



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Plateforme DEM'Eaux Thau – 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4 Livrable L10

Rapport final

BRGM/RP-70842-FR

Juillet 2022

Étude réalisée dans le cadre du projet BRGM RP16LRO005

Ladouche B., Dewandel B., C. Lamotte, P. Pezard, M. Séranne,

Vérificateur :

Nom : Maréchal J.C.

Fonction : Responsable Unité
DEPA/NRE

Date : 15/09/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Blum A.

Fonction : Directrice Direction
Régionale Occitanie

Date : 29/09/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



HydroSciences
Montpellier



Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots-clés : Observatoire, Forage profond, Forage carotté, Piézomètre, Source sous-marine, Vise, Hydrogéologie, Pompage, Diagraphie, Balaruc-les-Bains, Hérault

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

Ladouche B., Dewandel B., Lamotte C., Pezard P., Séranne M. (2022) - Plateforme DEM'Eaux Thau - 1^{ères} acquisitions sur la source de la Vise, forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3, DEMENT4 – Livrable L10 - Rapport final. BRGM/RP-70842-FR, 157 p., 71 fig., 7 tab., 2 ann.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau (2017–2022), a pour objectif de caractériser les aquifères des formations carbonatées situées autour de l'étang de Thau afin de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale. Cette étude scientifique pluridisciplinaire implique de caractériser à la fois la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème sur un territoire soumis à des enjeux économiques importants (thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme ...), à la fragilité de l'équilibre qui existe entre les différentes ressources en eaux souterraines (inversacs) et à la complexité du comportement des différents réservoirs souterrains.

Ce rapport constitue le livrable L10 du projet DEM'EAUX THAU : il décrit les dispositifs expérimentaux de la Vise et de la plateforme des forages et présente les résultats des premières acquisitions de données.

En effet, le projet de recherche a permis de renforcer l'observatoire des eaux souterraines sur les différents aquifères de la zone d'étude, notamment au sein des formations calcaires du Jurassique de la presqu'île de Balaruc-les-Bains. Cet observatoire spécifique est constitué par l'équipement de la source sous-marine de la Vise située dans la lagune de Thau, ainsi que par la réalisation et l'équipement de quatre ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 à quelques centaines de mètres de la source en complément de celui réalisé à Sète en début de projet (L6 du projet DEM'Eaux Thau, BRGM/RP-68549-FR).

L'acquisition de données de débit, de conductivité et température de la source sous-marine de la Vise constitue un élément-clé du projet de recherche pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique en condition « normale » ou en période « d'inversac » de l'hydrosystème karstique de Thau : caractérisation des flux (entrants ou sortants) de la source de la Vise, caractérisation des bilans volumiques ou massiques, caractérisation de la qualité physico-chimique des eaux de la source (température, conductivité électrique, éléments majeurs, traces, isotopes).

La plateforme expérimentale des forages est située à quelques centaines de mètres de la source sous-marine de la Vise à proximité immédiate de l'ouvrage existant F6 (BSS002JDXA) sur la commune de Balaruc-les-Bains. L'objectif de ces ouvrages est multiple, reconnaissance géologique et hydrogéologique des horizons aquifères profonds (jusqu'à 759 m de profondeur) qui n'étaient pas connus auparavant, instrumentations pour suivis hydro-géophysiques (pression, conductivité, température, résistivité électrique). Les équipements permettent la caractérisation des interactions entre les réservoirs karstiques profonds et superficiels dans la zone côtière de Balaruc-les-Bains où convergent des eaux douces, thermales et marines.

Le projet de recherche a permis de mettre en place une instrumentation exceptionnelle pour d'une part répondre aux besoins de recherche et de connaissance indispensables à la gestion de la nappe du pli ouest, et d'autre part pour pérenniser des mesures minimales sur la nappe et faire de cette instrumentation un véritable observatoire, représentatif d'un karst littoral méditerranéen. Ces mesures seront utiles tant pour la gestion de l'aquifère que pour le besoin de suivre dans la durée et dans un contexte de changement climatique un tel système.

Le projet DEM'EAUX terminé, ces équipements sont à disposition auprès de scientifiques, entreprises, d'étudiants, pour la réalisation de projets opérationnels (mises au point, tests de modes opératoires, matériels), éducatifs, ou de recherche).

Sommaire

1. Introduction	11
2. Dispositif expérimental de suivi de la source sous-marine de la Vise	13
2.1. SUIVIS HYDROMÉTRIQUES ET PHYSICOCHIMIQUES DE LA VISE	14
2.2. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES EFFECTUÉS À LA SOURCE DE LA VISE	19
3. Plateforme expérimentale : ouvrages de reconnaissance DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT3/DEMENT4	21
3.1. ACQUISITIONS GÉOLOGIQUES	23
3.1.1. DEMENT1 (168 m) et DEMENT2 (40 m) : ouvrages réalisés en destructif	23
3.1.2. DEMENT3 (300 m) : ouvrage carotté	27
3.1.3. DEMENT4 (760 m) : ouvrage carotté	31
3.2. ACQUISITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	35
3.2.1. Essais par pompage sur DEMENT1 et DEMENT2 (avant l'inversac)	35
3.2.2. Suivis hydrogéologiques et physico-chimiques sur DEMENT1 et DEMENT2	43
3.2.3. Suivi piézométrique : caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère	46
3.2.4. Essai par pompage sur DEMENT3 (contexte d'inversac)	49
3.2.5. Essais par pompage sur le forage profond DEMENT4 dit Claudine IV (contexte d'inversac)	54
3.2.6. Mise en perspective des nouveaux résultats dans le contexte hydrogéologique	60
3.3. ACQUISITIONS GÉOCHIMIQUES	61
3.3.1. Caractérisations géochimiques préliminaires des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 (avant l'inversac)	63
3.3.2. Caractérisations géochimiques préliminaires de l'ouvrage DEMENT3 (période d'inversac)	68
3.3.3. Caractérisations géochimiques préliminaires de l'ouvrage DEMENT4 (période d'inversac)	70
3.4. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES	71
3.4.1. Observatoire de résistivité (SMD de la société Imageau)	71
3.4.2. Observatoire de température (fibre optique, société Kloé)	74
3.4.3. Diagraphies de forage	77
4. Conclusion	81
5. Bibliographie	83

Liste des figures

Figure 1 : Situation de la plateforme DEM'Eaux Thau à Balaruc-les-Bains	12
Figure 2 : Évolution du débit mesuré par le dispositif collecteur sous-marin de la Vise. L'évolution de la côte de la lagune au droit de la Vise est également reportée.....	15
Figure 3 : Évolution détaillée de la vitesse mesurée par le débitmètre électromagnétique du dispositif collecteur sous-marin de la Vise.....	15
Figure 4 : Dispositif de contrôle du champ de vitesse en sortie du débitmètre de la Vise	16
Figure 5 : Planche photographique du dispositif de mesure sous-marin de la Vise	17
Figure 6 : Évolution de la conductivité et de la température de l'eau qui transite par le par le dispositif sous-marin de la Vise. L'évolution des débits moyens journaliers de la Vise est également reportée.....	18
Figure 7 : Évolutions détaillées (zoom) de la conductivité et de la température (pas de temps de 5 mn) de l'eau qui transite par le dispositif sous-marin de la Vise. Les évolutions des débits moyens journaliers de la Vise et des hauteurs d'eau de la lagune (5 mn) sont également reportées	18
Figure 8 : Vue du dispositif expérimental de suivi et prélèvement de la Vise (situé dans l'enceinte de la pisciculture « Poissons du Soleil »	19
Figure 9 : Report des dates de prélèvements à la source de la Vise dans le contexte hydrogéologique de la Vise.....	19
Figure 10 : Schéma de principe de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau	21
Figure 11 : Localisation de la plateforme expérimentale des forages.	22
Figure 12 : Emplacement des forages DEMENT1 et DEMENT2 à proximité de la source des Hespérides (forage thermal F6)	23
Figure 13 : Coupe géologique et technique du forage DEMENT1 (BSS004AXZH) avec les deux piézomètres n° 1 et n° 2.....	24
Figure 14 : Tête de forage de DEMENT1 avec l'accès aux deux piézomètres.	25
Figure 15 : Coupe géologique et technique du forage DEMENT2 (BSS004AXZJ)	26
Figure 16 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (DemT1) et le Miocène (DemT2)	27
Figure 17 : Emplacement du forage DEMENT3.....	28
Figure 18 : Coupe géologique préliminaire du forage DEMENT3 (Wildhem 2021, stage M2 sous la direction de Michel Séranne)	28
Figure 19 : Acquisition géologique et examens sur le terrain	29
Figure 20 : Log lithologique synthétique préliminaire de l'ouvrage DemT3	29
Figure 21 : Vue détaillée des déformations au sein des dolomies.....	30
Figure 22 : Examen microscopique des déformations au sein de la dolomie.....	30
Figure 23 : Log lithologique préliminaire interprété de l'ouvrage DemT3, synthèse des premières constatations	31
Figure 24 : Colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage carotté DEMENT3/DEMENT4 réalisé dans le projet DEM'EAUX Thau (extrait de Widhen et al, soumis)	33
Figure 25 : Légende de la colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage carotté DEMENT3/DEMENT4 réalisé dans le projet DEM'EAUX Thau	34
Figure 26 : Évolutions des niveaux d'eau sur DemT1 et demT2 lors des tests de pompage	35

Figure 27 : Suivi du débit de la source de la Vise (Avril – Mai 2020) et informations liées à la foration du DemT1	36
Figure 28 : Pompage d'une fracture dans un aquifère multicouche, avec impact sur une source.	37
Figure 29 : Pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Modèle : fracture dans un aquifère multicouche avec impact sur une source. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique.....	38
Figure 30 : Pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Schéma de calcul.	39
Figure 31 : Évaluation de l'impact sur le débit de la source de la Vise lors du pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020).....	40
Figure 32 : Diagnostic de l'essai réalisé sur DEMENT2 (02/06/2020).....	41
Figure 33 : Aquifère compartimenté avec anisotropie de perméabilité : a) structure « T », b) cas où les compartiments sont d'épaisseur égale.....	41
Figure 34 : Pompage sur DEMENT2 (02/06/2020). Modèle : aquifère compartimenté. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique.	42
Figure 35 : Pompage sur DEMENT2 (02/06/2020). Schéma de calcul.	42
Figure 36 : DemT1 : évolution de la piézométrie et de la conductivité et de la température de l'eau à 130 m de profondeur.....	43
Figure 37 : DemT2 : évolution de la piézométrie et de la conductivité et de la température de l'eau à 35 m de profondeur.....	44
Figure 38 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (demT1) et le Miocène (DemT2)	45
Figure 39 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (demT1) et le forage F6 Hespéride	45
Figure 40 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (DemT1, F4), dans le miocène (forage F6 Hespéride) et niveau d'eau de la lagune (à l'aplomb de la Vise). ...	46
Figure 41 : Schéma de principe de la méthode du code de calcul CATHERINE (Thiéry D., 2012)	47
Figure 42 : (a) Comparaison de la piézométrie mesurée au forage F6 et de la cote du plan d'eau de la lagune de Thau. (b) Modélisation de la composante liée aux variations induites par la lagune et calcul de la chronique piézométrique corrigée.	48
Figure 43 : Suivis de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021). La partie en bleutée est liée à la perturbation occasionnée par le nettoyage de l'ouvrage avant l'essai.	49
Figure 44 : Diagnostic de l'essai réalisé sur DEMENT3 (11-12/01/2021).	50
Figure 45 : Puits interceptant et pompant une fracture verticale située à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale (Dewandel et al., 2022).....	50
Figure 46 : Pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.....	51
Figure 47 : Pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021). Schéma de calcul.	52
Figure 48 : Calcul des flux le long des deux discontinuités, et comparaison du calcul du flux net de la zone perméable à la salinité de l'eau pompée normalisée (salinité normalisée= salinité mesurée/salinité zone perméable) ; salinité de la zone perméable estimée à 21,2 g/l. Pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021).....	53
Figure 49 : Suivis du rabattement, du débit, de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du premier pompage sur DEMENT4 (620-759 m ; 15-16/12/2021).....	54
Figure 50 : Suivis du rabattement, du débit, de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du second pompage sur Claudine IV (390-759 m ; 17-18/12/2021).....	55
Figure 51 : Diagnostic du premier essai réalisé sur DEMENT4 (620-759 m ; 15-16/12/2021).	56

Figure 52 : Diagnostic du second essai réalisé sur DEMENT4 (390-759 m ; 17-18/12/2021).	56
Figure 53 : Premier pompage sur DEMENT4 (15-16/12/2021 ; 760-620 m). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.	58
Figure 54 : Second pompage sur DEMENT4 (17-18/12/2021 ; 760-390 m). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.	59
Figure 55 : (Figure extraite et modifiée du rapport BRGM/RP-68483-FR) : comparaison des transmissivités (graphe haut-gauche), perméabilités (graphe haut-droite) et des emmagasinevements (graphe du bas) déduits des essais sur les forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4/Claudine IV aux données disponibles sur le secteur : Miocène, aquifères fracturés-karstifiés du Jurassique sur les mines de Bauxite (Villeveyrac), de Balaruc (Thermes) et du secteur Issanka-Belvezet.	60
Figure 56 : Moyens mis en oeuvre lors des échantillonnages au cours de l'essai de pompage de DEMENT1 (photo montage BRGM/HSM).	61
Figure 57 : Évolution des signatures en deutérium (d^2H) en fonction des signatures en oxygène 18 ($d^{18}O$)	63
Figure 58 : Évolution du rapport Mg/Ca en fonction des signatures en oxygène 18 ($\square^{18}O$)	64
Figure 59 : Évolutions des signatures en oxygène 18 en fonction des concentration en chlorures.	65
Figure 60 : Actualisation du modèle conceptuel interprétatif (avant inversac). (a) schéma conceptuel suivant une coupe NW-SE (modifié d'après Pétré et al, 2020). (b) schéma conceptuel focalisé sur la presqu'île de Balaruc en condition hydrogéologique normale [focus sur l'encadré rouge de (a)]	66
Figure 61 : Évolution de la conductivité électrique des eaux des ouvrages DemT1, F6, F5, S12 et cauvy sur la période du 01/06/2020 au 01/03/2021 (avant inversac et début d'inversac).	67
Figure 62 : Actualisation du modèle conceptuel interprétatif (pendant inversac). (a) schéma conceptuel suivant une coupe NW-SE (modifié d'après Pétré et al, 2020). (b) schéma conceptuel focalisé sur la presqu'île de Balaruc en condition d'inversac [focus sur l'encadré rouge de (a)]	69
Figure 63 : Caractéristiques des dispositifs (SMD).	72
Figure 64 : (A) schéma d'instrumentation du piézomètre T1 par SMD. (B) Premier profil de résistivité soulignant l'entrée dans le Jurassique à 72 m.	72
Figure 65 : Image SMD de résistivité électrique du milieu réalisée en mode dipôle-dipôle et transformée en conductivité électrique de l'eau de porale en fonction de la profondeur. Les 14 premiers mois de données soulignent nettement la fin de l'inversac en mars 2022.	74
Figure 66 : Caractéristiques des dispositifs de fibre optique (société Kloé).	75
Figure 67 : (A) Extrémités basses (-202m) des 2 câbles de mesures de température par FO le long du tube inox installé et cimenté jusqu'à 240 m dans le forage T4. (B) Fibres (jaune) pour les mesures acoustiques et sismiques	75
Figure 68 : Position des 42 capteurs (K-FBGA_1) et 46 capteurs (K-FBGA_2) de type « réseaux de Bragg » des fibres optiques.	76
Figure 69 : Relevé de la mesure faite concernant la fibre optique « Acousto_no1 » (en haut) et « Acousto_no2 » (en bas)	77
Figure 70 : Images optiques de paroi dans le forage DEMENT4.	78
Figure 71 : Profils géophysiques dans les forages DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4 du site de Balaruc.	79

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques des eaux collectées par le dispositif sous-marin de la Vise	20
Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Modèle : fracture dans un aquifère multicouche avec impact sur une source.....	39
Tableau 3 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMENT2 (02/06/2020). Modèle : aquifère compartimenté. Largeur du compartiment central (2L) : Dist.Lim.1 (m)+Dist.Lim.2 (m) ; soit 193,5 m.	43
Tableau 4 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale.	53
Tableau 5 : Paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais de pompage sur DEMENT4 (15-16/12/2021 et 17-18/12/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale.	59
Tableau 6 : Type d'analyse effectuée et nature de l'information obtenue	62
Tableau 7 : Résultats préliminaires des analyses chimiques des eaux collectées dans les ouvrages de la plateforme expérimentale.....	62

Liste des annexes

Annexe 1 : Extrait du Dossier des ouvrages exécutés de DEMENT1 et DEMENT2	85
Annexe 2 : Extrait du Dossier des ouvrages exécutés de DEMENT3 (Claudine 3) et DEMENT4 (Claudine 4)	123

1. Introduction

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau (2017- 2022), vise à mieux comprendre l'hydrosystème dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et à développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale. Le BRGM pilote ce projet de recherche. Les trois autres partenaires opérationnels du projet sont les laboratoires Géosciences Montpellier, Hydrosiences Montpellier et l'entreprise Synapse. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT (Syndicat Mixte Bassin de Thau) ainsi que les partenaires opérationnels.

Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème sur un territoire soumis : i) à des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) à la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme les phénomènes d'intrusion d'eau marine - inversac) ; iii) à la complexité du comportement des différents réservoirs.

À plusieurs reprises, l'aquifère karstique et thermal de la presqu'île de Balaruc-les-Bains a subi un phénomène d'intrusion d'eau saumâtre ou marine par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise située dans l'étang de Thau. **Le dernier en date a débuté le 28 Novembre 2020 et s'est terminé le 14 Mars 2022.** Lors de ce phénomène dit « d'inversac » qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014, 15 mois entre 2020/2022), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de l'étang de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune. Ce phénomène a pour conséquence une modification des paramètres physico-chimiques des eaux de l'hydrosystème au sein de la presqu'île, observée au niveau des ouvrages des thermes de Balaruc et sur la source Cauvy qui a dû être abandonnée (2014) pour son usage pour l'alimentation en eau potable.

Ainsi, la réalisation d'équipements dédiés s'est avérée indispensable pour répondre aux enjeux du territoire en termes de gestion de la ressource en eau souterraine. Il s'est agi d'une part d'équiper la source sous-marine de la Vise : l'acquisition de données de débit, de conductivité électrique et température de la source de la Vise a été un élément-clé du projet de recherche DEM'Eaux Thau pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique en condition « normale » ou en période « d'inversac ». D'autre part, la plateforme d'observation des ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et (DEMENT3)/DEMENT4 réalisés au cours du projet à quelques centaines de mètres de la source à proximité immédiate de l'ouvrage existant F6 sur la commune de Balaruc-les-Bains (Figure 1) constitue également un complément expérimental d'exception pour suivre les évolutions physico-chimiques des eaux souterraines à différentes profondeurs. Le détail de ces équipements ainsi que des premières acquisitions de données et leur première interprétation sont présentés dans ce rapport. Cet observatoire complète celui réalisé à Sète au stade Michel (BSS003CGKO) en début de projet (L6 du projet DEM'Eaux Thau, BRGM/RP-68549-FR).



Figure 1 : Situation de la plateforme DEM'Eaux Thau à Balaruc-les-Bains

2. Dispositif expérimental de suivi de la source sous-marine de la Vise

La source sous-marine de la Vise ([BSS002JDMR](#), ancien code 10165X0004/ISTPE) située dans l'étang de Thau à l'Ouest de la presqu'île de Balaruc-les-Bains (Figure 64) constitue l'un des exutoires naturels les plus importants de l'aquifère des calcaires karstifiés du Jurassique, les autres exutoires du système karstique étant les sources de Cauvy et d'Ambressac et d'Issanka.

Selon les informations consignées dans le rapport de synthèse initial (BRGM/RP-68483-FR, Ladouche *et al*, 2019), la source sous-marine de la Vise parfois appelée Abysses émerge dans l'étang de Thau autour de 30 m de profondeur (entre -28 m et -31 m), au niveau d'un banc de calcaires coquilliers attribué au Miocène. La topographie du gouffre de la Vise (cf. BRGM/RP-69163-FR, Lamotte 2019) qui s'étend sur un diamètre d'environ 120 m à 3 m de profondeur se rétrécit assez rapidement jusqu'à 25 m suivant une pente faible (1/3) de -3 à -10 m, qui passe à 1/2 entre 10 et 25 m. Entre 25 m et le fond du gouffre, la pente devient importante et présente un angle de 45° environ par rapport à la verticale. Jusqu'à 27 m de profondeur, le cône est couvert de vases sableuses et de débris de coquilles.



Le déterminisme de ce phénomène dit « d'inversac » qui demeure encore mal compris au début du projet a pu être étudié de manière approfondie notamment par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure expérimental de la Vise, ces travaux sont rassemblés dans le rapport BRGM/RP-70839-FR (Marechal *et al*, 2022).

La conception de l'instrumentation de la source de la Vise a dû faire face à plusieurs enjeux : griffon submergé sous une trentaine de mètres d'eau saumâtre, au point bas d'un cône de sédiments, éloignement de la cote de 160 m environ, présence d'anciens équipements (buse métallique, sacs de ciments...), zone fortement fréquentée par les pêcheurs et les plongeurs... Les travaux et la conception du dispositif expérimental mis en place ainsi que l'instrumentation de la Vise ont été réalisés par la société ANTEA Group. L'ensemble du dispositif sous-marin est conçu pour être pénétrable si besoin, amovible, et permettre l'écoulement libre des eaux de la source dans la lagune ou à l'inverse les flux de lagune en direction du karst en période d'inversac. Le dispositif expérimental est opérationnel depuis juin 2019. Il permet le suivi du débit de la Vise (Figure 2), le dispositif de collecte des eaux de la Vise est coiffé d'un débitmètre électromagnétique, le suivi de la conductivité et de la température in situ (à -29.5 m de profondeur) ainsi que de la pression d'eau exercée par la colonne d'eau saumâtre au-dessus de la Vise. Un dispositif de collecte des eaux de la Vise ramené sur la berge de la lagune permet l'échantillonnage des eaux de la source sous-marine.

Le détail de l'instrumentation de la source de la Vise est décrit dans le rapport [BRGM/RP-69163-FR](#). Les différents instruments de mesure sur la Vise sont vérifiés et entretenus tous les 6 mois par des plongeurs professionnels au cours du projet. L'envasement est également contrôlé lors de ces plongées. L'ensemble du dispositif sous-marin est conçu pour être pénétrable si besoin, amovible, et permettre l'écoulement libre des eaux de la source dans l'étang.

Ci-après sont présentés les résultats des suivis réalisés sur le dispositif expérimental de la Vise depuis juillet 2019.

2.1. SUIVIS HYDROMÉTRIQUES ET PHYSICOCHIMIQUES DE LA VISE

Le suivi de la source sous-marine de la Vise est opérationnel depuis fin juin 2019. Les figures suivantes permettent d'illustrer les évolutions observées sur la période juin 2019-août 2021 et permettent également de détailler les modalités du suivi et de contrôle de l'installation.

La Figure 2 présente l'évolution du débit moyen journalier de la Vise et des niveaux d'eau de la lagune mesurée à l'aplomb du gouffre de la Vise. Les suivis indiquent que le débit de la source est variable au cours du cycle hydrologique (compris entre 0.06 m³/s et 0.2 m³/s en crue). Le dispositif permet également le suivi des débits d'absorption depuis le déclenchement du phénomène d'inversac (28/11/2020). Les débits d'absorption apparaissent supérieurs au débit naturel de la Vise mesuré sur la période juin 2019-novembre 2020 (débit moyen 0.119 m³/s). Sur la période du 27/11/2020 au 31/08/2021 (Figure 2), le volume d'eau saumâtre absorbé par la Vise est évalué à 4.2 millions de m³ (débit moyen de -0.178 m³/s). Sur la période globale de l'inversac (28/11/2020 à 09h40 au 14/03/2022 à 08h35, durée = 471 jours), le volume d'eau saumâtre absorbé par le karst par l'intermédiaire de la Vise est estimé à 6.7 millions de m³ (± 0.3 millions de m³). La masse de sel apportée à l'aquifère est estimée à 216 000 tonnes (± 11 000 tonnes). Les flux moyens sont respectivement de 14 400 m³/j et 460 tonnes/j.

Les mesures instantanées réalisées par le débitmètre électromagnétique sont entachées d'un important « bruit » notamment en période de basses eaux lorsque le débit de la source est inférieur à 0.15 m³/s (Figure 3). Un diagnostic réalisé par la société Krohne a permis de montrer que ces perturbations étaient liées à un câble défectueux (câble de liaison entre le débitmètre et la centrale d'acquisition située à terre dans l'enceinte de la pisciculture « Poissons du Soleil », cf. Figure 8). Ce câble a été changé en octobre 2020.

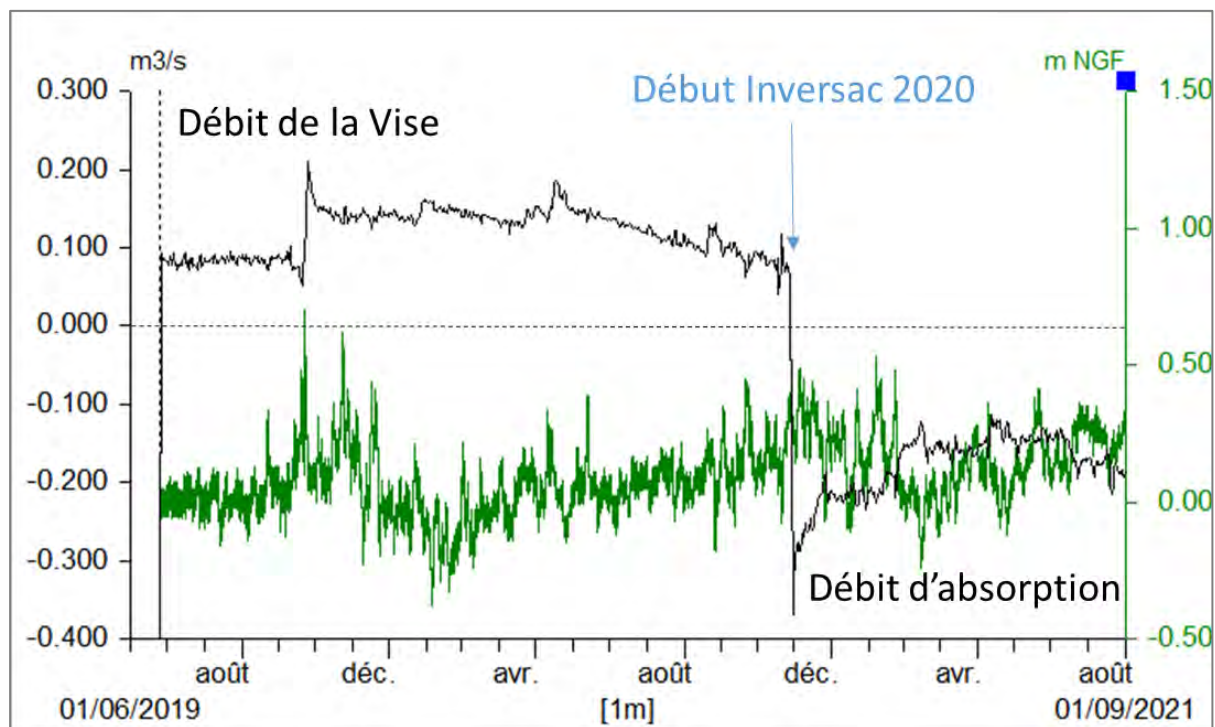


Figure 2 : Évolution du débit mesuré par le dispositif collecteur sous-marin de la Vise. L'évolution de la côte de la lagune au droit de la Vise est également reportée.

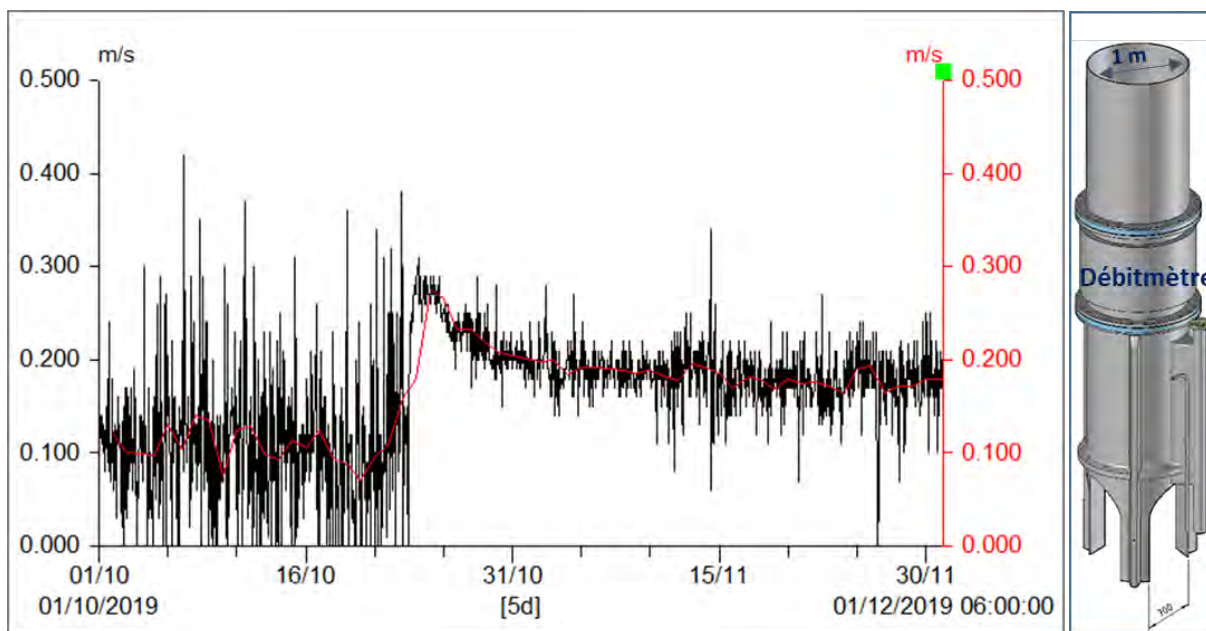


Figure 3 : Évolution détaillée de la vitesse mesurée par le débitmètre électromagnétique du dispositif collecteur sous-marin de la Vise.

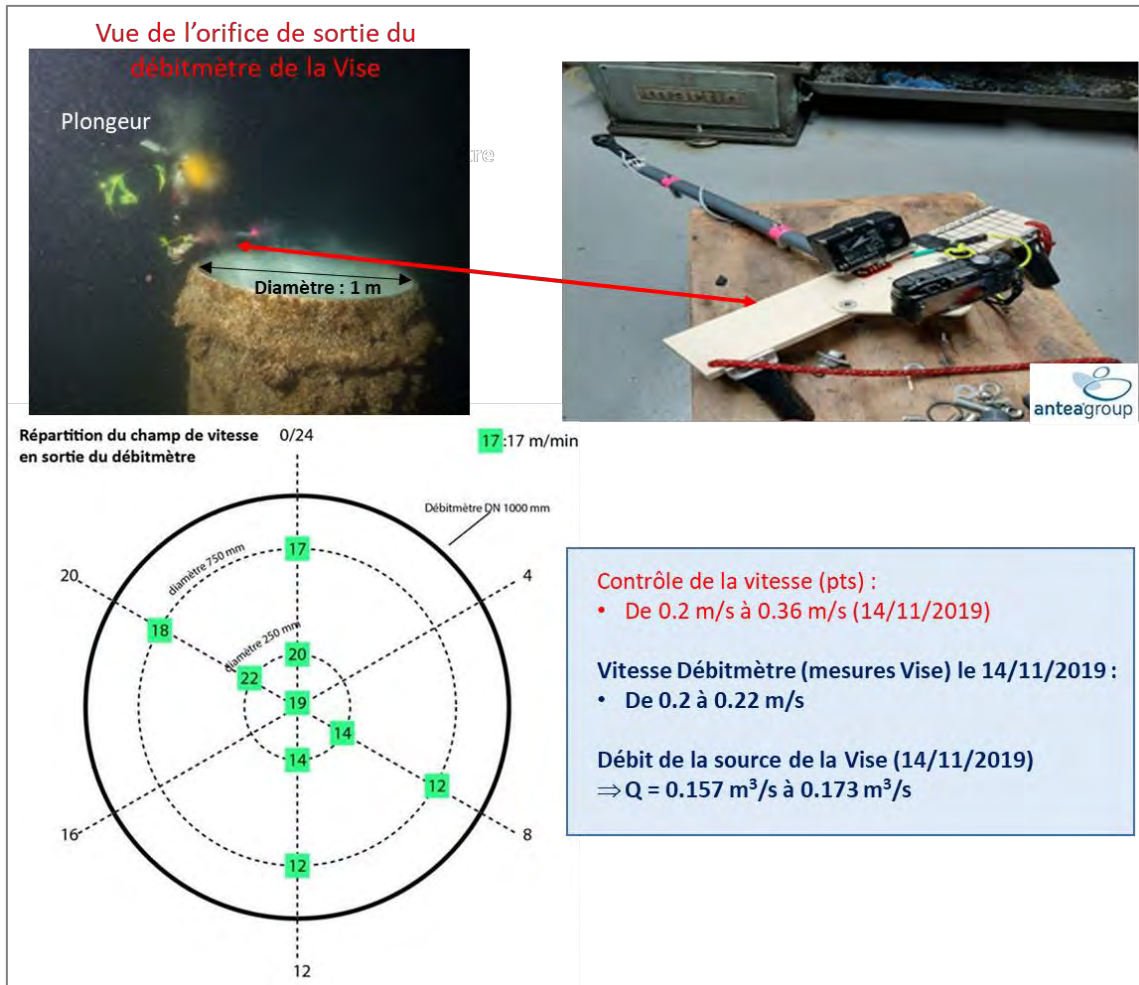


Figure 4 : Dispositif de contrôle du champ de vitesse en sortie du débitmètre de la Vise

Le contrôle du champ de vitesse en sortie du débitmètre de la Vise a été effectué à l'aide d'un dispositif spécifique spécialement développé dans le cadre de ce projet (Figure 4). Les mesures de contrôle réalisées permettent de valider les données produites par le débitmètre électromagnétique. Les vitesses en sortie du débitmètre sont de l'ordre de 0.2 m/s pour un débit l'ordre de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'illustration suivante (Figure 5) permet d'imager le dispositif de suivi de la conductivité et température de l'eau de la Vise. Le tube de mesure et les capteurs sont positionnés à proximité immédiate du griffon principal de la source de la Vise. Le capteur de 22 mm de diamètre permet de donner l'échelle, l'ouverture du griffon est de l'ordre de la dizaine de centimètres en moyenne sur une longueur de quelques décimètres.



Figure 5 : Planche photographique du dispositif de mesure sous-marin de la Vise

Tout autour du dispositif de mesure, des sacs de sable (visible sur la Figure 5) ont été disposés afin de canaliser les flux de la source dans le tube de mesure du débitmètre. Le dispositif de mesure sous-marin de la Vise n'est pas étanche. À certaines périodes, des arrivées d'eau saumâtre de la lagune peuvent se mélanger à l'eau de la Vise. Ce phénomène est clairement mis en évidence à l'aide des suivis de conductivité et de température réalisés au pas de temps de 5 mn. Les augmentations du niveau de la lagune se traduisent par une augmentation de la conductivité mesurée, ce phénomène est particulièrement visible lors des périodes de basses eaux lorsque le débit de la source est inférieur à $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. En période de hautes eaux, lorsque le débit de la source est supérieur à $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$, ce phénomène de perturbation de la mesure par les eaux de l'étang n'est pas visible. **La Figure 7 permet d'illustrer les périodes au cours desquelles la qualité physico-chimique des eaux collectées par le dispositif de mesure sont influencées par les eaux de la lagune. Ce point est important à garder à l'esprit dans l'interprétation des données géochimiques collectées à la Vise (cf. § 2.2).**

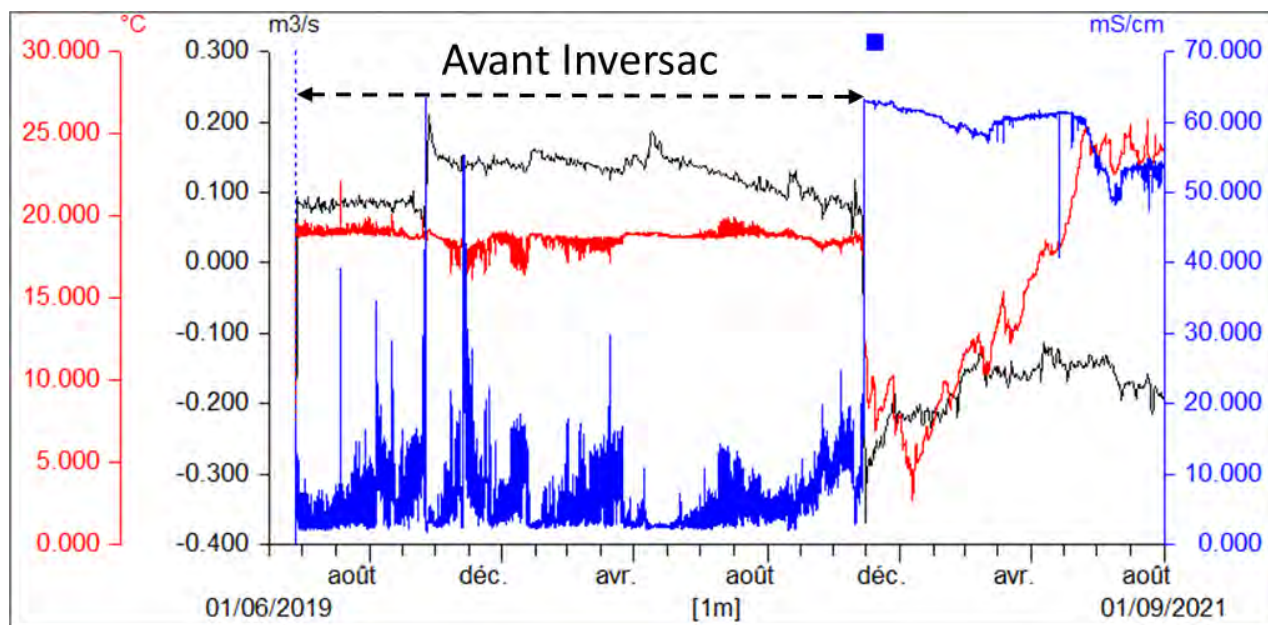


Figure 6 : Évolution de la conductivité et de la température de l'eau qui transite par le par le dispositif sous-marin de la Vise. L'évolution des débits moyens journaliers de la Vise est également reportée.

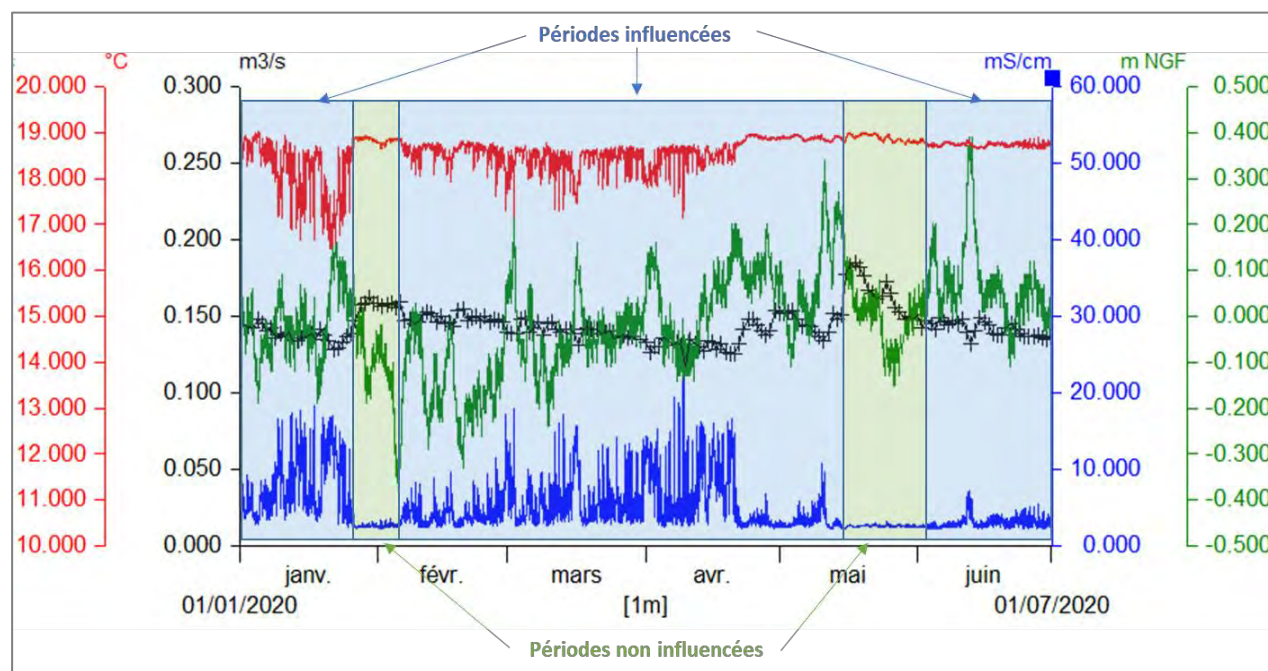


Figure 7 : Évolutions détaillées (zoom) de la conductivité et de la température (pas de temps de 5 mn) de l'eau qui transite par le dispositif sous-marin de la Vise. Les évolutions des débits moyens journaliers de la Vise et des hauteurs d'eau de la lagune (5 mn) sont également reportées

2.2. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES EFFECTUÉS À LA SOURCE DE LA VISE

L'illustration suivante (Figure 8) permet de visualiser le dispositif de suivi et de prélèvement des eaux de la Vise qui a été installé dans l'enceinte de la pisciculture « Poisson du Soleil ». La pompe à dépression (1 à 2 m³/h) prélève en continu les eaux collectées par le dispositif de mesure sous-marin de la Vise (Figure 5).



Figure 8 : Vue du dispositif expérimental de suivi et prélèvement de la Vise (situé dans l'enceinte de la pisciculture « Poissons du Soleil »)

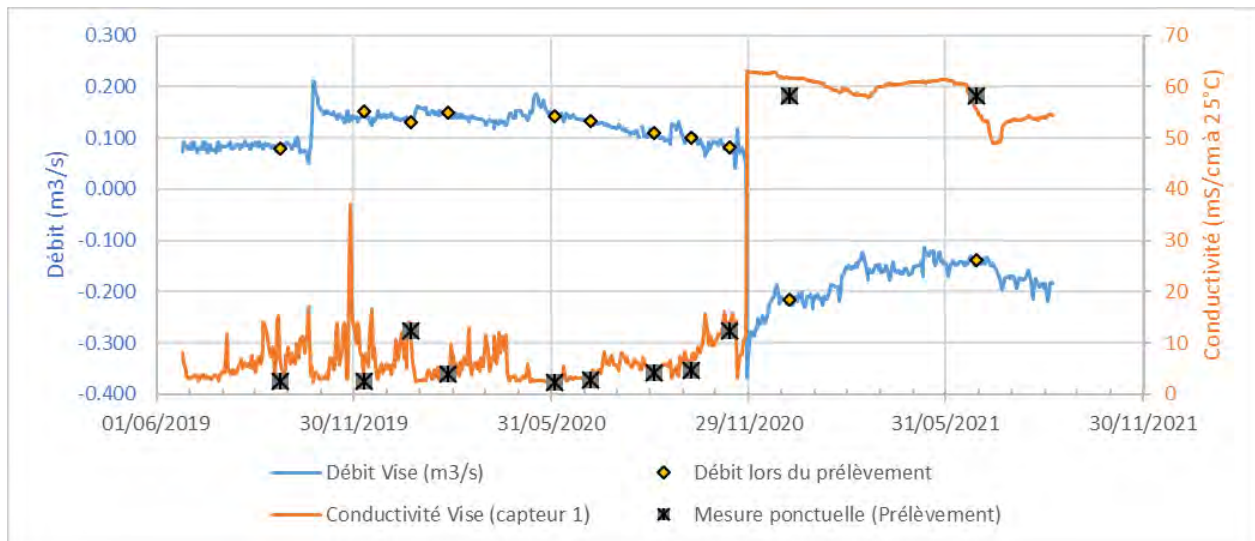


Figure 9 : Report des dates de prélèvements à la source de la Vise dans le contexte hydrogéologique de la Vise

Depuis la mise en fonctionnement du dispositif de collecte des eaux de la Vise (juillet 2019), 11 échantillons d'eau ont été collectés en vue d'analyses chimiques et isotopiques. La Figure 9 permet de replacer les prélèvements dans le contexte hydrogéologique. Les 2 derniers prélèvements ont été réalisés en contexte d'inversac (début le 28/11/2020). Ces 2 prélèvements permettent de qualifier la composition géochimique de l'eau de la lagune qui est absorbée par la Vise et qui contribue à modifier la qualité des eaux souterraines de la presqu'île de Balaruc lors des inversacs. Les résultats préliminaires des analyses effectuées sont rassemblés dans le Tableau 1. La valorisation des résultats géochimiques est présentée dans les livrables L5a et L5b (BRGM/RP-71281-FR et BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux et al 2022a,b).

Vise : exhaure dispositif de prélèvement										
date	Q (m3/s)*	Remarque	T (°C)	pH	Cond (mS/cm) à 25°C	O2 mg/l	TOC (mg/l)	SiO2 mg/l	HCO3 mg/l	PCO2_calc
24/09/2019	0.079	**	20.2	7.2	2.46	NA	0.39	8.9	418.4	0.027
10/12/2019	0.151	**	14.4	7.1	2.49	5.28	NA	9.6	375.27	0.031
22/01/2020	0.13		13.5	7.0	12.42	6.71	0.8615	9.0	346.2	0.038
26/02/2020	0.149	**	15.4	7.0	3.87	5.71		NA	382.2	0.039
04/06/2020	0.142	**	21.3	7.1	2.33	4.97	1.935	9.2	391.87	0.034
07/07/2020	0.133	**	21.6	7.2	2.85	5.19		9.4	392.36	0.024
03/09/2020	0.109		21.1	7.2	4.23	4.45	0.63	8.9	483.89	0.028
08/10/2020	0.101		18.7	7.0	4.70	4.76	2.74	8.8	376.49	0.044
12/11/2020	0.082		17.3	7.0	12.25	4.57	1.37	13.6	366.24	0.041
07/01/2021	-0.216	Inversac	5.7	8.2	58.20	11.6	2.234	NA	167.927	0.001
29/06/2021	-0.139	Inversac	24.6	8.0	58.20	5.13	3.82	NA	152.45	
date	Q (m3/s)*	Remarque	Cl mg/l	Na mg/l	K mg/l	Br mg/l	SO4 mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	NO3 mg/l
24/09/2019	0.079	**	568.7	315.8	11.9	1.4	108.8	131.7	58.5	5.4
10/12/2019	0.151	**	555.0	299.2	10.7	1.5	102.9	129.1	55.1	<LD
22/01/2020	0.13		3863.6	2083.0	85.9	15.9	584.5	201.1	277.6	4.0
26/02/2020	0.149	**	971.1	505.2	18.3	3.4	166.6	139.0	79.6	5.5
04/06/2020	0.142	**	462.7	248.8	9.0	5.9	98.8	129.4	49.0	<LD
07/07/2020	0.133	**	664.5	352.4	13.5	6.4	122.6	127.5	60.6	6.5
03/09/2020	0.109		1099.5	572.7	24.5	3.9	183.0	131.7	88.6	5.0
08/10/2020	0.101		1161.6	637.5	25.1	3.8	193.5	136.0	95.5	3.6
12/11/2020	0.082		3446.8	1914.0	75.2	14.7	548.1	186.2	250.0	2.9
07/01/2021	-0.216	Inversac	21953.4	11629.8	471.8	77.0	3032.2	478.6	1404.1	<LD
29/06/2021	-0.139	Inversac	20617.7	11632.3	400.1	81.1	3085.2	505.8	1389.7	<LQ
date	Q (m3/s)*	Remarque	Li µg/l	B µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	Ba µg/l	222Rn	d18O (‰)	d2H (‰)
24/09/2019	0.079	**	8.2	120.9	3.9	452.5	14.6	2.4	-5.6	-33.2
10/12/2019	0.151	**	8.6	121.4	3.8	468.8	16.3	2.2	-5.7	-33.8
22/01/2020	0.13		34.5	923.1	21.4	1625.9	15.3	2.50		
26/02/2020	0.149	**	11.6	197.8	6.0	629.5	17.8	NA	-5.6	-32.7
04/06/2020	0.142	**	8.2	106.9	3.3	399.5	17.1	2.6	-5.8	-33.4
07/07/2020	0.133	**	10.7	164.9	4.8	504.6	16.8	2.8	-5.7	-33.1
03/09/2020	0.109		12.7	236.4	7.0	631.4	16.9	2.14	-5.4	-32.1
08/10/2020	0.101		14.9	265.5	7.9	667.9	17.0	2.25	-5.4	-31.8
12/11/2020	0.082		38.9	868.3	22.6	1881.0	22.0	1.96	-4.6	-27.0
07/01/2021	-0.216	Inversac	193.5	4709.8	138.1	9025.1	12.3	0.09	1.2	6.9
29/06/2021	-0.139	Inversac	en attente	en attente	en attente	en attente	en attente	0.02	en attente	en attente
*Debit moyen journalier de la Vise										
** Non influencé par les eaux de la lagune (cf. texte)										

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques des eaux collectées par le dispositif sous-marin de la Vise.

3. Plateforme expérimentale : ouvrages de reconnaissance DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT3/DEMENT4

Dans le but d'acquérir des données hydrogéologiques inédites et de lever les incertitudes géologiques et géochimiques en vue d'améliorer le schéma conceptuel de structure et de fonctionnement de l'hydrosystème complexe de la presqu'île de Balaruc, une plateforme expérimentale composée de plusieurs ouvrages de reconnaissance a été mise en œuvre dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. Ces équipements sont réalisés dans le cadre de l'Investissement CPER n°1b avec le soutien de la Région Occitanie. La ville de Balaruc-les-Bains a mis à disposition une parcelle pour l'implantation des quatre forages DEMENT.

L'objectif de ces ouvrages est de capter et instrumenter des horizons aquifères qui ne l'étaient pas auparavant. Les objectifs scientifiques et principaux questionnements sont les suivants :

- caractérisation pétrophysique des réservoirs, minéralogie (circulations fluides, rôle des eaux thermales dans la karstification, ...) – Validation du modèle géologique 3D ;
- caractérisations des propriétés hydrauliques des différents aquifères et des structures hydrodynamiques (indispensables au modèle hydrogéologique) ;
- caractérisations géochimiques du réservoir profond : acquisition de la salinité des eaux thermales (Jurassique Supérieur ou plus profond?), le Jurassique Moyen est-il un réservoir relais des flux profonds transitant le long des failles ?
- comment évoluent les circulations au cours du temps ? Au cours d'un inversac ? Réservoir impacté par un inversac ?

Le schéma de principe d'implantation des ouvrages et les aquifères-cibles sont explicités sur la Figure 10.

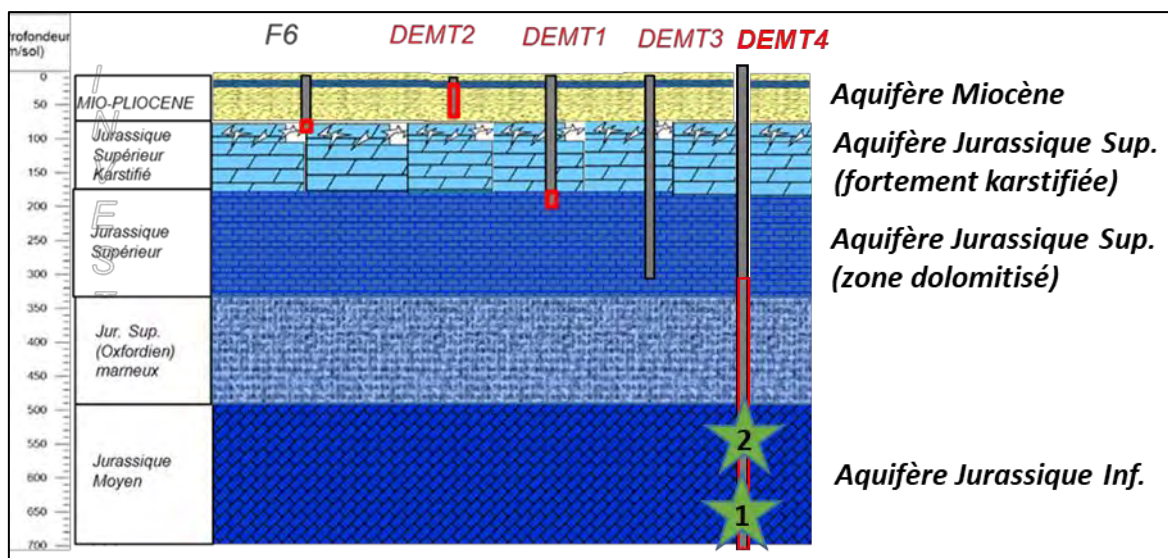


Figure 10 : Schéma de principe de l'implantation des ouvrages réalisés et aquifères-cibles de la plateforme DEM'Eaux Thau

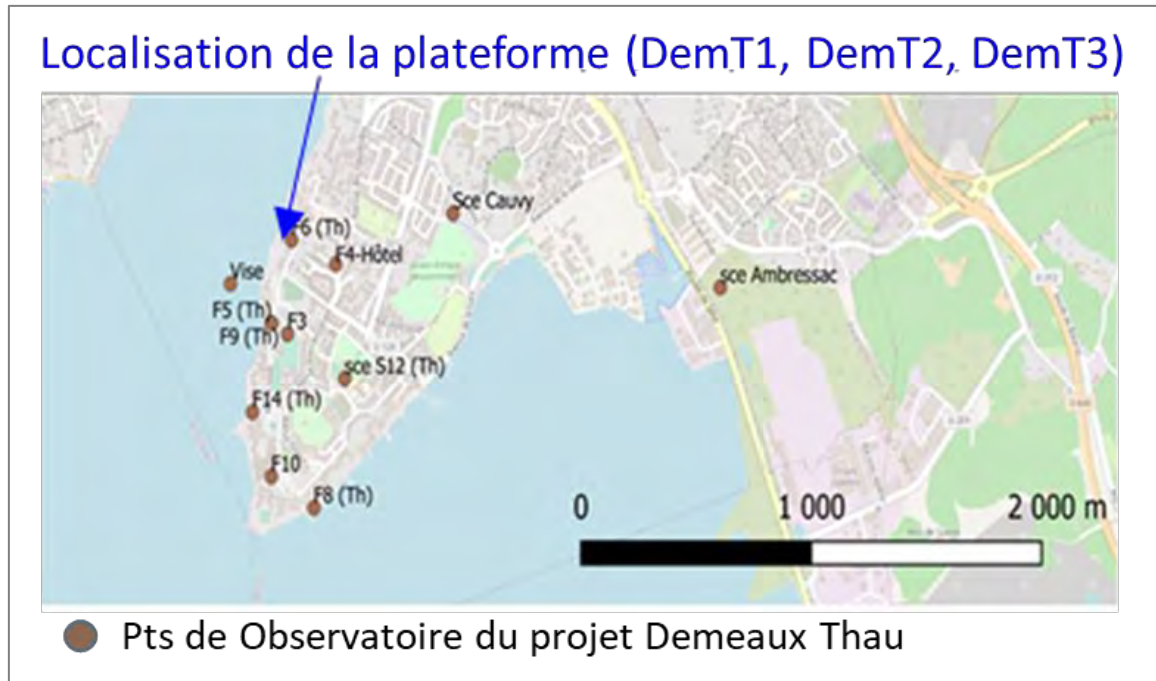


Figure 11 : Localisation de la plateforme expérimentale des forages.

Ce rapport présente les résultats des premières acquisitions de données réalisées sur les ouvrages DEMENT1, DEMENT1, DEMENT3 et DEMENT4.

Les forages DEMENT1 ([BSS004AXZH](#)) et DEMENT2 ([BSS004AXZJ](#)) ont été réalisés en destructif entre Mars et Mai 2020. Le forage DEMENT3 ([BSS004AXZK](#)) a été réalisé en carotté entre Novembre 2020 et Février 2021, à moins de 2 mètres du DEMENT1. **Le forage DEMENT3 a été comblé suite à des problèmes techniques liés à la foration.** Le forage carotté DEMENT4 ([BSS004CLMU](#)) a été réalisé entre Février et Novembre 2021, à environ 1 mètre du DEMENT3, afin de poursuivre l'acquisition de données géologiques et hydrogéologique jusqu'à 760 m de profondeur. Ils sont situés à proximité immédiate de l'ouvrage F6 ([BSS002JDXA](#)) des thermes de Balaruc-les-Bains.

3.1. ACQUISITIONS GÉOLOGIQUES

3.1.1. DEMENT1 (168 m) et DEMENT2 (40 m) : ouvrages réalisés en destructif

Les forages DEMENT1 ([BSS004AXZH](#)) et DEMENT2 ([BSS004AXZJ](#)) ont été réalisés en destructif entre Mars et Mai 2020. Ils sont situés à proximité immédiate de l'ouvrage des Hespérides (forage F6, [BSS002JDXA](#), ancien code 10165X0251/F6).



Figure 12 : Emplacement des forages DEMENT1 et DEMENT2 à proximité de la source des Hespérides (forage thermal F6)

On trouvera en annexe 1 des extraits du dossier des ouvrages exécutés.

Le forage DEMENT1 est constitué de deux piézomètres dont un est profond de 168 m et capte les formations carbonatées du Jurassique entre 128 et 163 m de profondeur (Figure 13). Le Jurassique est atteint vers 75 m de profondeur sous les dépôts marneux et marno-sableux du Mio-Pliocène. L'inspection vidéo a montré des cavités dont la plus importante est située entre 132.9 et 134.7 m. Une arrivée d'eau importante a été identifiée à la foration à 131-131,5 m de profondeur. Il s'agit d'un drain karstique de dimension notable (décimétrique). Le tube n° 2 accueille la sonde SMD (voir chapitre 3.4).

L'ouvrage est équipé d'un capteur de pression-température-conductivité (PTEC) positionné à 130 m de profondeur à proximité immédiate de l'importante arrivée d'eau identifiée à la foration. Les suivis ont débuté le 07/07/2020, le pas d'acquisition a été fixé à 15 mn, les données sont intégrées à la [plateforme Web DEM'Eaux Thau](#).

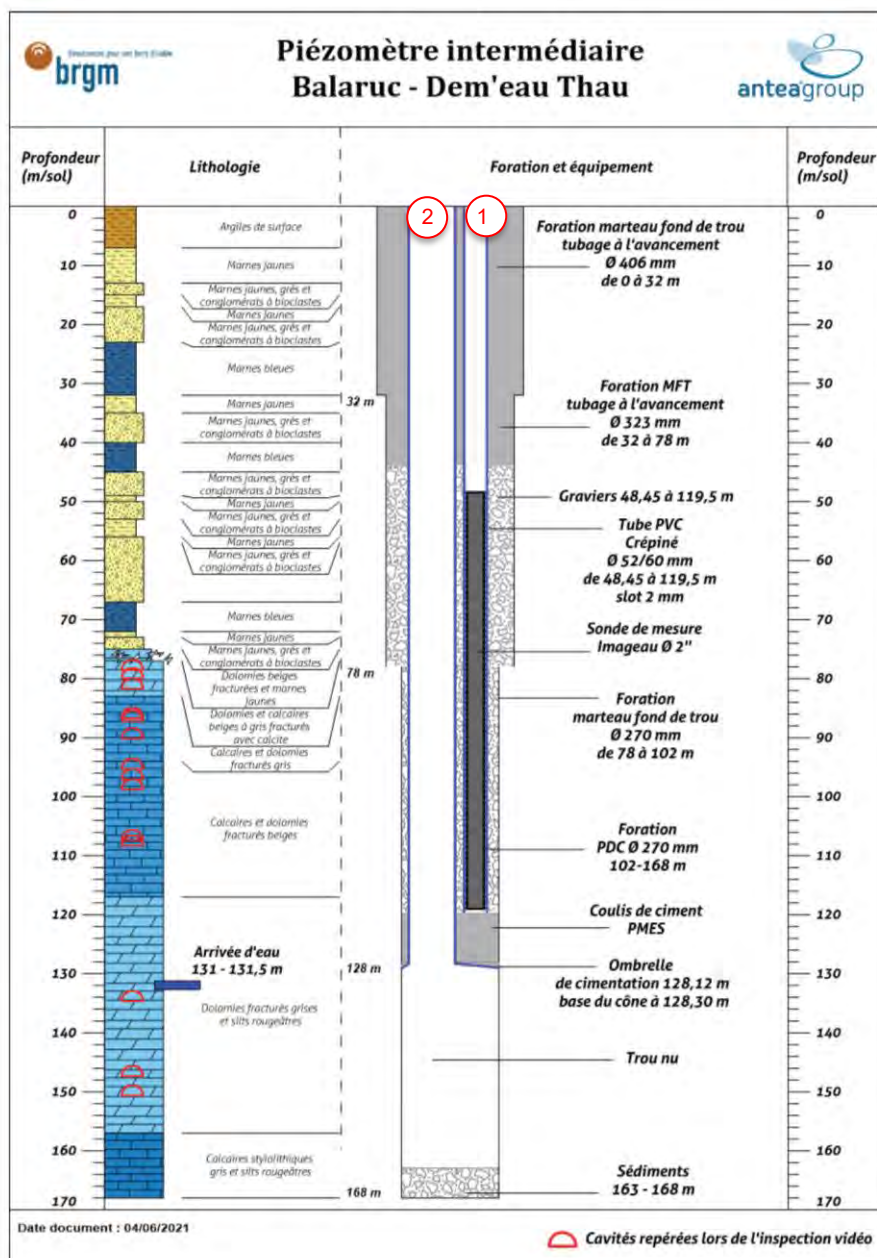


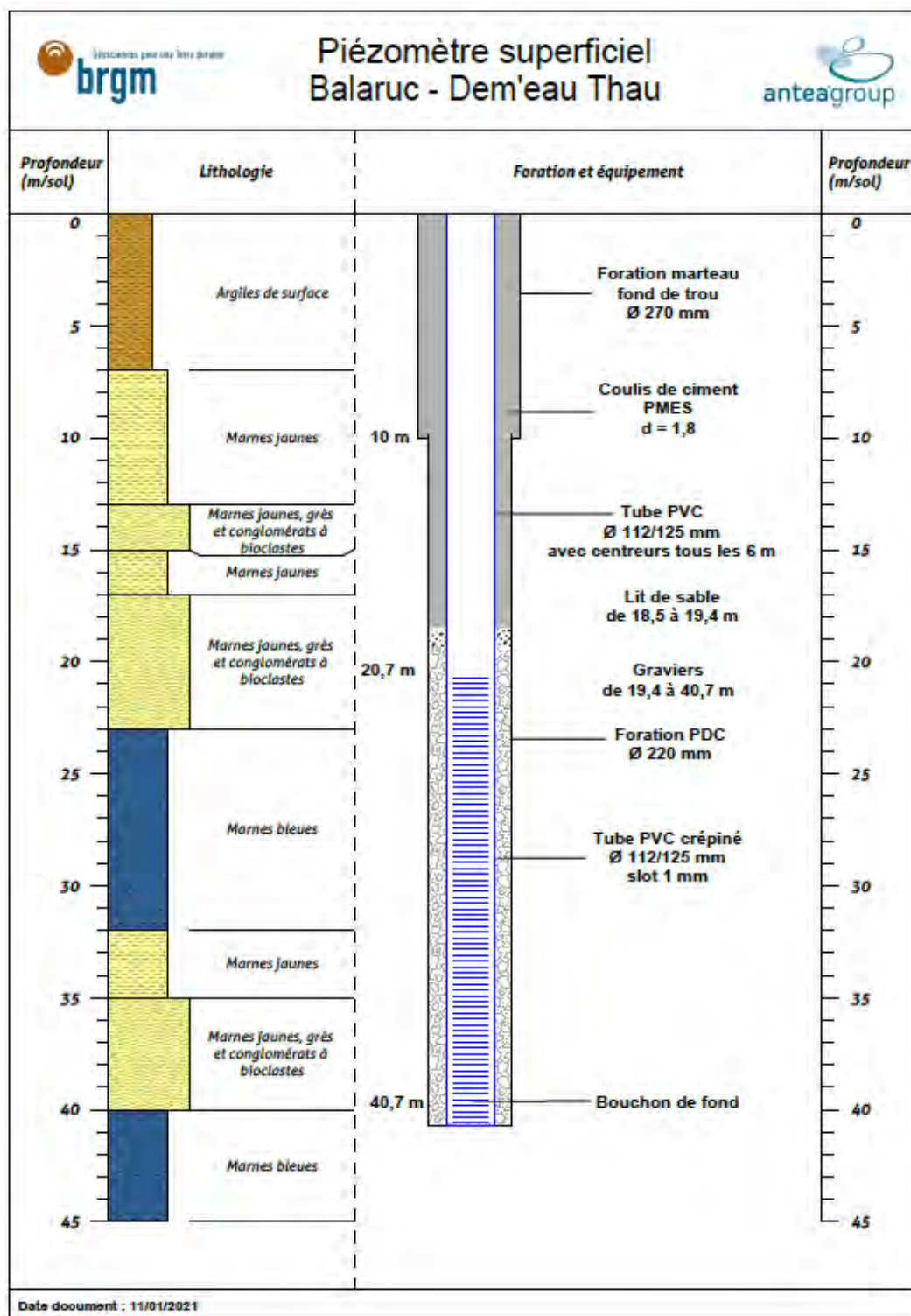
Figure 13 : Coupe géologique et technique du forage DMT1 ([BSS004AXZH](#)) avec les deux piézomètres n° 1 et n° 2.



Figure 14 : Tête de forage de DEMENT1 avec l'accès aux deux piézomètres.

Le forage DEMENT2 est situé dans la formation sus-jacente au Jurassique, dans les dépôts marneux et marno-sableux du Mio-Pliocène (Figure 15). Il est profond de 45 m et capte l'aquifère du Mio-Pliocène entre 20,7 et 40,7 m de profondeur. L'ouvrage est équipé d'un capteur de pression-température-conductivité (PTEC) positionné à 35 m de profondeur à proximité immédiate. Les suivis ont débuté le 16/06/2020, le pas d'acquisition a été fixé à 15 mn, les données sont intégrées à la [plateforme Web DEM'EAUX Thau \(https://demeauxthau.follow.solutions/Account/Logon\)](https://demeauxthau.follow.solutions/Account/Logon).

La comparaison des piézométries des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 (Figure 16) permet de montrer que l'aquifère jurassique (DEMENT1) est en charge par rapport au Miocène recoupé par le DEMENT2. La différence de charge de l'ordre de +0.3 m en moyenne tend à se réduire en période de basses eaux (+0.1 m). En période d'inversac, la différence de charge est très significativement plus forte, de l'ordre de +1.3 m.

Figure 15 : Coupe géologique et technique du forage DENT2 ([BSS004AXZJ](#))

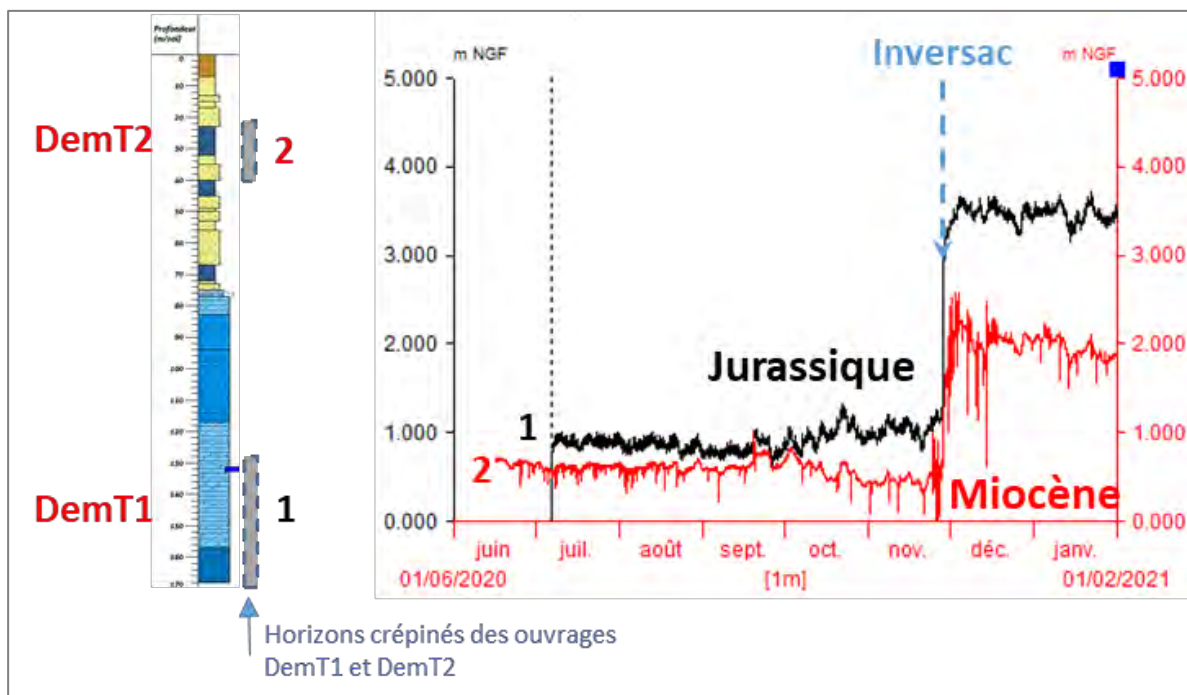


Figure 16 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (DemT1) et le Miocène (DemT2)

3.1.2. DEMENT3 (300 m) : ouvrage carotté

Les informations géologiques issues de l'examen des carottes vont permettre de vérifier et/ou calibrer le log géologique prévisionnel et ainsi valider et ou modifier le modèle géologique 3D. Ces examens permettront d'obtenir des informations capitales sur la nature de la karstification [nature des remplissages, type de karstification (gravifique et/ou hypogène) permettant d'expliquer le polyphasage de la karstification et donc des informations sur la structuration des écoulements au sein des réservoirs]. Les carottes permettront également l'examen de minéralisations secondaires liées à la diagénèse ou aux circulations hydrothermales.

Le forage carotté DEMENT3 ([BSS004AXZK](#)) a été réalisé entre Novembre 2020 et Janvier 2021, jusqu'à une profondeur de 280 m (Figure 18) ; il a été comblé suite à des problèmes liés à la reprise de foration après la réalisation de l'essai par pompage de janvier 2021. L'ouvrage recoupe les formations carbonatées du Jurassique sous environ 68 m de formations marneuses et marno-sableuses du Mio-Pliocène. Des informations géologiques préliminaires sont présentées sur les illustrations suivantes (Figure 19 à Figure 23).

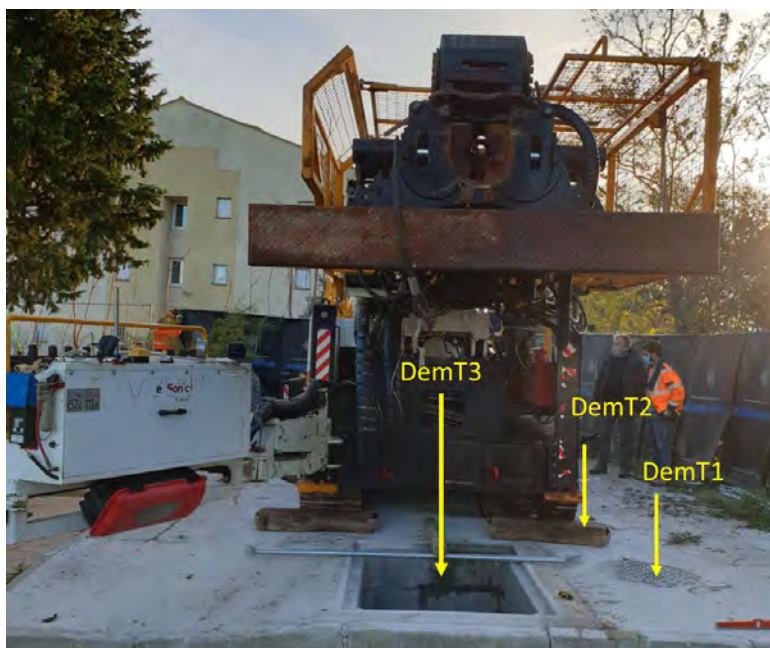


Figure 17 : Emplacement du forage DEMT3

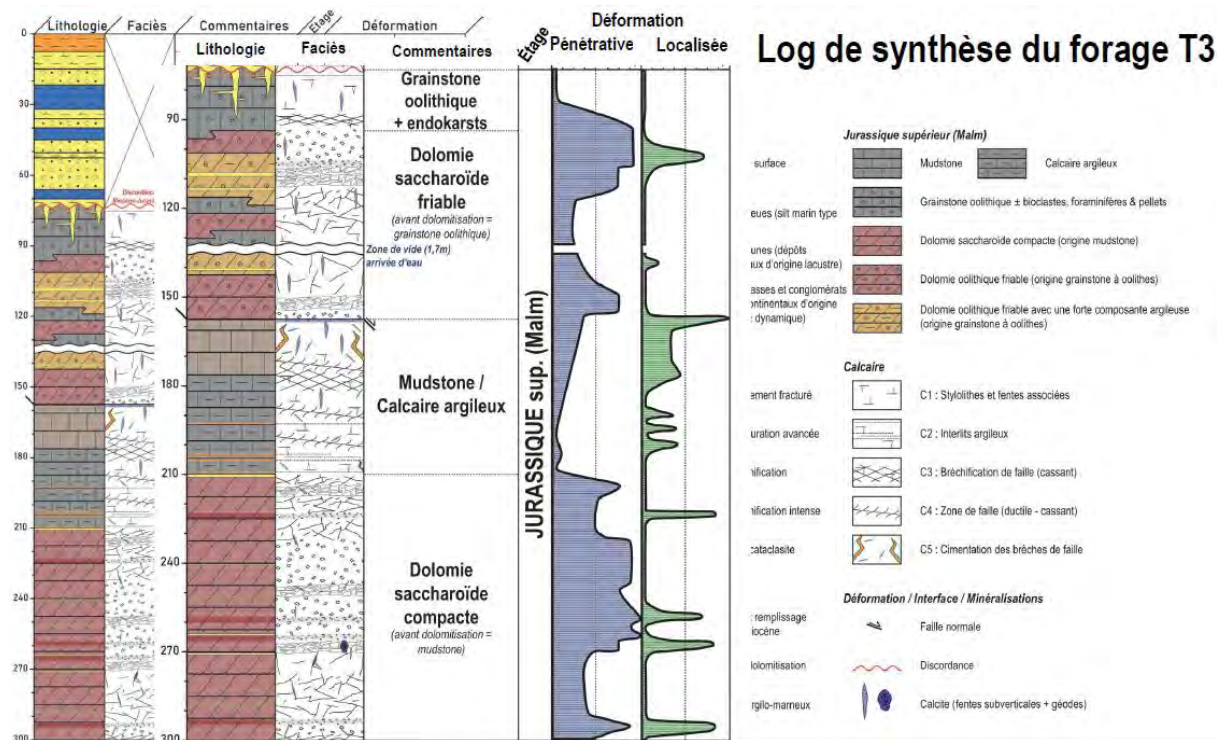


Figure 18 : Coupe géologique préliminaire du forage DEMT3 (Wildhem 2021, stage M2 sous la direction de Michel Séranne)



Figure 19 : Acquisition géologique et examens sur le terrain



Figure 20 : Log lithologique synthétique préliminaire de l'ouvrage DemT3



Figure 21 : Vue détaillée des déformations au sein des dolomies

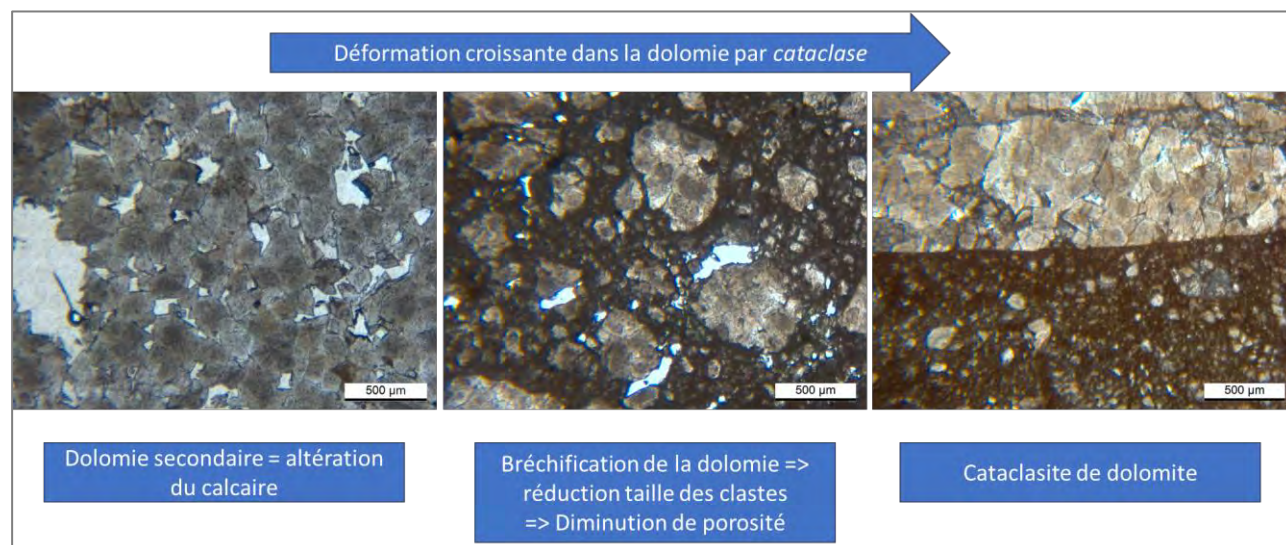


Figure 22 : Examen microscopique des déformations au sein de la dolomie

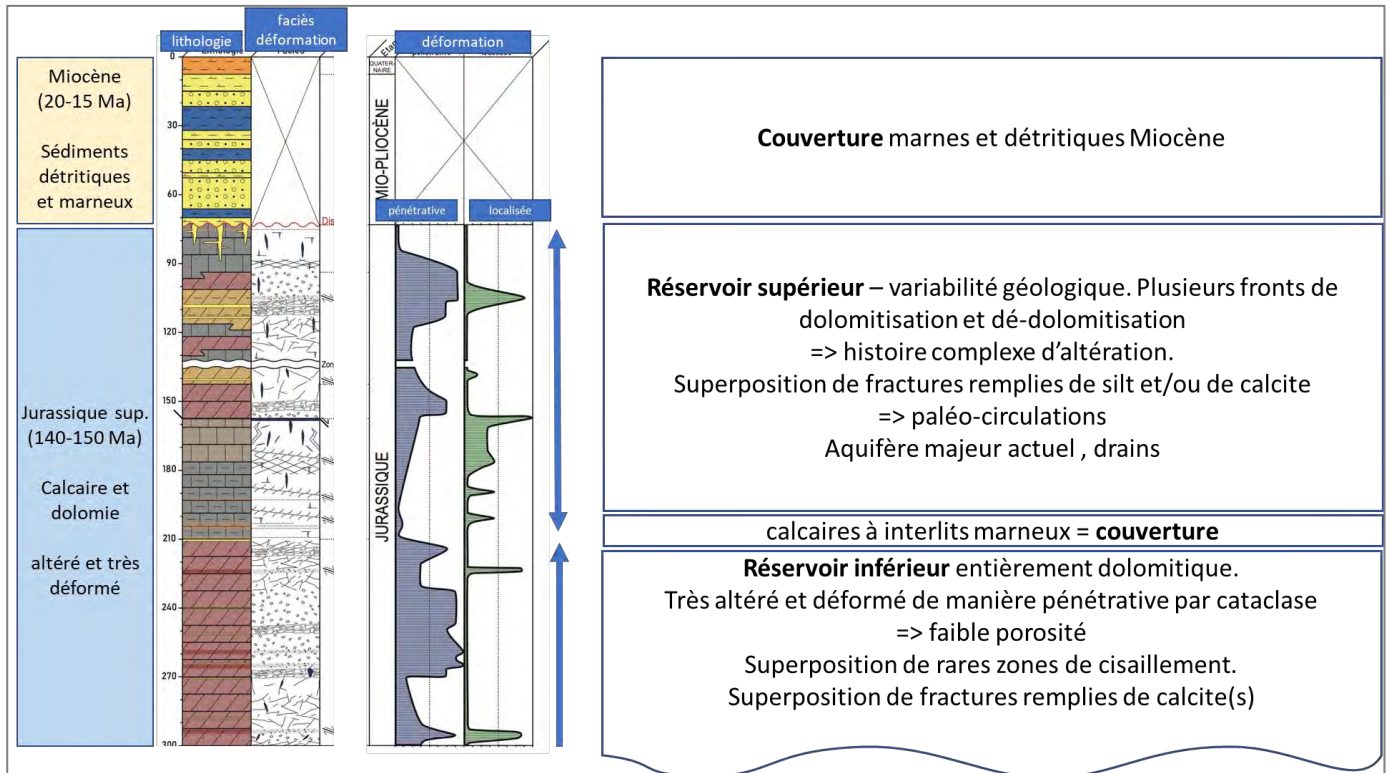


Figure 23 : Log lithologique préliminaire interprété de l'ouvrage DemT3, synthèse des premières constatations

3.1.3. DENT4 (760 m) : ouvrage carotté

Le forage carotté DENT4 ([BSS004CLMU](#)) a été réalisé entre Février et Novembre 2021, à quelques mètres du DENT3, afin de poursuivre l'acquisition de données géologiques et hydrogéologiques jusqu'à 759 m de profondeur. La Figure 24 présente le log synthétique de la colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage carotté DENT3/DENT4 réalisé dans le projet DEM'Eaux Thau

Les forages donnent un accès direct au réservoir ; ils permettent de valider les profondeurs des intervalles stratigraphiques, d'analyser les propriétés pétrophysiques des formations échantillonnées, de comprendre les paléo-circulations qui ont affecté le réservoir. Les forages verticaux DEM'Eaux Thau 3 et 4 ont livré 749 m de carottes dont l'analyse a fourni un log synthétique (Widhen & al, soumis). **Suite à ces descriptions, les carottes ont été stockées à la carothèque du BRGM à Orléans et sont donc référencées, pérennisées et librement accessibles.**

L'analyse des carottes a révélé une série de résultats originaux (Widhen *et al.*, soumis). La structure du réservoir est caractérisée par la superposition de plusieurs réservoirs séparés par des intervalles marneux. À faible profondeur, le grès initial est incomplètement dolomitisé dans des intervalles d'un mètre d'épaisseur, tandis que le calcaire dans les 210-340 m a été complètement dolomitisé à un stade précoce. La dolomie a été soumise à une déformation cataclastique pénétrante d'extension, tandis que le calcaire préservé est affecté par une faille normale, résultant d'une extension NNE-SSW.

Des types distincts de karsts ont été documentés, depuis le sommet du réservoir (paléo-lapiaz rempli de marnes marines du Burdigalien), jusqu'à 500 m de profondeur (paléo-endokarst rempli de limons continentaux). Le réservoir supérieur (75-150 m) est intensément karstifié, et comprend des cavités de 0,1 à 1m de large, où les flux d'eau actuels sont documentés.

Les analyses du ciment et des cristallisations de calcite et de dolomite sous lumière naturelle et cathodoluminescence indiquent une précipitation à partir de fluides distincts : eau de formation en équilibre chimique avec la roche hôte, eau riche en oxydes et hydroxydes, fluide hydrothermal ascendant et eau corrosive d'origine météorique. L'alternance de dolomitisation et de calcification observée dans le réservoir supérieur suggère des flux alternés d'eau douce karstique et d'eau salée marine. Des fissures ouvertes verticales, d'une longueur de plusieurs mètres et d'une largeur de quelques centimètres, sont actuellement utilisées pour de grands flux d'eau; plusieurs générations de croissance syntaxique de la calcite fournissent des preuves de la chimie variable des fluides en circulation.

Les relations de recoupement structurel nous ont permis d'établir une chronologie relative des événements, qui peut être corrélée avec l'évolution géodynamique régionale. L'étude révèle que l'architecture actuelle du réservoir résulte de la superposition de structures formées pendant l'extension du Crétacé précoce, le raccourcissement pyrénéen Maastrichtien-Eocène, le rifting Oligocène du Golfe du Lion. Le réservoir a également été façonné par des épisodes successifs de karstification et des transgressions marines. Bien que le système hydrologique actuel soit contrôlé par des structures héritées d'une évolution à long terme et qu'il les réactive, il est caractérisé par de fréquents revirements, réglés par des forçages externes à haute fréquence tels que les changements du niveau de la Méditerranée provoqués par la variation glacio-eustatique du Pléistocène, ou des variations du taux de recharge des aquifères.

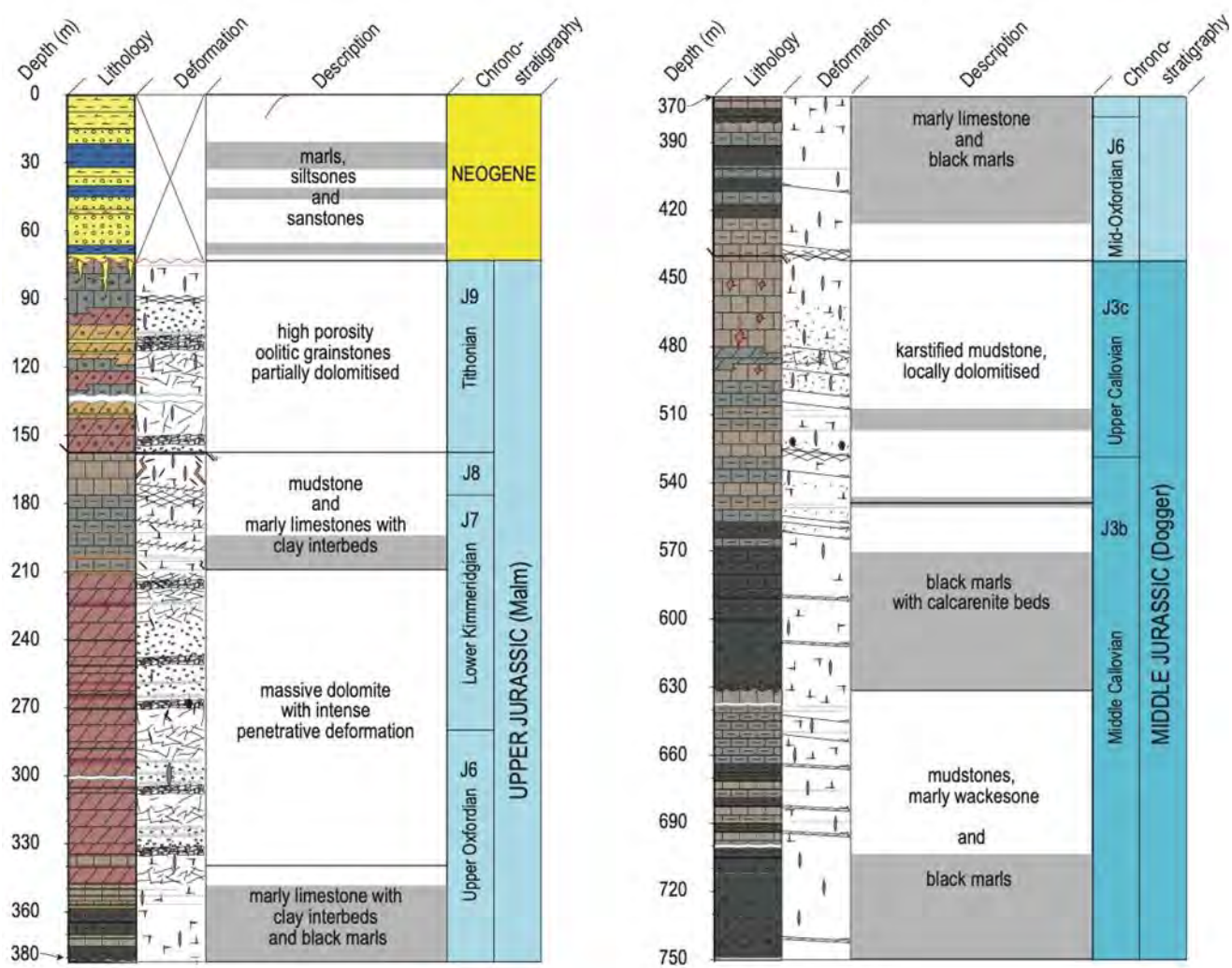


Figure 24 : Colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage carotté DENT3/DENT4 réalisé dans le projet DEM'EAUX Thau (extrait de Widhen et al, soumis)

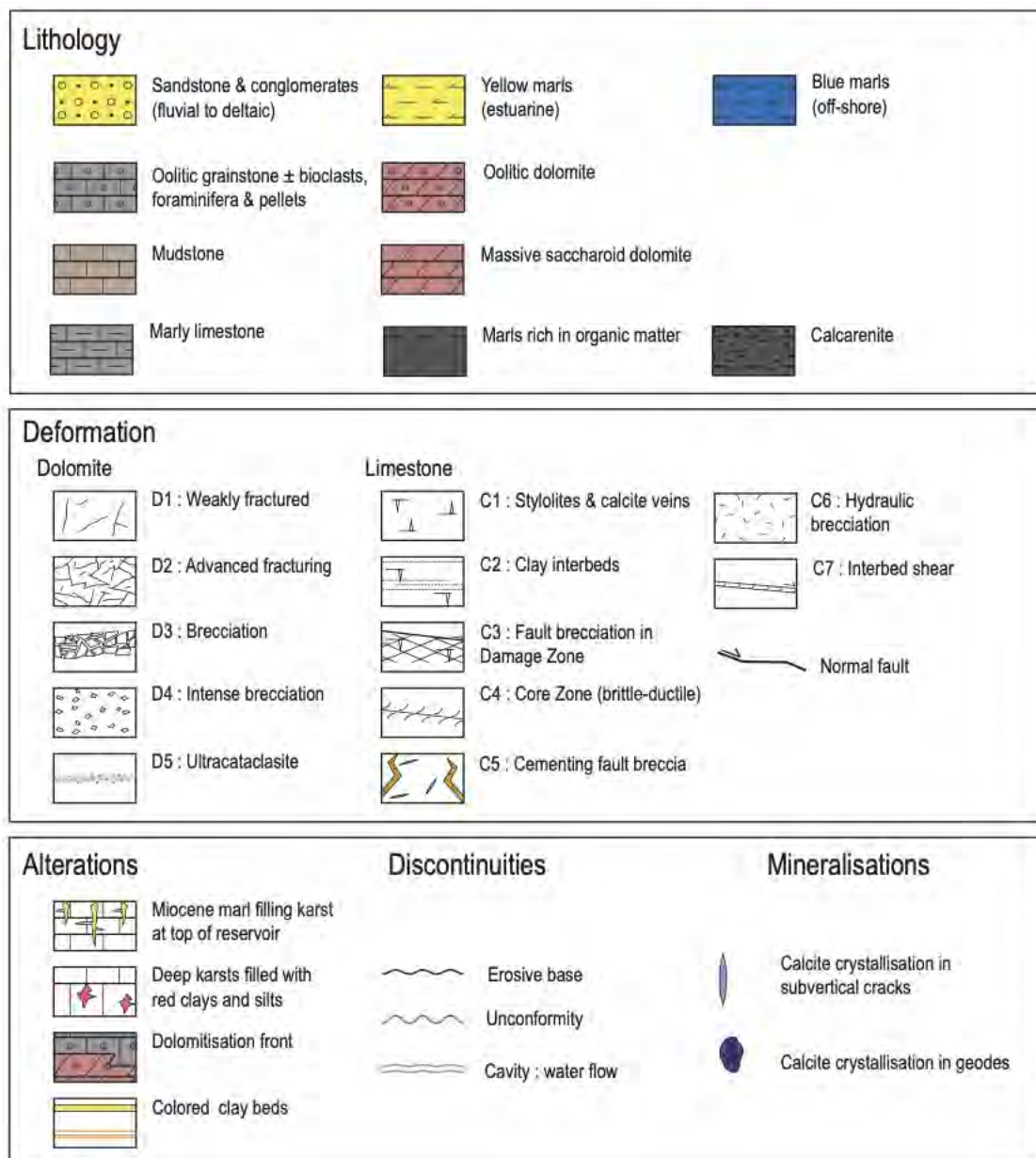
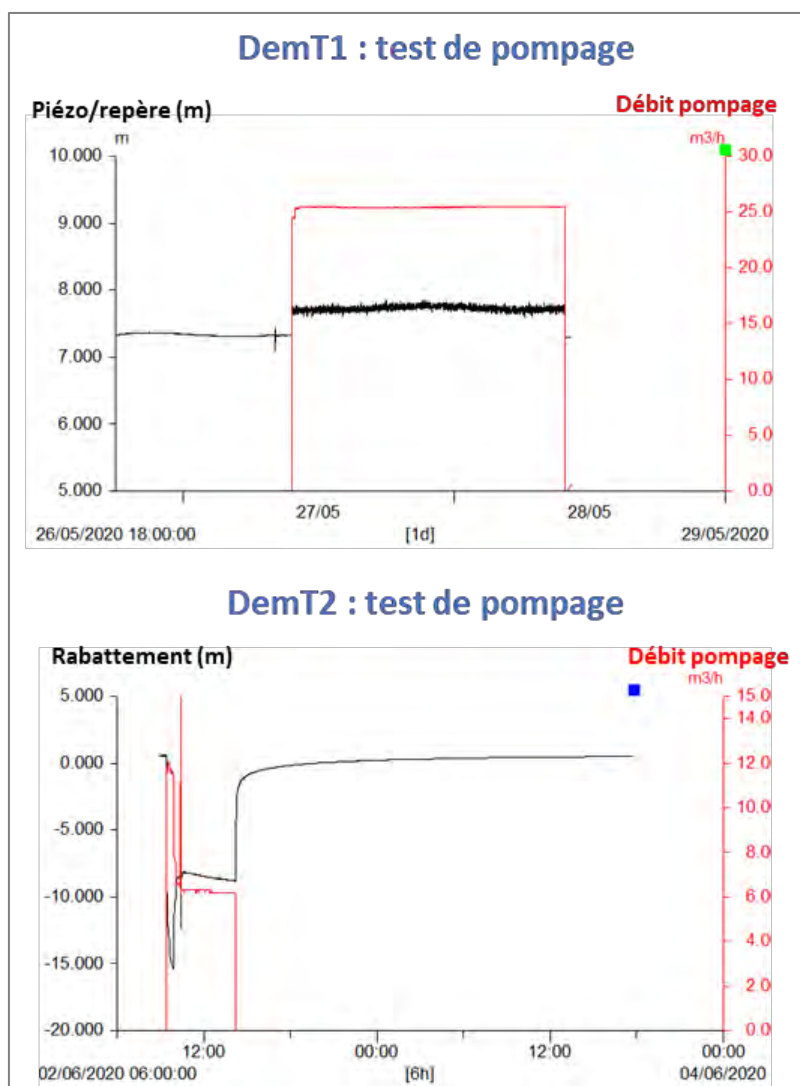


Figure 25 : Légende de la colonne litho-stratigraphique et de déformation du forage carotté DENT3/DEMT4 réalisé dans le projet DEM'EAUX Thau

3.2. ACQUISITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

3.2.1. Essais par pompage sur DEMENT1 et DEMENT2 (avant l'inversac)

Un essai par pompage a été réalisé sur chacun des deux ouvrages, la Figure 26 présente les l'évolution des niveaux et des débits de pompage mesurés lors des tests : du 27 au 28/05/2020 (24h) sur DEMENT1 à un débit de 25 m³/h et le 06/06/2020 durant moins de 5h (290 minutes) à un débit variant de 6 à 16 m³/h (7 m³/h en moyenne). Les niveaux statiques avant essai étaient de 7,40 m /repère sur DEMENT1 et 7,74 m /repère sur DEMENT2.



Durant ces essais, les forages F3 et F6 ont fait l'objet d'un suivi en niveau, et en conductivité et température pour F3 (cond. : 14,5 mS/cm et T : 23 °C). Ces ouvrages complètent le réseau d'observation de la presqu'île de Balaruc (Figure 11), aucune réaction n'a été constatée durant ces essais.

Le débit de la source de la Vise n'a lui aussi montré aucune variation, en particulier lors de l'essai sur DEMENT1, probablement à cause des trop faibles capacités de pompage de l'ouvrage, limitées par son diamètre (112 mm). Par contre, lors du développement de l'ouvrage, au soufflage et à un débit de l'ordre de 200 m³/h environ, le débit de la source de la Vise, située à environ 310 m de DEMENT1, a diminué de façon notable de plusieurs centaines de m³/h (200 m³/h en moyenne), montrant ainsi que le drain karstique situé à 131 m de profondeur est en forte connexion hydraulique avec la source de la Vise (Figure 27).

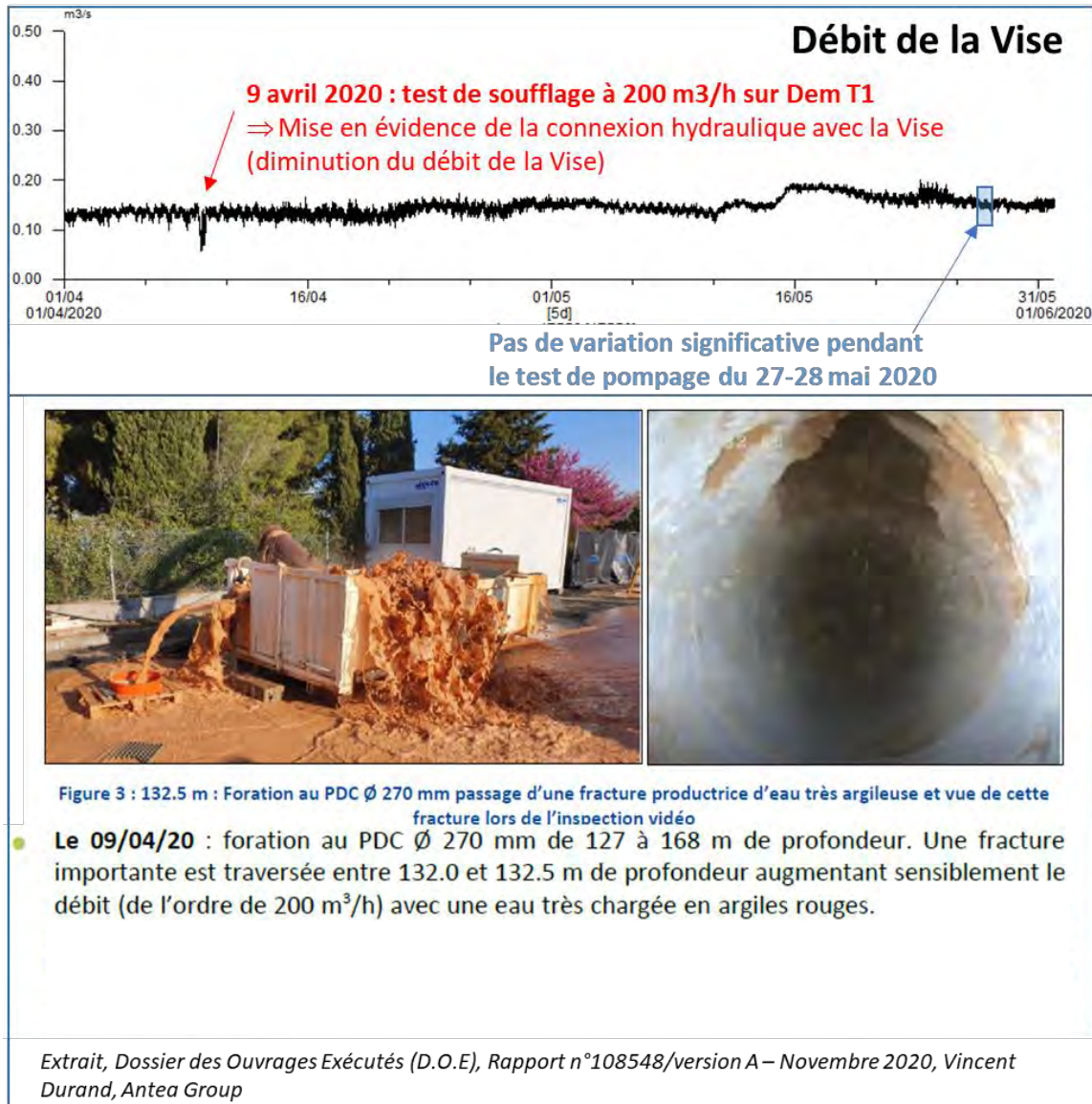


Figure 27 : Suivi du débit de la source de la Vise (Avril – Mai 2020) et informations liées à la foration du Dement1

De plus, aucune variation de niveau, de conductivité ou de température n'a été observée sur DEMENT1 ou DEMENT2, lorsque le pompage était réalisé dans l'autre ouvrage. Durant l'essai sur DEMENT1 la conductivité était de 28 mS/cm et la température de 19,5 °C, et durant l'essai sur DEMENT2 de 3,3 mS/cm et 23,3 °C. Durant les essais le débit de la source de la Vise était de l'ordre de 0,15 m³/s.

Les données de niveaux des essais, ou plutôt du rabattement, ont été diagnostiquées suivant la méthode des dérivées (Bourdet *et al.*, 1983 ; Renard *et al.*, 2009) comme présentée dans le rapport [BRGM/RP-68483-FR](#). Cette méthode a permis d'identifier les principaux régimes d'écoulement durant les essais, d'en déduire le modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère pompé et donc le modèle mathématique le plus approprié pour interpréter les rabattements mesurés. Néanmoins, le pompage sur DEMENT1 n'a pas permis d'utiliser cette technique à cause des trop faibles variations de niveau. En effet, au bout de quelques minutes de pompage, le rabattement s'est stabilisé à 0,43 m (profondeur de 7,83 m /repère). De plus, les valeurs de niveaux ont dû être débruitées d'un signal sinusoïdal, lié *a priori* aux fluctuations de niveaux de l'étang, et moyennées (sur un pas de temps de 10 min puis de 50 min au bout de 300 min de pompage) afin d'améliorer le rapport signal/bruit. Dans ce cas et en raison du drain karstique intercepté par l'ouvrage mais aussi à cause de la réaction de la source de la Vise lors du développement de l'ouvrage, un modèle à fracture avec impact sur une source a été choisi pour interpréter l'essai.

a) Essai par pompage sur DEMENT1

La figure suivante (Figure 28) présente de manière schématique le modèle qui a été utilisé pour interpréter l'essai sur DEMENT1. Ce modèle suppose un puits interceptant et pompant une fracture verticale recoupant complètement un aquifère, lui-même surmonté d'un aquitard traversé dans lequel sourd une source. Cette solution est une extension de la solution proposée pour un puits de pompage proposée par Hunt et M. Smith (2008) par de la solution générique de Dewandel *et al.* (2018) pour résoudre le problème de forage interceptant une ou plusieurs fractures. La fracture est définie par sa demi-longueur (x_f , en m) et son angle par rapport à l'axe puits-source (α), l'aquifère pompé par sa transmissivité et son emmagasinement (T en m^2/s et S respectivement) et l'aquitard de surface par son épaisseur B' (en m), sa perméabilité K' (en m/s) et son emmagasinement σ . La source est supposée circulaire, de rayon x_0 , et est en communication avec l'aquitard (ou l'aquifère pompé) via un facteur d'échange source/aquifère α_0 dépendant du rayon de la source, de la perméabilité et de l'épaisseur du lit de la source (k'' et b'' ; Hunt et M. Smith, 2008). Le modèle prend aussi en compte les effets liés au puits, voire à la fracture (effet de capacité et de pertes de charge quadratiques). Ce modèle permet aussi de calculer quel impact à le pompage dans la fracture sur le débit de la source.

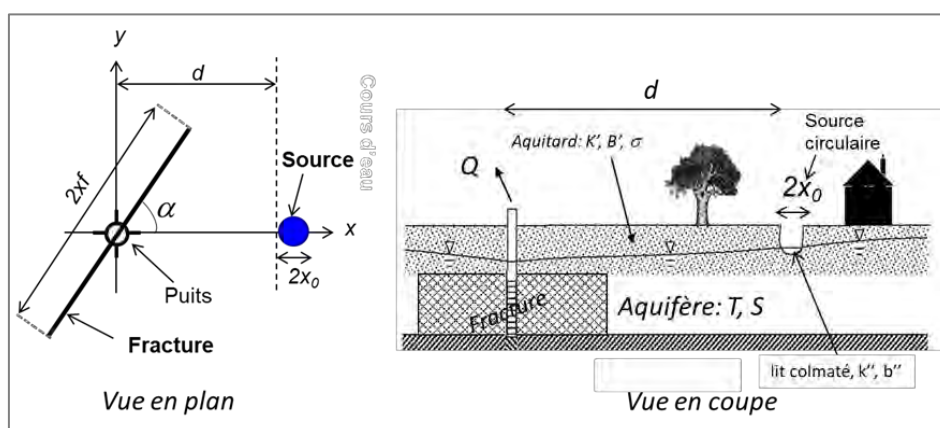


Figure 28 : Pompage d'une fracture dans un aquifère multicouche, avec impact sur une source.

Les figures suivantes présentent la modélisation de l'essai (Figure 29, Figure 30) et le Tableau 2 les paramètres déduits. La fracture est supposée de 200 m ($x_f=100$ m) et est orientée dans la direction de la source ($\alpha=0^\circ$). La transmissivité et l'emmagasinement de l'aquifère, $8,0 \times 10^{-2} m^2/s$ et 10^{-3} , sont élevées et caractéristiques d'un milieu très fracturé/karstifié. Néanmoins, comme la modélisation est réalisée au puits de pompage, la valeur de l'emmagasinement n'est qu'approximative.

La perméabilité de l'aquitard (défini pour une épaisseur unitaire) est de 2×10^{-6} m/s, pour un emmagasinement de 5×10^{-3} . Le coefficient d'échange source/aquifère est très élevé ($\alpha > 5 \times 10^4$), typique d'émergence par une zone de fractures très ouvertes (Hunt et M. Smith, 2008). Les pertes de charge quadratiques sont estimées à $7,8 \times 10^3$ m⁻⁵s², et l'effet de capacité à 0,5 m, largement plus élevé que le rayon du puits (0,14 m) est expliqué par la présence du conduit karstique.

Le modèle a permis d'estimer l'impact en terme de débit sur la source de la Vise (Figure 31). Il est évalué à 8 m³/h en fin d'essai, soit 32% du débit pompé. Ce calcul est comparé à la variation du débit de la Vise durant l'essai (débit moyen environ 0,15 m³/s [env. 500 m³/h]). Les résultats de la modélisation sont cohérents dans le sens où ils sont compris dans la gamme de la fluctuation du débit. On rappelle que la donnée de mesure du débit à la source ne permet pas de voir l'impact du pompage réalisé sur DEMENT1, les fluctuations des variations étant décorréliées de ce dernier (débit de pompage trop faible au regard des fluctuations naturelles du débit de la source).

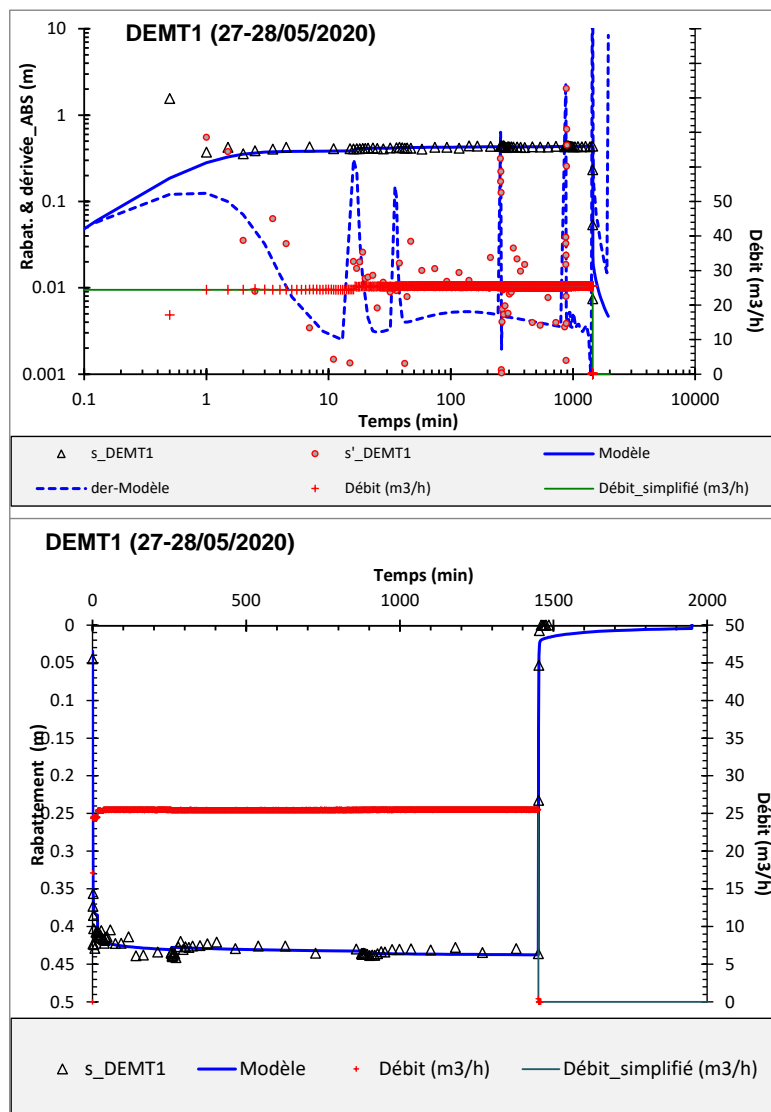


Figure 29 : Pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Modèle : fracture dans un aquifère multicouche avec impact sur une source. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique.

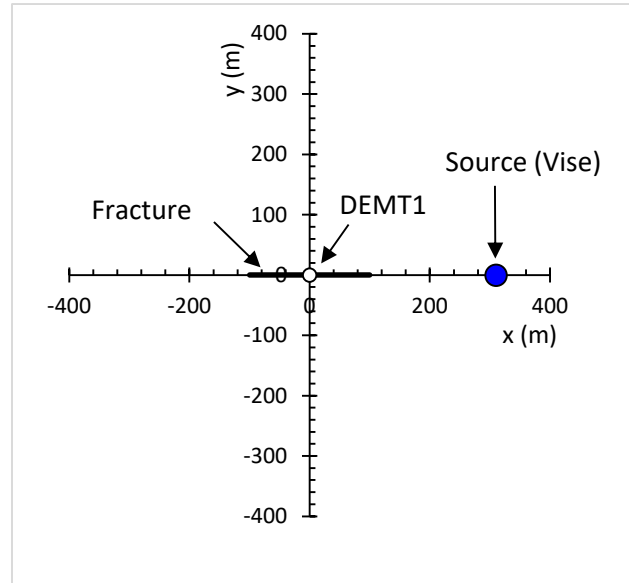


Figure 30 : Pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Schéma de calcul.

Modèle_fracture et source	DEMT1
r (m)	0.135
T; transmissivité (m ² /s)	8.0E-02
S; emmagasinement (-)	1.0E-03
xf; demi-longueur fracture (m)	100
α_{fract} (°); angle fracture (/axe puits-source)	0
K'; perméabilité aquitard (m/s)	2.0E-06
B'; épaisseur aquitard (m)	1
σ ; emmagasinement aquitard (-)	5.0E-03
d; dist. puits-source (m)	310.0
α_0 ; coef. d'échange source/aquifère (-)	56549
Pertes de charge quadratiques (m-5s ²)	7800
Effet capacité (m)	0.5

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMENT1 (27-28/05/2020). Modèle : fracture dans un aquifère multicouche avec impact sur une source.

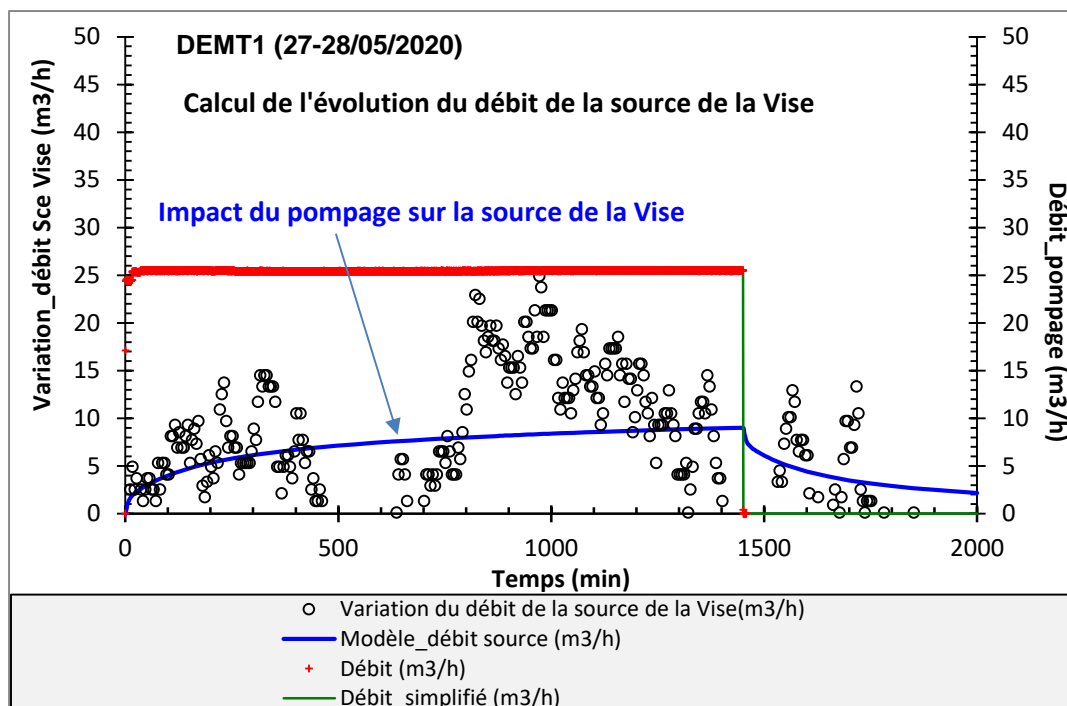


Figure 31 : Évaluation de l'impact sur le débit de la source de la Vise lors du pompage sur DMT1 (27-28/05/2020).

b) Essai par pompage sur DMT2

La Figure 32 présente le diagnostic de l'essai réalisé sur DMT2 (02/06/2020). Il montre du début de l'essai à environ 10-20 minutes l'effet de capacité du puits, puis de 20 à 50 min un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère est estimée à environ $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, puis de 50 min à la fin de l'essai une augmentation de la pente de la dérivée traduisant l'atteinte de compartiments moins transmissifs que celui où le puits est implanté. Le modèle choisi pour modéliser cet essai est un modèle d'aquifères compartimentés verticalement (Dewandel *et al.*, 2014). Il considère un puits implanté dans un compartiment central de largeur $2L$, de transmissivité $T1$ et d'emménagement $S1$, et limité dans l'espace par deux compartiments de transmissivités et emmagasinevements différents ($T2$, $S2$ et $T3$, $S3$) ; Figure 33. L'épaisseur des compartiments peut être identique ou différente, et le compartiment central peut être anisotrope en perméabilité ou pas. Le modèle intègre aussi les effets liés au puits (capacité de puits et pertes de charge quadratiques).

La Figure 34 présente les résultats de la modélisation, la Figure 35 le schéma de calcul et le Tableau 3 les paramètres hydrodynamiques déduits. La transmissivité de l'aquifère capté ($T1$) est de $2,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et son emmagasinement ($S1$) évaluée à 2×10^{-4} . La largeur du compartiment ($2L$) est évaluée à environ 200 m. Néanmoins, comme l'essai n'a été suivi qu'au puits de pompage la valeur de $S1$ n'est qu'approximative tout comme la largeur $2L$. Les propriétés des aquifères de part et d'autre du compartiment pompé ont été considérées identiques ($T2=T3$; $S2=S3$), $T2$ est estimée à $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $S2$ à 6×10^{-5} . Ces différences de propriétés entre les compartiments caractérisent des variations latérales de faciès au sein des dépôts du Mio-Pliocène. L'effet de capacité au puits de pompage a été fixé à 0,1 m, soit le rayon du puits et les pertes de charge ont été évaluées à $2,5 \times 10^5 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$. Ces dernières sont plutôt élevées suggérant que l'ouvrage n'est pas en très bonne connexion hydraulique avec l'aquifère (l'ouvrage est possiblement mal développé ou partiellement colmaté).

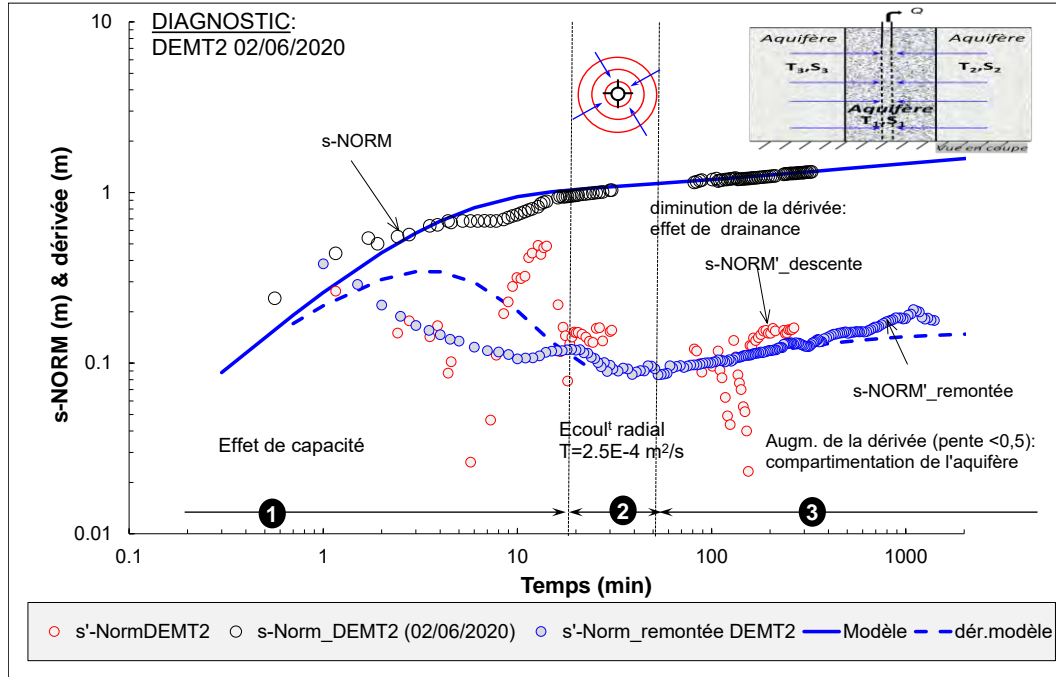
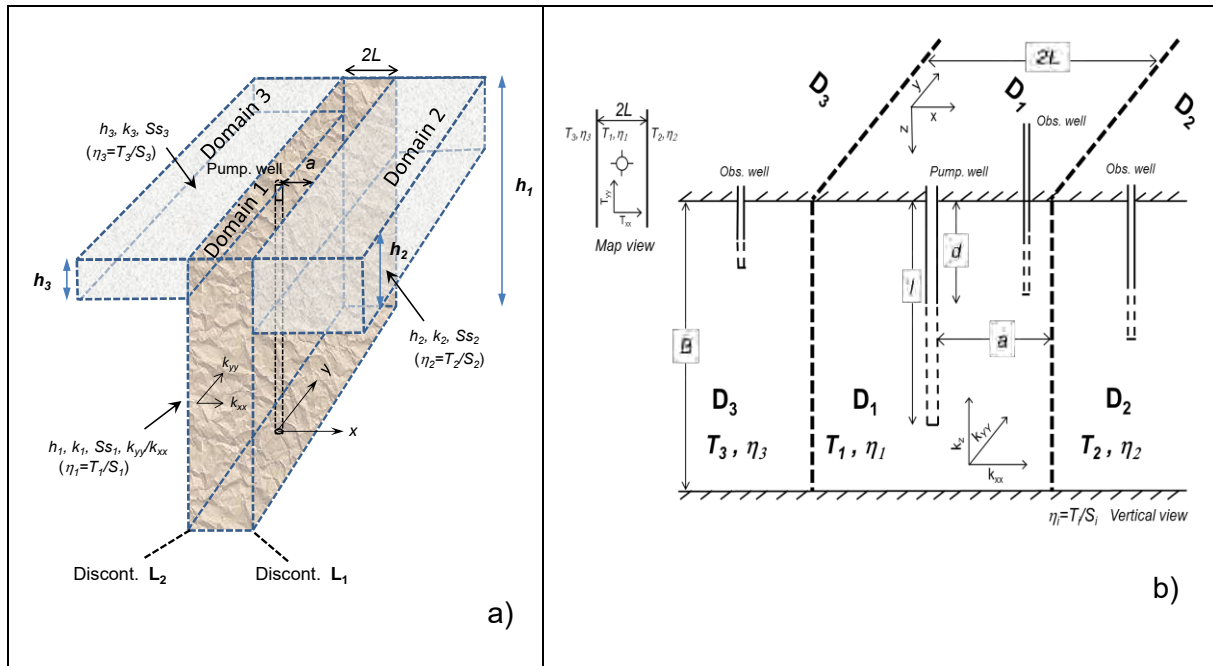


Figure 32 : Diagnostic de l'essai réalisé sur DEMT2 (02/06/2020).


 Figure 33 : Aquifère compartimenté avec anisotropie de perméabilité : a) structure « T »,
b) cas où les compartiments sont d'épaisseur égale.

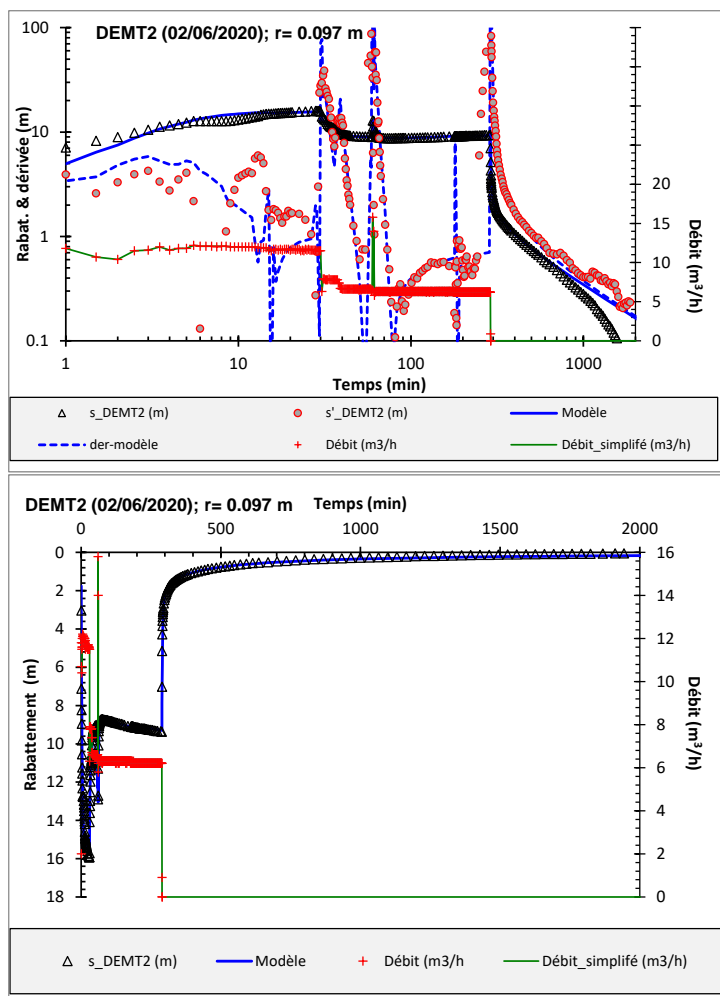


Figure 34 : Pompage sur DEMENT2 (02/06/2020). Modèle : aquifère compartimenté. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique.

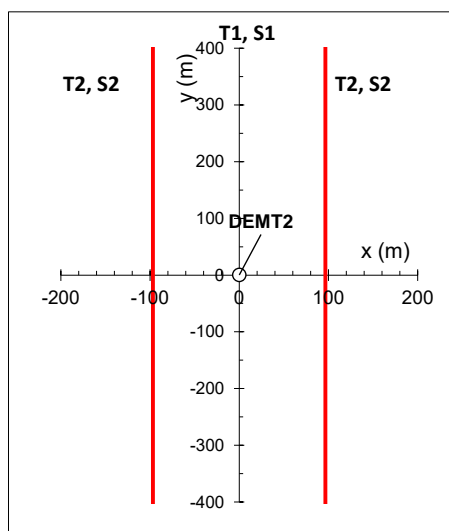


Figure 35 : Pompage sur DEMENT2 (02/06/2020). Schéma de calcul.

	DEMT2 (02/06/2020)
r (m)	0.10
T1 (m ² /s)	2.6E-04
S1 (-)	2.0E-04
T2 (m ² /s)	1.5E-04
S2 (-)	6.0E-05
Dist.lim. 1 (min)	30.00
Dist.lim. 2 (min)	30.00
Dist.lim. 1 (m)	96.75
Dist.lim. 2 (m)	96.75
Pertes de charge quadratiques (m-5s ²)	250000
Effet de capacité (m)	0.10

Tableau 3 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMT2 (02/06/2020). Modèle : aquifère compartimenté. Largeur du compartiment central (2L) : Dist.Lim.1 (m)+Dist.Lim.2 (m) ; soit 193,5 m.

3.2.2. Suivis hydrogéologiques et physico-chimiques sur DEMT1 et DEMT2

Tout comme le forage F6 situé à quelques mètres, les deux piézomètres DEMT1 et DEMT2 ont été équipés d'une sonde de mesure en continu (piézométrie, température, conductivité électrique). Les capteurs sont respectivement situés à 130 et 35 m de profondeur. L'ouvrage DEMT1 a été conçu pour recevoir également des sondes de mesure de la résistivité à différentes profondeurs (installée entre 49 et 94 mètres de profondeur, cf. 3.4 Acquisitions géophysiques).

Les évolutions de la piézométrie, de la conductivité et de la température des eaux des ouvrages sont présentées dans les illustrations suivantes (Figure 36 et Figure 37).

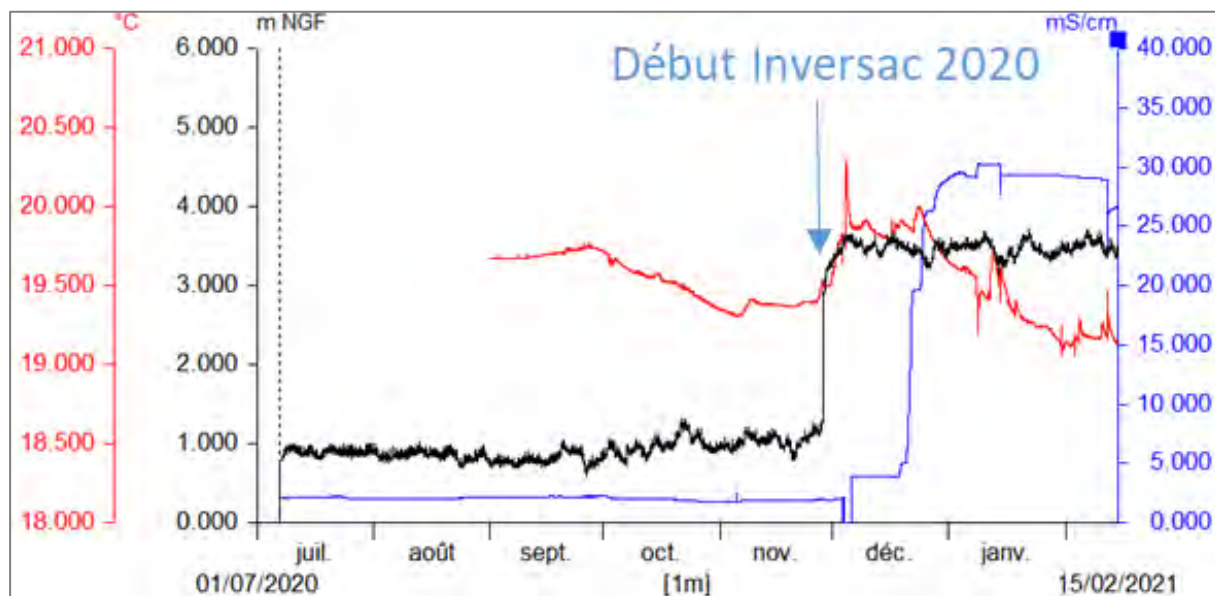


Figure 36 : DemT1 : évolution de la piézométrie et de la conductivité et de la température de l'eau à 130 m de profondeur

Deux périodes sont à distinguer : la période avant inversac et la période de l'inversac (débuté le 27/11/2020, fin le 14/03/2022).

Avant l'inversac, les eaux du DEMENT1 sont peu minéralisées (conductivité de l'ordre de 2.5 mS/cm) et comparables aux valeurs de la Vise non influencée par la lagune. La température de l'eau est variable comprise entre 19 °C et 20 °C, là encore les valeurs sont très comparables aux valeurs de la Vise non influencée par la lagune. La piézométrie fluctue faiblement autour de 0.9 m NGF, les variations sont contrôlées par les variations du niveau de la lagune.

Le phénomène d'inversac a engendré une augmentation brutale du niveau piézométrique (+2.1 m) de l'ouvrage en quelques heures. L'étude détaillée du phénomène est présentée dans le livrable L11b (BRGM/RP-70839-FR). Au cours du phénomène d'inversac, les niveaux piézométriques du DEMENT1 demeurent élevés autour de 3.2 m NGF contre environ 1 m NGF avant le phénomène, les variations sont essentiellement contrôlées par les fluctuations de la cote d'eau de la lagune. Les températures de l'eau du DEMENT1 demeurent globalement très comparables aux valeurs mesurées avant l'inversac (comprises entre 19 °C et 20 °C) contrairement à la conductivité électrique qui a fortement augmenté dans les jours qui suivent le début de l'inversac pour ensuite se stabiliser autour de 30 mS/cm.

Dans le piézomètre DEMENT2 (Figure 37) situé dans le Miocène, l'élévation brutale de la piézométrie lors du déclenchement du phénomène d'inversac est également observée ce qui suggère un transfert de pression de l'aquifère jurassique captif sous-jacent. L'évolution comparée de la piézométrie mesurée dans les 2 réservoirs (Figure 38) montre que l'aquifère jurassique est en charge par rapport à l'aquifère miocène. La conductivité de l'eau apparaît élevée (autour de 13.8 mS/cm) en comparaison de l'eau du réservoir jurassique sous-jacent (autour de 2.5 mS/cm). De même, la température de l'eau (autour de 23 °C) est significativement plus élevée que celles mesurées dans le Jurassique à 130 m de profondeur (19.5° en moyenne). Le phénomène d'inversac ne semble pas modifier de manière significative la température et la minéralisation de l'eau de la formation du Miocène.

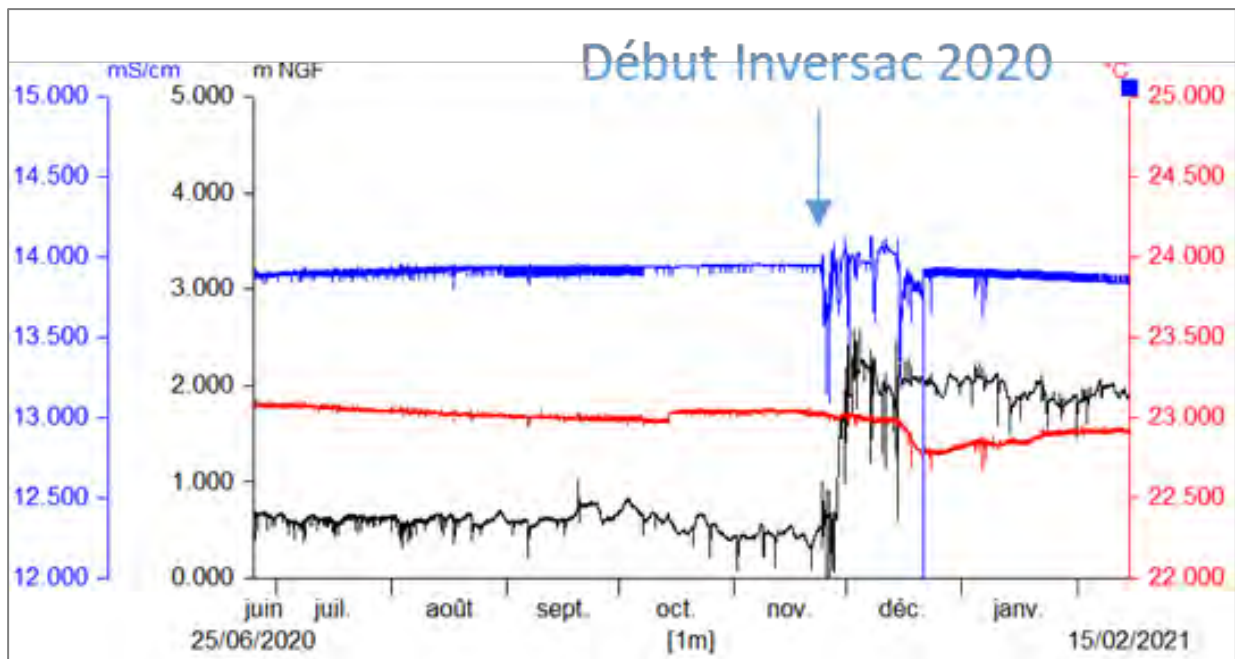


Figure 37 : DemT2 : évolution de la piézométrie et de la conductivité et de la température de l'eau à 35 m de profondeur

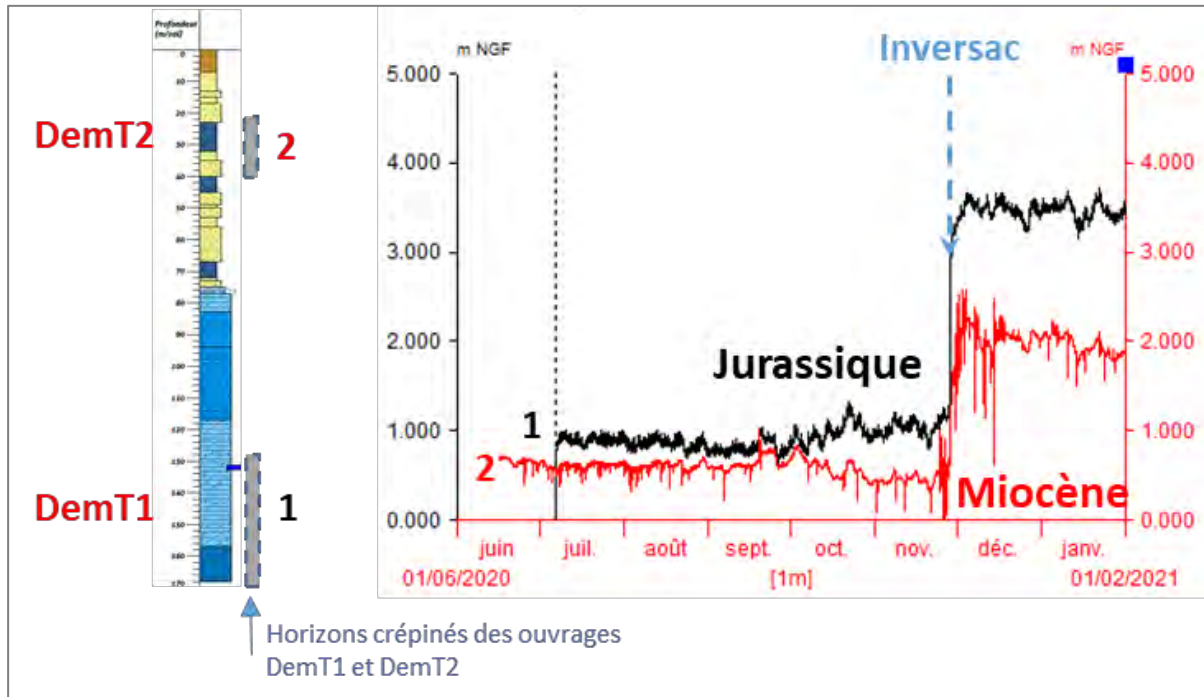


Figure 38 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (demT1) et le Miocène (DemT2)

La comparaison des piézométries des ouvrages DEMT1 et F6 est reportée sur la Figure 39. L'aquifère jurassique (DEMT1) est en charge par rapport au miocène recoupé par le forage F6. Avant le phénomène d'inversac, les évolutions présentent des évolutions comparables, les fluctuations observées sont contrôlées par les variations de la cote du plan d'eau qui constitue un potentiel imposé pour la formation jurassique karstifiée de la zone d'étude (Figure 40). La charge hydraulique dans l'aquifère apparaît supérieure de +0.8 m en moyenne par rapport à la lagune.

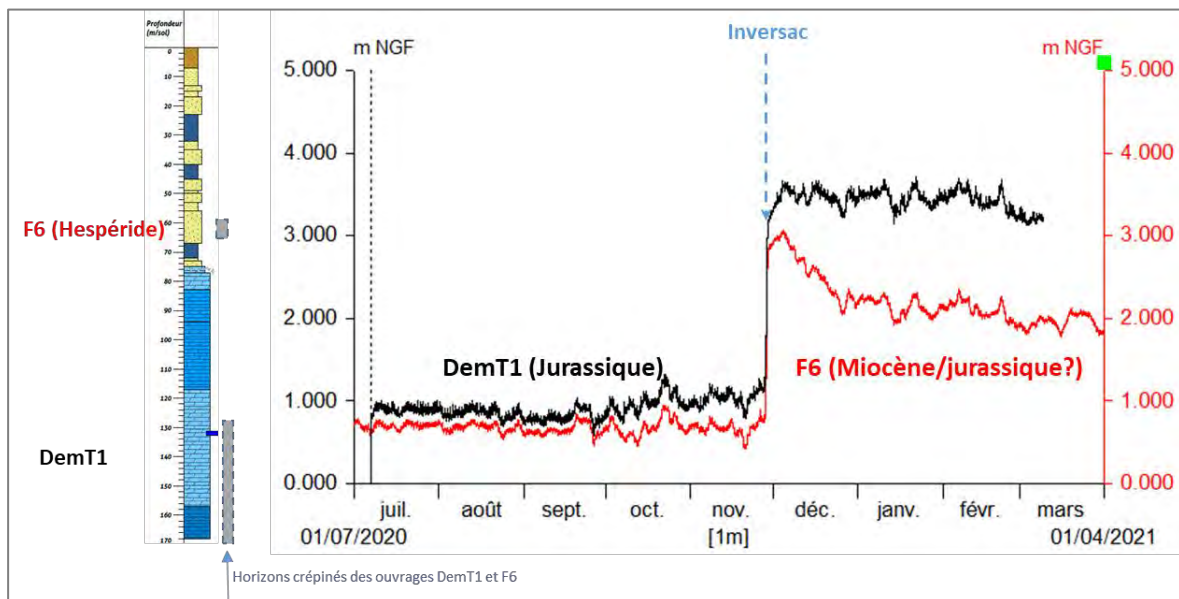


Figure 39 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (demT1) et le forage F6 Hespéride

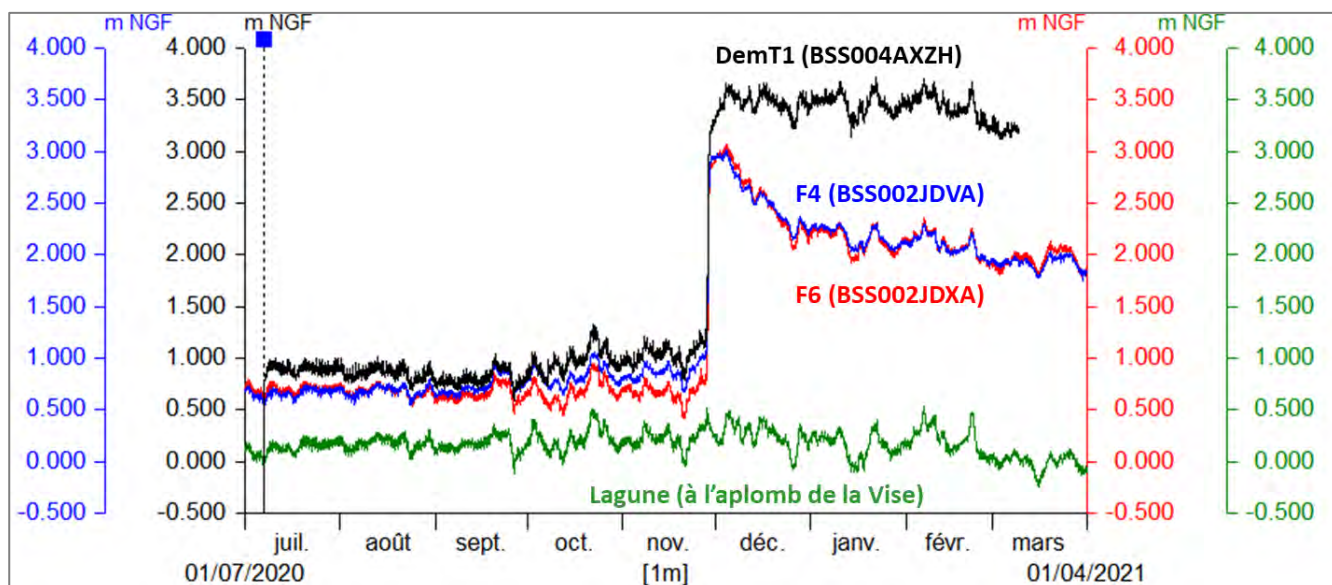


Figure 40 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée dans le Jurassique (DemT1, F4), dans le miocène (forage F6 Hespéride) et niveau d'eau de la lagune (à l'aplomb de la Vise).

L'évolution de la piézométrie mesurée dans le forage F6 apparaît très comparable à celle mesurée dans le forage F4, notamment depuis le déclenchement du phénomène d'inversac (28/11/2020).

3.2.3. Suivi piézométrique : caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère

Les niveaux piézométriques des ouvrages de la presqu'île apparaissent globalement tous influencés par les variations de la cote du plan d'eau de la lagune de Thau. Ce constat a été mis à profit pour estimer la diffusivité hydraulique (T/S) de l'aquifère à partir du suivi des variations temporelles simultanées du niveau piézométrique et du niveau de la lagune (pas de temps de 5 mn à 15 mn).

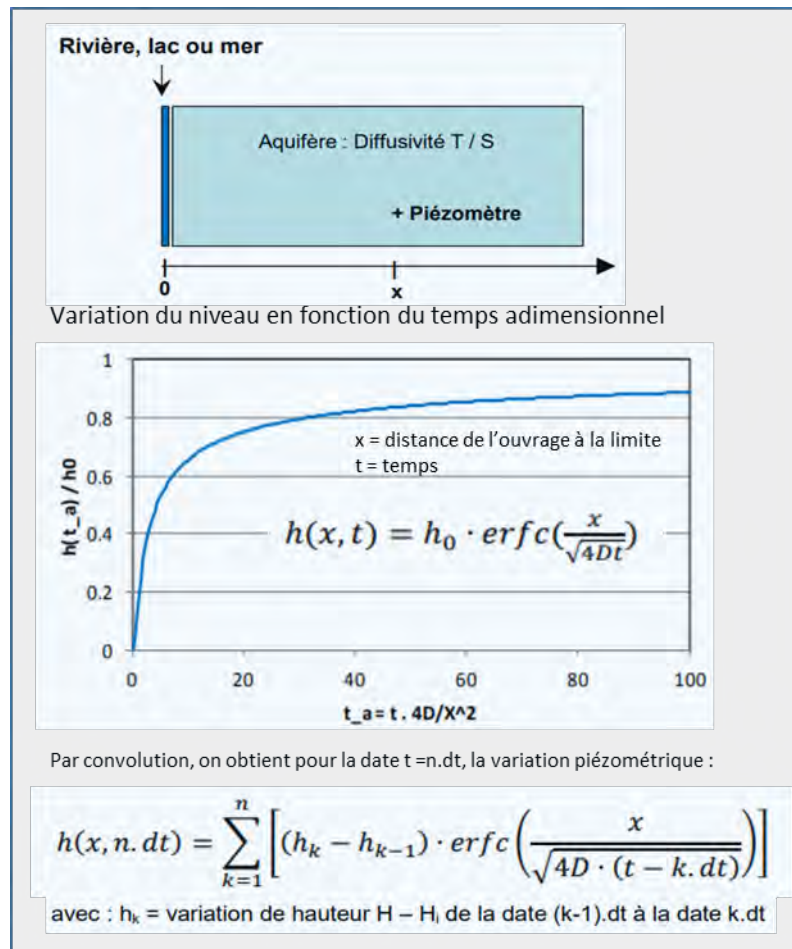


Figure 41 : Schéma de principe de la méthode du code de calcul CATHERINE (Thiéry D., 2012)

Dans l'approche basée sur le code de calcul CATHERINE (Thiéry D., 2012), on considère un aquifère bordé d'un côté par une limite rectiligne qui est constituée par une rivière, un plan d'eau ou la mer. Dans l'autre direction, perpendiculaire à la limite, l'aquifère est d'extension infinie (Figure 41). La variation h de niveau piézométrique au temps t , à la distance x est définie (cf. Figure 41) par $h(x, t)$ ou erfc représente Fonction « erreur complémentaire ». Pour $t \geq dt$, la variation de niveau piézométrique en un point situé à la distance x s'obtient alors par le théorème de superposition :

$$h(x, t) = h_1 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) + (h_2 - h_1) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4D \cdot (t - dt)}}\right)$$

De même, par convolution, on obtient pour la date $t = n \cdot dt$ la variation de niveau piézométrique

$$h(x, n \cdot dt) = \sum_{k=1}^n \left[(h_k - h_{k-1}) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4D \cdot (t - k \cdot dt)}}\right) \right]$$

avec : h_k = variation de hauteur $H - H_i$ de la date $(k-1) \cdot dt$ à la date $k \cdot dt$

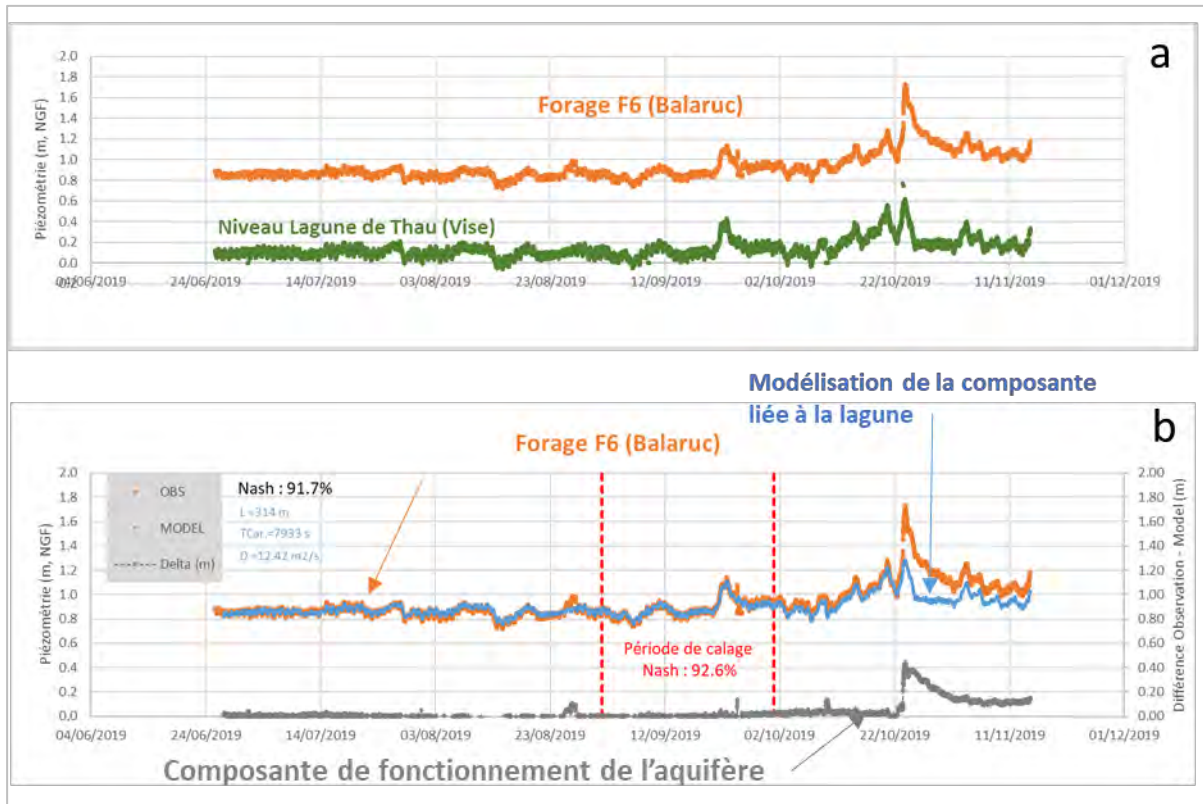


Figure 42 : (a) Comparaison de la piézométrie mesurée au forage F6 et de la cote du plan d'eau de la lagune de Thau. (b) Modélisation de la composante liée aux variations induites par la lagune et calcul de la chronique piézométrique corrigée.

La Figure 42 permet la comparaison de la piézométrie du forage F6 et du niveau du plan d'eau de la lagune de Thau mesuré sur la période juin 2019-novembre 2019 qui permet de caractériser à la fois une période de très basses eaux et une crue de reprise (fin octobre). La période du mois de septembre 2019 permet de caractériser le fonctionnement en période de très basses eaux. **La diffusivité de l'aquifère est estimée à 12.4 m²/s à l'aide de la chronique du forage F6.** Le calage du modèle sur cette période permet la correction du niveau piézométrique des variations de niveau induites par la marée. La chronique résultante (courbe grise sur la Figure 42) permet de qualifier la dynamique de fonctionnement de l'aquifère et notamment en période de crue, ce qui est intéressant dans un objectif de modélisation de la relation pluie-débit.

Les chroniques des ouvrages DEMENT1 et F4 permettent respectivement d'estimer des diffusivités de 11.1 m²/s et 25 m²/s. Pour DEMENT1, la valeur obtenue par cette approche est dans l'ordre de grandeur de celle obtenue par essai de pompage : T/S = 80 m²/s (cf. Tableau 2) .

3.2.4. Essai par pompage sur DEMENT3 (contexte d'inversac)

L'essai par pompage sur DEMENT3 a été réalisé du 11 au 12/01/2021 (24h) au début du phénomène d'inversac (T+44 jours) à un débit variant de 1,9 à 4 m³/h. Le tubage de soutènement de 0 à 200 m a permis d'isoler la section 200-300 m de profondeur durant l'essai par pompage.

Le niveau statique avant essai était de 4 m/repère. Les ouvrages DEMENT1, DEMENT2, F3, F4, F5, F6 et F10 ont été suivis en niveau durant l'essai et n'ont pas réagi à l'essai. La conductivité et la température de F3 sont restées stables à 14,3 mS/cm et 23 °C, comme la température sur F10 (19,1 °C). La température et la conductivité des eaux d'exhaure du pompage ont été suivies durant l'essai : la conductivité a augmenté rapidement durant les premières minutes de pompage tout comme la température (Figure 43). Cependant, ces augmentations rapides sont une perturbation expérimentale liée au nettoyage de l'ouvrage, avant l'essai, par des eaux peu minéralisées (de l'eau du réseau d'alimentation en eau potable a été utilisée dans le cadre des travaux du forage) qui a fortement diminué la minéralisation et la température dans l'aquifère à proximité de l'ouvrage. La température de l'eau s'est rapidement stabilisée au bout de quelques heures de pompage à 22,3 °C. La conductivité a augmenté progressivement durant la première dizaine d'heures de l'essai passant de 17,3 à 24,4 mS/cm, puis s'est stabilisée aux environs de 24,4 mS/cm.

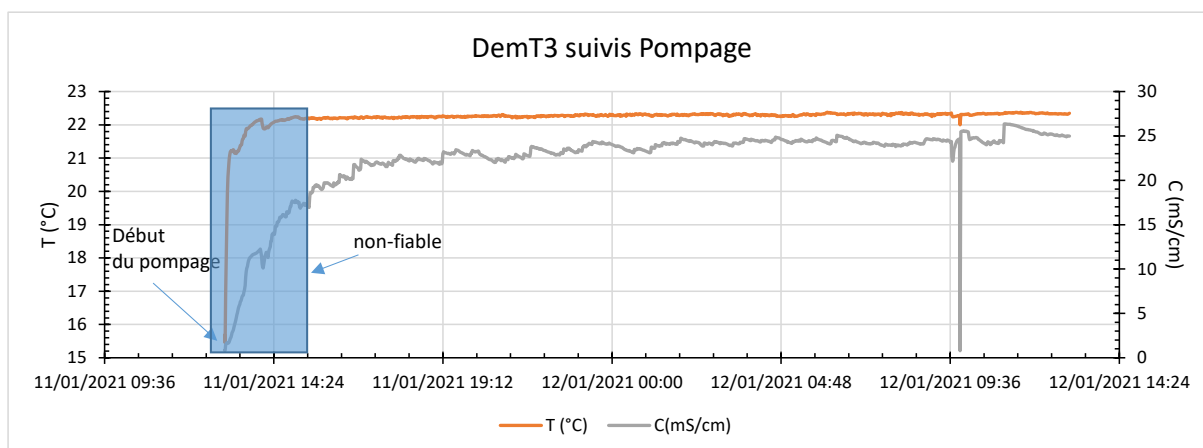


Figure 43 : Suivis de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du pompage sur DEMENT3 (11-12/01/2021). La partie en bleutée est liée à la perturbation occasionnée par le nettoyage de l'ouvrage avant l'essai.

La Figure 44 présente le diagnostic de l'essai réalisé sur DEMENT3. Il montre durant les premiers temps du pompage, jusqu'à 10 min environ, un effet de puits possiblement combiné à l'effet de fractures interceptées par le puits, et de 10 min à la fin de l'essai, la dérivée décrit une pente de -1 caractéristique d'une limite à potentiel imposé (limite d'alimentation). Ce dernier comportement est typique d'une zone très perméable située à proximité du puits de pompage (Abbaszadeh et Cinco-Ley, 1995). Il peut s'agir d'une zone de faille, d'un conduit karstique, etc. Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, une nouvelle solution mathématique, résolvant le cas d'un puits interceptant et pompant une fracture située à proximité d'une zone perméable -ou non, verticale, a été développée (Figure 45 ; Dewandel *et al.*, 2022). La fracture interceptée et pompée par le puits est caractérisée par sa demi-longueur et son angle par rapport à l'axe des x. L'aquifère pompé a une transmissivité T_1 et un emmagasinement S_1 , le compartiment central est caractérisé par sa transmissivité (T^*), son emmagasinement (S^*) et son anisotropie de transmissivité (T^*_y/T^*_x). Le compartiment de droite est caractérisé par ces propres propriétés, T_2 et S_2 . Les propriétés des aquifères peuvent prendre n'importe quelles valeurs, le compartiment central peut donc être soit le plus transmissif, soit le moins.

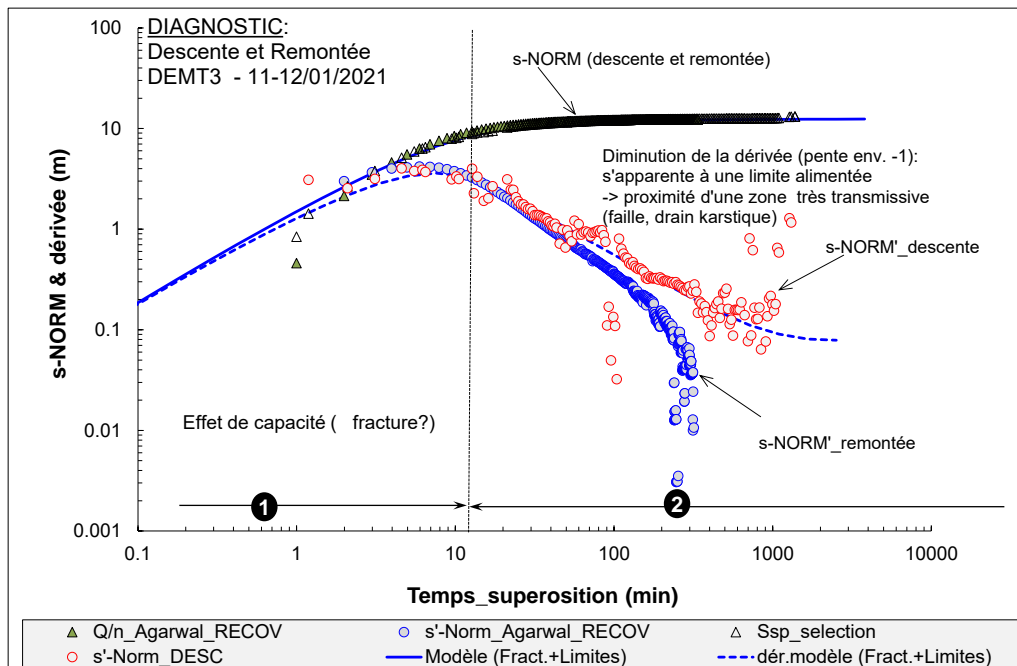


Figure 44 : Diagnostic de l'essai réalisé sur DENT3 (11-12/01/2021).

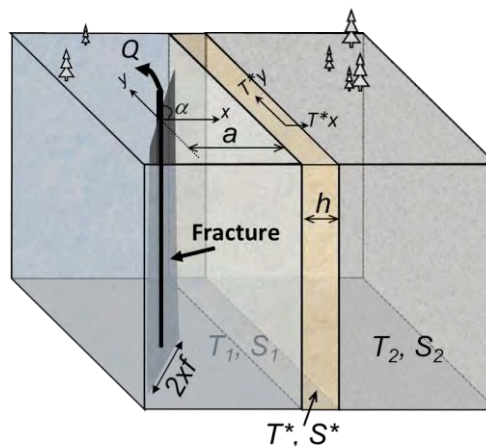


Figure 45 : Puits interceptant et pompant une fracture verticale située à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale (Dewandel et al., 2022).

La Figure 46 présente les résultats de la modélisation, la Figure 47 le schéma de calcul et le Tableau 4 les paramètres hydrodynamiques déduits. Dans ce modèle la fracture pompée a une demi-longueur de 6,3 m, est parallèle à la discontinuité perméable ($\alpha=90^\circ$), et est très proche de la zone perméable aux environs de 4 m d'après ce modèle. La transmissivité de l'aquifère capté (T1) est de $4,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et son emmagasinement (S1) évaluée à 2×10^{-4} . S1 est approximatif, pour les mêmes raisons évoquées que pour les essais précédents. La largeur de la zone perméable est estimée, approximativement à 1 m, sa transmissivité T^* à $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, son emmagasinement S^* à 10^{-1} et son anisotropie de transmissivité T^*/T^*_x à 10,0. Les propriétés du compartiment à l'opposé de la zone perméable ont été fixées identiques à celles du compartiment pompé ($T2=T1$, $S2=S1$). Les pertes de charge quadratiques sont estimées à $3,8 \times 10^6 \text{ m}^{-5} \text{ s}^2$ et l'effet de capacité à 0,1 m.

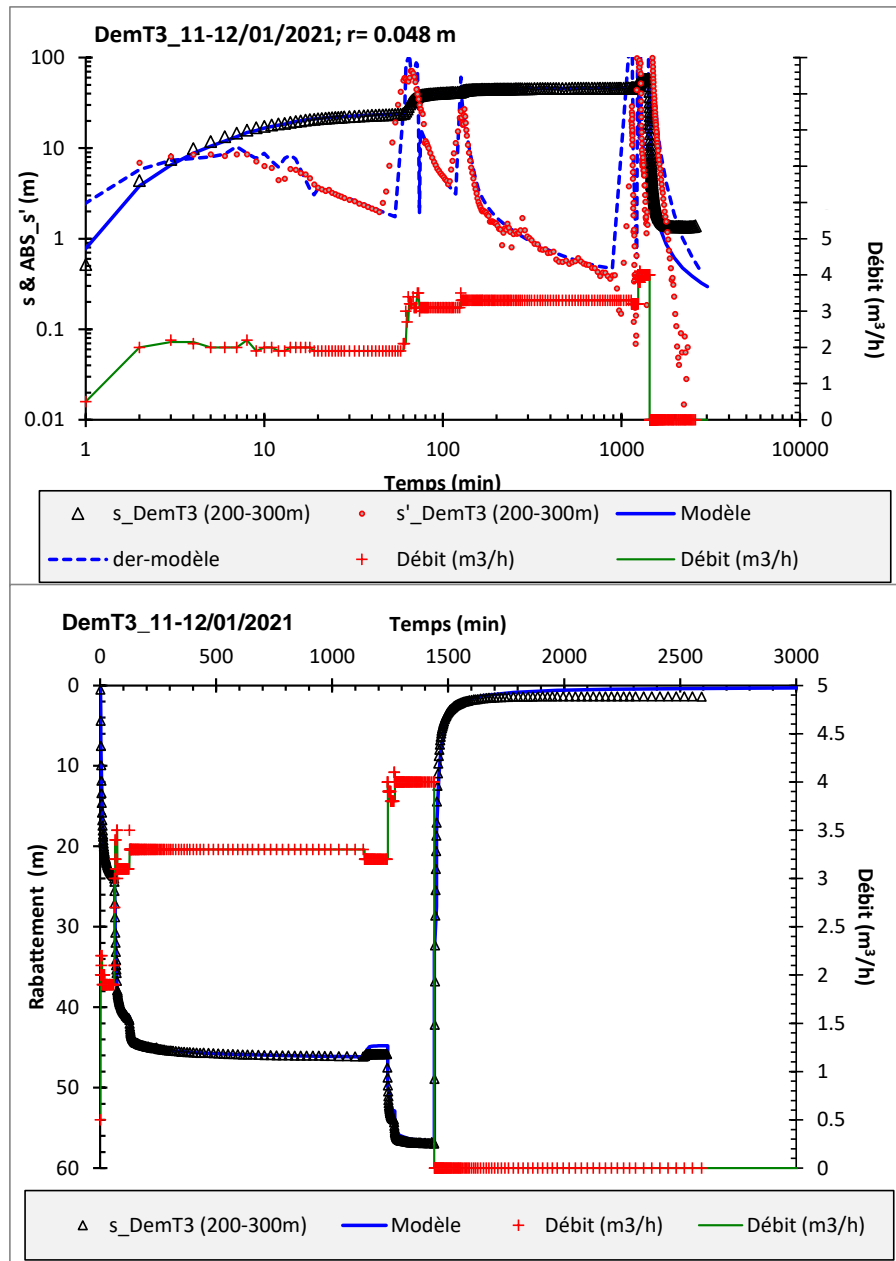


Figure 46 : Pompage sur DEMT3 (11-12/01/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.

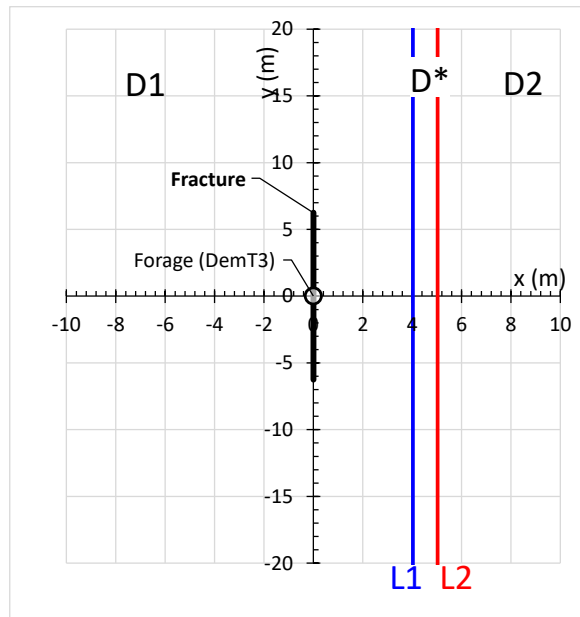


Figure 47 : Pompage sur DEMT3 (11-12/01/2021). Schéma de calcul.

La Figure 48 présente le calcul des flux venant de la limite zone perméable (D^*) / compartiment pompé (D1), Flux_L1 , ceux en provenance de la limite entre le compartiment situé à l'opposé (D2) et entrant dans la zone perméable, Flux_L2 , et le flux net correspondant au flux provenant de la zone perméable (D^*), $\text{Flux_net } D^*$ ($\text{Flux_net } D^* = \text{Flux_L1} - \text{Flux_L2}$). D'après ces calculs, en fin de pompage, environ 70% du flux pompé proviendrait de la zone perméable. Comparée à la salinité de l'eau pompée, calculée à partir des données de suivi de la conductivité (Figure 43) et normalisée par rapport à la conductivité de l'eau contenue dans la zone perméable, l'eau contenue au sein de la zone perméable aurait une salinité voisine de 20 g/l (21,2 g/l selon les calculs) et celle de l'aquifère où est implanté l'ouvrage aux environs de 10 g/l. Les premières 200-300 minutes de pompage environ sont mal calées ; ceci peut s'expliquer par la perturbation expérimentale liée au nettoyage de l'ouvrage avant l'essai (injection d'eau moins minéralisée que celle de l'aquifère), mais aussi à l'approximation liée au modalité de calcul où l'on suppose que l'eau transitant par l'interface entre l'aquifère où est implanté le forage et la discontinuité perméable (limite L1 sur les figures) transite instantanément vers le puits. Cette modélisation ne tient donc pas compte du temps nécessaire pour que l'eau passe de la discontinuité au puits de pompage.

	DemT3_11-12/01/2021
Rayon de l'ouvrage (m)	0.048
T1, transmissivité compartiment pompé D1 (m2/s)	4.50E-06
S1, emmagasinement compartiment pompé D1 (-)	2.00E-04
demi-long. fracture verticale (m)	6.3
α , angle de la fracture / axe des x (°)	90.0
a, distance à D* (min)	3
a, distance à D* (m)	4.0
T*, transmissivité compartiment milieu D* (m2/s)	5.00E-02
S*, emmagasinement compartiment milieu D* (-)	1.00E-01
h, largeur compartiment D* (m)	1.0
T*y/T*x, anisotropie de trans. compartiment D* (-)	10.0
T2, transmissivité compartiment D2 (m2/s)	4.50E-06
S2, emmagasinement compartiment D2 (-)	2.00E-04
Pertes de charge quadratiques (m-5s2)	3.8E+06
Effet capacité (m)	0.1

Tableau 4 : Paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation de l'essai de pompage sur DEMT3 (11-12/01/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale.

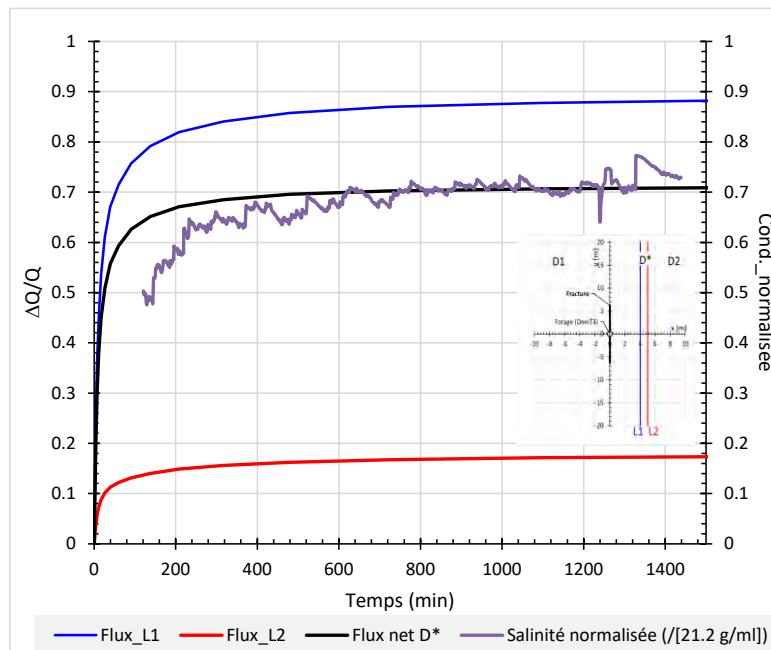


Figure 48 : Calcul des flux le long des deux discontinuités, et comparaison du calcul du flux net de la zone perméable à la salinité de l'eau pompée normalisée (salinité normalisée= salinité mesurée/salinité zone perméable) ; salinité de la zone perméable estimée à 21,2 g/l. Pompage sur DEMT3 (11-12/01/2021).

3.2.5. Essais par pompage sur le forage profond DMT4 dit Claudine IV (contexte d'inversac)

Deux essais par pompage de 24h ont été réalisés sur le forage DMT4/Claudine IV profond de 759 m en contexte d'inversac (T+382 jours). Le premier à 4,6-4,7 m³/h, effectué du 15 au 16/12/2021 a concerné les horizons compris entre 620 m et 759 m de profondeur, et le second, à 4,5 m³/h, du 17 au 18/12/2021, sur les horizons compris entre 390 à 760 m de profondeur. Durant ces essais, le tubage de soutènement du carottier a permis d'assurer l'isolation des niveaux supérieurs. Lors du premier essai (620-759 m ; 15-16/12/2021), le niveau statique n'est pas connu car l'ouvrage était artésien (débit faible de l'ordre de quelques l/min), par contre il était à 2,73 m / repère lors du deuxième essai (390-759 m ; 17-18/12/2021).

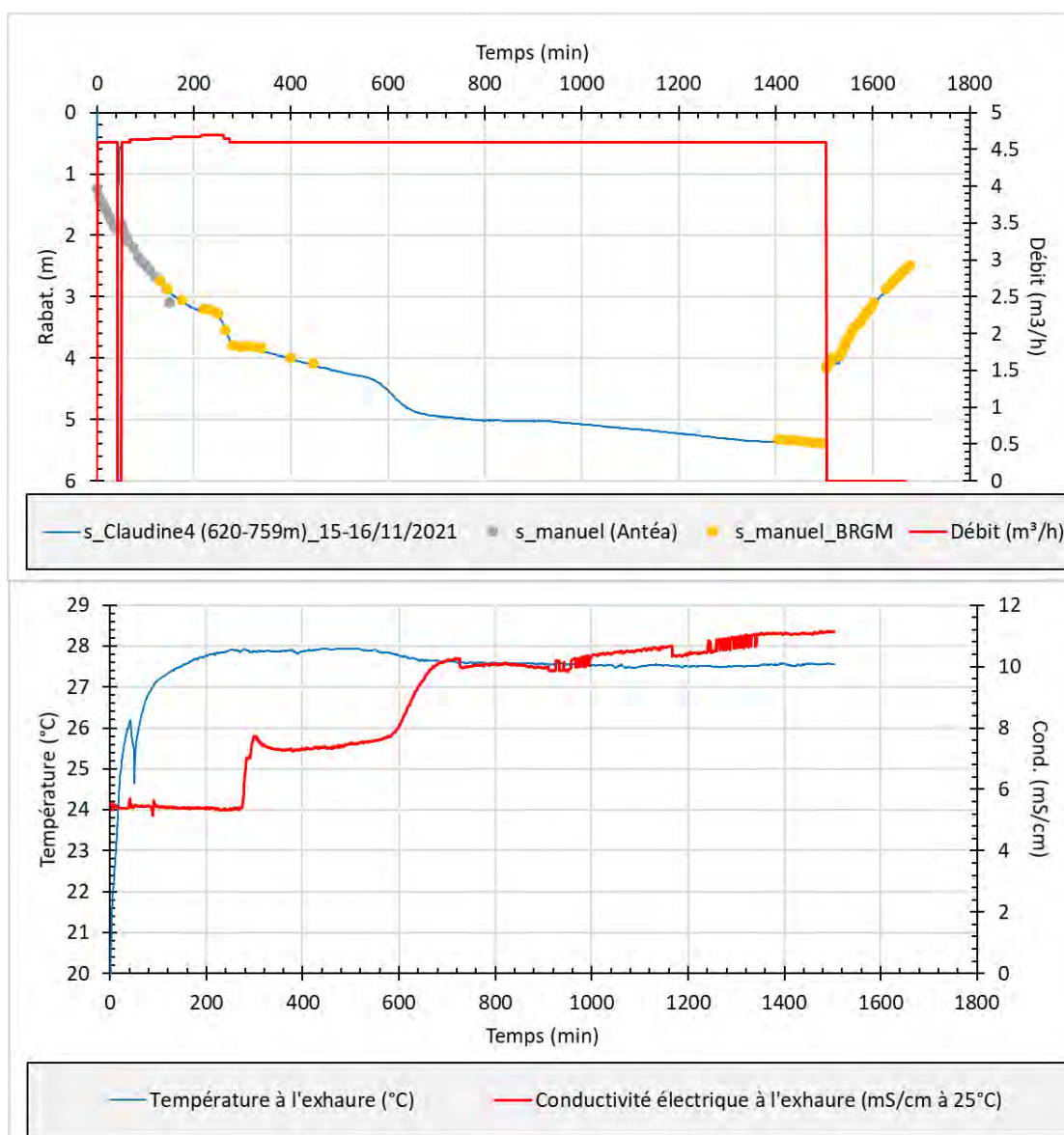


Figure 49 : Suivis du rabattement, du débit, de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du premier pompage sur DMT4 (620-759 m ; 15-16/12/2021).

La température et la conductivité des eaux d'exhaure des pompes ont été suivies durant les deux essais (Figure 49 et Figure 50). La minéralisation (conductivité) a fortement varié par paliers successifs de 2 à 3 mS/cm, pour se stabiliser en fin d'essai aux environs de 11 mS/cm dans les deux cas. En règle générale, la conductivité a augmenté durant les essais sans se stabiliser. La température a augmenté rapidement durant les premières heures de pompage pour se stabiliser aux environs de 27,5 °C dans les deux cas. Ces rapides variations de minéralisation ont entraîné des variations de densité au sein de la colonne d'eau (environ 760 m de hauteur) qui vraisemblablement expliquent les fluctuations du rabattement, de 20 à 30 cm, durant les essais sans qu'elles puissent être corrélées à des variations du débit de pompage : vers 300 et 600 min de pompage pour l'essai entre 620 et 759 m de profondeur, et vers 20 et 600 min pour l'essai entre 390 et 759 m de profondeur.

Les ouvrages DEMENT1, DEMENT2, F3, F4, F5, F6 et F10 ont été suivis en niveau durant les essais et n'ont pas réagi. La conductivité et la température de F3 sont restées stables à 13,02 mS/cm et 23 °C, comme la température sur F10 (19,1 °C).

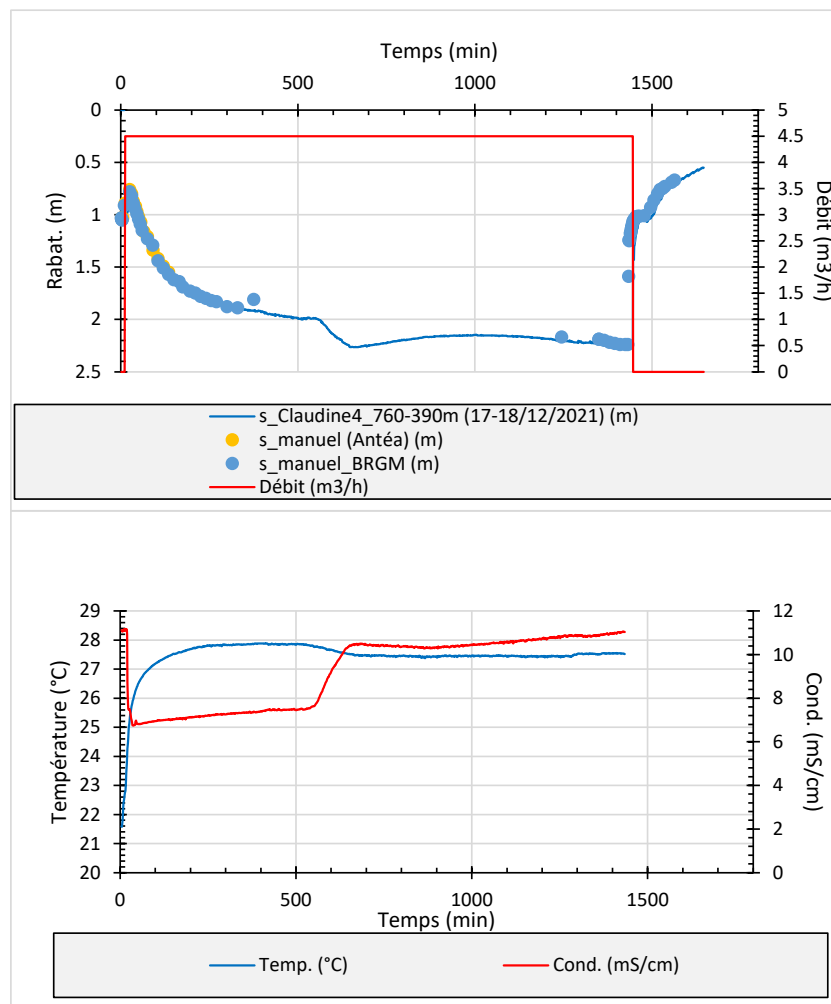


Figure 50 : Suivis du rabattement, du débit, de la conductivité et de la température des eaux d'exhaure lors du second pompage sur Claudine IV (390-759 m ; 17-18/12/2021).

La Figure 51 et la Figure 52 présentent les diagnostics des deux essais. Ils sont semblables, et dans une certaine mesure semblables à celui réalisé sur le forage DEMENT3 (Figure 44). Il montre durant les premiers temps du pompage, entre 1 et 2 h environ, l'effet de fractures interceptées par le puits possiblement combiné à un effet de puits, puis un écoulement pseudo-radial à radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère est estimée à $6-7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ sur les horizons entre 760 et 620 m de profondeur, et à $8-9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour ceux entre 760 et 390 m.

Enfin, la dérivée diminue, à partir de 500 min (essai entre 760 et 620 m) ou environ 100 min (essai entre 760 et 390 m), traduisant une alimentation par une ou des zones plus perméables (zones de failles perméables, conduits karstiques, etc.) situées à proximité du forage.

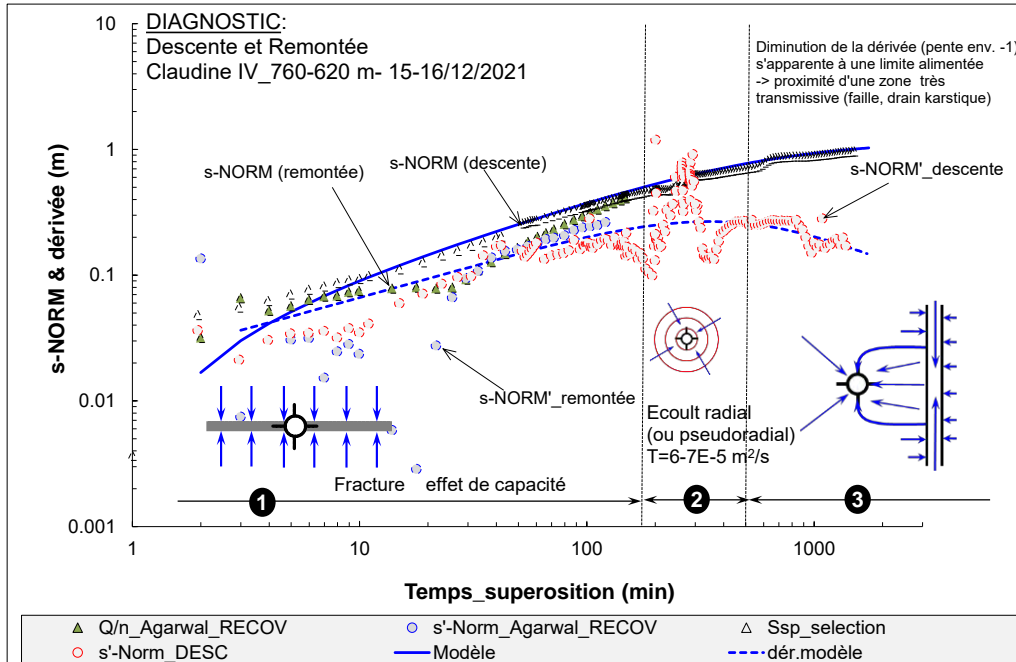


Figure 51 : Diagnostic du premier essai réalisé sur DEMT4 (620-759 m ; 15-16/12/2021).

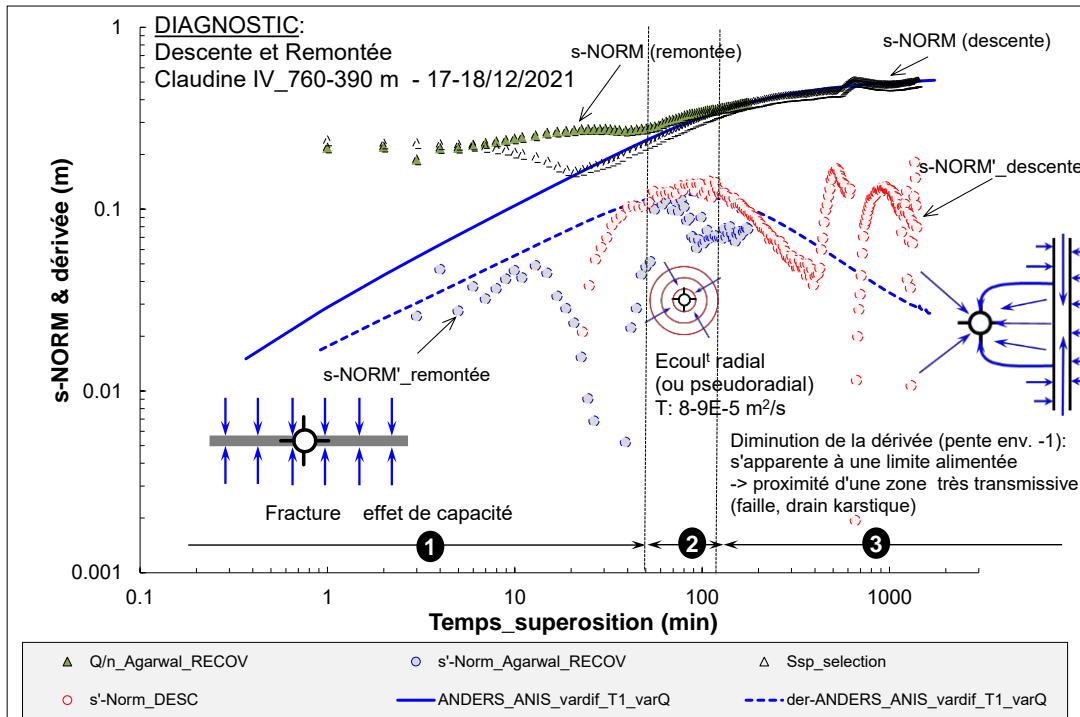


Figure 52 : Diagnostic du second essai réalisé sur DEMT4 (390-759 m ; 17-18/12/2021).

Le modèle, prenant en compte le cas d'un puits interceptant et pompant une fracture située à proximité d'une zone perméable verticale présentée précédemment pour l'interprétation des résultats de DMT3, a donc été utilisé (Figure 45 ; Dewandel *et al.*, 2022). La Figure 53 et la Figure 54 présentent les résultats de la modélisation, et le Tableau 5 les paramètres hydrodynamiques déduits. Par contre, il n'a pas été tenu compte des variations du rabattement liées aux phénomènes densitaires.

Dans ces modèles la fracture pompée a une demi-longueur de 140 à 180 m suivant les modèles, est parallèle à la discontinuité perméable ($\alpha=90^\circ$). D'après ces modèles, les zones perméables seraient aux environs de 200 m pour l'essai sur la zone 620-759 m et aux environs de 60 m pour celui de la zone 390-759 m. La transmissivité des niveaux aquifères captés (T1) est de $6,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la zone 760-620m et de $8,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la zone entre 390 et 759 m. Par différence, on en déduit donc qu'entre 390 et 620 m de profondeur les formations sont peu transmissives, aux environs de $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs d'emmagasinement déduites (S1) sont aux environs de $1-2 \times 10^{-4}$; cependant, et pour les mêmes raisons évoquées que pour les essais précédents, ces valeurs sont approximatives car estimées au puits de pompage. La largeur des zones perméables sont estimées, approximativement à quelques mètres (1 à 3 m suivant l'essai), leur transmissivité T^* de $1 \text{ à } 4 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ et leur emmagasinement S^* de $0,15-2 \times 10^{-1}$. L'anisotropie de transmissivité de ces zones a été fixée à 1,0 (T^*_y/T^*_x) et les propriétés du compartiment à l'opposé des zones perméables ont été fixées identiques à celles du compartiment pompé ($T_2=T_1$, $S_2=S_1$). Les pertes de charge quadratiques sont estimées à $4 \times 10^5 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ pour l'essai entre 620 et 759 m, et à $5 \times 10^4 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ pour celui entre 390 et 759 m ; les effets de capacité lié aux puits sont négligeables ici.

Il n'a pas été fait ici de calcul de flux en provenance des zones perméables identifiées. On peut néanmoins supposer que l'augmentation de minéralisation observée durant les essais est attribuable à des eaux très minéralisées en provenance de ces structures.

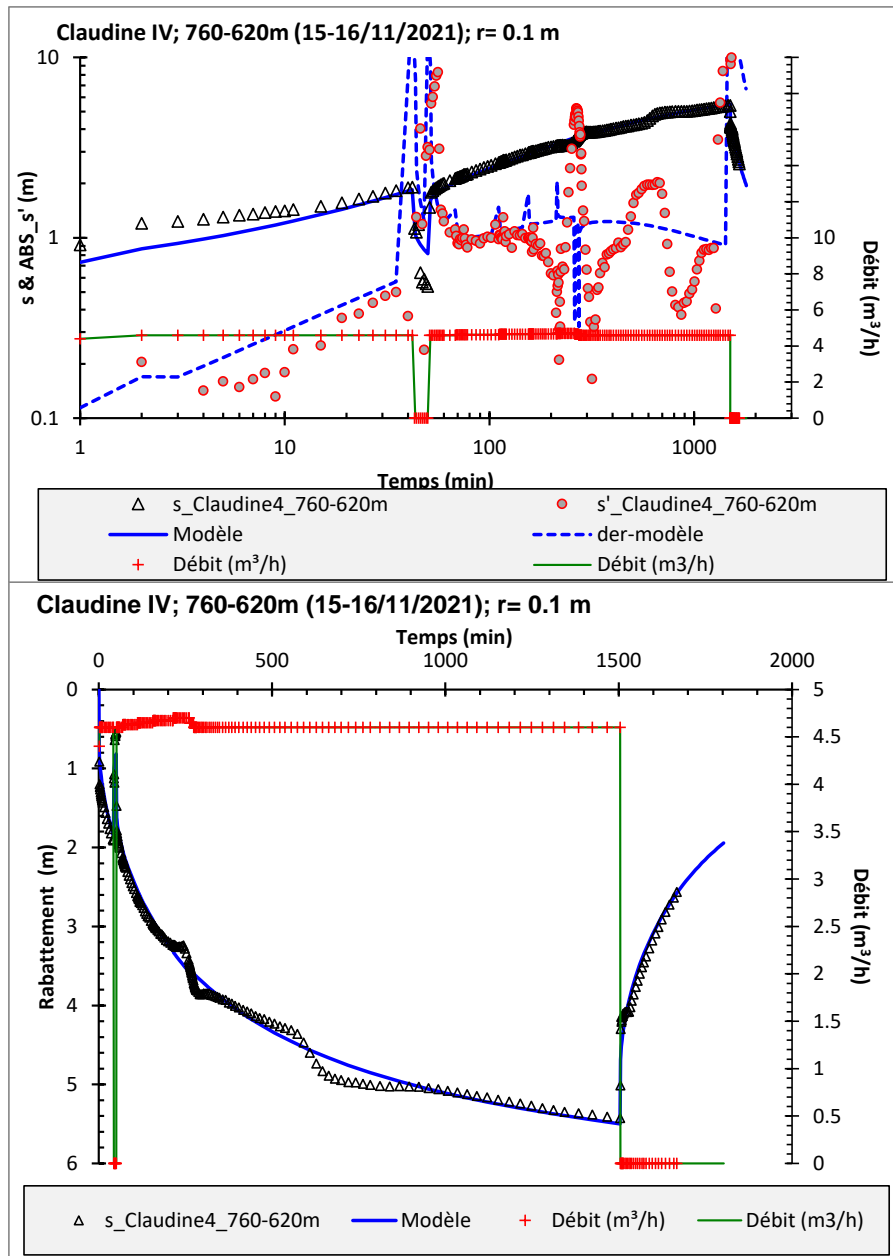


Figure 53 : Premier pompage sur DENT4 (15-16/12/2021 ; 760-620 m). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.

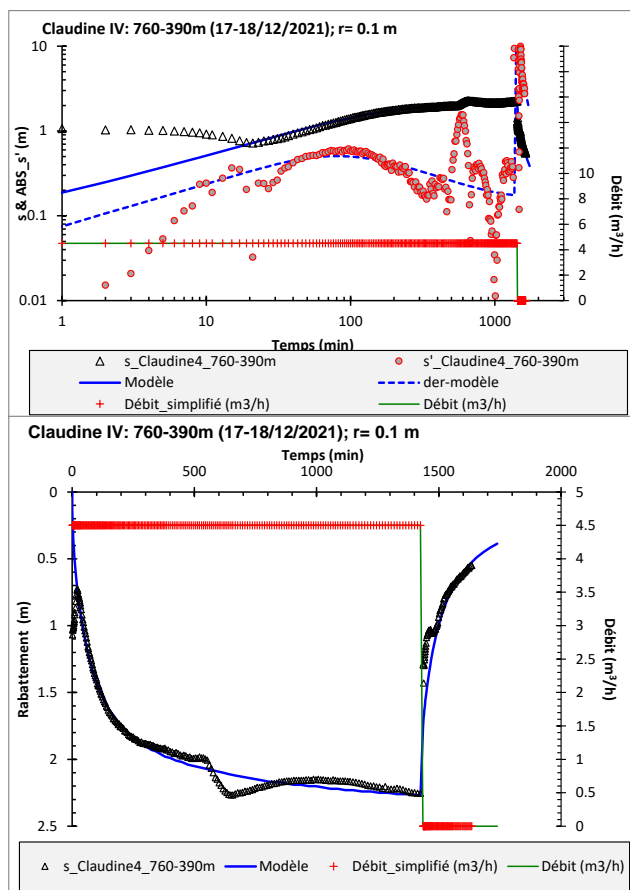


Figure 54 : Second pompage sur DEMENT4 (17-18/12/2021 ; 760-390 m). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale. Graphe du haut : Log-Log. Graphe du bas : arithmétique. s : rabattement et ABS_s' : dérivée du rabattement en valeur absolue.

Claudine IV	760-620m (15-16/11/2021)	760-390m (17-18/12/2021)
Rayon de l'ouvrage (m)	0.1	0.1
T1, transmissivité compartiment pompé D1 (m2/s)	6.50E-05	8.50E-05
S1, emmagasinement compartiment pompé D1 (-)	1.00E-04	2.00E-04
demi-long. fracture verticale (m)	180.0	140.0
α , angle de la fracture / axe des x (°)	90.0	90.0
a, distance à D* (min)	250	30
a, distance à D* (m)	197.5	55.3
T*, transmissivité compartiment milieu D* (m2/s)	1.00E-01	4.00E-01
S*, emmagasinement compartiment milieu D* (-)	1.54E-01	2.00E-01
h, largeur compartiment D* (m)	1.0	3.0
T*y/T*x, anisotropie de trans. compartiment D* (-)	1.0	1.0
T2, transmissivité compartiment D2 (m2/s)	6.50E-05	8.50E-05
S2, emmagasinement compartiment D2 (-)	1.00E-04	2.00E-04
Pertes de charge quadratiques (m-5s2)	4.0E+05	5.0E+04
Effet capacité (m)	0.0	0.0

Tableau 5 : Paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais de pompage sur DEMENT4 (15-16/12/2021 et 17-18/12/2021). Modèle : pompage dans une fracture verticale à proximité d'une zone perméable (ou non) verticale.

3.2.6. Mise en perspective des nouveaux résultats dans le contexte hydrogéologique

La Figure 55 compare les propriétés hydrodynamiques déduites des essais par pompage sur DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4/Claudine IV aux autres données disponibles dans le secteur (figure extraite du BRGM/RP-68483-FR). Ces nouvelles données sont cohérentes avec d'autres informations disponibles sur le Mio-Pliocène (DEMENT2) et sur le Jurassique fracturé/karstifié au niveau de la presqu'île de Balaruc (DEMENT1, DEMENT3 et des deux horizons testés sur DEMENT4). On notera néanmoins les faibles transmissivité/perméabilité au niveau de DEMENT3 et DEMENT4 (intervalle 390-759 m), montrant que lorsque le milieu n'est pas recoupé par des structures perméables (fractures/conduits) les propriétés aquifères sont faibles, environ 1 000 à 3 000 fois moins perméables que la perméabilité moyenne du système fracturé/karstifié. Dans ce cas, il s'agit essentiellement des propriétés matricielles du Jurassique. Les propriétés de la zone perméable mise en évidence à quelques mètres du forage DEMENT3, et celles situées à quelques dizaines à centaines de mètres sur DEMENT4, comme celle mise en évidence au droit de DEMENT1, ont par contre les valeurs les plus importantes, attestant de structures locales de dimension métrique très drainantes.

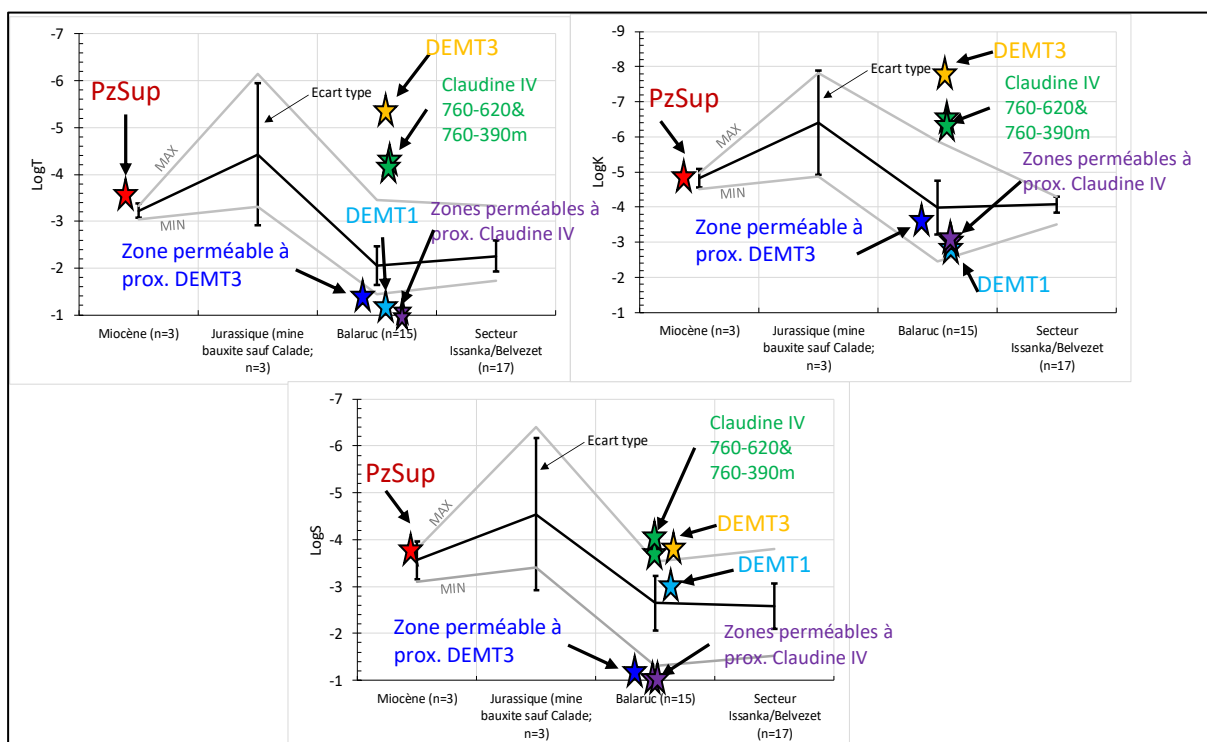


Figure 55 : (Figure extraite et modifiée du rapport BRGM/RP-68483-FR) : comparaison des transmissivités (graphe haut-gauche), perméabilités (graphe haut-droite) et des emmagasinevements (graphe du bas) déduits des essais sur les forages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4/Claudine IV aux données disponibles sur le secteur : Miocène, aquifères fracturés-karstifiés du Jurassique sur les mines de Bauxite (Villeveyrac), de Balaruc (Thermes) et du secteur Issanka-Belvezet.

3.3. ACQUISITIONS GÉOCHIMIQUES

Les prélèvements effectués au cours des essais de pompage sur les ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT3/T4 vont permettre d'acquérir des données géochimiques inédites sur l'origine des fluides en fonction de la profondeur, les temps de résidence, les vitesses de remontées le cas échéant et également de préciser les relations hydrauliques entre le gisement thermal et l'aquifère karstique de sub-surface, l'organisation des écoulements. La valorisation des résultats géochimiques est détaillée dans les livrables L5a et L5b (BRGM/RP-71281-FR et BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al* 2022a,b). Des informations préliminaires sont présentées ci-après pour les ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT3 (Figure 57 et Figure 58). Les données sur DEMENT4 sont détaillées dans le rapport BRGM/RP-71957-FR.

L'illustration suivante (Figure 56) permet de visualiser le dispositif de suivi et de prélèvement des eaux mis en œuvre lors des tests de pompage. Sur l'ouvrage DEMENT1, quatre prélèvements ont été effectués depuis mai 2020 : deux au cours de l'essai de pompage fin mai 2020, 2 au début du phénomène d'inversac (décembre 2020 et janvier 2021). Sur les autres ouvrages (DEMENT2 et DEMENT3), deux prélèvements pour analyses sur chaque ouvrage ont été effectués en début et fin d'essai de pompage (respectivement en juin 2020 et janvier 2021). Les prélèvements réalisés sur l'ouvrage DEMENT3 ont été réalisés près d'un mois et demi après le début du phénomène d'inversac. Le type d'analyse effectué et les résultats préliminaires sont rassemblés dans les tableaux (Tableau 6 et Tableau 7).

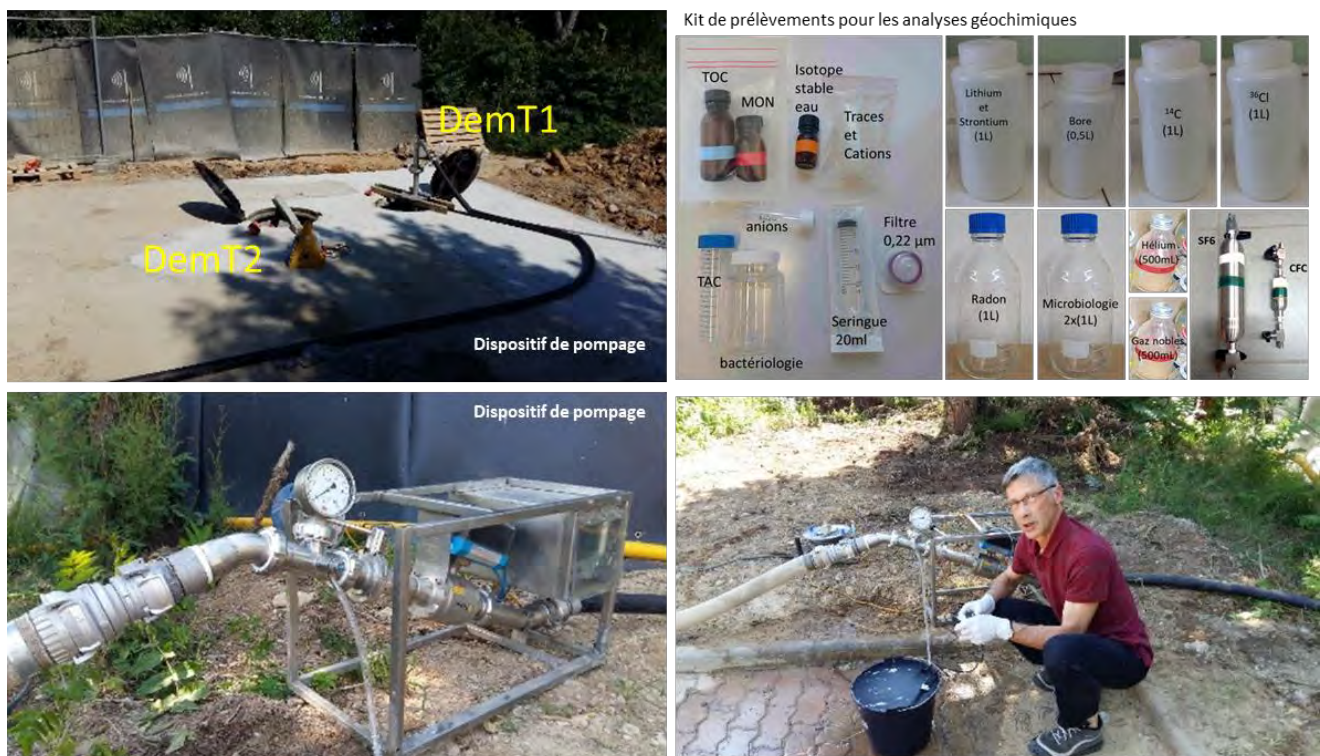


Figure 56 : Moyens mis en œuvre lors des échantillonnages au cours de l'essai de pompage de DEMENT1 (photo montage BRGM/HSM)

Paramètres mesurés		Utilisation
Eléments Majeurs		Caractérisation des mélanges
Eléments Traces		Caractérisation des mélanges
Carbone organique		Origine des flux (infiltration rapides) Contamination
Microbiologie (Colilert)		Contamination
Gaz	Radon-222	Origine des flux (profond/surface)
		Temps de transit court (<100ans) Type de circulation
	CFC-SF ₆	Contamination anthropiques
	Ne-Ar/He	Information sur la recharge /Datation
Isotopes	Stables	Caractérisation des mélanges
	Bore	Origine des flux
	Lithium	Origine des flux
	Strontium	Origine des flux

Tableau 6. Type d'analyse effectuée et nature de l'information obtenue

Plateforme expérimentale : DemT1, DemT2, DemT3											
Ouvrage	date	Contexte	T (°C)	pH	Cond (mS/cm) à 25°C	O ₂ mg/l	TOC (mg/l)	SiO ₂ mg/l	HCO ₃ mg/l	PCO ₂ _calc	
DEM_T1	27/05/2020	Pompage ech1 :T0+1h	19.7	7.1	1.98	6.0	1.23	8.9	375.8	0.0295	
DEM_T1	28/05/2020	Pompage ech2 :T0+24h	19.9	7.0	2.62	6.3	2.26	9.0	378.3	0.0357	
DEM_T1	04/12/2020	Inversac*		6.1**	3.50		0.82	NA	497.9	0.2580	
DEM_T1	08/01/2021	Inversac*	20.3	6.9	30.20	7.1	1.24	NA	362.5	0.0494	
DEM_T2	02/06/2020	Pompage ech1 :T0+1h30	24.1	6.5	12.36	1.0	1.81	21.2	631.9	0.2114	
DEM_T2	02/06/2020	Pompage ech2 :T0+4h	24.4	6.5	11.58	1.1	1.31	22.2	609.4	0.1992	
DEM_T3	11/01/2021	Pompage_Inversac ech 1 :T+4h	22	7.0	25.10	0.4	2.26	NA	386.5	0.0438	
DEM_T3	12/01/2021	Pompage_Inversac ech 2 :T+4h	22.1	6.9	27.30	0.3	0.40	NA	390.7	0.0545	
Ouvrage	date	Contexte	Cl mg/l	Na mg/l	K mg/l	Br mg/l	SO ₄ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	NO ₃ mg/l	
DEM-T1.1	27/05/2020	Pompage ech1 :T0+2h	378.7	208.1	7.7	1.4	84.7	120.6	43.3	6.1	
DEM-T1.2	28/05/2020	Pompage ech2 :T0+2h	563.1	308.5	11.3	1.8	107.9	130.8	50.5	8.1	
DEMT1	04/12/2020	Inversac*	950.2	486.9	20.2	2.9	162.7	148.9	74.0	3.1	
DEMT1	08/01/2021	Inversac*	10395.0	5308.2	201.6	35.3	1428.7	352.0	652.0	<LD	
DEM-T2.1	02/06/2020	Pompage ech1 :T0+2h	3592.5	1840.7	41.2	4.5	578.6	524.8	207.9	<LD	
DEM-T2.2	02/06/2020	Pompage ech2 :T0+2h	3223.7	1655.4	37.6	6.8	535.0	472.0	188.3	<LD	
DEMT3-1	11/01/2021	Pompage_Inversac ech 1 :T+4h	8629.1	4412.0	182.1	27.7	1183.3	436.1	470.0	<LD	
DEMT3-2	12/01/2021	Pompage_Inversac ech 2 :T+4h	9820.6	4978.7	204.3	31.2	1324.1	487.4	514.9	<LD	
Ouvrage	date	Contexte	Li µg/l	B µg/l	Rb µg/l	Sr µg/l	Ba µg/l	222Rn	d18O (‰)	d2H (‰)	
DEM-T1.1	27/05/2020	Pompage ech1 :T0+2h	7.1	104.0	3.0	334.1	15.1	9.7	-5.8	-33.6	
DEM-T1.2	28/05/2020	Pompage ech2 :T0+2h	11.7	160.9	4.1	413.0	16.3	10.9	-5.8	-33.5	
DEMT1	04/12/2020	Inversac*	16.9	223.6	6.5	665.2	19.5	26.7	-5.6	-32.7	
DEMT1	08/01/2021	Inversac*	87.2	2042.5	58.0	4333.5	52.8	11.0	-2.6	-15.4	
DEM-T2.1	02/06/2020	Pompage ech1 :T0+2h	99.0	614.0	5.7	3126.1	77.1	11.4	-5.0	-29.3	
DEM-T2.2	02/06/2020	Pompage ech2 :T0+2h	94.7	635.4	4.4	3008.7	64.9	9.8	-5.1	-29.7	
DEMT3-1	11/01/2021	Pompage_Inversac ech 1 :T+4h	99.1	1758.5	48.1	3405.3	37.9	4.8	-2.8	-16.3	
DEMT3-2	12/01/2021	Pompage_Inversac ech 2 :T+4h	117.3	2026.0	51.5	3817.7	40.4	4.2	-2.3	-14.6	

*Prélèvement MP1
**Mesure Labo

Tableau 7. Résultats préliminaires des analyses chimiques des eaux collectées dans les ouvrages de la plateforme expérimentale.

3.3.1. Caractérisations géochimiques préliminaires des ouvrages DEMENT1 et DEMENT2 (avant l'inversac)

En replaçant les nouvelles données collectées dans le contexte géochimique de la presqu'île de Balaruc, les résultats de l'ouvrage DEMENT1 permettent de montrer que l'eau présente (avant l'inversac) des signatures chimiques et isotopiques très comparables à celle de l'eau de la Vise (Figure 57, Figure 58 et Figure 59). Les résultats permettent de montrer par ailleurs que la qualité de ces eaux (Vise/Dement1) est très proche des eaux prélevées en amont hydraulique au niveau de l'ouvrage CGE-Tennis qui permet de définir le pôle karstique d'eau douce du secteur d'étude.

Les eaux du forage DEMENT2 apparaissent plus minéralisées que les eaux karstiques froides du compartiment jurassique sous-jacent. La position des points de DEMENT2 dans les diagrammes (Figure 57, Figure 58 et Figure 59) suggère l'existence d'un mélange avec les eaux thermales caractérisées par le forage F5 et les eaux karstiques de DEMENT1. Ces résultats permettent de suggérer que le transfert de pression (cf. Figure 38) entre le Jurassique et le Miocène est également accompagné d'un transfert de masse pour cet ouvrage (DEMENT2).

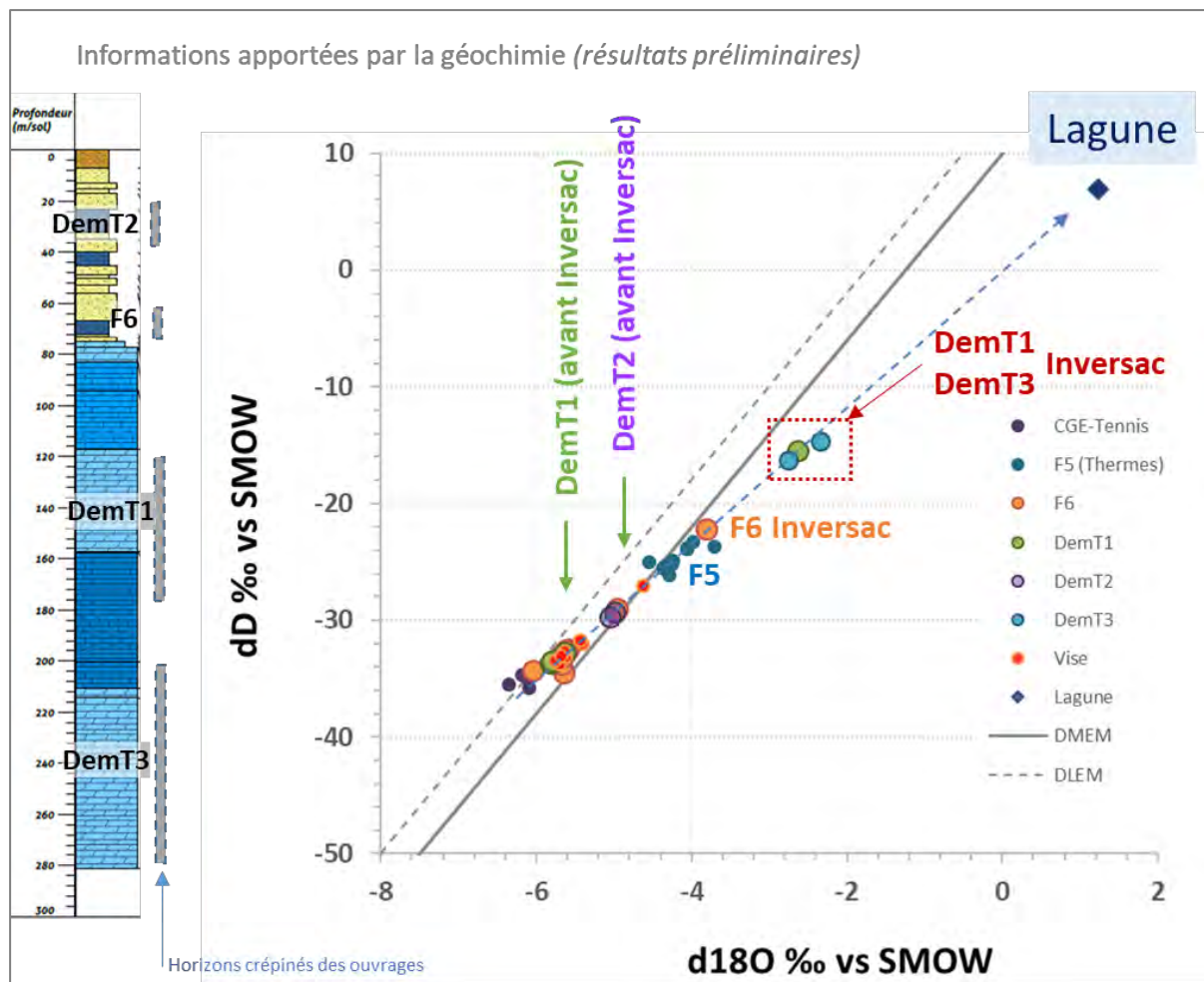


Figure 57 : Évolution des signatures en deutérium (d^2H) en fonction des signatures en oxygène 18 ($d^{18}O$)

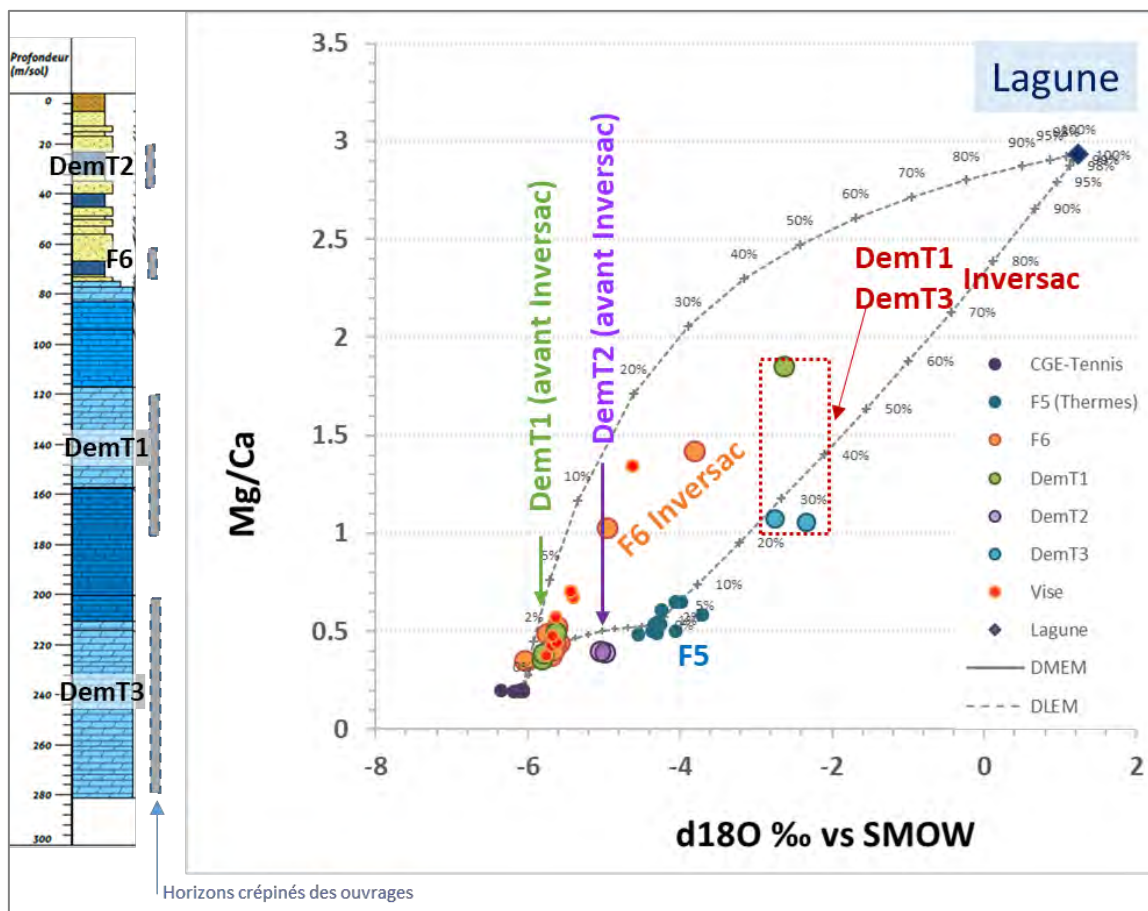


Figure 58 : Évolution du rapport Mg/Ca en fonction des signatures en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$)

Dans les conditions de fonctionnement « normales », les eaux du forage DEMENT1 sont comparables à celles de la Vise, les tests hydrauliques attestent de la connexion hydraulique entre ces ouvrages. Le forage F6 est en très bonne connexion hydraulique avec l'aquifère jurassique sous-jacent, la qualité des eaux indique que l'ouvrage apparaît fortement alimenté par l'eau du Jurassique de type « non minéral » caractérisé par le DemT1/Vise mais également par une contribution d'eau thermique du type de celle échantillonnée au forage F5. Les fluctuations de minéralisation observées au forage F6 avant l'inversac (Figure 61) sont à expliquer par l'évolution des contributions relatives des deux composantes (pole Karst « doux »/pole Thermal).

Les eaux du Miocène caractérisées par l'ouvrage DEMENT2 apparaissent très minéralisées en comparaison des eaux du Jurassique prélevées dans DEMENT1. Les eaux du DEMENT2 sont également nettement plus minéralisées que celles du forage F6. Les caractéristiques géochimiques des eaux de DEMENT2 suggèrent qu'il existe un mélange entre une eau douce (pole karstique ?) et une eau minérale du type de celle échantillonnée au forage F5. La contribution de la composante minérale apparaît importante (entre 40 et 50 %). Le schéma conceptuel de fonctionnement en condition de fonctionnement hydrogéologique « normal » (Figure 60) permet de proposer les chemins d'écoulement possibles pour les ouvrages DEMENT2 et F6.

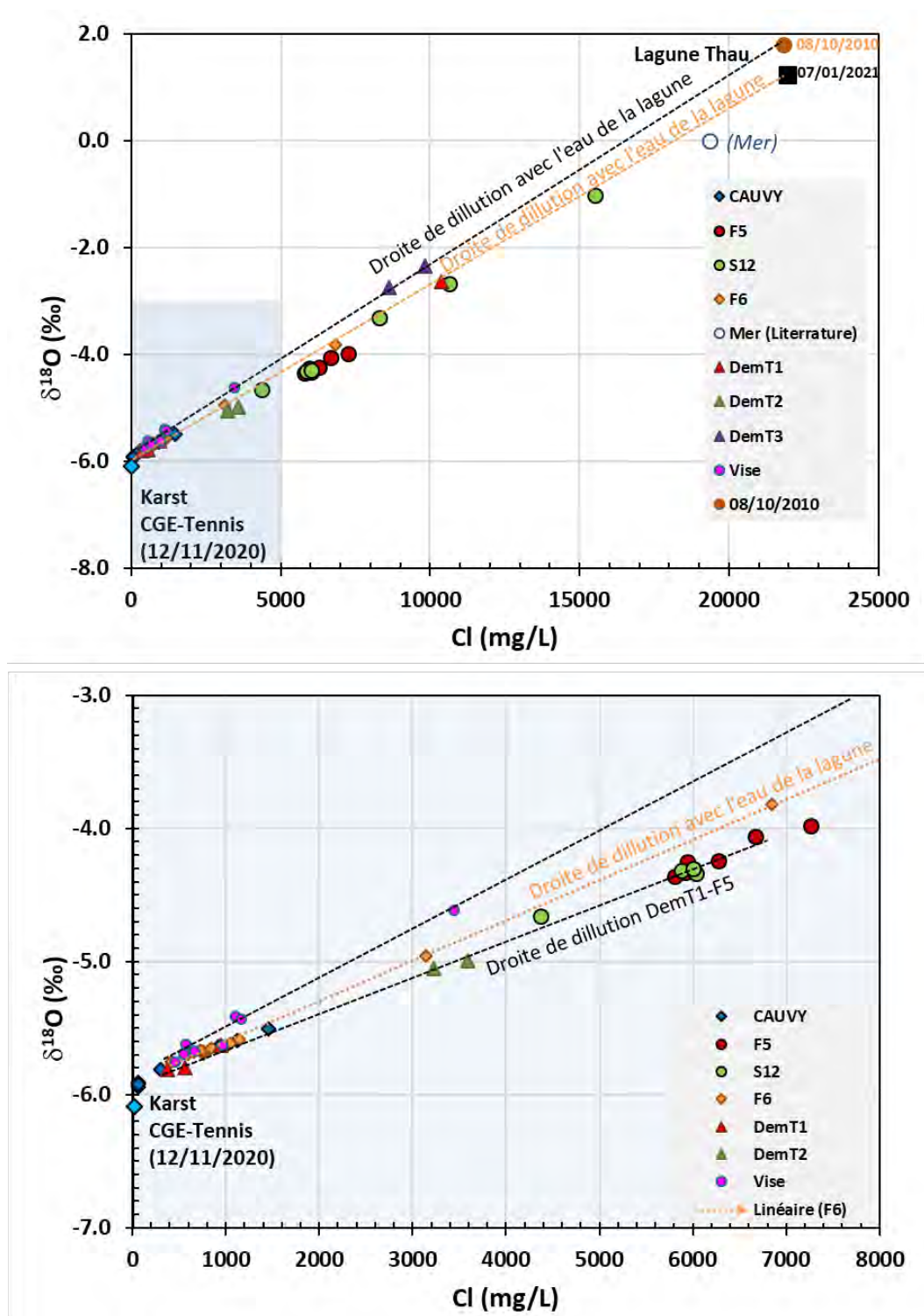


Figure 59 : Évolutions des signatures en oxygène 18 en fonction des concentration en chlorures.

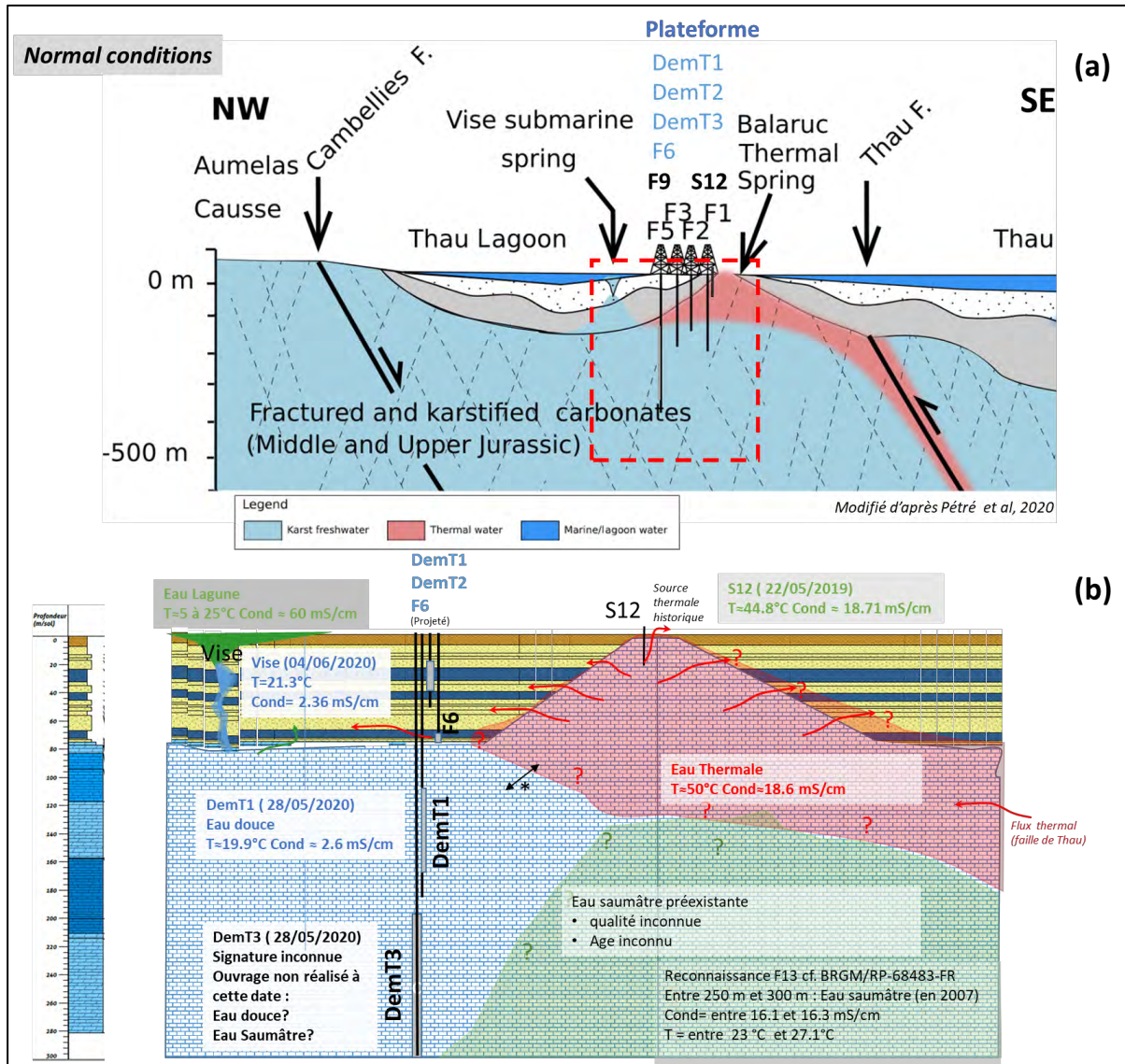


Figure 60 : Actualisation du modèle conceptuel interprétatif (avant inversac). (a) schéma conceptuel suivant une coupe NW-SE (modifié d'après Pétré et al, 2020). (b) schéma conceptuel focalisé sur la presqu'île de Balaruc en condition hydrogéologique normale [focus sur l'encadré rouge de (a)]

La synthèse des résultats préliminaires permet de proposer une actualisation du schéma conceptuel de fonctionnement (Figure 60) dont les éléments ont été synthétisés dans le rapport BRGM/RP-68483-FR et dans Pétré et al. 2020. Sur le schéma conceptuel de fonctionnement (Figure 60) en condition de fonctionnement hydrogéologique « normal » ont été reportées les quelques informations géochimiques disponibles sur les eaux souterraines :

- les eaux thermales sont caractérisées par le forage F9 et/ou par le forage F5 qui présente globalement des signatures très comparables ($T=49\text{ °C} \pm 1.2\text{ °C}$; $\text{Cond} = 18\text{ mS/cm} \pm 0.9\text{ mS/cm}$). L'ouvrage thermal S12 situé à proximité de l'émergence historique présente des températures plus faibles (autour de $44\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) et est globalement plus minéralisé (Cond autour de $19\text{ mS/cm} \pm 0.7\text{ °C mS/cm}$). Conceptuellement, il est supposé que la source historique (S12) constitue un lieu de convergence des eaux thermales de la presqu'île, caractérisées par les forages F9 et F8. L'ouvrage S12 est également potentiellement influencé, à certaines périodes du cycle hydrogéologique, par les écoulements karstiques froids de sub-surface ;

- les eaux karstiques « froides » peu minéralisées sont caractérisées par l'ouvrage DEMENT1 (entre 120 et 170 m de profondeur) et la Vise. En condition normale d'écoulement, la qualité des eaux des horizons plus profonds du réservoir (entre 200 et 300 m de profondeur) n'est pas connue, et la question suivante demeure toujours posée : l'aquifère en profondeur à l'aplomb de la plateforme expérimentale (entre 200 et 300 m de profondeur) est-il composé d'eau douce ou d'eau minéralisée ?
- au sein de la presqu'île, des eaux saumâtres plus ou moins chaudes sont rencontrées en profondeur comme le témoignent les résultats du forage de reconnaissance F13 réalisé en 2007 (cf. rapport de synthèse des connaissances BRGM/RP-68483-FR). L'extension spatiale et la qualité de ces eaux saumâtres que l'on rencontre en profondeur sous les eaux thermales demeurent globalement largement inconnues.

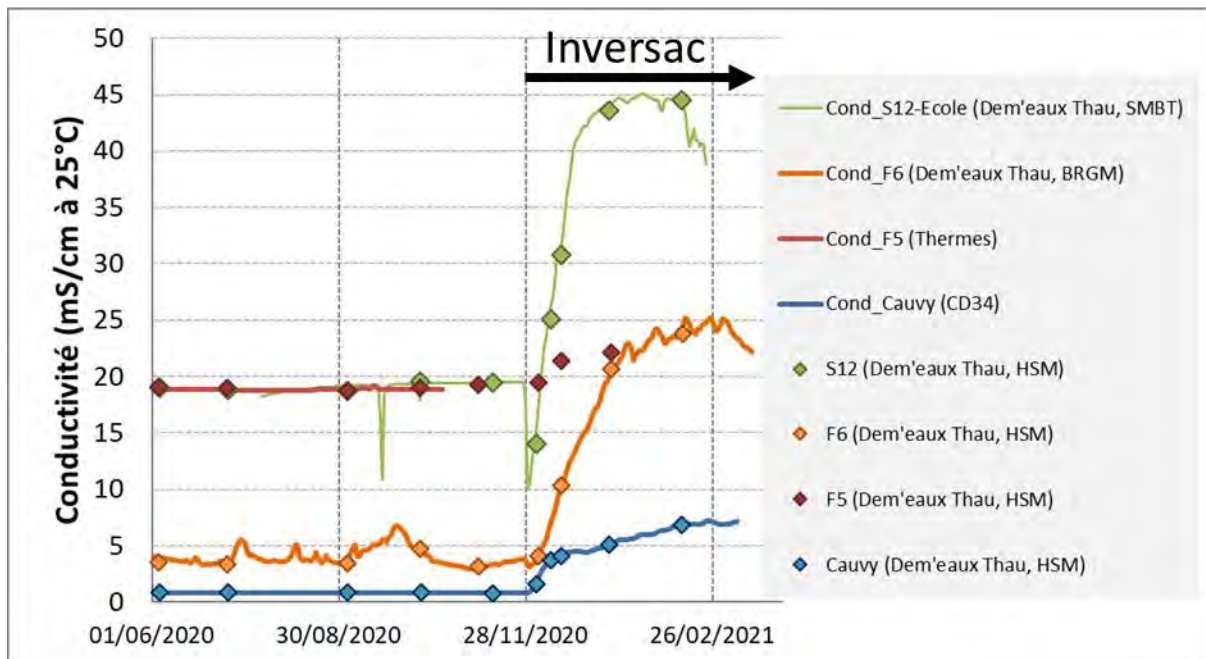


Figure 61 : Évolution de la conductivité électrique des eaux des ouvrages DemT1, F6, F5, S12 et Cauvy sur la période du 01/06/2020 au 01/03/2021 (avant inversac et début d'inversac).

En contexte d'inversac, les évolutions physico-chimiques des ouvrages permettent de montrer que les ouvrages DemT1, F6, F4, S12 et Cauvy sont fortement impactés par le phénomène d'intrusion d'eau marine par la Vise (Figure 61). Les ouvrages F5, F9 sont également impactés, les minéralisations des eaux sont significativement supérieures aux valeurs mesurées avant l'inversac (Figure 61). Ce phénomène précédemment décrit pour les épisodes de 2008, 2010 et 2014 (cf. rapports BRGM/RP-59922-FR ; BRGM/RP-63841-FR, BRGM/RP-64812-FR) sera explicité dans le livrable L11b (BRGM/RP-70839-FR). La valorisation des résultats géochimiques des prélèvements effectués dans les principaux ouvrages accessibles de la presqu'île sera présentée dans le livrable L5b (BRGM/RP-71957-FR). Les informations préliminaires présentées (cf. Figure 59) permettent de montrer que la qualité des eaux des ouvrages DEMENT1, F4, F6, S12, Cauvy est modifiée a priori sous l'effet du mélange avec les eaux marines de la lagune de Thau. La question de l'origine de l'eau qui permet d'expliquer l'augmentation de la minéralisation des différents points échantillonnés sera examinée dans le livrable L5b car l'étude géochimique précédente de 2010 (BRGM/RP-59922-FR) avait permis de montrer que, selon la localisation et la profondeur de l'ouvrage, les modifications peuvent résulter **d'un impact direct** de l'eau infiltrée par la Vise ou **d'un impact indirect**, suite à la mobilisation de la composante d'eau saumâtre initialement présente au sein de l'aquifère.

3.3.2. Caractérisations géochimiques préliminaires de l'ouvrage DEMENT3 (période d'inversac)

L'essai par pompage sur DEMENT3 réalisé du 11 au 12/01/2021 (24h) a permis d'échantillonner les eaux de l'aquifère située entre 200 et 300 m de profondeur. Cet essai a été réalisé au début de la période d'inversac, soit 44 jours après le déclenchement du phénomène (28/11/2020). Le type d'analyse effectué et les résultats préliminaires sont rassemblés dans le Tableau 7.

Le suivi réalisé dans l'aquifère supérieur entre 120 et 170 m de profondeur (DEMENT1) indique que l'intrusion saline de la Vise est arrivée en profondeur à partir du 22 décembre (Figure 36). Le 11 janvier 2021 au début du pompage, les eaux du DEMENT1 à 130 m de profondeur présentent une conductivité électrique de l'ordre de 30 mS/cm et une température de 19.5°C.

Les eaux prélevées dans le DEMENT3 au cours du test de pompage réalisé du 11 au 12/01/2021 présentent une minéralisation de l'ordre de 27.3 mS/cm et une température de l'ordre de 22 °C (cf. Figure 43). Les eaux du DEMENT3 apparaissent significativement différentes de celles prélevées dans le DEMENT1 quelques jours plus tôt (08/01/2021) comme le suggère également, en exemple, la position des points dans la figure précédente (Figure 58). Dans cette figure, les eaux de DEMENT3 semblent se positionner sur une droite de mélange défini par le pôle thermal (F5) et les eaux de la lagune de Thau. Les eaux de DEMENT1 prélevées au début du mois de janvier (08/01/2021) se positionnent dans le triangle de mélange défini par les 3 pôles (CGE-Tennis ; F5 et Lagune) ce qui suggère que ces trois composantes se mélangent pour former la qualité de l'eau du DEMENT1. Ces nouveaux résultats permettent une actualisation du schéma conceptuel interprétatif **en contexte d'inversac** (Figure 62) qui demandera à être affiné à l'aide des informations apportées par les autres traceurs chimiques et isotopiques (livrable L5b) :

- en profondeur (entre 120 et 170 m), la qualité des eaux prélevées dans DEMENT1, près de 41 jours après le début du phénomène, est expliquée par le phénomène de mélange entre l'eau salée de la lagune et l'eau douce karstique préexistante dans le réservoir qui apparaît, avant l'inversac, très légèrement influencée par une faible contribution d'eau minérale « type F5 » ;
- en profondeur (entre 200 et 300 m), les eaux prélevées près de 44 jours après le début de l'inversac suggèrent l'existence d'un mélange entre l'eau saumâtre préexistante dans l'aquifère (dont la qualité apparaît contrôlée par le chimisme des eaux thermales de type F5) et l'eau saumâtre qui s'infiltre par la Vise (30 % pôle Lagune, 70 % pôle préexistant type F5). Les informations de datation permettront de préciser l'âge apparent de l'eau échantillonnée ;
- le phénomène d'inversac affecte l'organisation des écoulements et de la qualité des eaux thermales notamment dans la zone d'émergence naturelle (autour de la source S12) pour laquelle de très fortes augmentations de minéralisation sont observées (de 18.7 mS/cm à 44 mS/cm) expliquées par le phénomène de mélange avec les eaux salées (C= 60 mS/cm) absorbées par la Vise ;
- le phénomène d'inversac affecte également très significativement la qualité des eaux prélevées aux ouvrages F4, F5 et F6 et à la source Cauvy en lien, très vraisemblablement, avec l'infiltration directe des eaux de la lagune par la Vise, bien que l'impact indirect, suite à la mobilisation de la composante d'eau saumâtre initialement présente au sein de l'aquifère, ne peut pas être exclu à ce stade de l'étude préliminaire ;
- l'intrusion de l'eau salée par la Vise repousse probablement vers le nord la limite avec les eaux douces d'origine karstique sans que l'on puisse précisément la situer, entre les ouvrages F4 et CGE-Tennis/P4 Balme, ces 2 derniers ouvrages n'étant pas affectés du point de vue physico-chimique par le phénomène d'inversac.

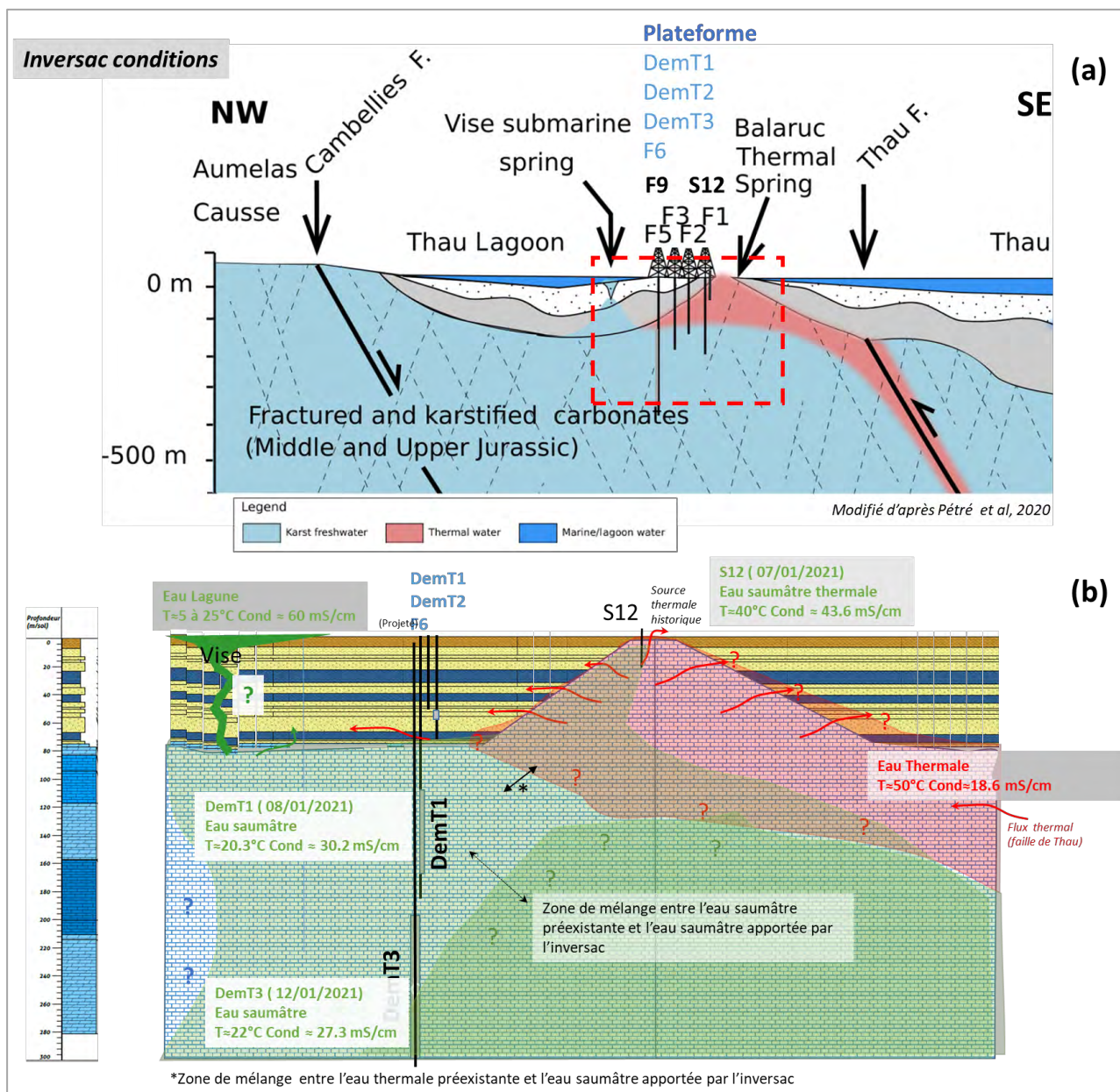


Figure 62 : Actualisation du modèle conceptuel interprétatif (pendant inversac). (a) schéma conceptuel suivant une coupe NW-SE (modifié d'après Pétré et al, 2020). (b) schéma conceptuel focalisé sur la presqu'île de Balaruc en condition d'inversac [focus sur l'encadré rouge de (a)]

3.3.3. Caractérisations géochimiques préliminaires de l'ouvrage DEMENT4 (période d'inversac)

Deux essais par pompage de 24h ont été réalisés sur le forage DEMENT4 (ou Claudine IV) profond de 759.5 m. Ces deux essais ont été réalisés en contexte d'inversac. Le premier à 4,6-4,7 m³/h, effectué du 15 au 16/12/2021 a concerné les horizons compris entre 759 m et 620 m de profondeur, et le second, à 4.5 m³/h, du 17 au 18/12/2021, sur les horizons compris entre 390 à 759 m de profondeur. Durant ces essais, le tubage de soutènement du carottier a permis d'assurer l'isolation des niveaux supérieurs.

Les eaux prélevées dans le DEMENT4 entre 620 et 759 m de profondeur dans le Jurassique moyen présentent une température comprise entre 25.9 °C et 26.3 °C et une minéralisation comprise entre 5.82 et 11.36 mS/cm (Cl entre 1808 et 3750 mg/l) en fin de pompage (prélèvements 382/383 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac de 2020). Les teneurs en oxygène dissous sont très faibles (<0.3 mg/l), les potentiels redox des eaux sont négatifs (<-100 mV). **Les eaux prélevées dans le Jurassique moyen sont globalement assez froides (25 °C/26 °C) compte tenu de leurs profondeurs et du gradient géothermique.** En considérant une température moyenne de recharge de 15 °C, et un gradient géothermique moyen de +3°C/100 m, des températures de l'ordre de 36 °C auraient pu être attendues pour ces eaux profondes. L'anomalie négative de température témoigne globalement de circulations karstiques actives à ces profondeurs.

Les eaux prélevées dans le DEMENT4 entre 390 et 760 m de profondeur dans le Jurassique moyen présentent une température comprise entre 25.9 °C et 26.3 °C et une minéralisation comprise entre 7.34 et 11.11 mS/cm (Cl entre 2389 et 3803 mg/l) en fin de pompage (prélèvements 384/385 jours après le déclenchement du phénomène d'inversac de 2020). Les teneurs en oxygène dissous sont très faibles (<0.3 mg/l), les potentiels redox des eaux sont négatifs (<-100 mV).

L'échantillonnage d'eau réalisé en début de pompage T0+4h au cours du premier test (759-620 m) permet de qualifier la signature géochimique de la matrice carbonatée selon les résultats de l'étude hydraulique de l'ouvrage, le second prélèvement (T0+24h) constitue un mélange entre l'eau de la matrice et l'eau en provenance de la zone perméable identifiée à environ 200 m du puits de pompage. Les eaux profondes échantillonnées à T0+4h sont très singulières en comparaison des eaux du Jurassique supérieur (DEMENT1) ou des eaux thermales (F9). Les eaux apparaissent très enrichies en Mg (210 mg/l), Li (185 µg/l) et Sr (16864 µg/l) compte tenu de leurs concentrations en Cl (1808 mg/l), les rapports isotopiques du strontium sont faibles (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.707539) en comparaison des autres signatures karstiques de la zone d'étude (cf. BRGM/RP-71281-FR, Ranchoux *et al.* 2022). Les signatures carbone 13 des eaux et l'activité ¹⁴C des eaux (cf. BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.* 2022) indiquent par ailleurs que les eaux du réservoir en profondeur ont subi d'importantes interactions eau-roche en présence de CO₂ dissous d'origine profonde (probablement issu du socle sous-jacent).

L'interprétation détaillée des résultats géochimiques des eaux prélevées sur le DEMENT4 est présentée dans le rapport L5b (BRGM/RP-71957-FR, Ranchoux *et al.* 2022).

3.4. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, le BRGM a mandaté les sociétés ImaGeau et Kloé afin de doter la plateforme expérimentale d'équipements de suivi en continu de la résistivité électrique (ImaGeau – SMD) et de température par fibre optique (Kloé) dans le but d'obtenir un monitoring en continu avec une grande résolution verticale de la minéralisation et de la température des eaux.

Le SMD (Subsurface Monitoring Device) de la société Imageau est un outil de monitoring des eaux souterraines qui permet d'enregistrer et de télétransmettre la conductivité électrique de l'eau, la pression, et la température de l'aquifère autour d'un piézomètre via un grand nombre de points de mesure (jusqu'à 60). Un boîtier d'acquisition placé en surface à proximité de l'ouvrage contrôle une chaîne d'électrodes permettant de réaliser des profils de résistivité électrique autour de l'ouvrage en utilisant des méthodes géophysiques. Ce signal est ensuite converti en conductivité électrique de l'eau de l'aquifère en utilisant l'équation de Waxman-Smits (1968). Cette opération demande de connaître le facteur de formation (F) et la conductivité de surface (Cs) qui sont déterminés à l'installation du SMD en utilisant un jeu réduit de diagraphies (gamma ray pour les argiles, résistivité électrique et sonic P-wave velocity pour la porosité).

Le câble optique équipé de capteurs de températures (K-FBGA) mis en place par la société Kloé se compose principalement d'une fibre optique, le long de laquelle des capteurs de type « réseaux de Bragg » ont été inscrits régulièrement au cœur de celle-ci. Ces capteurs (K-FBGs) ont la particularité d'avoir chacun, à température constante, une signature fréquentielle qui leur est propre : lors de variations de températures, cette réponse fréquentielle va varier de manière proportionnelle à l'intensité des variations thermiques dans l'environnement direct de chaque capteur. Grâce à une calibration préalable, il est ainsi possible de retranscrire et d'afficher en continu la valeur de température mesurée par chacun des capteurs le long du câble en confiant, au PC embarqué, la conversion de l'amplitude du décalage fréquentiel enregistré par l'unité d'interrogation laser en variations de température par rapport à une valeur de référence. Du fait que le câble soit utilisé en sous-sol pour les besoins du projet, les variations de températures peuvent être assez faibles à cause de l'inertie thermique dans le sol : c'est notamment pour ce type d'applications que la société Kloé a développé cette technologie qui offre la particularité de pouvoir atteindre une résolution en température inférieure à 0.01 °C.

Initialement, les équipements devaient être déployés dans l'ouvrage DEMENT1 ; en définitive les deux observatoires ont été finalement déployés sur deux ouvrages distincts, DEMENT1 pour le dispositif SMD (imaGeau) et DEMENT4 pour la Fibre Optique (Kloé).

À la demande du BRGM, l'installation s'est déroulée en plusieurs phases afin d'avoir le plus rapidement possible des mesures en continu de résistivité avant la fin des travaux de forage. Ainsi, la sonde imaGeau a été mise en place avant la fibre optique (qui n'était alors pas disponible du fait d'un délai de fabrication plus long qu'initialement prévu) et la fin des travaux. Les fibres de mesure de température Kloé ont été mises en place dans DEMENT4 fin juin 2021.

3.4.1. Observatoire de résistivité (SMD de la société Imageau)

L'ouvrage DEMENT1 accueille la sonde SMD. Les capteurs devaient être initialement installés entre 60 et 120 m de profondeur (cf. Figure 63) mais le tube DEMENT1 dédié au système SMD (tube n°2) s'est retrouvé partiellement bouché suite aux opérations de comblement du DEMENT3. Malgré des opérations de nettoyage du piézomètre de mesure, le bouchon à 94 m de profondeur n'a pas pu être évacué. Ce problème technique conduit donc à la nouvelle configuration pour le dispositif SMD (Figure 64A). Dans cette configuration, les électrodes

placées tous les mètres sur le câble sont donc positionnées entre 35 et 94 m de profondeur ; ainsi, certaines d'entre elles se retrouvent placées au niveau du tube plein ce qui ne permet pas de réaliser de mesures pour ces profondeurs concernées (entre 35 m et 49 m de profondeur), les électrodes 1 à 15 sont donc inopérantes. La possibilité de redescendre la flute si le forage est débouché par la suite est toujours envisageable car la rallonge des câbles nécessaire à ce repositionnement a été laissée en tête de puits.

Le test de bon fonctionnement de l'équipement le 06/04/2021 (en période d'inversac) a permis de vérifier que le système est opérationnel (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le dispositif a été programmé pour acquérir une mesure par jour (la nuit) pour ne pas déranger les opérations de foration.

Capteur	Nombre d'électrodes	Espacement	Localisation
SMD (résistivité électrique)	60 électrodes	1m	Position dernière électrode / Fond de câble : 10 cm
Capteurs de Pression	1	-	Position / fond de câble : 15,5m

Figure 63 : Caractéristiques des dispositifs (SMD).

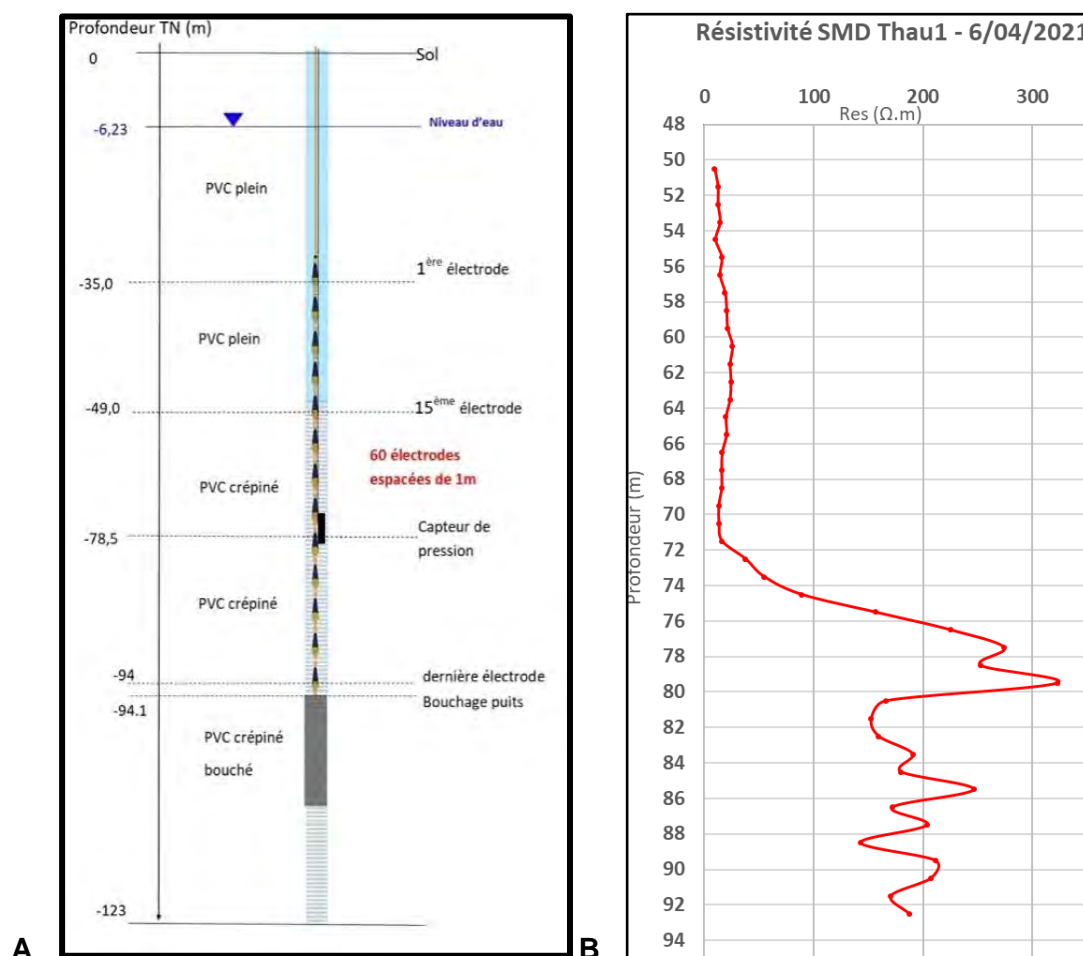


Figure 64 : (A) schéma d'instrumentation du piézomètre T1 par SMD. (B) Premier profil de résistivité soulignant l'entrée dans le Jurassique à 72 m.

En cours de chantier, le SMD a été configuré pour enregistrer un profil de résistivité la nuit (pour ne pas déranger les travaux de forage). Cette fréquence peut être augmentée à distance ou sur place par ImaGeau. Les premières mesures (Figure 64B) sont conformes aux profils enregistrés en forage et soulignent la transition entre Miocène et Jurassique à 72 m.

Afin d'obtenir des profils de conductivité électrique de l'eau dans l'aquifère, il est nécessaire de calibrer le SMD. Les mesures de résistivité du SMD dépendent en effet de la nature et la quantité d'argiles, la porosité, la connectivité des pores, la température et la salinité de l'eau dans l'aquifère. La calibration correspond à la soustraction des composantes géologiquement invariantes du signal mesuré. Les paramètres géologiques sont déduits de l'étude géologique et géophysique réalisée à partir de diagraphies réalisées par le CNRS. À partir de cela, un programme développé par ImaGeau calcule la conductivité de l'eau en fonction de la profondeur et de la date de mesure. La conversion de la résistivité SMD en conductivité du fluide est basée sur les équations d'Archie (1942) et de Waxman & Smith (1968) :

$$C_0 = \frac{C_w}{F} + C_s$$

Il en résulte :

$$C_w = \left(\frac{1}{R_o} - C_s \right) \cdot F$$

avec R_o : résistivité du milieu (mesurée par l'observatoire)
 C_s : conductivité de surface due aux argiles
 F : facteur de formation (Archie, 1942).

C_s peut être déduite de la mesure de radioactivité naturelle gamma. Le volume d'argile (V_{sh}) est calculé à partir de cette mesure à chaque point de profondeur en utilisant la formule :

$$V_{sh} = \frac{(GR - GR_{min})}{(GR_{max} - GR_{min})}$$

Où

- V_{sh} : volume d'argile à la profondeur z ,
- GR : valeur du Gamma Ray à la profondeur z ,
- GR_{min} : valeur minimale du Gamma Ray,
- GR_{max} : valeur maximale du Gamma Ray.

La conductivité de surface C_s est déduite du volume d'argile (V_{sh}), en utilisant la valeur maximale de conductivité d'argile (C_{smax}) obtenue par mesure électrique en forage en face d'une couche d'argile.

$$C_s = V_{sh} \times C_{smax}$$

Les chroniques de conductivité ont débuté le 6 avril 2021. Sur les 14 premiers mois de données (Figure 65), on note une conductivité assez uniforme de l'ordre de 1 500-2 500 $\mu S/cm$ dans l'aquifère Miocène, des variations plus discrètes avec des valeurs généralement plus faibles au toit du Jurassique. En mars 2022, la fin de l'inversac est visible de 65 à 80 m de profondeur, aussi bien dans le Miocène qu'au toit du Jurassique.

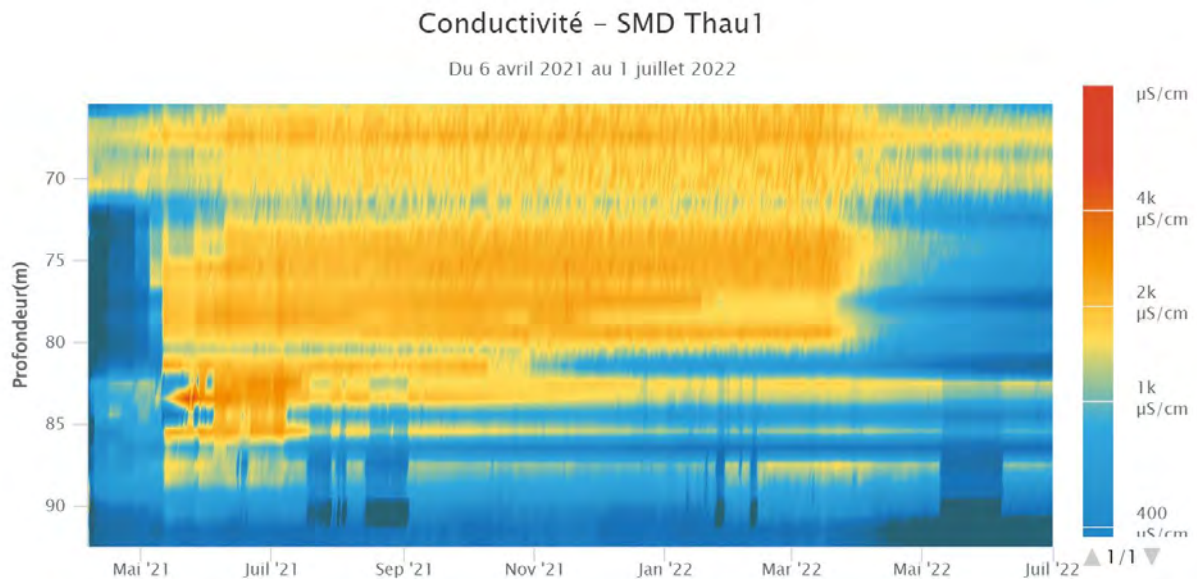


Figure 65 : Image SMD de résistivité électrique du milieu réalisée en mode dipôle-dipôle et transformée en conductivité électrique de l'eau de porale en fonction de la profondeur. Les 14 premiers mois de données soulignent nettement la fin de l'inversac en mars 2022.

3.4.2. Observatoire de température (fibre optique, société Kloé)

La solution de Monitoring des températures par fibre optique développée et fournie par la société Kloé se compose d'un interrogateur optoélectronique de surface (K-FBG-MU), d'un (ou plusieurs) câble(s) optique(s) (K-FBGA) déployé(s) le long du site à surveiller, comportant les capteurs optiques de températures (K-FBG) répartis selon les besoins du projet.

L'interrogateur optoélectronique se compose (i) d'une source laser, accordable, qui balaie en boucle un spectre de longueurs d'onde dont la largeur est adaptée au nombre de capteurs de températures déployés le long des câbles optiques de mesure, (ii) d'un commutateur optique permettant une interrogation multi-lignes, (iii) de détecteurs optiques assurant la mesure permanente des signaux optiques collectés à l'extrémité de chaque câble relié à l'interrogateur, et (iv) d'un logiciel rendant principalement compte des températures relevées par chaque capteur en fonction du temps.

Le câble optique se compose principalement d'une fibre optique, déployée en A/R dans le câble, comportant régulièrement des capteurs optiques (de type « réseaux de Bragg », les K-FBGs) très sensibles à la température, répartis spatialement le long de la fibre selon les besoins de l'application, et d'une gaine de protection, dont le type est sélectionné et adapté au mieux en fonction des contraintes environnementales liées au projet.

Le système de monitoring de températures installé par Kloé sur le site de Balaruc (17/06/21 - 24/06/21) repose sur le déploiement de 2 câbles de mesures de températures par fibre optique (gainés noirs; Figure 67A), installés de manière parallèle l'un à l'autre, et comportant respectivement 42 capteurs (K-FBGA_1) et 46 capteurs (K-FBGA_2) de type réseaux de Bragg. L'interrogateur permet d'interroger jusqu'à 50 capteurs par câble optique pour la mesure de température allant de -10 °C et 60 °C avec une résolution moyenne de 0.3-0.4 °C, et susceptible d'interroger jusqu'à 2 câbles optiques.

Capteur	Nombre d'électrodes	Espacement	Localisation
KFBGA n°1	42 capteurs	Espacement à façon	Position dernier capteur / Fond de câble : ~2m
KFBGA n°2	46 capteurs	Espacement à façon	Position dernier capteur / Fond de câble : ~2m

Figure 66 : Caractéristiques des dispositifs de fibre optique (société Kloé).

Les deux câbles optiques de 200 m de long environ (+20 m de rallonge en surface), chacun d'un diamètre moyen de 6mm / maximum de 18-19 mm (extrémités) assurent la mesure *in situ* des températures. Ces 2 câbles ont été déployés solidairement le long de l'observatoire (puits).

Le dernier capteur du chapelet K-FBGA_2 devait initialement être positionné à -200 m : le positionnement relatif des chapelets est assuré de telle manière que leurs extrémités basses sont positionnées à la même profondeur et qu'une distance d'environ 2 m sépare l'extrémité de ces 2 câbles du dernier capteur du K-FBGA_2 (à positionner à -200 m), ce qui a amené à attacher les 2 fonds de câble à la profondeur de -202 m avant d'amorcer la pose et le déroulement des 2 bobines de fibre de température (Figure 67A et Figure 68).

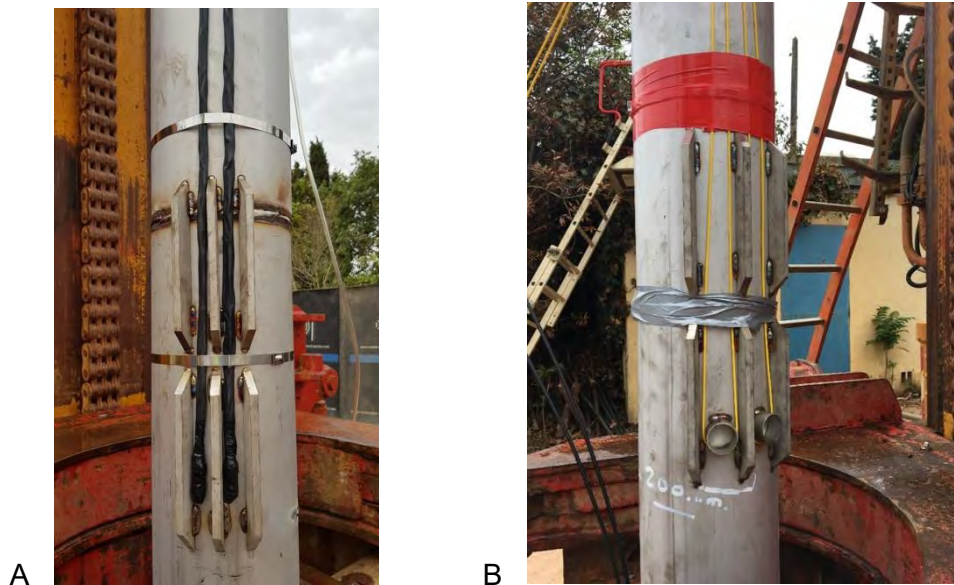


Figure 67 : (A) Extrémités basses (-202m) des 2 câbles de mesures de température par FO le long du tube inox installé et cimenté jusqu'à 240 m dans le forage T4. (B) Fibres (jaune) pour les mesures acoustiques et sismiques

	K-FBGA_1	K-FBGA_2		K-FBGA_1	K-FBGA_2		K-FBGA_1	K-FBGA_2
TN	0m	0m	Capteur no26	-74m		Capteur no56	-104m	
Capteur no1	-5m		Capteur no27		-75m	Capteur no57		-105m
Capteur no2	-10m		Capteur no28	-76m		Capteur no58	-106m	
Capteur no3	-15m		Capteur no29		-77m	Capteur no59		-107m
Capteur no4	-20m		Capteur no30	-78m		Capteur no60	-108m	
Capteur no5	-25m		Capteur no31		-79m	Capteur no61		-109m
Capteur no6	-30m		Capteur no32	-80m		Capteur no62	-110m	
Capteur no7	-35m		Capteur no33		-81m	Capteur no63		-111m
Capteur no8	-40m		Capteur no34	-82m		Capteur no64	-112m	
Capteur no9	-45m		Capteur no35		-83m	Capteur no65		-113m
Capteur no10	-50m		Capteur no36	-84m		Capteur no66	-114m	
Capteur no11	-55m		Capteur no37		-85m	Capteur no67		-115m
Capteur no12	-60m		Capteur no38	-86m		Capteur no68	-116m	
Capteur no13		-61m	Capteur no39		-87m	Capteur no69		-117m
Capteur no14	-62m		Capteur no40	-88m		Capteur no70	-118m	
Capteur no15		-63m	Capteur no41		-89m	Capteur no71		-119m
Capteur no16	-64m		Capteur no42	-90m		Capteur no72	-120m	
Capteur no17		-65m	Capteur no43		-91m	Capteur no73		-125m
Capteur no18	-66m		Capteur no44	-92m		Capteur no74		-130m
Capteur no19		-67m	Capteur no45		-93m	Capteur no75		-135m
Capteur no20	-68m		Capteur no46	-94m		Capteur no76		-140m
Capteur no21		-69m	Capteur no47		-95m	Capteur no77		-145m
Capteur no22	-70m		Capteur no48	-96m		Capteur no78		-150m
Capteur no23		-71m	Capteur no49		-97m	Capteur no79		-155m
Capteur no24	-72m		Capteur no50	-98m		Capteur no80		-160m
Capteur no25		-73m	Capteur no51		-99m	Capteur no81		-165m
			Capteur no52	-100m		Capteur no82		-170m
			Capteur no53		-101m	Capteur no83		-175m
			Capteur no54	-102m		Capteur no84		-180m
			Capteur no55		-103m	Capteur no85		-185m
						Capteur no86		-190m
						Capteur no87		-195m
						Capteur no88		-200m
						Bout du câble	-202m	-202m

Figure 68 : Position des 42 capteurs (K-FBGA_1) et 46 capteurs (K-FBGA_2) de type « réseaux de Bragg » des fibres optiques.

En parallèle de ces deux câbles dédiés à la mesure de température, la société Kloe a déployé 2 fibres optiques monomodes supplémentaires (gainés jaunes), pour pouvoir procéder ultérieurement à des mesures sismiques en collaboration avec le laboratoire Géosciences Montpellier. L'extrémité basse de ces 2 câbles est positionnée à -200 m (Figure 67B).

Compte tenu des contraintes techniques liées au chantier de foration du DENT4 qui s'est terminé fin novembre 2021, le système d'acquisition associé au système de monitoring n'a pas pu être installé avant la fin du chantier, ni les fibres raccordées à ce dernier. Les acquisitions pourront démarrer lorsque le container prévu pour les instrumentations du DENT4 sera installé sur site (Novembre 2022).

Cependant, à l'issue de la pose de ces 4 fibres (2 pour les mesures de températures, 2 autres pour les mesures acoustiques futures) et à leur mise en attente sécurisée en tête de forage, elles ont pu être testées avec succès en termes de continuité et d'intégrité physique. Il a ensuite été procédé à l'enroulement puis à la protection de ces dernières sur le tubing en tête de puits, dans la perspective de reprise des travaux de carottage à venir et en attendant de pouvoir ré-intervenir pour finaliser et mettre en route cette installation.

Le diagnostic réalisé lors de l'installation (Figure 69) indique que la fibre optique « Acousto_no2 » présente une légère atténuation sur l'ensemble de sa longueur (~ 450 m A/R), quelque peu supérieure à celle observée sur la fibre optique « Acousto_no1 » : cette information tend à rendre compte de petites contraintes appliquées sur celles-ci le long du tubing, sans pour autant contrarier la possibilité de l'exploiter pour les mesures acoustiques à venir. Il faudrait donc privilégier la fibre optique « Acousto_no1 » si une seule de ces 2 fibres devait être connectée et exploitée par la suite pour les mesures acoustiques.

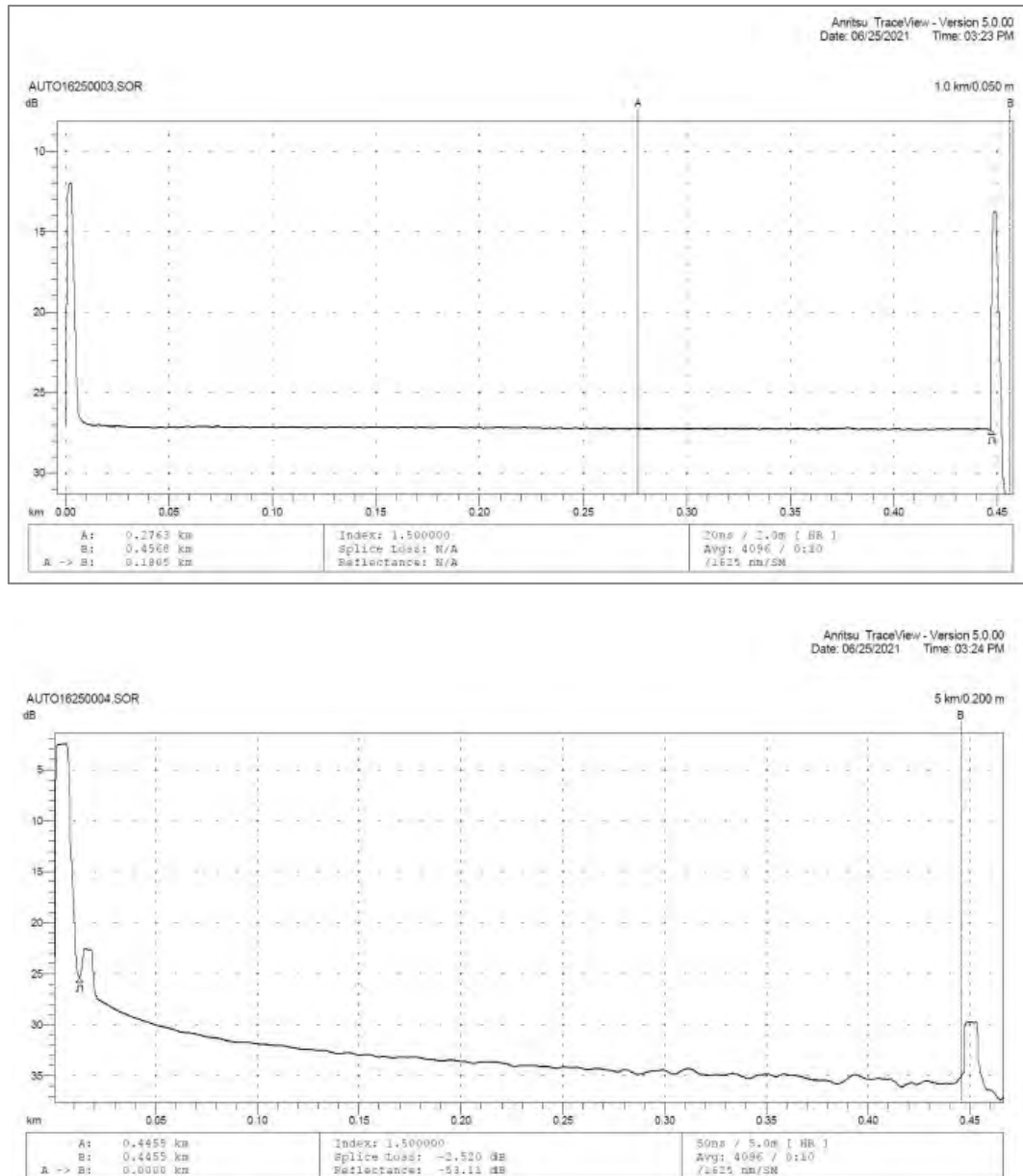


Figure 69 : Relevé de la mesure faite concernant la fibre optique « Acousto_no1 » (en haut) et « Acousto_no2 » (en bas)

3.4.3. Diagraphies de forage

Les acquisitions sur DEMENT1 et DEMENT2 ont été réalisées en Juin et Décembre 2020 (avant et après inversac). Les acquisitions sur DEMENT3 ont été réalisées le 13 Janvier 2021 (situation d'inversac depuis le 28 novembre 2020). Les acquisitions sur DEMENT4 ont été réalisées au mois de novembre 2021 (situation d'inversac depuis le 28 novembre 2020). Des mesures géophysiques (radioactivité gamma naturelle; rapport Th/K lié à la minéralogie des argiles, conductivité électrique, vitesse acoustique (V_p) comparées aux mesures ultrasoniques sur carottes (carrés noirs) ; calculs de porosité à partir des mesures de V_p comparées aux mesures de porosité sur carottes) et images de paroi ont été enregistrées sur ces ouvrages. Les images de résolution millimétrique permettent de mettre en évidence la présence des horizons karstiques ou de fractures colmatées avec de la calcite (Figure 70). Les horizons karstiques ou fractures ouvertes mis en évidence sur les images optiques présentent des anomalies de température, de conductivité électrique ou de pH (Figure 71). La synthèse détaillée des informations est présentée dans le rapport L14 BRGM/RP-77471-FR.

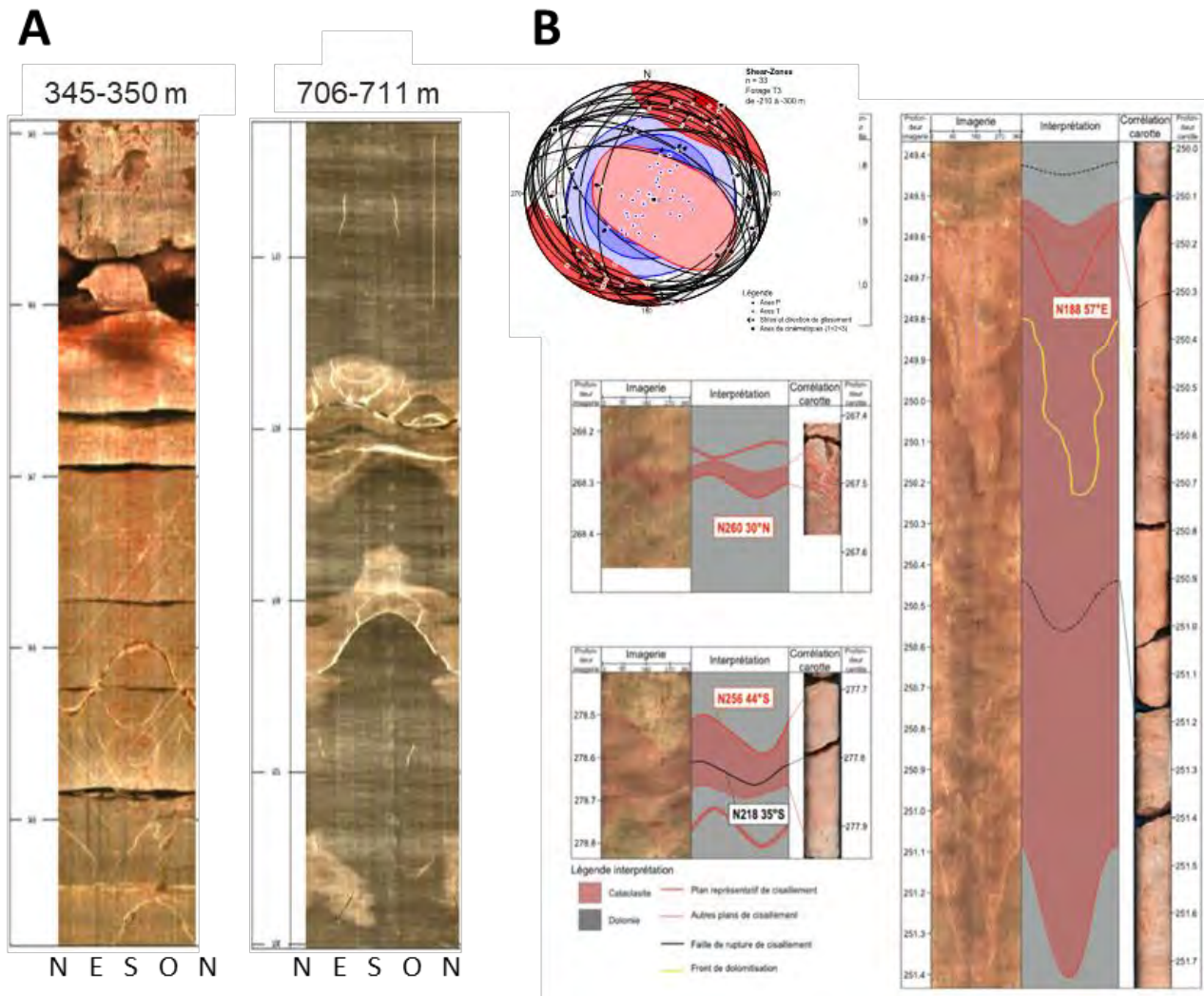


Figure 70 : Images optiques de paroi dans le forage DEMT4.

Note de la Figure 70. Les images de résolution millimétrique sont orientées par rapport au Nord et mettent en évidence la présence d'horizons karstiques (346 m, à gauche) ou de fractures colmatées avec de la calcite (709 m, à droite). **(B)** Cartographie de l'ensemble des structures à partir des images optiques (Widhen, 2021).

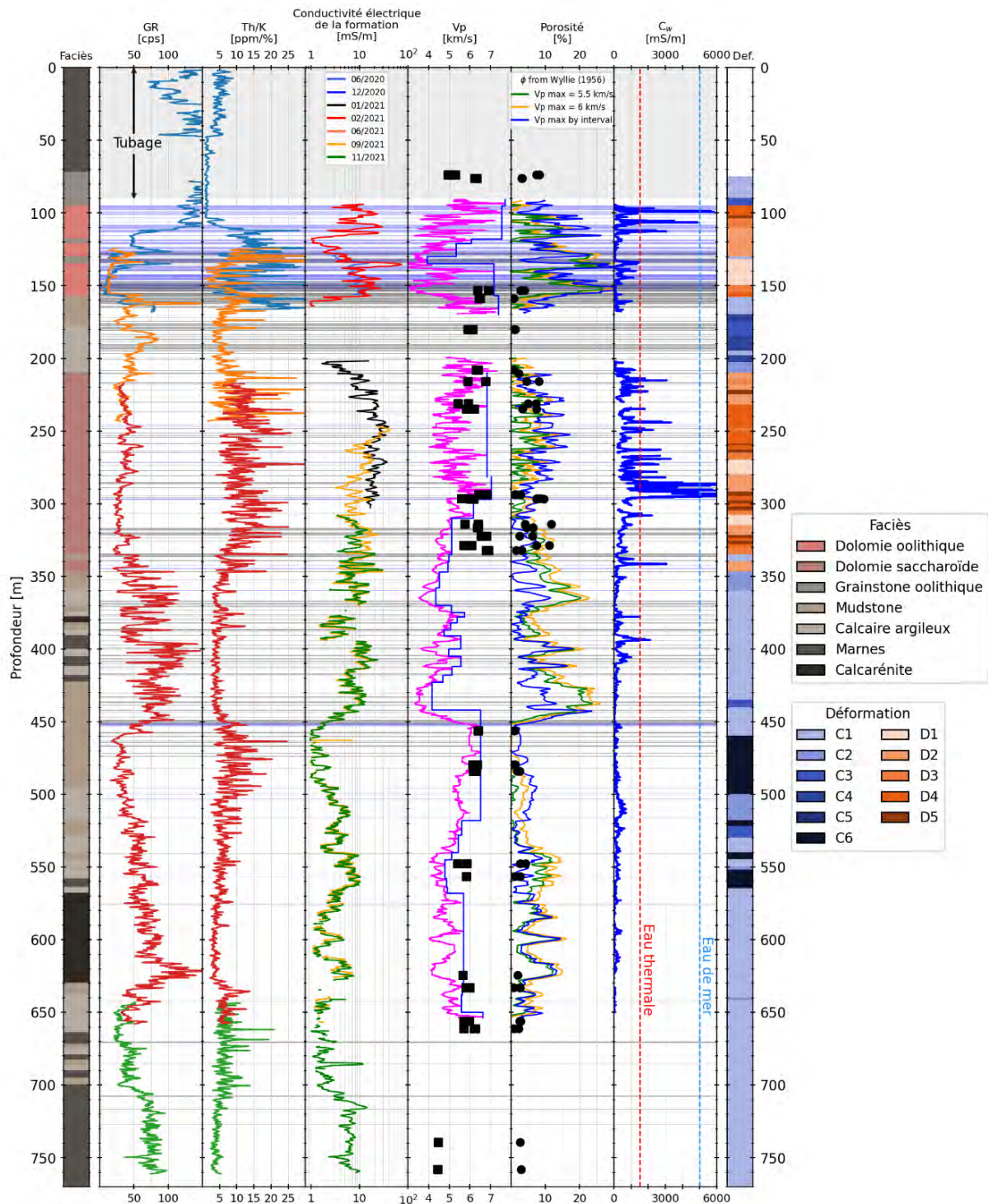


Figure 71 : Profils géophysiques dans les forages DEMT1, DEMT3 et DEMT4 du site de Balaruc.

Note de la Figure 71. De gauche à droite : lithologie déduite de l'analyse des carottes (Widhen, 2021) ; radioactivité gamma naturelle; rapport Th/K lié à la minéralogie des argiles, conductivité électrique de la formation, vitesse acoustique (Vp) comparées aux mesures ultrasoniques sur carottes (carrés noirs) ; calculs de porosité à partir des mesures de Vp comparées aux mesures de porosité sur carottes (ronds noirs) ; conductivité électrique du fluide poral ; déformations observées sur carottes (Widhen, 2021). Horizontalement : les karsts ou fractures ouverts sur les images optiques et avec une anomalie de température, de conductivité électrique ou de pH du fluide en forage sont soulignés en bleu ; ceux qui sont sans anomalie apparaissent en gris clair.

4. Conclusion

Le présent rapport constitue le livrable L10 du projet de recherche DEM'Eaux-Thau intitulé « **Élaboration d'un outil de gestion des ressources souterraines d'un hydrosystème karstique complexe en contexte méditerranéen** ». Ce projet est mené par le BRGM avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT ainsi que les partenaires opérationnels (laboratoires Géosciences Montpellier, Hydrosiences Montpellier et l'entreprise Synapse).

Cette étude scientifique pluridisciplinaire impliquait de caractériser à la fois la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème sur un territoire soumis à des enjeux économiques importants (thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme ...), à la fragilité de l'équilibre qui existe entre les différentes ressources en eaux souterraines (inversacs) et à la complexité du comportement des différents réservoirs souterrains.

Le projet de recherche a permis de mettre en place une instrumentation exceptionnelle pour d'une part répondre aux besoins de recherche et de connaissance indispensables à la gestion de la nappe du pli ouest, et d'autre part pour pérenniser des mesures minimales sur la nappe et faire de cette instrumentation un véritable observatoire, représentatif d'un karst littoral méditerranéen. Ces mesures seront utiles tant pour la gestion de l'aquifère que pour le besoin de suivre dans la durée et dans un contexte de changement climatique un tel système.

Cet observatoire est constitué par l'équipement de la source sous-marine de la Vise située dans la lagune de Thau, ainsi que par la réalisation et l'équipement de quatre ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 à quelques centaines de mètres de la source. Il complète celui réalisé à Sète au stade Michel (BSS003CGKO) en début de projet (L6 du projet DEM'Eaux Thau, [BRGM/RP-68549-FR](#)). Ces équipements ont été réalisés dans le cadre de l'investissement CPER n°1a (forage de Sète), n°1b (DEMENT) et n°3 (Vise).

Les suivis réalisés à la source sous-marine de la Vise permettent de préciser l'importance des flux de sortie de la source (débit moyen journalier compris entre 0.06 m³/s en basses eaux et 0.2 m³/s en crue). Le dispositif a également permis d'évaluer le volume d'eau saumâtre absorbé par la Vise pendant le phénomène d'inversac 2020/2022 (28/11/2020 au 14/03/2022, durée = 471 jours) qui est évalué à 6.7 millions de m³ (14 400 m³/j). Les informations hydrogéologiques collectées ont permis de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de l'inversac ainsi que de proposer différentes approches de modélisation mettant en relation les conditions hydrologiques et hydrogéologiques (basses eaux et hautes eaux de la lagune de Thau et de l'aquifère jurassique) avec le fonctionnement de la source de la Vise en période dite normale et en période d'inversac (cf. Livrable L11b, BRGM/RP-68483-FR).

Les différents instruments de mesure sur la Vise ont été vérifiés et entretenus notamment par des plongeurs professionnels au cours du projet (tous les 6 mois, sauf pendant la période d'inversac du 28/11/2020 au 14/03/2022).

L'objectif des quatre ouvrages DEMENT1, DEMENT2, DEMENT3 et DEMENT4 est multiple : reconnaissance géologique et hydrogéologique des horizons aquifères profonds (jusqu'à 759 m de profondeur) qui n'était pas connu auparavant, instrumentations pour suivis hydrogéophysiques (pression, conductivité, température, résistivité électrique). Les forages verticaux DEMENT3 et 4 ont livré 749 m de carottes dont l'analyse a fourni un log synthétique qui donnent un accès direct aux caractéristiques du réservoir ; ils permettent de valider les profondeurs des intervalles stratigraphiques, d'analyser les propriétés pétrophysiques des formations échantillonnées, et de comprendre les paléo-circulations qui ont affecté les

réservoirs carbonatés. Suite à ces descriptions, les carottes ont été stockées à la carothèque du BRGM à Orléans et sont donc référencées et librement accessibles.

L'ensemble de ces acquisitions a permis d'apporter des informations décisives pour la compréhension des mécanismes en jeu dans le déclenchement de l'inversac et d'ouvrir des pistes pour en assurer la gestion et l'anticipation. De même, les analyses géochimiques exceptionnelles liées à la réalisation de ces équipements et l'élaboration d'un modèle géologique 3D ont fourni des informations capitales sur l'origine des eaux thermales et les échanges terre-mer.

La plateforme expérimentale des forages constitue ainsi un complément expérimental d'exception pour suivre les évolutions physico-chimiques des eaux souterraines à différentes profondeurs et permettent la caractérisation des interactions entre les réservoirs karstiques profonds et superficiels dans la zone côtière de Balaruc-les-Bains où convergent des eaux douces, thermales, marines (cf. Livrable L5b, BRGM/RP-71957-FR). Les premiers résultats des observatoires de résistivité et les futures données des suivis de température par fibre optique mis en place dans le projet demanderont à être spécifiquement étudiés dans le cadre d'un autre projet.

Le projet DEM'EAUX terminé, ces équipements sont mis à disposition auprès de scientifiques, entreprises, d'étudiants, pour la réalisation de projets opérationnels (mises au point, tests de modes opératoires, matériels, éducatifs, ou de recherche).

5. Bibliographie

Abbaszadeh M.D., Cinco-Ley H. (1995). Pressure transient behavior in a reservoir with a finite-conductivity fault. S.P.E.-R.E Feb., 115-124.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis, World Oil.

Brillouet N., Neyens D. (2021). Projet DEM'EAUX THAU. FORAGES SCIENTIFIQUES. RAPPORT DE L'INSTALLATION DE L'INSTRUMENTATION EN FORAGE de DemT1 & DemT4. Sociétés KLOE et ImaGeau

Dewandel, B., Lanini, S., Lachassagne, P., Maréchal, J.-C. (2018). A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. J. Hydrol., 559, 89–99, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013>.

Dewandel B., Hakoun V., Lanini S., Ladouche B., Lamotte C., Maréchal J.-C. (2022). Analytical solutions for analysing pumping tests near an infinite vertical and anisotropic fault zone with finite thickness, storativity and hydraulic conductivity based upon unconventional application of well-image theory. Adv.in Water Res. Vol. 160, Feb. 2022, 104107. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104107.

Hunt, B. and M. Smith (2008). Improved spring depletion solution and analysis. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No. 2, 80-89.

Ladouche B, Millot R, Guerrot C, Lamotte C. (2011). Caractérisation géochimique des eaux de l'hydrosystème de la presqu'île de Balaruc-Les-Bains lors d'un épisode d'inversac, BRGM/RP 59922-FR- 93pp., 4 ann., 24 ill.

Ladouche B, Lamotte C. (2014). Inversac de la source sous-marine de la Vise en 2014. Recueil des informations disponibles en date du 22/07/2014. Rapport BRGM RP-63841-FR – aout 2014.

Ladouche B, Lamotte C. (2015). Inversac de la source sous-marine de la Vise en 2014 : Recueil et analyse des données disponibles. Rapport final. BRGM/RP - 64812 - FR, 82 p., 56 ill. .

Ladouche B., Lamotte C., Hemelsdael R., Petre M.A., Dewandel B., Léonardi V., Seidel A.L., Seranne M. (2019). DEM'Eaux Thau – Synthèse et valorisation des données historiques sur l'hydrosystème de Thau (34) -Livrabale L1. Rapport final. BRGM/RP-68483-FR

Pétre M-A., Ladouche B., Seidel J-L., Hemelsdaël R., de Montety V., Batiot-Guilhe C., Lamotte C. (2020). Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karst and thermal aquifer (Balaruc peninsula near Montpellier, France). HESS, doi.org/10.5194/hess-2020-292

Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal. 17: 589–600.

Thiéry D. (2012). Code de calcul CATHERINE - Principe et mode d'emploi. Rapport final. BRGM/RP-61430-FR, 39 p., 16 fig., 5 tabl.

Widhen F., Séranne M., Ballas G., Labaume P., Le-Ber E., Pezard P., Girard F., Lamotte C., Ladouche B. (Soumis). Long-term evolution of a carbonate reservoir submitted to fresh, saline and thermal waters interactions - Jurassic carbonates in the coastal area of the Gulf of Lion margin (southern France).

Widhen Florian (2021). Interactions déformation altération dans un réservoir karstique côtier de la marge proximale du Golfe du Lion (presqu'île de Balaruc) Étude de carottes et diagraphies du forage DEM'EAUX Thau. Stage M2, Géoscience Montpellier, Université de Montpellier.

Annexe 1

Extrait du Dossier des ouvrages exécutés de DEMENT1 et DEMENT2

Projet Dem'Eaux Thau – Réalisation de deux piézomètres – Site de Balaruc-les-Bains

Dossier des Ouvrages Exécutés



Rapport n°108548/version A – Novembre 2020

Projet suivi par Vincent DURAND - 04.67.15.91.10 - vincent.durand@anteagroup.com

Antea Group

Parc d'Activité de l'Aéroport

180, impasse John Locke
34470 PEROLS

www.anteagroup.fr/fr

Fiche signalétique

Projet Dem'Eaux Thau – Réalisation de deux piézomètres – Site de

Balaruc-les-Bains

Dossier des Ouvrages Exécutés

CLIENT	SITE
BRGM	Balaruc-les-Bains
Direction Régionale Occitanie	
1 039 rue de Pinville	
34000 Montpellier	
Claudine Lamotte	
04.67.15.79.80	
c.lamotte@brgm.fr	

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet	Vincent DURAND
Interlocuteur commercial	Vincent DURAND
	Implantation de Montpellier
Implantation chargée du suivi du projet	04.67.15.91.10
	secretariat.montpellier-fr@anteagroup.com

Rapport n°	108548
Version n°	version A
Votre commande et date	
Projet n°	LROP190104

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	MICHEL	Ingénieur Hydrogéologue	Novembre 2020	
Approbation	DURAND	Chef de projet	Novembre 2020	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	01/2021	23	2	Version initiale

Sommaire

1. Contexte et objectifs	x
2. Situation géographique des piézomètres	x
3. Réalisation des piézomètres	x
3.1. Déroulements des travaux	x
3.1.1. Piézomètre intermédiaire	x
3.1.2. Piézomètre superficiel	x
3.2. Caractéristiques du piézomètre intermédiaire	x
3.2.1. Foration	x
3.2.2. Inspection	x
3.2.3. Equipement	x
3.2.4. Coupe technique et lithologique	x
3.3. Caractéristiques du piézomètre superficiel	x
3.3.1. Foration	x
3.3.2. Equipement	x
3.3.3. Coupe technique et lithologique	x
4. Pompages d'essai	x
4.1. Déroulement des pompages	x
4.2. Dispositif des pompages	x
4.3. Résultats et interprétation	x
4.3.1. Pompage sur le piézomètre intermédiaire	x
4.3.2. Pompage sur le piézomètre superficiel	x

Table des figures

Figure A- 1 : Localisation des deux piézomètres sur fond IGN (Source : Géoportail) ..	93
Figure A- 2: regards de tête de puits DEMENT1 et DEMENT2.....	93
Figure A- 3: 132.5 m : Foration au PDC Ø 270 mm passage d'une fracture productrice d'eau très argileuse et vue de cette fracture lors de l'inspection vidéo .	95
Figure A- 4: Protection du chantier avec des barrières scellées au sol du parking et habillées de bâche anti-bruit	96
Figure A- 5: Bac de récupération des eaux de forage boueuses avec cyclonage et décantation	97
Figure A- 6 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm	97
Figure A- 7: cimentation finale avec alimentation du coulis par toupie	98
Figure A- 8 : Début foration du piézomètre superficiel (DEMENT2)	99
Figure A- 9 : Perforation d'un réseau lors de la foration du piézomètre superficiel (DEMENT2)	99
Figure A- 10 : Nettoyage du piézomètre superficiel	100
Figure A- 11 : Coupe lithologique et technique du piézomètre intermédiaire (DEMENT1)	103
Figure A- 12: Coupe lithologique et technique du piézomètre superficiel (DEMENT2)...	105
Figure A- 13 Dispositif de pompage	106
Figure A- 14 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai longue durée réalisé sur le piézomètre intermédiaire (DEMENT1)	108
Figure A- 15: Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai longue durée réalisé sur le piézomètre superficiel	110
Figure A- 16 : Exemple de carotte – Caisse n°65	130

Table des annexes

Annexe I :	Planche photo de différentes étapes du chantier Piézomètre intermédiaire
Annexe II :	Planche photo des cuttings du Piézomètre intermédiaire

1. Contexte et objectifs

Dans le cadre du projet de recherche Dem'Eaux Thau, porté par le BRGM en collaboration avec le Syndicat mixte du bassin de Thau, la ville de Balaruc-les-Bains, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, l'État, la Région Occitanie et Montpellier Méditerranée Métropole, le BRGM souhaite réaliser un forage profond 600 à 700 m accompagné de deux piézomètres d'observation d'environ 50 m et 150 m de profondeur. Les deux piézomètres, réalisés par la société AD Forage de mars à mai 2020, se situent à proximité du forage F6 des Thermes de Balaruc-les-Bains.

L'objectif du forage profond est d'acquérir des données géologiques et hydrogéologiques et de servir de plateforme expérimentale. À l'issue de la réalisation de ce forage et des deux piézomètres associés, ces infrastructures seront mises à disposition aux unités de recherche en géosciences.

Le BRGM a confié à Antea Group une mission de maîtrise d'œuvre pour la réalisation de ces forages de reconnaissance et des pompages d'essai associés. L'objectif étant de concevoir les ouvrages dans les règles de l'art tout en l'adaptant à la géologie rencontrée.

Ce présent rapport constitue le Dossier des Ouvrages Exécutés des deux piézomètres, superficiel (DEMT 2) et intermédiaire (DEMT 1), réalisés par AD Forage de mars à mai 2020.

2. Situation géographique des piézomètres

Les piézomètres de reconnaissance superficiel et intermédiaire se situent sur la presqu'île de Balarucles-Bains à moins de 5 mètres du forage F6 des thermes de Balaruc. Les informations géographiques sont les suivantes :

- commune : Balaruc-les-Bains (34540) ;
- référence cadastrale : 000/BD/0031 ;
- codes BBS : DEMENT1 : BSS004AXZH
- - DEMENT2 : BSS004AXZJ
- coordonnées géographiques approximatives (Lambert 93) :
 - o X : 754 671 / Y : 6 260 888 ; o
 - Altitude (précision MNT) : 8 m NGF ;
- accès : l'accès au site se fait par l'Allée des sources (route à sens unique), en arrivant sur la presqu'île en direction des thermes par l'avenue des Hespérides prendre à droite par l'avenue de la Cadole.

La Figure 1 présente la localisation des piézomètres superficiel (DEMENT2) et intermédiaire (DEMENT1). La Figure 2 montre les regards de têtes de puits après les travaux.

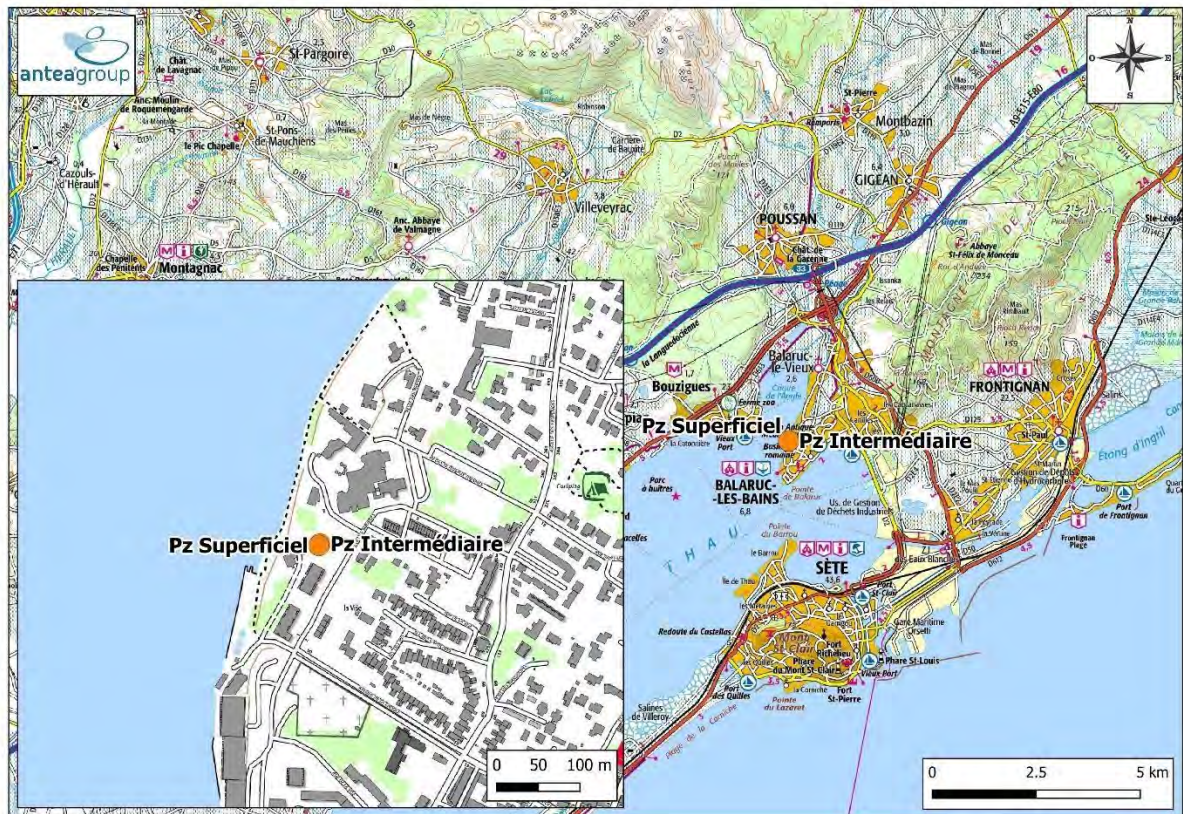


Figure A- 1 : Localisation des deux piézomètres sur fond IGN (Source : Géoportail)



Figure A- 2: regards de tête de puits DEMT1 et DEMT2

3. Réalisation des piézomètres

3.1. Déroulements des travaux

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

3.1.1. Piézomètre intermédiaire

Les travaux sur le piézomètre intermédiaire se sont déroulés de la manière suivante :

- **Du 17/02/20 au 26/02/20** : mise en place du chantier et installation des barrières Héras. Renforcement des barrières par des jambes de force scellées au sol sur 0,5 m. Mise en place des bâches acoustiques. Implantation du piézomètre intermédiaire le 26 février au matin en présence de C. Lamotte du BRGM et de N. Masscheleyn de la Mairie de Balaruc ;
- **Le 27/02/20** : visite du chantier et accord de rejet d'eaux claires dans le réseau des eaux pluviales par le service de gestion des eaux pluviales urbaines de Sète Agglopôle Méditerranée, après passage dans un dispositif de traitement des eaux boueuses (cyclone et benne de décantation) ;
- **Du 27/03/20 au 04/03/20** : démarrage de la foration du piézomètre intermédiaire au marteau fond de trou tubage à l'avancement (TAV) Ø 406 mm de 0 à 32 m ;
- **Du 05/03/20 au 06/03/20** : approvisionnement des tubages pour le marteau fond de trou TAV Ø 323 mm et descente de ces tubages jusqu'à 32 m ;
- **Du 09/03/20 au 10/03/20** : foration au marteau fond de trou TAV Ø 323 mm de 32 à 55 m de profondeur. Débit à la foration 15 à 20 m³/h, température = 21 °C, conductivité = 10,8 µS/cm (le 10/03 à 13h) ;
- **Du 11/03/20 au 13/03/20** : foration au marteau fond de trou TAV Ø 323 mm de 55 à 78 m de profondeur et soufflage. Débit au soufflage à 78 m de profondeur : 50 à 100 m³/h, température = 21 °C, conductivité = 2100 µS/cm (le 11/03/20 à 16h) ;
- **Le 17/03/20** : début du confinement lié au coronavirus ;
- **Le 19/03/20** : mise en sécurité du chantier ;
- **Du 01/04/20 au 02/04/20** : reprise des travaux, préparation des équipements de foration au marteau fond de trou Ø 270 mm, modification de la benne de décantation ;
- **Le 03/04/20** : foration au marteau fond de trou Ø 270 mm de 78 à 87 m de profondeur ;

- **Le 07/04/20** : foration au marteau fond de trou Ø 270 mm de 87 à 102 m de profondeur - débit au soufflage à 102 m de profondeur : environ 100 à 150 m³/h ; Le débit important génère un avancement lent, après concertation, il est décidé de remonter le train de tiges et de monter un outil PDC Ø 270 mm à la place du MFT ;
- **Le 08/04/20** : manœuvre du train de tiges et foration au PDC Ø 270 mm de 102 à 127 m de profondeur - débit au soufflage à 127 m de profondeur : environ 100 m³/h, température = 21 °C, conductivité = 2080 µS/cm (le 09/04/20 à 18h) ;
- **Le 09/04/20** : foration au PDC Ø 270 mm de 127 à 168 m de profondeur. Une fracture importante est traversée entre 132.0 et 132.5 m de profondeur augmentant sensiblement le débit (de l'ordre de 200 m³/h) avec une eau très chargée en argiles rouges. L'arrêt du forage est décidé vers 17h00 devant l'impossibilité de gérer un tel débit à la foration. Intervention de la gendarmerie durant le soufflage en fin d'AM pour constater un défaut de filtration des eaux avant leur rejet ;



Figure A- 3: 132.5 m : Foration au PDC Ø 270 mm passage d'une fracture productrice d'eau très argileuse et vue de cette fracture lors de l'inspection vidéo

Le 10/04/20 : début de remontée du train de tiges, un sondage pour mesurer le fond du trou permet de constater une retombée d'environ 5 m de cutting (fond du forage à 163 m de profondeur) ;

- **Le 14/04/20** : fin de remontée du train de tiges. Attente de la disponibilité des tubages PVC (production ralentie du fait du confinement) ;
- **Le 21/04/20** : récupération des tubages PVC et réalisation de l'inspection vidéo préalable au tubage. La zone saine sans cavité sélectionnée pour la cimentation de pied se situe entre 132 et 112 m de profondeur.
- **Le 23/04/20** : mise en place du double tubage PVC sur DMT1 o tubage PVC Ø 112 – 125 mm plein de 128.3 m de profondeur à la surface muni d'un cône inversé (Ø ext. 172 mm – Ø int. 112 mm) à sa base (pour faciliter la remontée des outils de diagraphies

depuis la zone en trou nu) et d'une ombrelle de cimentation installée à 128.12 m de profondeur ;

o tubage PVC Ø 52 – 60 mm crépiné de 119.5 m à 48.45 m de profondeur (slot 2 mm) et plein de 48.45m de profondeur à la surface

- **Le 24/04/20** : sécurisation de l'ombrelle de cimentation avec du gravier puis du sable fin – top sable avant la première cimentation 127.3 m de profondeur. Injection de 80 l de coulis PMES + 20 l de gravier – top à 126.4 m de profondeur puis injection du bouchon de pied en fin de journée (1040 l de coulis PMES de densité 1.8).
- **Du 27/04/20 au 29/04/20** : contrôle du top ciment à 119.5 m de profondeur, mise en place de graviers de comblement siliceux roulé (2 – 4 mm) jusqu'à 45 m de profondeur pour éviter toute injection dans les fractures ouvertes du sommet des calcaires jurassique capté par le F6. Injection en fin de journée du 29/04/20 de 80 l de coulis PMES de densité 1.8. Remontée du tubage de travail Ø 323 mm.
- **Du 30/04/20 au 01/05/20** : contrôle du top ciment à 43.7 m de profondeur et Injection en 2 passes de 800 l et 2 400 l de coulis PMES de densité 1.8. Remontée du tubage de travail Ø 406 mm.
- **Le 07/05/20** : cimentation finale, injection d'environ 4 m³ de coulis PMES livré en toupie
- **Du 20/05/20 au 22/05/20** : réalisation du regard de tête de puits avec une buse béton Ø 800 mm et tampon fonte DN 800 mm et réfection de la dalle béton autour du regard.

Les figures 4 à 7, illustrent les différentes étapes du chantier décrites précédemment. Une planche photographique complémentaire est disponible en Annexe 1.



Figure A- 4: Protection du chantier avec des barrières scellées au sol du parking et habillées de bâche anti-bruit



Figure A- 5: Bac de récupération des eaux de forage boueuses avec cyclonage et décantation



Figure A- 6 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm



Figure A- 7: cimentation finale avec alimentation du coulis par toupie

3.1.2. Piézomètre superficiel (DEMT2)

Les travaux sur le piézomètre superficiel se sont déroulés de la manière suivante :

Le 12/05/20 : foration au marteau fond de trou Ø 270 mm de 0 à 5 m de profondeur.
Perforation d'une canalisation d'eau de ville (PE DN 25 mm) non identifiée dans les DICT;

- **Le 14/05/20** : réparation et reprise foration au marteau fond de trou Ø 270 mm de 5 à 10 m de profondeur ;
- **Le 18/05/20** : foration au PDC Ø 220 mm de 10 à 40 m de profondeur et pose du tubage PVC Ø 112/125 mm constitué de tubes pleins avec centreurs tous les 6 m de 0 à 20,6 m et de tubes crépinés de 20,6 à 40,7 m. Mise en place du gravier (2 – 4 mm) de 40.6 m à 19,4 m et lit de sable de 18,5 à 19,4 m ;
- **Le 19/05/20** : cimentation PMES d=1,8 de 0 à 18,50 m ;

- **Du 20/05/20 au 22/05/20** : réalisation du regard de tête de puits avec une buse béton Ø 800 mm et tampon fonte DN 800 mm et réfection de la dalle béton autour du regard.



Figure A- 8 : Début foration du piézomètre superficiel (DEMT2)



Figure A- 9 : Perforation d'un réseau lors de la foration du piézomètre superficiel (DEMT2)



Figure A- 10 : Nettoyage du piézomètre superficiel

3.2. Caractéristiques du piézomètre intermédiaire (DEMT1)

3.2.1. Foration

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

La foration s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Etape 1 : **de 0 à 32 m** : foration au marteau fond de trou TAV Ø 406 mm ;
- Etape 2 : **de 32 à 78 m** : foration au marteau fond de trou TAV Ø 323 mm ;
- Etape 3 : **de 78 à 102 m** : foration au marteau fond de trou Ø 270 mm ;
- Etape 4 : **de 102 à 168 m** : foration au PDC Ø 270 mm ;

Les diamètres de foration sont les suivants :

- **de 0 à 32 m** : Ø 420 mm ;
- **de 32 à 78 m** : Ø 340 mm ;
- **de 78 à 102 m** : Ø 270 mm ;
- **de 102 à 168 m** : Ø 270 mm ;

3.2.2. Inspection

L'inspection vidéo réalisée de 78 m à 162 m avant la pose de l'équipement en PVC a permis de mettre en évidence les principales zones de fractures ouvertes aux profondeurs suivantes :

- **de 77.6 à 77.85 m** : petite cavité ;
- **de 78.6 à 79.8 m** : petite cavité avec dépôts d'argile rouge ;
- **de 80.6 à 81.1 m** : petite cavité ;
- **de 85.7 à 85.95 m** : petite cavité ;
- **de 86.2 à 86.4 m** : petite cavité ;
- **de 88.9 à 89.85 m** : cavité de forme complexe ;
- **de 94.85 à 94.1 m** : petite cavité ;
- **de 96.1 à 96.4 m** : petite cavité ;
- **de 97.1 à 98.9 m** : cavité de forme complexe ;
- **de 106.3 à 106.85 m** : petite cavité ;
- **de 107.45 à 107.65 m** : petite cavité ;
- **de 132.9 à 134.7 m** : cavité importante et de forme complexe ;
- **de 146.4 à 146.7 m** : petite cavité ;
- **de 149.75 à 149.9 m** : petite cavité de forme régulière avec des parois très arrondies ;
- **de 155.0 à 155.25 m** : petite cavité.

3.2.3. Equipement

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

L'équipement du piézomètre est le suivant :

- **de 0 à 130 m** : tube PVC Ø 112/125 mm ; o **de 0 à 44 m** : coulis de ciment ; o **de 44 à 110 m** : graviers ;
- **de 130 à 163 m** : tube PVC crépiné Ø 112/125 mm slot 1 mm et bouchon de fond ; o **de 110 à 128 m** : coulis de ciment avec ombrelle de cimentation à 128 m ;
- **de 163 à 168 m** : sédiments.

L'équipement du piézomètre secondaire (destiné à la pose d'une sonde Imageau) est le suivant : • **de 0 à 119.5 m** : tube PVC Ø 52/60 mm, crépiné de 119.5 à 48.45 m de profondeur (slot 2 mm) ; o **de 44 à 119.5 m** : gravier roulé 2/4 mm o **de 0 à 44 m** : coulis de ciment PMES densité 1.8

3.2.4. Coupe technique et lithologique

La Figure 12 ci-après présente la coupe lithologique et technique du piézomètre intermédiaire (DEMT1).

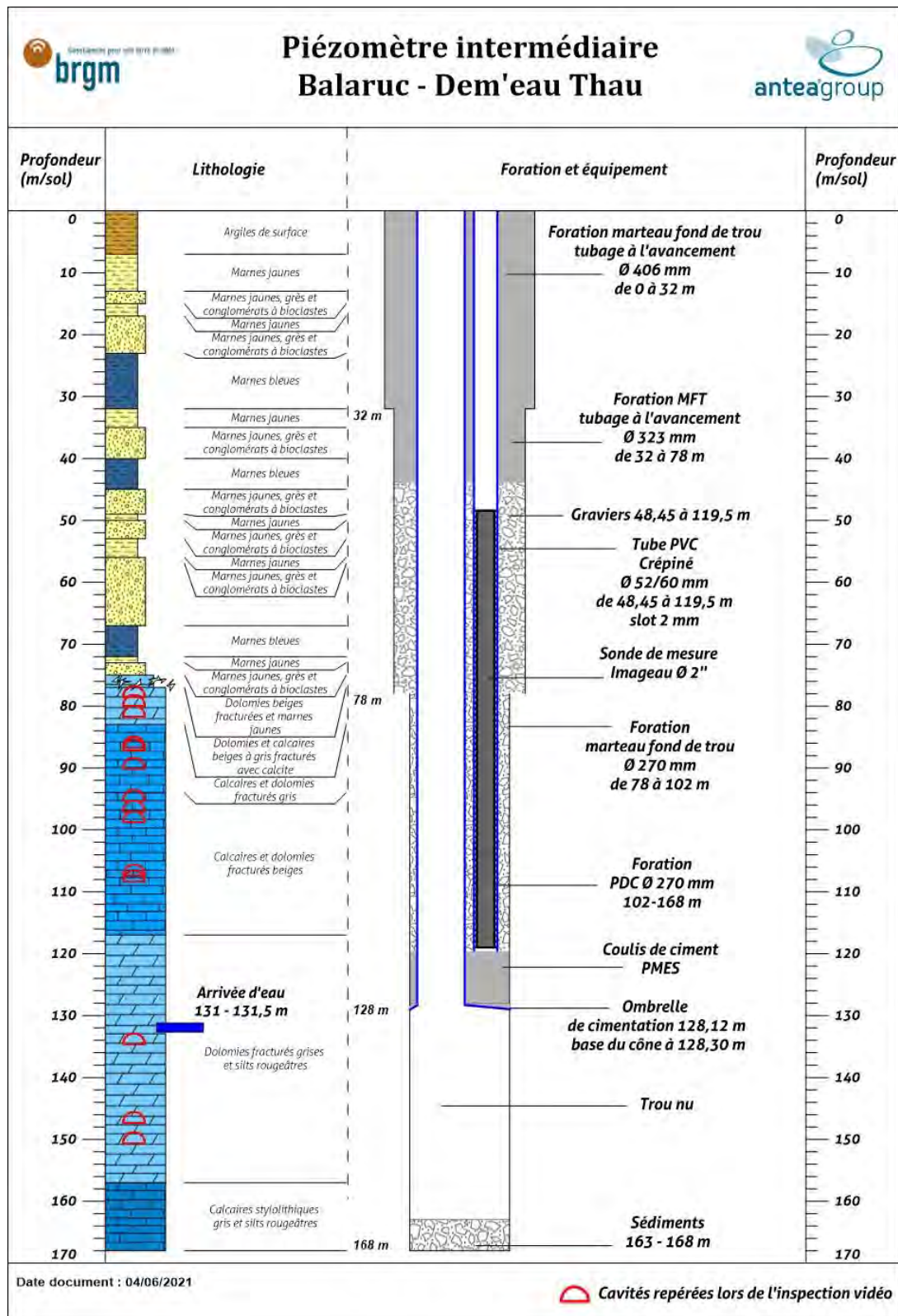


Figure A- 11 : Coupe lithologique et technique du piézomètre intermédiaire (DEMT1)

3.3. Caractéristiques du piézomètre superficiel (DEMT2)

3.3.1. Foration

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

La foration s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Etape 1 : **de 0 à 10 m** : foration au marteau fond de trou Ø 270 mm ;
- Etape 2 : **de 10 à 40,7 m** : foration au PDC Ø 220 mm ;

Les diamètres de foration sont les suivants :

- **de 0 à 10 m** : Ø 270 mm ;
- **de 10 à 40,7 m** : Ø 220 mm ;

3.3.2. Equipement

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

L'équipement du forage est le suivant :

- **de 0 à 20,6 m** : tube PVC Ø 112/125 mm avec centreurs tous les 6 m
de 0 à 18,5 m : coulis de ciment PMES (d=1,8) ;
- **de 18,5 à 19,4 m** : lit de sable ;
- **de 20,6 à 40,7 m** : tube PVC crépiné Ø 112/125 mm slot 1 mm et bouchon de fond ; o **de 19,4 à 40,7 m** : graviers ;

3.3.3. Coupe technique et lithologique

La figure 12 ci-après présente la coupe lithologique et technique du piézomètre superficiel (DEMT2).

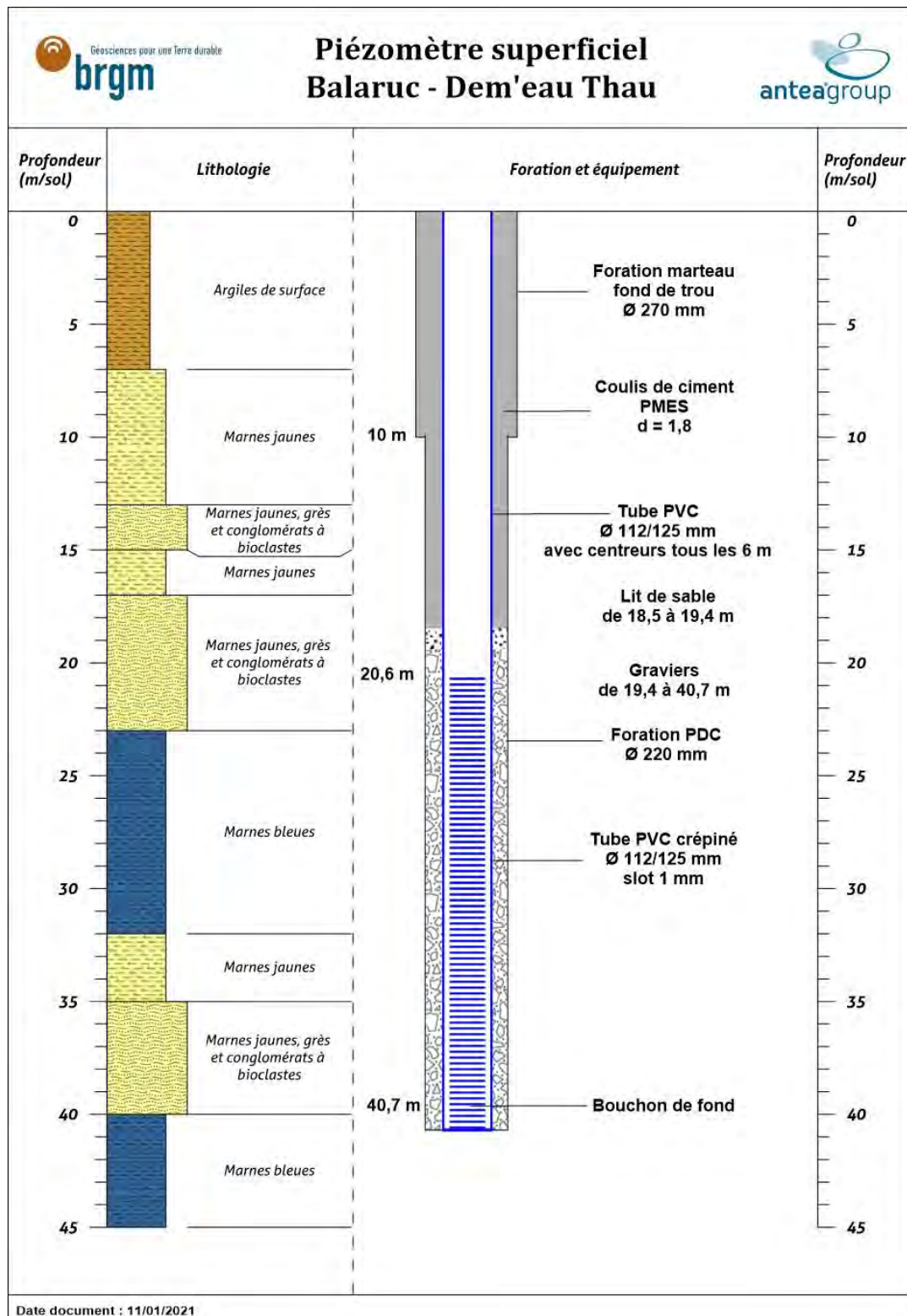


Figure A- 12: Coupe lithologique et technique du piézomètre superficiel (DEMT2)

4. Pompages d'essai

4.1. Déroulement des pompages

Des pompages d'essai ont été réalisés sur les deux ouvrages et se sont déroulés de la façon suivante :

- **du 27 au 28 mai 2020** : pompage de longue durée (24 h) à un débit de 25,5 m³/h sur le piézomètre intermédiaire ;
- **le 2 juin** : pompage de courte durée (4 h) à un débit de 6,3 m³/h sur le piézomètre superficiel ;

4.2. Dispositif des pompages

Le dispositif de pompage installé, similaire pour les deux piézomètres, est le suivant :

- une pompe immergée 4" installée à une profondeur de 30 m pour Piézomètre-Superficiel et de 50 m pour Piézomètre-Intermédiaire,
- un dispositif de suivi des différents paramètres (niveau, température, conductivité et débit) composé d'un capteur de pression immergé calibré placé au-dessus de la pompe et d'un débitmètre électromagnétique DN 50 mm avec un enregistreur;
- un manomètre et une vanne de réglage de débit ;
- un tubing de mesure en PVC ;
- un robinet de prélèvement ;
- une canalisation de rejet provisoire en direction du réseau d'eaux pluviales ;



Figure A- 13 Dispositif de pompage

4.3. Résultats et interprétation

4.3.1. Pompage sur le piézomètre intermédiaire (DEMT1)

Le pompage longue durée s'est déroulé du 27 mai à 8h38 au 28 mai à 9h48, soit plus de 24 h de pompage à un débit constant de 25,5 m³/h. Les données sont représentées graphiquement sur la figure 14.

Le niveau dynamique du piézomètre intermédiaire présente un rabattement quasi instantané d'environ 0.5 m dès le début du pompage puis reste stable durant tout l'essai. En fin de pompage, le retour au niveau initial est évidemment également instantané.

Il est à noter une différence de 0.2 à 0.5 m entre les mesures de niveau manuelles et celle enregistrées sans explication évidente autre qu'un défaut de calibration du datalogger.

La conductivité augmente tout au long du premier tiers de l'essai jusqu'à un maximum de 2,89 mS/cm puis décroît lentement jusqu'à 2.7 mS/cm. Après la mise en équilibre de la température lors du début du pompage (mesure extérieure dans un bac - diminution en quelques minutes de 22.0 °C à 19.2 °C), celle-ci reste relativement stable entre 19,2 et 19.5°C durant tout l'essai.

Aucun impact n'est à noter sur les ouvrages de suivi à proximité : F3, F6 et le piézomètre superficiel (DEMT2).

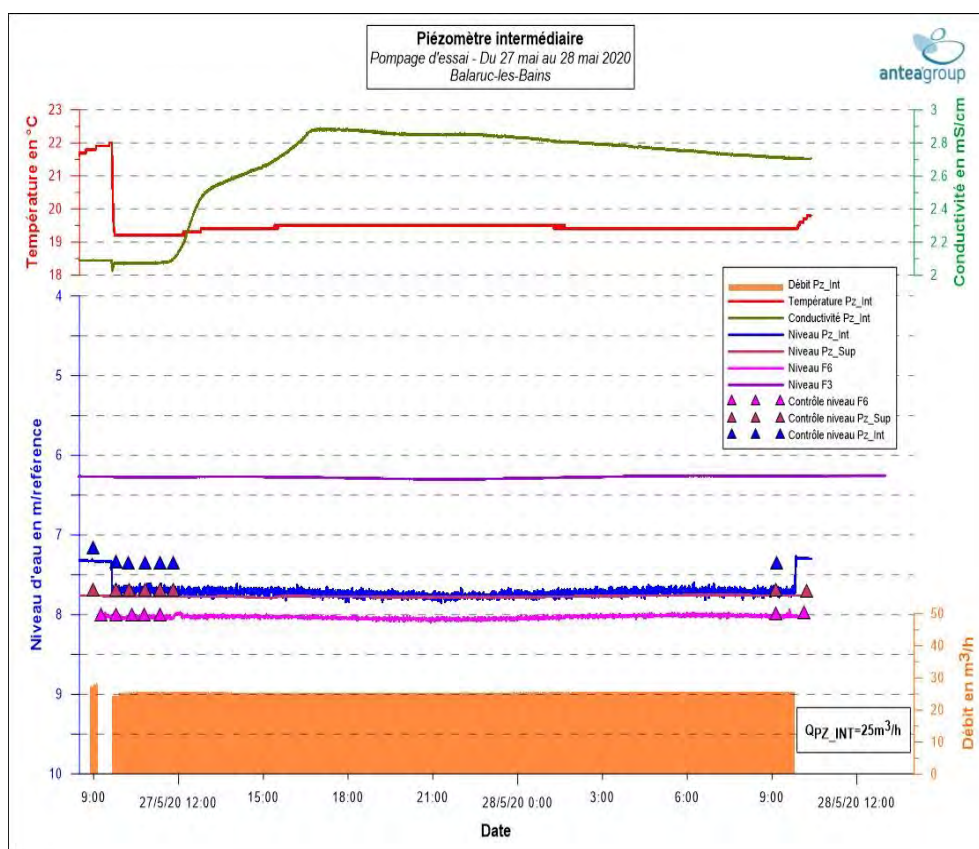


Figure A- 14 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai longue durée réalisé sur le piézomètre intermédiaire (DEMT1)

4.3.2. Pompage sur le piézomètre superficiel (DEMT2)

Le pompage longue durée a été réalisé le 2 juin de 10h à 14h, soit 4 h de pompage, à un débit de départ d'environ 12 m³/h puis pour éviter le dénoyage de la pompe, il a été décidé de réduire le débit à 6,3 m³/h. Les données sont représentées graphiquement sur la figure 15. Les niveaux sont représentés en mètres par rapport au haut du tubage.

Le niveau baisse fortement lors du débit initial de 12 m³/h (rabattement de l'ordre de 16 m en 30 minutes) puis, après une remontée d'environ 8 m suite à la réduction du débit, tend vers une lente décroissance régulière de 0.2 m à l'heure.

La conductivité est élevée, mais ne varie pas au cours de l'essai. Il en est de même pour la température qui reste stable entre 23.2°C et 23.5°C.

De même pour le piézomètre superficiel, aucun impact n'est observé sur les ouvrages F3, F6 et le piézomètre intermédiaire.

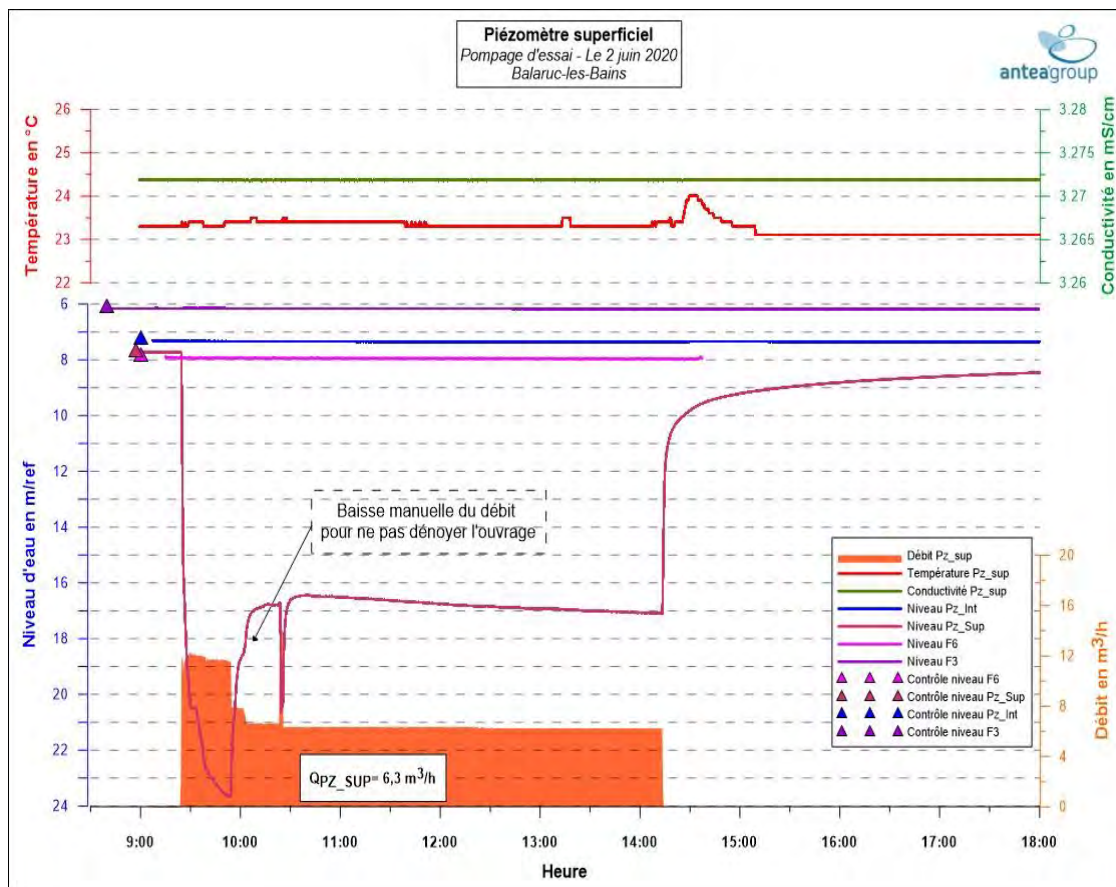


Figure A- 15: Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai longue durée réalisé sur le piézomètre superficiel



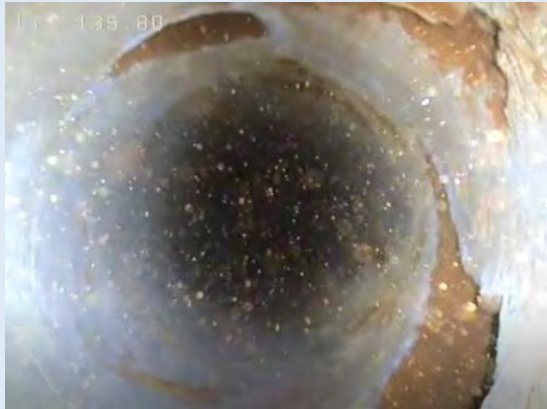
ANNEXES

Annexe I : Planche photo de différentes étapes du chantier du piézomètre intermédiaire

Annexe II : Planche photo des cuttings du Piézomètre intermédiaire

Annexe I : Planche photo de différentes étapes du chantier du piézomètre intermédiaire





136 - 137 m : zone avec de nombreuses cavités de section décimétrique dont les parois sont en grande partie tapissées de cristaux de calcite automorphe (vue axiale et vue latérale)

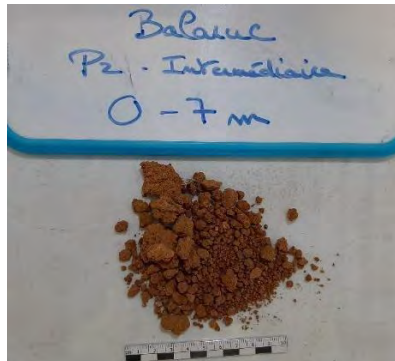


128 m : zone saine, non fracturée, adaptée à la mise en œuvre de l'ombrelle de cimentation

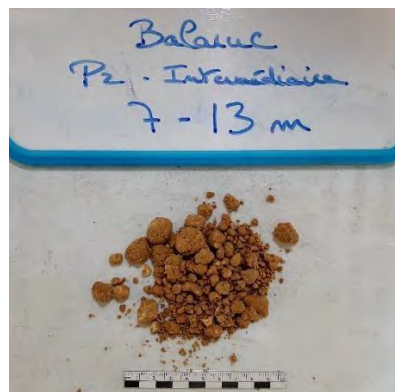


Tubages et crépines PVC Ø 52 – 60 mm et 112 – 125 mm

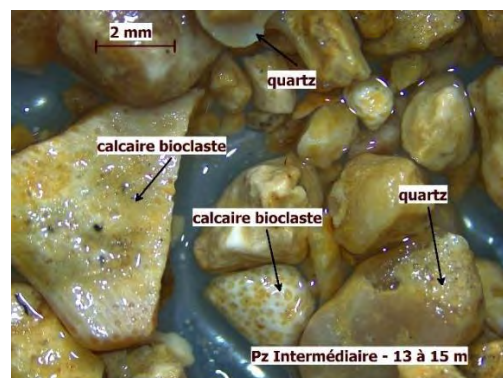
Annexe II : Planche photo des cuttings du Piézomètre intermédiaire



0-7m : Argile de surface



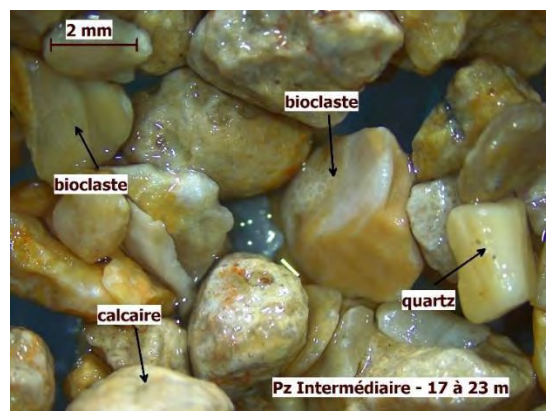
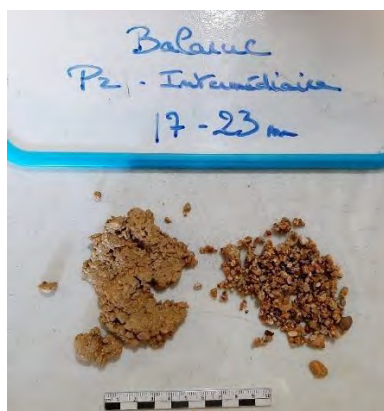
7-13 m : marnes jaunes



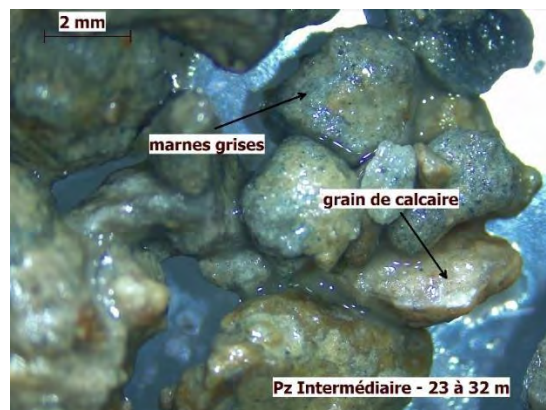
13-15 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



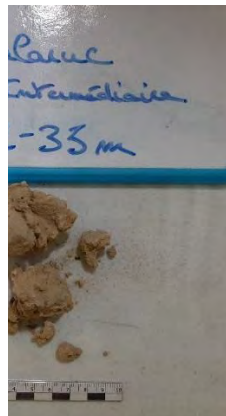
15-17 m : Marnes jaunes



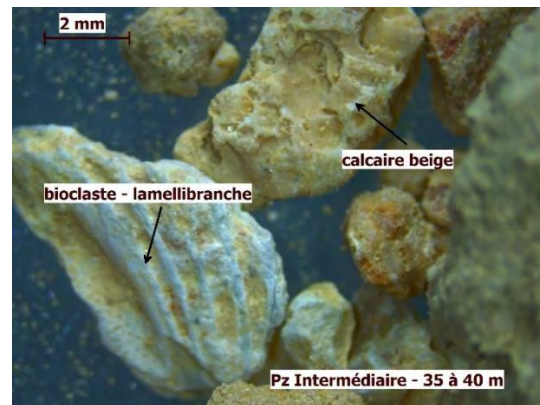
17-23 m : Marnes jaunes, rès et conglomérats à bioclastes



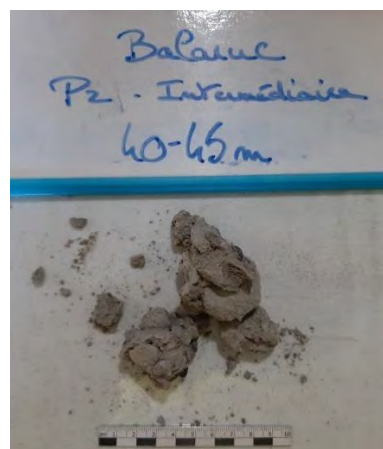
23-32 m : Marnes bleues



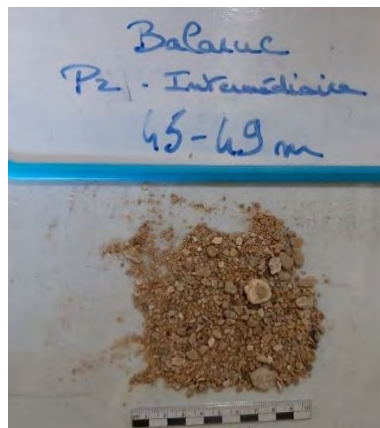
32-35 m : Marnes jaunes



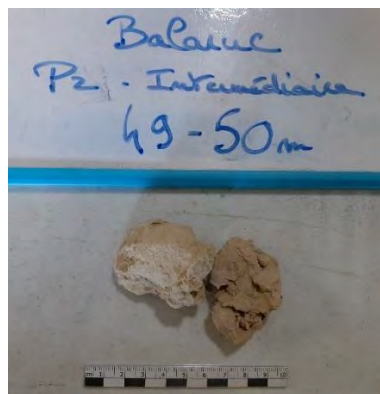
35-40 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



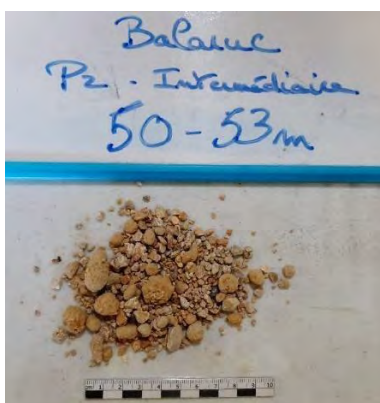
40-45 m : Marnes bleues



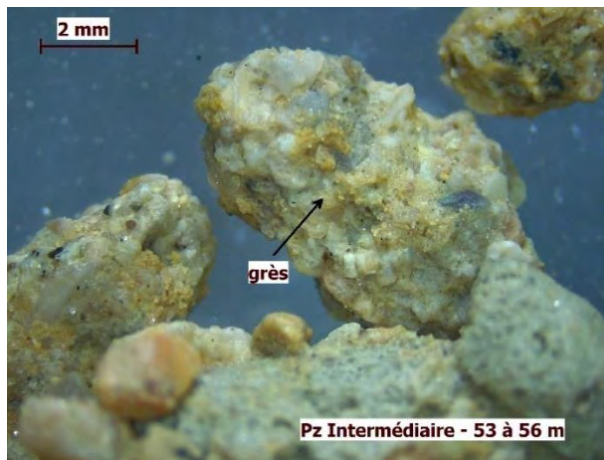
45-49 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



49-50 m : Marnes jaunes



50-53 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



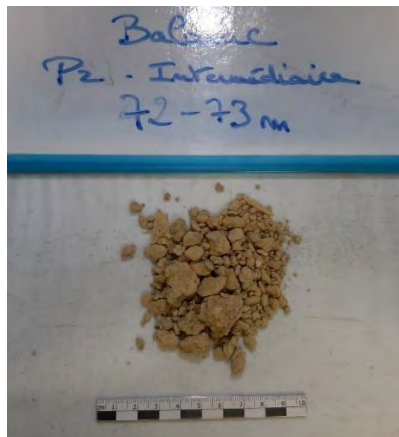
53-56 m : Marnes jaunes



56-67 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



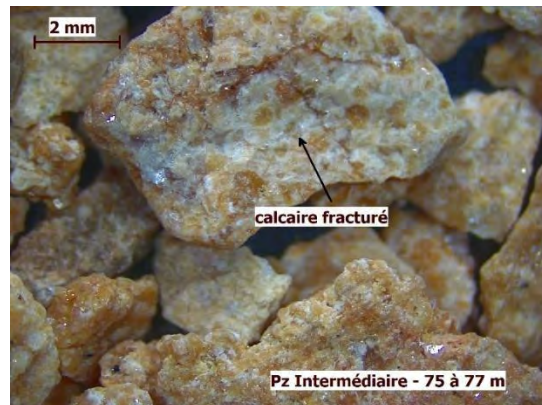
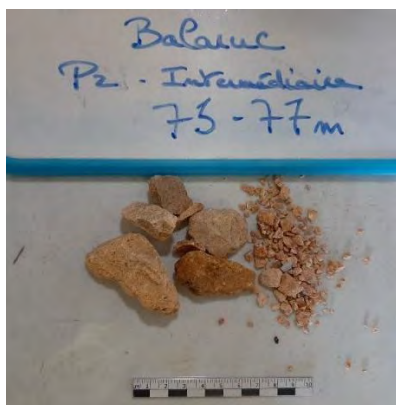
67-72 m : Marnes bleues



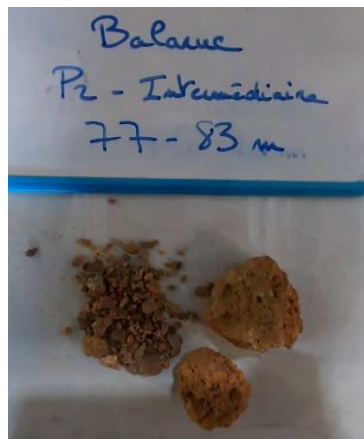
72-73 m : Marnes jaunes



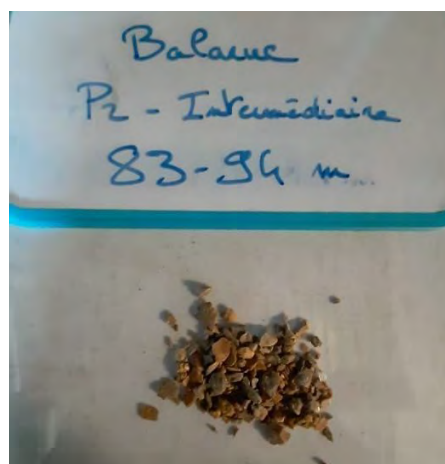
73-75 m : Marnes jaunes, grès et conglomérats à bioclastes



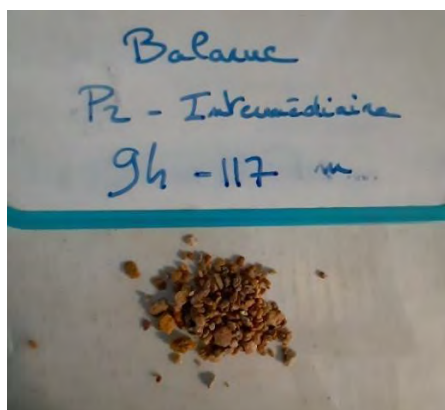
75-77 m : Dolomies beiges fracturées et marnes jaunes



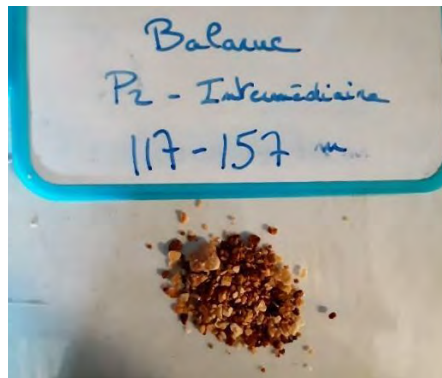
77-83 m : Dolomies et calcaires beiges à gris fracturés avec calcite



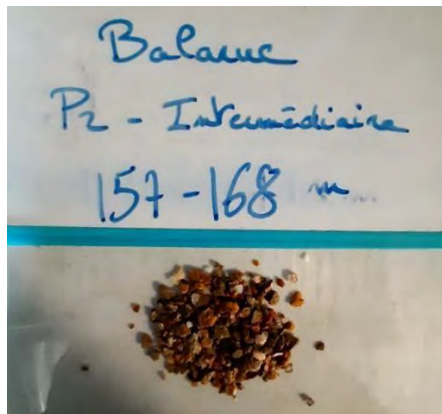
83-94 m : Calcaires et dolomies fracturés gris



94-117 m : Calcaires et dolomies fracturés beiges



117-157 m : Dolomies fracturés grises et silts rougeâtres



157-168 m : Calcaires stylolithiques gris et silts rougeâtres

Annexe 2

Extrait du Dossier des ouvrages exécutés de DEMENT3 (Claudine 3) et DEMENT4(Claudine 4)

Projet Dem'Eaux Thau – Réalisation de deux piézomètres et d'un forage profond – Site de Balaruc-les-Bains

Dossier des Ouvrages Exécutés



Rapport n°108548/version B – juillet 2022

Projet suivi par Vincent DURAND - 04.67.15.91.10 - vincent.durand@anteagroup.fr

Antea Group

Parc d'Activité de l'Aéroport

180, impasse John Locke
34470 PEROLS

www.anteagroup.fr/fr

Fiche signalétique

Projet Dem'Eaux Thau – Réalisation de deux piézomètres et d'un forage profond – Site de Balaruc-les-Bains

Dossier des Ouvrages Exécutés

CLIENT

SITE

BRGM

Balaruc-les-Bains

Direction Régionale Occitanie

1 039 rue de Pinville

34000 Montpellier

Claudine Lamotte

04.67.15.79.80

c.lamotte@brgm.fr

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet

Vincent DURAND

Interlocuteur commercial

Vincent DURAND

Implantation de Montpellier

Implantation chargée du suivi du projet

04.67.15.91.10

secretariat.montpellier-fr@anteagroup.fr

Rapport n°

108548

Version n°

version **B**

Votre commande et date

Projet n°

LROP190104

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	CHOIRAT	Ingénieur Hydrogéologue	Juillet 2022	
Rédaction	LUCAS	Ingénieur Hydrogéologue	Juillet 2022	
Approbation	DURAND	Chef de projet	Juillet 2022	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	01/2021	23	2	Version initiale piézomètres superficiel et intermédiaire
B	07/2022	53	3	Version finale piézomètres superficiel, intermédiaire et forage profond

<u>Figure A- 17 : Représentation polaire de la déviation du forage carotté DEMENT3 (Claudine 3) avant son abandon</u>	131
<u>Figure A- 18 : Atelier de forage destructif d'Hydroforage</u>	134
<u>Figure A- 19 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm</u>	135
<u>Figure A- 20 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm</u>	135
<u>Figure A- 21 : Cyclone et bac de récupération des cuttings</u>	136
<u>Figure A- 22 : Déblocage des tubages à l'avancement</u>	136
<u>Figure A- 23 : Barrage anti-turbidité au droit du point de rejet</u>	137
<u>Figure A- 24 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm</u>	137
<u>Figure A- 25 : anneau de cimentation à bille et sabot de cimentation à bille</u>	138
<u>Figure A- 26 : Marquage du tubage inox 316 L Ø 193,7 mm ep. 6 mm</u>	138
<u>Figure A- 27 : Fibres optiques pour mesures sismiques (gainés jaunes Ø 3 mm) avec centreurs de protection</u>	139
<u>Figure A- 28 : Typologie et spécifications des fibres optiques (Kloé)</u>	139
<u>Figure A- 29 : Vues générales du chantier de pose des fibres optiques</u>	140
<u>Figure A- 30 : Détail des déroulements des fibres optiques (Kloé)</u>	141
<u>Figure A- 31: Dispositif d'inertage interne et soudure TIG des tubes inox</u>	142
<u>Figure A- 32 : vue des centreurs du tubage inox</u>	142
<u>Figure A- 33 : Protecteurs de tiges en POM pour la foration à l'intérieur des tubes inox</u>	143
<u>Figure A- 34: Atelier de carottage LX11 de Géosonic</u>	146
<u>Figure A- 35 : Atelier de carottage LX11 de Géosonic</u>	146
<u>Figure A- 36: Coupe lithologique et technique du forage Claudine 4</u>	148
<u>Figure A- 37: Coupe lithologique et technique des ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT4 (Claudine 4)</u>	149
<u>Figure A- 38: Phasage des travaux de foration - DEMENT4 (Claudine 4, BSS004CLMU)</u>	150
<u>Figure A- 39: Dispositif de pompage</u>	152
<u>Figure A- 40 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage de janvier 2021, réalisé sur le forage Claudine 3</u>	153
<u>Figure A- 41 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage du 15 et 16 novembre 2021, réalisé sur le forage Claudine 4</u>	155
<u>Figure A- 42Figure 42 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage du 17 et 18 novembre 2021, réalisé sur le forage DEMENT4 (Claudine 4)</u>	157

5. Réalisation des forages profonds DEMENT3 (Claudine 3) et DEMENT4 (Claudine 3)

5.1. Présentation des travaux

Le forage Claudine 4 a été réalisé en trois phases principales par l'entreprise Géosonic (Mandataire) appuyée en sous-traitance par l'entreprise Hydroforage.

Phase 1 du 16/11/2020 au 26/02/2021 : Carottage de l'ouvrage de reconnaissance DEMENT3 (Claudine 3) de 0 à 300 m en diamètre PQ (122 mm) jusqu'à 199.7 m puis HQ (96 mm) jusqu'à 300 m. Blocage du tubage de soutènement PHD lors de la tentative de dé-tubage imposant de couper et laisser dans l'ouvrage un élément de tubage situé entre 168 et 199.7 m de profondeur. La présence de cet élément ne permettant pas l'alésage du forage dans des conditions optimales, il a été décidé de modifier le programme de foration initial en remplaçant l'alésage en destructif de cette première reconnaissance en foration destructive à 1.5 m du forage initial. Une diagraphie de déviation gyroscopique du forage a alors été réalisée afin de limiter le risque de recoupement de cet ouvrage abandonné par le nouveau forage. Le forage a ensuite été obturé.

Phase 2 du 07/04/2021 au 15/07/2021 : Après décalage de la cible de 1.5 m vers l'Est, forage de l'avant puits de l'ouvrage final DEMENT4 (Claudine 4) au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 508, 406 et 323 mm jusqu'à 127.6 m puis au PDC à l'air en Ø 270 mm jusqu'à 255 m de profondeur. Devant les nombreux coincements dans la partie inférieure de l'ouvrage, le tubage en inox 316L a été posé à cette cote de 255 m puis la partie inférieure a été forée au Marteau Fond de Trou en Ø 165 mm jusqu'à 290 m. Cette phase a été marquée par de fortes arrivées d'eau chargées en argiles qui ont nécessité la mise en place d'un barrage anti-turbidité dans l'étang de Thau au droit du point de rejet des eaux de forage.

Phase 3 du 22/07/2021 au 19/11/2021 : Carottage de la partie inférieure de l'ouvrage DEMENT4 (Claudine 4) de 290 à 300 m en diamètre HQ (96 mm) jusqu'à 759.5 m. La reprise du carottage à 290 m a permis un embrayage optimal entre le forage carotté initial DEMENT3 (Claudine 3) et la seconde phase carottée du forage DEMENT4 (Claudine 4).

5.2. Déroulements des travaux

5.2.1. Forage profond

Les travaux sur le forage profond se sont déroulés de la manière suivante :

Phase 1 : Carottage de l'ouvrage de reconnaissance DMT3 (Claudine 3) de 0 à 300 m

- **Du 16/11/20 au 18/11/20** : Amenée/repli et mise en place du chantier de carottage ;
- **Le 18/11/20** : foration en Ø 9^{7/8} de 0 à 6.8 m. Pose d'un tube acier UW (ø ext 197), cimentation du pied de tubage avec un coulis de ciment de densité 1.8 ;
- **Le 19/11/20** : remblaiement de l'extrados du tube UW avec du gravier et cimentation en surface. Mise en place du tubage SW (Ø 168 mm) de centrage à l'intérieur de 0 à 6,8 m ;
- **Du 20/11/20 au 01/12/20** : Phase de carottage GéoborS de 6,8 à 92 m. Mise en place du tubage GeorborS de 0 à 73,85 m ;
- **Du 01/12/20 au 02/12/20** : Alternance de phase de carottage PQ et de descente du tubage GéoborS du fait de la présence de sable bloquant le carottier. Casse du tubage GéoborS et prise de décision d'approvisionner des tubages SW pour sur-forer le SQ ;
- **Du 02/12/20 au 07/12/20** : Sur-forage SW jusqu'à 86 m ;
- **Du 08/12/20 au 10/12/20** : Panne mécanique sur le moteur de la foreuse ;
- **Du 11/12/20 au 14/12/20** : Récupération de la garniture SQ cassée ;
- **Du 15/12/20 au 21/12/20** : Reprise du carottage en diamètre PQ de 92 m jusqu'à 199,70 m. A partir de 122,70 m le forage est en perte totale et un vide important est constaté entre 133,60 et 134,85 m ;
- **Du 21/12/20 au 23/12/20** : Descente du tubage PHD jusqu'à 199.70 m. Reprise en HQ à partir de 199,70 m. Carottage jusqu'à 244,80 m. Mise en sécurité du chantier pour les vacances de Noel ;
- **Du 04/01/21 au 07/01/21** : Carottage de 244.80 à 300 m. Mise en eau claire du forage ;
- **Le 08/01/21** : Mise en place d'une pompe 4" équipée d'une colonne d'exhaure PEHD 32 mm;
- **Le 11/01/21** : Pompage d'essai de la zone 199.7 – 300 m au débit de 0,4 m³/h. Rabattement stabilisé à partir de 12h à 50 m ;
- **Le 13/01/21** : Remontée de la pompe et diagraphies par GEOSCIENCES ;
- **Le 14/01/21** : Début du dé-tubage pour la phase alésage. Essai de traction sur le tubage PHD : tubage bloqué ;

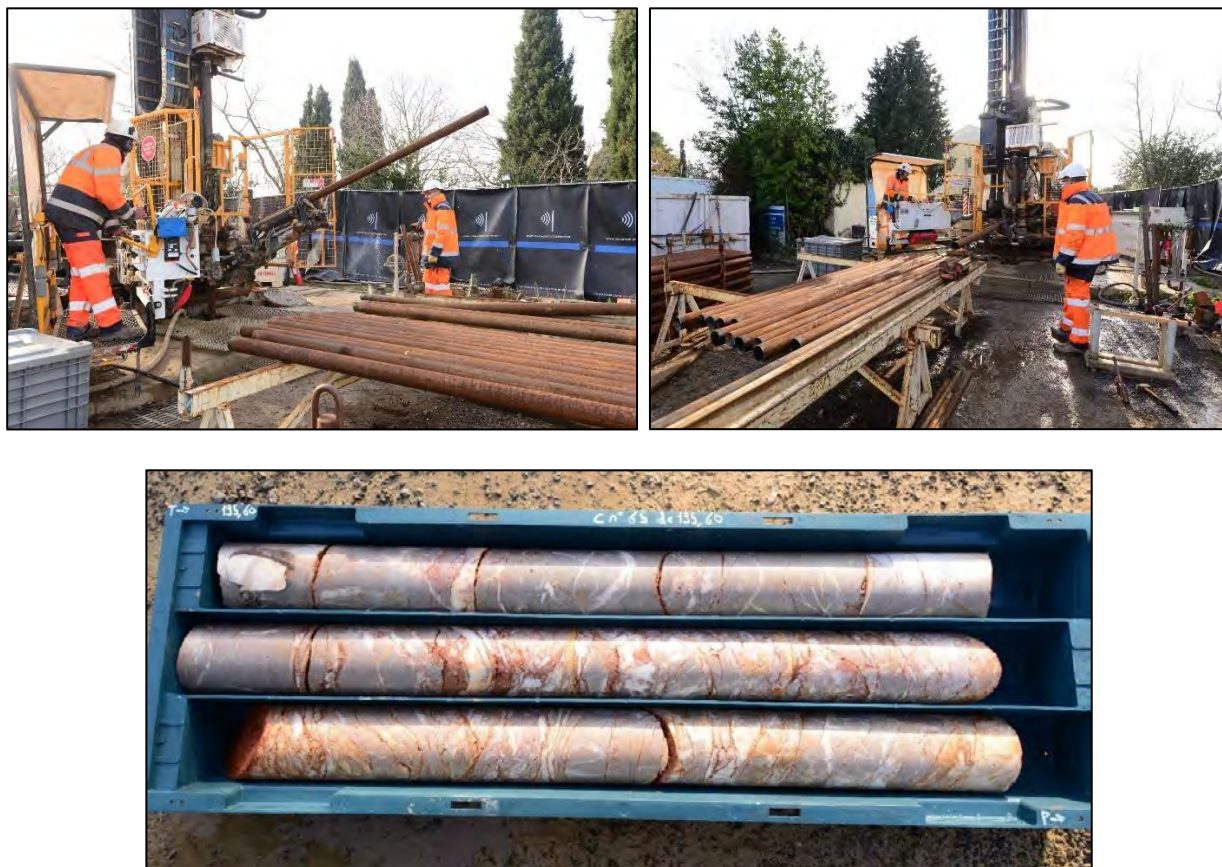


Figure A- 16 : Exemple de carotte – Caisse n°65

- **Du 15/01/21 au 21/01/21** : nombreux essais de traction infructueux. Prise de décision de couper la partie basse du tubage ;
- **Du 22/01/21 au 05/02/21** : Réalisation de différentes coupes entre 199,40 et 168 m de profondeur jusqu'à obtenir l'arrachage du tubage à 168 m de profondeur en laissant au fond une portion de tubage PHD d'environ 30 m ;
- **Du 07/02/21 au 09/02/21** : Diagraphies GEOSCIENCES et mesure de déviation gyroscopique ;
- **Le 10/02/21** : Prise de décision d'abandonner l'ouvrage ;
- **Du 10/02/2021 au 12/02/21** : Gravillonnage de 300 à 210 m et cimentation au coulis de ciment densité 1,8 de 210 à 145 m ;
- **Le 15/02/21** : Mise en place de gravier de 145 à 93 m ;
- **Du 16/02/2021 au 24/02/21** : Fin d'obturation de l'ouvrage et remontée des différents tubages en place (gravier de 93 à 48 m et ciment de densité 1,8 de 48 à 0m) ;
- **Du 25/02/2021 au 26/02/21** : Repli de l'atelier de carottage.

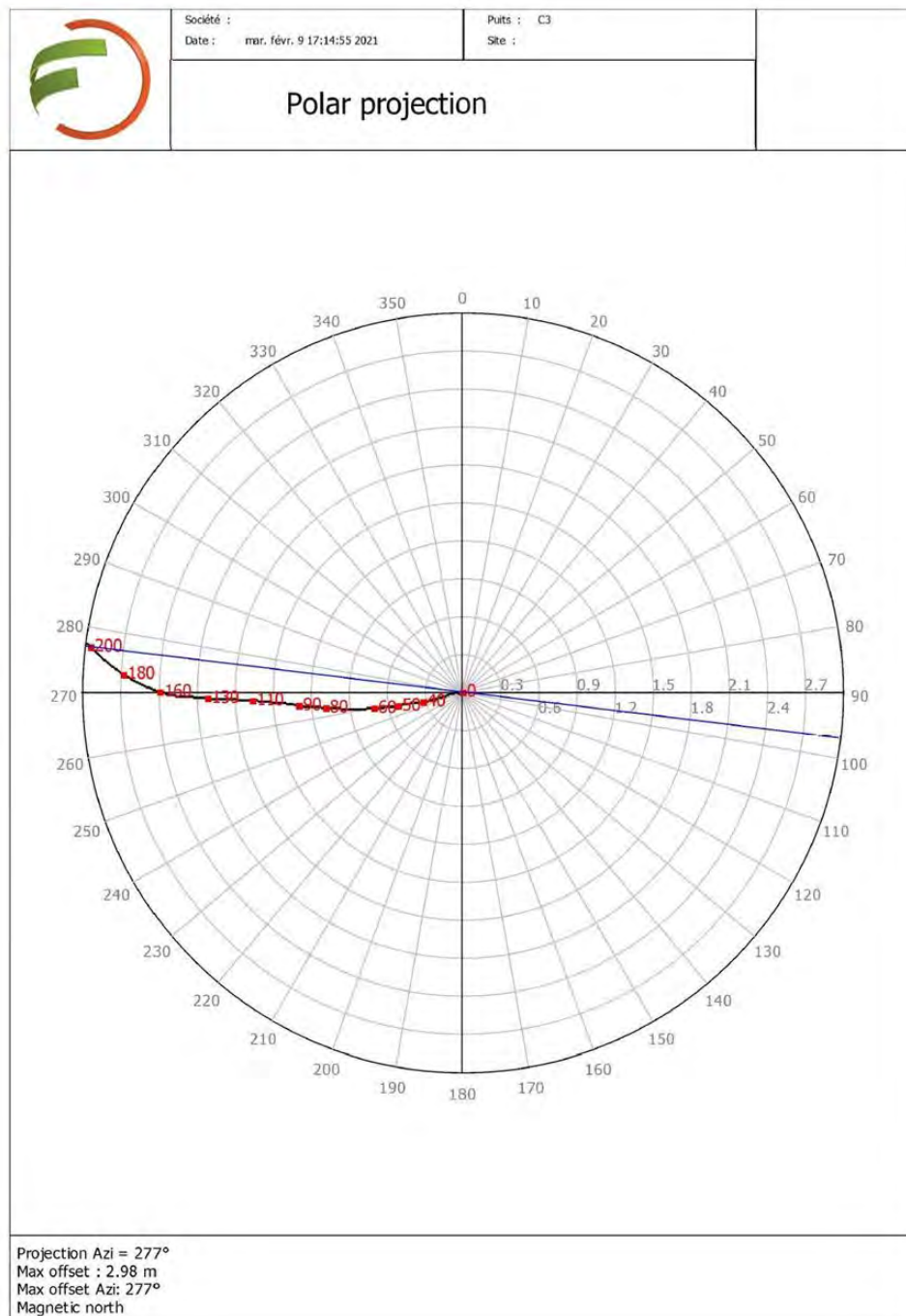


Figure A- 17 : Représentation polaire de la déviation du forage carotté DMT3 (Claudine 3) avant son abandon

Phase 2 : Forage destructif de la chambre de pompage du forage DEMENT4 (Claudine 4) de 0 à 290 m

- **Le 07/04/2021** : Amenée de l'atelier de forage destructif et mise en station sur le nouveau point de foration (situé à environ 1.5 m à l'Est du sondage DEMENT3);
- **Du 08/04/2021 au 12/04/2021** : Foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 508 mm de 0 à 28 m ;
- **Du 13/04/2021 au 15/04/2021** : Foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 406 mm de 28 à 72 m ;
- **Du 26/04/2021 au 04/05/2021** : Foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 323 mm de 72 à 88 m. L'avancement est très lent dû aux très fortes venues d'eau (estimées entre 200 et 400 m³/h). Malgré les deux bennes de décantation le débit est tel que le rejet à l'étang est fortement chargé en argiles. Le 04/05/2021 arrêt du chantier à 9h à la suite d'un contrôle de la police de l'eau. Prise de décision de faire installer par la société BUESA un barrage anti-turbidité dans l'étang au droit du point de rejet des eaux ;
- **Le 07/05/2021** : Installation du barrage anti-turbidité dans l'étang ;
- **Du 10/05/2021 au 17/05/2021** : Reprise de la foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 323 mm de 88 à 110 m. De nombreux incidents mécaniques viennent perturber l'avancement ;
- **Du 18/05/2021 au 21/05/2021** : Réparation électrique sur la sondeuse. Retrait du tubage Ø 323 mm pour changement de la couronne ;
- **Du 25/05/2021 au 21/05/2021** : Réparation sur le faisceau électrique sur la sondeuse. Retrait du tubage Ø 323 mm pour changement de la couronne ;
- **Le 25/05/2021** : Reprise de la foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 406 mm de 72 à 75 m pour améliorer l'ancrage de ce tubage dont le sommet était lentement descendu sous le sol ;
- **Du 26/05/2021 au 28/05/2021** : Redescente de la garniture Ø 323 mm et reprise de la foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 323 mm de 110 à 126 m ;
- **Du 31/05/2021 au 02/06/2021** : Nouvelle réparation sur le faisceau électrique sur la sondeuse;
- **Le 03/06/2021** : Reprise de la foration au Marteau Fond de Trou avec Tubage A l'Avancement (MFT TAV) en Ø 323 mm de 126 à 127.6 m. Avancement très lent (de l'ordre de 1 m en 2 heures) du fait de l'important débit à la foration. Décision de changer de méthode de foration pour utiliser le rotary à l'air avec un taillant PDC Ø 270 mm ;

- **Du 07/06/2021 au 10/06/2021** : Foration au rotary PDC à l'air Ø 270 mm de 127.6 à 255 m. Le forage est fortement instable entre 175 et 200 m de profondeur, engendrant de nombreux coincements du train de tiges et entraînant la décision de stopper la chambre de pompage à cette cote ;
- **Du 14/06/2021 au 15/06/2021** : retrait du train de tiges et diagraphies par GEOSCIENCES ;
- **Du 16/06/2021 au 24/06/2021** : installation du tubage inox 316L Ø 193.7 mm – épaisseur 6 mm, raccordement par soudure mixte sous inertage (1 passe TIG + 1 passe MMA). La base du tube est équipée d'un double dispositif de cimentation constitué par :
 - o Un sabot de cimentation à clapet (hauteur : 1 m),
 - o Une longueur de tube de 6 m, o Un anneau de cimentation à clapet (hauteur 0.78 m).

A partir de la cote finale de 200 m deux jeux de fibres optiques ont été mise en place à l'extrados du tubage inox par la société Kloé :

- o 2 fibres optiques intégrées dans des gaines inox Ø 6 mm pour les mesures de température
- o 2 aller et retour de fibres optiques dans des gaines souples jaunes Ø 3 mm pour les mesures sismiques,

La protection de ces jeux de fibres optiques et le maintien du rayon de courbure des fibres souples ont nécessité la mise en place de centreurs de protection de part et d'autre de ces fibres et l'installation de guides circulaires au point de retournement des fibres souples.

La base des fibres optiques pour les mesures thermiques est située à 201.5 m et celles des fibres pour les mesures sismiques est localisée à 200 m.

Un contrôle satisfaisant des fibres a été réalisé en fin de pose du tubage. Elles ont ensuite été enroulées autour du sommet du tubage entre deux guides inox destinés à respecter le rayon de courbure puis protégé par deux coquilles en acier.

- **Le 28/06/2021** : descente et installation du stinger dans l'anneau de cimentation à l'aide d'un train de tiges munis de raccords de protection en POM. Injection de
- **Le 30/06/2021** : Injection de 4 m³ de coulis de ciment densité 1.8 arrêt sur problème de pompe d'injection. Déconnexion du stinger et rinçage des tiges.
- **Du 01/07/2021 au 06/07/2021** : contrôle de la cimentation de pied par CBL : le top du ciment est à 192 m de profondeur. Réalisation de trois injections gravitaires de 1500 l, 900 l et 2800 l de mortier dosé à 500 kg/m³ avec adjuvant anti-délavement. Retrait en parallèle des tubages de travail Ø 323 mm. Top ciment à 82 m.

- **Le 07/07/2021** : mise en place de gravier 4-6 mm entre 82 et 51 m de profondeur pour protéger la zone de captage du forage voisin F6. Injection gravitaire de 2000 l de mortier dosé à 500 kg/m³ avec adjuvant anti-délavement et retrait en parallèle des tubages de travail Ø 406 mm. Injection gravitaire de 5500 l de mortier dosé à 500 kg/m³ avec adjuvant anti-délavement et retrait en parallèle des tubages de travail Ø 508 mm.
- **Le 08/07/2021** : Injection gravitaire finale de 4000 l de mortier dosé à 500 kg/m³ avec adjuvant anti-délavement. Foration au Marteau Fond de Trou Ø 165 mm de 236 à 290 m de profondeur avec un train de tiges protégées.
- **Du 12/07/2021 au 15/07/2021** : repli de l'atelier de foration à l'air comprimé.



Figure A- 18 : Atelier de forage destructif d'Hydroforage



Figure A- 19 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm



Figure A- 20 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm



Figure A- 21 : Cyclone et bac de récupération des cuttings



Figure A- 22 : Déblocage des tubages à l'avancement



Figure A- 23 : Barrage anti-turbidité au droit du point de rejet



Figure A- 24 : Foration au MFT TAV Ø 323 mm



Figure A- 25 : anneau de cimentation à bille et sabot de cimentation à bille

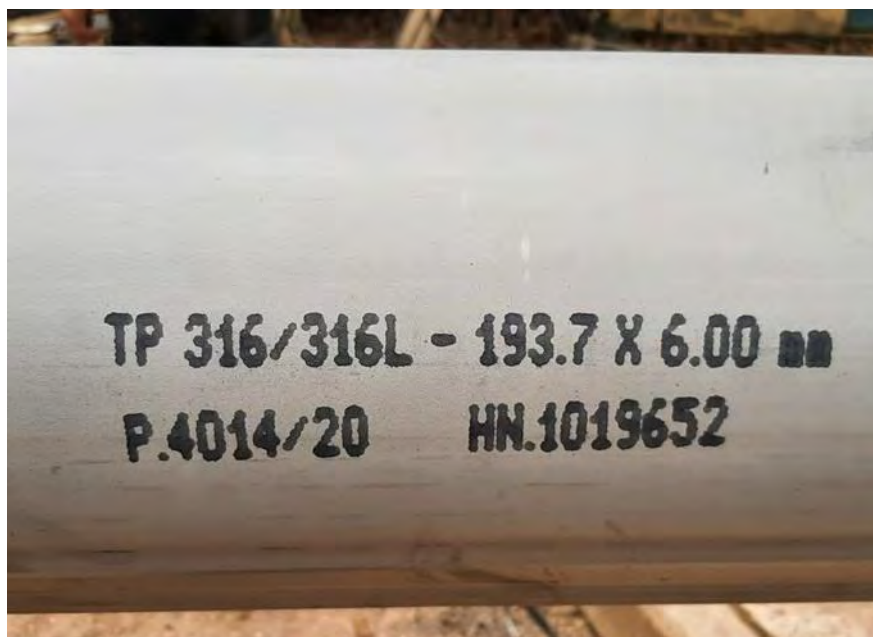


Figure A- 26 : Marquage du tubage inox 316 L Ø 193,7 mm ep. 6 mm



Figure A- 27 : Fibres optiques pour mesures sismiques (gaines jaunes Ø 3 mm) avec centreurs de protection

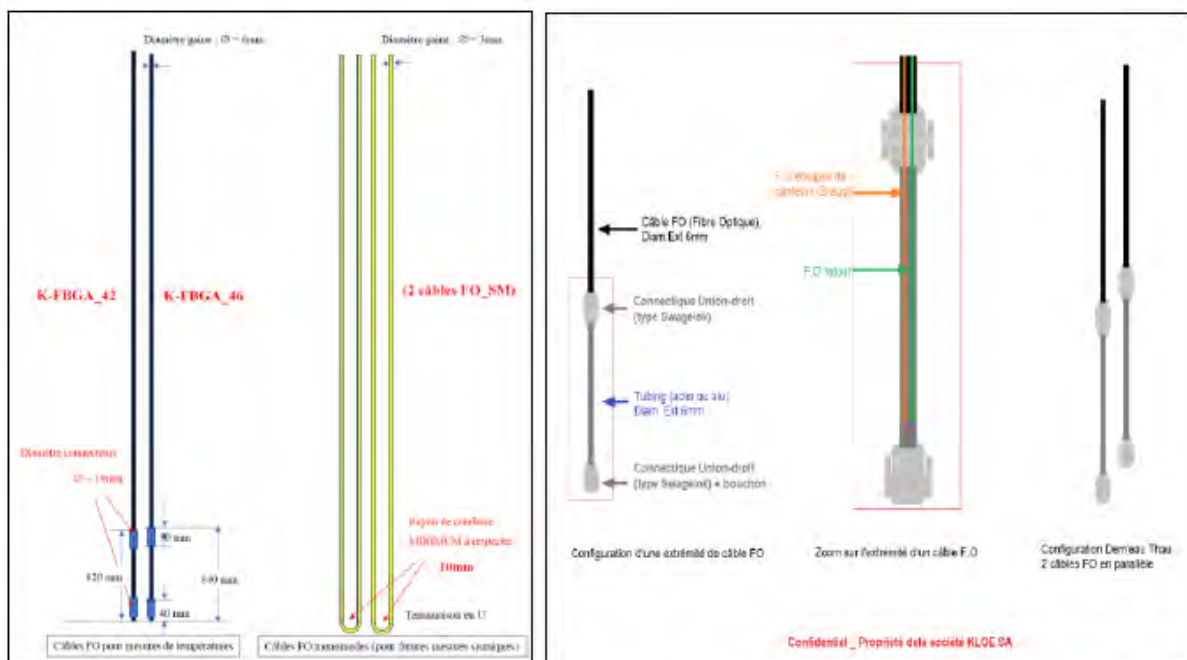


Figure A- 28 : Typologie et spécifications des fibres optiques (Kloé)



Figure A- 29 : Vues générales du chantier de pose des fibres optiques



Figure A- 30 : Détail des déroulements des fibres optiques (Kloé)



Figure A- 31: Dispositif d'inertage interne et soudure TIG des tubes inox



Figure A- 32 : vue des centreurs du tubage inox



Figure A- 33 : Protecteurs de tiges en POM pour la foration à l'intérieur des tubes inox

Phase 3 : Carottage de la zone de captage du forage DMT4 (Claudine 4) de 290 à 759 m

- **Du 22/07/2021 au 23/07/2021** : Installation de l'atelier de carottage LX11 de Géosonic ;
- **Du 29/07/2021 au 03/08/2021** : Mise en place des tubages de centrage : GéoborS (Ø140 mm) avec manchons de protection en POM puis PHD (Ø 114 mm) – base des tubages à 290 m ;
- **Du 04/08/2021 au 16/08/2021** : Carottage au Ø HQ (96 mm) de 290 m à 450 m à raison de 20 à 30 m de carottage par poste. Perte totale de fluide dès 295.2 m. Arrêt sur avancement nul (couronne HS) ;
- **Du 17/08/2021 au 23/08/2021** : Remontée au jour de la couronne : des éléments de la matrice diamantée sont restés au fond. Mise en place d'une nouvelle couronne et manœuvre jusqu'au fond pour essayer de broyer les éléments restés au fond – échec : nouvelle destruction de la matrice. Nouvelle tentative avec une couronne plus dure et nouvel échec. Troisième tentative de broyage des débris avec une couronne extra dure et nouvel échec. Nettoyage du trou avec succès à l'aide d'un tricône Ø3''^{5/8} .
- **Du 24/08/2021 au 30/08/2021** : Carottage au Ø HQ (96 mm) de 450 m à 542 m à raison de 30 m de carottage par poste. Arrêt sur mauvaise récupération de 537 m à 542 m. Manœuvre au jour pour décoincer le carottier et changer la couronne.
- **Du 31/08/2021 au 01/09/2021** : Reprise du carottage et casse immédiate d'un morceau de matrice. Remontée au jour et manœuvre de nettoyage du trou à l'aide du tricône Ø3''^{5/8}. Remise en place de la garniture de carottage avec une couronne neuve.
- **Du 02/09/2021 au 10/09/2021** : Carottage au Ø HQ (96 mm) de 542 m à 657.9 m. Le niveau statique est faiblement artésien. Manœuvre au jour pour la réalisation des diagraphies.
- **Du 12/09/2021 au 13/09/2021** : Réalisation des diagraphies par GEOSCIENCES.
- **Le 14/09/2021** : Changement du câble wireline, mise en place de 1000 m de câble neuf.
- **Du 15/09/2021 au 20/09/2021** : Carottage au Ø HQ (96 mm) de 657.9 m à 660 m avec deux manœuvres pour changement de couronne motivées par de fortes vibrations dans le train de tiges.
- **Du 21/09/2021 au 28/09/2021** : Carottage au Ø HQ (96 mm) de 660 m à 738.9 m et remontée du train de tiges pour changement de couronne – toujours présence de vibrations importantes.

- **Du 29/09/2021 au 04/10/2021** : Reprise du carottage au Ø HQ (96 mm) de 738.9 m à 749.5 m et perte de couple dû à une rupture des tiges à 441.8 m de profondeur. Repêchage des tiges au taraud réussi à la troisième tentative.
- **Du 05/10/2021 au 29/10/2021** : Reprise du carottage au Ø HQ (96 mm) de 749.5 m à 759.9 et nouvelle perte de couple dû à une rupture des tiges à 410.5 m de profondeur. Mise en œuvre de 6 tentatives de repêchage des tiges au taraud avec des tiges à filetage à gauche – toutes ont échouées.
- **Du 02/11/2021 au 03/11/2021** : Mise en œuvre d'un arrache tube de chez Mustang, ancrage dans les tiges cassées au premier essai et remontée de la base du train de tiges.
- **Du 04/11/2021 au 09/11/2021** : Contrôle et nettoyage du forage au carottier HQ jusqu'à 759.5 m de profondeur avec un changement de couronne à 648 m. Remontée des tiges HRQ à 620 m pour la mise en œuvre du pompage.
- **Le 10/11/2021** : Mise en place de la pompe 3" à 80 m de profondeur avec une colonne PEHD Ø 32 mm – tests OK
- **Du 15/11/2021 au 16/11/2021** : Pompage N° 2 de 26 h à 4.6 m³/h de la zone 620 – 759 m. Remontée de la pompe 3".
- **Du 17/11/2021 au 19/11/2021** : Remontée des tiges HRQ à 390 m pour la mise en œuvre du pompage N°3. Pompage N° 3 de 24 h à 4.6 m³/h de la zone 390 – 759 m. Remontée de la pompe 3". Remontée des tiges HRQ à 306 m pour la réalisation des diagraphies par GEOSCIENCES.
- **Du 21/11/2021 au 26/11/2021** : Repli du chantier et diagraphies par GEOSCIENCES.



Figure A- 34: Atelier de carottage LX11 de Géosonic



Figure A- 35 : Atelier de carottage LX11 de Géosonic

5.3. Caractéristiques finales du forage DMT4 (Claudine 4)

5.3.1. Foration

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

La foration s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Etape 1 :
 - **de 0 à 28 m** : Foration au marteau fond de trou TAV Ø 508 mm sur le nouveau point de forage à 1,5 m;
 - **de 28 à 75 m** : Foration au marteau fond de trou TAV Ø 406 mm ; o **de 75 à 127,6 m** : Foration au marteau fond de trou TAV Ø 323 mm ; o **de 127,6 à 255 m** : Foration au PDC à l'air Ø 270 mm ; o **de 255 à 290 m** : Foration au marteau fond de trou Ø 165 mm ;
- Etape 2 :
 - **de 290 à 759,5 m** : Carottage Ø HQ (96,1 mm).

5.3.2. Equipement tubulaire

Les profondeurs sont exprimées en mètre par rapport au sol (m/sol).

L'équipement du forage DMT4 est le suivant :

de 0 à 245 m : tube inox 316L Ø 193,7 mm épaisseur 6 mm

de 0 à 51 m : mortier de ciment ;

de 51 à 82 m : graviers 4-6 mm ; o **de 82 à 192 m** : mortier de ciment ;

de 192 à 245 m : coulis de ciment PMES de densité 1,8.

5.3.3. Coupe technique et lithologique du forage DMT4 (Claudine 4)

La Figure 36 ci-après présente la coupe lithologique et technique du forage Claudine 4 et la Figure 37.

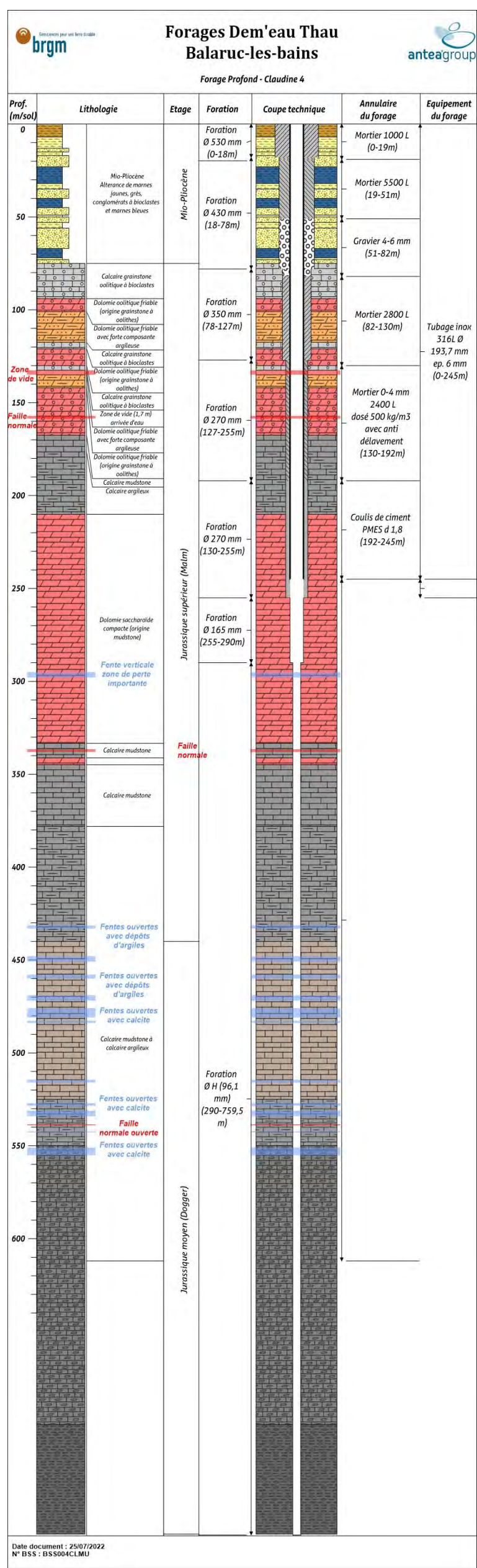


Figure A- 36: Coupe lithologique et technique du forage Claudine 4

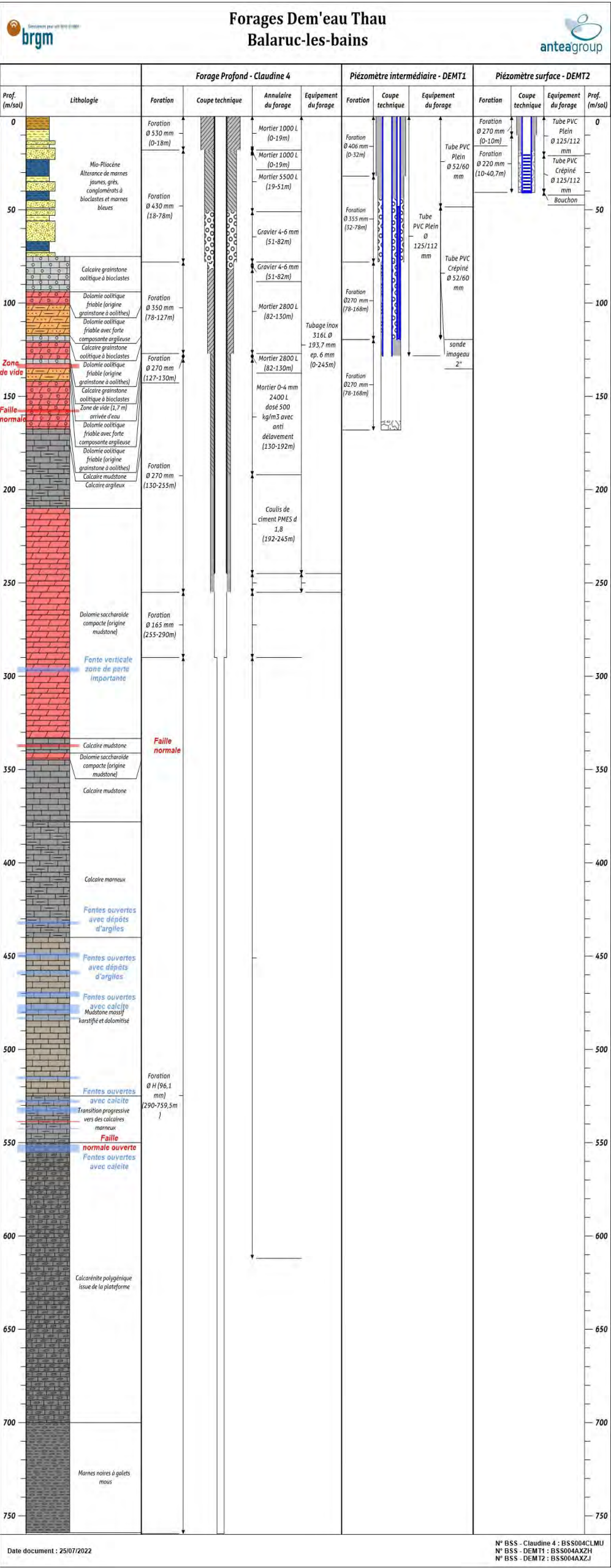


Figure A- 37: Coupe lithologique et technique des ouvrages DEMT1, DEMT2 et DEMT4 (Claudine 4)

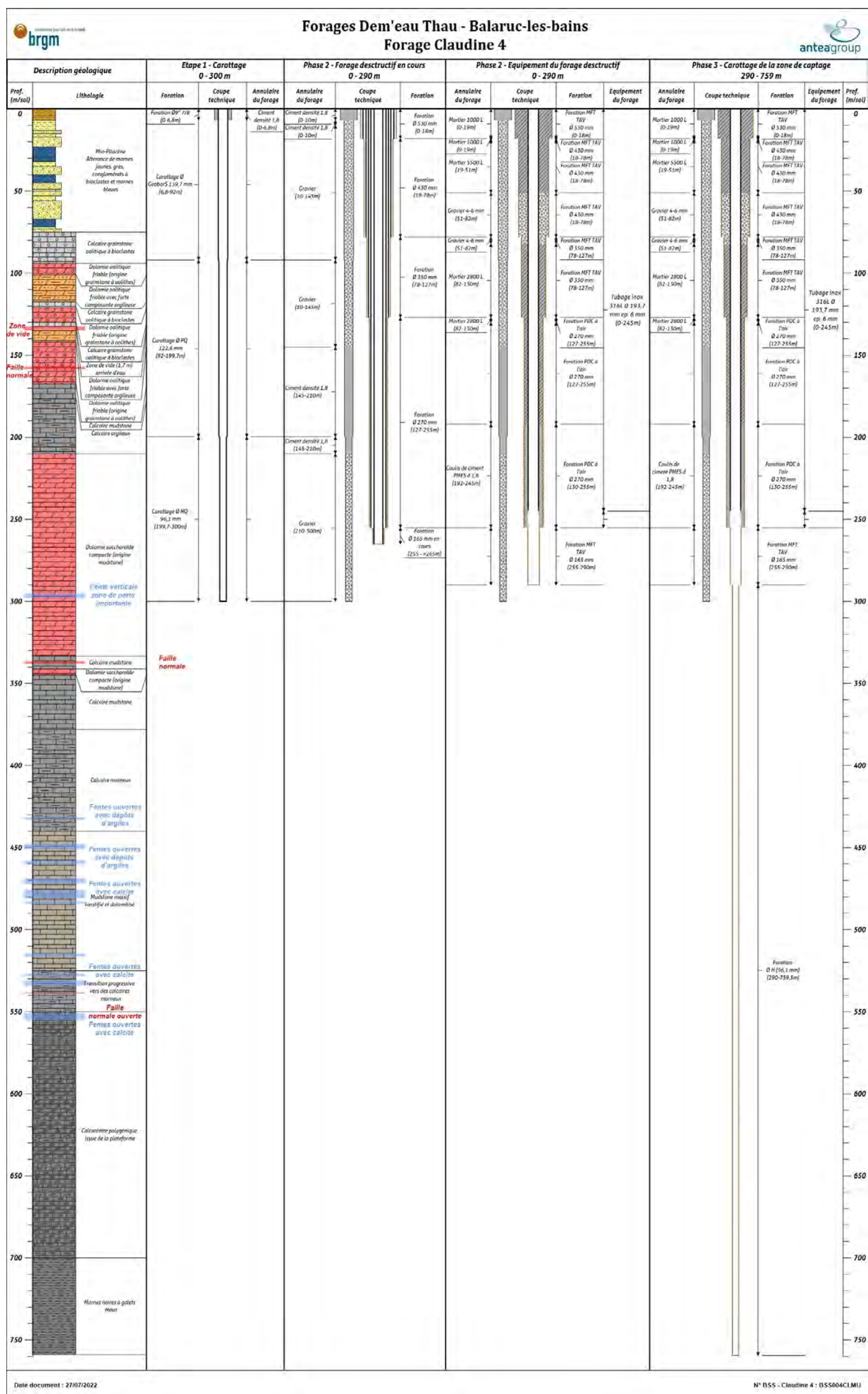


Figure A- 38: Phasage des travaux de foration - DENT4 (Claudine 4, BSS004CLMU)

6. Pompages d'essai

6.1. Déroulement des pompages

Trois pompages d'essai ont été réalisés sur les forages DEMENT3(Claudine 3) et DEMENT4(Claudine 4). Ces tests se sont déroulés de la façon suivante :

- **du 11 au 12 janvier 2021** : pompage de longue durée (24 h) de la zone 199,7 – 300 m/sol, à un débit de 3,3 et 4 m³/h sur le forage DEMENT3 (Claudine 3);
- **du 15 au 16 novembre 2021** : pompage de longue durée (25 h) de la zone 620 – 759 m/sol, à un débit de 4,6 m³/h sur le forage DEMENT4 (Claudine 4);
- **du 17 au 18 novembre 2021** : pompage de longue durée (24 h) de la zone 390 – 759 m/sol, à un débit de 4,5 m³/h sur le forage DEMENT4 (Claudine 4);

6.2. Dispositif de pompage

Le dispositif de pompage installé et qui a été identique pour les trois pompages est le suivant :

- une pompe immergée 3" installée à une profondeur de 88 m,
- un dispositif de suivi des différents paramètres (niveau, température, conductivité et débit) composé d' :
 - o un capteur de pression immergé calibré placé au-dessus de la pompe ;
 - o un débitmètre électromagnétique DN 50 mm avec un enregistreur ;
 - o un enregistreur de conductivité et température installé dans un bac en surface après le débitmètre
- un manomètre et une vanne de réglage de débit ;
- un tubing de mesure en PVC ;
- un robinet de prélèvement ;
- une canalisation de rejet provisoire en direction du réseau d'eaux pluviales.



Figure A- 39: *Dispositif de pompage*

6.3. Résultats et interprétation

6.3.1. Pompage de janvier 2021 sur le forage DEMENT3 (Claudine 3)

Ce pompage s'est déroulé du 11 janvier 2021 à 13h00 au 12 janvier 2021 à 13h00, soit 24 h de pompage à un débit de 3,3 puis 4 m³/h. Les données sont représentées graphiquement sur la figure 40.

Le niveau dynamique du forage DEMENT3 (Claudine 3) présente un rabattement rapide d'environ 46 m à 3,3 m³/h puis 57 m à 4,5 m³/h. Ces rabattements sont stabilisés à la fin de chacun des deux paliers. En fin de pompage, le retour au niveau initial est quasiment complet au bout de trois heures de remontée.

Il est à noter une différence d'environ 1 m entre les mesures de niveau manuelles et celle enregistrées sans explication évidente autre qu'un défaut de calibration du datalogger.

Avant le départ du pompage, la conductivité se situe autour de 2000 µS/cm. La conductivité diminue du départ de l'essai jusqu'à un minimum de 379 µS/cm puis reste stable. Lors du début du pompage la température se met en équilibre à environ 21,5°, celle-ci reste relativement stable durant tout l'essai et descend à 20° une fois l'essai terminé.

Aucun impact n'est à noter sur les ouvrages de suivi à proximité : F3, F6 et le piézomètre superficiel.

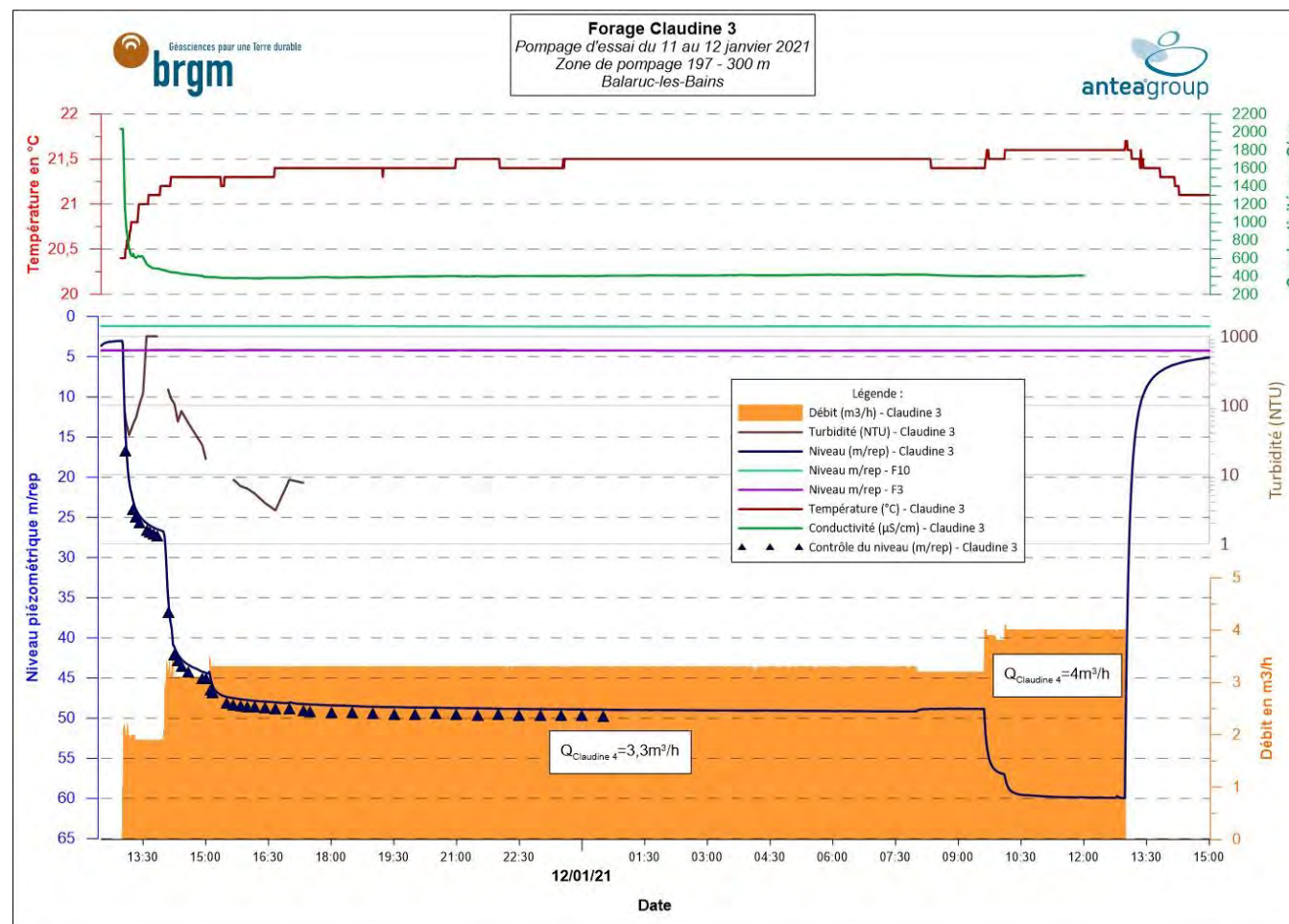


Figure A- 40 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage de janvier 2021, réalisé sur le forage Claudine 3

6.3.2. Pompage du 15 au 16 novembre 2021 sur le forage DENT4 (Claudine 4)

Ce pompage longue durée s'est déroulé du 15 novembre à 10h35 au 16 novembre à 11h40, soit 25 h de pompage à un débit de 4,6 m³/h. Les données sont représentées graphiquement sur la figure 41. Le niveau dynamique du forage DENT4 (Claudine 4) continue de décroître durant tout le pompage pour atteindre un rabattement d'environ 5,4 m après 25 heures de pompage. Le rabattement est resté relativement progressif et linéaire sur la deuxième partie de l'essai avec 1 cm de rabattement pour 5 minutes de pompage. En fin de pompage, le retour au niveau initial n'est qu'à 50% au bout de trois heures de remontée.

Les mesures de niveau manuelles sont similaires à celle enregistrées au datalogger.

Au départ du pompage, la conductivité se situe autour de 5 900 µS/cm. Les mesures de conductivité réalisées manuellement n'ont été possibles que durant les trois premières heures de pompage. Durant cet intervalle, la conductivité décroît de façon linéaire jusqu'à un minimum de 5 760 µS/cm. Lors du début du pompage la température se met en équilibre après 7 heures de pompes à environ 25,5°. Celle-ci est restée relativement stable durant tout l'essai.

Aucun impact n'est à noter sur les forages existant à proximité : F3, F6 et le piézomètre superficiel.

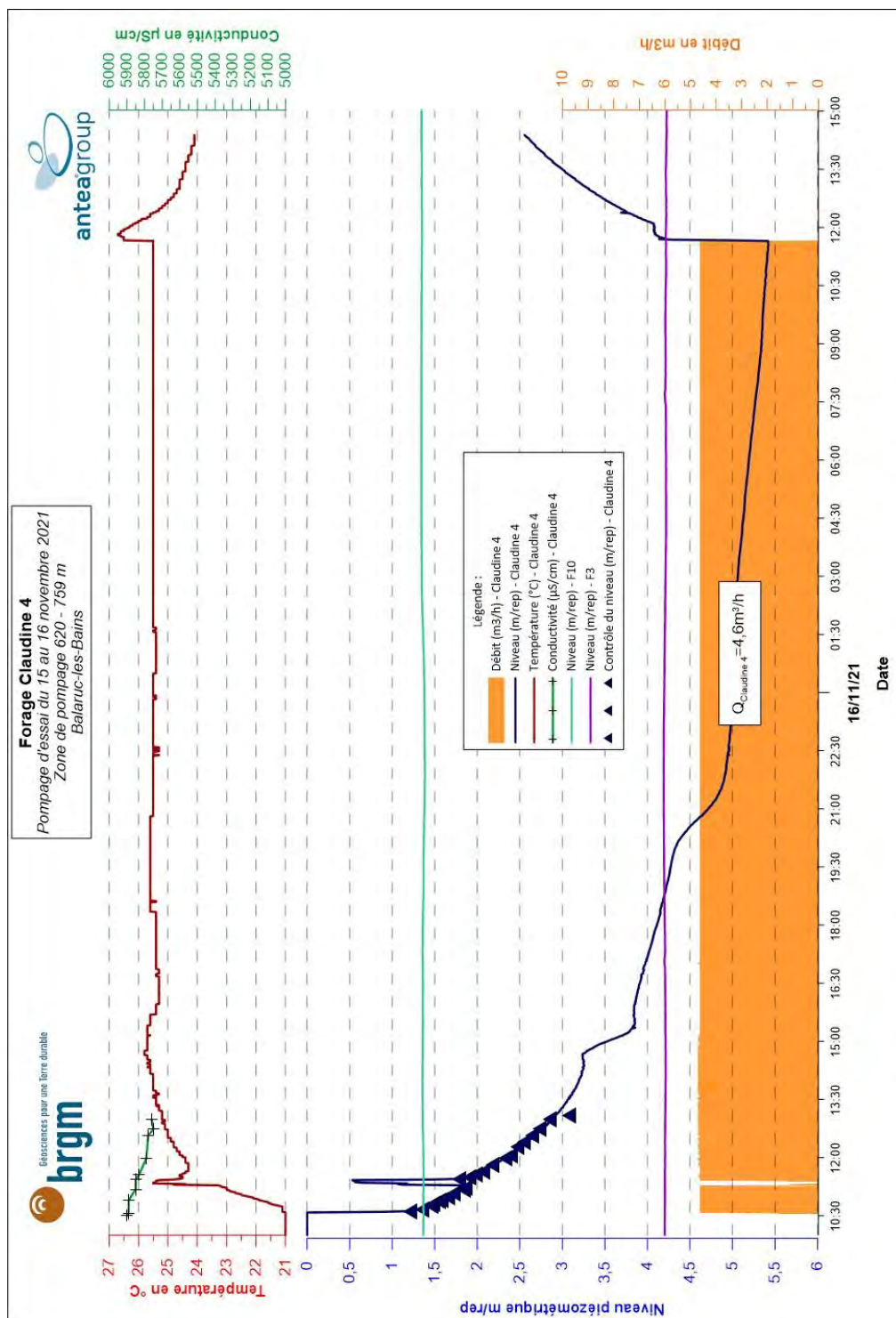


Figure A- 41 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage du 15 et 16 novembre 2021, réalisé sur le forage Claudine 4

6.3.3. Pompage du 17 au 18 novembre 2021 sur le forage DENT4 (Claudine 4)

Ce pompage s'est déroulé du 17 novembre à 11h45 au 18 novembre à 11h45, soit 24 h de pompage à un débit de 4,5 m³/h. Les données sont représentées graphiquement sur la figure 42.

Le niveau dynamique du forage DENT4 (Claudine 4) chute instantanément sur environ 1 m avant de décroître pendant environ 8 heures pour atteindre un rabattement globalement stabilisé d'environ 5 m durant le reste du pompage. En fin de pompage, la remontée est également instantanée sur 1 m et le retour au niveau initial reste partiel au bout de 3 heures de remontée.

Les mesures de niveau manuelles sont identiques à celle enregistrées au datalogger.

Au départ du pompage, la conductivité se situe autour de 11,5 mS/cm. Les mesures de conductivité n'ont été possibles que durant les trois premières heures de pompage. Durant cet intervalle, la conductivité décroît de façon linéaire jusqu'à un minimum de 6,5 µS/cm. Lors du début du pompage la température se met en équilibre après 8 heures de pompages à environ 26,5°. Celle-ci est restée relativement stable durant tout l'essai.

Aucun impact n'est à noter sur les ouvrages thermaux suivis à proximité : F3, F6 et le piézomètre superficiel.

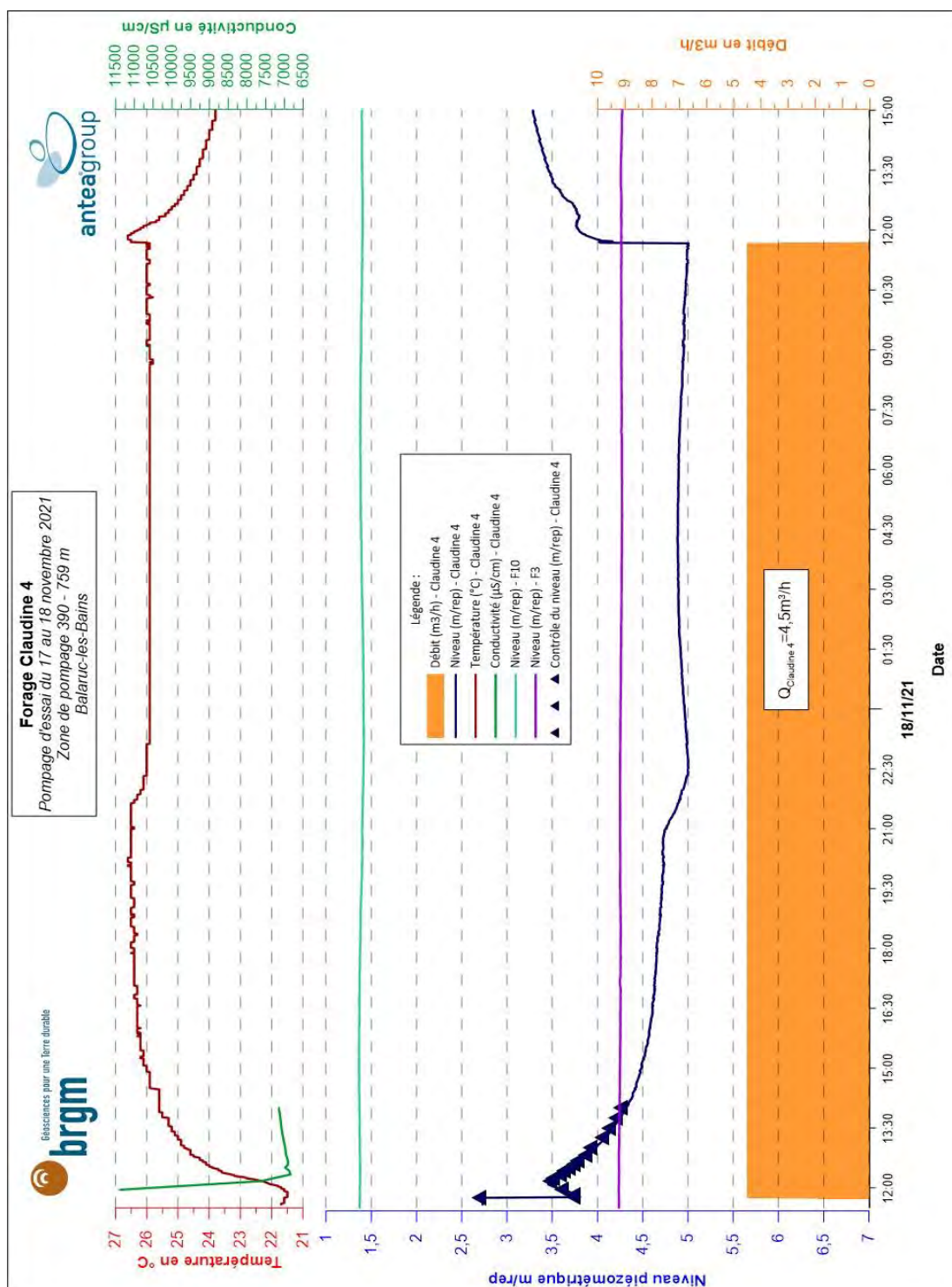


Figure A- 42Figure 42 : Evolution des principaux paramètres au cours de l'essai de pompage du 17 et 18 novembre 2021, réalisé sur le forage DMT4 (Claudine 4)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 –

Direction régionale Occitanie

1039 rue de Pinville

34000 Montpellier

Tel. : 04.67.15.79.80

www.brgm.fr