



OPHEA

Ôphêa
EUROMÉTROPOLE
HABITAT
STRASBOURG

Rapport

Réalisation de deux forages géothermiques au niveau du centre intergénérationnel à Mundolsheim (67)

Rapport de fin de forage



Rapport n°A118010/A – Octobre 2022

Projet suivi par [REDACTED]

Fiche signalétique

Réalisation de deux forages géothermiques au niveau du centre
intergénérationnel à Mundolsheim (67).
Rapport de fin de forage

CLIENT	SITE
[REDACTED]	Centre intergénérationnel
[REDACTED]	
[REDACTED]	
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	
[REDACTED]	
[REDACTED]	

RAPPORT D'ANTEA GROUP	
Responsable du projet	[REDACTED]
Interlocuteur commercial	[REDACTED]
	Implantation de Strasbourg
Implantation chargée du suivi du projet	03.88.78.90.60 secretariat.strasbourg@anteagroup.fr
Rapport n°	A118010
Version n°	A
Votre commande et date	Bon pour accord du 25/02/2020
Projet n°	ALSP200132

Nom	Fonction	Date	Signature
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	Octobre 2022	48	2	Etablissement du rapport

Sommaire

1. Contexte et objectifs	7
2. Compte-rendu technique	9
2.1. Démarches administratives préalables	9
2.2. Entreprise et déroulement général des travaux de forage	9
2.3. Implantation des puits.....	10
2.4. Rappel du cadre géologique.....	11
2.5. Coupes géologique et technique du puits de rejet	12
2.5.1. Coupe géologique	13
2.5.2. Coupe technique	13
2.6. Coupes géologique et technique du puits de captage	17
2.6.1. Coupe géologique	17
2.6.2. Coupe technique	18
2.7. Avant-puits	22
2.8. Développement.....	23
2.8.1. Puits de rejet	23
2.8.2. Puits de captage.....	24
2.9. Pompage par paliers.....	25
2.9.1. Puits de rejet	25
2.9.2. Puits de captage.....	28
2.10. Test d'injection	30
2.11. Analyses sur les 2 puits.....	31
2.11.1. Structure physico-chimique des eaux des 2 puits.....	32
2.11.2. Concentrations en fer et manganèse	33
2.11.3. Analyses microbiologiques.....	33
3. Inspection des ouvrages par caméra vidéo	34
3.1. Puits de captage	34
3.2. Puits de rejet	37
4. Recommandations pour l'exploitation des puits et l'équipement de la boucle géothermale.....	40
4.1. Puits de captage	40
4.1.1. Positionnement de la pompe immergée	40
4.1.2. Protection de la pompe.....	40
4.1.3. Débit d'exploitation	40
4.1.4. Régime d'exploitation et mise en route.....	40
4.2. Puits de rejet	41
4.2.1. Positionnement du tube d'injection et de de la pompe d'arrosage	41

4.3. Equipement de la boucle géothermique.....	42
4.3.1. Filtre et dispositif de maintien de pression.....	42
4.3.2. Instrumentation	42
4.4. Surveillance et entretien	43
4.4.1. Equipements hydrauliques	43
4.4.2. Bilans de surveillance initiaux	43
4.4.3. Suivi annuel.....	43
5. Suivi réglementaire des forages	45
5.1. Suivi annuel (extrait de l'arrêté du 25 juin 2015 – Annexe 5.2.1).....	45
5.2. Suivi décennal (extrait de l'arrêté du 25 juin 2015 - Annexe 5.2.2).....	45
6. Conclusions.....	46

Table des figures

Figure 1 : Localisation du projet.....	8
Figure 2 : Implantation des puits sur plan masse.....	10
Figure 3 : Mise en place de la colonne en PVC 411/450 mm du puits de rejet	14
Figure 4 : Coupe géologique et technique du puits de rejet.....	16
Figure 5 : Mise en place de la colonne en PVC 411/450 mm du puits de captage	19
Figure 6 : Coupe géologique et technique du puits de captage.....	21
Figure 7 : Photographies des avant-puits (27/09/2022)	22
Figure 8 : Suivi des opérations de développement du puits de rejet	23
Figure 9 : Suivi des opérations de développement du puits de captage	24
Figure 10 : Courbe caractéristique et calcul des pertes de charge du puits de rejet.....	26
Figure 11 : Courbe caractéristique et calcul des pertes de charge du puits de captage	29
Figure 12 : Mesures des niveaux sur le puits de captage et le puits de rejet pendant le test d'injection de 24 heures.....	30
Figure 13 : Diagrammes de Piper et Stabler.....	32
Figure 14 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de captage....	35
Figure 15 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de rejet.....	38

Table des tableaux

Tableau 1 : Indices nationaux des ouvrages réalisés.....	10
Tableau 2 : Coupe géologique du puits de rejet	13
Tableau 3 : Coupe géologique du puits de captage	17
Tableau 4 : Résultats du pompage par paliers au niveau du puits de rejet réalisé le 19 avril 2022	25
Tableau 5 : Résultats du pompage par paliers au niveau du puits de captage réalisé le 03 mai 2022.	28
Tableau 6 : Concentrations en fer et en manganèse dans les eaux souterraines exprimées en µg/L..	33

Table des annexes

Annexe I : Photographies des échantillons des 2 puits réalisés

Annexe II : Rapports d'analyse

1. Contexte et objectifs

Dans le cadre de la construction du nouveau siège du Centre intergénérationnel entre la rue des Ecoles et la rue du Stade à MUNDOLSHEIM (67), l'OPH de l'Eurométropole de Strasbourg a choisi de mettre en place une solution par géothermie basse température sur eau de nappe (échangeur ouvert) pour assurer le rafraîchissement des bâtiment (géocooling).

Une étude de faisabilité (rapport Antea Group A103775/A de mai 2020) a permis de préciser les caractéristiques de la nappe dans le secteur d'étude, son mode de fonctionnement, le dispositif de captage/rejet et le cadre réglementaire.

Le doublet géothermique a été dimensionné afin de permettre un pompage et un rejet d'un débit de **22 m³/h** dans la nappe des alluvions quaternaires.

Le présent document constitue le rapport de fin de forage conformément à l'article 5.1.3. de l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance.

Dans un délai de deux mois maximum suivant la fin des travaux, ce rapport devra être déposé sur le téléservice dédié à l'accomplissement des procédures relatives à la géothermie de minime importance.

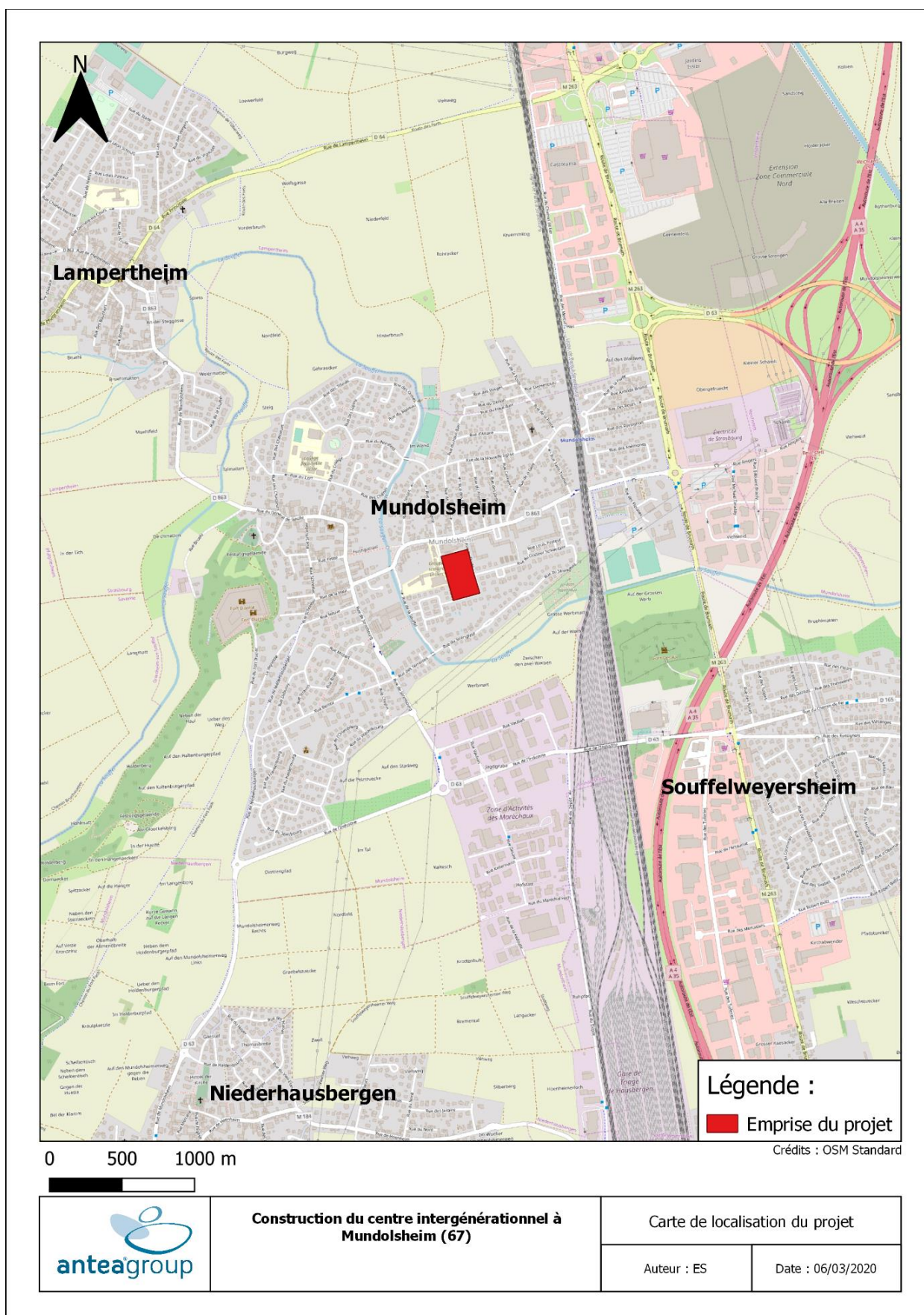


Figure 1 : Localisation du projet

2. Compte-rendu technique

2.1. Démarches administratives préalables

D'un point de vue réglementaire, selon le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 (modifiant le décret n° 78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, l'annexe de l'article R. 122-2 et l'article R. 414-27 du code de l'environnement), le projet est éligible au régime de Géothermie de Minime Importance du Code Minier.

Le projet a donc fait l'objet d'une déclaration sur le téléservice dédié à l'accomplissement des procédures relatives à la géothermie de minime importance. La déclaration a été enregistrée sous le numéro 10096 le 19/10/2021. Elle a été réalisée pour l'installation géothermique de minime importance enregistrée sous le numéro 7807.

2.2. Entreprise et déroulement général des travaux de forage

Les travaux de forage ont été confiés à l'Entreprise FORALEST, Antea Group assurant le suivi hydrogéologique du chantier.

Les travaux de forage proprement dits se sont déroulés du 04 au 18 novembre 2021 pour le puits de rejet et du 16 au 24 mars 2022 pour le puits de captage.

Ils ont été suivis par des pompages de développement (dessablage), des pompages d'essai par paliers de débits croissants puis par un test d'injection de 24 heures entre le 22 et le 23 octobre 2022.

2.3. Implantation des puits

Les travaux ont été réalisés sur le ban communal de MUNDOLSHEIM (cf. Tableau 1).

Ouvrage	Identifiant National Code BSS	Commune	Localisation WGS84	
			Longitude	Latitude
Puits de captage	BSS004CFFG/X	Mundolsheim	7.71553	48.63994
Puits de rejet	BSS004CFFJ/X		7.71591	48.64028

Tableau 1 : Indices nationaux des ouvrages réalisés

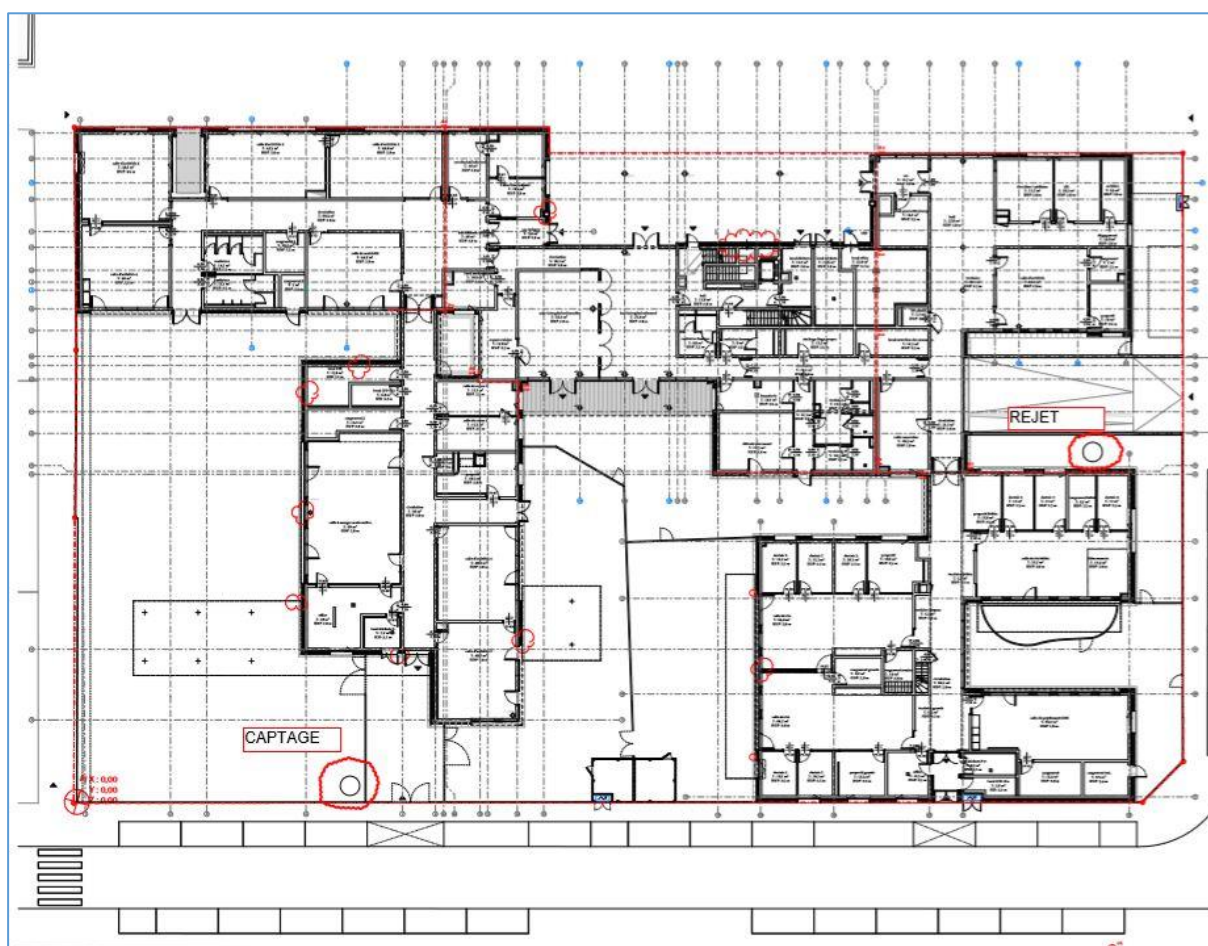


Figure 2 : Implantation des puits sur plan masse

2.4. Rappel du cadre géologique

La commune de MUNDOLSHEIM est localisée en bordure Ouest de la plaine du Rhin, comblée par les alluvions rhénanes sablo-graveleuses du Quaternaire, et en limite Est d'un bassin d'effondrement que l'on appellera « fossé de PFULGRIESHEIM ». Ce dernier est encadré par deux jeux de failles qui ont décalé les dépôts alluviaux au cours du Quaternaire :

- A l'Ouest du fossé, au niveau de STUTZHEIM-OFFENHEIM et de PFETTISHEIM bordant les terrains de l'Oligocène ;
- A l'Est du fossé selon un axe VENDENHEIM-NIEDERHAUSBERGEN.

La faille à hauteur de VENDENHEIM-NIEDERHAUSBERGEN entraîne au voisinage du secteur d'étude un rejet de l'ordre de 30 à 35 m du substratum marneux oligocène (base de l'aquifère alluvial).

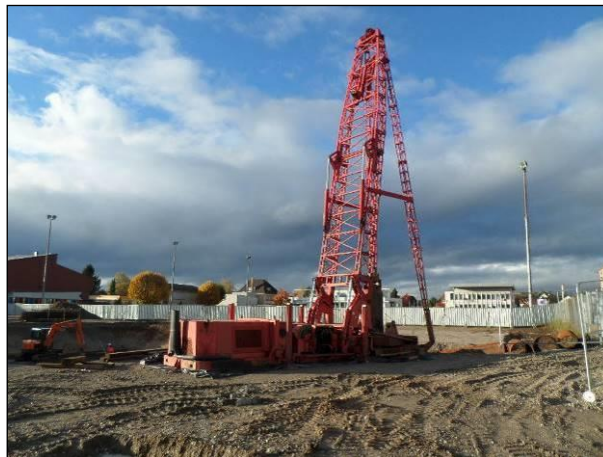
Ainsi, le substratum serait à une cote d'environ +95 m NGF IGN69 à l'aplomb du projet, et affaissé à une cote de l'ordre de +60 m NGF IGN 69 à environ 450 m à l'ouest du projet.

2.5. Coupes géologique et technique du puits de rejet

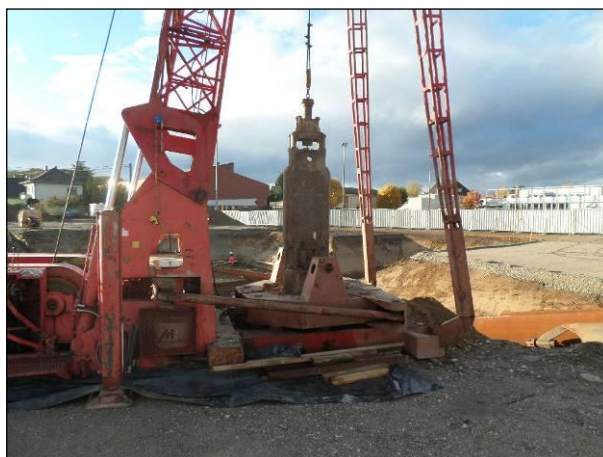
Les travaux de foration ont débuté le 04 novembre et se sont terminés le 18 novembre 2021 à la profondeur d'environ 24 mètres.

La foration par havage est réalisée au moyen d'une benne circulaire munie de coquilles ouvertes qui percute le sol comme un trépan et remonte les déblais, coquilles fermées.

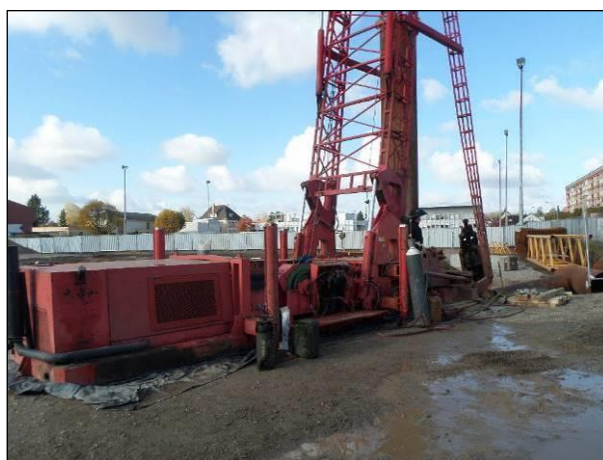
A la fin de chaque passe, l'outil est remonté en surface et vidé.



La benne est manœuvrée au moyen d'un treuil sur un derrick. Parallèlement à l'extraction des déblais, le forage est tubé avec des éléments de tubes soudés en Ø 800 mm, qui à mesure du havage, sont enfoncés par un mouvement de louvoisement.



Ce mouvement est assuré par un louvoyeur muni de vérins enserrant la tête du tubage, actionné par une centrale hydraulique. Des vérins de fonçage et d'arrachage assurent les mouvements verticaux de ce tubage.



2.5.1. Coupe géologique

L'analyse des échantillons recueillis en cours de foration a permis de relever la coupe géologique des terrains recoupés avec une bonne précision compte tenu de la méthode de foration utilisée.

Profondeur	Lithologie – Puits de rejet
De 0 à 0,3 m	Remblais
De 0,3 à 4 m	Loess
De 4 à 5,2 m	Sable argileux : 100%
De 5,2 à 6 m	Sable argileux avec quelques graviers
De 6 à 7 m	Sable grossier brun-rouge : 100%
De 7 à 8 m	Limons argileux : 100%
De 8 à 9 m	Sable argileux gris : 30% - graviers : 65% - Petits galets 5% (2-8 cm)
De 9 à 11 m	Sable gris-rose : 40% - graviers : 60%
De 11 à 14 m	Sable grossier gris-rose : 30% - graviers : 60% - Petits galets 10% (2-5 cm)
De 14 à 16 m	Sable grossier gris-rose : 20% - graviers : 60% - Petits galets 20% (2-8 cm)
De 16 à 17 m	Sable ocre-brun : 30% - graviers : 50% - Petits galets 20% (2-5 cm)
De 17 à 19,8 m	Sable gris : 40% - graviers : 50% - Petits galets 10% (2-5 cm)
De 19,8 à 20 m	Sable gris : 10% - graviers : 85% - Petits galets 5% (2-5 cm)
De 20 à 22 m	Sable gris-rose : 30% - graviers : 60% - Petits galets 10% (2-5 cm)
De 22 à 24 m	Sable gris-rose : 40% - graviers : 60%
De 24 à 24,1 m	Argile brune

Tableau 2 : Coupe géologique du puits de rejet

Sous 8 m de loess, sable argileux et limons, La foration a traversé des alluvions sableuses moyennes pour s'arrêter dans un niveau d'argile brune à 24 m de profondeur. Les photographies de ces échantillons sont compilées en Annexe I.

2.5.2. Coupe technique

Compte-tenu de la lithologie des terrains, la coupe technique est la suivante :

- De 1 à 18 m de profondeur : tubage plein en PVC 411/450 mm ;
- De 18 à 23 m de profondeur : tubage crépiné en PVC 411/450 mm avec fentes horizontales de 2 mm ;
- De 23 à 24 m de profondeur : 1 tube plein de 1 ml en PVC 411/450 mm avec fond plat.

Positionnement des centreurs à lame :

- A 20 m, au droit d'un tube crépiné ;
- A 10 m au droit d'un tube plein.

L'équipement en PVC 450 x 19,5 mm a été mis en place le 19 novembre 2021 (cf. Figure 3).

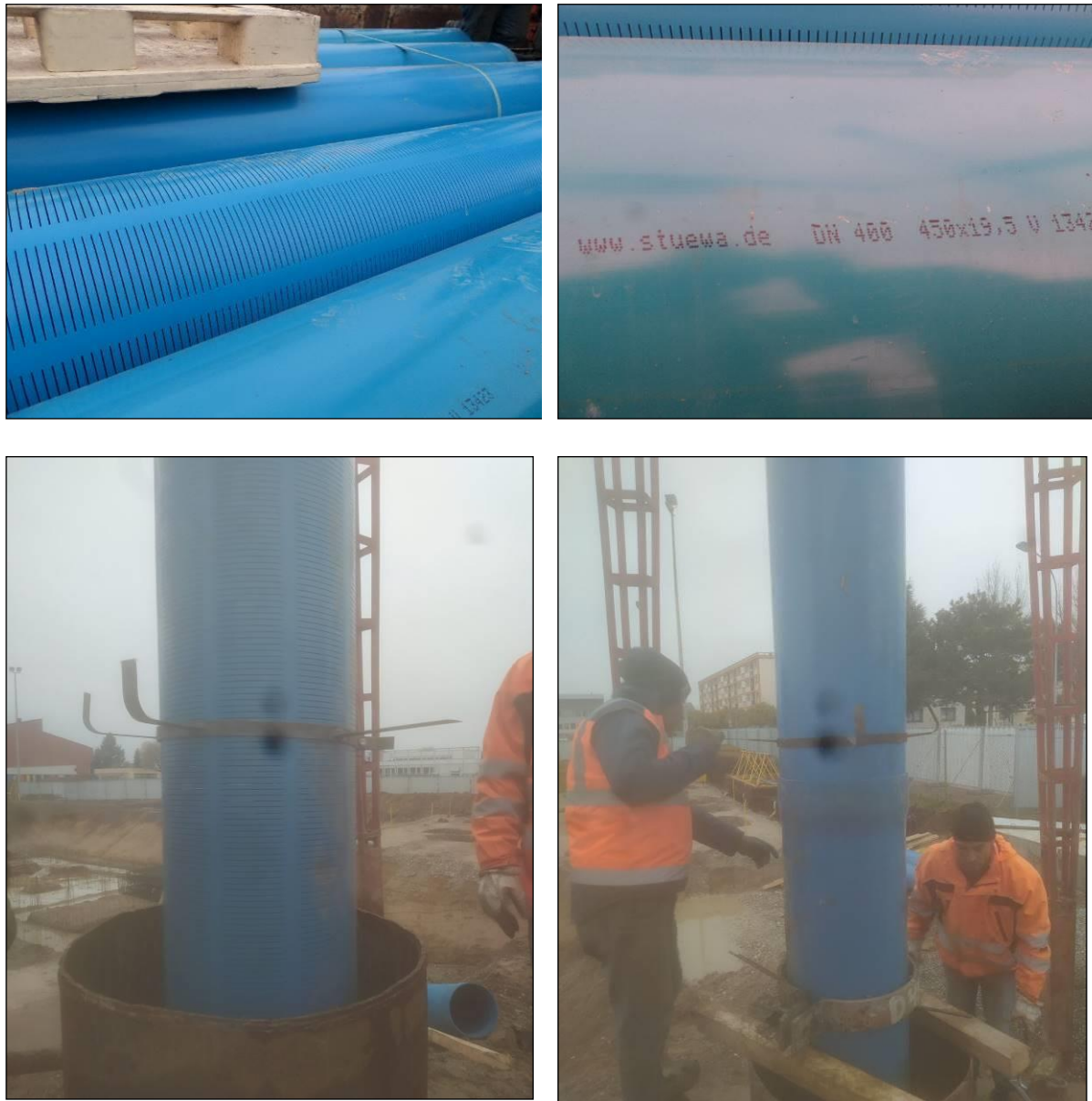
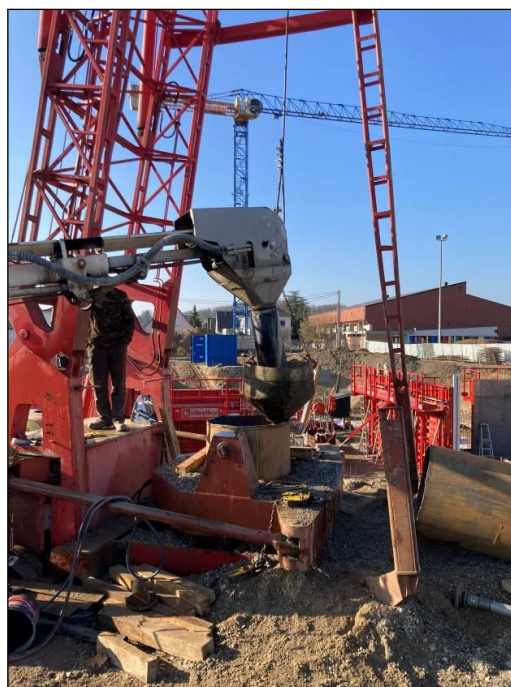
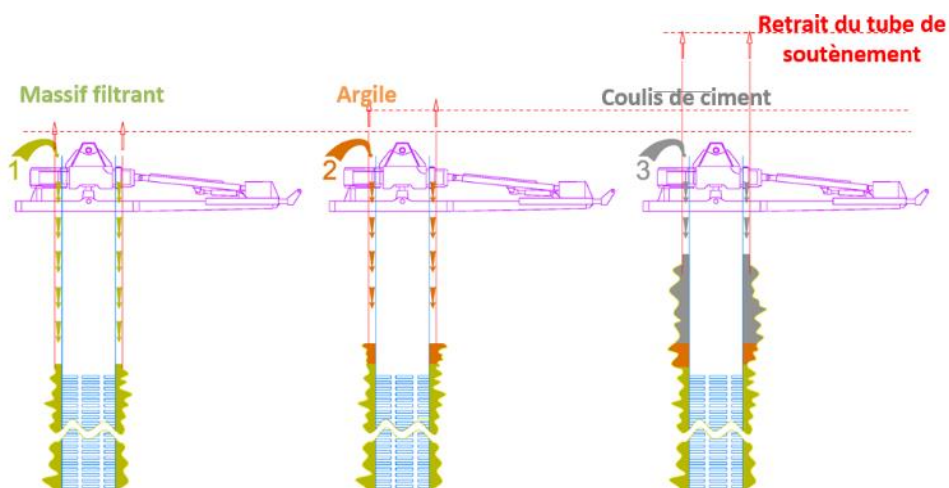


Figure 3 : Mise en place de la colonne en PVC 411/450 mm du puits de rejet

L'annulaire entre les tubes en PVC et la paroi du trou foré a été comblé progressivement de la base vers le sommet de la façon suivante :

- Gravillons calibrés (4-8 mm) siliceux du fond de l'ouvrage jusqu'à 17 m de profondeur (simultanément à la remontée des tubes de soutènement provisoires) ;
- Bouchon d'étanchéité (bentonite) de 17 à 15 m de profondeur ;
- Cimentation de 15 m jusqu'à environ 4 m de profondeur ;
- Cimentation de finition du tube plein supérieur jusqu'au niveau du radier de l'avant-puits.



Le massif filtrant est posé au droit des zones crépinées. Son rôle est de stabiliser les formations recoupées et, ce faisant, de limiter les arrivées de particules fines. Ces opérations ont été effectuées du 19 au 24 novembre 2021.

La coupe géologique et technique du puits de rejet est présentée en Figure 4.

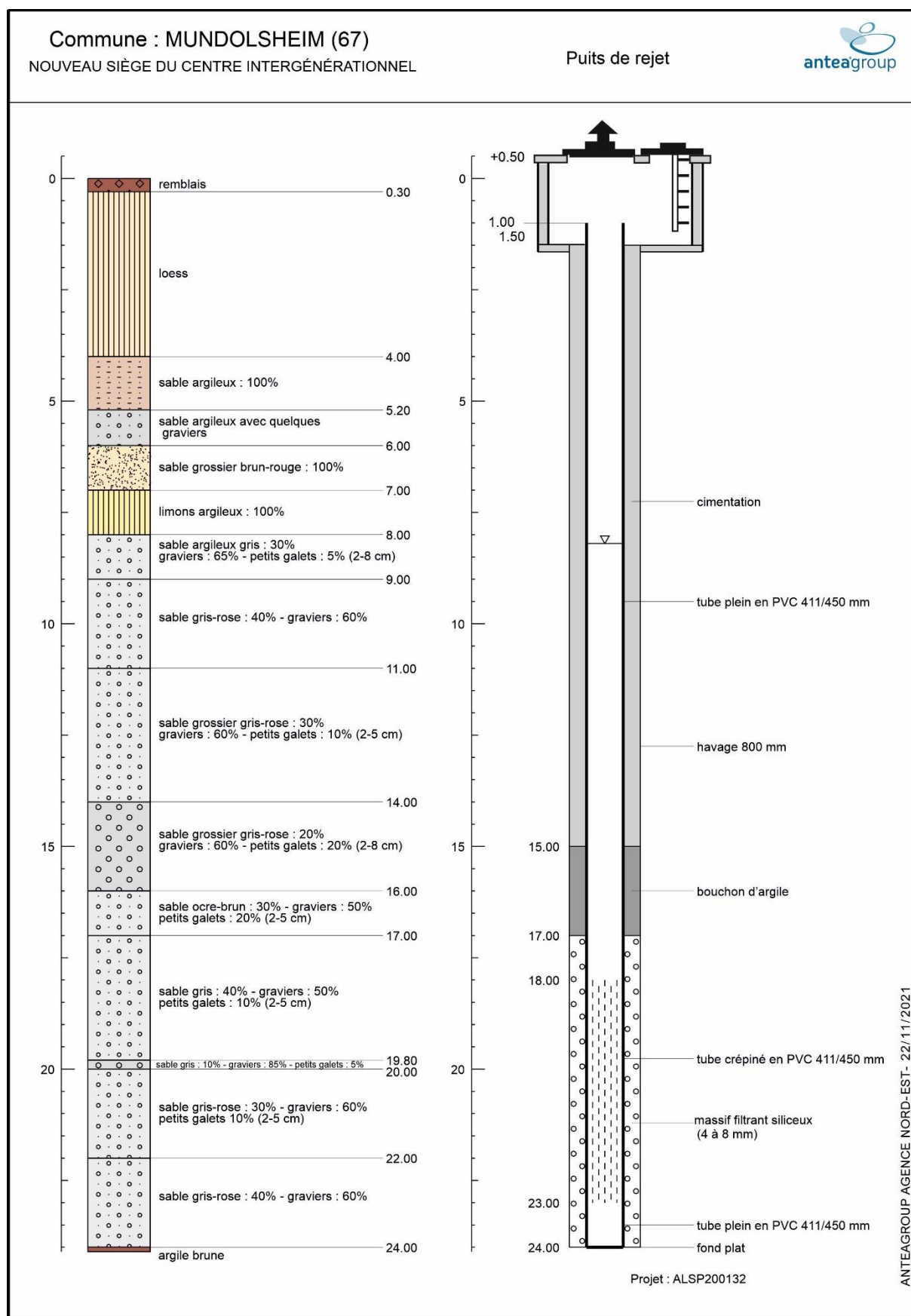


Figure 4 : Coupe géologique et technique du puits de rejet

2.6. Coupes géologique et technique du puits de captage

2.6.1. Coupe géologique

La foration a été réalisée du 16 au 24 mars 2022. Les tubes de soutènement provisoires en Ø 800 mm ont été vidés progressivement au moyen d'une benne circulaire.

L'analyse des échantillons recueillis en cours de foration a permis de relever la coupe géologique des terrains recoupés :

Profondeur	Lithologie
De 0 à 2 m	Terre végétale, sol brun
De 2 à 3,8 m	Loess
De 3,8 à 5,3 m	Sable argileux : 100%
De 5,3 à 7,6 m	Sable argileux induré
De 7,6 à 10,3 m	Sable gris-rose : 60% - graviers : 20% - galets 20% (2-12 cm)
De 10,3 à 15 m	Sable gris : 30% - graviers : 60% - Petits galets 10% (2-5 cm)
De 15 à 22,6 m	Sable gris : 40% - graviers : 50% - Petits galets 10% (2-8 cm)
De 22,6 à 23,5 m	Argile grise tourbeuse
De 23,5 à 25,7 m	Argile gris-bleu
De 25,7 à 28 m	Sable argileux très fin gris-bleu



Tableau 3 : Coupe géologique du puits de captage

Les photographies de ces échantillons sont compilées en Annexe I.

Sous 7,6 m de formations superficielles, cette coupe montre des alluvions sablo-graveleuses moyennes jusqu'à 22,6 m de profondeur puis des argiles jusqu'à 25,7 m et un sable argileux très fin gris-bleue reconnu jusqu'à 28 m de profondeur.

Les coupes des 2 ouvrages réalisés montrent une certaine variabilité de la lithologie (présence d'argile tourbeuse entre 22,6 et 23,5 m de profondeur sur le puits de captage notamment ; cf. photo ci-contre).



2.6.2. Coupe technique

Compte-tenu de la lithologie des terrains, La coupe technique du puits de captage a été adaptée de la manière suivante :

- De 1,2 à 17,2 m de profondeur : tubage plein en PVC 411/450 ;
- De 17,2 à 22,2 m de profondeur : tubage crépiné en PVC 411/450 mm avec fentes horizontales de 2 mm ;
- De 22,2 à 27,2 m de profondeur : tubage plein en PVC 411/450 mm avec fond plat.

Positionnement des centreurs à lame :

- A 23 m, au droit d'un tube plein ;
- A 10 m au droit d'un tube plein.

L'équipement en PVC 450 x 19,5 mm a été mis en place les 28 et 29 mars 2022 (cf. Figure 5).

Nota :

Après inspection vidéo réalisée le 27 septembre 2022 (cf. §3), nous avons constaté que la partie pleine en fond d'ouvrage (de 22,2 à 27,2 m de profondeur) ne fait que 4 ml (de 22,2 à 26,2 m de profondeur).

Cette erreur de l'entreprise de forage ne remet pas en cause le bon fonctionnement de cet ouvrage, la hauteur crépinée n'ayant pas été modifiée (cf. Figure 6).



Figure 5 : Mise en place de la colonne en PVC 411/450 mm du puits de captage

L'annulaire entre la colonne PVC et la paroi du trou foré a été comblé progressivement de la base vers le sommet de la façon suivante :

- Remblai sableux de 28 à 26,2 m de profondeur ;
- Gravillons calibrés (4-8 mm) siliceux de 26,2 m jusqu'à 15,2 m de profondeur (simultanément à la remontée des tubes de soutènement provisoires) ;
- Bouchon d'étanchéité (bentonite) de 15,2 à 13,2 m de profondeur ;
- Cimentation de 13,2 m jusqu'à environ 5 m de profondeur ;
- Cimentation de finition du tube plein supérieur jusqu'au niveau du radier de l'avant-puits.

Ces opérations ont été effectuées du 29 mars au 04 avril 2022.

La coupe géologique et technique du puits de captage est présentée en Figure 6.

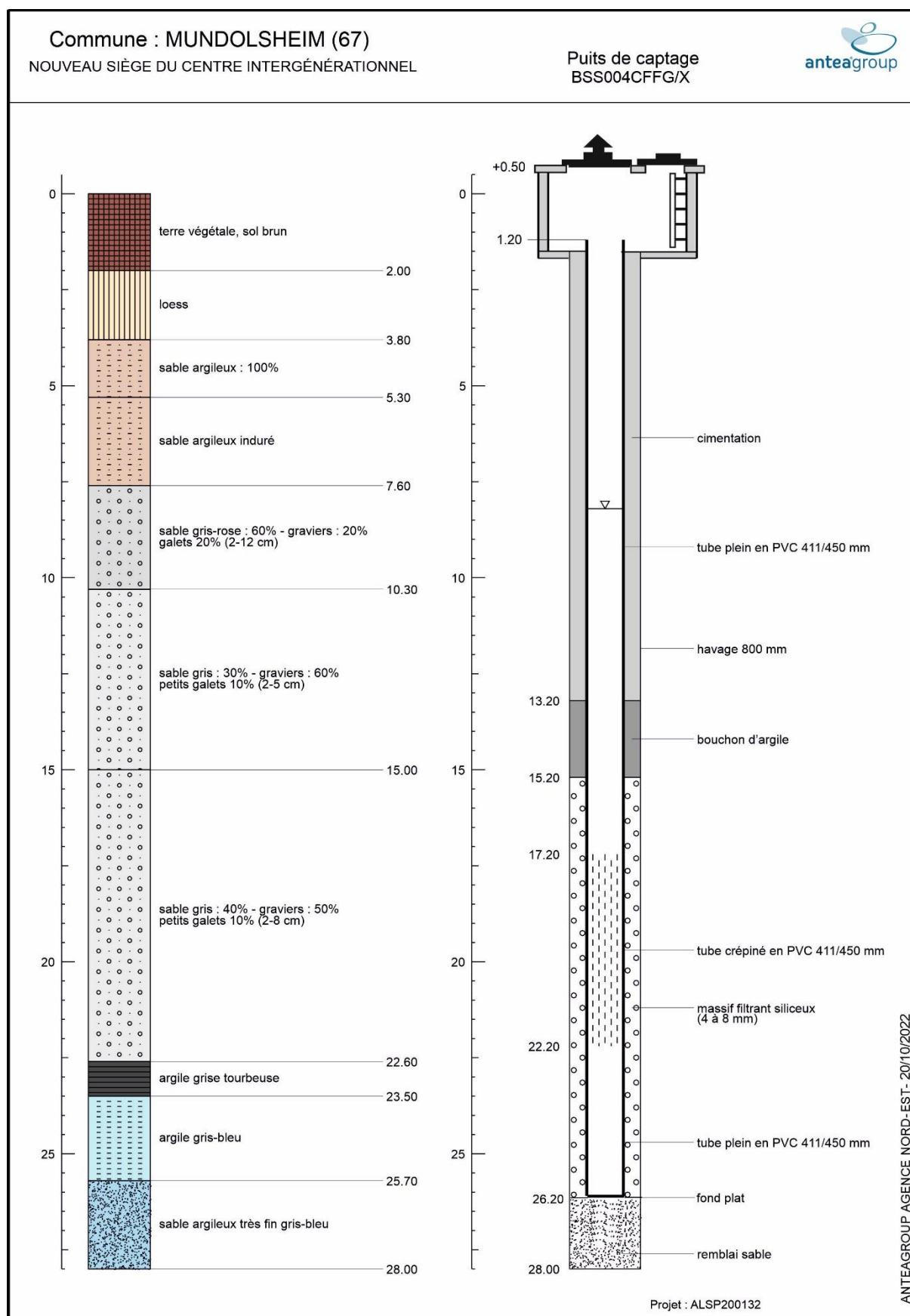


Figure 6 : Coupe géologique et technique du puits de captage

2.7. Avant-puits

Les avant-puits coiffant les ouvrages ont été réalisés avec des anneaux en béton préfabriqués. Ils sont fermés par une dalle en béton d'environ 25 cm d'épaisseur avec un regard équipé d'un capot regard en fonte avec cheminée d'aération, placé à l'aplomb de la colonne PVC pour de futures opérations de maintenance, et d'un second regard de visite.



Puits de captage



Puits de rejet

Figure 7 : Photographies des avant-puits (27/09/2022)

Une échelle métallique sera placée au droit du regard de visite et fixée dans les anneaux constituant l'avant-puits. Ces structures sont étanches et permettent d'assurer la protection de la nappe vis-à-vis du risque d'infiltration d'eau superficielle au niveau de chaque ouvrage.

2.8. Développement

Dans le cas théorique parfait, le rendement d'un forage ne doit dépendre que de la transmissivité du terrain aquifère. En réalité, à l'abaissement du niveau imputable à l'évolution transitoire des niveaux piézométriques en cours de pompage, viennent s'ajouter habituellement des pertes de charge parasites, dont certaines inévitables, dues au passage de l'eau dans le terrain et dans les crépines. Lors du développement d'un ouvrage, on cherche à améliorer son rendement en diminuant les pertes de charge. Dans le cas présent, plusieurs pompages de nettoyage à la pompe de chantier ont été effectués.

2.8.1. Puits de rejet

Les pompages de développement ont été réalisés sur le puits de rejet du 05 au 08 avril 2022. Pendant toutes ces opérations, les eaux issues du pompage ont été rejetées dans le réseau d'assainissement du site. Les pompages ont été menés jusqu'à obtention d'une eau claire au démarrage de la pompe de chantier à 49 m³/h.

Après 29 heures de pompage de développement, les résultats étaient les suivants :

- Niveau statique : 8,08 m/repère ;
- Débit de pompage : 49 m³/h ;
- Niveau dynamique : 8,35 m/repère ;
- Rabattement correspondant : 27 cm ;
- Débit spécifique correspondant : 181,5 m³/h pour 1 m de rabattement ;
- Eau claire avec quelques grains de sable dans le cône de mesure Imhoff au démarrage de la pompe à 49 m³/h.

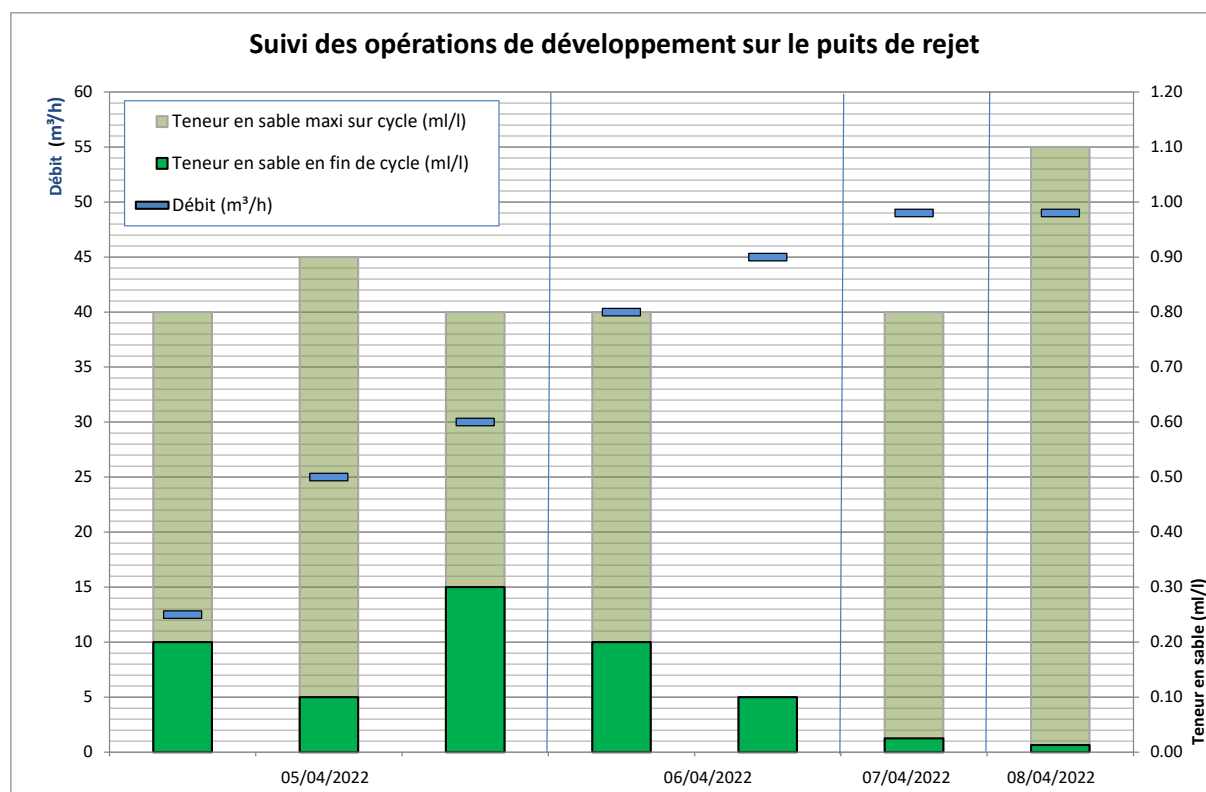


Figure 8 : Suivi des opérations de développement du puits de rejet

2.8.2. Puits de captage

Les pompages de développement sur le puits d'injection ont été réalisés du 21 avril au 02 mai 2022 (34h30 cumulées).

Lors du pompage de contrôle du 02 mai 2022, les résultats étaient les suivants :

- Niveau statique : 7,91 m/repère ;
- Débit de pompage : 41,5 m³/h ;
- Niveau dynamique : 8,29 m/repère ;
- Rabattement correspondant : 38 cm ;
- Débit spécifique correspondant : 109,2 m³/h pour 1 m de rabattement ;
- Eau claire avec 0,05 ml/l de sable dans le cône de mesure Imhoff au démarrage de la pompe à 41,5 m³/h.

On constate que le puits de captage est un peu moins productif que l'ouvrage de rejet.

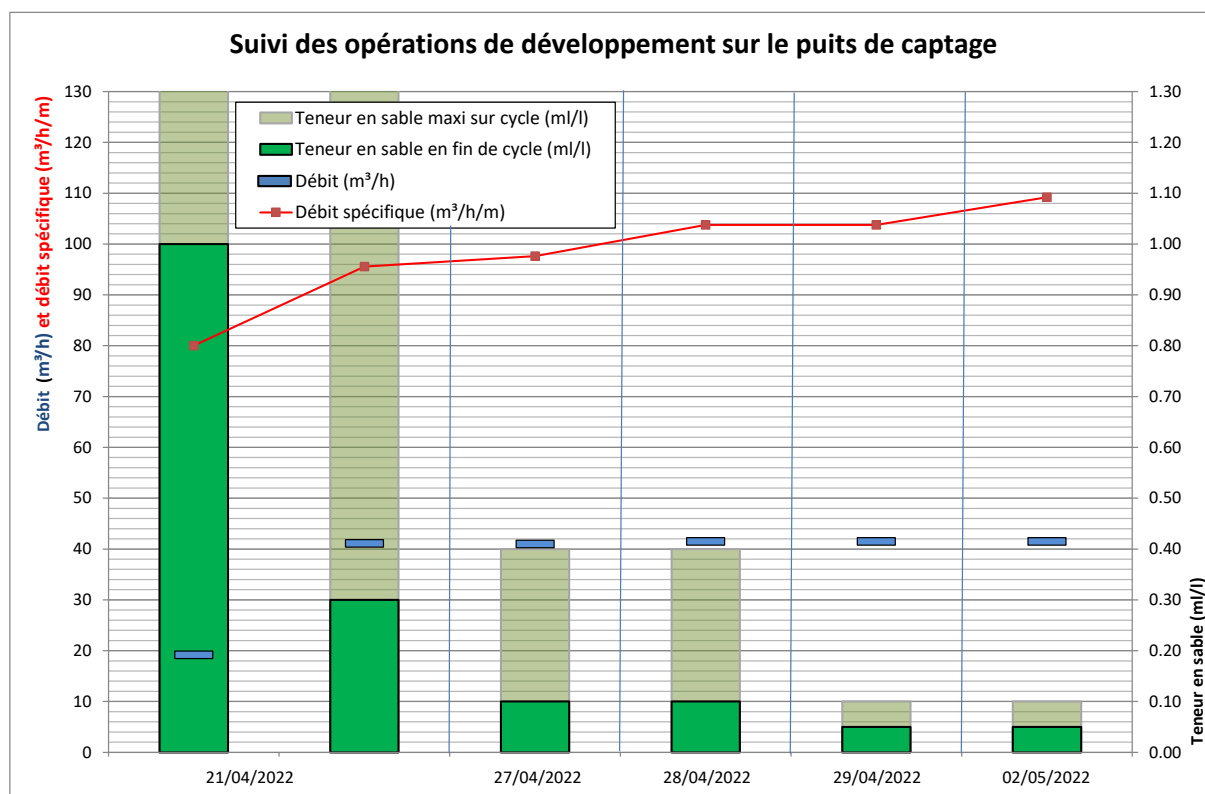


Figure 9 : Suivi des opérations de développement du puits de captage

2.9. Pompage par paliers

L'essai par paliers de débits croissants a pour objectif de caractériser chaque puits d'un point de vue hydraulique en déterminant l'ampleur de leurs pertes de charge.

2.9.1. Puits de rejet

Quatre paliers d'une durée de pompage d'une heure, entrecoupés de remontées intermédiaires de ½ heure, ont permis de tracer la courbe caractéristique du forage et de calculer l'équation des pertes de charge. Avant ces essais, le niveau de la nappe se situait à 8,06 m/repère (à +0,2 m/sol). Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 4 et dans le graphique présenté en Figure 10.

<i>Durée (mn)</i>	<i>Débit moyen (m³/h)</i>	<i>Niveau (m/repère)</i>	<i>Rabattements mesurés (m)</i>	<i>Débit spécifique Q/S (m³/h/m)</i>
0	0	8,06	0	0
60	10,1	8,11	0,05	202,0
30	0	8,06	0	0
60	20,8	8,16	0,10	208,0
30	0	8,06	0	0
60	29,9	8,20	0,14	213,6
30	0	8,06	0	0
60	39,8	8,26	0,20	199,0

Tableau 4 : Résultats du pompage par paliers au niveau du puits de rejet réalisé le 19 avril 2022

L'équation des pertes de charge dans un forage exprime la relation entre l'abaissement du niveau d'eau (s exprimé en m) et le débit pompé (Q exprimé en m³/h) ; elle se met sous la forme : $s = BQ + CQ^2$

Le terme BQ , lié aux caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et à l'éventuel effet de paroi ("skin effect"), est linéaire en fonction du débit. Le terme CQ^2 représente les pertes de charge quadratiques liées à l'équipement du forage.

Dans les conditions de l'essai, les données reportées conduisent à l'équation des pertes de charge suivante :

$$s = 4,84 \times 10^{-3} Q + 9,13 \times 10^{-7} Q^2$$

Affaire ALSP200132
Client OPHEA

POMPAGE
PAR PALIERS
Puits de rejet

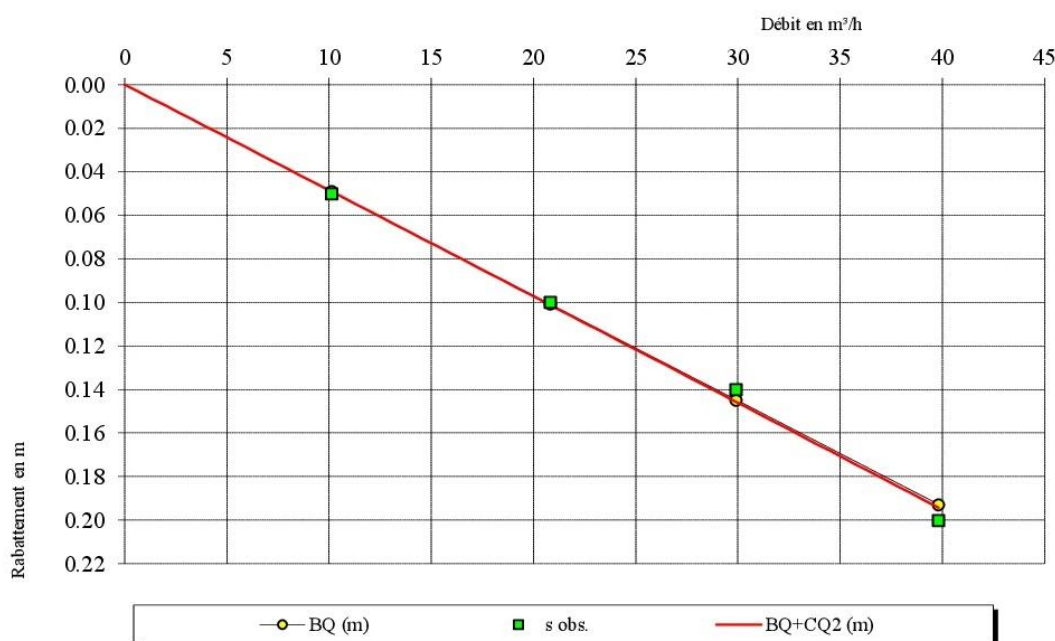
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIT DE POMPAGE

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Localité Mundolsheim Opérateur FORALEST
Forage Puits de rejet Date de début de pompage 19/04/2022

Essai de puits

Niveau statique initial 8.06 m/repère à +0,2m/sol
Prof. pompe (m) 18 m
Type pompe Chantier
Diamètre forage (mm) 411/450 mm
Position crépine (m) de 18 à 23 m/sol
Type crépine PVC fentes horizontales de 2 mm
Massif filtrant Gravier 4/8 mm



Coef. pertes de charge linéaires (B) = 4.84E-03 m/(m³/h) = 17 m/(m³/s)
Coef. pertes de charge quadratiques (C) = 9.13E-07 m/(m³/h)² = 12 m/(m³/s)²

	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Q (m³/h)	10.10	20.80	29.90	39.80	
Temps de pompage (h)	1.00	1.00	1.00	1.00	
Temps de remontée (h)	0.50	0.50	0.50	0.50	
Q/s calculé (m²/h)	206.07	205.66	205.31	204.93	
Q/s observé (m²/h)	202.00	208.00	213.57	199.00	
Ecart Q/s cal. - Q/s obs. (m²/h)	-4.07	2.34	8.26	-5.93	
Rabattement observé (m)	0.05	0.10	0.14	0.20	
Rabattement calculé (m)	0.05	0.10	0.15	0.19	
Ecart Scal-Sobs (m)	0.00	0.00	0.01	-0.01	

Figure 10 : Courbe caractéristique et calcul des pertes de charge du puits de rejet

Au débit de **22 m³/h** (débit prévisionnel maximal d'exploitation), on obtient les résultats suivants :

- Les pertes de charge linéaires sont estimées à 10 cm (soit environ 99,6 % des pertes de charge totales) et les pertes de charge quadratiques sont de 1 cm (soit 0,4 % des pertes de charge totales) ;
- Le rabattement obtenu à ce débit après 1 heure de pompage est donc d'environ **11 cm**, ce qui représente dans les conditions de l'essai un niveau d'eau stabilisé à 8,17 m/repère ;
- Ce rabattement reste largement inférieur au 1/3 de la longueur crépinée du puits ($1/3 * 5 \text{ m} = 1,66 \text{ m}$).

La valeur du coefficient C, exprimée en s^2/m^5 ($\text{m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$) permet d'appréhender l'état d'un puits en pompage (Todd, 1980) :

- Une valeur de C inférieure à $1\,800 \text{ s}^2/\text{m}^5$ indique un puits correctement conçu et bien développé ;
- Une valeur de C comprise entre $1\,800$ et $3\,600 \text{ s}^2/\text{m}^5$ indique un puits soit assez mal conçu soit légèrement colmaté ou détérioré ;
- Une valeur de C comprise entre $3\,600$ et $14\,400 \text{ s}^2/\text{m}^5$ indique un puits soit très mal conçu soit sévèrement colmaté ou détérioré ;
- Une valeur de C supérieure à $14\,400 \text{ s}^2/\text{m}^5$ indique un puits très mal conçu ou si sévèrement colmaté ou détérioré qu'il sera difficile de le réhabiliter.

La valeur obtenue lors de l'essai du 19/04/2022 est de **12 s²/m⁵**.

Le développement du puits de rejet a donc été réalisé correctement d'un point de vue strictement hydraulique.

2.9.2. Puits de captage

Avant l'essai par paliers, le niveau de la nappe se situait à 7,92 m/repère, (à +0,4 m/sol).

<i>Durée (mn)</i>	<i>Débit moyen (m³/h)</i>	<i>Niveau (m/repère)</i>	<i>Rabatement final (m)</i>	<i>Débit spécifique Q/S (m³/h/m)</i>
0	0	7,92	0	-
40	10,4	8,01	0,09	115,6
30	0	7,92	0	
40	20,4	8,10	0,18	113,3
30	0	7,93	0	
40	30,2	8,19	0,27	111,9
30	0	7,92	0	
60	40,3	8,30	0,38	106,1
30	0	7,92	0	

Tableau 5 : Résultats du pompage par paliers au niveau du puits de captage réalisé le 03 mai 2022

Dans les conditions de l'essai, les données reportées conduisent à l'équation des pertes de charge suivante (cf. Figure 11) :

$$s = 8,34 \times 10^{-3} Q + 2,46 \times 10^{-5} Q^2$$

Au débit de **22 m³/h** (débit prévisionnel maximal d'exploitation), on obtient les résultats suivants :

- Les pertes de charge linéaires sont estimées à 18,5 cm (soit environ 94 % des pertes de charge totales) et les pertes de charge quadratiques sont de 1,5 cm (soit 6 % des pertes de charge totales) ;
- Le rabattement calculé à ce débit après 1 heure de pompage est donc d'environ **19,5 cm**, ce qui représente dans les conditions de l'essai un niveau d'eau stabilisé à 8,12 m/repère ;
- Ce rabattement reste largement inférieur au 1/3 de la longueur crépinée du puits (1/3 * 5 m = 1,66 m).

La valeur du coefficient C obtenue lors de l'essai du 03/05/2022 est de 319 s²/m⁵. Le développement du puits de captage a donc été réalisé correctement d'un point de vue strictement hydraulique.

Affaire ALSP200132
Client OPHEA

POMPAGE
PAR PALIERS
Puits de captage

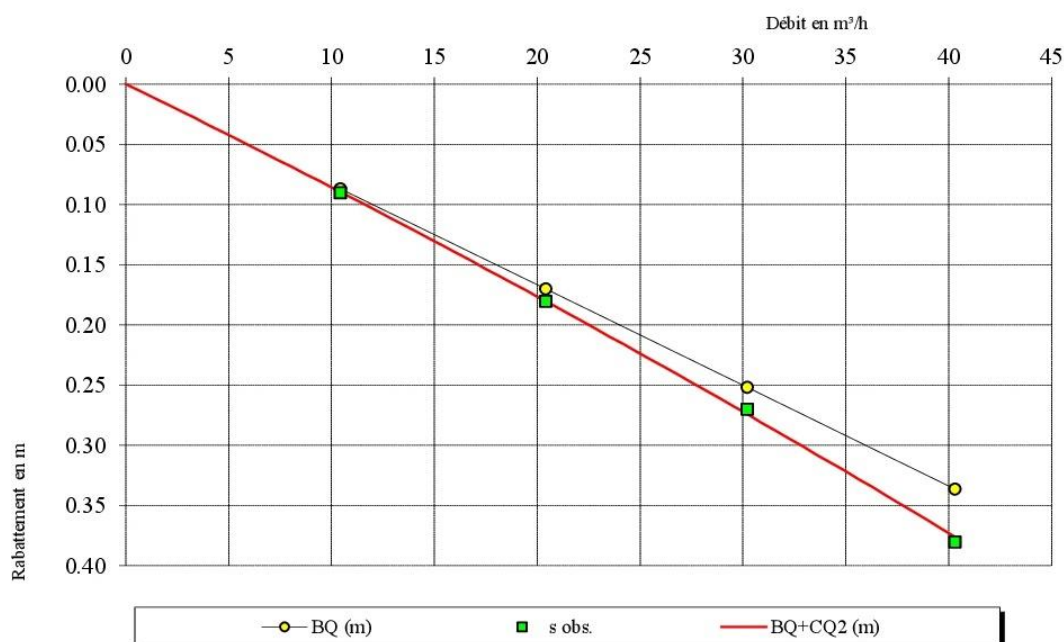
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIT DE POMPAGE

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Localité Mundolsheim Opérateur FORALEST
Forage Puits de captage Date de début de pompage 03/05/2022

Essai de puits

Niveau statique initial 7.92 m/repère à +0,4m/sol
Prof. pompe (m) 24 m
Type pompe Chantier
Diamètre forage (mm) 411/450 mm
Position crépine (m) de 17,2 à 22,2 m/sol
Type crépine PVC fentes horizontales de 2 mm
Massif filtrant Gravier 4/8 mm



Coef. pertes de charge linéaires (B) = 8.34E-03 m/(m³/h) = 30 m/(m³/s)
Coef. pertes de charge quadratiques (C) = 2.46E-05 m/(m³/h)² = 319 m/(m³/s)²

	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Q (m³/h)	10.40	20.40	30.20	40.30	
Temps de pompage (h)	0.67	0.67	0.67	1.00	
Temps de remontée (h)	0.50	0.50	0.50	0.50	
Q/s calculé (m²/h)	116.35	113.11	110.11	107.18	
Q/s observé (m²/h)	115.56	113.33	111.85	106.05	
Ecart Q/s cal. - Q/s obs. (m²/h)	-0.79	0.22	1.74	-1.13	
Rabattement observé (m)	0.09	0.18	0.27	0.38	
Rabattement calculé (m)	0.09	0.18	0.27	0.38	
Ecart Scal-Sobs (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	

Figure 11 : Courbe caractéristique et calcul des pertes de charge du puits de captage

2.10. Test d'injection

Le test d'injection de 24 heures a été réalisé du 22 au 23 septembre 2022.

Les mesures de niveaux d'eau sur le doublet ont été faites à l'aide de capteurs de pression mis en place par Antea Group. Le débit a été contrôlé par FORALEST à l'aide d'un compteur de chantier.

Avant démarrage, le niveau statique s'établissait à 8,17 m/repère pour le puits de captage et 8,34 m/repère pour le puits de rejet.

Au bout de 24 heures de pompage continu à **23 m³/h**, le niveau d'eau s'est stabilisé à 8,35 m/repère, **soit un rabattement de 18 cm** sur le puits de captage.

En ce qui concerne le puits de rejet, le niveau s'est stabilisé entre 8,06 et 8,03 m/repère **soit une remontée du niveau d'eau d'environ 31 cm** (cf. graphique ci-dessous).

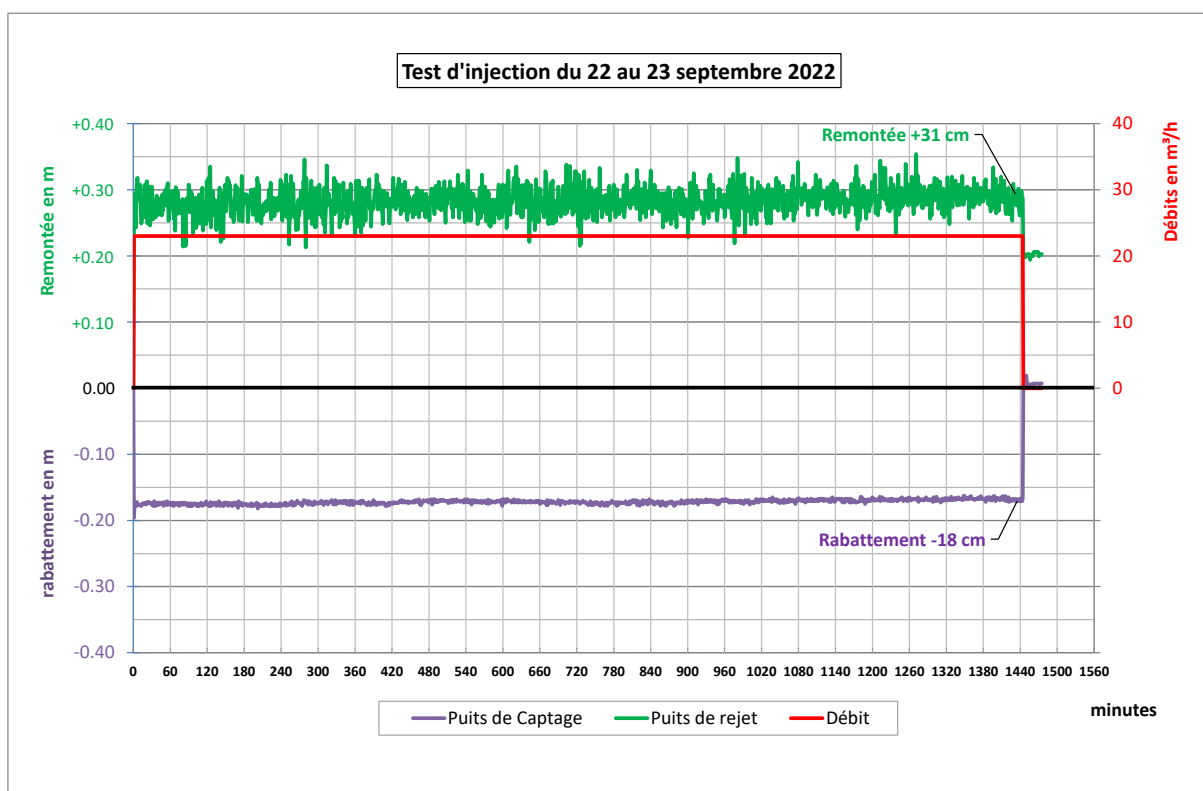


Figure 12 : Mesures des niveaux sur le puits de captage et le puits de rejet pendant le test d'injection de 24 heures

Au cours de ce test d'injection, un rabattement un peu inférieur à celui relevé pour un débit équivalent lors du pompage par paliers du 03 mai 2022 sur le captage seul a été constaté. Ceci montre un léger transfert de pression entre les 2 ouvrages sollicitant le même niveau aquifère.

2.11. Analyses sur les 2 puits

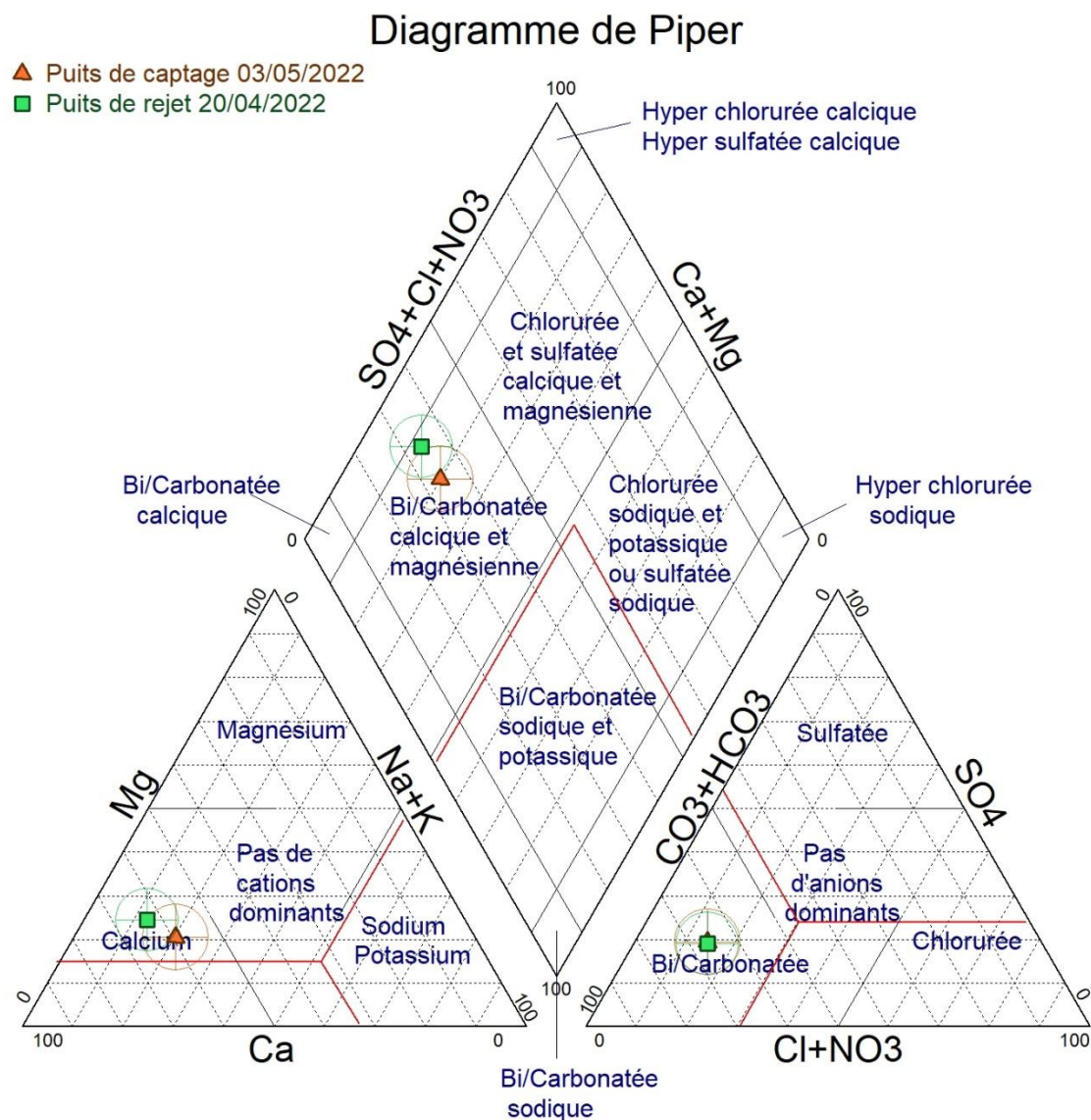
Les prélèvements d'eau ont été effectués par FORALEST avec la pompe de chantier durant les pompages d'essai (le 20/04/2022 pour le puits de rejet et le 03/05/2022 pour le puits de captage en pompage à 30 m³/h). Les analyses suivantes ont été réalisées sur les 2 puits :

- Métaux : Fer, Manganèse (totaux et dissous) ;
- Anions et Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) ;
- Turbidité, Matières En Suspension, alcalinité, carbonates, hydrogénocarbonates, dureté totale, anhydride carbonique agressif, sulfures.
- Bactéries sulfato-réductrices ;
- Bactéries ferrugineuses ;
- Spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices ;
- Recherche d'algues.

Les rapports d'analyses sont présentés en Annexe II.

2.11.1. Structure physico-chimique des eaux des 2 puits

Les eaux, de pH voisin de la neutralité (légèrement acide sur le puits de captage), sont bicarbonatées calciques et magnésiennes, très dures (45°F) avec des concentrations en calcium d'environ 130 mg/L et en sulfates d'environ 100 mg/L.



Stabler

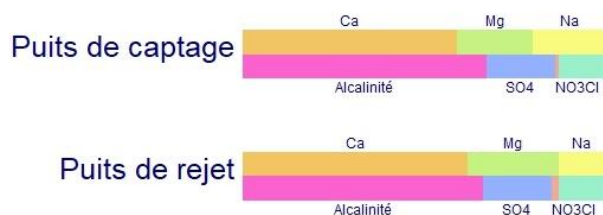


Figure 13 : Diagrammes de Piper et Stabler

2.11.2. Concentrations en fer et manganèse

Les résultats des concentrations en fer et manganèse sont présentés dans le tableau ci-dessous.

<i>Ouvrage</i>	<i>Date</i>	<i>Fer dissous</i>	<i>Fer total</i>	<i>Manganèse dissous</i>	<i>Manganèse total</i>
Puits de captage	03/05/22	<10	<10	70	71
Puits de rejet	20/04/22	<10	<10	144	147

Tableau 6 : Concentrations en fer et en manganèse dans les eaux souterraines exprimées en µg/L

Pour ce qui concerne le fer :

- Les concentrations en fer restent inférieures au seuil de quantification du laboratoire.

Pour ce qui concerne le manganèse :

- Les concentrations en manganèse sont relativement élevées dans le puits de captage, et encore davantage dans le puits de rejet, majoritairement sous forme dissoute.

Ces teneurs, associées à la présence de bactéries du manganèse, peuvent être à l'origine de boues colmatantes dans les conduites, échangeurs et dans le puits de rejet.

2.11.3. Analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques de l'eau n'ont pas révélé la présence **de bactéries ferrugineuses** dans les échantillons. Ces bactéries se fixant préférentiellement sur les surfaces, un résultat d'analyse négatif dans les prélèvements ne signifie pas pour autant qu'elles soient absentes des ouvrages et/ou des niveaux aquifères. Néanmoins, dans la mesure où les concentrations en fer dissous sont faibles (cf. Tableau 6), le risque éventuel de prolifération rapide de cette microflore de type ferrobactéries apparaît limité.

Les bactéries sulfato-réductrices sont dénombrées dans les 2 puits. Ces microorganismes anaérobies peuvent réduire les sulfates en sulfures. Les concentrations en sulfures dissous dans l'eau restent inférieures au seuil de quantification du laboratoire ce qui laisse penser que ces bactéries sont pour l'heure peu actives dans les ouvrages.

Les spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices ne sont pas dénombrés dans les 2 échantillons. En absence d'oxygène, ces bactéries peuvent réduire le sulfite et les sels de fer en sulfure entraînant la formation de sulfure de fer noirâtre.

3. Inspection des ouvrages par caméra vidéo

L'inspection vidéo des 2 puits réalisée le 27 septembre 2022 avait pour objectif de formaliser la réception des ouvrages et de faire un état des lieux initial avant leur mise en service. Une copie de l'inspection vidéo sur CD-Rom est jointe au présent rapport.

Les planches photographiques reprenant les principaux éléments observés sont présentées en Figures 14 et 15.

3.1. Puits de captage

Le repère 0 de l'inspection vidéo correspond au sommet du tubage PVC dans l'avant-puits (environ -1 m de décalage par rapport à la coupe de référence en Figure 6 qui est donnée par rapport au sol).

Les observations suivantes ont été faites (cf. Figure 14) :

- **Avant-puits** : les parois et le radier sont propres ;
- **Tubage plein 411/450 mm** : la chambre de pompage descend jusqu'à -16,2 m (4 tubes d'environ 4 ml). Les raccords entre les tubes pleins sont bien vissés. Des traces de fines argileuses sont visibles sur la paroi (cf. photos 1 à 3) ;
- **Tubage crépiné 411/450 mm** : la colonne captante est constituée par 1 tube de 4 ml puis 1 tube de 1 ml entre 16,2 et 21,2 m (cf. photos 4 à 10). Les fentes horizontales sont bien dégagées sur toute la hauteur crépinée. La paroi des tubages est globalement propre et les raccords bien jointifs. On peut noter la présence de fines argileuses sur le rebords des dernières fentes (cf. photos 9 et 10) ;
- **Boîte à boue** : elle est constituée d'un tube de 3 ml et d'un tube de 1 ml avec fond plat en PVC. Le fond est atteint à -24,7 m. Un dépôt de matériaux sablo-argileux très fins, épais d'environ 50 cm repose sur le fond plat de l'ouvrage (cf. photos 11 et 12).

Le dépôts sableux dans le puits de captage a été curé le 20/10/2022.

**Puits de captage BSS004CFFG/X – Centre Intergénérationnel à MUNDOLSHEIM (67)
Inspection du 27/09/2022**

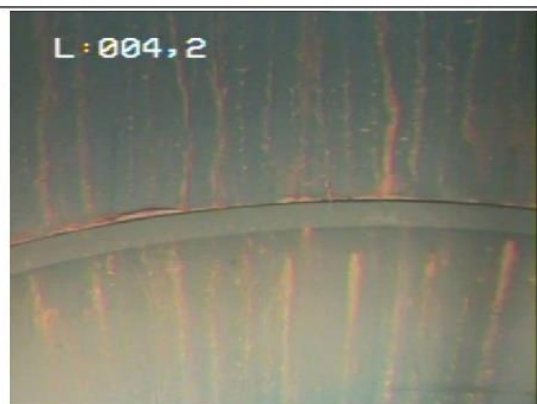


Photo 1 : Raccord entre deux tubes pleins en PVC 411/450 mm. Le niveau d'eau a été rencontré vers -6,8 m/repère. (Sommet du tube PVC dans l'avant-puits).



Photo 2 : Idem photo 1. Dans l'eau, la paroi du tubage plein est propre.



Photo 3 : Quelques légères traces de dépôts sont visibles au niveau du raccord



Photo 4 : 1^{ères} fentes horizontales avec raccord du tubage crépiné à -16,2 m.

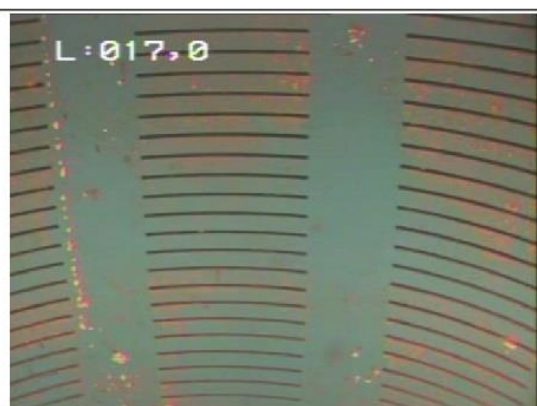


Photo 5 : Les fentes sont bien dégagées.

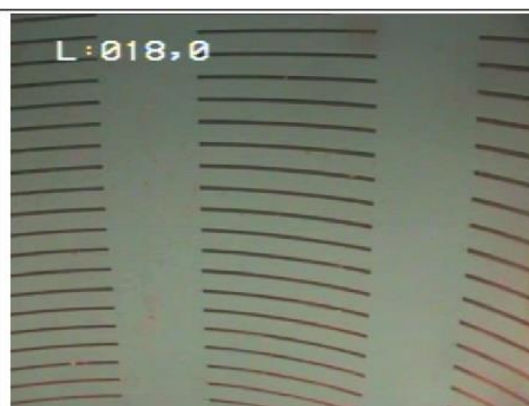


Photo 6 : La paroi du tubage PVC est propre et les fentes bien visibles.

Figure 14 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de captage

Puits de captage BSS004CFFG/X – Centre Intergénérationnel à MUNDOLSHEIM (67)
Inspection du 27/09/2022



Photo 7 : La paroi du tubage en PVC 411/450 mm est propre.

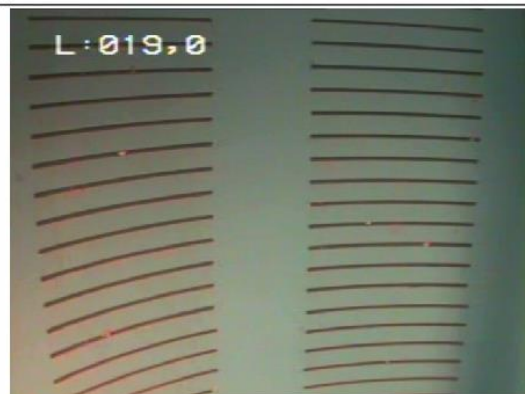


Photo 8 : Les fentes sont bien dégagées et le massif filtrant est visible à l'arrière des fentes.

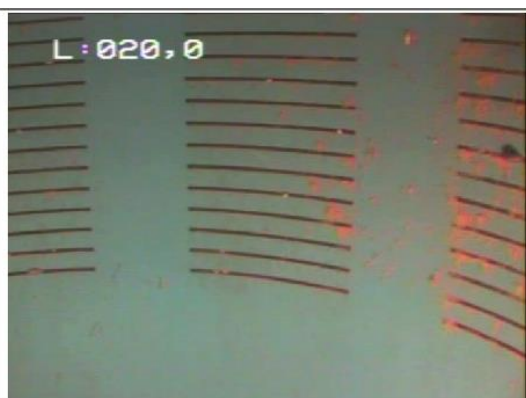


Photo 9 : Traces argileuses visibles sur la paroi et sur les rebords des fentes. Raccord entre 2 tubes crépinés à -20,2 m.

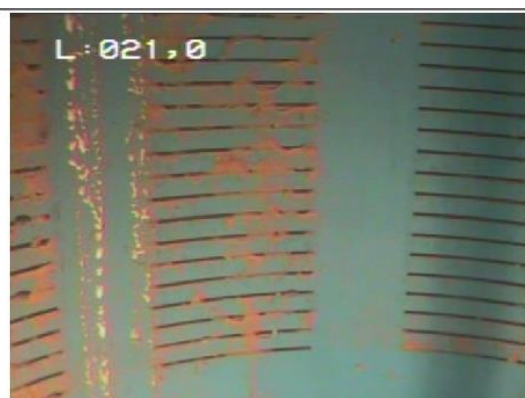


Photo 10 : Dernières fentes horizontales et raccord à -21,2 m avec le tube décanteur de 5 ml.



Photo 11 : Raccord entre les 2 tubes pleins en PVC 411/450 mm (1 tube de 3 ml et 1 tube de 1 ml avec fond plat).



Photo 12 : Fond de l'ouvrage atteint à -24,7 m. Dépôt sableux d'environ 50 cm (Fond théorique à 25,2 m).

Figure 14 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de captage (suite)

3.2. Puits de rejet

Le repère 0 de l'inspection vidéo correspond au sommet du tubage PVC dans l'avant-puits (-1 m de décalage par rapport à la coupe de référence en Figure 4 qui est donnée par rapport au sol).

Les observations suivantes ont été faites (cf. Figure 15) :

- **Avant-puits** : Les parois des anneaux préfabriqués sont propres et le fond de l'avant-puits est sec ;
- **Tubage plein 411/450 mm** : La paroi du tubage est propre et les raccords entre tubes bien vissés (1 tube de 1 ml puis 4 tubes de 4 ml cf. photos 1 à 3) ;
- **Tubage crépiné 411/450 mm** : la colonne captante est constituée par 1 tube de 1 ml puis 1 tube de 4 ml entre 17 et 22 m de profondeur). La paroi des tubages est propre et les fentes horizontales sont bien dégagées sur toute la hauteur crépinée (cf. photos 4 à 11) ;
- **Boîte à boue** : elle est constituée un tube de 1 ml avec fond plat en PVC. Le fond est atteint à -22,9 m. Un petit monticule sablo-argileux est visible sur un côté du fond plat de l'ouvrage (cf. photo 12).

En résumé, aucune anomalie de structure n'a été observée sur les deux puits.

Les différents éléments sont bien en place et la longueur des tubes crépinés correspond au linéaire qui a été défini (5 ml pour chaque ouvrage).

**Puits de rejet BSS004CFFJ/X – Centre Intergénérationnel à MUNDOLSHEIM (67)
Inspection du 27/09/2022**



Photo 1 : La paroi du tubage plein en PVC 411/450 mm est propre. Raccords vissés entre tubes pleins visibles à -1,0 m et à -5,0 m



Photo 2 : Idem photo 1. Le niveau d'eau a été rencontré à -7,2 m/repère (Sommet du tubage PVC dans l'avant-puits).



Photo 3 : Idem photo 1. Raccord à 13,0 m.



Photo 4 : fentes horizontales avec raccord du tubage crépiné à -17,0 m.

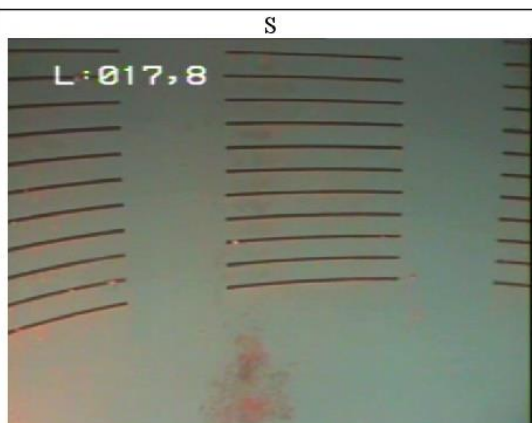


Photo 5 : Les fentes horizontales sont dégagées. Raccord entre 2 tubes crépinés à -18,0 m.

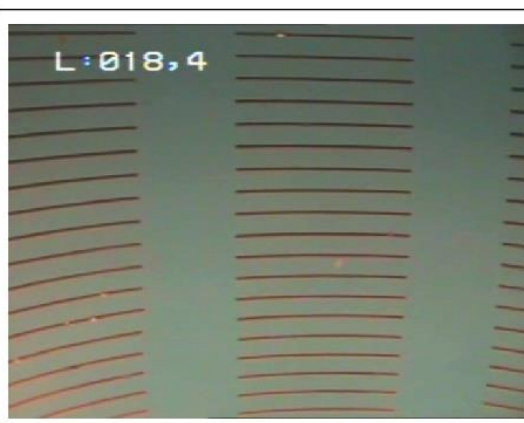


Photo 6 : La paroi du tubage PVC est propre et les fentes sont bien visibles.

Figure 15 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de rejet

Puits de rejet BSS004CFFJ/X – Centre Intergénérationnel à MUNDOLSHEIM (67)
Inspection du 27/09/2022



Photo 7 : Quelques traces d'oxydes métalliques sont visible sur la paroi en PVC 411/450 mm.

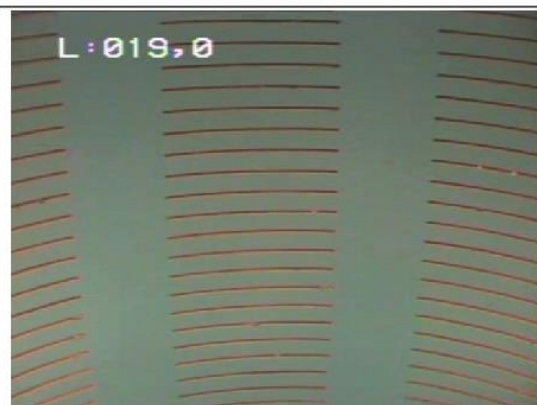


Photo 8 : La paroi de l'ouvrage est propre avec des fentes bien dégagées.



Photo 9 : Idem photo 8.

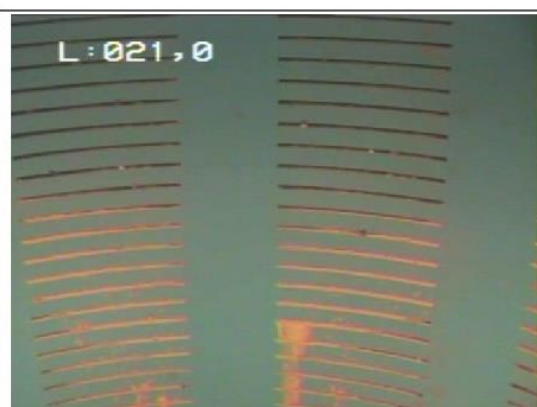
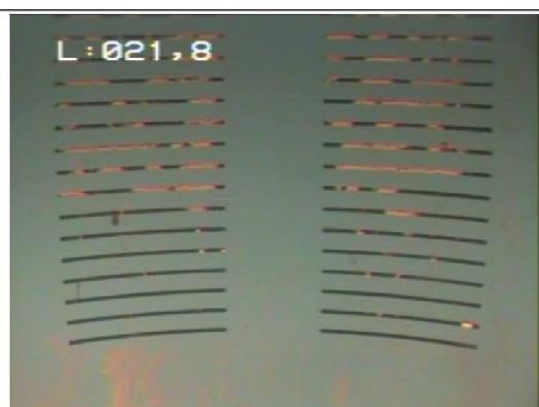


Photo 10 : Léger dépôt argileux au droit de certaines fentes.



**Photo 11 : Base des tubes crépinés avec raccord à -22,0 m.
Sommet du tube décanteur de 1 ml.**



Photo 12 : Fond de l'ouvrage atteint à -22,90 m. Un monticule de sable est visible sur un côté du puits.

Figure 15 : Prises de vue extraites des enregistrements vidéo de l'inspection du puits de rejet (suite)

4. Recommandations pour l'exploitation des puits et l'équipement de la boucle géothermale

4.1. Puits de captage

4.1.1. Positionnement de la pompe immergée

Du fait de la profondeur du niveau de la nappe et des battements saisonniers, la pompe d'exploitation devra être positionnée, dans la partie pleine en Ø411/450 mm à une profondeur d'au moins 13 m/sommet tubage PVC (environ 14 m/sol).

4.1.2. Protection de la pompe

La pompe sera équipée d'électrodes de protection (niveau bas, niveau haut) et si nécessaire d'une jupe de refroidissement (voir recommandations du fournisseur en fonction du diamètre de la colonne PVC).

4.1.3. Débit d'exploitation

Les résultats des différents essais effectués montrent de bonnes caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Dans la situation initiale constatée sur le site, les tests hydrauliques permettent, pour les contraintes à satisfaire (crépine non dénoyée, arrivée de sable limitée, vitesse d'entrée dans les crépines inférieure à 3 cm/s), de fixer un débit maximum d'exploitation de 22 m³/h.

4.1.4. Régime d'exploitation et mise en route

L'exploitation du puits de captage devra être la plus régulière possible. Le nombre de mises en marche-arrêt de la pompes d'exploitation doit être limité (en général moins d'une dizaine par jour).

Des démarrages rapides ainsi que des marches-arrêts trop fréquents risquent de créer des chocs hydrauliques, des appels de sable et de favoriser l'oxygénation de l'eau pouvant conduire à la précipitation du fer. L'augmentation de la charge particulière dans l'eau liée à des venues de sable ou à la précipitation de minéraux peut entraîner la diminution de la productivité de l'ouvrage ou encore une usure prématurée des pompes (et souvent, une non-application de la garantie constructeur).

Il est donc fortement recommandé de mettre en place une pompe immergée sur variateur.

En cas d'arrêt prolongé de l'installation, il faudra la remettre en pompage progressivement, en rejetant l'eau vers le réseau d'assainissement, sans passer par le ballon, ni l'échangeur et s'assurer que la qualité de l'eau pompée est compatible avec un usage géothermique.

4.2. Puits de rejet

4.2.1. Positionnement du tube d'injection et de la pompe d'arrosage

Le tube d'injection devra être positionné au-dessus des tubages crépinés :

→ injection à une profondeur de 15 m/sommet tubage PVC (environ 16,5 m/sol).

Toute « chute d'eau » dans l'ouvrage de réinjection sera à proscrire afin d'éviter un dégazage et une oxygénation de l'eau. Celle-ci serait en effet dommageable pour les installations car propice à la précipitation de minéraux notamment de types carbonatés, hydroxydes et oxydes métalliques.

En l'absence de source de production d'énergie de secours à l'installation géothermique, il pourra être judicieux de prévoir une dérivation pour un rejet ponctuel dans le réseau d'eaux pluviales ou d'assainissement du site afin de maintenir l'exploitation thermique en cas de travaux de régénération sur le puits d'injection.

4.3. Equipement de la boucle géothermique

4.3.1. Filtre et dispositif de maintien de pression

Il faut prévoir un filtre à particules entre le puits de captage et les futurs échangeurs, adapté à la qualité de l'eau pompée (protection contre le colmatage des échangeurs et du puits de rejet) ainsi qu'un **dispositif de maintien de pression en tête de forage de réinjection, sur la conduite de rejet.**

En effet, au niveau du point de rejet dans l'aquifère, la boucle est généralement à pression atmosphérique, si bien que plus haut, et en surface en particulier, la pression est inférieure à la pression atmosphérique si aucun dispositif spécifique n'est prévu.

En l'absence de ce dispositif (clapet anti-retour couplé à un stab-amont de type CLA-VAL ou modèle équivalent permettant de maintenir en charge la conduite de rejet), les phénomènes suivants préjudiciables au bon fonctionnement de l'installation, peuvent se produire :

- Le dégazage du CO₂ dissous, et par là même, l'augmentation du pH de l'eau et la précipitation des carbonates dans les conduites, échangeurs et ouvrage de rejet ;
- L'oxygénation des eaux rejetées (si la boucle n'est pas étanche à l'air, notamment si les purgeurs ne sont pas équipés de clapet anti-retour), qui est de nature à favoriser le développement bactérien et la précipitation d'hydroxydes de fer ou de manganèse, ce qui peut provoquer le colmatage des tubages crépinés du puits de rejet et son débordement ;
- L'introduction d'une quantité d'air importante à chaque arrêt de pompe (la boucle d'eau se vidant en grande partie), également favorable à l'apparition des désordres soulignés au point précédent.

Si l'installation géothermique n'est pas secourue par un autre dispositif, il est recommandé de prévoir des piquages en attente, permettant de faire fonctionner l'installation à partir d'organes de production provisoires.

4.3.2. Instrumentation

Afin d'anticiper une baisse du rendement hydraulique des ouvrages, nous recommandons la mise en place :

- D'un compteur au pompage et d'un compteur à la réinjection avec un report des données en GTC et/ou un relevé hebdomadaire des index ;
- D'un suivi de la pression en amont et aval des échangeurs avec report des données en GTC ;
- D'un suivi continu des niveaux et des températures (pompage et réinjection) dans les puits au moyen de capteurs bi-paramètres avec report des données en GTC de façon à pouvoir déterminer l'évolution de leur productivité dans le temps et d'ajuster, si besoin, les débits de pompage ;
- D'un signal d'alerte de niveau « hautes eaux de nappe » pour prévenir le risque de débordement de l'ouvrage d'injection ;
- D'électrodes de niveau (niveau bas, niveau haut) dans le puits de captage afin de protéger la pompe d'exploitation.

4.4. Surveillance et entretien

4.4.1. Equipements hydrauliques

Pour un bon fonctionnement des équipements hydrauliques des forages, nous recommandons de :

- Contrôler au moins tous les trimestres les paramètres électriques de la pompe, qui sont également des indicateurs indirects de fonctionnement du forage (consommation électrique, puissance, tension, intensité absorbée, résistance entre phases, fréquence en sortie de variateur, isolation électrique du câble et du moteur) ;
- Contrôler l'état des têtes de forage régulièrement. A chaque remontée de pompe, contrôler visuellement l'état de la colonne d'exhaure (traces de corrosion, de dépôts, intérieurs ou extérieurs). Contrôler si des suintements sont perceptibles sur la tête de réinjection ;
- Vérifier trimestriellement le bon fonctionnement des électrodes de niveau de la pompe d'exploitation. Parfois, une gangue (biofilm ou dépôts carbonatés) peut se former autour de l'électrode et l'isoler totalement, faussant ainsi les mesures ;
- Contrôler régulièrement la temporisation de la pompe immergée, par exemple tous les trimestres.

4.4.2. Bilans de surveillance initiaux

Un bilan de surveillance devra être effectué chaque trimestre pendant les deux premières années de fonctionnement. Ce bilan portera sur :

- Les paramètres d'exploitation (débits/rabattements/températures à une fréquence hebdomadaire au minimum) ;
- La maintenance effectuée par l'exploitant.

Il permettra de réévaluer, si nécessaire, le régime d'exploitation. La fréquence des bilans à réaliser par la suite sera adaptée en fonction des observations effectuées au cours de ces deux premières années.

4.4.3. Suivi annuel

Nous recommandons de réaliser chaque année les opérations suivantes :

- Vérification de l'état, la stabilité, l'étanchéité de l'avant-puits ;
- Contrôle de la profondeur des 2 puits. Un remblaiement progressif et continu des forages traduit un désordre qu'il faudra traiter ;
- Contrôle des caractéristiques hydrauliques des puits (notamment de la capacité d'infiltration du puits d'injection), avec mise en œuvre d'un pompage par palier de 30 mn avec pompes en place, suivi des niveaux dans les ouvrages (ce qui suppose la mise en place d'un dispositif de réglage du débit sur la pompe d'exhaure du puits de captage), interprétation des résultats et comparaison avec les résultats initiaux présentés dans ce rapport ;

- Analyse physico-chimique et bactériologique de l'eau (a minima axée sur la recherche des paramètres cités au § 2.11). Suivant les résultats de ces analyses, une désinfection et/ou un nettoyage des forages pourra être préconisé ;
- Analyse bactériologique (ferrobactéries, BSR, BTR) des matières en suspension ou dépôts éventuellement présents dans les éléments de la boucle de surface comme les filtres ou échangeurs ;
- Eventuellement, écrémage des eaux stagnantes dans la partie haute de la chambre de pompage du puits d'exploitation ;
- Inspection par caméra vidéo après la première année de fonctionnement.

Ce suivi aura pour but de définir des consignes d'exploitation et d'entretien (débit de production maximal, minimal, température et pression d'injection, injection éventuelle de produits anticorrosion/anti-dépôt, régénération des puits).

En complément à ce suivi annuel, un contrôle tous les trois ans par caméra vidéo permettra de constater l'absence de détérioration de la structure des puits et d'observer le développement éventuel de dépôts de paroi et le vieillissement naturel des ouvrages.

Enfin, toutes anomalies et tous les retours d'information venant des ouvrages, outre les signaux de fonctionnement ou d'arrêt des pompes, sont à prendre en compte et devront être consignés dans le dossier de l'installation.

Des opérations de nettoyage des forages (avec éventuellement développements complémentaires) sont à prévoir et anticiper. La fréquence de ces travaux sera à adapter en fonction des observations effectuées.

Un accès aisé aux forages doit être conservé pendant toute la durée d'exploitation des ouvrages.

5. Suivi réglementaire des forages

L'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance décrit les opérations de suivi à réaliser à minima sur ce type d'installation.

5.1. Suivi annuel (extrait de l'arrêté du 25 juin 2015 – Annexe 5.2.1)

« L'exploitant fait figurer annuellement dans le dossier d'installation le suivi des paramètres suivants :

- Le nombre d'heures de fonctionnement de la pompe à chaleur,
- Les températures en entrée et sortie de la pompe à chaleur, lorsque cette dernière est en fonctionnement nominal ainsi que le relevé de la température maximale sortie de l'échangeur géothermique,
- Les volumes prélevés et rejetés annuellement ainsi que le relevé de l'index du compteur volumétrique (sans remise à zéro).
- L'exploitant de l'installation est tenu de vérifier le bon fonctionnement du puits de réinjection, de s'assurer de l'étanchéité du réseau primaire et que les volumes des eaux prélevées et réinjectées est nulle. »

5.2. Suivi décennal (extrait de l'arrêté du 25 juin 2015 - Annexe 5.2.2)

« En complément de l'opération annuelle de surveillance et d'entretien, la surveillance décennale comporte une inspection par vidéo ou toutes autres méthodes équivalentes pour apprécier l'état général des ouvrages de production et de réinjection....

L'exploitant reporte le procès-verbal de la surveillance décennale au dossier de l'installation en particulier le résultat de l'inspection de la cimentation et le résultat des mesures du suivi annuel ».

6. Conclusions

Dans le cadre de la construction du nouveau siège du Centre intergénérationnel entre la rue des Ecoles et la rue du Stade à MUNDOLSHEIM (67), l'OPH de l'Eurométropole de Strasbourg a choisi de mettre en place une solution par géothermie basse température sur eau de nappe (échangeur ouvert) pour assurer le rafraîchissement des bâtiments (géocooling). Les travaux de forage ont été réalisés par l'entreprise FORALEST entre novembre 2021 et juin 2022, le suivi hydrogéologique du chantier étant assuré par Antea Group.

Ce doublet est constitué de :

- 1 puits de captage de 26,2 m/sol équipé d'une colonne en PVC Ø411/450 mm crépinée de 17,2 à 22,2 m ;
- 1 puits de rejet de 24 m/sol équipé d'une colonne en PVC Ø411/450 mm crépinée de 18 à 23 m.

D'un point de vue hydraulique :

- Les pompes d'essai montrent que le puits de captage peut être exploité à un débit de prélèvement maximum de 22 m³/h ;
- L'injection d'un débit maximum de 22 m³/h est envisageable au droit du puits de rejet.

Qualité des eaux :

Pour ce qui concerne, la compatibilité avec un usage énergétique :

- L'analyse bactériologique montre un bon état sanitaire des ouvrages, avec l'absence d'algues et de bactéries ferrugineuses. Des bactéries sulfato-réductrices sont dénombrées dans les 2 puits. Les concentrations en sulfures dissous dans l'eau restent inférieures au seuil de quantification du laboratoire ce qui laisse penser que ces bactéries sont pour l'heure peu actives dans les ouvrages ;
- Les concentrations en fer restent faibles dans les 2 puits ;
- Les concentrations en manganèse sont relativement élevées dans le puits de captage (71 µg/L), et encore davantage dans le puits de rejet (147 µg/L), majoritairement sous forme dissoute dans les deux ouvrages.

La présence de concentrations moyennes à élevées en manganèse sur les 2 puits constitue un point de vigilance particulier, car pouvant être à l'origine de la formation de précipités colmatants. Il importe d'en suivre l'évolution lors de la mise en exploitation de ces ouvrages et réaliser si nécessaire avant la période d'utilisation des ouvrages un rétro-lavage dans le puits de rejet avec une pompe immergée. En fonction des résultats du suivi annuel (cf. § 4.4.3), cette périodicité pourra être adaptée.

Les caractéristiques hydrauliques des 2 puits ont été déterminées sur des ouvrages neufs et dans les conditions hydrogéologiques de réalisation. Ces conditions peuvent être évolutives dans le temps (colmatage progressif des crépines, évolution des conditions hydrologiques, modifications des prélèvements effectués par des tiers, mise en œuvre de nouveaux projets dans le secteur, etc...).

Les caractéristiques de qualité des eaux de la nappe définies au travers des résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques, issues des prélèvements réalisés sur chaque puits dans le cadre des phases de travaux, ont permis de faire une première évaluation de la qualité générale de la nappe et du potentiel de colmatage des ouvrages par des processus chimiques, physiques et biologiques.

La prise en compte des recommandations pour l'exploitation et la maintenance des ouvrages (cf. chapitre 4) permettra de vérifier l'état des puits et de suivre les éventuels phénomènes de colmatage des tubages crépinés.

D'un point de vue réglementaire, le suivi annuel et décennal des puits devra être réalisé conformément aux Annexes 5.2.1 et 5.2.2 de l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance (cf. Chapitre 5).

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/fr/annexes>

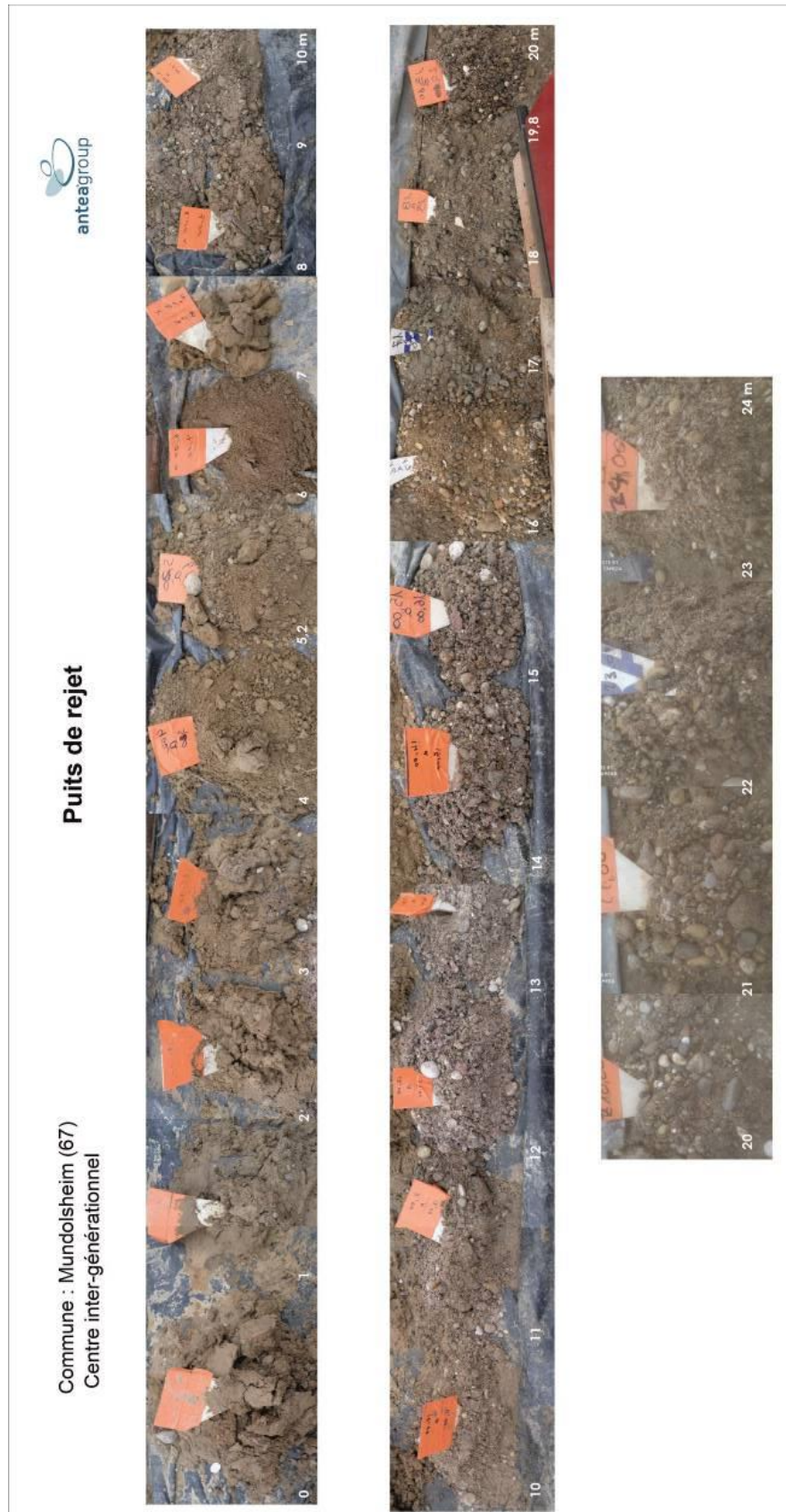


ANNEXES

Annexe I : Photographies des échantillons des 2 puits réalisés

Annexe II : Rapports d'analyse

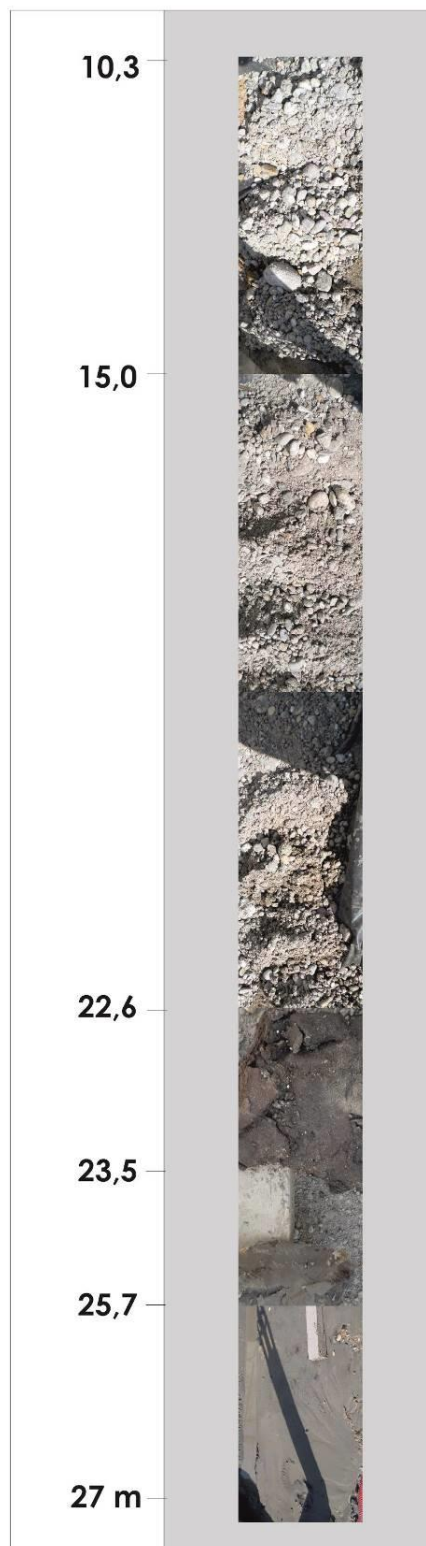
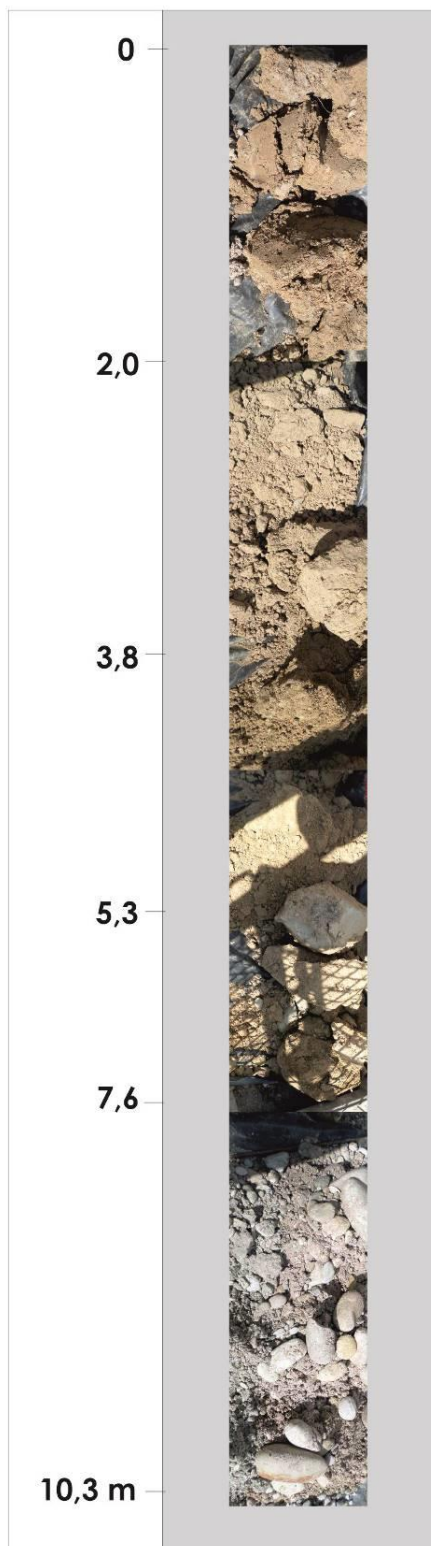
Annexe I : Photographies des échantillons des 2 puits réalisés



Commune : Mundolsheim (67)
Centre inter-générationnel



Puits de captage



Annexe II : Rapports d'analyse



CENTRE D'ANALYSES ET DE RECHERCHES
76 Route du Rhin — BP 70311
F-67411 ILLKIRCH Cedex

LABORATOIRE AGREE PAR LE MINISTRE CHARGE DE LA SANTE POUR
LE CONTRÔLE SANITAIRE DES EAUX ET DES EAUX THERMOMINÉRALES

www.car-analyse.com — service-client@car-analyse.com
Tél. (33) 03 88 65 39 39
Fax (33) 03 88 65 39 29

LABORATOIRE AGREE PAR LE MINISTRE CHARGE DE L'ENVIRONNEMENT



Rapport d'analyse Page 1 / 2
Edité le : 25/05/2022

FORALEST MAURUTTO
M. Claude MAURUTTO
2 RUE D'ITALIE

68310 WITTELSHEIM

Le rapport établi ne concerne que l'échantillon soumis à l'essai tel qu'il a été reçu, et se substitue à tout rapport partiel de résultats préalablement émis. Il comporte 2 pages.

Dans le cas où le prélèvement est réalisé par le client, les données et informations fournies sont mentionnées dans le cadre supérieur du présent rapport. Ces données sont sous la responsabilité du seul client.

< marque la valeur du paramètre analytique qui est inférieure à la limite de quantification. N.M. : non mesuré.

(*) marque une analyse sous-traitée. Pour les analyses sous-traitées, se référer au(x) rapport(s) de sous-traitance joint(s) mentionnant le(s) laboratoire(s) concerné(s), le numéro d'accréditation pour le(s) paramètre(s) couvert(s) par l'accréditation et le(s) lieu(x) de réalisation de la prestation.

sans (*) identifie les seuls essais qui sont effectués sous le couvert de l'accréditation Cofrac du laboratoire.

et (*) identifie les seuls essais qui sont effectués sous le couvert de l'accréditation Cofrac du ou des laboratoire(s) sous-traitant(s).

Identification dossier : CAN22-7804 **Référence contrat :** CANC22-512
Identification échantillon : CAN2204-3916-1
Référence dossier : BPA le 19.04.22 MAURUTTO
NATURE : Eau souterraine
COMMUNE : MUNDOLSHEIM
DEPARTEMENT : 67
ORIGINE : PUIT DE REJET
RORALEST
PRELEVEMENT :
Prélevé le : 20/04/2022 à 09 h 15
Prélevé par : Le client
Réceptionné le : 20/04/2022 à 10 h 32
Flaconnage conforme : OUI
Transport en glacière : OUI

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Début d'analyse : 20/04/2022

Paramètres analytiques	Codé Santé	Résultats	Unités	Méthodes	Références	Limites de qualité	Références de qualité
Analyses microbiologiques							
Bactéries sulfato-réductrices		10 - 100	bactérie/mL	Ensemencement	M_CAR-E7166		
Bactéries ferrugineuses		Absence	-	Examen microscopique	M_CAR-E7023		
Spores de bactéries anaérobies		< 1	UFC/100 ml	Filtration	NF EN 26461-2		
sulfito-réductrices							
Analyses biologiques							
Recherche d'algues	1066	Absence	l	Filtration	M_CAR-E7020		
Caractéristiques organoleptiques							
Turbidité (*)	1295	< 0,10	NFU	Néphélométrie (*)	NF EN ISO 7027-1		
Analyses physicochimiques							
Analyses physicochimiques de base							
pH (*)	1302	7,16	-	Electrochimie (*)	NF EN ISO 10523		

SAS au capital de 1 000 000 € - N° SIRET : 445 235 963 00011 - RCS STRASBOURG - NAF : 7120B - TVA intracom : FR 53 445 235 963
Siège social : 76 route du Rhin - BP 70321 - 67411 ILLKIRCH Cedex - Tél : 03 88 65 39 39 - Fax : 03 88 65 37 38

Rapport d'analyse Page 2 / 2
Edité le : 25/05/2022
Identification échantillon : CAN2204-3916-1
Destinataire :

Paramètres analytiques	Code Sonde	Résultats	Unités	Méthodes	Références	Limites de qualité	Références de qualité
Température de mesure du pH (*)	6484	20,4	°C	Electrochimie (*)	NF EN ISO 10523		
# TA (Titre alcalimétrique) (*)	1346	0,00	° f	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
# TAC (Titre alcalimétrique complet) (*)	1347	34,50	° f	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
# Matières en suspension totales (*)	1305	< 2,0	mg/l	Gravimétrie (filtre Whatman ou Breguer-Krueger) (*)	NF EN 872		
# TH (Titre Hydrotimétrique) (*)	1345	45,72	° f	Calcul à partir de Ca et Mg (*)	Méthode interne M_EM144		
Analyse des gaz							
# Sulfures totaux (*)	1355	< 0,10	mg/lS--	Potentiométrie (*)	Méthode interne		
# Hydrogène sulfuré (calculé en fonction du pH) (*)	1343	<0,10	mg/lH2S	Potentiométrie (*)	Méthode interne		
Cations							
# Ammonium (*)	1335	< 0,05	mg/lNH4+	Spectrophotométrie au bleu indophénol (*)	NF T90-015-2		
# Calcium dissous (*)	1374	131,7	mg/lCa++	ICP/AES après filtration (*)	NF EN ISO 11885		
# Magnésium dissous (*)	1372	31,1	mg/lMg++	ICP/AES après filtration (*)	NF EN ISO 11885		
Anions							
# Chlorures (*)	1337	49	mg/lCl-	Chromatographie ionique (*)	NF EN ISO 10304-1		
# Sulfates (*)	1338	95	mg/lSO4--	Chromatographie ionique (*)	NF EN ISO 10304-1		
# Nitrates (*)	1340	10	mg/lNO3-	Flux continu (CFA) (*)	NF EN ISO 13395		
# Nitrites (*)	1339	0,10	mg/lNO2-	Flux continu (CFA) (*)	NF EN ISO 13395		
# Bicarbonates (*)	1327	421,0	mg/lHCO3-	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
Métaux							
# Fer dissous (*)	1393	< 0,010	mg/lFe	ICP/MS après filtration (*)	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
# Fer total (*)	1393	< 0,010	mg/lFe	ICP/MS après acidification et décantation (*)	NF EN ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
# Manganèse dissous (*)	1394	0,144	mg/lMn	ICP/MS après filtration (*)	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
# Manganèse total (*)	1394	0,147	mg/lMn	ICP/MS après acidification et décantation (*)	NF EN ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		

Roger GROULT
Dr en chimie, Directeur du CAR





CENTRE D'ANALYSES ET DE RECHERCHES
76 Route du Rhin — BP 70311
F-67411 ILLKIRCH Cedex

www.car-analyse.com — service-client@car-analyse.com
Tél. (33) 03 88 65 39 39
Fax (33) 03 88 65 39 29

LABORATOIRE AGREE PAR LE MINISTRE CHARGE DE LA SANTE POUR
LE CONTROLE SANITAIRE DES EAUX ET DES EAUX THERMINOMINERALES

LABORATOIRE AGREE PAR LE MINISTRE CHARGE DE L'ENVIRONNEMENT



Rapport d'analyse Page 1 / 2

Annule et remplace le rapport CAN2205-2072-1
Veuillez détruire l'exemplaire précédent

FORALEST MAURUTTO
M. Claude MAURUTTO
2 RUE D'ITALIE

68310 WITTELSHEIM

Le rapport établi ne concerne que l'échantillon soumis à l'essai tel qu'il a été reçu, et se substitue à tout rapport partiel de résultats
préalablement émis. Il comporte 2 pages.

Dans le cas où le prélèvement est réalisé par le client, les données et informations fournies sont mentionnées dans le cadre supérieur du
présent rapport. Ces données sont sous la responsabilité du seul client.

< marque la valeur du paramètre analytique qui est inférieure à la limite de quantification. N.M. : non mesuré.

(*) marque une analyse sous-traitée. Pour les analyses sous-traitées, se référer au(x) rapport(s) de sous-traitance joint(s) mentionnant le(s)
laboratoire(s) concerné(s), le numéro d'accréditation pour le(s) paramètre(s) couvert(s) par l'accréditation et le(s) lieu(x) de réalisation
de la prestation.

sans (*) identifie les seuls essais qui sont effectués sous le couvert de l'accréditation Cofrac du laboratoire.

et (*) identifie les seuls essais qui sont effectués sous le couvert de l'accréditation Cofrac du ou des laboratoire(s) sous-traitant(s).

Identification dossier : CAN22-8928 Référence contrat : CANC22-512

Identification échantillon : CAN2205-2072-2

Référence dossier : BPA le 19.04.22 MAURUTTO

NATURE : Eau souterraine
COMMUNE : MUNDOLSHEIM
DEPARTEMENT : 67
ORIGINE : PUIITS DE CAPTAGE
OPHEA
RUE DU PROFESSEUR PHILIPPE BELLOCQ

PRELEVEMENT :
Prélevé le : 03/05/2022 à 13 h 35
Durée du prélèvement : 0 h
Prélevé par : Le client
Réceptionné le : 03/05/2022 à 14 h 12
Flaconnage conforme : OUI
Transport en glacière : OUI

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au
laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Début d'analyse : 03/05/2022

Paramètres analytiques	Catégorie Santé	Résultats	Unités	Méthodes	Références	Limites de qualité	Références de qualité
Analyses microbiologiques							
Bactéries sulfato-réductrices		10 - 100	bactérie/mL	Ensemencement	M_CAR-E7166		
Bactéries ferrugineuses		Absence	-	Examen microscopique	M_CAR-E7023		
# Spores de bactéries anaérobies	1042	< 1	UFC/100 ml	Filtration	NF EN 26461-2		
sulfito-réductrices							
Analyses biologiques							
Recherche d'algues	1066	Absence	/l	Filtration	M_CAR-E7020		
Caractéristiques organoleptiques							

SAS au capital de 1 000 000 € - N° SIRET : 445 235 963 00011 - RCS STRASBOURG - NAF : 7120B - TVA intracom : FR 53 445 235 963
Siège social : 76 route du Rhin - BP 70321 - 67411 ILLKIRCH Cedex - Tél : 03 88 65 39 39 - Fax : 03 88 65 37 38

Rapport d'analyse Page 2 / 2

Identification échantillon : CAN2205-2072-2

Destinataire :

	Paramètres analytiques	Code Sonde	Résultats	Unités	Méthodes	Références	Limites de qualité	Références de qualité
#	Turbidité (*)	1295	< 0,10	NFU	Néphélométrie (*)	NF EN ISO 7027-1		
	Analyses physicochimiques							
	Analyses physicochimiques de base							
#	pH (*)	1302	6,37	-	Electrochimie (*)	NF EN ISO 10523		
	Température de mesure du pH (*)	6484	20,6	°C	Electrochimie (*)	NF EN ISO 10523		
#	TA (Titre alcalimétrique) (*)	1346	0,00	°f	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
#	TAC (Titre alcalimétrique complet) (*)	1347	35,00	°f	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
#	Matières en suspension totales (*)	1305	< 2,0	mg/l	Gravimétrie (filtre Whatman ou Breguer-Kruggel) (*)	NF EN 872		
#	TH (Titre Hydrotimétrique) (*)	1345	43,43	°f	Calcul à partir de Ca et Mg (*)	Méthode interne M_EM144		
	Analyse des gaz							
#	Sulfures totaux (*)	1355	< 0,10	mg/lS--	Potentiométrie (*)	Méthode interne		
#	Hydrogène sulfuré (calculé en fonction du pH) (*)	1343	<0,10	mg/lH2S	Potentiométrie (*)	Méthode interne		
	Cations							
#	Ammonium (*)	1335	< 0,05	mg/lNH4+	Spectrophotométrie au bleu indophénol (*)	NF T90-015-2		
#	Calcium dissous (*)	1374	129,1	mg/lCa++	ICP/AES après filtration (*)	NF EN ISO 11885		
#	Magnésium dissous (*)	1372	27,1	mg/lMg++	ICP/AES après filtration (*)	NF EN ISO 11885		
	Anions							
1	Chlorures (*)	1337	49,0	mg/lCl-	Chromatographie ionique (*)	NF EN ISO 10304-1		
1	Sulfates (*)	1338	99,0	mg/lSO4--	Chromatographie ionique (*)	NF EN ISO 10304-1		
#	Nitrates (*)	1340	9,1	mg/lNO3-	Flux continu (CFA) (*)	NF EN ISO 13395		
#	Nitrites (*)	1339	0,06	mg/lNO2-	Flux continu (CFA) (*)	NF EN ISO 13395		
#	Bicarbonates (*)	1327	427,0	mg/lHCO3-	Potentiométrie (*)	NF EN ISO 9963-1		
	Métaux							
#	Fer dissous (*)	1393	< 0,010	mg/lFe	ICP/MS après filtration (*)	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
#	Fer total (*)	1393	< 0,010	mg/lFe	ICP/MS après acidification et décantation (*)	NF EN ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
#	Manganèse dissous (*)	1394	0,070	mg/lMn	ICP/MS après filtration (*)	ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		
#	Manganèse total (*)	1394	0,071	mg/lMn	ICP/MS après acidification et décantation (*)	NF EN ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2		

ABSENCE DU LOGO COFRAC :

1 L'absence du logo Cofrac provient d'un délai de mise en analyse par rapport au prélèvement supérieur aux exigences normatives.

Roger GROULT

Dr en chimie, Directeur du CAR





Références :



Gennevilliers



Portées
communiquées
sur demande