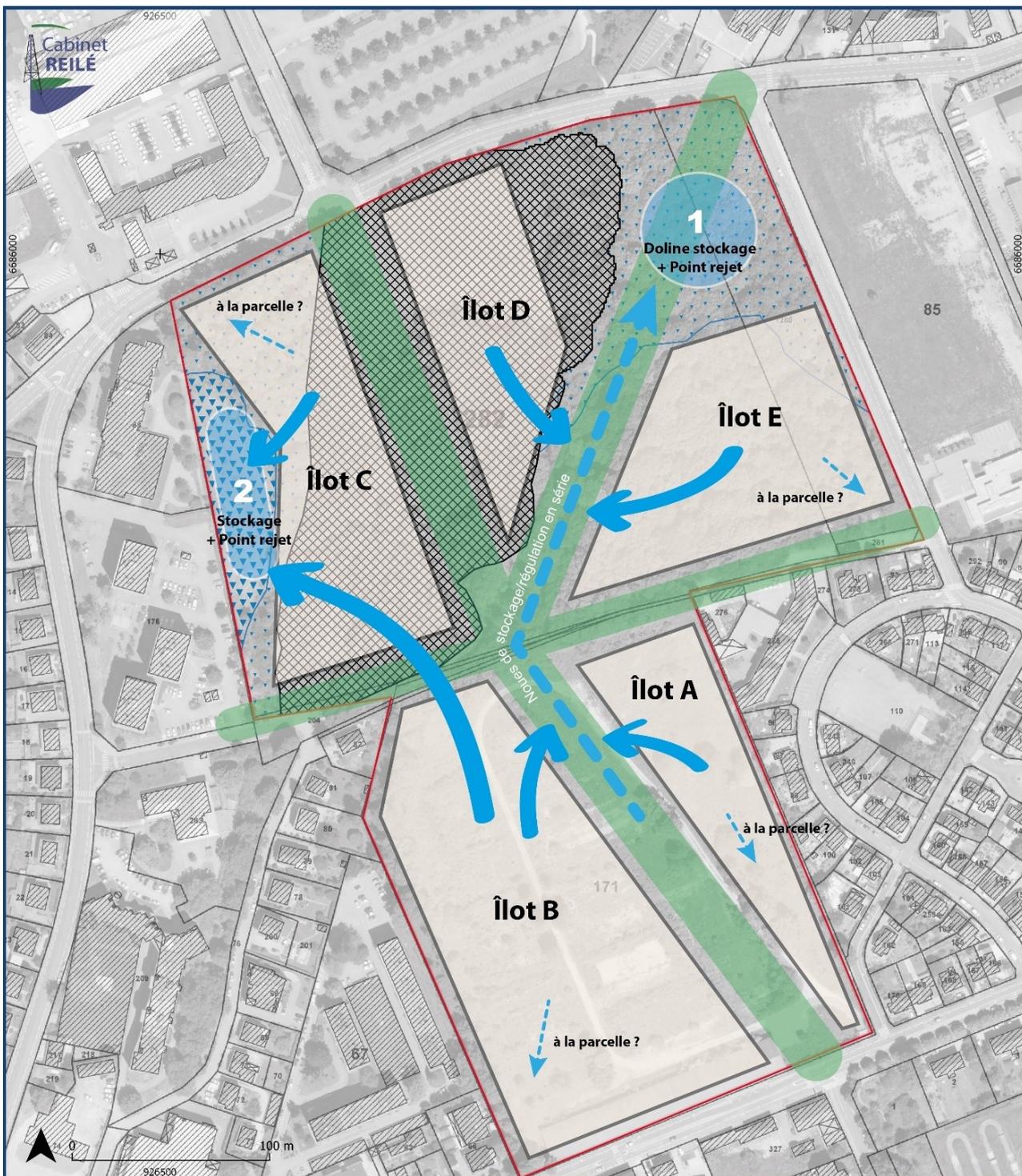
- **Ilot A** : bordé par la trame verte à l'ouest et le quartier existant à l'Est, et situé dans une zone peu favorable à l'infiltration (cas général à valider par étude spécifique), les eaux seront dirigées dans l'axe de la doline (ou dans un point testé sur la parcelle)
- **Ilot B** : bordé par la trame verte à l'Est, et situé dans une zone peu favorable à l'infiltration (cas général à valider par étude spécifique), les eaux peuvent être dirigées dans l'axe de la doline, ou dans la zone d'infiltration préférentielle de l'ancienne carrière remblayée (ou dans un point identifié sur la parcelle)
- **Ilot C** : au voisinage de l'ancienne carrière remblayée, et localisé en partie sur la zone de décharge, les eaux seront rejetées préférentiellement dans la zone d'infiltration préférentielle de l'ancienne carrière remblayée. Une gestion à la parcelle peut être

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 77/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

envisagée uniquement dans le quart nord-ouest de cet îlot dans la zone d’affleurement des calcaires. Aucune gestion à la parcelle n’est envisagée dans la zone remblayée par l’ancienne décharge (excepté par forages d’infiltration).

- **Ilot D** : au voisinage de l’ancienne doline, localisé sur la zone de décharge, à l’aplomb d’une dépression sous couverture, les eaux seront rejetées dans la doline au niveau d’un point d’infiltration aménagé. Aucune gestion à la parcelle n’est envisagée pour cet îlot au regard du contexte anthropisé de la zone (excepté par forage d’infiltration). Au besoin, les eaux pourraient être dirigées vers la zone d’infiltration préférentielle de l’ancienne carrière remblayée
- **Ilot E** : au voisinage de l’ancienne doline, les eaux seront rejetées dans celle-ci. Une gestion à la parcelle est également envisageable.

La gestion des eaux pluviale doit être validée par : la réalisation d’essais d’infiltration complémentaires sur la zone de l’ancienne carrière et de la doline partiellement remblayée, et nécessitera également des études hydrogéologiques spécifiques pour chacun des projets afin d’identifier des points de rejets pérennes (sauf îlot D et le sud de l’îlot C). Au besoin, et le cas échéant, des tests d’infiltration par forage pourrait être envisagée.



CARTOGRAPHIE DES MODALITES GENERALES DE GESTION DES EAUX PUVIILES

PROSPECTION POINT DE REJET EP

- Très favorable (sous réserve tests)
- Favorable (sous réserve tests)
- Peu favorable (à étudier au cas par cas)
- Interdiction (sauf par forage)

EPSG:2154, 22/09/2022

Figure 52 - Principe général de gestion des eaux pluviales

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 79/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

TABLE DES MATIÈRES

1. Contexte général du projet.....	5
1.1. Localisation du projet.....	5
1.2. Description générale du projet.....	5
2. Occupation des sols	7
2.1. État actuel.....	7
2.2. Évolution de l'occupation des sols (étude diachronique)	9
3. Méthodologie générale	11
4. Contexte géologique & hydrogéologique.....	12
4.1. Contexte géologique.....	12
4.1.1. Investigations complémentaires de terrain	14
4.1.1.1. Levés structuraux de surface.....	14
4.1.1.2. Investigations géotechniques (fouilles à la pelle & forages)	14
4.1.1.2.1. <i>Fouilles à la pelle</i>	14
4.1.1.2.2. <i>Piézomètres</i>	16
4.1.1.1. Investigations géophysiques.....	19
4.2. Contexte hydrogéologique	22
4.2.1. Inventaire des traçages	22
4.2.2. Traçage - Fouille à la pelle F4, Avenue Clémenceau	23
4.2.2.1. Modalités.....	23
4.2.2.2. Synthèse des résultats	25
4.2.3. Réseau karstique avéré.....	29
4.2.3.1. Inventaire des cavités et sources karstiques du secteur	29
4.2.3.1. Sources d'Avanne (exutoire du secteur)	31
4.2.3.2. Critère décisionnel « Karstogénèse »	31
4.2.4. Piézométrie.....	32
4.2.4.1. Localisation des dispositifs de suivi	32
4.2.4.2. Modalités métrologiques.....	32
4.2.4.3. Description des ouvrages	35
4.2.4.3.1. <i>Piézomètre PZ1</i>	35
4.2.4.3.2. <i>Piézomètre PZ5</i>	35
4.2.1. Piézomètres de référence.....	37
4.2.1.1.1. <i>Inventaire des ouvrages de la masse d'eau</i>	37
4.2.1.1.2. <i>Caractéristiques de l'ouvrage de référence</i>	37
4.2.1.1.3. <i>Modalités de mesure & QA/QC des données</i>	38
4.2.2. Résultats de suivi.....	40
4.2.1. Niveaux de référence.....	43

4.2.1.1.	Comparaison des niveaux piézométriques	43
4.2.1.2.	Variation moyennes mensuelles (VM)	44
4.2.1.1.	Niveaux de référence mensuels	45
4.2.1.2.	Critère décisionnel « Piézométrie »	46
4.2.2.	Essais d'infiltration	47
4.2.2.1.	Localisation	47
4.2.2.2.	Méthode	47
4.2.2.3.	Déroulé des opérations	49
4.2.2.1.	Résultat & interprétation des essais.....	52
4.2.2.1.	Critère décisionnel « Rétention/Infiltration »	54
5.	Caractérisation de l'aléa karstique.....	56
5.1.	Investigations géotechniques	56
5.1.1.	Critère décisionnel « Géotechnique »	57
5.2.	Inventaires existants de l'aléa.....	58
5.2.1.1.	Atlas des mouvements de terrains (DDT)	58
5.2.1.2.	PLU Besançon (GBM)	59
5.3.	Diagnostic soutirages	60
5.3.1.	Localisation des soutirages	60
5.3.1.	Analyse diachronique	60
5.3.1.1.	Fonctionnalité hydraulique.....	60
5.3.1.1.	Critère décisionnel « Indice karstique »	63
5.3.2.	Identification des enjeux	63
5.3.3.	Recommandations/Aménagements.....	65
5.3.3.1.	Sécurisation	65
5.3.3.2.	Investigations complémentaires.....	65
5.3.3.3.	Stabilisation/Confortement.....	65
5.4.	Diagnostic dépression/doline.....	66
5.5.	Analyse de densité des indices karstiques	70
5.6.	Diagramme décisionnel de l'aléa karstique	71
5.6.1.	Caractérisation de l'aléa karstique.....	71
5.7.	Zonage proposé de l'aléa karstique et des contraintes additionnelles d'aménagement	72
5.7.1.	Aléa karstique.....	72
5.7.2.	Contraintes additionnelles d'aménagement.....	74
6.	Préconisations/Prescriptions	75
6.1.	Constructibilité	75
6.1.1.	Modalités constructives (techniques de construction).....	75
6.1.2.	Modalités hydrogéologiques d'aménagements en milieu karstique (impact sur le milieu et les aménagements).....	75
6.2.	Gestion des Eaux Pluviales	77
6.2.1.	Code de l'environnement.....	77

6.2.2.	Modalités présentées par le porteur de projet & Préconisations	77
6.2.2.1.	Gestion des eaux pluviales externes	77
6.2.2.2.	Gestion des eaux pluviales internes	77
TABLE DES MATIÈRES.....		80
TABLE DES ILLUSTRATIONS		83
ANNEXES		86

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 – Plan général du projet présenté par le Maitre d’Ouvrage	5
Figure 2 – Localisation sur plan topographique et plan cadastral.....	6
Figure 3 - Vue générale de la parcelle concernée par le projet (Google Earth).....	7
Figure 4 – Photographies de l’environnement général du projet	8
Figure 5 – Étude diachronique sur photographies aériennes	10
Figure 6 – Contexte hydrogéologique du site étudié	13
Figure 7 - Photographie de l’affleurement calcaire Rue de l’Abbé Grégoire (front ancienne carrière).....	14
Figure 8 - Illustration de la fouille à la pelle en milieu anthropisé (PM14, ECR)	15
Figure 9 - Coupe de sondage du piézomètre PZ1 (ECR).....	17
Figure 10 - Coupe de sondage du piézomètre PZ2 (ECR).....	18
Figure 11 - Altitude du toit du substrat calcaire (m NGF) et levés structuraux sur affleurements	20
Figure 12 – Carte de profondeur du substrat calcaire (ie. isopacité des formations superficielles : altérations et de remblais anthropiques) par interprétation des levés géophysiques et de forages.	21
Figure 13 – Photographies des opérations d’injection de traceur au point n°1	24
Figure 14 – Résultats de suivi au fluorimètre - source d’Avanne (LAV).....	26
Figure 15 - Cartographie des résultats de la campagne de traçage sur fond orthophotographique & IGN	27
Figure 16 - Cartographie des résultats de la campagne de traçage sur fond géologique, et hypothèses de circulations souterraines.....	28
Figure 17 – Photographie aérienne du gouffre des Beaux-Arts.....	30
Figure 18 - Topographie du gouffre des compteurs (Asso. Spéléo du Canton de Rougemont, GIPEK)	30
Figure 19 – Photomontage de l’organisation des sources d’Avanne (Photo JGS25, modifiée)	31
Figure 20 – Carte de localisation des points de suivi de paramètres environnementaux	33
Figure 21 – Photographies des points de suivi	34
Figure 22 - Localisation des piézomètres de références de la masse d’eau dans laquelle s’inscrit le projet.....	37
Figure 23 – Caractéristiques piézométriques de l’ouvrage de référence (d’après données BRGM). De haut en bas : chronique piézométrique avec NPHEc NPBEc, piézométrie mensuelle moyenne, graphique d’autocorrélation	39
Figure 24 – Chroniques piézométriques et organisation de la zone aquifère au droit du projet (bleu clair, PZ2 Clémenceau ; bleu foncé, PZ5 Ste Famille).	40
Figure 25 – Comparaison des amplitudes des chroniques piézométriques.....	41
Figure 26 - Corrélogramme croisé des chroniques piézométriques au droit du projet (PZ2 et PZ5) par rapport au piézomètre de référence à Montferrand-le-Château.....	41
Figure 27 – Corrélogramme croisé du piézomètre PZ5 (Clémenceau) par rapport au piézomètre PZ2 (Ste Famille).	41
Figure 28 – Comparaison des niveaux piézométriques de l’ouvrage du projet et de l’ouvrage de référence avec le déphasage temporel au coefficient maximal de corrélation	43
Figure 29 – Projection des niveaux moyens mensuels au droit du projet.....	44
Figure 30 – Ajustement de Gumbel selon la méthode graphique au piézomètre de référence de Montferrand-le-Château.....	46

Figure 31 - Localisation des essais d'infiltration	47
Figure 32 – Photographies des opérations de fouilles à la pelle en préparation des essais d'infiltration.....	48
Figure 33 – Photographie d'ensemble de l'organisation de l'essai d'infiltration	50
Figure 34 – Photographie d'ensemble de l'organisation de l'essai d'infiltration	51
Figure 35 – Graphiques d'évolution des capacités d'infiltration des différentes fouilles	53
Figure 36 – Illustration des percolations à l'interface remblais/argiles de décalcification entre la fouille F1 et F2. ...	55
Figure 37 – État de décompression du substratum calcaire. « Remarque : la description des terrains traversés et la position des interfaces comportent des imprécisions ou des interprétations inhérentes à la méthode de forage en petit diamètre ». (ECR).....	57
Figure 38 - Localisation du projet selon l'atlas des mouvements de terrain et de l'aléa karstique (export CARTELIE)	58
Figure 39 - Localisation du projet sur la cartographie de l'aléa karstique de Besançon (Cabinet Reilé)	59
Figure 40 - Photographie des soutirages identifiés lors des investigations géotechniques (ECR)	60
Figure 41 – Carte de localisation des soutirages, analyse diachronique sur orthophotographies (revoir localisation précise soutirages)	61
Figure 42 - Localisation des soutirages sur profils géophysiques (ECR, modifié)	62
Figure 43 - Cartographie des infrastructures à risque et de leur proximité aux soutirages	64
Figure 44 - Photographie panoramique de la dépression.....	66
Figure 45 – Limite ouest de la dépression avec la ligne de talus de remblais/déchets.....	66
Figure 46 – Photographie du fossé drainant le long du chemin forestier	67
Figure 47 - Analyse morphologique de la dépression visible en surface	68
Figure 48 – Cartographie des dépressions en surface et sous-couverture	69
Figure 49 - Cartographie de la densité d'indices karstiques	70
Figure 50 - Zonage proposé de l'aléa karstique et des prescriptions associées.....	73
Figure 51 – Proposition de zonage des prescriptions d'aménagement au regard du contexte karstique	76
Figure 52 - Principe général de gestion des eaux pluviales	79

Tableaux

Tableau 1 – Adresse complète du projet et parcelles cadastrales.....	5
Tableau 2 - Évolution de l'occupation des sols de la parcelle concernée par le projet d'aménagement	9
Tableau 3 – Description des critères de l'arbre décisionnel de l'aléa karstique.....	11
Tableau 4 - Liste des points de surveillance et des moyens associés.....	23
Tableau 5 - Synthèse des résultats sur les différents supports de suivi, et niveau de confiance	25
Tableau 6 – Synthèse des résultats sur les différents supports de suivi, et niveau de confiance.....	25
Tableau 7 – Liste des points et des équipements de suivi environnemental	32
Tableau 8 – Niveaux moyens mensuel au piézomètre de référence de Montferrand-le-Château et extrapolation au piézomètre au projet.....	45
Tableau 9 – Définition des niveaux de remontée de nape en fonction de leur récurrence	45
Tableau 10 – Synthèse des essais d'infiltration sur le projet	52

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone				Page 84/91
REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081		

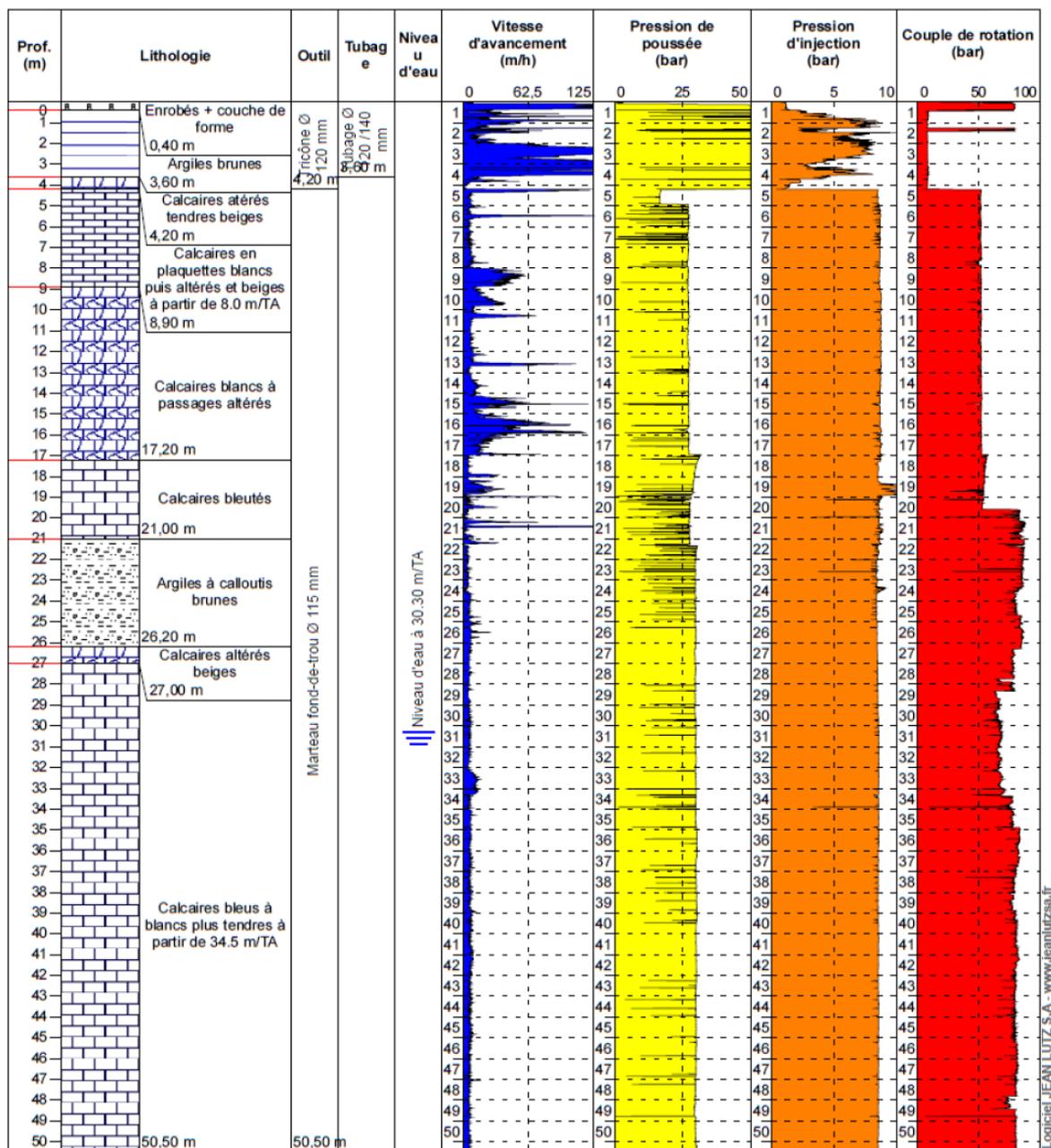
Tableau 11 – Proximité des infrastructures identifiées & enjeux associés	63
Tableau 12 - Diagramme décisionnel aléa karstique.....	71

ANNEXES

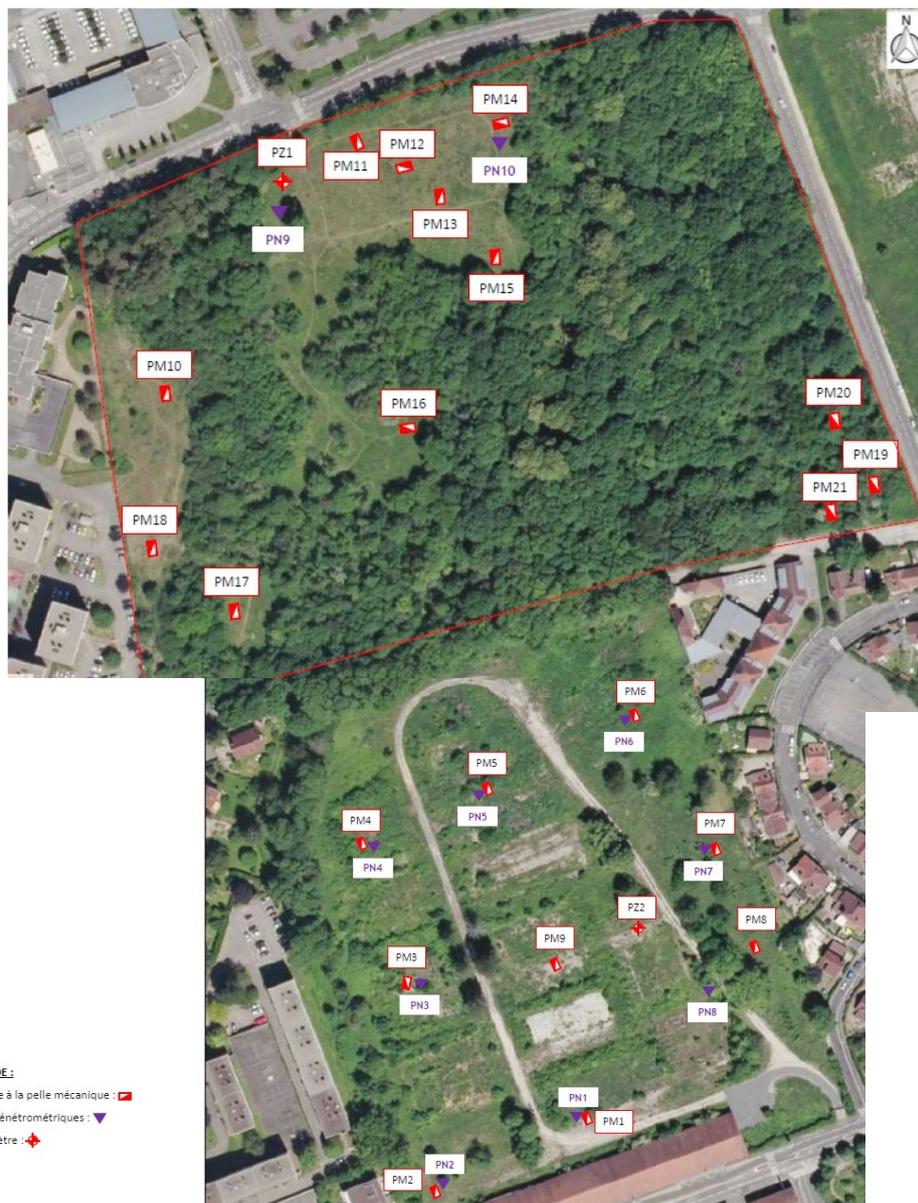
TABLE DES ANNEXES

A-I.	Coupe de sondage piézomètre PZ5 (Saint-Famille).....	87
A-II.	Carte d'implantation des investigations géotechniques (ECR, modifié).....	88
A-III.	Règlement d'aménagement en milieu karstique (DREAL).....	89
A-IV.	Exemple d'aménagements de noues avec dispositifs de régulation.....	90

A-I. Coupe de sondage piézomètre PZ5 (Saint-Famille)



A-II. Carte d'implantation des investigations géotechniques (ECR, modifié)



A-III. Règlement d'aménagement en milieu karstique (DREAL)

Zones soumises aux phénomènes d'affaissement et d'effondrement															
Aléa affaissement / effondrement	Évacuation des eaux pluviales et usées	Écoulement de surface	Infiltrations directes dans les indices avérés (dolines, failles ...)	Comblement d'indices	Ouverture à l'urbanisation	Nouvelles constructions	Reconstruction de bâtiment	Extension bâtiment à proximité de l'indice	Pompage relèvement STEP	Entretien des bâtiments existants	Terrains camping caravanning et accueils gens du voyage avec installations associées	Végétalisation	Piscine, projet avec concentration d'eau	Fosse à lisier, stations de traitements de déchets, lixiviat	
Indices avérés (périphérie réelle de l'indice + 20m ou indice ponctuel matérialisé dans l'atlas + 50m)	Interdit sauf si étude géotechnique hydrogéologique Attention : Ne pas modifier les écoulements ou les modifier très peu. Infiltration des eaux pluviales ou usées tolérée qu'en l'absence de possibilité de raccordement sur un réseau et si cela ne se traduit pas par un risque supplémentaire. Limiter l'imperméabilisation des sols. Privilégier le remplissage des eaux et matériaux drainants.	Interdit sauf si étude géotechnique hydrogéologique Attention : Ne pas modifier les écoulements ou les modifier très peu. Infiltration des eaux pluviales ou usées tolérée qu'en l'absence de possibilité de raccordement sur un réseau et si cela ne se traduit pas par un risque supplémentaire. Limiter l'imperméabilisation des sols. Privilégier le remplissage des eaux et matériaux drainants.	Interdit sauf si pas de solution alternative : le réseau doit être capable d'admettre la quantité d'eau supplémentaire, minimum 10 m en aval de toute construction ou aménagement, injection dans substratum rocheux et non dans les couches de surface, injection progressive (bassin écréteur).	Interdit Le comblement des indices karstiques est à proscrire même avec des matériaux meubles ou perméables	Interdit	Interdit sauf si : Impossibilité à construire hors zone d'aléa ou en aléa plus faible tels que les hangars, agricoles ou forestiers, les unités de méthanisation, les pylônes, transformateurs centraux, téléphoniques... Ces projets ne doivent pas accueillir une présence humaine permanente. Étude géotechnique à produire. A défaut d'étude géotechnique, seuls les très petits projets tels que des abris de jardin, des auvents (<10m²) sont autorisés sans présence humaine permanente – gestion des eaux à étudier	pas concerné – puisque indice avéré	Interdit	Interdit sauf solution alternative existe	Autorisé	Interdit	Autorisé si projet de petite taille uniquement (végétation de moins de 2 m de hauteur) Autorisé Respect des recommandations générales de taille (<2m de hauteur)	Interdit	Interdit	Autorisé sous réserve de porter une attention particulière à l'étanchéité
Forte densité d'indices avérés	Autorisé sous conditions : à faire de façon soignée – toute fuite peut fragiliser la structure des sols et/ou induire des risques de pollution – surveillance régulière des conduits.	Interdit sauf si étude géotechnique hydrogéologique	Interdit	Interdit	Interdit	Interdit	Autorisé sous conditions : Le sinistre n'est pas dû à l'aléa. Pas augmentation des enjeux ou de la vulnérabilité. Étude à produire intégrant également la gestion des eaux	Autorisés sous conditions : Extension bâtiment limitée à 20 m² d'emprise au sol cumulés par bâtiment, sans création de logement supplémentaire. Étude à produire – (garantissant la sécurité des personnes et des biens pas d'augmentation de la vulnérabilité du territoire) gestion des eaux à étudier	Interdit pour certains projets impossibles à construire hors zone d'aléa ou en aléa plus faible. Étude à produire. Surveillance régulière d'éventuelles fuites d'eau.	Autorisé	Interdit	Autorisé	Interdit, sauf si réalisation d'une étude géotechnique intégrant les conséquences d'une fuite et les modalités de vidange (comme en aléa moyen glissement)		
Moyenne densité d'indices avérés	Si aménagements autorisés une étude menée par un hydrogéologue peut être demandée. De plus privilégier les implantations hors zone d'aléa ou en zone d'aléa plus faible.	Interdit sauf si étude géotechnique hydrogéologique	Interdit	Interdit	Interdit	Autorisé sous conditions : Le sinistre n'est pas dû à l'aléa. Pas augmentation des enjeux ou de la vulnérabilité. Étude à produire intégrant également la gestion des eaux	Autorisés sous conditions : Extension bâtiment limitée à 20 m² d'emprise au sol cumulés par bâtiment, sans création de logement supplémentaire. Étude à produire – (garantissant la sécurité des personnes et des biens pas d'augmentation de la vulnérabilité du territoire) gestion des eaux à étudier	Autorisés sous conditions : Extension bâtiment limitée à 20 m² d'emprise au sol cumulés par bâtiment, sans création de logement supplémentaire. Étude à produire – (garantissant la sécurité des personnes et des biens pas d'augmentation de la vulnérabilité du territoire) gestion des eaux à étudier	Autorisé pour certains projets impossibles à construire hors zone d'aléa ou en aléa plus faible. Étude à produire.	Autorisé	Interdit sauf si impossibilité d'implanter hors zone d'aléa ou en aléa plus faible et si production d'une étude pour les bâtiments inclus dans le Permis d'aménager	Autorisé	Interdit, sauf si réalisation d'une étude géotechnique intégrant les conséquences d'une fuite et les modalités de vidange (comme en aléa moyen glissement)		

A-IV. Exemple d'aménagements de noues avec dispositifs de régulation



Porte du Tarn (H2G)



Les mureaux (InfraServices)



Barentin (InfraServices)

Etude hydrogéologique aménagement en milieu karstique – Quartier polygone REILÉ Benoît	27/10/2022	D2021-081	 Grand Besançon Métropole	Page 91/91