



Document à accès différé

Expertise du document d'incidences de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour l'élevage de saumons – Le Verdon sur Mer (33)

Rapport final

BRGM/RP-73880-FR

Version 1 du 2 septembre 2024

Expertise réalisée dans le cadre des missions d'Appui aux Administrations

BRGM.

Ce rapport a été vérifié le 03/09/2024 et approuvé le 06/09/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Déclaration

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.

La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Les conditions d'accès, de diffusion et de réutilisation du document sont régies par les dispositions en vigueur prévues dans le CRPA et le code de l'environnement.

Le BRGM a mis en place un dispositif de déontologie visant à développer une culture de l'intégrité et de la responsabilité dans le quotidien de tous ses salariés.

- Après examen, il ressort qu'il n'existe aucun lien d'intérêt susceptible de compromettre l'indépendance et l'impartialité du BRGM dans la réalisation de cette expertise :
 - entre le BRGM et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise ;
 - entre les salariés du BRGM qui seront impliqués et l'objet ou les différentes parties prenantes de la présente expertise.
- Après examen, il ressort qu'il existe un lien d'intérêt entre le BRGM et l'objet ou l'une des parties prenantes de la présente expertise (cf. déclaration de lien d'intérêt en annexe).Cependant, le BRGM atteste, grâce à la mise en place de son SMQE et de son dispositif de déontologie, que la réalisation de la présente expertise n'est en rien influencée par le lien d'intérêt identifié.

Le BRGM confie la réalisation de cette expertise à des salariés qui n'ont, à titre individuel, aucun lien d'intérêt avec l'objet ou l'une des parties prenantes de la présente expertise, de façon à en préserver l'indépendance et l'impartialité..
- Le BRGM confie la réalisation de cette expertise à des salariés qui présentent un lien d'intérêt déclaré (cf. déclaration de lien d'intérêt jointe en annexe) avec l'objet ou l'une des parties prenantes de la présente expertise et atteste que l'existence de ce(s) lien(s) ne présente aucun risque de compromettre leur neutralité..

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 : Expertise, Hydrogéologie, Modèle hydrodynamique, Pompage, Le Verdon sur Mer, Gironde

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

BRGM. (2024) – Expertise du document d'incidences de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour l'élevage de saumons – Le Verdon sur Mer (33). Rapport final V1. BRGM/RP-73880-FR, 37 p., 24 fig.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM002_ENV-MT030-P2-08/04/2024

Synthèse

Contexte :

Date de la formulation de la demande d'expertise au BRGM : 3 juin 2024

Demandeur : DDPP de la Gironde

Nature de l'expertise / question posée :

Suite au dépôt d'une troisième version du dossier réglementaire relatif à l'exploitation de la nappe du Plio-Quaternaire via 3 triplets de forages, pour l'alimentation en eau d'un élevage de saumons, la DDPP a sollicité l'avis du BRGM sur les données produites, leurs méthodes de collecte et les modélisations utilisées pour évaluer l'incidence du projet sur les ressources en eaux souterraines : sont-elles adaptées, suffisantes et fiables ?

Situation du sujet : Le Verdon sur Mer (33)

Nature de l'intervention du BRGM : Expertise sur dossier

Pour répondre à ces questions, le BRGM a effectué un examen critique du rapport fourni, sur les points suivants :

- forages de reconnaissance (données acquises et interprétations) ;
- paramètres des aquifères et des forages ;
- vérification des impacts et paramètres d'exploitation (débit et rabattement) ;
- modélisation hydrodynamique ;
- incidences calculées sur les ressources en eau ;
- préconisations associées.

Dossiers examinés :

Le document suivant, ainsi que ses annexes, a été examiné :

ArcaGée (2024), Pure Salmon France – Document d'incidences de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour l'élevage de saumons – Le Verdon sur Mer (33). Rapport d'étape et d'orientation après 3 séries de tests (version 0 du 16/04/2024).

Conclusions/Recommandations du BRGM :

Les investigations réalisées par forage permettent de préciser utilement le contexte géologique et hydrogéologique du projet, les interprétations de ces investigations sont cohérentes avec les documents de référence sur le territoire.

Par contre, les pompages d'essai et suivis n'ont pas été réalisés dans les règles de l'art, ils ne permettent par conséquent pas de préciser les propriétés de ces aquifères. L'affirmation de la déconnexion (ou d'une connexion négligeable) entre l'aquifère captif du Plio-Quaternaire, cible du projet, et l'aquifère sous-jacent de l'Éocène moyen à inférieur n'est pas confirmée, et les rares éléments fournis tendent plutôt à l'infirmier.

Du fait de ces incertitudes majeures sur le fonctionnement de l'aquifère visé du Plio-Quaternaire, et sur ses éventuelles connexions avec les autres masses d'eau, les simulations fournies pour évaluer l'incidence hydraulique du projet de prélèvement ne peuvent être validées. Et les choix méthodologiques pris pour la construction du modèle tendent à minimiser cette incidence.

Enfin, les évolutions de minéralisation dans les ressources en eau associées au projet de prélèvement ne peuvent pas être traitées, faute de suivi durant les essais.

Plusieurs préconisations sont émises afin que les investigations soient réalisées dans les règles de l'art, pour permettre dans un deuxième temps une évaluation étayée des incidences quantitatives et qualitatives du projet.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Informations fournies.....	10
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	10
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	10
2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE : DONNÉES INITIALES	11
2.4. INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES CONDUITES.....	12
2.4.1. Réalisation de forages	12
2.4.2. Pompage d'essai de janvier 2023	14
2.4.3. Pompage d'essai d'avril 2023.....	16
2.4.4. Pompage d'essai de septembre 2023	18
2.4.5. Observations des fluctuations piézométriques naturelles	19
2.5. ÉVALUATION DES INCIDENCES LIÉES À L'EXPLOITATION D'EAU SAUMATRE	20
2.5.1. Incidence quantitative	20
3. Avis sur les éléments du rapport.....	24
3.1. AVIS SUR LA CARACTÉRISATION DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE	24
3.2. AVIS SUR LES INVESTIGATIONS CONDUITES	25
3.2.1. Réalisation des forages et caractérisation du milieu	25
3.2.2. Caractérisation hydraulique des aquifères	27
3.2.3. Caractérisation de la minéralisation des réservoirs	30
3.2.4. Observations des fluctuations piézométriques naturelles	31
3.3. ÉVALUATION DES INCIDENCES ASSOCIÉES AU PROJET DE PRÉLÈVEMENT	31
3.3.1. Incidences quantitatives sur la ressource	31
3.3.2. Incidences qualitatives sur la ressource.....	32
4. Conclusion et recommandations.....	33
5. Annexes	35

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du site (source : Arcagée, 2024).....	10
Figure 2 : Extrait de la carte géologique BRGM 1/50 000 (http://infoterre.brgm.fr) et localisation du site.....	11
Figure 3 : Coupe technique et description lithologique des terrains traversés par le forage GAT-F (source : Arcagée, 2024)	12
Figure 4 : Coupe technique et description lithologique des terrains traversés par le forage GAT-Pz, dans sa configuration initiale avant approfondissement (source : Arcagée, 2024)	13
Figure 5 : Schéma conceptuel issu des investigations et interprétations (source : Arcagée, 2024) ..	14
Figure 6 : Suivi du pompage d'essai de janvier 2023 (source : Arcagée, 2024)	15
Figure 7 : Interprétation du pompage d'essai sur GAT-F de janvier 2023 (source : Arcagée, 2024) .	16
Figure 8 : Interprétation fournie du pompage d'essai d'avril 2023 (source : Arcagée, 2024)	17
Figure 9 : Suivi des niveaux dans GAT-Pz et dans l'estuaire durant l'essai d'avril 2023 (source : Arcagée, 2024).....	17
Figure 10 : Interprétation fournie du pompage d'essai de septembre 2023 (source : Arcagée, 2024) 18	18
Figure 11 : Suivi des niveaux dans GAT-Pz et dans l'estuaire durant l'essai de septembre 2023 (source : Arcagée, 2024)	19
Figure 12 : Suivi du niveau dans GAT-Pz durant les 200 premières minutes de l'essai de septembre 2023 (source : Arcagée, 2024)	19
Figure 13 : Position des forages d'exploitation projetés sur le site de Gare à Terre et extension du modèle (source : Arcagée, 2024).....	21
Figure 14 : Aperçu du maillage du modèle (source : Arcagée, 2024).....	21
Figure 15 : Piézométrie initiale du modèle (source : Arcagée, 2024)	22
Figure 16 : Piézométrie simulée en pompage sur un forage à 50 m ³ /h (source : Arcagée, 2024)	22
Figure 17 : Piézométrie simulée en pompage sur 6 forages à 80 m ³ /h chacun (source : Arcagée, 2024)	23
Figure 18 : Piézométrie simulée en pompage sur 6 forages à 45 m ³ /h chacun et zone d'incidence principale tracée (source : Arcagée, 2024)	23
Figure 19 : Coupe dans la maille du Modèle Nord-Aquitain (MONA) située au droit du projet (source : https://sigesaqi.brgm.fr/)	26
Figure 20 : Coupe géologique transversale de l'estuaire de la Gironde au niveau du Verdon (Platel, 1997)	27
Figure 22 : Illustration de l'interprétation d'un pompage d'essai soumis à l'influence de la marée (Chapuis <i>et al.</i> , 2006)	29
Figure 23 : Suivi du niveau piézométrique de GAT-Pz pendant le pompage d'avril 2023 sur GAT-F (source ArcaGEE, 2024, avec commentaires BRGM en rouge)	30
Figure 24 : Zoom du graphique présenté en Figure 8 sur les variations de niveau piézométrique des basses mers du 28/09/2023 autour de 23h (avant arrêt du pompage) et du 29/12/2023 autour de 12h (lors de l'arrêt du pompage) - source ArcaGEE, 2024, avec commentaires BRGM en rouge)	30

1. Introduction

La DDPP de la Gironde a sollicité le BRGM le 3 juin 2024 pour émettre un avis technique relatif au document d'incidence de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour le projet d'élevage de saumons sur le territoire de la commune de Le Verdon sur Mer (33). L'avis doit porter sur les points suivants :

- forages de reconnaissance (données acquises et interprétations) ;
- paramètres des aquifères et des forages ;
- vérification des impacts et paramètres d'exploitation (débit et rabattement) ;
- modélisation hydrodynamique ;
- incidences calculées sur les ressources en eau ;
- préconisations associées.

Le document fourni au BRGM par la DDPP de la Gironde pour analyse critique est le suivant : ArcaGée (2024), Pure Salmon France – Document d'incidences de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour l'élevage de saumons – Le Verdon sur Mer (33). Rapport d'étape et d'orientation après 3 séries de tests (version 0 du 16/04/2024).

En complément, le BRGM s'est également appuyé sur les documents/sources suivants :

- arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-3 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 1.1.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié ;
- norme NF X10-999 (2014) – Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages ;
- Barthélémy, Yves ; Seguin, Jean-Jacques ; Wuilleumier, Arnaud ; Courrioux, Gabriel ; Bourgine, Bernard (2016) - Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport final. Version 2. BRGM/RP-62549-FR, 140 p., 3 ann. ;
- Chapuis R.P. (1999). Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Gouvernement du Québec ;
- Chapuis, R. P., Belanger, C., & Chenaf, D. (2006). Pumping test in a confined aquifer under tidal influence. Ground Water, 44(2), 300-305 ;
- Kruseman, G.P., De Ridder N.A. (1974). Interprétation et discussion des pompages d'essai. International institute for land reclamation and improvement, Wageningen, The Nederlands ;
- Platel J.P., avec la collaboration de Dubreuilh J., Bonnery H., Sourisseau B., Besse A., Le Jeune F., Benhammouda S. (1997) Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 1 – Opération sectorielle – Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène – Synthèse des connaissances géologiques, état des connaissances hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-39328-FR.

L'expertise s'inscrit dans le cadre des missions d'Appui aux Administrations menées par le BRGM au titre de l'année 2024.

2. Informations fournies

Le présent paragraphe reprend les principales informations fournies par le rapport Arcagée (2024)

2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le site expertisé est situé sur la commune de Le Verdon sur Mer (33) (Figure 1).



Figure 1 : Localisation du site (source : Arcagée, 2024)

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

D'après la carte géologique au 1/50 000 du BRGM, les formations affleurantes sont des sables d'origine marine dominante des dunes actuelles.

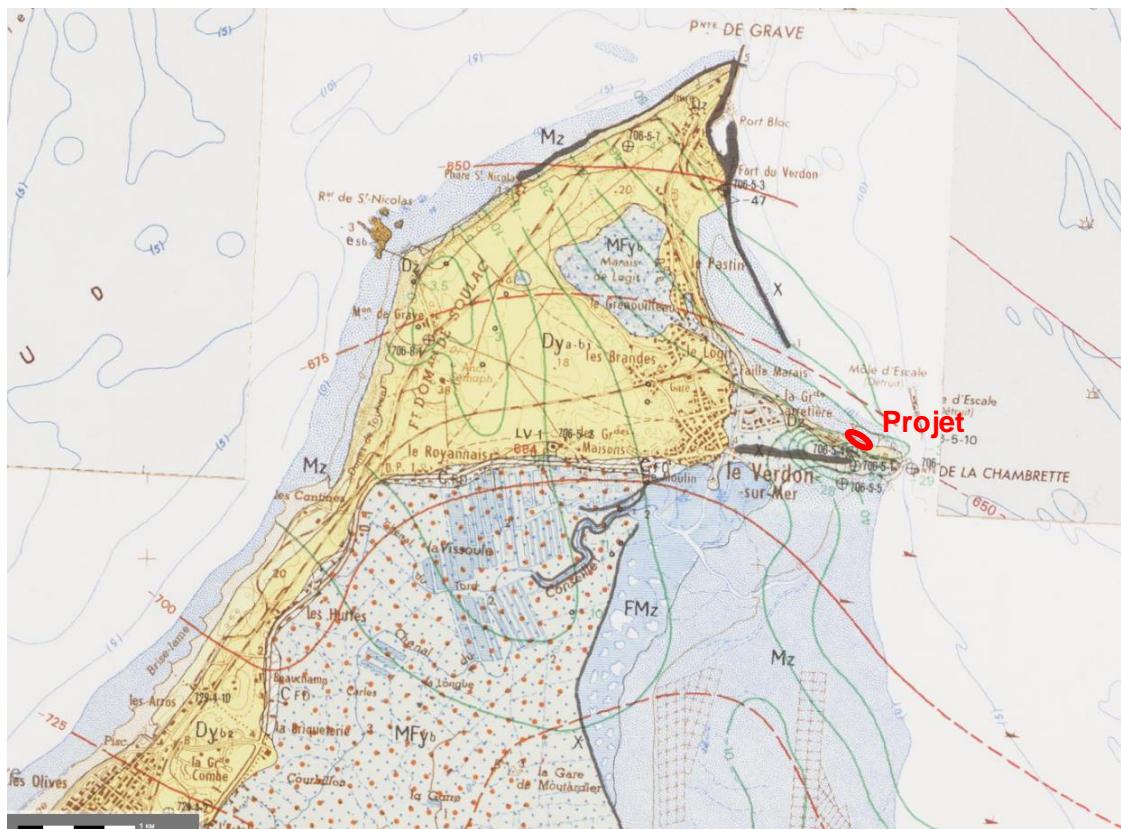


Figure 2 : Extrait de la carte géologique BRGM 1/50 000 (<http://infoterre.brgm.fr>) et localisation du site

Les sondages voisins extraits de la Banque des Données du Sous-sol (BSS) montrent que les formations géologiques susceptibles d'être rencontrées en sous-sol sur le secteur sont en premier lieu les alluvions à dominante sableuse et graveleuse du Quaternaire sur 40 à 50 m, puis les formations calcaires de l'Éocène moyen. Des formations à dominante argileuse sont susceptibles d'être observées entre ces deux ensembles, sur plusieurs mètres d'épaisseur.

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE : DONNÉES INITIALES

Les principaux aquifères référencés dans le rapport pour le secteur d'étude sont, à partir de la surface :

- l'aquifère du Plio-Quaternaire, contenu dans les formations à dominante sableuse et graveleuse (masse d'eau FRFG045) ;
- l'aquifère de l'Éocène moyen à inférieur (FRFG071), majoritairement captif dans le Médoc mais potentiellement vulnérable dans le secteur étudié du fait de la faible profondeur du toit (de l'ordre de 50 m) et de sa connexion possible avec l'estuaire de la Gironde dans le chenal ; les eaux contenues dans cet aquifère constituent régionalement une ressource majeure pour l'alimentation en potable, mais ne seraient localement pas intéressantes pour cet usage du fait d'une salinité élevée et une faible productivité ;
- les aquifères profonds captifs du Crétacé supérieur.

Les principaux captages sont recensés jusqu'à une distance de 1,5 km environ par rapport au projet, à partir des bases de données publiques. Il est également mentionné que la présence d'autres forages non référencés ne peut être négligée. Les ouvrages de prélèvement actifs sont 4 puits de profondeurs inconnues, pour un volume total annuel moyen de 10 137 m³. Il est probable que ces ouvrages captent la nappe du Plio-Quaternaire.

Les seules données piézométriques disponibles sont des cartographies établies à échelle régionale par le BRGM dans la nappe du Plio-Quaternaire.

2.4. INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES CONDUITES

2.4.1. Réalisation de forages

Afin de compléter la connaissance géologique et hydrogéologique au droit du projet, les investigations suivantes ont été conduites :

- réalisation d'un forage de reconnaissance et d'essai jusqu'à la base des formations du Plio-Quaternaire (forage GAT-F) ;
- réalisation d'un forage de reconnaissance et de suivi piézométrique dans les formations de l'Éocène (forage GAT-Pz).

Les deux ouvrages ont été réalisés au battage, dans le but de préserver au mieux les caractéristiques des aquifères traversés. Ils indiquent, à partir de la surface (Figure 3 et Figure 4) :

- la présence de sables sur les 8,5 premiers mètres susceptibles de constituer un premier aquifère libre ;
- un horizon à dominante argileuse sur 7 à 8 m d'épaisseur constituant un aquiclude au sein des formations du Plio-Quaternaire ;
- la présence de sables détritiques polygéniques et coquilliers, de granulométrie croissante avec la profondeur, jusqu'à 38 m de profondeur, avec des galets polygéniques à la base ;
- l'existence d'un horizon discontinu d'argile noire à la base du Plio-Quaternaire, inexistant sur GAT-Pz et dont l'épaisseur n'est que de 20 cm sur GAT-F ;
- le sommet érodé de l'Éocène moyen (confirmé par une datation par étude de microfaciès et biostratigraphie sur l'un des échantillons de terrain prélevés) est constitué par un calcaire induré sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres, puis par des formations détritiques sablo-argileuses à faible ciment calcaire, peu cohérentes.

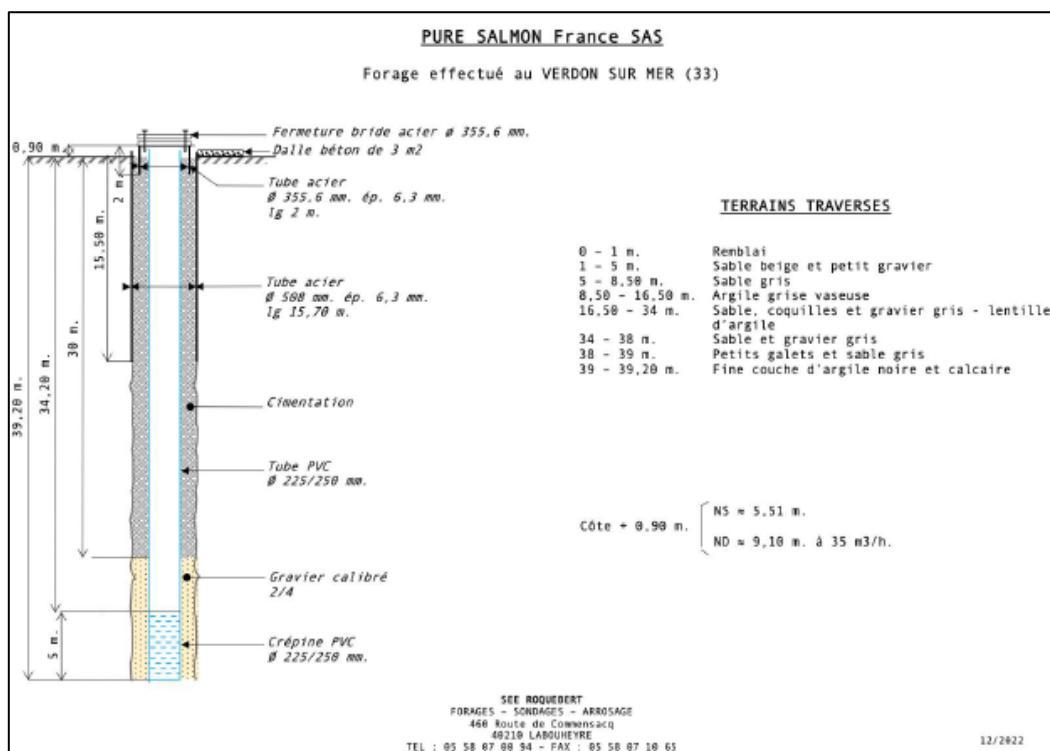


Figure 3 : Coupe technique et description lithologique des terrains traversés par le forage GAT-F
(source : Arcagée, 2024)

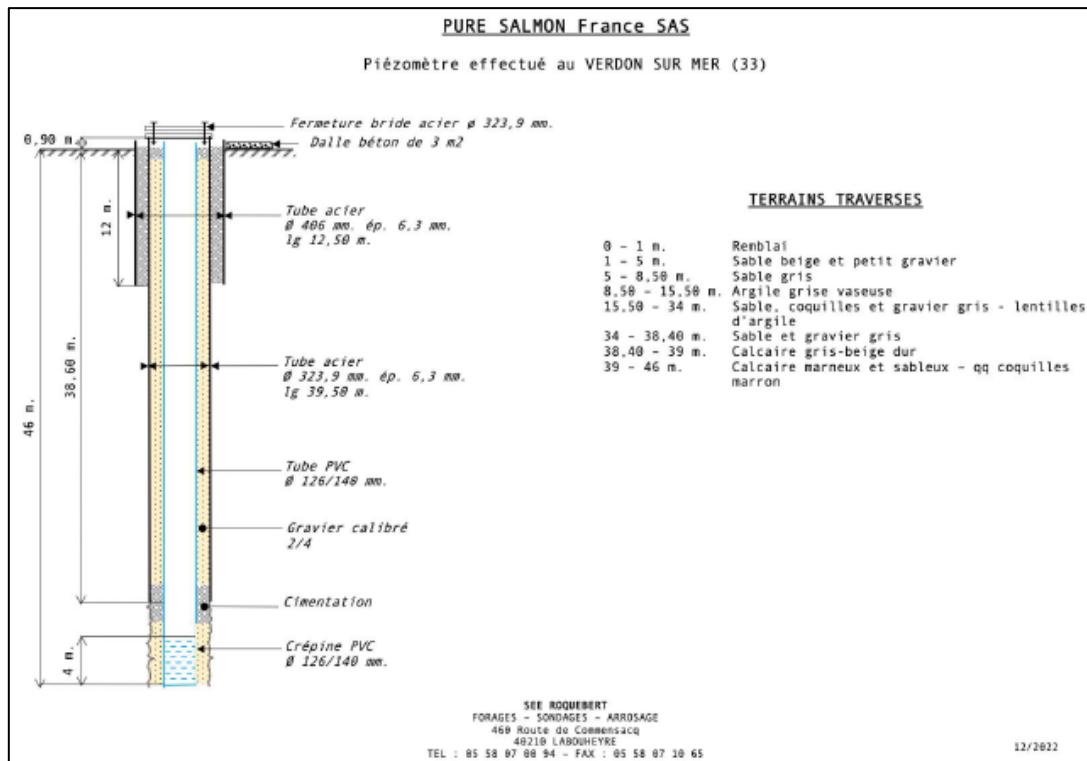


Figure 4 : Coupe technique et description lithologique des terrains traversés par le forage GAT-Pz, dans sa configuration initiale avant approfondissement (source : Arcagée, 2024)

Lors de la réalisation du forage GAT-F, une augmentation significative de conductivité a été observée à partir de 35 m de profondeur : 40 à 50 mS/cm, pour une salinité estimée de 25 à 30 g/L. L'ouvrage a été équipé de crépines et massif de gravier à la base du Plio-Quaternaire : le sommet du massif de gravier se situe à 30 m de profondeur, le sommet des crépines à 34,2 m de profondeur.

Dans un premier temps, le forage GAT-Pz a traversé les formations potentiellement aquifères de l'Éocène moyen sur 7 m ; il a alors été équipé de crépines et massif de gravier au droit de ces formations ; les crépines PVC ont été positionnées sur une hauteur de 4 m. Il est indiqué que le pompage de nettoyage a occasionné une vidange rapide de l'ouvrage, avec ensuite une remontée très lente du niveau piézométrique, il en est déduit un bon isolement de l'ouvrage et une conductivité hydraulique significativement plus faible que dans les formations du Plio-Quaternaire ; lors de ce pompage à 10 m³/h, la conductivité mesurée était très élevée à 40 mS/cm, ce qui indiquerait une salinité de l'ordre de 25 g/L.

Dans un second temps, après réalisation de deux séries de pompages d'essai en 2023, le forage GAT-Pz a été approfondi jusqu'à 63 m de profondeur, afin de capter la plupart de l'aquifère de l'Éocène moyen à inférieur, notamment les horizons sableux réputés les plus transmissifs.

Le constat majeur posé est celui de l'absence d'horizon susceptible de constituer une déconnexion hydraulique entre l'aquifère du Plio-Quaternaire cible et l'aquifère de l'Éocène inférieur à moyen. Il est toutefois avancé, au vu des contrastes de perméabilités, que le sommet de l'Éocène est susceptible de constituer un aquitard.

Les résultats de ces investigations sont synthétisés sur la Figure 5 ci-après.

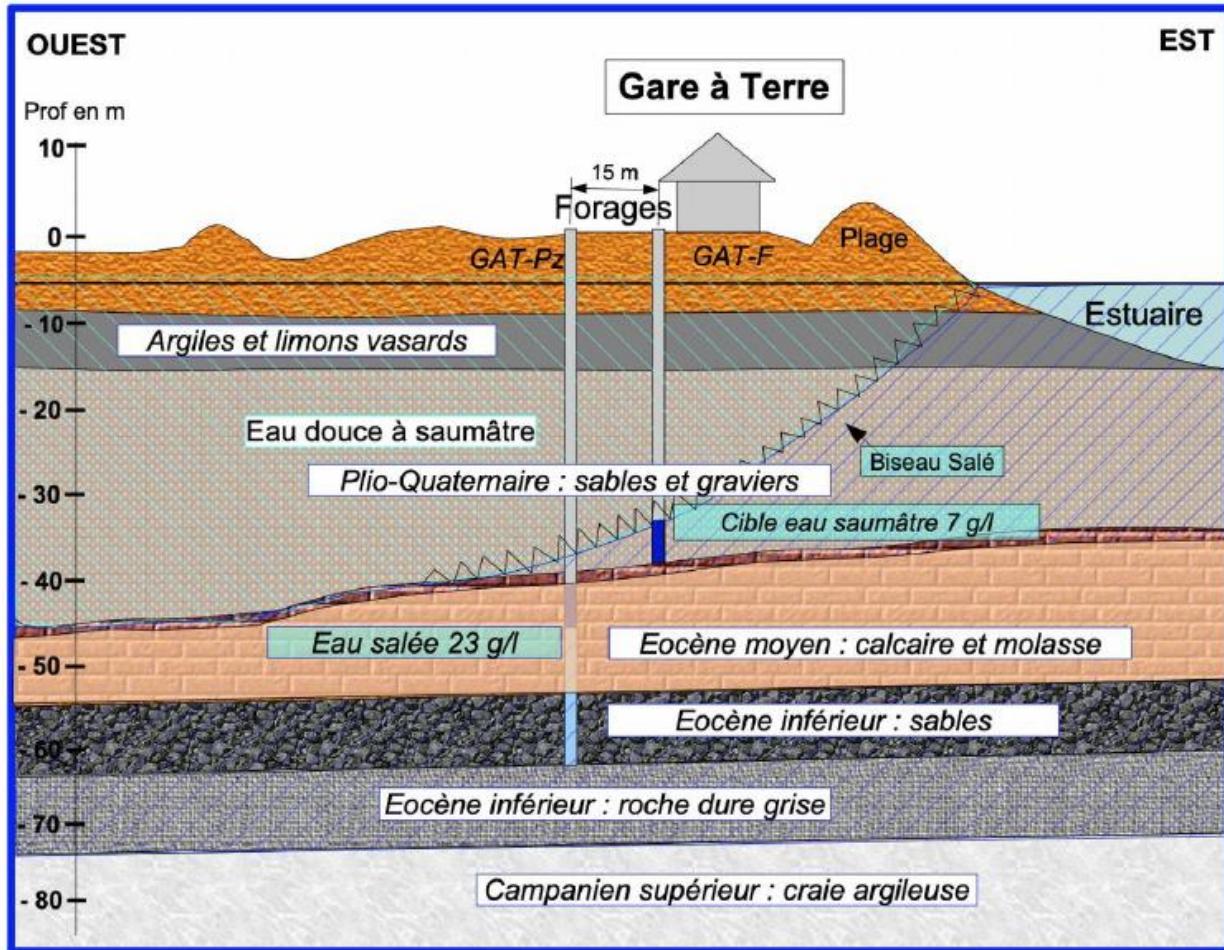


Figure 5 : Schéma conceptuel issu des investigations et interprétations (source : Arcagée, 2024)

2.4.2. Pompage d'essai de janvier 2023

Un pompage d'essai par 3 paliers de débit enchaînés de 40 minutes a été réalisé sur GAT-F, immédiatement suivi par un dernier palier d'une durée de 2h30 à 35 m³/h. Les niveaux ont été suivis en continu dans les deux forages. La conductivité de l'eau a été suivie à l'exhaure sur GAT-F, ainsi qu'en profondeur à 43 m (au droit des crépines) sur GAT-Pz. Les constats posés par Arcagée sont les suivants :

- sur l'ensemble de l'essai, les potentiels hydrauliques sont affectés par une remontée naturelle sous l'effet de la marée montante ;
- concernant les paramètres hydrauliques :
 - o le forage GAT-F montre un débit spécifique élevé, de l'ordre de 7 à 9 m³/h/m ;
 - o une interprétation de l'essai a été conduite avec le logiciel OUAIP, elle aboutit à une transmissivité de l'ordre de 3 à 4×10^{-4} m²/s (Figure 7) ;
 - o de ce fait l'aquifère plio-quaternaire est jugé capable de fournir 270 m³/h à répartir sur 6 ouvrages ;
- concernant les minéralisations :
 - o au sein du Plio-Quaternaire, la minéralisation la plus élevée est rencontrée à la base des formations, entre 35 et 40 m environ ;

- la conductivité mesurée à l'exhaure de GAT-F (Plio-Quaternaire) augmente de 13,15 à 13,85 mS/cm sur la durée de l'essai, soit une salinité estimée de l'ordre de 8 g/L ;
- la conductivité mesurée en profondeur dans GAT-Pz (Éocène moyen), plus élevée, augmente sur la durée de l'essai de 22 à 26 mS/cm ;
- du fait du différentiel de conductivité hydraulique entre les aquifères du Plio-Quaternaire et de l'Éocène moyen, il n'est pas attendu d'influence importante du projet sur la masse d'eau de l'Éocène moyen.

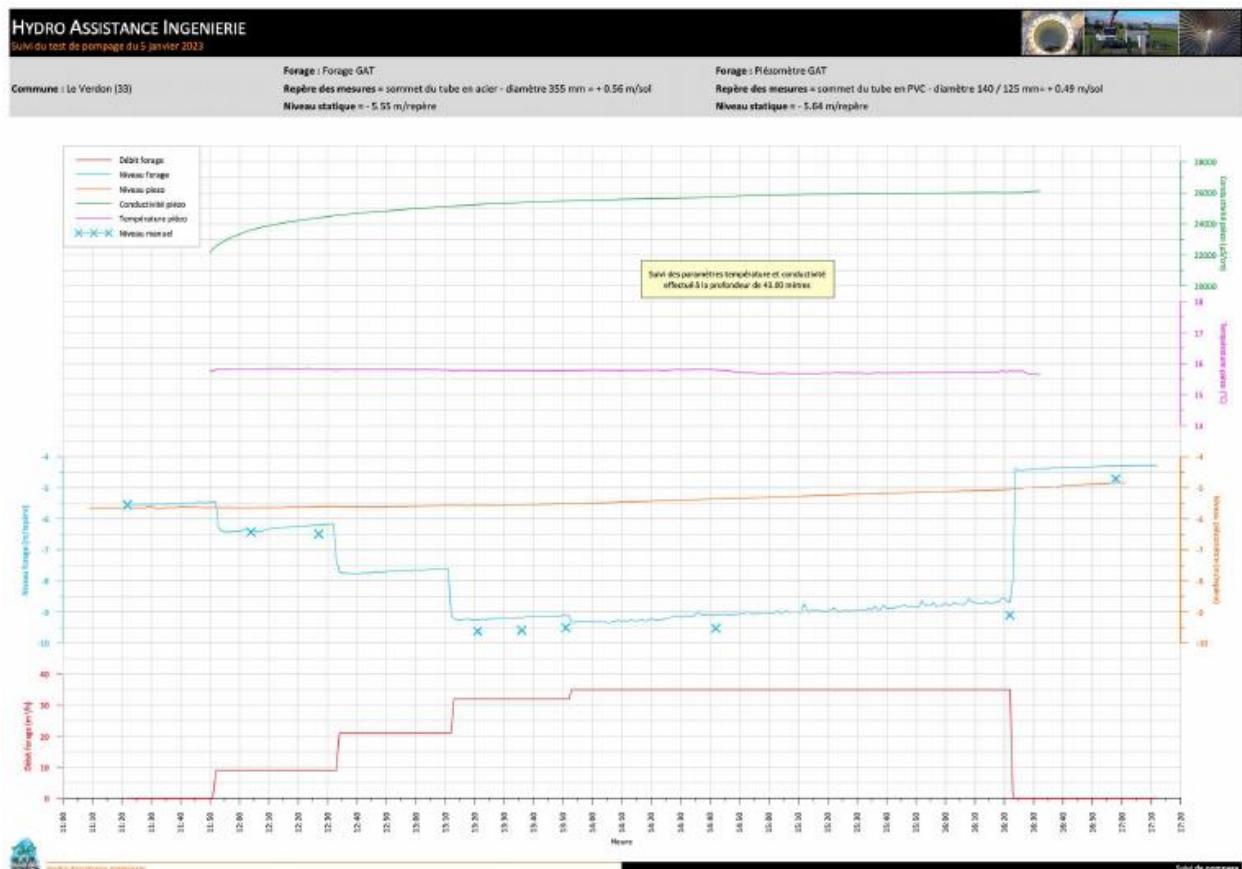


Figure 6 : Suivi du pompage d'essai de janvier 2023 (source : Arcagée, 2024)

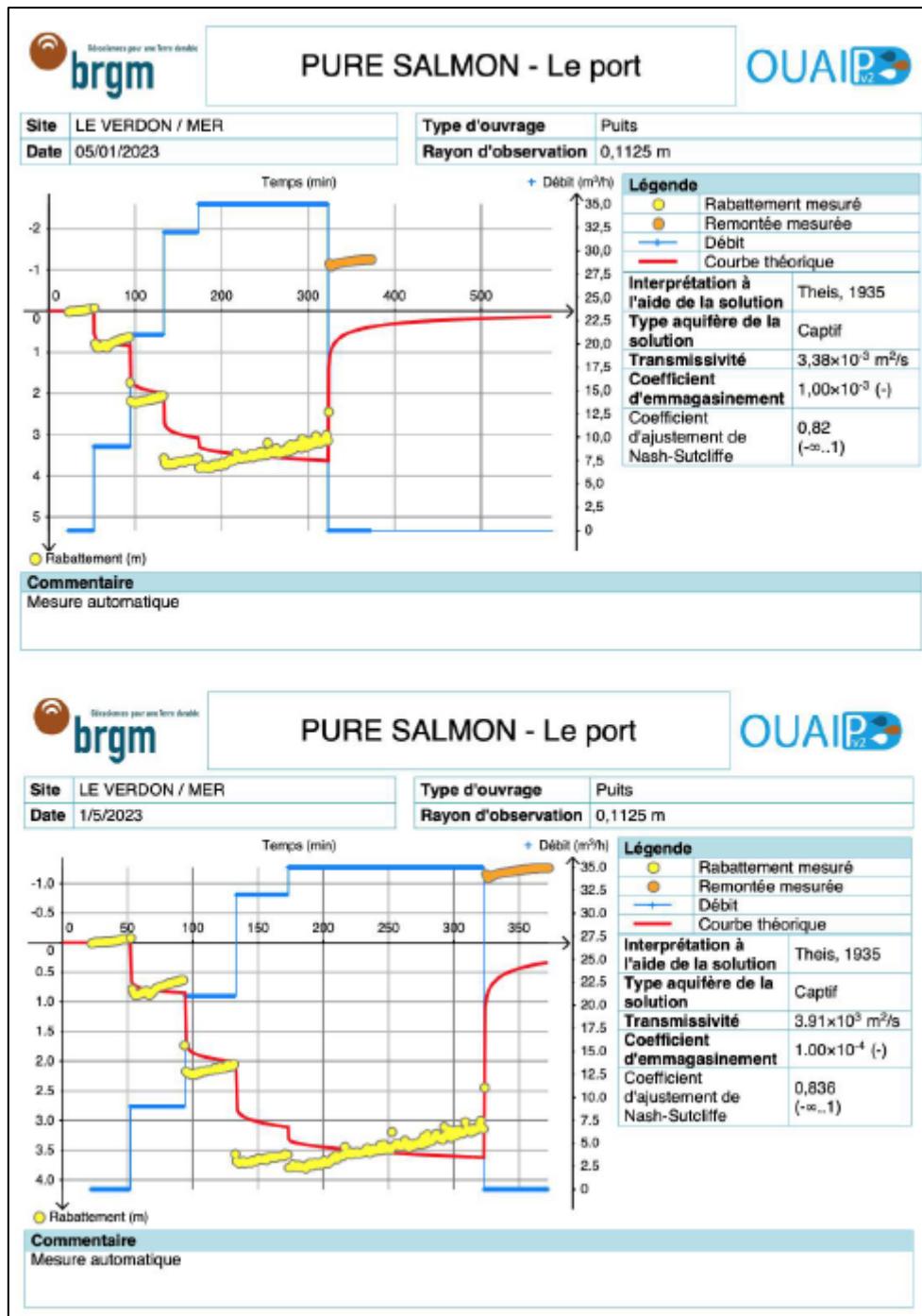


Figure 7 : Interprétation du pompage d'essai sur GAT-F de janvier 2023 (source : Arcagée, 2024)

2.4.3. Pompage d'essai d'avril 2023

Un pompage complémentaire a été effectué du 3 avril (12:40) au 7 avril (10:52) 2023 sur le forage GAT-F : 2 paliers enchaînés de $36,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (42 minutes) puis $65 \text{ m}^3/\text{h}$ (68 minutes), suivis d'un pompage enchaîné de $76 \text{ m}^3/\text{h}$ durant 94 h. Pour le suivi de l'essai, les 2 forages GAT-F et GAT-Pz ont été équipés de sondes de niveau.

L'interprétation fournie pour cet essai est donné sur la Figure 8, la transmissivité estimée est de l'ordre de $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Le suivi du niveau dans GAT-Pz est donné sur la Figure 9, il en est déduit qu'aucune influence de pression du pompage dans la nappe du Plio-Quaternaire n'est visible sur le piézomètre, dans la nappe de l'Éocène moyen.

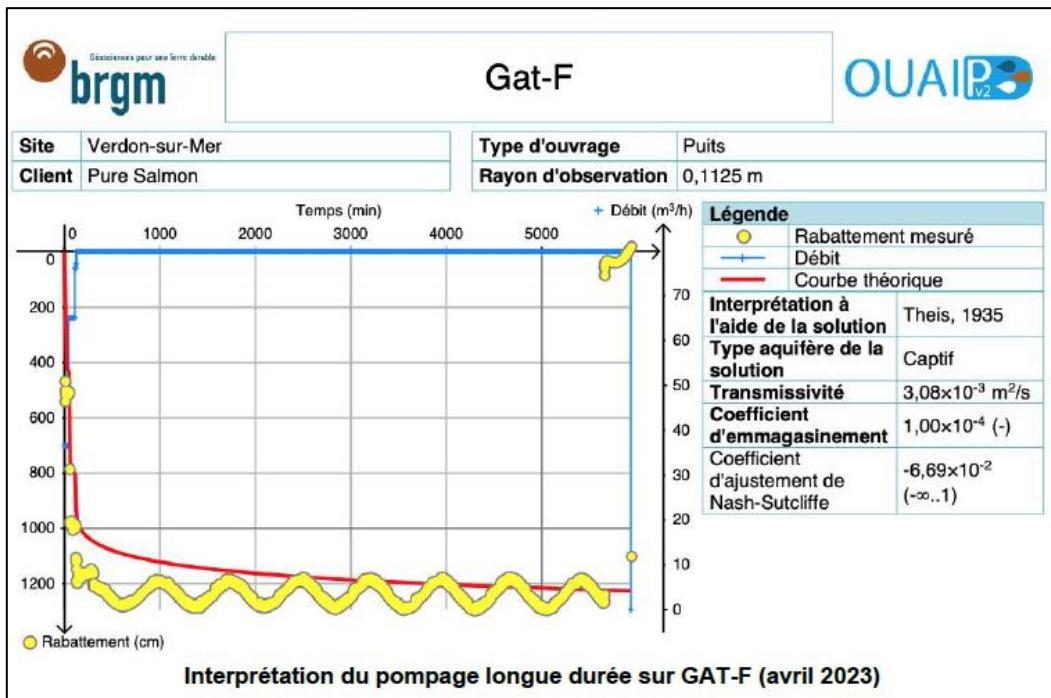


Figure 8 : Interprétation fournie du pompage d'essai d'avril 2023 (source : Arcagée, 2024)

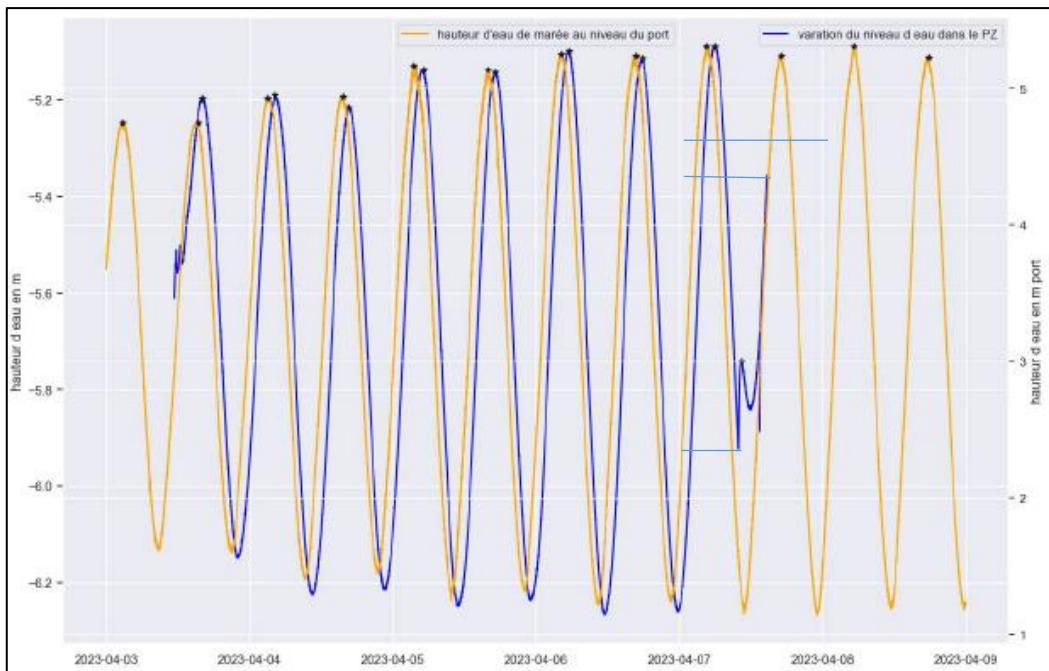


Figure 9 : Suivi des niveaux dans GAT-Pz et dans l'estuaire durant l'essai d'avril 2023 (source : Arcagée, 2024)

Des prélèvements pour analyses (ions majeurs essentiellement) ont été effectués :

- l'un sur GAT-F (Plio-Quaternaire) le 17 avril 2023 ; la minéralisation totale est de 6,9 g/L, le faciès est hybride entre eau continentale et eau marine ;
- l'autre sur GAT-Pz (Éocène moyen) le 19 avril 2023 ; la minéralisation totale est de 22,7 g/L.

Cette différence significative de salinité est interprétée comme renforçant l'hypothèse d'isolement entre les deux masses d'eau considérées.

2.4.4. Pompage d'essai de septembre 2023

Un pompage d'essai a été conduit après approfondissement du forage GAT-Pz à l'Éocène inférieur, du 26 septembre (9:59) au 29 septembre (12:00) 2023 : 2 paliers enchaînés d'1h à 80 puis 100 m³/h, suivis d'un pompage enchaîné de 72h à 116 m³/h.

L'interprétation fournie pour cet essai est donnée sur la Figure 8, la transmissivité estimée est de l'ordre de 3×10^{-3} m²/s (2,6x10⁻³ sur le graphique, 3,1x10⁻³ dans le texte). Le suivi du niveau dans GAT-Pz est donné sur la Figure 11. Il en est déduit qu'aucune influence de pression du pompage n'est visible.

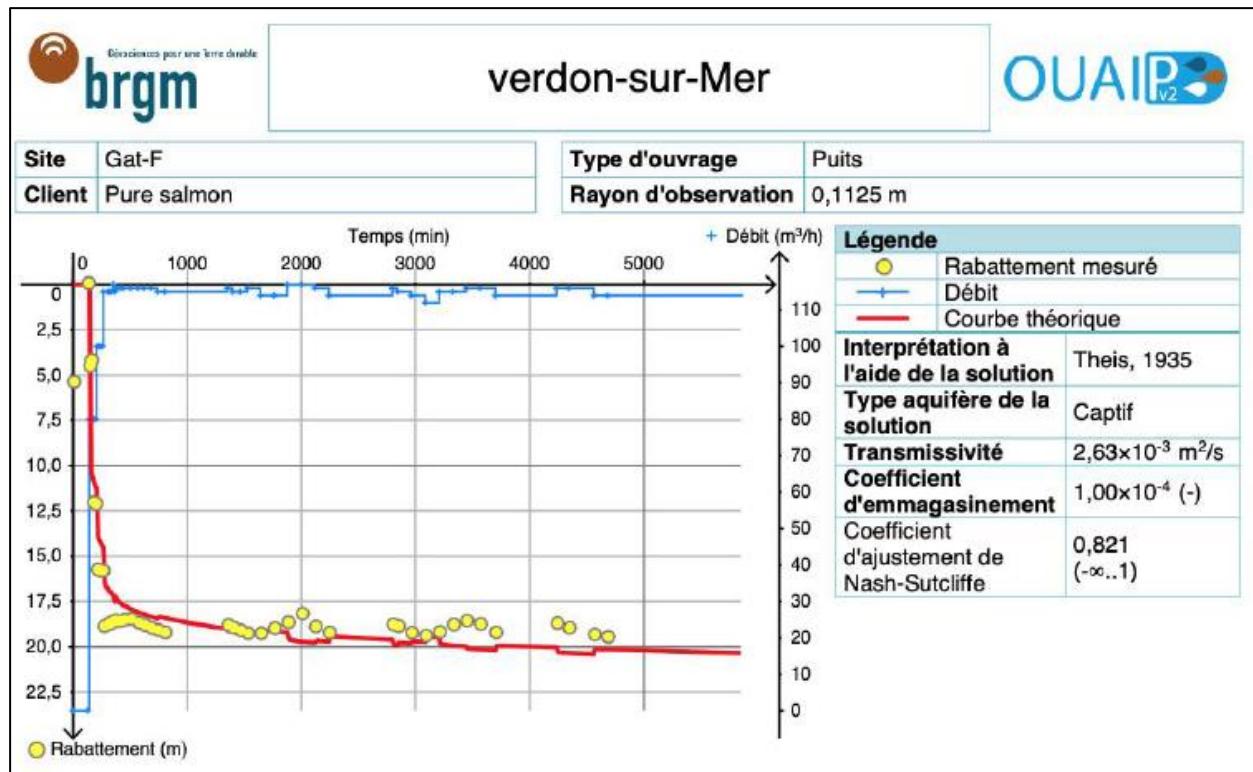


Figure 10 : Interprétation fournie du pompage d'essai de septembre 2023 (source : Arcagée, 2024)

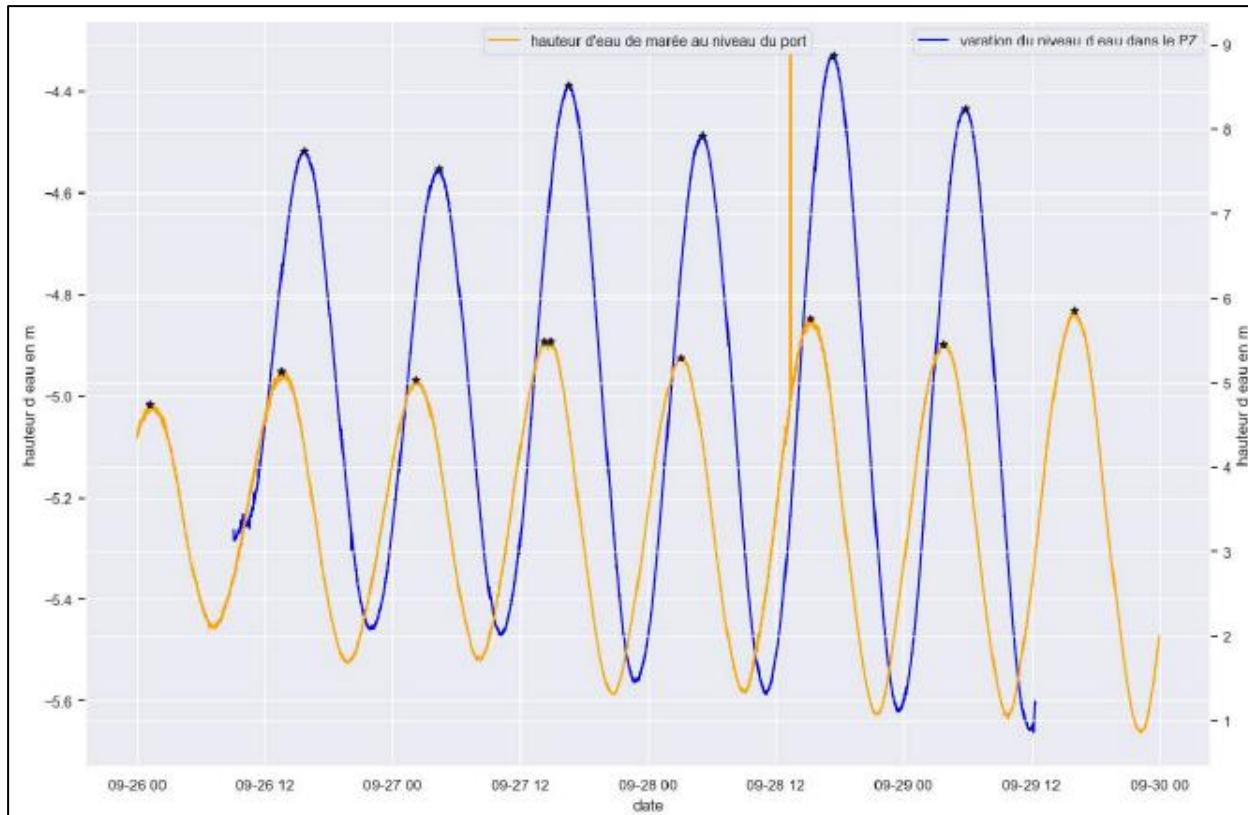


Figure 11 : Suivi des niveaux dans GAT-Pz et dans l'estuaire durant l'essai de septembre 2023
(source : Arcagée, 2024)

Un zoom est effectué sur le début de l'essai, il met en évidence une influence du pompage dans GAT-F sur le niveau de GAT-Pz (Figure 12). Il en est déduit une influence de l'ordre de 3 cm sur le niveau dans la nappe de l'Éocène, influence considérée comme très faible au regard des variations de pression liées à l'influence des marées ; cette influence se manifestant comme un "transfert de pression sans transfert de matière".

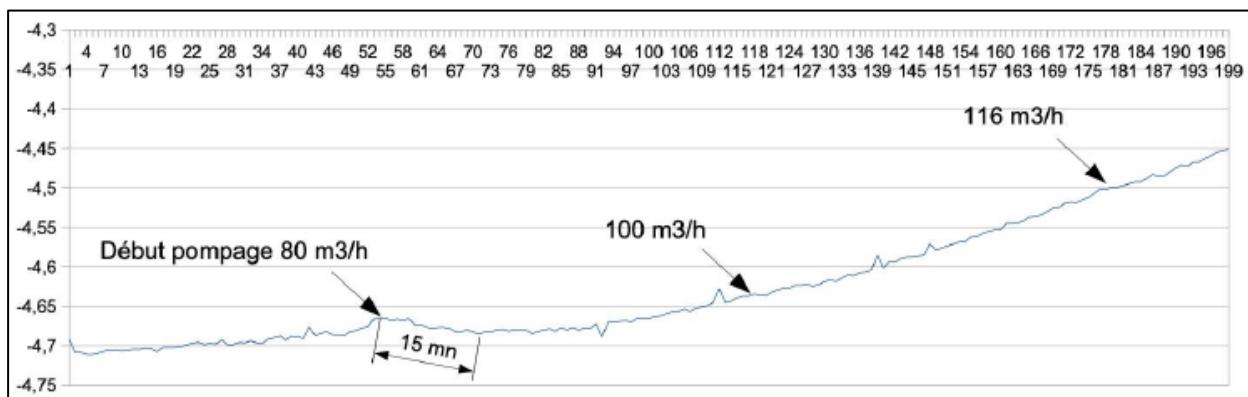


Figure 12 : Suivi du niveau dans GAT-Pz durant les 200 premières minutes de l'essai de septembre 2023 (source : Arcagée, 2024)

2.4.5. Observations des fluctuations piézométriques naturelles

En complément des essais hydrauliques, il est fourni une note de synthèse des observations sur le suivi des niveaux piézométriques dans les deux forages GAT-Pz (Éocène inférieur) et GAT-F (Plio-Quaternaire), hors pompage, comparés aux fluctuations des niveaux dans l'estuaire.

Les observations fournies sont les suivantes :

- un retard plus faible en GAT-F (56 minutes en moyenne) qu'en GAT-Pz (67 minutes) ; ce retard est calculé sur les *minima* et *maxima* (associés aux pleine mer et basse mer) ;
- un facteur d'amortissement plus faible en GAT-F (65 %) qu'en GAT-Pz (74 %) ; ce facteur est calculé en effectuant le ratio entre l'amplitude des fluctuations dans la nappe et celle de dans l'estuaire.

Il en est déduit une différence de diffusivités hydrauliques entre les deux aquifères, confirmant "le bon isolement des ouvrages dans 2 systèmes hydrogéologiques de salinités très différentes et l'absence de relation hydraulique entre les 2 systèmes".

2.5. ÉVALUATION DES INCIDENCES LIÉES À L'EXPLOITATION D'EAU SAUMATRE

2.5.1. Incidence quantitative

En préambule de l'estimation de l'incidence quantitative, Arcagée évalue la baisse de pression dans l'Éocène associée au projet à 2 cm. Il est pour cela considéré un débit d'exhaure de 45 m³/h (correspondant au débit d'exploitation envisagé pour chacun des forages), au regard de l'incidence de 3 cm estimée lors du pompage à 80 m³/h (septembre 2023, cf. 2.4.4).

La configuration prévisionnelle d'exploitation de l'aquifère du Plio-Quaternaire prévoit deux lignes de trois forages de pompage ; sur chaque ligne, les ouvrages sont espacés de 50 m les uns des autres, et les deux lignes sont espacées de 25 m (Figure 13). Chaque ouvrage est exploité à 45 m³/h, pour un total de 270 m³/h.

Pour évaluer l'incidence quantitative de cette exploitation, un modèle numérique en 2 dimensions construit sous Win-ASM 6.0 a été utilisé. La méthodologie est décrite dans le rapport de Geopal (référence 24 GIR 20, mars 2024) figurant en Annexe du rapport d'Arcagée (2024). Les caractéristiques indiquées du modèle sont les suivantes :

- régime permanent ;
- nappe captive ;
- extension de 103,73 ha (environ 900 x 1150 m d'après les figures) ;
- 625 mailles (p. 7) ou 961 mailles (p. 12) ;
- paramètres d'entrée utilisés initialement pour le calage :
 - gradient piézométrique de 0,5 %,
 - transmissivité de 3×10^{-3} m²/s,
 - coefficient d'emmagasinement de 10^{-4} ,
 - niveau statique à 1,30 mNGF.

Il est fourni un aperçu du maillage du modèle (Figure 14), de la piézométrie initiale (Figure 15).

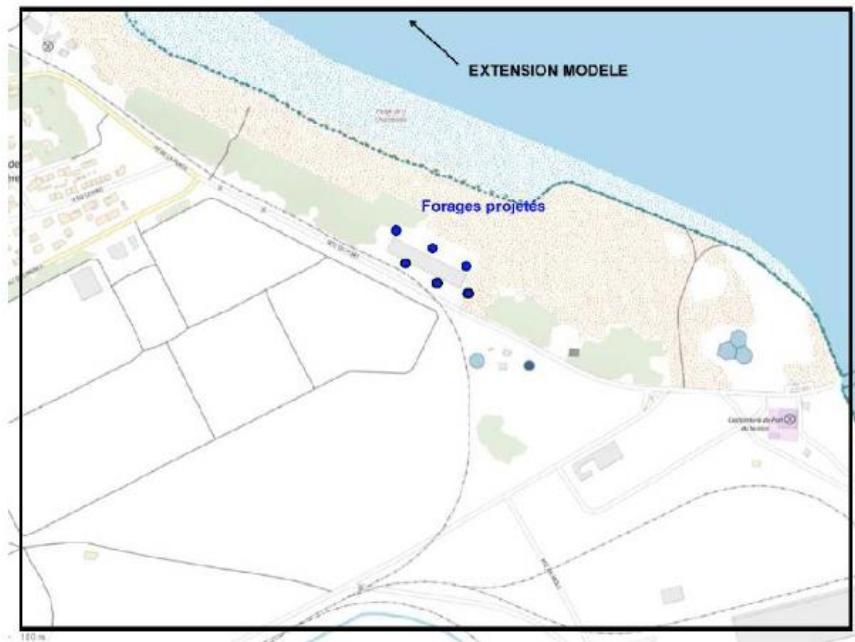


Figure 13 : Position des forages d'exploitation projetés sur le site de Gare à Terre et extension du modèle (source : Arcagée, 2024)

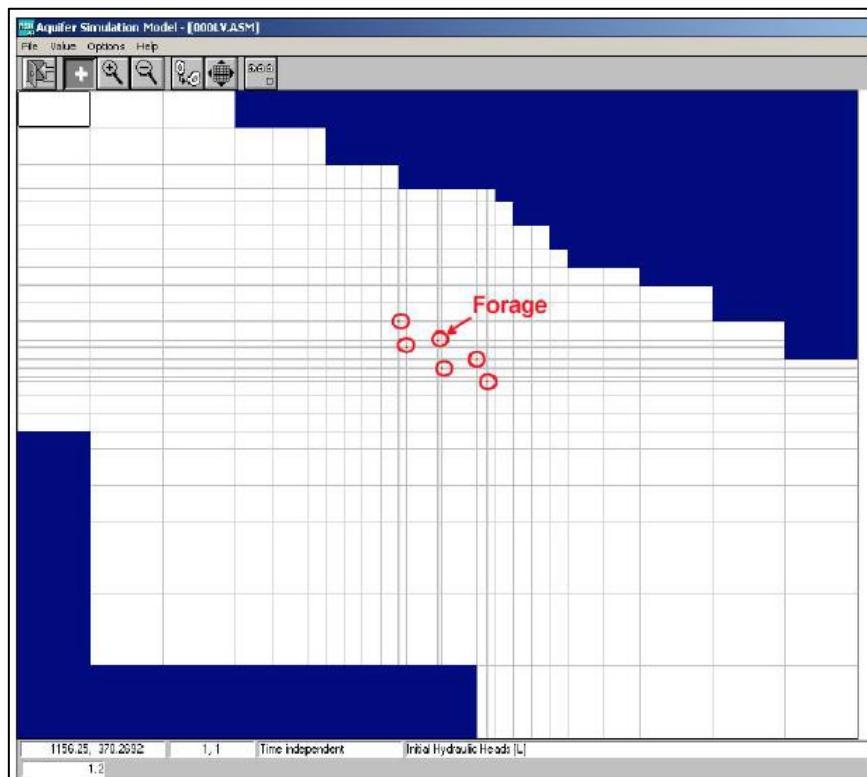


Figure 14 : Aperçu du maillage du modèle (source : Arcagée, 2024)

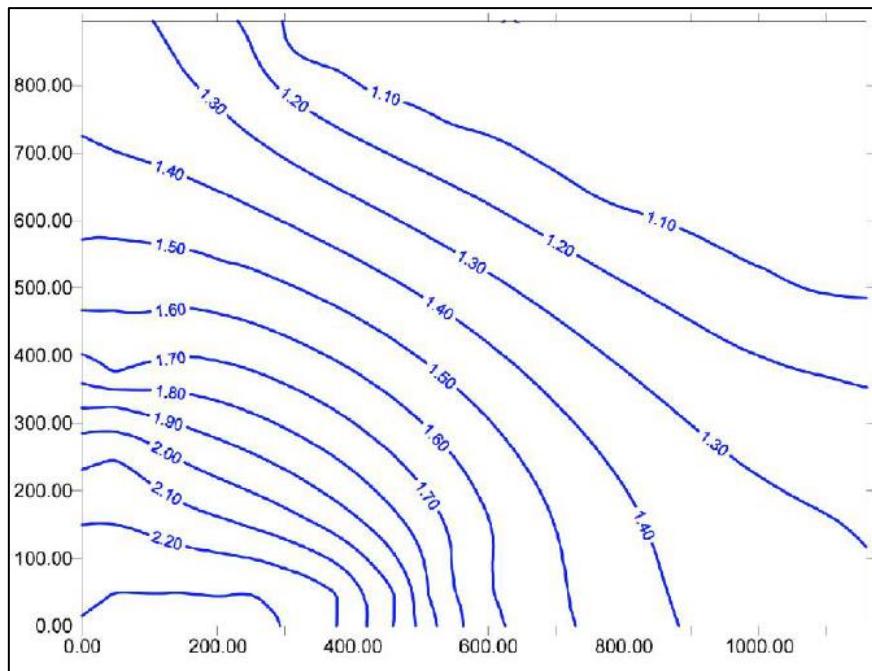


Figure 15 : Piézométrie initiale du modèle (source : Arcagée, 2024)

Il est indiqué que le calage du modèle a été effectué en simulant un pompage unique à 50 m³/h (Figure 16), les différentes itérations devant conduire à un rabattement proche de la valeur théorique calculée par Arcagée.

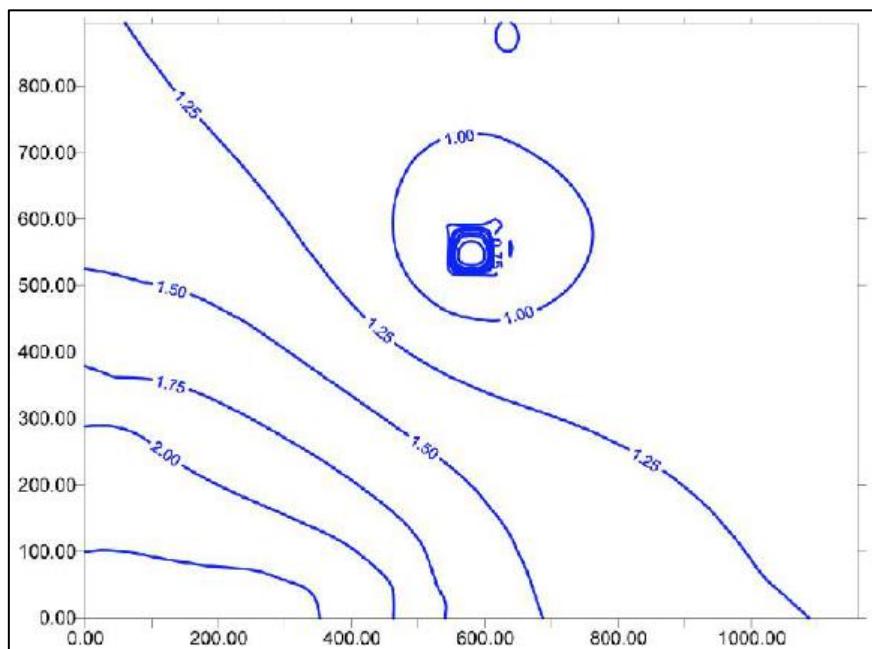


Figure 16 : Piézométrie simulée en pompage sur un forage à 50 m³/h (source : Arcagée, 2024)

Une simulation d'exploitation a ensuite été conduite, sur la base de 6 pompages à 80 m³/h. Il en résulte des niveaux dynamiques compris entre -9,59 et -10,38 mNGF au droit des ouvrages (Figure 17).

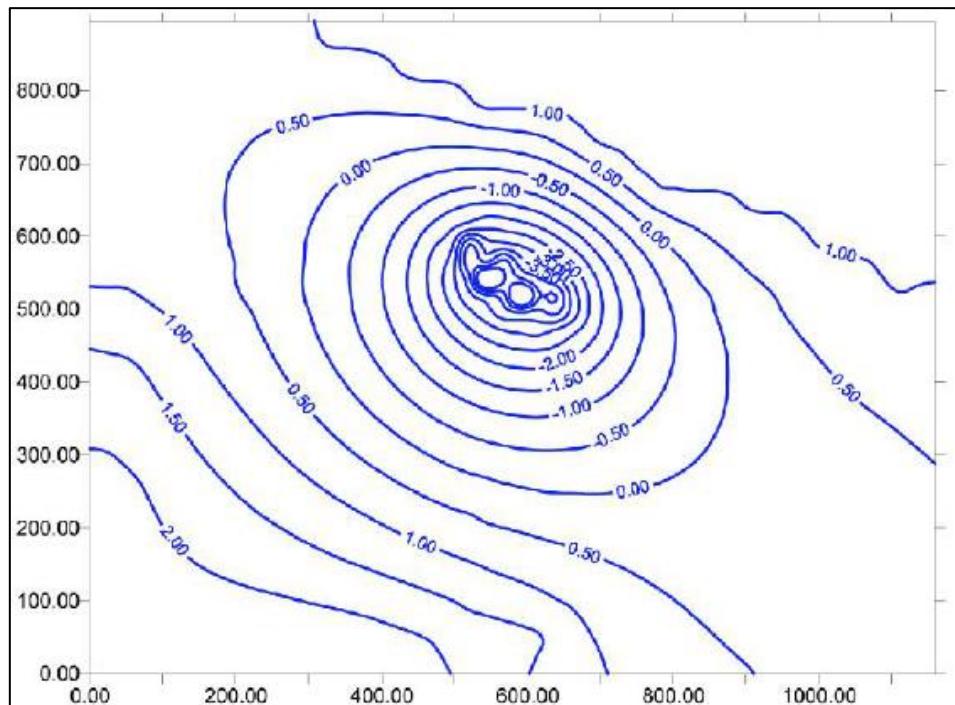


Figure 17 : Piézométrie simulée en pompage sur 6 forages à $80 \text{ m}^3/\text{h}$ chacun (source : Arcagée, 2024)

En complément, est également fournie une simulation d'exploitation avec 6 pompages à $45 \text{ m}^3/\text{h}$ chacun, en situation de basse mer (niveau piézométrique au repos à 0,8 mNGF dans la zone des forages). Le rabattement calculé sur les forages est de l'ordre de 7 à 7,6 m. Il en est déduit une zone d'influence principale du pompage de $500 \times 300 \text{ m}$.

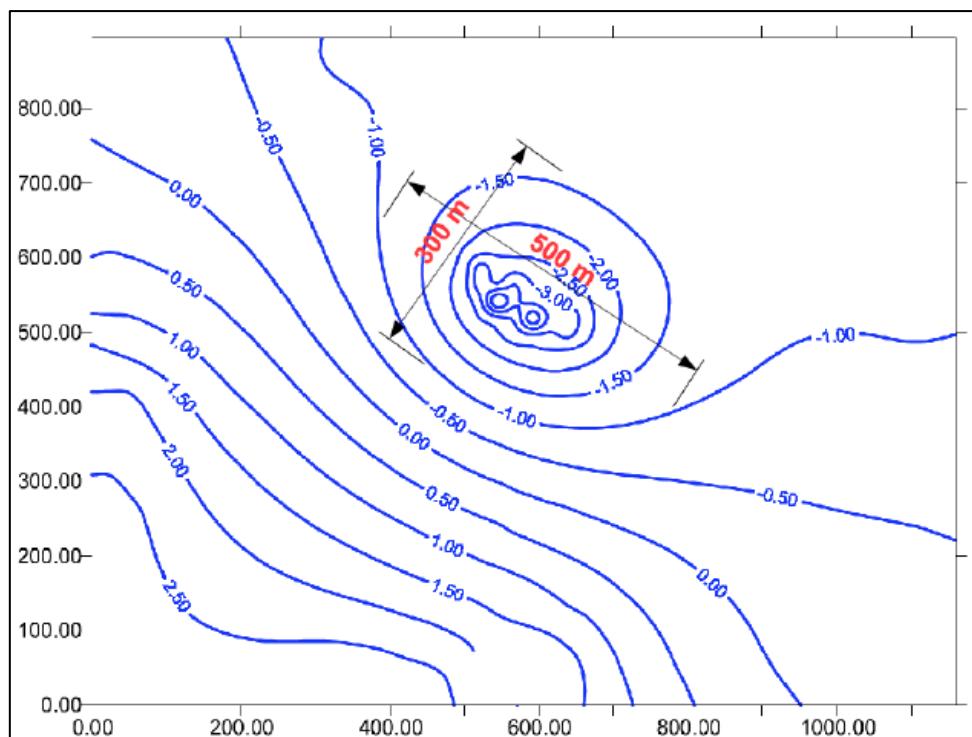


Figure 18 : Piézométrie simulée en pompage sur 6 forages à $45 \text{ m}^3/\text{h}$ chacun et zone d'incidence principale tracée (source : Arcagée, 2024)

3. Avis sur les éléments du rapport

3.1. AVIS SUR LA CARACTÉRISATION DU CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

La description initiale du contexte géologique est établie sur la base de la carte géologique au 1/50 000, ainsi que des coupes géologiques validées des ouvrages disponibles en Banque du Sous-Sol dans un rayon de 3 km environ, suffisant au vu du projet et du contexte.

Un point de vigilance est à mettre sur les anciens forages de production d'eau potable décrits dans le rapport, car ils présentent une erreur de positionnement conséquente sur la carte de localisation (page 16) :

- le forage référencé BSS001TYDV se situe à 200 m environ au sud-est du projet ; sa profondeur est de 567 m, il est crépiné au droit du Crétacé supérieur (Turonien à Cénomanien) ; il aurait été réalisé en 1932 ("Forage du Mole" ou "Forage communal n°1 – Pointe de la Chambrette") ;
- le forage référencé BSS001TXLW se situe à 3,5 km environ au nord-ouest du projet, sa profondeur est de 66 m, il capte l'aquifère de l'Éocène inférieur à moyen.

De même, l'identification des principaux aquifères du secteur est cohérente avec la Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères (BDLISA), base publique établissant l'état actuel des connaissances régionales sur les principaux aquifères. Celle-ci identifie en effet la succession suivante au Niveau 3 (niveau présentant la meilleure résolution), au droit du site :

- unité aquifère 308AA01 : Sables dunaires du littoral aquitain (Plio-Quaternaire) ;
- unité semi-perméable 308AA02 : Sables flandriens et argiles du Gurp du littoral aquitain ;
- unité aquifère 334AG04 : Calcaires, grès et sables marins de l'Éocène moyen du nord du Bassin aquitain ;
- unité imperméable 334AG12 : Éponte entre l'Éocène inférieur et Éocène moyen du nord-ouest du Bassin aquitain ;
- unité imperméable 338AA01 : Molasses et argiles de l'Éocène-Paléocène du Bassin aquitain ;
- unité aquifère 344AA10 : Calcaires bioclastiques et grès du Campano-Maastrichtien du nord du Bassin aquitain.

D'un point de vue réglementaire, il est toutefois important d'apporter quelques précisions concernant les codes MESO (Masses d'Eau Souterraine) des aquifères concernés, car les codes indiqués dans le rapport sont pour certains obsolètes :

- sables, graviers et galets plio-quaternaires de l'Estuaire de la Gironde : FRFG045A ;
- sables, graviers, grès et calcaires de l'Éocène inférieur et moyen majoritairement captif du Nord du Bassin aquitain : FRFG114 ;
- aquifères du Crétacé supérieur : FRFG072, FRFG073A, FRFG075A.

3.2. AVIS SUR LES INVESTIGATIONS CONDUITES

3.2.1. Réalisation des forages et caractérisation du milieu

Les descriptions des terrains traversés par les deux forages GAT-F et GAT-Pz permettent de compléter la connaissance du site avec une description locale. Il est à noter que le choix, peu commun, de mettre en œuvre une datation des échantillons de terrains pour confirmer leur datation à l'Éocène moyen, étaye significativement cette caractérisation : elle permet de s'affranchir de la subjectivité inhérente à la seule description visuelle des terrains, qui est la pratique usuellement mis en œuvre.

D'autre part, la méthode du battage choisie pour la réalisation des forages présente l'avantage de minimiser l'endommagement des terrains traversés, par rapport à d'autres méthodes utilisant des fluides de forage. Elle est, de ce fait, parfaitement adaptée pour caractériser les propriétés hydrauliques des aquifères traversés, avec la meilleure représentativité possible.

Le constat est que les descriptions des terrains et principaux aquifères rencontrés au droit du site sont cohérentes avec les interprétations fournies dans les données publiques du Modèles Nord-Aquitain (MONA), disponibles en ligne sur l'atlas du Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine (Figure 19).

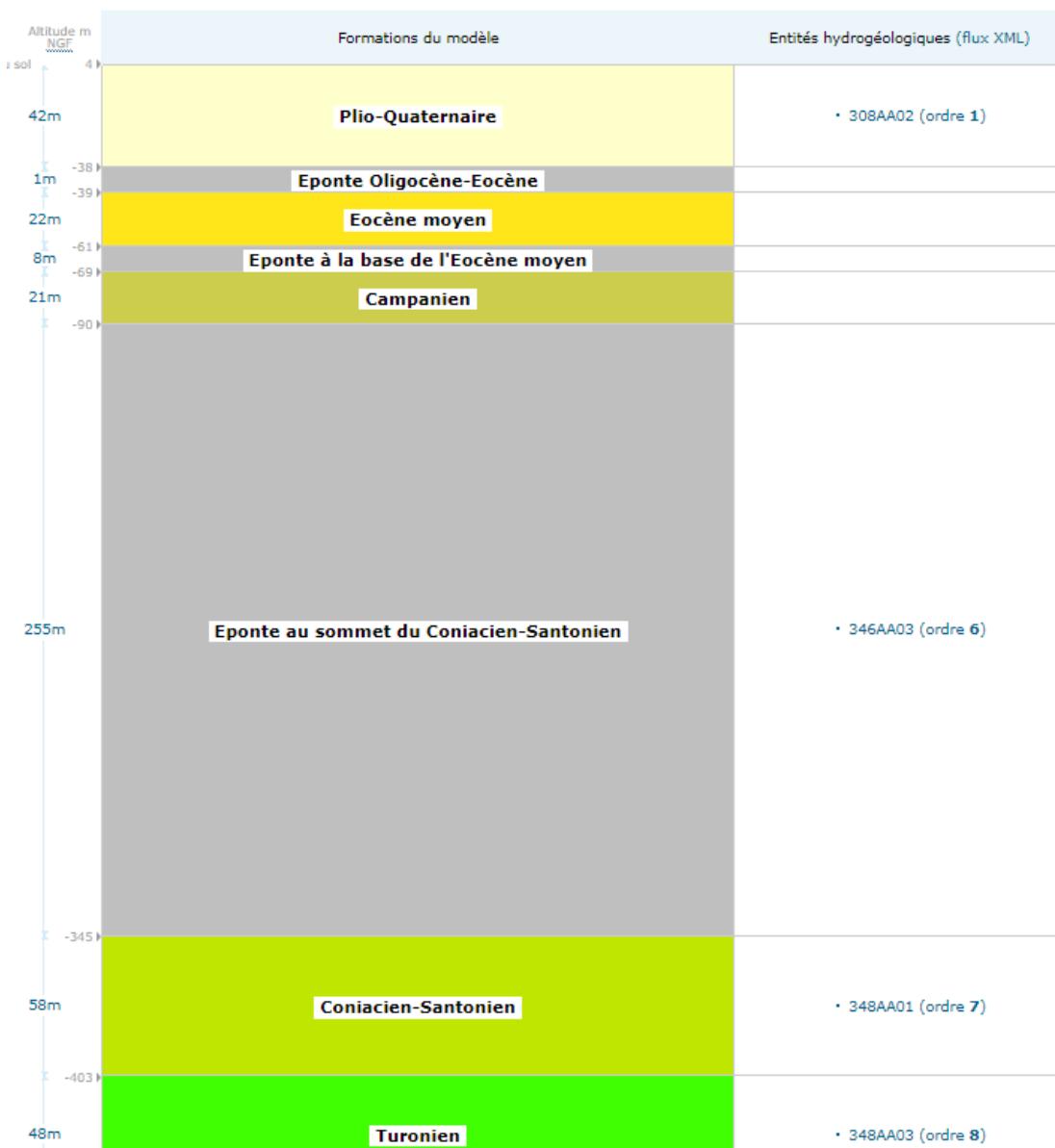


Figure 19 : Coupe dans la maille du Modèle Nord-Aquitain (MONA) située au droit du projet
(source : <https://sigesaqi.brgm.fr/>)

Les descriptions des terrains et observations en forage conduisent Arcagée au constat affiné que le principal horizon aquifère dans le Plio-Quaternaire, qui constitue la cible du projet, est captif sous les argiles vasardes. Ceci est également cohérent avec certains documents antérieurs focalisés sur ce territoire. Par exemple, la synthèse géologique et hydrogéologique des relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène (Platel, 1997) identifiait sur tout ce secteur un aquifère captif constitué par les sables, graviers et galets de la base du Plio-Quaternaire, sous les formations à dominante argileuse flandrienne. Le schéma de synthèse d'Arcagée (Figure 5) est notamment cohérent avec la Figure 20 issue de cette synthèse. Il apparaît également que cet aquifère repose sur les aquifères de l'Éocène moyen et inférieur et du Campanien, sans qu'aucune formation imperméable franche susceptible de les déconnecter soit identifiée à grande échelle. Il est uniquement à noter que le sommet de l'Éocène peut localement avoir une moindre perméabilité, et constituer un aquitard.

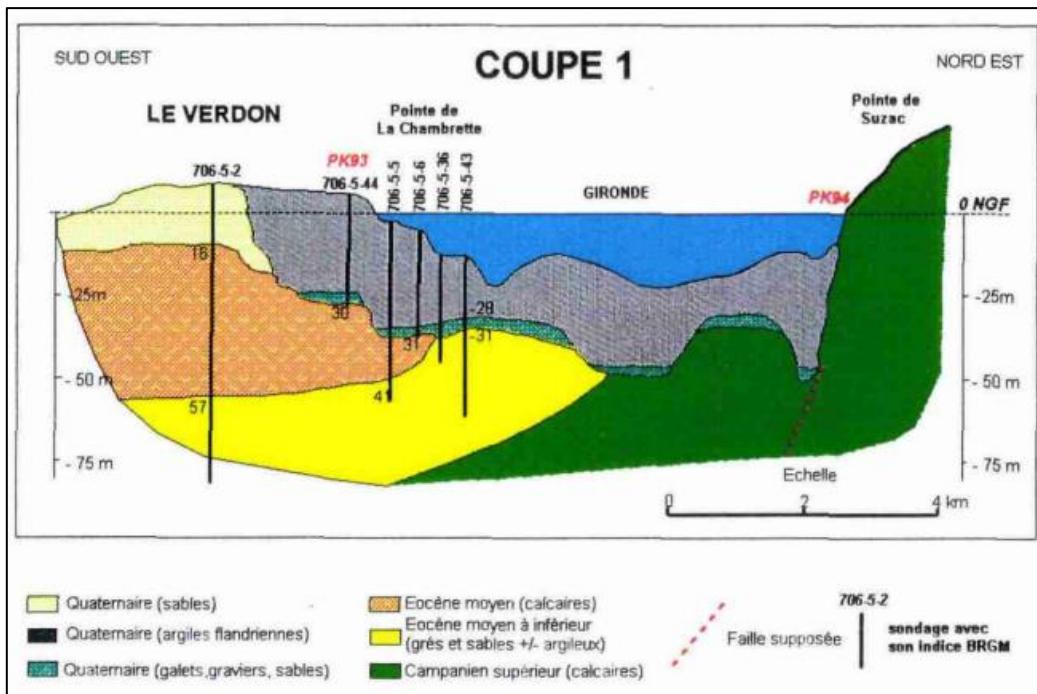


Figure 20 : Coupe géologique transversale de l'estuaire de la Gironde au niveau du Verdon (Plate, 1997)

Enfin, les mesures de conductivité effectuées lors des phases de forage, puis ponctuellement dans les ouvrages, sont importantes dans ce contexte. Elles permettent de mettre en évidence une stratification de la minéralisation sur la verticale, selon les nappes rencontrées. La méthode utilisée pour la conversion de conductivité en salinité n'est pas précisée ; les valeurs calculées sont toutefois cohérentes avec celles que fournissent les tables de conversion mises à disposition par l'IFREMER (<https://prelevements-hydro.ifremer.fr/tables-conversion.html>).

3.2.2. Caractérisation hydraulique des aquifères

Concernant les coupes techniques des deux forages réalisés :

- le forage GAT-F, profond de 39,2 m, crépiné en fond sur 5 m et dont le sommet du massif de gravier se situe à 30 m permet de caractériser la piézométrie de la base de l'aquifère Plio-Quaternaire ; l'isolation de la partie supérieure du Plio-Quaternaire est assurée par une cimentation sur 30 m de hauteur ;
- le forage GAT-Pz, profond initialement de 46 m, crépiné en fond sur 4 m, et dont le sommet du massif de gravier se situe autour de 40 m, permet de caractériser la piézométrie de la partie sommitale de l'aquifère de l'Éocène moyen (lors des essais de juin à avril 2023) ; l'isolation vis-à-vis du Plio-Quaternaire par un bouchon de ciment de quelques mètres de hauteur autour de 38,6 m, puis un tube cimenté en tête sur les 12 mètres supérieurs, assure *a priori* la représentativité des mesures (Figure 4) ; il est toutefois à noter que cette absence de cimentation au droit du Plio-Quaternaire entre 37 m et 12 m de hauteur constitue une non-conformité vis-à-vis des règles de l'art et de la réglementation : l'Article 17 de l'Arrêté du 11 septembre 2003 indique en effet qu'*"afin d'éviter les infiltrations d'eau depuis la surface, la réalisation d'un sondage, forage ou puits doit s'accompagner d'une cimentation de l'espace interannulaire, compris entre le cuvelage et les terrains forés, sur toute la partie supérieure du forage, jusqu'au niveau du terrain naturel"* ;
- le forage GAT-Pz est ensuite approfondi jusqu'à 63 m, il serait crépiné de 40 à 60 m au droit de l'Éocène moyen à inférieur ; la seule modification de coupe technique serait cet approfondissement et l'insertion d'un tubage crépiné de petit diamètre (52x60 mm)

jusqu'au fond ; dans cette configuration, l'ouvrage permettrait effectivement de refléter la piézométrie globale de la nappe de l'Éocène moyen à inférieur durant l'essai conduit en septembre 2023 ; il serait toutefois souhaitable de disposer d'une coupe technique de l'ouvrage finalisé, afin de confirmer sa configuration.

Les ouvrages réalisés peuvent donc être considérés comme fiables pour caractériser les comportements hydrauliques des aquifères ciblés. Sur l'ensemble des pompages d'essai réalisés, les niveaux piézométriques ont été suivis dans le puits pompé au Plio-Quaternaire (GAT-F) et dans le puits à l'Éocène moyen et inférieur (GAT-Pz), ce choix est cohérent avec la volonté d'investiguer les éventuels phénomènes de drainance entre ces aquifères.

On peut toutefois se questionner sur l'absence de suivi mis en place dans l'aquifère superficiel sableux, identifié sur les 8,5 premiers mètres sous la surface. Celui-ci est théoriquement isolé hydrauliquement de l'aquifère cible par les argiles vasardes, mais il serait souhaitable de le démontrer factuellement.

Le constat sur l'ensemble des essais est que le niveau piézométrique dans les nappes suivies (Plio-Quaternaire et Éocène) est soumis à des fluctuations naturelles sinusoïdales de plusieurs dizaines de centimètres sous influence de la marée. Ceci est cohérent avec le contexte hydrogéologique, et démontre une connexion hydraulique des nappes considérées avec l'estuaire.

Le premier pompage réalisé en janvier 2023 peut fournir des premiers ordres de grandeur, mais sa durée de 2h30 (pour le pompage continu) est clairement insuffisante pour caractériser de manière fiable le comportement hydraulique de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques et géométrie). Une durée minimale de 12 heures pour un essai longue durée est par exemple fixée par l'Arrêté du 11 septembre 2003. L'expertise se focalisera par conséquent sur les pompages d'avril et septembre 2023, conduits sur plusieurs jours.

D'après les graphiques fournis, sur ces deux pompages d'avril et septembre 2023, les suivis des niveaux dans les deux forages GAT-Pz et GAT-F démarrent tous deux de manière quasi-synchrone avec les pompages. Et ces suivis se poursuivent pendant quelques heures seulement après l'arrêt (environ 4 h ?) en avril 2023, tandis qu'ils sont arrêtés en même temps que le pompage en septembre 2023. Ces modalités de suivi ne permettent pas d'appréhender les fluctuations naturelles des nappes en-dehors des essais (notamment avant le démarrage). A ce titre, et notamment dans ce contexte singulier de nappes soumises à des effets de marée, ces essais n'ont pas été conduits dans les règles de l'art. Les interprétations fournies, que ce soient les calculs des paramètres hydrodynamiques ou les caractérisations des relations hydrauliques entre aquifères, ne reposent donc pas sur une base robuste.

Pour mémoire, les règles de l'art imposent la mise en œuvre des suivis de niveau avant et après la mise en œuvre de pompages d'essai longue durée, et de manière proportionnée avec les fluctuations naturelles des systèmes (Chapuis, 1999 ; Kruseman et De Ridder, 1974 – cf. extraits en Annexe 1). Le but est de caractériser les fluctuations naturelles pour tâcher de s'en affranchir lors de la phase d'interprétation. Parmi les documents de référence concernant les interprétations des pompages d'essais, les extraits suivants peuvent notamment être cités.

L'absence de ce suivi du marnage naturel des niveaux piézométriques hors des périodes d'essai est fortement préjudiciable à l'interprétation de ces essais. Celle-ci nécessite en effet de décomposer le signal pour discerner d'une part les fluctuations naturelles liées à la marée, et d'autre part la seule influence de l'essai, comme figuré schématiquement sur la Figure 21 : la courbe 3 représentant l'influence seule d'un pompage est déduite de la courbe 1 de suivi du niveau pendant le pompage et de la courbe 2 représentant les fluctuations naturelles (sans pompage) de niveau liées à la marée.

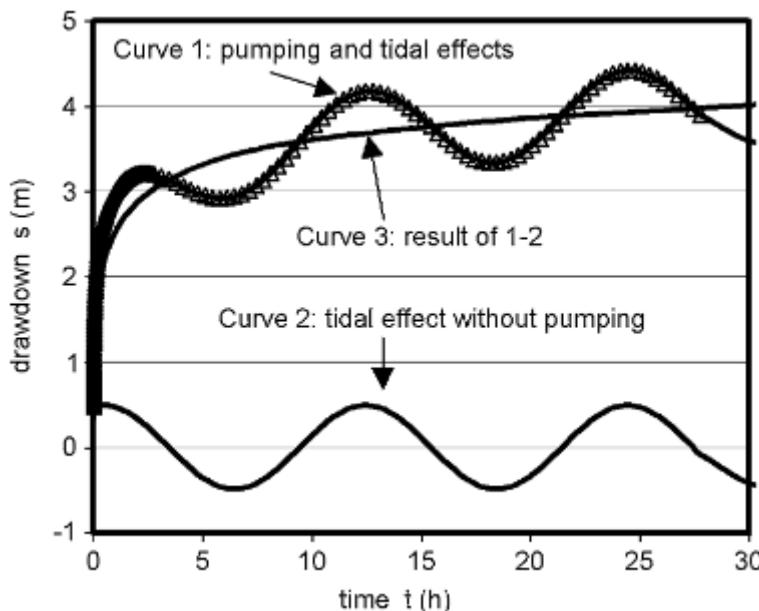


Figure 21 : Illustration de l'interprétation d'un pompage d'essai soumis à l'influence de la marée (Chapuis et al., 2006)

En l'absence de ces suivis, et donc de la possibilité de prendre en compte l'influence de la marée sur les résultats, les interprétations de pompage fournies pour les deux pompages d'avril et septembre 2023 ne peuvent pas être validées. Il est en outre à noter que le pompage de septembre 2023 n'a pas bénéficié d'un suivi continu des niveaux, même sur le forage pompé GAT-F ; des différences de niveau significatives sont visibles sur les données ponctuelles (Figure 10), mais les fluctuations associées (notamment en début de pompage) ne peuvent être caractérisées pour vérifier l'interprétation. De ce fait notamment, l'interprétation proposée pour le pompage d'avril 2023 (Figure 8), qui lui bénéficie d'un suivi de niveau continu, présente un coefficient d'ajustement insatisfaisant ; pour mémoire, le coefficient de Nash-Sutcliffe doit tendre vers la valeur de 1 pour être satisfaisant, la valeur figurant sur le graphe d'interprétation est de $-6,69 \times 10^{-2}$. De plus, l'observation de la courbe semble indiquer une stabilisation rapide du niveau après quelques heures : il est possible que le pompage atteigne une limite alimentée (connexion avec l'estuaire ?), et par conséquent qu'il soit nécessaire de focaliser l'interprétation sur le début de pompage.

De surcroît, les rares indices disponibles en début et fin de pompage sur les graphiques fournis tendent à infirmer le constat posé d'une déconnexion hydraulique (ou d'une connexion négligeable) entre l'aquifère du Plio-Quaternaire captif et celui de l'Éocène moyen et inférieur :

- en premier lieu, le suivi de niveau dans GAT-Pz (Éocène moyen à inférieur) lors du pompage d'avril 2023 est repris dans la Figure 22 ci-après ; une remontée brutale du niveau de GAT-Pz est visible en milieu de journée le 7 avril 2023, dans une temporalité concordante avec l'arrêt du pompage dans GAT-F, puis une redescension, qui ne sont ni évoquées ni expliquées ; en l'absence d'autre incident ou action mentionné, cette remontée ne peut être qu'imputable à l'influence hydraulique de l'arrêt du pompage, qui s'estomperait ensuite rapidement car l'influence de la marée redeviendrait prépondérante ; cela impliquerait une influence de ce pompage à $76 \text{ m}^3/\text{h}$ dans le Plio-Quaternaire sur le niveau piézométrique dans l'Éocène de plusieurs dizaines de centimètres ;
- d'autre part, le niveau dans GAT-Pz n'est suivi que pendant quelques minutes après l'arrêt du pompage de septembre 2023, en début de marée montante ; la remontée de niveau, au moment de l'arrêt du pompage, paraît plus abrupte que sur les marées montantes sinusoïdales précédentes (Figure 23) ; la résolution du graphique et la durée du suivi sont cependant insuffisants pour être confirmer cette hypothèse.

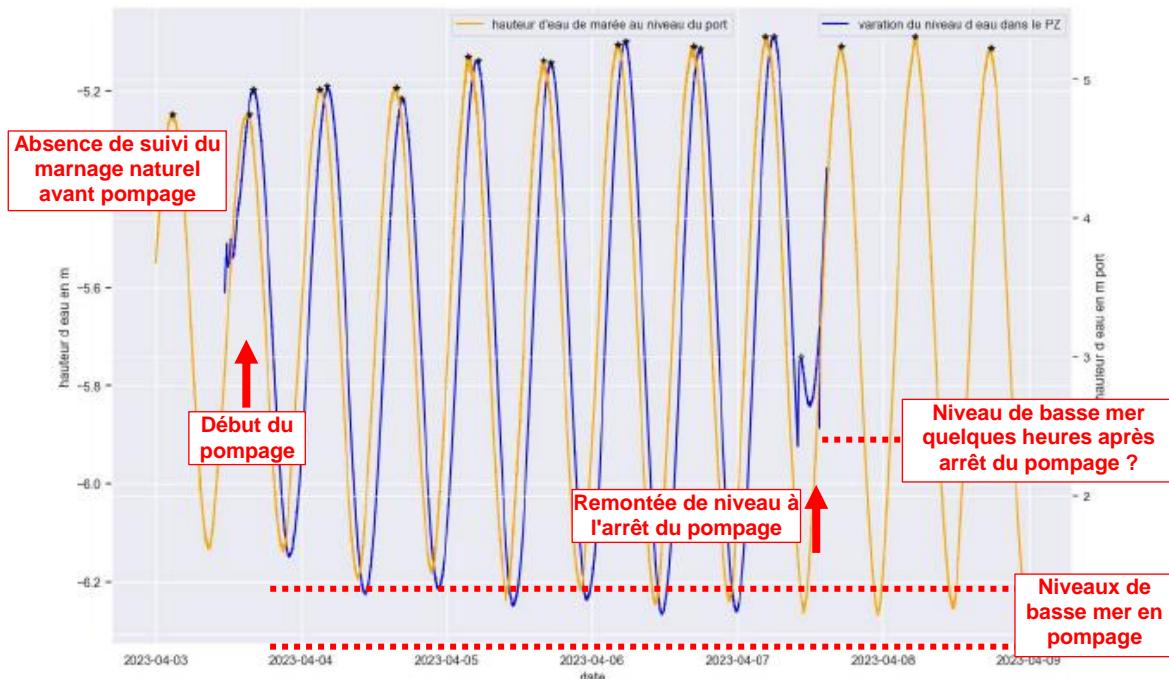


Figure 22 : Suivi du niveau piézométrique de GAT-Pz pendant le pompage d'avril 2023 sur GAT-F (source ArcaGEE, 2024, avec commentaires BRGM en rouge)

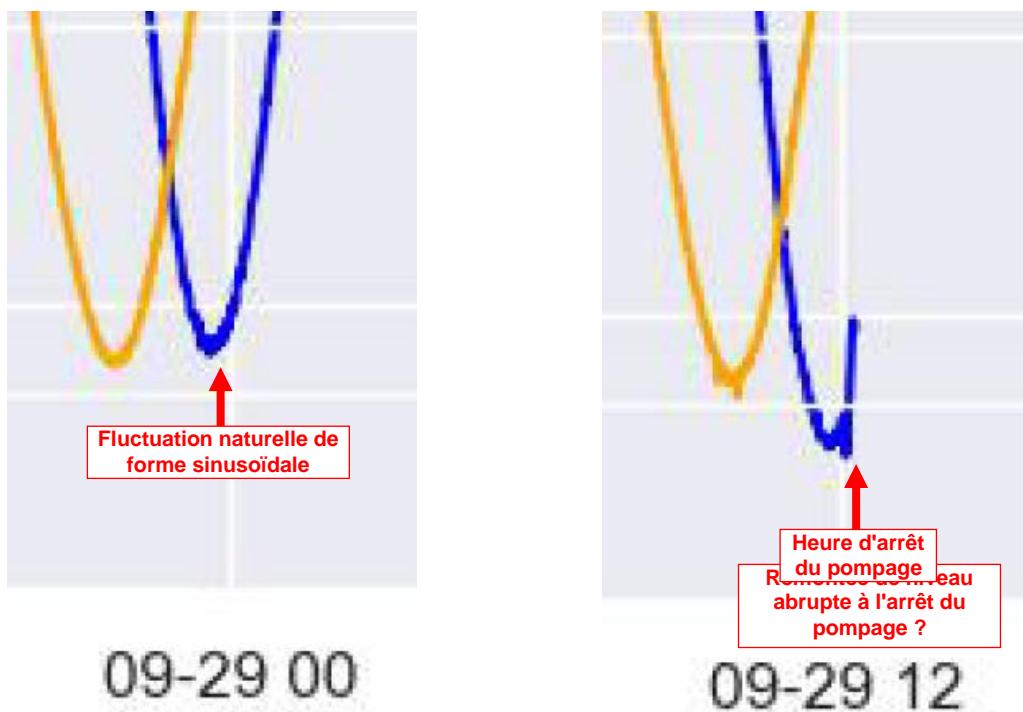


Figure 23 : Zoom du graphique présenté en Figure 11 sur les variations de niveau piézométrique des basses mers du 28/09/2023 autour de 23h (avant arrêt du pompage) et du 29/12/2023 autour de 12h (lors de l'arrêt du pompage) - source ArcaGEE, 2024, avec commentaires BRGM en rouge)

3.2.3. Caractérisation de la minéralisation des réservoirs

Au-delà de la seule stratification de la minéralisation mise en évidence par les mesures de conductivité en pompage, les caractérisations effectuées dans les forages équipés apportent des éléments de compréhension supplémentaires.

En premier lieu, le suivi de conductivité mis en œuvre lors du premier pompage de janvier montre une augmentation de la conductivité de 0,7 mS/cm sur les deux heures d'essai, ce qui est significatif sur une durée aussi courte. Malgré cet indice de dérive de la minéralisation, ce suivi n'a pas été remis en œuvre sur les pompages longs, ce qui ne permet pas de caractériser le phénomène : la dérive est-elle liée à une modification des contributions des différents réservoirs ? Se poursuit-elle sur le long terme ? Ou est-elle plutôt cyclique en lien avec les marées ?

D'autre part, les deux prélèvements pour analyses chimiques réalisés en avril 2023 fournissent un aperçu utile des minéralisations des réservoirs considérés. Il est à noter que le prélèvement sur GAT-F n'a pas été effectué en fin du pompage long, mais 10 jours plus tard, dans des conditions qui ne sont pas précisées : de ce fait, il n'est pas possible de s'assurer de sa représentativité, d'autant plus que la conductivité est de 11,7 mS/cm à 25 °C sur ce résultat d'analyse, alors qu'elle était supérieure à 13 mS/cm à 25 °C sur le pompage de janvier 2023.

Quoi qu'il en soit, cette stratification des minéralisations démontre effectivement des fonctionnements différenciés des réservoirs. Mais l'interprétation fournie, selon laquelle elle contribuerait à démontrer l'isolement de ces réservoirs, est abusive, car des différences de lithologie et de propriétés hydrodynamiques suffisent à expliquer ce constat.

3.2.4. Observations des fluctuations piézométriques naturelles

Les suivis de niveau sur une semaine en décembre 2023 sont utilisés à titre informatif pour établir les ordres de grandeur des fluctuations naturelles. Les méthodes d'interprétation permettant de calculer les paramètres hydrodynamiques en observant la propagation de l'onde sinusoïdale de marée dans un aquifère n'ont pas été mises en œuvre. Disponibles dans la littérature (certaines sont également directement utilisables dans des outils gratuits¹), et basées sur des solutions théoriques qui utilisent l'amplitude et le déphasage du signal, au regard de la distance à la masse d'eau superficielle considérée, elles peuvent pourtant fournir des éléments supplémentaires d'évaluation des paramètres des aquifères.

En l'occurrence, le constat des différences de fonctionnement des aquifères, basé sur les différences observées sur les fluctuations respectives de niveau associées à la marée, est validé : elles peuvent être associées à des différences des paramètres hydrodynamiques et des géométries. Mais l'interprétation fournie, selon laquelle elle contribuerait à démontrer l'isolement de ces réservoirs, est abusive, car des différences de propriétés hydrodynamiques suffisent à expliquer ce constat.

3.3. ÉVALUATION DES INCIDENCES ASSOCIÉES AU PROJET DE PRÉLÈVEMENT

3.3.1. Incidences quantitatives sur la ressource

La démarche proposée de simuler les incidences quantitatives en utilisant le principe de la modélisation hydrodynamique est cohérente. Mais dans la mesure où plusieurs réserves ont été émises ci-dessus sur la compréhension hydrogéologique du système, et notamment que les paramètres hydrodynamiques utilisés pour la construction du modèle sont ceux issus des interprétations des pompages qui n'ont pas été validées, l'estimation des incidences qui en découle ne peut pas être considérée comme fiable.

¹ Par exemple logiciel Catherine (<https://www.brgm.fr/fr/logiciel/catherine-logiciel-analyse-influence-riviere-nappe>)

Seuls les choix méthodologiques effectués sur le modèle seront par conséquent discutés ci-après, au regard des règles de l'art (notamment fixées par Barthelemy *et al.*, 2016) :

- le choix d'utiliser un modèle maillé est cohérent avec la complexité de l'aquifère (lien avec l'estuaire notamment) et les enjeux ;
- le choix de fixer comme limite du niveau piézométrique rabattu la cote de -10,2 mNGF (cote du toit de l'aquifère à -11,2 mNGF avec une sécurité de 1 m) est cohérente avec les règles de l'art, qui imposent de ne pas dénoyer un aquifère captif ; cette contrainte doit être conservée ;
- le choix d'utiliser un modèle en deux dimensions peut être acceptable si l'aquifère considéré ne présente pas de fortes variations de géométrie ou de propriétés sur la verticale, et surtout si aucun échange vertical n'est observé entre l'aquifère simulé et d'autres aquifères ; en l'occurrence, au vu des réserves émises sur les interprétations des investigations conduites (2.4), la pertinence de ce choix n'est pas établie ;
- le calage d'un modèle doit s'effectuer à partir de données d'observations. Il est généralement calibré en régime permanent pour représenter les hétérogénéités spatiales puis en régime transitoire pour représenter la dynamique du système. Le calage, confrontation des données simulées et observées, permet de s'assurer que le modèle reproduit le fonctionnement observé de l'aquifère. Le choix d'effectuer un calage sur la base d'un pompage fictif, dont le rabattement est estimé par ailleurs, n'est pas conforme aux règles de l'art ;
- le champ de perméabilité obtenu après calage n'est pas indiqué, ce qui ne permet pas de valider sa cohérence ;
- la justification de l'emprise modélisée et les conditions appliquées aux limites du modèle ne sont pas précisées, elles ne peuvent donc pas être validées ; sur la base des seuls visuels fournis, deux observations peuvent cependant être partagées :
 - o l'extension du modèle utilisé, de l'ordre de 1200 x 900 m, est insuffisante dans ce contexte de nappe captive transmissive ; les piézométries restituées (Figure 17, Figure 18) montrent clairement que l'aire d'influence des pompages atteint les limites du modèle ; or les règles de l'art établissent que les limites d'un domaine modélisé doivent "*se situer au-delà de la zone d'influence des scenarios les plus contraignants en termes d'extension spatiale des impacts cumulés*" (Barthelemy *et al.*, 2016) ;
 - o des limites à potentiel imposé ont visiblement été introduites dans le modèle ; la première borde l'aquifère à l'est et au nord-est, vraisemblablement pour reproduire le lien hydraulique avec l'estuaire, ce qui serait alors cohérent avec le contexte ; la seconde, au sud-ouest, sert probablement à contraindre le sens d'écoulement de la piézométrie initiale, mais elle n'est étayée par aucune mesure effective et limite artificiellement l'extension de l'aire d'influence dans ce secteur du modèle et force son extension selon un axe sud-est – nord-ouest.

3.3.2. Incidences qualitatives sur la ressource

Le rapport consulté mentionne l'absence d'incidence attendue sur la qualité des eaux souterraines, du fait de la configuration prévisionnelle des forages qui comporteront une cimentation complète et une tête aménagée dans les règles de l'art.

Cette considération ne prend pas en compte les éventuelles connexions hydrauliques naturelles de l'aquifère du Plio-Quaternaire avec les autres aquifères, et avec l'estuaire. Car l'affirmation selon laquelle il pourrait y avoir "*transfert de pression sans transfert de masse*" entre les réservoirs est erronée : d'après les principes de l'hydraulique souterraine, ces deux transferts s'effectuent dans des temporalités différentes. La dépression générée dans le

réservoir Plio-Quaternaire par le pompage peut se répercuter rapidement sur un réservoir en connexion (eaux de surface de l'estuaire, ou nappe de l'Éocène par exemple), mais ne générer une dérive de minéralisation (par apport d'eau issue de ces nappes) que dans une temporalité bien plus longue.

C'est pourquoi il est important, y compris dans l'intérêt de l'exploitant pour s'assurer de la pérennité de son projet, d'apprécier les risques de dérive de la minéralisation causées par les drainances possibles d'eau issues d'autres nappes ou de l'estuaire vers l'aquifère capté.

4. Conclusion et recommandations

En conclusion, les investigations réalisées par forage permettent de préciser utilement le contexte géologique et hydrogéologique du projet, les interprétations géologiques fournies sont cohérentes avec les documents de référence sur le territoire : succession des terrains au droit du site et attribution stratigraphique, aquifères en présence, stratification de la minéralisation des eaux des différentes nappes associées. Il apparaît notamment que l'aquifère captif de la base du Plio-Quaternaire, cible du projet, ainsi que l'aquifère sous-jacente de l'Éocène moyen à inférieur, sont en connexion hydraulique avec l'estuaire et soumis à des variations cycliques naturelles des niveaux piézométriques, liées à l'influence de la marée. Ces deux aquifères sont en outre susceptibles d'être en connexion hydraulique en l'absence d'horizon imperméable franc entre eux.

Par contre, les essais et suivis réalisés ne permettent pas de préciser les propriétés de ces aquifères. En premier lieu, les suivis de niveau pour les essais n'ont pas été mis en place dans les règles de l'art ; de ce fait, il n'est pas possible de dissocier l'effet de la marée des éventuels effets des pompages. L'affirmation de la déconnexion (ou d'une connexion négligeable) des deux aquifères du Plio-Quaternaire et de l'Éocène moyen à inférieur entre eux ne peut donc pas être confirmée, et les rares éléments fournis tendent plutôt à l'inflimer. D'autre part, les calages des paramètres hydrodynamiques pour l'interprétation de ces pompages longue durée sont insuffisamment étayés et ne peuvent pas non plus être validés.

En outre, un indice de dérive de minéralisation de l'eau captée est visible sur le premier pompage court. Pourtant, aucun suivi de minéralisation n'a été mis en œuvre sur les pompages suivants, de longue durée, ce qui laisse de fortes incertitudes sur l'évolution à venir de la qualité de l'eau captée et sur la représentativité des analyses chimiques effectuées.

Du fait de ces incertitudes majeures rémanentes sur le fonctionnement de l'aquifère visé du Plio-Quaternaire, et sur ses liens avec les autres masses d'eau, les simulations fournies pour l'évaluation de l'incidence hydraulique du projet ne peuvent pas être validées. D'une part, l'utilisation d'un modèle en 2 dimensions ne sera pertinente qu'en l'absence de connexion avec d'autres aquifères. Et d'autre part, plusieurs réserves sont émises sur les choix méthodologiques pour la construction du modèle : principalement son extension et ses conditions aux limites, qui s'avèrent inadaptées.

Plusieurs préconisations méthodologiques pour la réalisation des investigations, puis des interprétations peuvent être émises :

- un essai de longue durée doit être effectué dans les règles de l'art et sans paliers enchaînés préalables, ce qui implique la mise en œuvre de suivis de niveau en continu durant l'ensemble de l'essai sur tous les ouvrages possibles, y compris plusieurs jours avant et après ;
- plusieurs investigations complémentaires sont envisageables pour étayer la connaissance des aquifères, et par-là-même mieux apprécier l'incidence du projet :

- ajout d'un piézomètre dans l'aquifère superficiel du Plio-Quaternaire,
- ajout d'un piézomètre distant dans l'aquifère captif du Plio-Quaternaire (qui pourrait être transformé ultérieurement en ouvrage d'exploitation),
- mise en œuvre de suivis de conductivité en continu dans tous les ouvrages durant l'essai ;
- les interprétations hydrauliques devraient se baser sur les méthodes spécifiques aux aquifères soumis à effet de marée ; ces méthodes peuvent s'avérer complexes à mettre en œuvre, mais présentent l'intérêt de fournir *a minima* des ordres de grandeur plus fiables ; d'où l'intérêt de disposer de plusieurs ouvrages de suivi, pour maximiser le nombre de données potentiellement fiables ;
- dans ce contexte d'eau salée ou saumâtre, la minéralisation de l'eau modifie sensiblement sa densité ; avant de mettre en œuvre les interprétations, il sera pertinent de confronter les mesures de niveau manuelles aux mesures de niveau des capteurs, afin de s'assurer de l'importance des effets de densité sur les mesures ; si ces effets sont significatifs au regard des influences du pompage, une correction de densité devra être réalisée ;
- la pertinence du modèle réalisé pour les simulations de l'incidence hydraulique devra être totalement réévaluée à la lumière des nouvelles connaissances acquises ; si des effets de drainance notamment sont mis en évidence, l'utilisation d'un modèle 2D s'avérera probablement inadéquate ; les choix de l'extension et des conditions aux limites devront suivre les recommandations des principaux guides, à la lumière des nouvelles acquisitions ;
- l'évaluation de l'incidence qualitative du projet devra être mise à jour sur la base des investigations complémentaires.

Ces incidences devront ensuite être confrontées aux enjeux qui sont identifiés sur les ressources en eau concernées.

Enfin, des observations complémentaires sont à faire :

- il sera pertinent de vérifier si le forage BSS001TYDV est comblé, si oui selon quelles méthodes ; d'après les documents disponibles, le tube plein qui isole la nappe captée des nappes moins profondes ne serait cimenté qu'à son pied, sur une hauteur de 21 m ; ceci serait cohérent avec les pratiques à la date de réalisation de l'ouvrage ; au vu toutefois de l'âge de l'ouvrage, il est possible que les tubages soient dégradés et n'assurent plus une isolation des nappes traversées entre elles ;
- le forage GAT-Pz présente une coupe technique non conforme à la réglementation, qu'il conviendra de reconfigurer.

5. Annexes

Annexe 1 Extraits des ouvrages cités au paragraphe 3.2.2

Extrait 1 (Chapuis, 1999) :

"Il faut mesurer au moins une fois les niveaux piézométriques avant l'essai de pompage, dans chacun des piézomètres (aquifère à tester et aquifère adjacent le cas échéant). Il est préférable de prendre plusieurs mesures dans les jours qui précèdent l'essai de pompage, afin de tracer les courbes de variation de ces niveaux dans le temps, et de prévoir leur évolution pendant l'essai. Ces courbes permettront de définir par exemple le coefficient d'efficacité barométrique d'un aquifère à nappe captive, ou la réponse piézométrique en fonction de fluctuations de « réservoirs » voisins (marée, ouvrages de retenue des eaux).

Dans le cas des aquifères influencés par la marée ou par le niveau d'opération d'un ouvrage de retenue des eaux de surface, il faut, avant l'essai de pompage, établir des courbes de corrélation entre les niveaux piézométriques et le niveau de la mer, ou le niveau variable du plan d'eau. (...) Dans le cas des marées, pour faciliter les calculs ultérieurs des rabattements, il est préférable d'établir un graphique adimensionnel du rapport de la variation du niveau piézométrique sur la variation du niveau de la marée en fonction du temps : ce graphique fournira directement les rapports d'amplitude et le déphasage du niveau de référence pour chaque piézomètre."

Extrait 2 (Kruseman et De Ridder, 1974) :

"Théoriquement, un pompage d'essai ne doit pas démarrer avant que l'on connaisse les variations naturelles de la nappe, à long ou court terme. Donc, quelques jours avant l'essai proprement dit, tous les niveaux d'eau doivent être mesurés deux fois par jour. Sur chaque piézomètre, on trace un limnigramme dont l'allure permet d'estimer les variations piézométriques. Dès qu'on pense pouvoir extrapoler ces variations, on peut commencer l'essai.

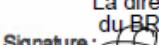
(...)

Les nappes côtières posent des problèmes particuliers, car elles sont sensibles à la marée. Avant l'essai, il est donc indispensable de tracer pour chaque piézomètre la courbe de variation du niveau, sur laquelle on portera les niveaux maximaux et minimaux et le temps auquel ils se produisent."

Extrait 3 (Kruseman et De Ridder, 1974) :

"Une courbe du niveau d'eau des différents puits en fonction du temps (...) donnera les informations nécessaires à la correction des rabattements observés durant l'essai, à la condition qu'elle recouvre une période suffisamment longue avant le pompage et après la remontée"

Annexe 2 Fiche de demande d'intervention

BRGM DR / Nouvelle-Aquitaine	Appui aux Administrations - Fiche de demande d'intervention	
Objet de l'appui sollicité : Analyser les méthodes utilisées et la qualité (fiableté) de la donnée produite dans le cadre du document d'incidences de l'exploitation d'une ressource en eau saumâtre pour l'élevage de saumons – Le Verdon sur Mer (33)		Demandeur Administration : DDPP de la GIRONDE Direction : Service : Protection de l'environnement Interlocuteur : Sabrina DONDEYNE
Mission demandée au BRGM : La société Pure Salmon souhaite élever sur la commune du Verdon 10000 tonnes de saumon par an en bassins totalement « hors sol ». Pour ses besoins d'alimentation des bassins et d'usine agroalimentaire elle envisage un pompage de 6500 m ^{3/j} via 2 triplets de forages dans une lentille d'eau saumâtre de la nappe du plioquaternaire d'accompagnement de l'estuaire. Suite au dépôt de cette 3ème version du dossier d'étude hydrogéologiques, deux questions se posent concernant les données produites et les méthodes de collecte de ces données et de modélisations utilisées : sont-elles adaptées, suffisantes et fiables pour démontrer 1) le non impact du prélèvement sur la nappe de l'écocene 2) la disponibilité de la ressource du plioquaternaire dans laquelle le pompage serait effectué, pour les volumes et débits sollicités, avec un impact acceptable pour la ressource		Typologie de l'action : <input type="checkbox"/> Type 1 : Rassembler des connaissances existantes <input checked="" type="checkbox"/> Type 2 : Expertise avec processus de vérification systématique du rapport <input type="checkbox"/> Type 3 : Informer, communiquer, participer à réunions
Date de la demande : 3 juin 2024 Date de réponse souhaitée : 1 ^{er} septembre 2024 (ou plus tôt si c'est possible)		
Proposition BRGM : Descriptif : Analyse critique du rapport fourni : - forages de reconnaissance (données acquises et interprétations) ; - paramètres des aquifères et des forages ; - vérification des impacts et paramètres d'exploitation (débit et rabattement) ; - modélisation hydrodynamique ; - incidences calculées sur les ressources en eau ; - préconisations associées. Lien d'intérêt institutionnel (2) : X Non <input type="checkbox"/> Oui cf. note en PJ Durée de réalisation : 5 jours Délai de réalisation : 10 semaines Nature du rendu rapport Intervenant (3) Date : 03/07/2024 Signature :  Cécile LE GALL		
Format souhaité : X rapport (obligatoire si type 2) <input type="checkbox"/> autre (préciser) : Documents annexés : Accès : <input type="checkbox"/> public immédiat (1) <input type="checkbox"/> public différé (délai : n mois) Accord du demandeur : A : ...Bordeaux..... Le : ..3/06/24 ..		
Mise :  Copie DREAL :  <small>(1) En application des dispositions de la loi « CADA » du 17 juillet 1978 modifiée en 2000 et 2002, tous les documents d'appui à l'intervention du BRGM sont rendus accessibles au public immédiat, à l'exception de ceux qui sont préparés lors d'une séance d'information publique, lorsque ce sont rendus accessibles ou une fois cette séance en prise.</small> <small>(2) Lien entre l'intérêt de l'intervenant ou le demandeur d'une part et le BRGM d'autre part susceptibles de compromettre sa neutralité.</small> <small>(3) Après vérification de l'absence de lien d'intérêt institutionnel ou déclaration d'un lien (M 362 EXP) porté à la connaissance des parties prenantes (cf note en PJ) et accepté par le demandeur ce qui compromettant pas la neutralité du BRGM.</small>		



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine

24 avenue Leonard de Vinci
16600 Pessac

Tél. :

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm