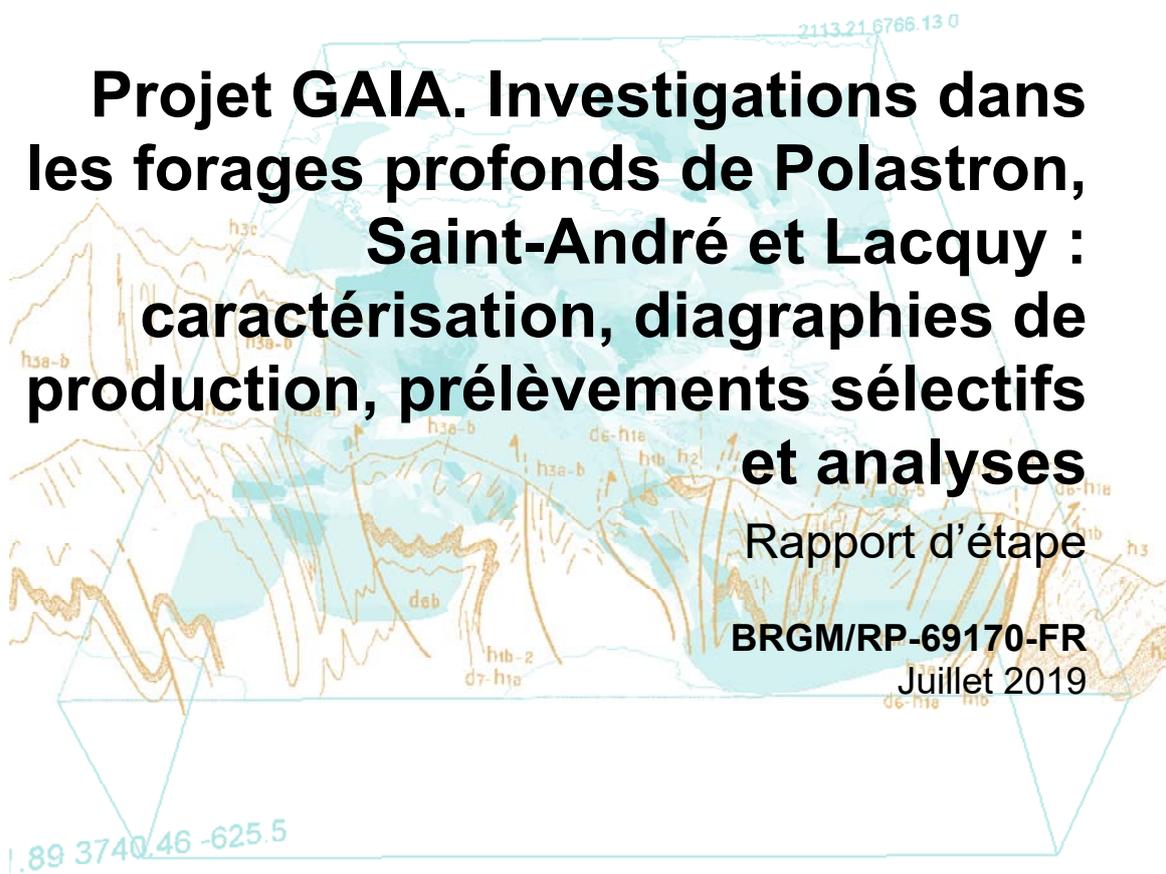


Document public



Projet GAIA. Investigations dans les forages profonds de Polastron, Saint-André et Lacquy : caractérisation, diagraphies de production, prélèvements sélectifs et analyses

Rapport d'étape

BRGM/RP-69170-FR

Juillet 2019

Projet GAIA. Investigations dans les forages profonds de Polastron, Saint-André et Lacquy : caractérisation, diagraphies de production, prélèvements sélectifs et analyses

Rapport d'étape

BRGM/RP-69170-FR

Juillet 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet de Recherche du BRGM PDR13AQI02

J. Barrière, F. Gal, L. André, A. Wuilleumier

Avec la collaboration de

G. Bentivegna, M. Djemil

Vérificateur :

Nom : F. BUGAREL

Fonction : Expert "études techniques
et ingénierie"

Date : 31/07/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : N. PEDRON

Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine

Date : 05/02/2020

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

Mots-clés : Forages, diagraphies, analyses d'eau, gaz dissous, Sables Infra-Molassiques, Paléocène, Aquitaine, Occitanie

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

Barrière J., Gal F., André L., Wuilleumier A., avec la collaboration de **Bentivegna G., Djemil M.**, (2019)
- Projet GAIA. Investigations dans les forages profonds de Polastron, Saint-André et Lacquy : caractérisation, diagraphies de production, prélèvements sélectifs et analyses. Rapport d'étape. BRGM/RP-69170-FR, 82 p., 34 fig., 17 tab., 8 ann.

Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du programme scientifique GAIA, programme financé par Teréga (ex TIGF), l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le BRGM, et piloté par le BRGM. Ce programme inclut un volet d'acquisition de nouvelles données hydrodynamiques et hydrogéochimiques des principales nappes d'eau souterraine. Le présent rapport expose les acquisitions dédiées aux forages profonds, visant à la fois l'acquisition de nouvelles données et l'obtention d'un état des lieux des données de suivi existantes. Ces acquisitions ont été menées en parallèle d'autres investigations hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Afin d'apporter des éléments de caractérisation géochimique et isotopique des aquifères des Sables Infra-Molassiques et du Paléocène dans des secteurs géographiques peu renseignés, une méthodologie rigoureuse a été suivie en plusieurs phases consécutives.

En premier lieu, une analyse bibliographique des documents disponibles en BSS et des rapports de fin de sondage des ouvrages pétroliers a permis de déterminer les coupes techniques et géologiques supposées des forages profonds, et d'analyser leurs chroniques piézométriques et l'historique de leurs sollicitations hydrauliques, afin d'identifier les ouvrages potentiellement les plus fiables en termes de représentativité. Les quatre forages présélectionnés étaient tous d'anciens forages profonds réalisés, dans le cadre de campagnes d'exploration pétrolière :

- à Polastron, dans le département du Gers (32) : forage PO-101, réalisé en 1957 et ayant atteint la profondeur de 2 751 mètres ;
- à Saint-André, en Haute-Garonne (31) : forage SA-1, réalisé en 1957 à une profondeur de 4 202 mètres ;
- à Lacquy, dans les Landes (40) : forage LC-101, réalisé en 1972, à une profondeur de 4 002 mètres ;
- à Eaunes, en Haute-Garonne (31) : forage Muret-104, réalisé en 1965, à une profondeur de 1 410 mètres.

Ces forages ont ensuite été reconvertis en piézomètres par la mise en place de bouchons de ciment, afin d'isoler la partie basse de l'ouvrage, puis la perforation des tubages au droit d'une section sus-jacente présentant un intérêt pour le suivi d'un aquifère.

Dans un deuxième temps, les trois premiers de ces ouvrages ont fait l'objet d'un premier diagnostic par des instrumentations descendues dans les forages (diagraphies), afin de vérifier la coupe technique et contrôler leur état visuel actuel (tubages, perforations, fond), puis d'établir la nature physico-chimique de la colonne d'eau.

L'ensemble des observations indique que des communications hydrauliques entre la nappe des Sables Infra-Molassiques (SIM), captée au niveau des perforations des tubages, et des aquifères sous-jacents sont très probables via les espaces annulaires des tubages supposés non cimentés, sur des hauteurs mettant en contact ces différents niveaux. L'hypothèse de fuites au travers des bouchons de ciment ne peut également être exclue.

Des pompages dans les forages de Polastron et de Saint-André ont permis de renouveler la colonne d'eau dans les ouvrages. Le forage de Saint-André est apparu partiellement comblé par des matériaux meubles, sans pour autant que cela remette en cause sa liaison hydraulique avec les niveaux productifs plus profonds. Le forage de Lacquy a nécessité une adaptation du protocole, du fait de la présence d'huiles résiduelles surnageantes dans l'ouvrage : seul un

pompage court a pu être effectué, permettant de renouveler partiellement la colonne d'eau, sur une hauteur située immédiatement au-dessus des perforations.

Les suivis piézométriques, enregistrés au cours de ces périodes, dans les forages de Polastron et de Saint-André, montrent des décalages entre les niveaux stabilisés avant et après pompage. Ceux-ci ne correspondent aucunement à une modification de la pression de l'aquifère capté, mais sont liés à des effets de densité imputables au renouvellement de la colonne d'eau sur des hauteurs de plusieurs centaines de mètres.

Les profils physico-chimiques (température, conductivité, pH, potentiel d'oxydo-réduction) montrent le fort contraste entre la colonne d'eau stagnante dans les ouvrages depuis plusieurs années et l'eau circulant dans l'aquifère. Ce contraste est évidemment confirmé par les analyses physico-chimiques (ions majeurs et traces, gaz dissous). Ceci confirme toute la pertinence d'une caractérisation initiale fine des forages préalablement aux prélèvements, pour s'assurer de leur représentativité. L'ensemble de ces caractérisations préalables a permis de sélectionner les prélèvements représentatifs des eaux contenues dans les aquifères et de n'interpréter que ceux-ci sur un plan hydrogéochimique.

Sur la base de ces diagraphies, les prélèvements de fond ont été opérés avant et après les phases de pompage, par un système à double tube (brevet FR1259214), à des profondeurs sélectionnées.

Les analyses des gaz dissous, dans les échantillons, mettent en évidence les points suivants :

- l'espèce majoritaire est l'azote ; et le méthane est systématiquement présent, ce qui est également rapporté dans d'autres grands bassins sédimentaires, notamment au travers de nombreuses études récentes interrogeant la thématique des ressources en hydrocarbures non conventionnels ;
- à Polastron, des alcanes supérieurs (C2 et C3) sont également détectés après le renouvellement de l'eau contenue dans le forage PO-101 ; un lien avec la présence de ressources en hydrocarbures est vraisemblable, sans qu'il soit possible d'en proposer une localisation au sein de la pile sédimentaire ;
- la présence ubiquiste d'hélium concorde avec les constats effectués dans d'autres bassins sédimentaires de par le monde, ce gaz étant un produit de la désintégration de l'uranium - élément existant en abondance variée dans toutes les séries géologiques.

Les analyses chimiques permettent d'autre part de caractériser les eaux prélevées dans les forages, de la manière suivante :

- une minéralisation élevée et un faciès sulfaté sodique, au forage de Polastron (32), qui capte l'aquifère des Sables de Lussagnet (Yprésien), mais très probablement celui de la formation d'Arcet (Paléocène) également. Les concentrations mesurées en ions majeurs et traces rapprochent ces eaux de celle prélevée à Lectoure (32) dans les Sables de Lussagnet ;
- une eau peu minéralisée et un faciès bicarbonaté calcique, au niveau du forage de Saint-André (31), qui capte la nappe des sables et grès de la formation de Pont-Labau (Thanétien) mais aussi probablement celle de la formation de Mancieux (Yprésien) sus-jacente et celle de la formation d'Arcet (Danien-Sélandien), voire du Crétacé supérieur. Ces eaux se singularisent par une faible concentration en sulfates, et a contrario une forte concentration en baryum ;
- le forage de Lacquy (40) capte vraisemblablement les Sables Infra-Molassiques (Sables de Lussagnet et grès à Nummulites de l'Yprésien) et sans doute le Crétacé supérieur sous-jacent. Les eaux prélevées sont chlorurées et sulfatées sodiques : elles pourraient résulter d'un mélange d'eaux peu minéralisées avec une faible proportion d'eaux très minéralisées.

Enfin, les analyses des isotopes stables de la molécule d'eau et des mesures d'activité en carbone 14 confirment les points suivants :

- au niveau de Polastron (32) : un enrichissement en isotopes lourds (et principalement en ^{18}O) de la zone est de l'aquifère. L'estimation de l'âge apparent sur la base du carbone 14 place la recharge vers la fin de la dernière période glaciaire (21 700 ans BP) ;
- les eaux captées au niveau de Saint-André (31) sont appauvries en isotopes stables de la molécule d'eau, avec un temps de résidence estimé à 4 500 ans BP, ce qui correspond soit à des eaux relativement récentes infiltrées depuis une aire de recharge relativement élevée, soit à un mélange entre des eaux météoriques anciennes (infiltrées lors de la période glaciaire) et des eaux météoriques récentes ;
- au niveau de Lacquy (40), les isotopes stables de la molécule d'eau s'alignent sur la droite météorique ; le temps de résidence estimé à 1 500 ans BP est cohérent avec une recharge lors d'une période tempérée récente.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Contexte | 13 |
| 1.1. OBJECTIFS | 13 |
| 1.2. METHODOLOGIE D'INTERVENTION DANS LES OUVRAGES | 14 |
| 1.3. MODE OPERATOIRE UTILISE POUR LES PRELEVEMENTS DE FOND | 15 |
| 2. Forage de Polastron PO-101 | 19 |
| 2.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE | 19 |
| 2.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION | 19 |
| 2.2.1. Mesures au repos..... | 19 |
| 2.2.2. Mesures en pompage..... | 21 |
| 2.3. DONNEES HYDRAULIQUES..... | 25 |
| 2.4. ANALYSE DU DECALAGE PIEZOMETRIQUE POSTERIEUR AU POMPAGE | 26 |
| 2.5. PRELEVEMENTS..... | 29 |
| 2.5.1. Prélèvements avant pompage..... | 29 |
| 2.5.2. Prélèvements après pompage..... | 30 |
| 3. Forage de Saint-André SA-1 | 33 |
| 3.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE | 33 |
| 3.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION | 33 |
| 3.2.1. Mesures au repos..... | 33 |
| 3.2.2. Mesures en pompage et après pompage..... | 37 |
| 3.3. DONNEES HYDRAULIQUES..... | 38 |
| 3.4. PRELEVEMENTS..... | 40 |
| 3.5. ETAT PIEZOMETRIQUE DU FORAGE APRES LES OPERATIONS | 41 |
| 4. Forage de Lacquy LC-101 | 43 |
| 4.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE | 43 |
| 4.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION | 43 |
| 4.3. DONNEES HYDRAULIQUES..... | 45 |
| 4.4. PRELEVEMENTS..... | 45 |
| 4.4.1. Spécificités de l'ouvrage de Lacquy | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.2. Mode opératoire | 46 |
| 4.4.3. Paramètres physico-chimiques | 49 |
| 4.5. ETAT PIEZOMETRIQUE DU FORAGE APRES LES OPERATIONS..... | 51 |
| 5. Forage de Muret 104 | 53 |
| 5.1. COUPE TECHNIQUE DU FORAGE | 53 |
| 5.2. PRELEVEMENTS | 54 |
| 6. Chimie des gaz dissous | 57 |
| 6.1. METHODOLOGIE | 57 |
| 6.2. DONNEES EXPRIMEES EN POURCENTAGE DE PHASE GAZEUSE..... | 57 |
| 6.2.1. Forages de Polastron, Saint-André, Lacquy | 57 |
| 6.2.2. Forage de Muret 104..... | 60 |
| 6.3. DONNEES EXPRIMEES EN CONCENTRATION (MOL.L ⁻¹) | 62 |
| 7. Chimie des eaux..... | 65 |
| 7.1. MAJEURS ET TRACES | 65 |
| 7.1.1. Forage de Polastron 101..... | 65 |
| 7.1.2. Forage de Saint-André 1..... | 69 |
| 7.1.3. Forage de Lacquy 101 | 71 |
| 7.2. ISOTOPIE | 74 |
| 8. Conclusions et perspectives | 77 |
| 9. Bibliographie | 79 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Principe de mise en œuvre du préleveur de fond à Polastron..... | 15 |
| Figure 2 : Principe d'utilisation du préleveur de fond à Polastron - étapes 1 et 2..... | 17 |
| Figure 3 : Principe d'utilisation du préleveur de fond à Polastron - étapes 3 et 4..... | 17 |
| Figure 4 : Coupe synthétique du forage de Polastron - synthèse des mesures au repos. | 20 |
| Figure 5 : Coupe synthétique du forage de Polastron - synthèse des mesures après pompage. | 21 |
| Figure 6 : Diagraphies de production au repos et en pompage, dans le forage de Polastron..... | 23 |
| Figure 7 : Diagraphies de production au repos et en pompage, dans le forage de Polastron - zoom de 750 à 950 m..... | 24 |
| Figure 8 : Suivi piézométrique du forage de Polastron sous l'effet du pompage..... | 25 |
| Figure 9 : Evolution piézométrique du forage de Polastron, de juin 2017 à juillet 2018. | 26 |

| | |
|---|----|
| Figure 10 : Masse volumique de l'eau pure en fonction de la température (données Lide, 2005). | 27 |
| Figure 11 : Profils reconstitués de densité de la colonne d'eau avant et après pompage à Polastron. | 28 |
| Figure 12 : Comparaison des paramètres physico-chimiques représentatifs avant et après pompage, dans le forage de Polastron..... | 32 |
| Figure 13 : Diagraphies de production au repos et en pompage dans le forage de Saint-André..... | 35 |
| Figure 14 : Représentation schématique de la position du prélèvement, dans le forage de Saint-André. | 38 |
| Figure 15 : Suivi piézométrique dans le forage de Saint-André, sous l'effet du pompage, et diagnostic, par le calcul, de la dérivée du rabattement..... | 39 |
| Figure 16 : Exemple-type de diagnostic de pompage pour un forage avec effet de capacité (United States Environmental Protection Agency, 2002). | 39 |
| Figure 17 : Vue d'ensemble du forage de Saint-André, lors des prélèvements de fond. | 40 |
| Figure 18 : Evolution piézométrique du forage de Saint-André, depuis 2016 (données ADES https://ades.eaufrance.fr/)..... | 41 |
| Figure 19 : Diagraphies de conductivité-température, dans le forage de Lacquy, après pompage. | 44 |
| Figure 20 : Etat de la sonde piézométrique le 24/10/2017, lors d'une mesure de niveau, dans le forage de Lacquy. | 45 |
| Figure 21 : Première remontée d'eau avec préleveur disposé à 425 m dans le forage de Lacquy : purge de l'eau collectée lors de la descente du système. | 47 |
| Figure 22 : Etat de l'eau à différentes profondeurs, dans le forage de Lacquy. | 48 |
| Figure 23 : Remontée d'eau avec préleveur disposé à 425 m, dans le forage de Lacquy, et état du filtre après utilisation..... | 48 |
| Figure 24 : Etat du bitube (à gauche) et de la tête de forage (à droite) à l'issue de la remontée du préleveur de fon, dans le forage de Lacquy. | 49 |
| Figure 25 : Comparaison des paramètres physico-chimiques le long de la colonne d'eau, dans le forage de Lacquy. | 50 |
| Figure 26 : Suivi piézométrique du forage de Lacquy, de 2016 à 2018 (données ADES https://ades.eaufrance.fr/)..... | 51 |
| Figure 27 : Coupe schématique du forage Muret 104..... | 53 |
| Figure 28 : Principaux forages utilisés pour la comparaison des eaux de Saint André 1 et Polastron 101. | 66 |
| Figure 29 : Diagramme de Schoeller des eaux de Polastron. Comparaison (a) avec les eaux faiblement minéralisées de Pléhaut, Lamazère, Saint-Médard et Puymaurin 2 ; (b) avec les eaux de Muret 103 et Muret 104 ; (c) avec les eaux de Blagnac et Saint-Cricq ; (d) avec les eaux de Lectoure et Agassac 1..... | 67 |
| Figure 30 : Diagramme de Schoeller des eaux de Saint-André 1 (campagne de prélèvements 2017) et comparaison avec les eaux de deux piézomètres à Saint-Médard (Sables Infra-Molassiques et Danien) et Puymaurin 2 (formation de Pont-Labau). | 71 |
| Figure 31 : Carte des principaux forages utilisés pour la comparaison des eaux de Lacquy 101..... | 72 |
| Figure 32 : Diagramme de Schoeller des eaux de Lacquy 101 (campagne de prélèvements 2017) et comparaison avec des eaux prélevées dans des forages proches géographiquement. | 72 |
| Figure 33 : Modélisation de mélanges d'eaux pour expliquer la composition chimique des eaux de Lacquy 101. A gauche, mélange de 90 % d'eau de Créon (Aquitanien) et 10 % d'eau de Réaup-Lisse (Jurassique). A droite, mélange de 99 % d'eau de Créon (Aquitanien) et de 1 % d'eau de Moncrabeau 101 (zone à anhydrite et dolomie à 1 473 m de profondeur). | 73 |

Figure 34 : Diagramme δD vs. $\delta^{18}O$ pour les eaux des Sables Infra-Molassiques. Analyses de janvier 2017 (symboles rouges) et analyses provenant de diverses campagnes plus anciennes (symboles verts). La droite météorique mondiale (Craig, 1961) est représentée par la droite noire en trait plein, et la droite météorique de Dax est représentée en pointillés (Millot et al., 2010).....75

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques techniques des ouvrages pré-sélectionnés..... | 14 |
| Tableau 2 : Synthèse du cycle de prélèvement à 828 m dans Polastron, le 11/10/2017..... | 29 |
| Tableau 3 : Synthèse des prélèvements de fond, à Polastron, avant pompage..... | 29 |
| Tableau 4 : Synthèse des prélèvements de fond, à Polastron, après pompage..... | 31 |
| Tableau 5 : Prélèvement à 320 m dans le forage Saint André, le 19/10/2017 ; des évaluations des émissions gazeuses (agitation d'une bouteille) ont été pratiquées durant la purge du système de prélèvement. | 41 |
| Tableau 6 : Synthèse des prélèvements de fond à Lacquy ; * : les données sur le méthane peuvent avoir été collectées durant la phase de purge et ne sont pas nécessairement acquises lors des deux derniers runs (qui sont conditionnés pour analyses ultérieures au laboratoire)..... | 50 |
| Tableau 7 : Synthèse des prélèvements de fond à Muret 104..... | 54 |
| Tableau 8 : Prélèvements de fond à Muret 104 - influence de la profondeur de prélèvement sur les résultats d'analyses chimiques - éléments majeurs ($mg.L^{-1}$). | 55 |
| Tableau 9 : Prélèvements de fond à Muret 104 - influence de la profondeur de prélèvement sur les résultats d'analyses chimiques - éléments traces ($\mu g.L^{-1}$). | 55 |
| Tableau 10 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en pourcentage de la phase gaz exsolvée lors de la mise sous vide du prélèvement..... | 59 |
| Tableau 11 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en pourcentage de la phase gaz exsolvée lors de la mise sous vide du prélèvement..... | 61 |
| Tableau 12 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en mol/l, calculées à la température du laboratoire..... | 63 |
| Tableau 13 : Solubilité maximale des gaz dissous (cas de Polastron) et saturation à l'équilibre avec l'atmosphère. Données exprimées en mol/l, pour une eau douce. La solubilité de N_2 en conditions fond de trou est calculée à partir du programme de Mao et Duan (2006) disponible à http://gcmodel.kl-edi.ac.cn/archives/programs.htm | 63 |
| Tableau 14 : Concentrations (en $\mu g/L$) en éléments traces des eaux minéralisées autour du forage de Polastron 101. | 68 |
| Tableau 15 : Concentrations en éléments traces dans les eaux des forages étudiés..... | 70 |
| Tableau 16 : Compositions des isotopes de la molécule d'eau et du carbone des eaux. | 75 |
| Tableau 17 : Compositions en isotopes (Sr, B, Li, S) des eaux..... | 76 |

Liste des annexes

| | |
|---|-----|
| Annexe 1 Estimation de l'impact de la densité sur le niveau piézométrique | 83 |
| Annexe 2 Fiche descriptive du forage Polastron 101..... | 87 |
| Annexe 3 Fiche descriptive du forage Saint-André..... | 95 |
| Annexe 4 Fiche descriptive du forage de Lacquy | 103 |
| Annexe 5 Fiche descriptive du forage Muret 104..... | 111 |
| Annexe 6 Diagnostic du forage Polastron 101 - Rapport Hydro Assistance..... | 117 |
| Annexe 7 Diagnostic du forage Saint-André - Rapport Hydro Assistance..... | 155 |
| Annexe 8 Diagnostic du forage de Lacquy - Rapport Hydro Assistance | 191 |

1. Contexte

1.1. OBJECTIFS

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet GAIA, dont l'objectif est l'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. Ce programme est financé par Teréga (ex. TIGF), l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le BRGM, et piloté par le BRGM. Le volet « eau » inclut notamment un programme d'acquisition de nouvelles données hydrodynamiques et géochimiques dans les principales nappes. Dans ce cadre, il est notamment prévu de réaliser des caractérisations géochimiques et isotopiques, en utilisant les forages profonds existants, dans des « zones blanches » en termes de connaissance.

Cette caractérisation se heurte en premier lieu à l'impératif de représentativité des échantillons prélevés dans des forages profonds anciens, dont l'intégrité incertaine (liée à un défaut potentiel d'étanchéité des tubages et/ou des espaces annulaires à l'extrados des tubages non ou mal cimentés) peut induire un mélange d'eaux entre les différents niveaux aquifères traversés par le forage. Cette complexité du fonctionnement des forages d'eau profonds, la diversité des eaux qui peuvent y être contenues, sont bien connues des opérateurs de mesure en forages, et parfois des maîtres d'ouvrages. Mais elles ne bénéficient pas d'une bibliographie étoffée.

Une phase précédente de démonstration avait été conduite dans deux forages situés dans la région de Castres (Labruguière - 10122X0055/F et Valdurenque - 09866X0074/F), dans le cadre du projet GAIA (Gal et al., 2016). Elle avait établi deux impératifs majeurs préalables à des prélèvements en forage destinés à la caractérisation hydrogéochimique d'aquifères :

- l'acquisition préalable de connaissances concernant l'ouvrage ; cela passe par le recueil de données bibliographiques (suivi de forage, essais hydrauliques), et par une caractérisation in-situ de la colonne d'eau par des diagraphies géochimiques ;
- la sollicitation hydraulique du forage pour s'assurer du renouvellement de l'eau présente dans la colonne, par de l'eau circulant dans l'aquifère.

Parmi les ouvrages captant les aquifères profonds du sud du Bassin aquitain, 4 ouvrages avaient été présélectionnés pour la réalisation de prélèvements (tableau 1), sur la base :

- des données historiques disponibles, de leur coupe technique et lithologique, et le cas échéant des tests anciens de pompage ou d'injection ;
- de leurs suivis piézométriques, les fluctuations indiquant potentiellement une bonne connexion hydraulique à l'aquifère considéré ;
- de leur position géographique, afin de privilégier les secteurs peu renseignés.

Ces ouvrages sont tous d'anciens forages de reconnaissance pétrolière, reconvertis en piézomètres par obturation du fond et perforations au droit des SIM.

Les travaux réalisés dans le cadre du projet GAIA, et présentés dans ce rapport, concernent les ouvrages de Polastron (32), Saint-André (31) et Lacquy (40). En complément, il est également fait appel à des données antérieures acquises par le BRGM sur fonds propres, et qui concernent l'ouvrage Muret 104 situé à Eaunes (31), également dénommé SIM8 dans le projet CARISMEAU (données non publiées par ailleurs).

| Ouvrage | Polastron | Saint-André | Lacquy | Muret 104 |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Code BSS | BSS002HRNC | BSS002KEHH | BSS002CXHS | BSS002HVPP |
| Ancien indice BSS | 10082X0001 | 10336X0002 | 09266X0004 | 10098X0004 |
| Latitude (WGS84) | 43,520339°N | 43,289158°N | 43,960100°N | 43,452464°N |
| Longitude (WGS84) | 0,870339°E | 0,872025°E | 0,272900°O | 1,371297°E |
| Altitude (m NGF) | 215 | 305 | 110 | 175 |
| Niveau piézométrique (m NGF) | ≅ 116 | ≅ 288 | ≅ 78 | ≅ 160 |
| Niveau piézométrique (m/sol) | ≅ 101 | ≅ 17 | ≅ 32 | ≅ 15 |
| Profondeur théorique (m) | 1 289 | 1 940 | 1 230 | 1 043 |
| Zone perforée (m) | 818,5 - 828,5 | 430 - 440 | 435 - 445 | 1 031,6 - 1 040 |
| Formation connectée | Sables de Lussagnet | Formation de Pont-Labau | Sables de Lussagnet | Sables de Lussagnet |
| Diamètre tubage (cm) | 17,78 (7") | 24,45 (9"5/8) | 33,97 (13"3/8) | 23,81 (9"3/8) |

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des ouvrages pré-sélectionnés.

1.2. METHODOLOGIE D'INTERVENTION DANS LES OUVRAGES

La réalisation de prélèvements de fond dans des ouvrages profonds doit être, idéalement, entreprise à l'issue d'une phase de caractérisation initiale. Cette phase comporte :

- une évaluation de l'état du tubage et des perforations, par inspection endoscopique ;
- un diagnostic de l'état physico-chimique de la colonne d'eau au repos, par diagraphies ;
- une caractérisation d'éventuels flux dans l'ouvrage au repos (mesures au micro-moulinet et diagraphies physico-chimiques).

A l'issue de cette première phase, le choix des profondeurs de prélèvement peut être fait. Il s'agit prioritairement de pratiquer des prélèvements au niveau du (des) horizon(s) producteur(s) dans la zone perforée. Il s'agit en complément de pratiquer un prélèvement dans le tube plein, afin d'évaluer l'amplitude et le type d'interactions que l'eau a pu avoir avec le tubage depuis la dernière sollicitation de l'ouvrage. Cette première série de prélèvements de fond vise donc à déterminer les caractéristiques chimiques de l'eau, sans aucune sollicitation de l'ouvrage.

Pour faire lien avec les actions précédemment entreprises dans la région de Castres, une seconde série de prélèvements de fond a été opérée, après extraction de quelques mètres cubes d'eau dans la colonne d'eau. Le dispositif de pompage est placé au maximum vers 140 m de profondeur, puis utilisé de manière à extraire un volume supérieur au volume d'eau présent dans le forage au droit des perforations. Ainsi, si ces perforations sont les seules zones d'alimentation en eau de l'ouvrage, alors le volume d'eau extrait permet de renouveler l'eau présente en face de celles-ci. Une fois ce pompage effectué, l'opération de prélèvement de fond est à nouveau mise en œuvre. Le but est de déterminer si des écarts existent entre les premiers et les derniers prélèvements, pour une profondeur donnée.

Les données rapportées pour l'ouvrage Muret 104 ne concernent que des prélèvements de fond réalisés en 2014. Il n'y avait pas eu d'autres caractérisations.

1.3. MODE OPERATOIRE UTILISE POUR LES PRELEVEMENTS DE FOND

L'exemple présenté est celui des acquisitions effectuées dans l'ouvrage de Polastron. La figure 1 illustre la mise en œuvre, sur site, du système de prélèvement, à une profondeur ciblée dans le forage (brevet FR1259214), qui peut être schématisée comme suit :

- en tête d'ouvrage, un tube double (ci-après dénommé bitube) est descendu dans l'ouvrage, de manière à avoir au maximum une longueur de 250 m immergée sous le niveau statique ;
- à l'extrémité de ce bitube, un système de clapet et de filtre est mise en place ;
- sous ce système de clapet, un monotube, de longueur variable, est mis en place, muni à son extrémité inférieure d'un lest en inox.

Pour le prélèvement le plus profond réalisé à Polastron (828 m/bride), compte tenu du niveau statique (108 m/bride), la longueur de bitube est de 332 m (longueur immergée de $332 - 108 = 224$ m) et la longueur immergée de monotube est de 496 m. Pour les profondeurs moins importantes, on a simplement joué sur la longueur de bitube descendu en forage (ainsi, pour la profondeur de 764 m, on a remonté 64 m de bitube).

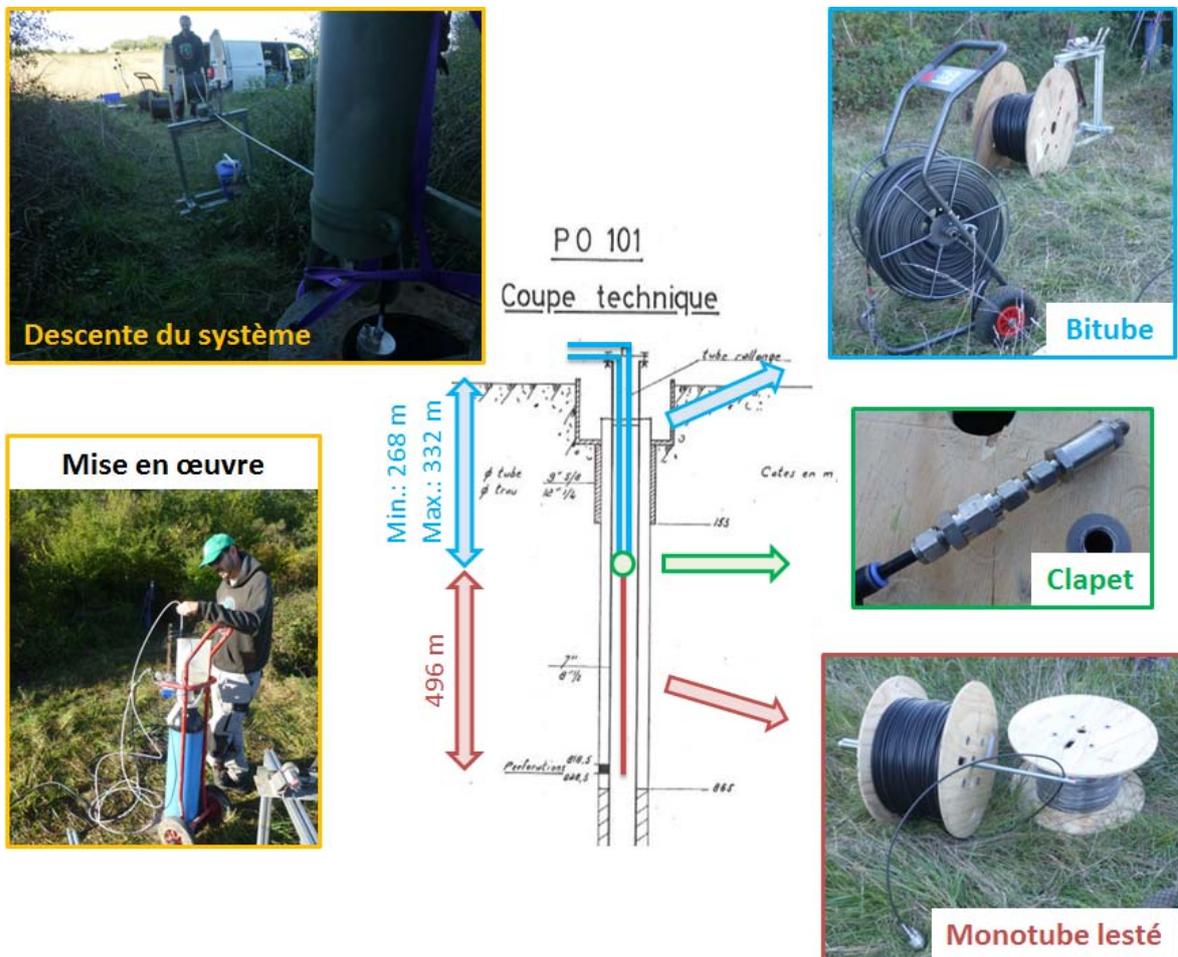


Figure 1 : Principe de mise en œuvre du préleveur de fond à Polastron.

Le système est descendu avec clapet ouvert, ce qui permet à l'eau du forage de remonter dans le monotube puis dans le bitube jusqu'au niveau statique. Le système se remplit comme un immense *bailer*, échantillonnant, au cours de sa descente, tous les horizons d'eau qu'il rencontre.

Il y a donc nécessité de réaliser des cycles de purge avant d'obtenir l'eau de l'horizon auquel le préleveur a été déployé. Pour ce faire, on utilise un des tuyaux du bitube pour effectuer une mise en pression avec un gaz vecteur (azote). Ceci permet de fermer le clapet et de chasser, via l'autre tuyau, l'eau qui est présente dans le bitube. Le volume théorique, hors pertes de charges, est de 1,2 litre d'eau pour 100 m de tube. Dans le cas du prélèvement à 828 m, on peut donc retirer au maximum environ 5,7 litres d'eau à chaque mise en pression du système. De l'eau est également présente dans les 496 m de monotube situés sous le clapet (environ 6,3 litres), qu'il faut aussi purger. Il est donc nécessaire de répéter au minimum 3 fois le cycle de remplissage/mise en pression/purge avant d'obtenir de l'eau issue de la profondeur à laquelle le dispositif a été descendu.

Ces étapes sont illustrées par les figure 2 et figure 3 :

- étape de mise en pression (figure 2). On procède à la fermeture du clapet pour initier la remontée d'eau dans le système, par la poussée qu'elle permet d'exercer sur l'eau présente dans le bitube. On suit la remontée en regardant le bullage dans le 2^{ème} tuyau du bitube, le 1^{er} servant à l'introduction du gaz.
- arrivée d'eau (figure 2). Une fois que le bullage est terminé, l'eau se met à couler. Les premiers écoulements ne sont pas considérés (contact avec l'azote). Par la suite, l'eau s'écoule de manière calme, permettant de mettre en évidence un dégazage léger (microbulles de gaz qui se remarquent sur les parois du béccher ou sur les électrodes). Le gaz qui dégaze est ici un gaz naturellement présent dans l'eau.
- fin d'arrivée d'eau (figure 3). Au fur et à mesure de la remontée d'eau en surface, la pression de la colonne dans le bitube diminue. Cela se traduit par une accélération de la vitesse d'écoulement de l'eau en surface, jusqu'au stade ultime de la vidange du bitube, où le gaz injecté d'un côté du bitube ressort de l'autre. A la fin de la remontée d'eau, il est évident que la composition en gaz est fortement influencée par la présence du gaz vecteur, ce qui donne à l'eau un aspect de mousse légère. La fin de la remontée d'eau n'est ainsi jamais considérée pour le prélèvement des gaz dissous.
- relâchement de pression (figure 3). Lorsqu'il n'y a plus d'eau dans le système, seul un léger brouillard est émis, principalement composé d'azote et de l'eau qui peut rester dans le système. On relâche alors la pression, le clapet se rouvre et l'eau remonte depuis le monotube dans le bitube. Au début, la remontée est assez rapide, marquée par un bullage notable dans le béccher. A la fin, la remontée est beaucoup plus lente : seules quelques bulles de gaz étant émises par spasmes. Ceci marque la fin de l'étape de remontée de l'eau dans le bitube, et signale qu'une nouvelle mise en pression peut être envisagée.



| Séquences |
|----------------------------|
| 1. Mise en pression |
| 2. Arrivée d'eau |
| 3. Fin d'arrivée d'eau |
| 4. Relâchement de pression |



Figure 2 : Principe d'utilisation du préleveur de fond à Polastron - étapes 1 et 2.



| Séquences |
|----------------------------|
| 1. Mise en pression |
| 2. Arrivée d'eau |
| 3. Fin d'arrivée d'eau |
| 4. Relâchement de pression |



Figure 3 : Principe d'utilisation du préleveur de fond à Polastron - étapes 3 et 4.

2. Forage de Polastron PO-101

2.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE

L'ouvrage fait l'objet d'une fiche récapitulative reportée en annexe 2. Ce forage réalisé dans le Gers (32), en 1965 (profondeur originelle : 1 410 m), a une profondeur théorique de 1 289 m correspondant à la cote de mise en place d'un bouchon de ciment lors des travaux de reconversion du forage en piézomètre, réalisés en mai-juin 1973 (AFBAG, 1974).

L'inspection endoscopique, opérée le 9 octobre 2017, montre un forage en bon état général ; les parois internes des tubages apparaissent bien préservées. Des dépôts (incrustations) sont seulement visibles autour de 100-200 m et autour des cotes théoriques des perforations (entre 818,5 et 828,5 m - par rapport à la table de rotation de 1957). L'ouvrage est obstrué, à 951,4 m par rapport à la bride actuelle, par des dépôts constitués d'un remplissage de sédiments fins (provenant de la section perforée ?).

Les repères des mesures de profondeur peuvent varier selon les documents disponibles (table de rotation de la foreuse, tubage, sol), et il est important de préciser qu'il peut résider une incertitude sur les profondeurs des éléments par rapport au repère actuel. En l'absence de données fiables sur l'évolution de la cote du sol ou de repère pour recalibrer et homogénéiser les mesures, l'inspection endoscopique (vidéo) avait pour vocation de vérifier la profondeur effective des perforations dans la configuration actuelle de la tête de forage. Cette position des perforations toutefois n'a pas pu être validée car elles ne sont pas visibles. La présence d'incrustations de teinte blanche sur les parois autour de la profondeur théorique des perforations semble toutefois indiquer leur existence dans l'intervalle attendu. Les diagraphies de production ont toutefois permis de valider la suite la position de la section productive des perforations (cf. 2.2.2).

Selon les données lithologiques disponibles, la formation des Sables de Lussagnet (Yprésien) se situerait entre 775 et 836 m par rapport au sol (intervalle contenant la section du tubage perforée), et les calcaires et dolomies de la formation d'Arcet (Paléocène) entre 836 et 887 m de profondeur.

Le tubage en acier de diamètre externe 7" (177,8 mm) ne serait cimenté que dans sa partie basse de 865 m à 1 289 m. Des communications hydrauliques sont par conséquent susceptibles de s'opérer, dans l'espace annulaire, entre les niveaux aquifères des Sables de Lussagnet et de la formation d'Arcet sous-jacente.

2.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

2.2.1. Mesures au repos

Dans le forage au repos depuis plusieurs années, les profils quasi-verticaux de pH, conductivité, O₂ dissous, dans toute la colonne de tubes pleins jusqu'à 815 m environ, démontrent l'absence d'entrées d'eau parasites (figure 4, figure 6, figure 7). Le pH élevé, voisin de 9, résulte classiquement d'un contact prolongé de la colonne d'eau stagnante avec le tubage acier. Le profil de température suit également un gradient régulier jusqu'à 780 m, proche du gradient géothermique moyen (autour de 3,15°C / 100 m), démontrant qu'il n'existe pas non plus de flux d'échange significatif dans l'espace annulaire. Sur la base de ces constats, on peut déjà affirmer que les niveaux aquifères profonds ne sont pas contaminés par d'éventuels horizons aquifères moins profonds via le forage (figure 7) : sous réserve de renouvellement de la colonne d'eau, un

prélèvement représentatif des conditions de fond est par conséquent envisageable, sous la section en tube plein.

Le profil de conductivité met en évidence une stratification claire de la colonne d'eau, avec une interface au sommet des perforations :

- au-dessus, une colonne moyennement minéralisée (conductivité comprise entre 1 020 et 1 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C), à pH élevé de l'ordre de 9 ;
- au-dessous, une colonne plus minéralisée, de conductivité proche de 2 350 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C, pH proche de 8 autour de 830 m, puis plus fluctuant dans le tube plein au-dessous.

Cette dernière est vraisemblablement plus représentative de l'eau de la formation. La colonne présente au-dessus pourrait correspondre à une eau exogène utilisée par le passé pour la mise en eau du forage (AFBAG, 1974), plus probablement à un mélange de cette eau avec celle de l'aquifère appauvrie en éléments dissous, du fait des interactions avec le tubage (précipitations), voire plus probablement encore un mélange entre les deux origines envisagées précédemment.

Une inflexion est visible sur le profil de température entre 780 et 840 m, soit très majoritairement au droit des Sables de Lussagnet, avec une diminution du gradient (figure 7). Elle pourrait confirmer l'existence d'un léger flux d'échanges entre l'Yprésien (Sables de Lussagnet associés à la nappe des SIM) et le Paléocène (formation d'Arcet) sous-jacent, via l'espace annulaire non cimenté.

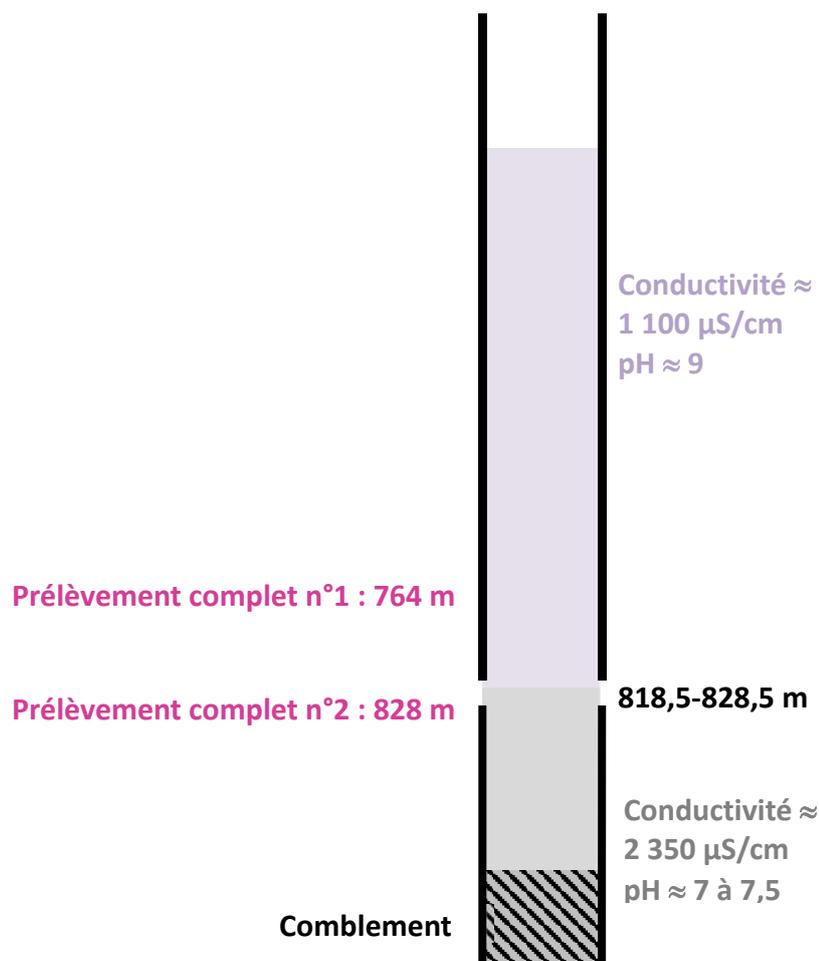


Figure 4 : Coupe synthétique du forage de Polastron - synthèse des mesures au repos.

2.2.2. Mesures en pompage

Le pompage a extrait un volume total de 17,2 m³, pour un volume intérieur théorique du forage de l'ordre de 14 m³, en considérant comme limite supérieure la position de la pompe immergée (la colonne considérée est comprise entre 150 et 818,5 m).

Lors des mesures en pompage (figure 5, figure 6, figure 7), la conductivité de la colonne d'eau est homogène, autour de 2 400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C (profil vertical), entre la position de la pompe immergée (150 m) et la position des perforations (818,5 m) : la colonne a été entièrement renouvelée, et aucune venue d'eau parasite n'est détectée dans le tube plein. Le gradient de température diminue sensiblement, sous l'effet du réchauffement progressif de la colonne d'eau.

Le sommet de la zone perforée productive est nettement visible sur les profils, par un palier de conductivité et pH, à 819,4 m par rapport à la bride actuelle.

Sous les perforations, aucune modification de la colonne d'eau par rapport aux mesures au repos n'est visible et aucun flux n'est mesurable : le fond de l'ouvrage n'est pas productif, la colonne d'eau présente au-dessus des perforations est bien représentative de l'eau entrant uniquement à la faveur des perforations (figure 7).

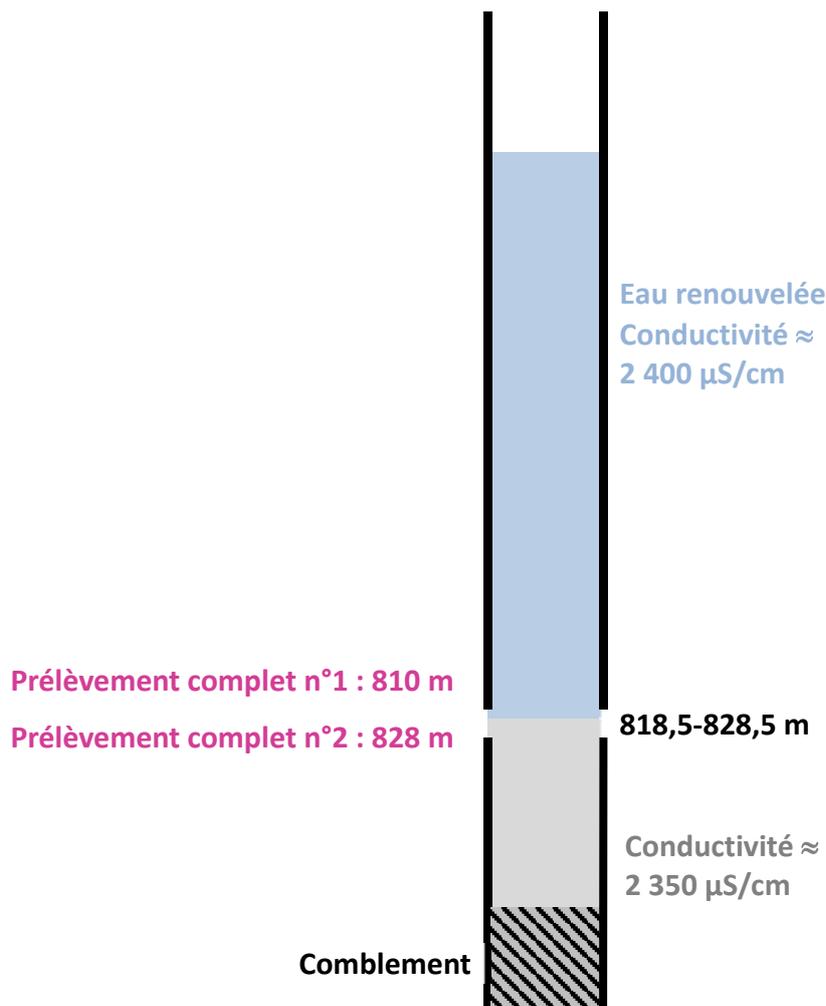


Figure 5 : Coupe synthétique du forage de Polastron - synthèse des mesures après pompage.

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Diagraphies



Commune : Polastron (32)
Forage : PO 101

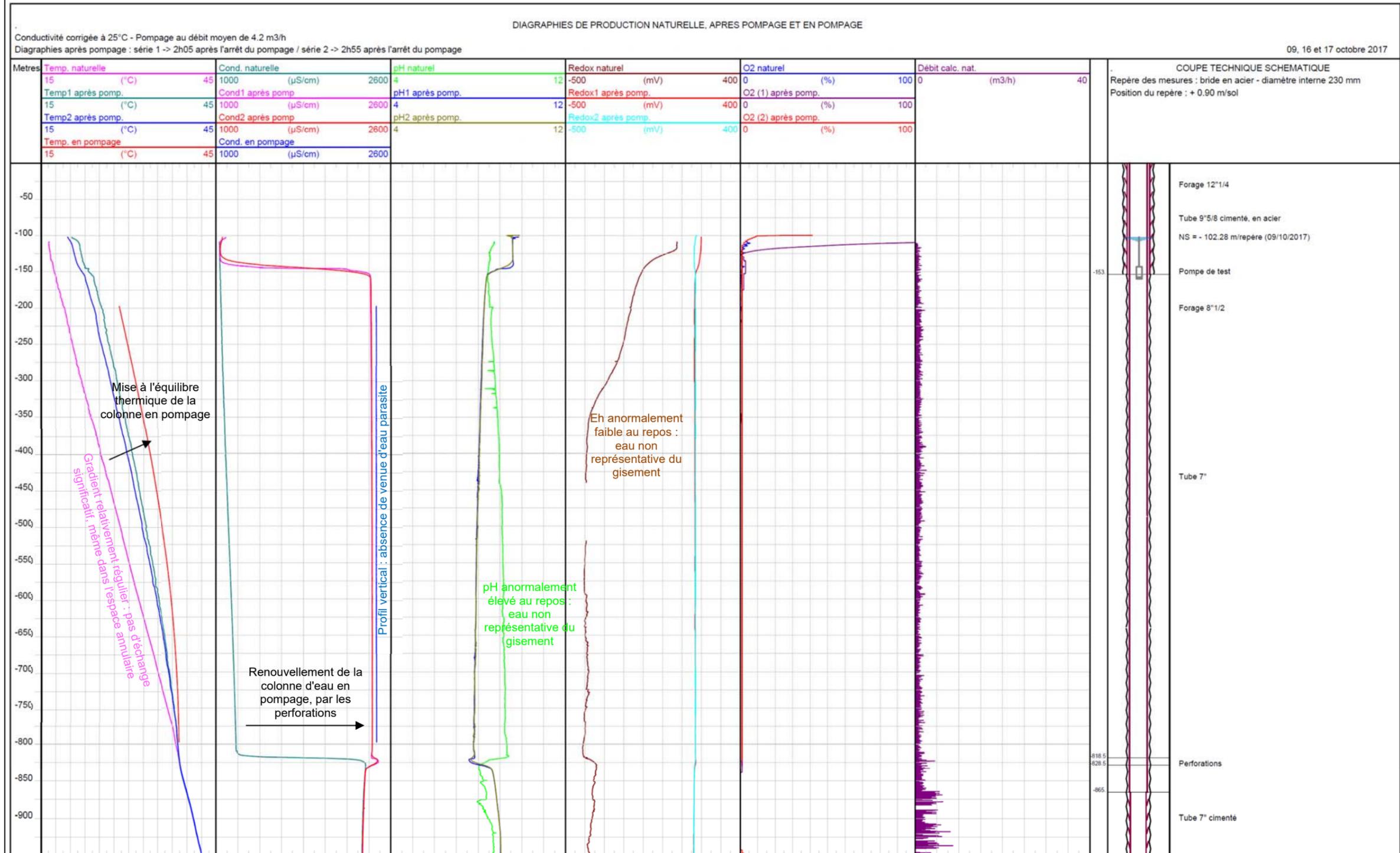


Figure 6 : Diagraphies de production au repos et en pompage, dans le forage de Polastron.

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Diagraphies



Commune : Polastron (32)
Forage : PO 101

DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE, APRES POMPAGE ET EN POMPAGE

Conductivité corrigée à 25°C - Pompage au débit moyen de 4.2 m³/h

Diagraphies après pompage : série 1 -> 2h05 après l'arrêt du pompage / série 2 -> 2h55 après l'arrêt du pompage

09, 16 et 17 octobre 2017

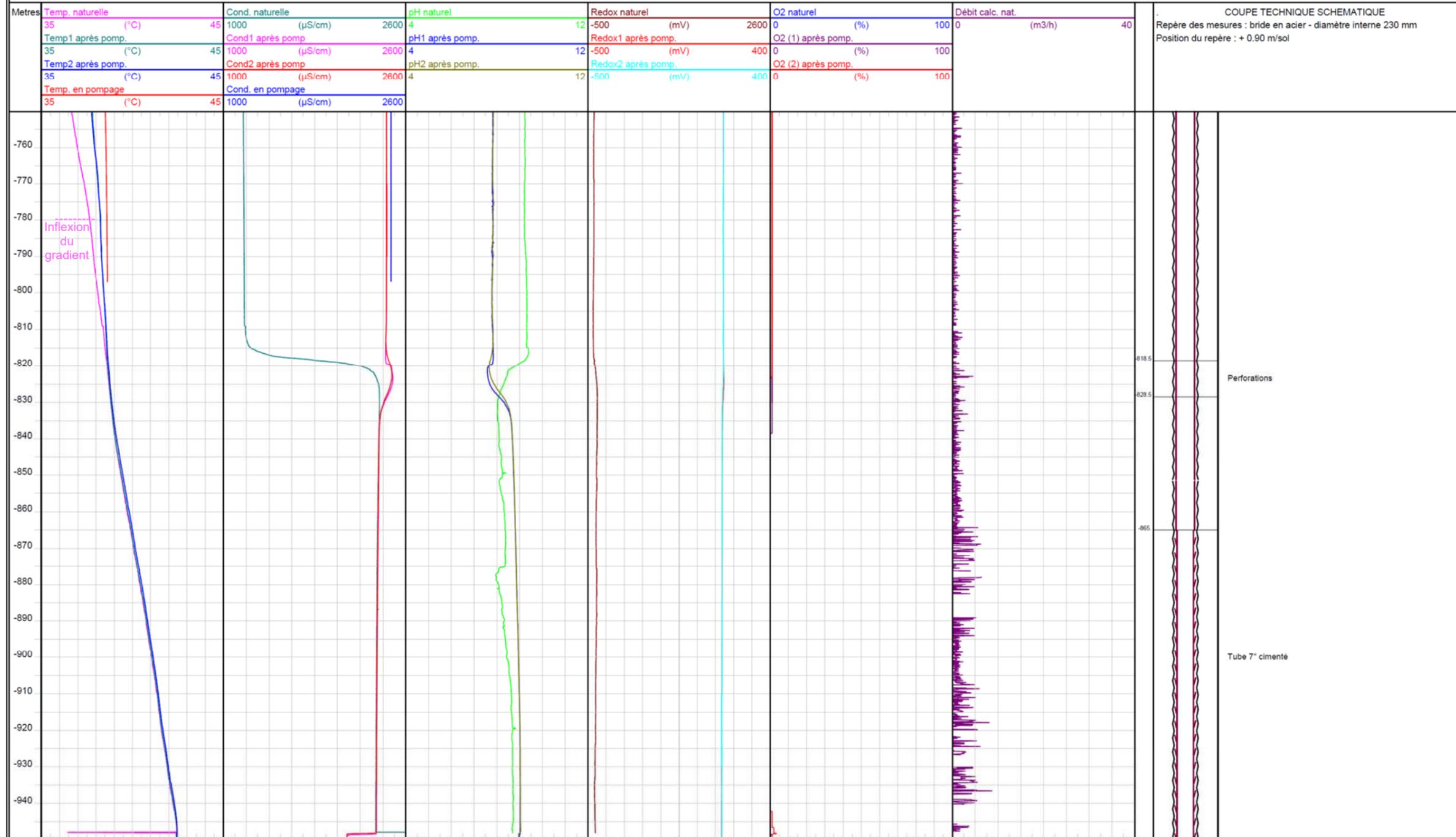


Figure 7 : Diagraphies de production au repos et en pompage, dans le forage de Polastron - zoom de 750 à 950 m.

2.3. DONNEES HYDRAULIQUES

Le niveau piézométrique initial mesuré dans le forage était de 12,80 m sous le niveau repère (bride acier), le 16 octobre 2017. Le forage a été pompé à un débit moyen de 4,2 m³/h (pompe positionnée à 150 m) pendant 4 heures, engendrant un rabattement maximum de 2,6 m.

Sur les deux premières heures (figure 8), le suivi piézométrique met en évidence :

- une pseudo-stabilisation rapide du niveau en quelques minutes, ce qui confirme la connexion effective du forage à l'aquifère capté (pas de vidange observée du forage sous l'effet du pompage) ;
- des fluctuations significatives du niveau observées suite à l'arrêt du pompage et à son redémarrage au bout de 15 minutes environ (1 000 s.) ;
- un retour à une relative stabilité du niveau après 1 heure environ (3 500 s.) de pompage.

Le suivi piézométrique, correspondant à la deuxième partie du pompage (au-delà de la deuxième heure), n'est pas reporté, car le capteur de pression a subi un dysfonctionnement donnant des valeurs de niveau erratiques.

Les fluctuations observées du niveau au cours de la première heure ne permettent pas une interprétation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère capté. Sachant que leur irrégularité ne concorde pas avec d'éventuels phénomènes de variation de densité de la colonne d'eau (liés à la température et à la minéralisation), l'hypothèse la plus probable pour expliquer ces fluctuations serait un décolmatage possible des dépôts observés au niveau des perforations lors de l'examen endoscopique.

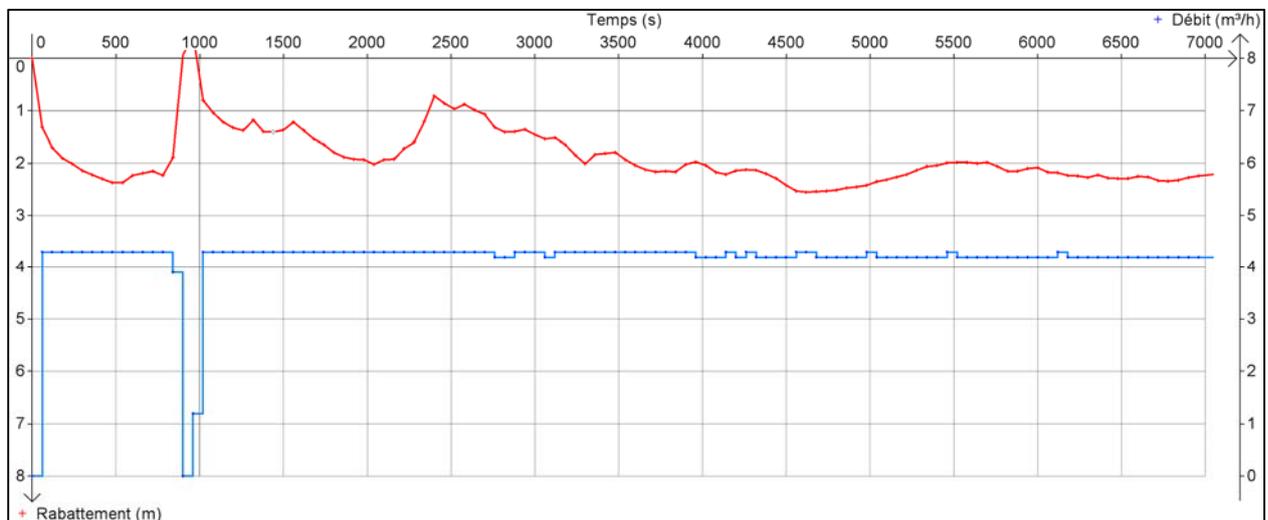


Figure 8 : Suivi piézométrique du forage de Polastron sous l'effet du pompage.

2.4. ANALYSE DU DECALAGE PIEZOMETRIQUE POSTERIEUR AU POMPAGE

Le suivi piézométrique à long terme dans le forage de Polastron indique un décalage significatif du niveau de la nappe captée, supérieur à 40 cm, entre les mesures réalisées avant et après le pompage (figure 9). Ce décalage est validé par les mesures manuelles : il n'est par conséquent pas imputable à un problème matériel (positionnement du capteur).

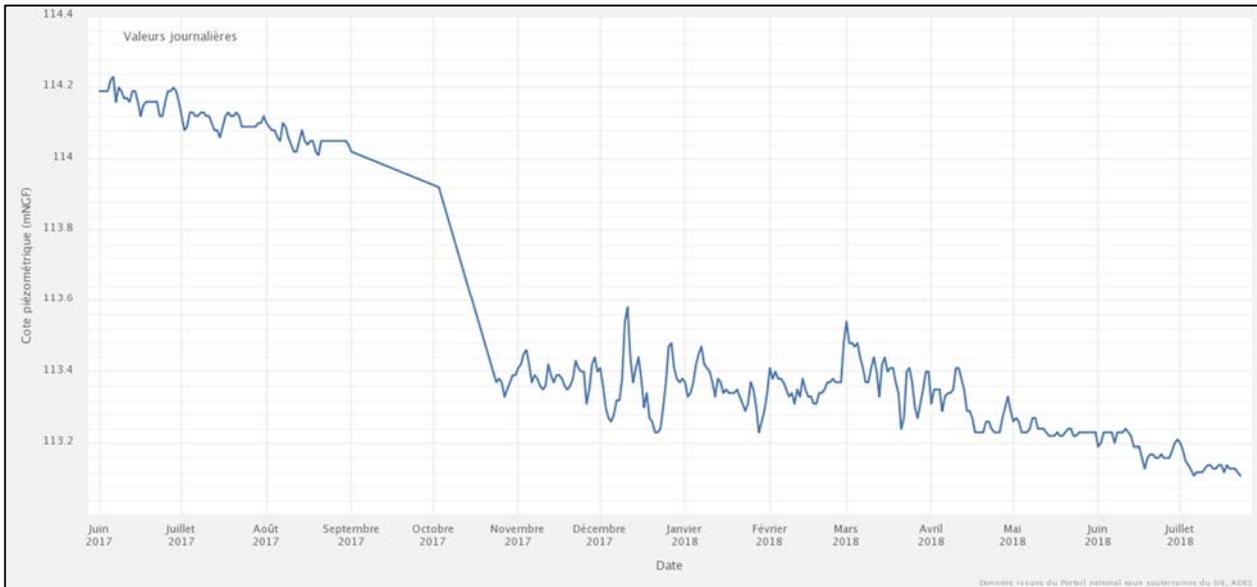


Figure 9 : Evolution piézométrique du forage de Polastron, de juin 2017 à juillet 2018.

Un effet de densité de la colonne d'eau peut être suspecté à ce stade : une augmentation minime de la densité de l'eau, sur une hauteur de colonne de l'ordre de 800 m entre le niveau piézométrique et les perforations, est susceptible de générer ce phénomène.

L'influence de la température est exclue, car le pompage a au contraire généré un réchauffement transitoire de la colonne d'eau, et donc une diminution de la densité ; de surcroît, les mesures après pompage montrent que le retour à l'équilibre thermique de la colonne d'eau est rapide, de l'ordre de quelques jours.

Les effets liés à la compressibilité de l'eau sont négligés dans ces gammes de profondeur.

A titre indicatif, une reconstitution de la densité sur toute la hauteur de la colonne a été effectuée afin de comparer les situations avant et après pompage, en intégrant les données de diagraphies :

- diagraphie de température initiale au repos (09/10/2017) prise comme référence du forage au repos, dans les 2 cas ;
- diagraphie de conductivité initiale (09/10/2017) et diagraphie de conductivité après pompage (16/10/2017).

Dans un premier temps, la densité de l'eau pure est calculée en chaque point de la colonne d'eau selon la relation fournie par la figure 10.

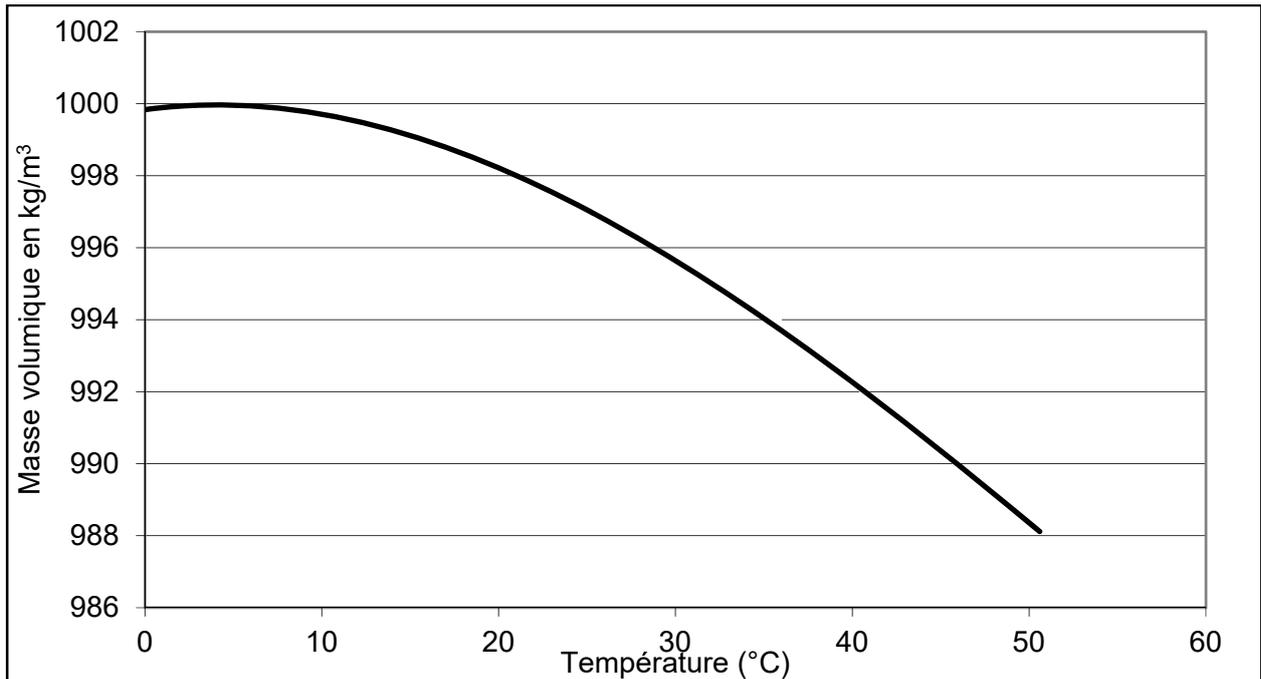


Figure 10 : Masse volumique de l'eau pure en fonction de la température (données Lide, 2005).

Puis une concentration équivalente en NaCl (mg.L^{-1}) est calculée en chaque point de la colonne d'eau, sur la base des mesures de conductivité, en utilisant les conductivités correspondant aux ions Na et Cl fournies par la norme AFNOR NF T90-111 de septembre 1975. Cette concentration est additionnée à la masse volumique de l'eau pure pour établir la densité estimée de la colonne d'eau en chaque point.

Les densités ainsi reconstituées des colonnes d'eau sont données ci-dessous, avec la pression cumulée depuis le niveau piézométrique (figure 11).

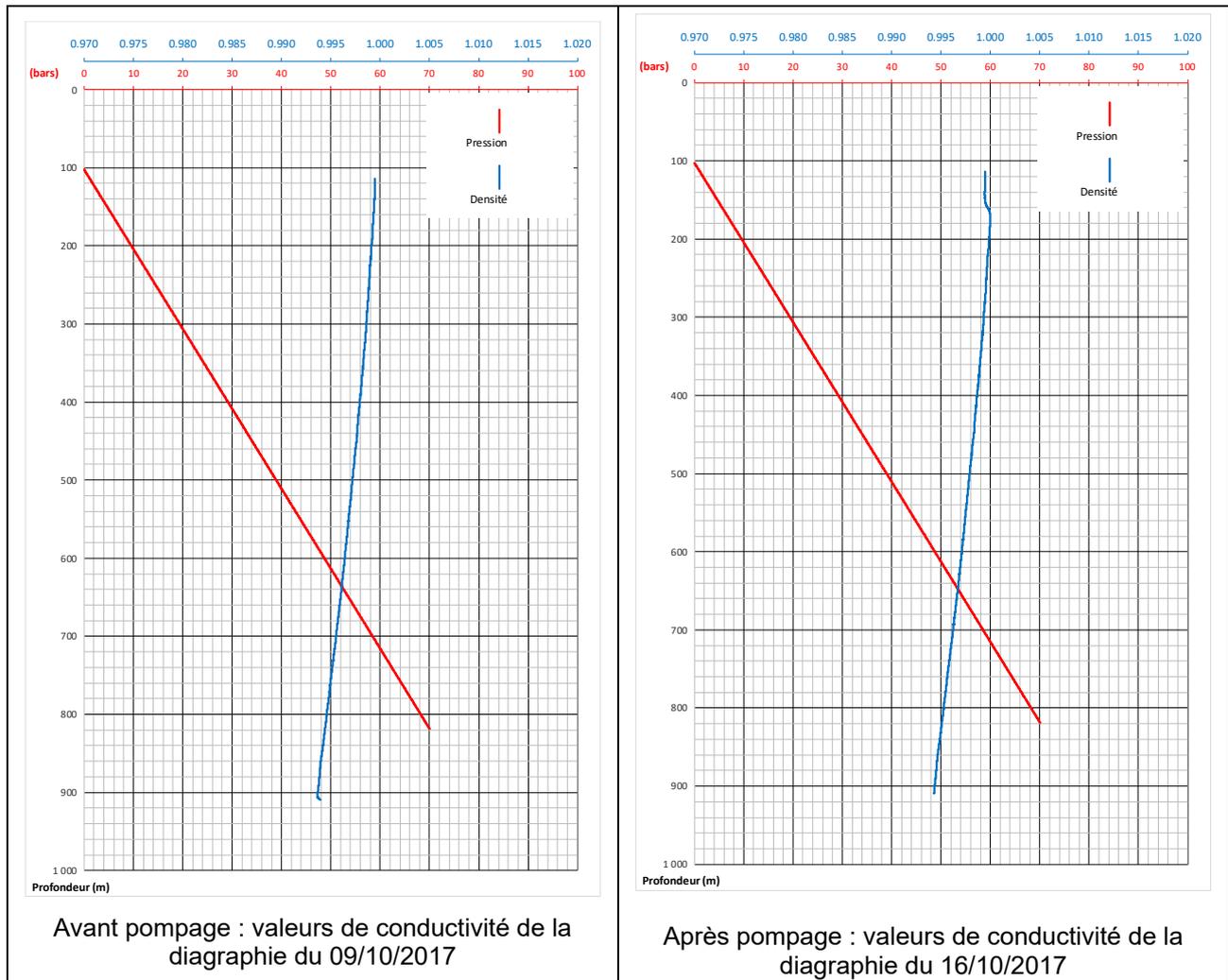


Figure 11 : Profils reconstitués de densité de la colonne d'eau avant et après pompage à Polastron.

Entre le sommet des perforations à 818,5 m et le niveau piézométrique au repos (une dizaine de mètres sous le niveau repère), la densité moyenne calculée de la colonne d'eau est de 0,98015 avant pompage, le 09/10/2017, et de 0,98066 après pompage, à partir du 16/10/2017. Cette différence de densité de 5×10^{-4} peut paraître minime, mais elle a une incidence significative pour une colonne d'eau dont la hauteur est de l'ordre de 800 m : la différence de pression à la base de la colonne est en effet de l'ordre de $5 \times 10^{-4} \times 800 = 0,4$ m entre les deux situations.

Alternativement, une seconde évaluation de cette influence de la densité de la colonne d'eau a été effectuée, à partir des données de conductivité mesurées. Une intégration le long de la colonne d'eau permet d'évaluer la différence de pression (voir annexe 1). Ce second calcul permet également d'estimer une différence de l'ordre de 40 cm.

L'ordre de grandeur obtenu par les deux méthodes est cohérent avec les observations, ce qui confirme que l'effet de marche visible sur le suivi piézométrique après l'intervention est imputable au renouvellement de la colonne d'eau du forage avec de l'eau issue des niveaux perforés, dont la minéralisation est plus élevée.

2.5. PRELEVEMENTS

2.5.1. Prélèvements avant pompage

Comme mentionné au paragraphe 1.3, il est nécessaire de réaliser au minimum 3 cycles de remplissage/mise en pression/purge avant d'obtenir de l'eau issue de la profondeur à laquelle le dispositif a été descendu. A titre illustratif, le tableau 2 présente le suivi de cette étape pour le prélèvement réalisé à 828 m avant que l'ouvrage ne soit pompé. La purge progressive du système est bien illustrée par l'évolution de la conductivité électrique. L'eau est d'abord caractéristique de niveaux peu conducteurs présents dans le tube plein, et devient progressivement représentative de l'aquifère capté (zone perforée). On remarquera également que la présence de gaz (CH₄) est notée lorsque l'on détecte le gaz produit par agitation de quelques centaines de ml d'eau dans une bouteille - cet aspect sera détaillé lors de la présentation des résultats d'analyse.

Les valeurs de température ne sont pas reportées dans le tableau. Les mesures étant effectuées en surface : elles ne sont pas représentatives de la température de l'eau dans le forage, différents effets modifiant la température au cours de la remontée de l'eau (dégazage du fluide générant un refroidissement et exposition du bitube au soleil en surface notamment).

| Polastron 828 m | Mise en pression | P. max (bar) | Arrivée d'eau | Fin arrivée d'eau | Volume eau (l) | EC-25°C (μS.cm ⁻¹) | pH | Eh (mV ESH) | CH ₄ (%) |
|-----------------|------------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|--------------------------------|------|-------------|---------------------|
| Run 1 | 09:35 | 35 | 9:50 | 10:03 | 4,75 | 1220 | - | - | 1 |
| Run 2 | 10:14 | 33 | 10:21 | 10:31 | 4,5 | 1202 | - | - | 1,5 |
| Run 3 | 10:41 | 35 | 10:49 | 10:57 | 4,5 | 2050 | 9,23 | -30 | 0,7 |
| Run 4 | 11:06 | 35 | 11:12 | 11:18 | 4,5 | 2180 | 8,99 | -55 | 0,2 |
| Run 5 | 11:24 | 35 | 11:29 | 11:34 | 4,5 | 2210 | 8,98 | -50 | - |
| Run 6 | 11:47 | 35 | 11:52 | 11:59 | 4,5 | 2230 | 8,93 | -60 | - |

Tableau 2 : Synthèse du cycle de prélèvement à 828 m dans Polastron, le 11/10/2017. Les valeurs de conductivité sont rapportées à 25°C, les valeurs de redox sont rapportées à celle de l'électrode standard hydrogène. Les concentrations en méthane se rapportent à des mesures sur un échantillon d'eau dégazé dans un flacon de 1 litre.

Le tableau 3 présente les données mesurées, en fin de session de prélèvement de fond, pour les différents niveaux analysés, avant pompage, dans l'ouvrage de Polastron.

| Polastron | EC-25°C (μS.cm ⁻¹) | pH | Eh (mV ESH) |
|---------------------|--------------------------------|------|-------------|
| 764 m avant pompage | 1110 | 9,82 | -35 |
| 810 m avant pompage | 2220 | - | - |
| 819 m avant pompage | 2220 | 8,89 | -35 |
| 823 m avant pompage | 2220 | 8,93 | -40 |
| 828 m avant pompage | 2230 | 8,93 | -60 |

Tableau 3 : Synthèse des prélèvements de fond, à Polastron, avant pompage. Les valeurs de conductivité sont rapportées à 25°C, les valeurs de redox sont rapportées à celle de l'électrode standard hydrogène. La zone perforée s'étend de 818,5 à 828,5 m de profondeur.

Ces données peuvent être comparées à celles obtenues, in-situ, par diagraphie :

- La conductivité électrique dans la zone perforée ($2\,220\text{--}2\,230\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) est très légèrement inférieure à celle mesurée in-situ ($2\,350\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) : cet écart ne représente toutefois que moins de 1,5 % d'incertitude sur la valeur, ce qui est proche de l'erreur instrumentale et de l'incertitude de calibration. La conductivité mesurée plus haut, dans le tube plein, est également très proche entre mesure sur prélèvement de fond ($1\,110\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et mesure in-situ ($1\,100\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ;
- Le pH dans la zone perforée est proche de 8,9, valeur supérieure à celle mesurée en diagraphie (entre 8 et 8,5 suivant les horizons). Ici, une partie de l'écart peut être attribuée à la non-conservation de la température en fond de puits, lorsque les mesures sont faites avec le préleveur de fond, les mesures de pH étant rapportées à la température du fluide. Une baisse de température du fluide de l'ordre de 20°C induit une hausse de pH de 0,32 unité pour de l'eau pure (pH 7 à 25°C) et une hausse de 0,16 unité pour un tampon borate (pH de 9,18 à 25°C). Ainsi, un pH mesuré à 8,9 en surface correspondra à un pH de 8,6-8,7 en profondeur, ce qui se rapproche des valeurs mesurées en diagraphie. Un même constat peut être fait pour le pH mesuré dans le tube plein (9,8), qui est également supérieur à celui mesuré in-situ (9,3-9,4). La prise en compte de la correction de température fera diminuer le pH de 9,8 vers 9,5-9,6 ;
- Les valeurs de potentiel redox indiquent des conditions légèrement réductrices (valeur corrigée proche de -40 à -60 mV). Il n'y a pas de comparaison avec des données in-situ (paramètre non mesuré), mais l'existence de conditions réductrices dans le contexte des SIM n'est pas anormale ;
- Les valeurs de température (et d'oxygène dissous¹) ne sont pas représentatives, comme rapporté précédemment². La cinétique de remontée du fluide est trop lente, celui-ci a le temps de se rééquilibrer dans des encaissements moins chauds. La température peut également évoluer en surface (faible débit donc possible influence du forçage atmosphérique).

Les alcalinités bicarbonate mesurées sur site sont de $344\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à 828 m et de $393\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à 764 m.

2.5.2. Prélèvements après pompage

Le pompage a permis d'extraire un peu plus de $17\ \text{m}^3$ d'eau, permettant donc de renouveler la colonne d'eau jusqu'au niveau de la pompe (soit jusque vers 150 m/bride). La conductivité électrique est proche de $2\,400\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ depuis le niveau de la pompe jusqu'au niveau des perforations, la valeur maximale étant mesurée devant ces mêmes perforations ($2\,450\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), ce qui suggère que l'alimentation se fait majoritairement par ces niveaux. La présence de gaz dégazant à l'exhaure est rapportée, de même qu'une influence de ce dégazage au sommet de la colonne d'eau dans l'ouvrage (bruitage des mesures de niveau piézométrique).

Les mesures physico-chimiques obtenues aux niveaux 810, 819, 828 et 823 m sont rapportées dans le tableau 4. Les différences avec les mesures obtenues avant le pompage sont synthétisées dans la figure 12 :

¹ Données non reportées: les mesures ne sont pas faites en cellule à circulation, il y a possibilité d'interaction avec l'atmosphère, notamment lorsque les valeurs sont mesurées en fin de cycle, lorsque le bouillonnement d'azote agit fortement l'eau.

² Cf. rapport BRGM/RP-65934-FR.

- à la base de la zone perforée (828 m), les changements concernant la conductivité électrique sont imperceptibles, la valeur du potentiel redox est également peu variable. Seule une légère différence peut être constatée sur le pH (diminution de 0,2 unité après pompage) ;
- au milieu de la zone perforée (823 m) et au sommet de la zone perforée (819 m), la conductivité électrique mesurée après pompage est très légèrement supérieure, sans que l'on puisse y voir une valeur très différente de celle de la base des perforations (moins de 1 % d'écart) ou des mesures faites avant pompage (ici encore un écart à peine supérieur à 1 % relève sans doute plus de l'incertitude analytique que d'un écart significatif). La valeur du pH est par contre plus basse qu'avant pompage ;
- au-dessus de la zone perforée (810 m), le renouvellement d'eau - conséquence du pompage - n'apparaît pas fortement visible, même si la conductivité électrique est un peu plus élevée ;
- par contre, si l'alcalinité est peu différente en base d'ouvrage avant et après pompage (344 mg.L⁻¹ initialement, 351 mg.L⁻¹ après pompage), elle connaît une nette hausse au-dessus de la zone perforée à l'issue du pompage (393 mg.L⁻¹ initialement à 764 m, 478 mg.L⁻¹ après pompage à 810 m) ; toutefois les mesures ne proviennent pas des mêmes niveaux.

| Polastron | EC-25°C (μS.cm⁻¹) | pH | Eh (mV ESH) |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------|--------------------|
| 810 m après pompage | 2340 | 8,46 | +30 |
| 819 m après pompage | 2290 | 8,65 | -5 |
| 823 m après pompage | 2280 | 8,75 | -40 |
| 828 m après pompage | 2240 | 8,80 | -45 |

Tableau 4 : Synthèse des prélèvements de fond, à Polastron, après pompage. Les valeurs de conductivité sont rapportées à 25°C, les valeurs de redox sont rapportées à celle de l'électrode standard hydrogène. La zone perforée s'étend de 818,5 à 828,5 m de profondeur.

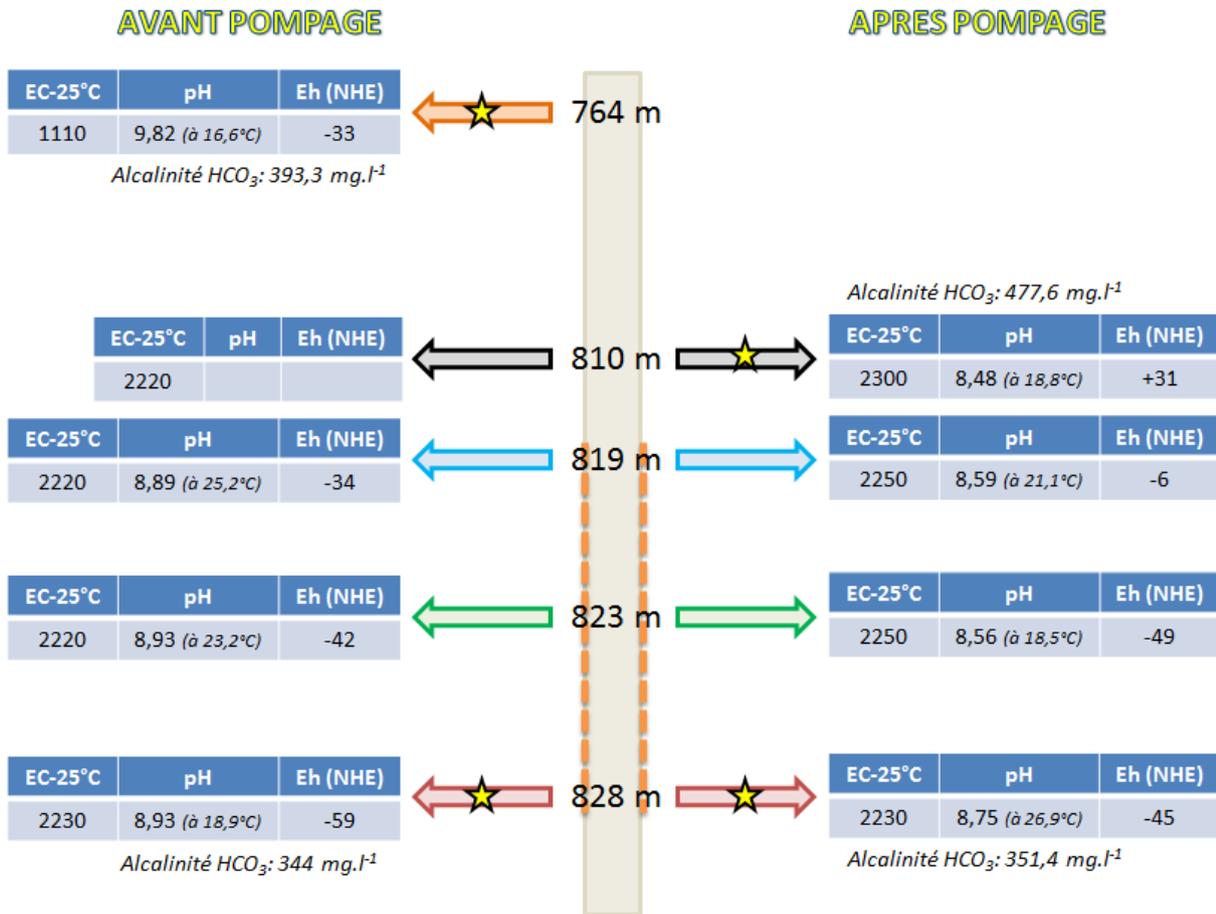


Figure 12 : Comparaison des paramètres physico-chimiques représentatifs avant et après pompage, dans le forage de Polastron.

Les étoiles indiquent les zones où les prélèvements pour analyses ultérieures ont été faits. La conductivité électrique est corrigée à 25°C, le pH est donné à la température de l'eau lors du prélèvement, le potentiel redox est corrigé des effets de température et rapporté au potentiel de l'électrode standard hydrogène.

3. Forage de Saint-André SA-1

3.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE

L'ouvrage fait l'objet d'une fiche récapitulative reportée en annexe 3. Ce forage, réalisé dans le département de la Haute-Garonne (31), en 1957 (profondeur originelle : 4 202 m), a été reconverti en piézomètre en 1975 (Roche et Grech, 1977) avec la mise en place d'un bouchon de ciment entre 1 940,5 et 1 975 m de profondeur et la perforation du tubage entre 430 et 440 m de profondeur. La colonne d'eau ne serait en principe présente qu'au-dessus de 500 m : le forage serait théoriquement en boue de 500 à 1 940,5 m.

L'inspection endoscopique par caméra vidéo conduite en octobre 2017 a mis en évidence l'existence d'une obstruction vers 339 m sous le niveau repère (bride), constitué d'un remplissage de sédiments fins. Par conséquent, la position des perforations n'a pas pu être validée, et les mesures physico-chimiques réalisées ont donc été limitées à la partie supérieure de la colonne d'eau uniquement. La désobstruction du forage nécessiterait la mise en œuvre d'un atelier de forage lourd, avec une incertitude marquée sur la durée du chantier, du fait de l'absence d'informations sur l'épaisseur du bouchon et sur sa constitution.

Dans la partie qui a pu être inspectée, les parois du tubage 9"5/8 sont globalement en bon état visuel, seule la partie émergée présente une corrosion un peu plus marquée.

Selon les données lithologiques disponibles, la base des molasses est rencontrée à 177,5 m de profondeur. Au-dessous, l'ouvrage traverse les niveaux calcaires de la formation de Mancieux (Yprésien inférieur) jusqu'à 219,5 m, puis les niveaux sablo-gréseux et calcaires de la formation de Pont-Labau (Thanétien) jusqu'à 466,5 m (intervalle contenant la section du tubage perforée). Le forage a recoupé ensuite une dizaine de mètres d'argiles paléocènes, puis les calcaires et dolomies du Danien-Sélandien (formation d'Arcet) ont été rencontrés jusqu'à 606,5 m de profondeur. La foration s'est ensuite poursuivie dans les formations du Crétacé supérieur (Maastrichtien puis Campanien).

L'espace annulaire du tubage de diamètre externe 9"5/8 ne serait cimenté qu'entre 865 m et 1 942 m (bouchon de ciment). Des communications hydrauliques sont par conséquent susceptibles de s'opérer via l'espace annulaire non cimenté dans la mesure où plusieurs niveaux aquifères ont été traversés par le forage : formation de Mancieux (Yprésien), formation de Pont-Labau (Thanétien), formation d'Arcet (Danien-Sélandien) et éventuellement les formations du Crétacé supérieur.

3.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

3.2.1. Mesures au repos

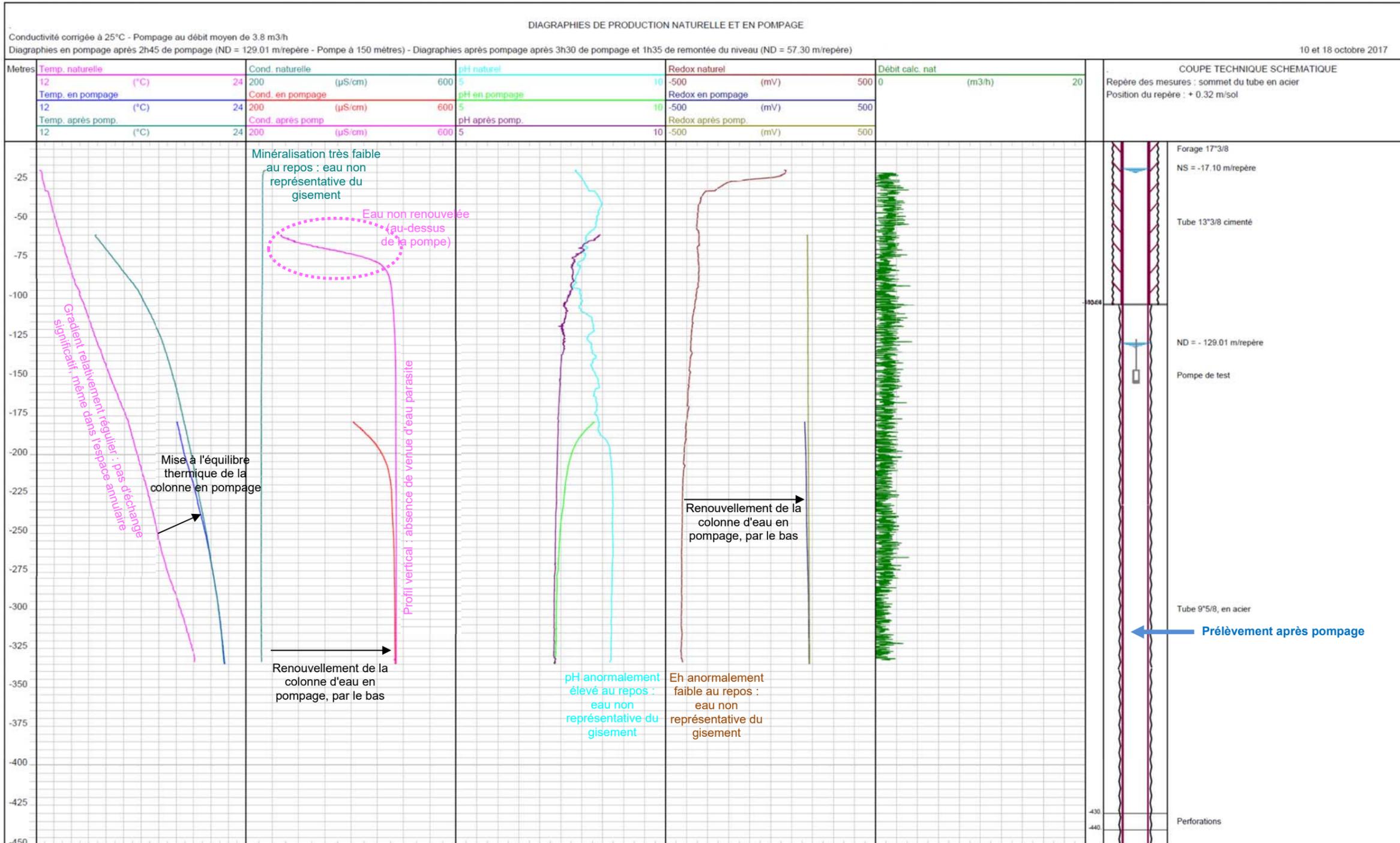
Les diagraphies ont été réalisées dans un forage au repos depuis plusieurs années.

Le profil vertical de conductivité, dans toute la colonne du tubage plein jusqu'à 339 m, démontre l'absence d'entrées d'eau parasites (figure 13). Le pH élevé, compris entre 8 et 8,8, résulte classiquement d'un contact prolongé de la colonne d'eau stagnante avec le tubage acier. Le potentiel d'oxydo-réduction Eh, significativement négatif, montre un milieu fortement réducteur. La minéralisation de cette colonne d'eau au-dessus de 339 m est faible : la conductivité mesurée est de l'ordre de 230 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C. Elle pourrait correspondre à une eau exogène utilisée par

le passé pour la mise en eau du forage, plus probablement à l'eau de l'aquifère capté appauvrie en éléments dissous du fait des interactions avec le tubage (précipitations), voire plus probablement encore un mélange entre les deux origines envisagées précédemment.



Commune : Saint André (31)
Forage : "Saint André"



Par conséquent, le constat majeur à effectuer est que l'eau présente dans le tubage plein a une physico-chimie très singulière, fortement divergente d'une eau souterraine naturelle. Ces observations sont concordantes avec l'état général observé du forage : une fois l'équilibre physico-chimique atteint, la colonne d'eau stagnante réductrice n'interagit plus avec les tubages, ce qui contribue à leur préservation.

D'autre part, le profil de température suit un gradient régulier jusqu'à 330 m, proche du gradient géothermique moyen (autour de $3,15^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$), démontrant qu'il n'existe pas non plus de flux d'échange significatif dans l'espace annulaire. Sur la base de ces constats, on peut déjà affirmer que les niveaux aquifères profonds ne sont pas contaminés par d'éventuels aquifères moins profonds ($< 339 \text{ m}$) via le forage. Sous réserve de renouveler la colonne d'eau dans le forage, un prélèvement dans des conditions proches des conditions de fond est par conséquent envisageable, dans la section du tubage plein au-dessus de 339 m.

3.2.2. Mesures en pompage et après pompage

Afin de renouveler la colonne d'eau dans le forage, une pompe immergée a été positionnée à 150 m sous le niveau-repère (bride). Le pompage a extrait un volume total de l'ordre de 32 m^3 , pour un volume intérieur théorique du forage de l'ordre de 11 m^3 entre 150 et 430 m de profondeur, auquel il faut ajouter $4,8 \text{ m}^3$ associés au rabattement de 120 m.

A l'exception du sommet de la colonne d'eau, qui n'a pas bénéficié d'un renouvellement (car correspondant à l'eau résiduelle située au-dessus de la pompe), la conductivité de la colonne d'eau est homogène autour de $480 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C (profil vertical) jusqu'au bouchon à 339 m. La colonne a été entièrement renouvelée, et aucune venue d'eau parasite n'est détectée dans le tubage plein jusqu'à cette cote. Le gradient de température diminue sensiblement, sous l'effet du réchauffement progressif de la colonne d'eau. Le bouchon correspondant à l'obstruction constatée à 339 m est par conséquent perméable.

La présence de cette obstruction à 339 m ne permet pas d'attester précisément de la cote d'origine de l'eau assurant ce renouvellement. Mais le réchauffement de l'ordre de $1,7^{\circ}\text{C}$ observé à la base des mesures démontre que la venue d'eau se situe au-delà de 400 m de profondeur. Une représentation schématique de l'état des connaissances concernant l'ouvrage est fournie en figure 14.

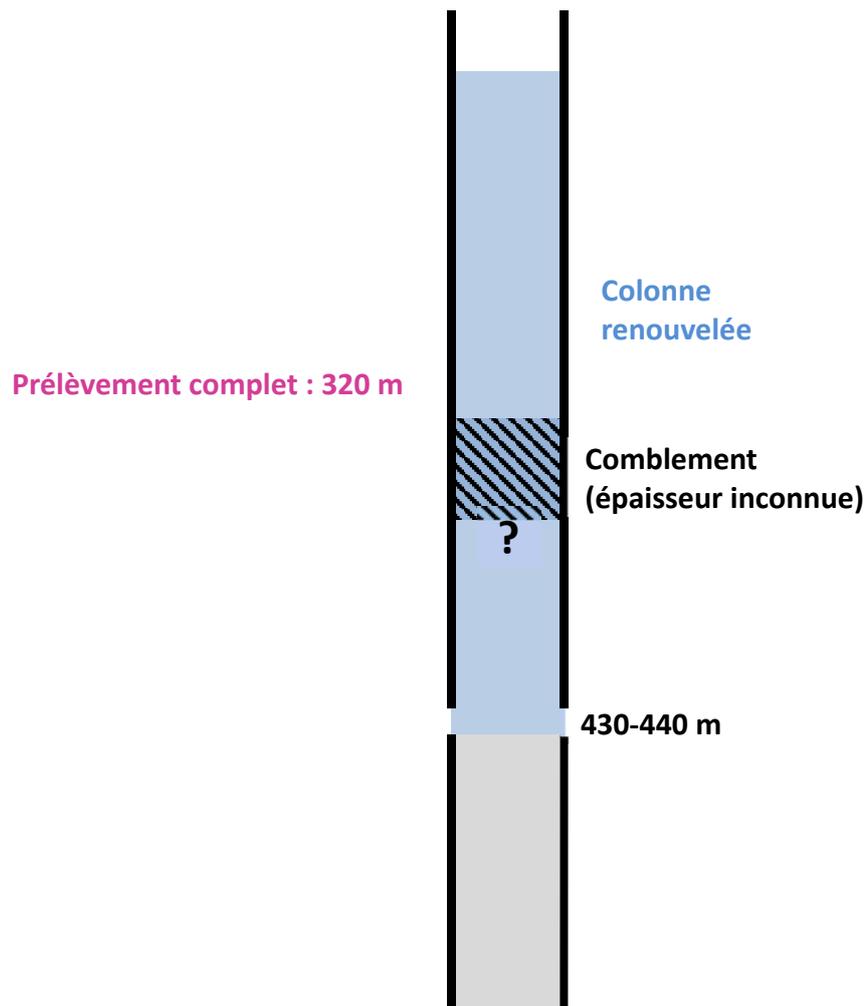


Figure 14 : Représentation schématique de la position du prélèvement, dans le forage de Saint-André.

3.3. DONNEES HYDRAULIQUES

Un premier pompage a été effectué dans le forage de Saint-André, le 16 octobre 2017, mais il n'est pas interprétable du fait d'un dysfonctionnement de la sonde de mesure de niveau.

Le forage a été ensuite pompé à un débit moyen de 4,4 m³/h (pompe positionnée à 150 m) pendant 3h30, le 17 octobre 2017. Le niveau piézométrique initial était à 17,10 m sous le niveau repère (bride). Les données du suivi piézométrique sont représentées sur la figure 15. L'amortissement de la courbe de rabattement après une heure de pompage, puis la récupération du niveau après l'arrêt du pompage, démontrent la connexion hydraulique effective à l'aquifère capté. Toutefois, la productivité du forage est extrêmement faible, car le rabattement final est de 120 m.

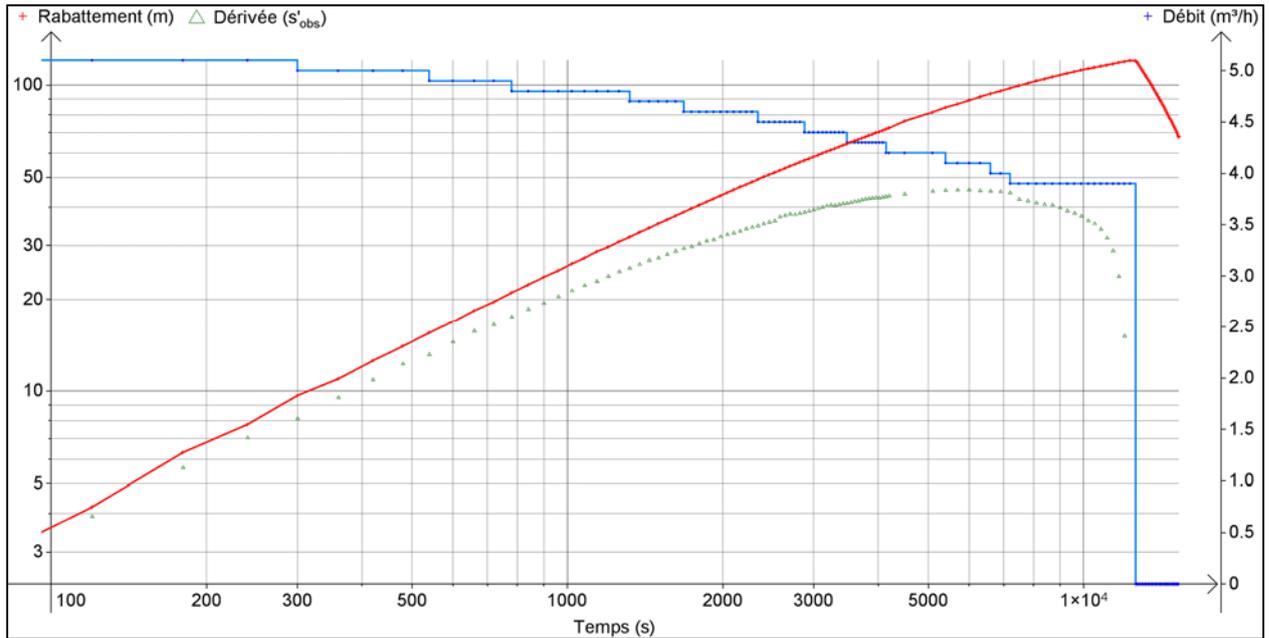


Figure 15 : Suivi piézométrique dans le forage de Saint-André, sous l'effet du pompage, et diagnostic, par le calcul, de la dérivée du rabattement.

Pour la durée observée et compte tenu du débit de pompage appliqué, l'évolution du niveau dynamique est clairement marquée par un effet de capacité lié au forage, qui ne s'atténue qu'en toute fin de pompage. A titre comparatif, le schéma-type du rabattement et de sa dérivée, dans le cas d'un forage avec effet de capacité significatif, est donné ci-dessous (figure 16). La similitude entre le début de cette courbe-type (jusqu'à la période de transition) et le rabattement observé dans le forage de Saint-André est clairement visible.

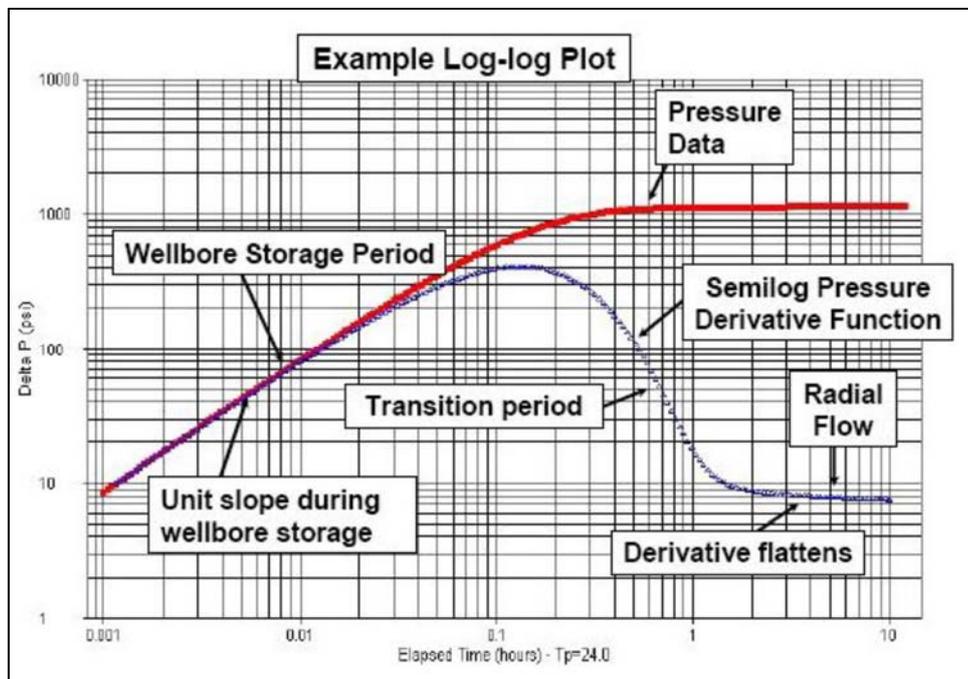


Figure 16 : Exemple-type de diagnostic de pompage pour un forage avec effet de capacité (United States Environmental Protection Agency, 2002).

Le pompage effectué, dont l'objectif était le renouvellement de la colonne d'eau et la réalisation de diagraphies, est principalement influencé par la configuration du forage. Il s'agit en premier lieu de l'effet de capacité lié au volume d'eau présent dans l'ouvrage profond. Mais d'autres effets s'y ajoutent vraisemblablement : effet de skin, lié à la mauvaise connexion avec l'aquifère (intervalle réduit des perforations) ; influence de la perméabilité du bouchon, identifié par l'obstruction constatée à 339 m ; effet de densité de la colonne, lié à la température, voire au changement de minéralisation. Le calcul de paramètres hydrodynamiques de l'aquifère capté nécessiterait un pompage bien plus long (plusieurs jours) pour s'affranchir de ces effets et fournir des données fiables.

3.4. PRELEVEMENTS

En raison de la présence de l'obstruction à 339 m, il n'a pas été possible de réaliser des prélèvements au droit de la section perforée (430-440 m). L'eau, présente depuis des années dans un tubage plein ayant de facto perdu sa représentativité, les prélèvements n'ont été réalisés qu'après le pompage, afin d'échantillonner une eau récemment renouvelée. Pour éviter d'éventuelles interactions avec le bouchon supposé sous l'obstruction, le point de prélèvement a été positionné plus haut dans la colonne, à 320 m de profondeur (figure 17).

Les paramètres physico-chimiques mesurés lors de l'échantillonnage sont reportés dans le tableau 5, à l'exception des données de température (cf. partie 2.5). On peut retenir les paramètres suivants pour l'eau prélevée : pH proche de 7,5, conductivité électrique proche de $470 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et potentiel redox légèrement positif (+50 mV environ). Comme mentionné précédemment, la température et la concentration en oxygène dissous ne sont pas représentatives. L'alcalinité exprimée en bicarbonates ressort à $287 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. A titre indicatif, les données de la dernière diagraphie (effectuée la veille) à la même profondeur ont été reportées.



Figure 17 : Vue d'ensemble du forage de Saint-André, lors des prélèvements de fond.

| Saint-André 320 m | EC-25°C ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | pH | Eh (mV ESH) | CH ₄ (%) | CO ₂ (%) |
|------------------------|---|------|-------------|---------------------|---------------------|
| Run 2 | 503 | 7,56 | +50 | 1,18 | 0,44 |
| Run 3 | 472 | 7,52 | +45 | 0,27 | 0,67 |
| Run 7 | 469 | 7,56 | +55 | - | - |
| Diagraphie du 18/10/17 | 486 | 7,34 | +185 | | |

Tableau 5 : Prélèvement à 320 m dans le forage Saint André, le 19/10/2017 ; des évaluations des émissions gazeuses (agitation d'une bouteille) ont été pratiquées durant la purge du système de prélèvement.

3.5. ETAT PIEZOMETRIQUE DU FORAGE APRES LES OPERATIONS

La figure 18 présente le suivi piézométrique, dans le forage Saint-André, de fin 2016 à fin 2018. Il apparaît que le pompage génère a posteriori un décalage du niveau piézométrique de quelques centimètres. Comme pour le forage de Polastron (cf. 2.4), un effet densitaire lié à la différence de minéralisation des colonnes avant et après pompage est certainement à incriminer.

Dans ce cas, il n'est pas possible de reconstituer la densité théorique de la colonne d'eau sur la base des diagraphies, en l'absence de données pour une partie de la colonne d'eau. Il est seulement possible d'évaluer un ordre de grandeur de cet effet densitaire : la différence de conductivité de l'ordre de $200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ entre les deux états correspond à une concentration équivalente de NaCl autour de 130 mg/L, soit une différence de densité de l'ordre de $1,3 \times 10^{-4}$. Appliquée à une colonne d'eau haute de 413 m, cela correspond à une hauteur d'eau équivalente de l'ordre de 5 cm, concordante avec les ordres de grandeur des observations.



Figure 18 : Evolution piézométrique du forage de Saint-André, depuis 2016 (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/>).

4. Forage de Lacquy LC-101

4.1. COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DU FORAGE

L'ouvrage fait l'objet d'une fiche récapitulative reportée en annexe 4. Ce forage, réalisé dans le département des Landes (40), en 1972 (profondeur originelle : 4 002 m), a été reconverti en piézomètre vers 1973-1974, avec la mise en place d'un bouchon de ciment à une profondeur théorique de 1 230 m (profondeur théorique du sommet du bouchon) et la perforation du tubage entre 435 et 445 m de profondeur.

Lors des investigations menées en octobre 2017, les premières observations ont indiqué que le sommet de la colonne d'eau et les parois du tubage étaient couverts d'huile. Ceci a empêché toute investigation complémentaire au repos (sans pompage) : pas de visibilité à la caméra, et risque de contamination de la sonde de géochimie. Un pompage a par conséquent été opéré pour tenter d'écrémer le maximum d'hydrocarbures. 4 m³ d'eau souillée ont été extraits et évacués vers un centre spécialisé, avec un éclaircissement progressif notable lors du pompage.

Selon les données lithologiques disponibles, l'ouvrage traverse les Sables de Lussagnet et les grès à Nummulites (Yprésien) entre 425 et 494 m (intervalle contenant la section du tubage perforée), puis le calcaire micritique de la formation de Roquefort (Maastrichtien / Crétacé supérieur). Ce forage a été poursuivi au-delà dans les formations du Crétacé et du Jurassique (étage du Kimméridgien supérieur relevé sur la coupe géologique).

Le tubage de diamètre externe 13''3/8 ne serait cimenté qu'en dessous de 710 m de profondeur. Des communications hydrauliques sont par conséquent susceptibles de s'opérer via l'espace annulaire ; dans la mesure où plusieurs niveaux aquifères ont été traversés par le forage, dont notamment les niveaux du Crétacé supérieur. Une fuite via le bouchon de ciment et/ou par les espaces annulaires mal ou non cimentés pourraient expliquer la présence d'hydrocarbures surnageant à la surface de l'eau dans le forage.

4.2. INDICATIONS DES DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

Le constat de présence d'huile surnageante et les incertitudes sur l'intégrité de l'ouvrage génèrent un fort risque de souillure de la sonde multiparamètres (utilisée en captages d'eau) et d'endommagement de certains de ses capteurs (notamment pH, O₂ dissous et Eh). Ce risque étant trop important, le contenu des investigations a été modifié : le profil physico-chimique a été effectué avec une sonde conductivité-température, plus robuste. Cette modification a nécessité un temps de préparation et de coordination, ce qui a conduit à effectuer l'opération plus tardivement que prévu, le 20 décembre 2017, soit 2 mois après le pompage (figure 19).

La colonne d'eau présente une conductivité de l'ordre de 1 200 µS.cm⁻¹ à 25°C dans sa partie supérieure, au-dessus de 300 m, non renouvelée par le pompage. Un pic moins minéralisé est visible autour des perforations, avec une conductivité minimale de 1 110 µS.cm⁻¹ à 25°C ; il représente la portion de la colonne renouvelée lors des pompages, mais dont la limite n'est pas marquée par une stratification nette du fait des phénomènes de diffusion qui ont pu « lisser » l'interface entre les 2 eaux durant les deux mois séparant les opérations.

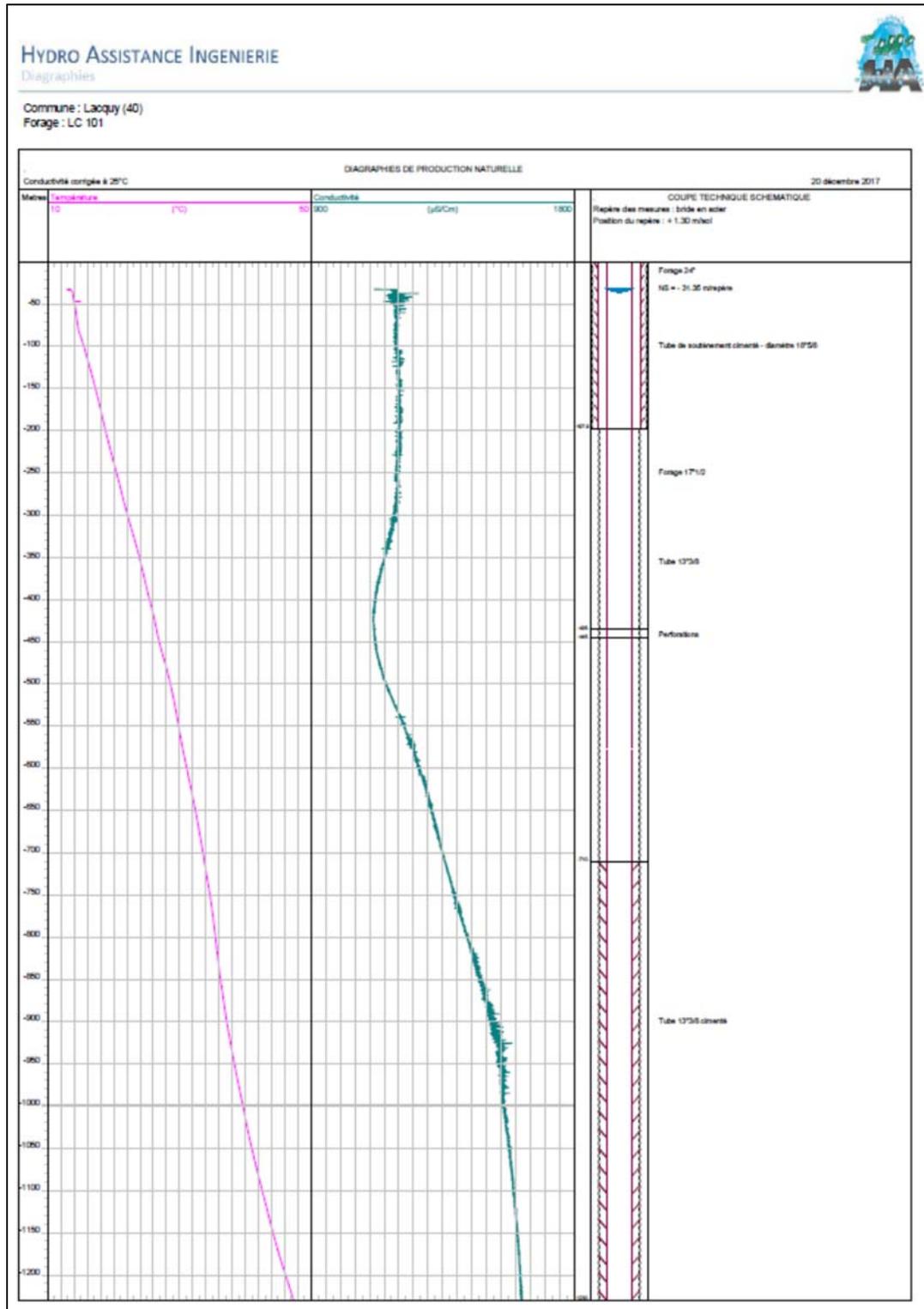


Figure 19 : Diagraphies de conductivité-température, dans le forage de Lacquy, après pompage.

Aucune anomalie pouvant suggérer une venue d'eau parasite n'a été identifiée dans le reste de la colonne.

Au-dessous des perforations, la conductivité mesurée augmente avec la profondeur. Elle se stabilise sensiblement au-dessous de 920 m, autour de $1\ 600\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C .

4.3. DONNEES HYDRAULIQUES

Au total 4 m³ ont été extraits du forage les 19 et 20 octobre 2017, ce qui équivaut à une colonne d'eau d'une hauteur de 50 m environ dans le forage. Du fait de l'état de l'ouvrage et de la configuration du pompage, la mise en place d'un suivi piézométrique n'était pas pertinente.

Un retour à l'équilibre du niveau piézométrique a été observé dans les heures et jours suivants l'opération de pompage, ce qui atteste de la connexion hydraulique effective à des niveaux aquifères.

4.4. PRELEVEMENTS

4.4.1. Spécificités de l'ouvrage de Lacquy

Comme rapporté ci-avant, les investigations préalables aux prélèvements de fond dans l'ouvrage de Lacquy sont très réduites et se bornent pour l'essentiel à un pompage d'écumage. Compte tenu de la géométrie de l'ouvrage, un volume de 4 m³ correspond à peu près à 50 m de colonne d'eau (cf. partie 0). Les perforations étant situées entre 435 et 445 m de profondeur, il est donc envisageable d'échantillonner un fluide renouvelé en dessous de 400 m de profondeur. Aucune donnée endoscopique n'étant disponible, la présence d'obstacle ou bouchon dans l'ouvrage ne peut pas être déterminée. Seule la remontée du niveau statique après le pompage, assez rapide, suggère qu'une communication entre la zone perforée et le sommet de la colonne d'eau existe.

Le mode opératoire a donc consisté à réaliser une descente du préleveur de fond à l'aveugle. Les prélèvements sont pratiqués à la descente, d'abord au-dessus des perforations (425 m), puis à intervalles réguliers dans les perforations (435, 440 et 445 m). Un ultime prélèvement a ensuite été réalisé plus haut dans la colonne d'eau (350 m), pour échantillonner l'eau ayant stagné dans le tubage plein. Le pompage d'écumage n'a toutefois pas réussi à entièrement supprimer les hydrocarbures, ainsi que l'atteste le surnageant remonté lors d'une mesure du niveau piézométrique (figure 20).



Figure 20 : Etat de la sonde piézométrique le 24/10/2017, lors d'une mesure de niveau, dans le forage de Lacquy.

4.4.2. Mode opératoire

L'extrémité lestée du monotube a été protégée par un fin voile de tissu, afin de limiter la pénétration de particules grossières ou de matières visqueuses dans le système. Le passage des premiers mètres de la colonne d'eau, les plus susceptibles de contenir un surnageant de type hydrocarbure, a été effectué rapidement, afin de créer un mouvement dans la colonne d'eau de nature à chasser le surnageant. Lors de la descente, des tests de remontée du système sur quelques mètres ont été opérés périodiquement, afin de vérifier la tension du tuyau pour détecter un éventuel blocage (par ex. sur un bouchon). Rien de tel n'a été ressenti lors de la descente du préleveur. En conséquence, il est très vraisemblable que les longueurs de tuyau descendues dans l'ouvrage correspondent aux profondeurs réellement atteintes.

Une confirmation a été apportée par les volumes d'eau remontés lors des prélèvements : compte tenu de la géométrie du système (longueur de bitube déployée dans l'eau), le volume maximum d'eau pouvant être remonté, hors pertes de charge, depuis 440 m est proche de 5,6 litres. Il est de 3,3 litres à 350 m. Lors des prélèvements, un volume compris entre 2,5 et 3 litres a été remonté à chaque fonctionnement du préleveur à 350 m. Ce volume passe entre 4,5 et 5 litres entre 425 et 445 m. Ceci ne constitue pas une preuve irréfutable, mais renforce l'idée que les profondeurs mentionnées ont bien été atteintes.

Les eaux remontées lors des différents échantillonnages présentent des caractéristiques variables. Les premières eaux extraites suite à la mise en place du préleveur correspondent aux eaux présentes en sommet de colonne. Elles sont claires (figure 21), avec des traces d'irisations au début de l'écoulement, passant à l'expression d'un surnageant huileux en fin de remontée d'eau. Cette même eau claire sera échantillonnée lors de la dernière utilisation du préleveur à 350 m de profondeur.



Figure 21 : Première remontée d'eau avec préleveur disposé à 425 m dans le forage de Lacquy : purge de l'eau collectée lors de la descente du système.

Au contraire, les horizons profonds sont caractérisés par une eau beaucoup plus turbide (figure 22). L'eau est brunâtre, présente des fréquentes irisations en surface, manifeste aussi une tendance au dégazage. La présence de ce composant "hydrocarbure" est retrouvée dans tout le système, comme l'illustre la bulle formée à l'extrémité d'une vanne sur le système de mise en pression du préleveur de fond (figure 22 en bas à droite). La conséquence directe de cette turbidité est une grande difficulté à filtrer les échantillons, amenant à utiliser un système de filtration sous pression d'azote (figure 23). Environ 200 mL d'eau peuvent alors être traités avec un filtre, alors que la filtration à la seringue ne permet guère de dépasser 30 mL.

Enfin, lors de la remontée du préleveur, il a été observé qu'un coulis huileux était plaqué le long du tuyau, indiquant qu'un surnageant est toujours présent dans l'ouvrage (figure 24).

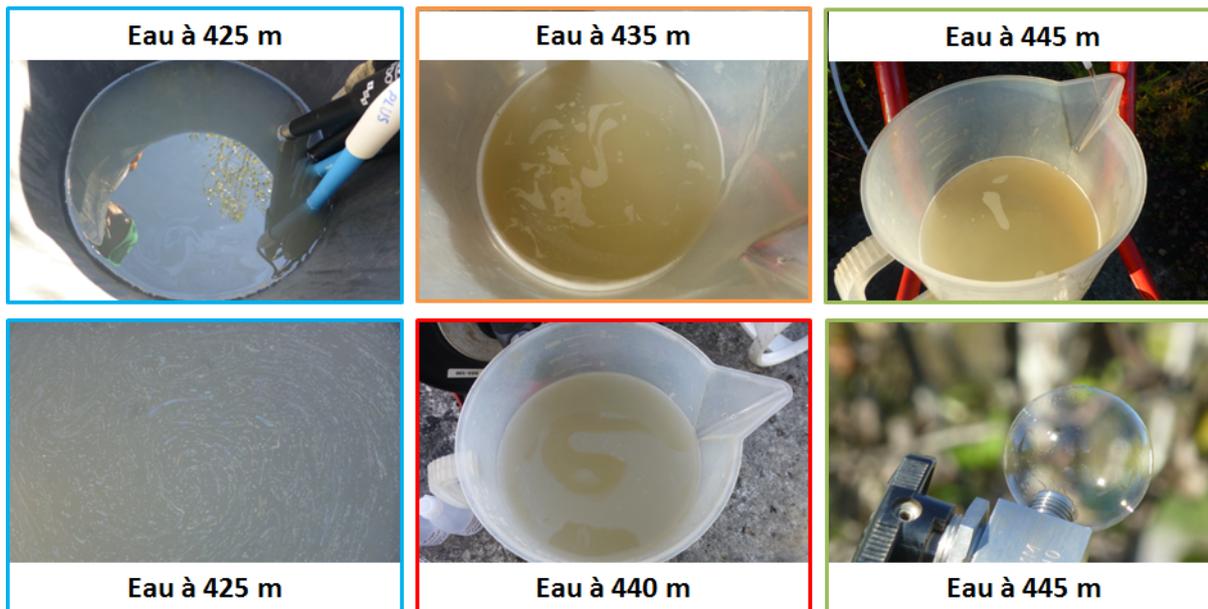


Figure 22 : Etat de l'eau à différentes profondeurs, dans le forage de Lacquy.



Figure 23 : Remontée d'eau avec préleveur disposé à 425 m, dans le forage de Lacquy, et état du filtre après utilisation.



Figure 24 : Etat du bitube (à gauche) et de la tête de forage (à droite) à l'issue de la remontée du préleveur de fon, dans le forage de Lacquy.

4.4.3. Paramètres physico-chimiques

Les différents paramètres physico-chimiques, mesurés lors des purges et lors des échantillonnages, sont reportés dans le tableau 6. Une représentation synthétique de la variabilité des paramètres physico-chimiques dans la colonne d'eau est donnée figure 25. De même que pour les prélèvements effectués aux forages de Polastron et de Saint-André, les valeurs de température ne sont toutefois pas portées dans le tableau. Celles-ci étant effectuées en surface, elles ne sont pas représentatives de la température en fond de puits.

La partie non purgée de la colonne d'eau (prélèvement à 350 m) apparaît comme plus conductrice et en état légèrement plus réduit. Le pH est élevé, mais il l'est également plus en profondeur (valeur proche de 9). La valeur des bicarbonates semble très basse.

Les niveaux ayant été - potentiellement - affectés par le pompage présentent un gradient de conductivité électrique ; il n'est pas trouvé de valeur d'équilibre dans la colonne d'eau, ce qui peut laisser supposer que l'alimentation n'est pas homogène dans l'ouvrage, ou que seul un niveau producteur peu conducteur, proche de 435 m, a été sollicité³. Le niveau de base (445 m) ne semble pas être un contributeur important (pH plus élevé, conductivité un peu plus élevée) ; les paramètres suivis, comme l'alcalinité, semblent le rapprocher de l'eau qui est présente dans le tubage plein⁴.

³ Ou encore que la durée de pompage et le volume pompé sont trop faibles pour avoir permis d'homogénéiser le fluide dans la partie perforée de l'ouvrage.

⁴ Une grosse différence dans la turbidité de l'eau entre ces 2 horizons est toutefois à mentionner.

| Lacquy | EC-25°C ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | pH | Eh (mV ESH) | CH ₄ (%)* |
|--------|-----------------------------------|------|-------------|----------------------|
| 350 m | 1163 | 9,30 | -155 | 0,19 |
| 425 m | 945 | 8,98 | -130 | 0,32 |
| 435 m | 970 | 9,04 | -130 | 0,48 |
| 440 m | 991 | 9,08 | -130 | 0,36 |
| 445 m | 1019 | 9,26 | -120 | 0,32 |

Tableau 6 : Synthèse des prélèvements de fond à Lacquy ; * : les données sur le méthane peuvent avoir été collectées durant la phase de purge et ne sont pas nécessairement acquises lors des deux derniers runs (qui sont conditionnés pour analyses ultérieures au laboratoire).

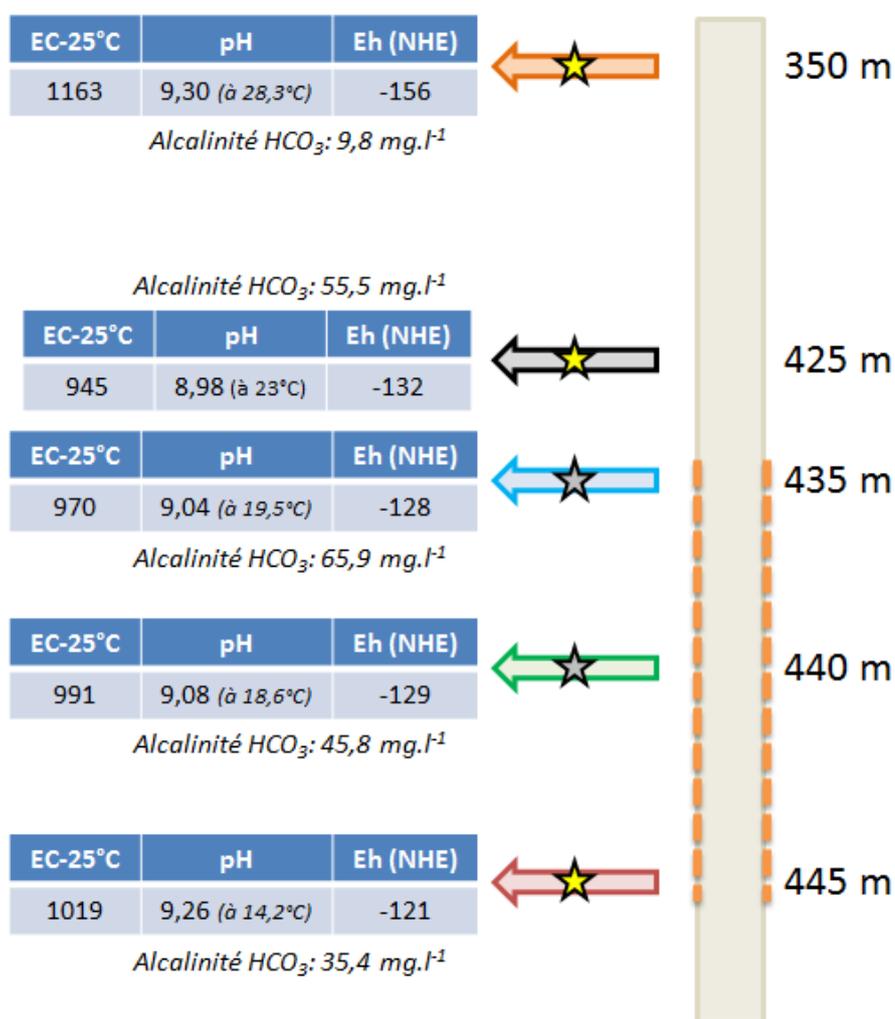


Figure 25 : Comparaison des paramètres physico-chimiques le long de la colonne d'eau, dans le forage de Lacquy.

Les étoiles indiquent les zones où les prélèvements ont été faits (en jaune : prélèvements complets ; en gris : uniquement cations/anions/traces). La conductivité électrique est corrigée à 25°C, le pH est donné à la température de l'eau lors du prélèvement, le potentiel redox est corrigé des effets de température et rapporté au potentiel de l'électrode standard hydrogène.

4.5. ETAT PIEZOMETRIQUE DU FORAGE APRES LES OPERATIONS

La figure 26 présente le suivi piézométrique du forage de Lacquy, de 2016 à fin 2018. Dans les quelques jours suivant la remise en place du capteur (le 24 octobre 2017), le rééquilibrage du niveau est encore observable.

Ensuite, aucun décalage significatif du niveau piézométrique n'est visible consécutivement au pompage effectué. Il est vrai que le protocole a dû être modifié pour ce forage, du fait de la présence d'huile au sommet de la colonne d'eau : la colonne d'eau n'a été renouvelée que sur une hauteur réduite, ce qui restreint d'autant les éventuelles influences liées aux modifications de densité.



Figure 26 : Suivi piézométrique du forage de Lacquy, de 2016 à 2018 (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/>)

5. Forage de Muret 104

5.1. COUPE TECHNIQUE DU FORAGE

Le forage pétrolier de Muret 104 (10098A0004), d'une profondeur initiale de 1 410 m, a été reconverti en piézomètre en 1965 : des perforations des tubes pleins ont été effectuées entre 1 031,6 et 1 040 m de profondeur (figure 27), et un bouchon de ciment a été mis en place entre 1 043 (voire 1 047 m d'après l'observation effectuée ultérieurement aux travaux de cimentation) et 1 100 m (Vandenberghe A., 1966).

Cet ouvrage avait fait l'objet d'investigations dans le cadre du projet CARISMEAU, à la fin des années 2000 (Négrel et al., 2008a - l'ouvrage ayant été désigné par le code SIM8 dans le cadre de cette étude). Les prélèvements n'avaient alors été effectués qu'à 250 m de profondeur, les diagraphies n'explorant que les 140 premiers mètres de la colonne d'eau. De nouvelles investigations ont été faites en mai 2014 : des prélèvements de fond ont été pratiqués aux profondeurs de 250, 500, 750 et 1 035 m. Il s'agissait alors de tester l'opérationnalité de l'outil de prélèvement de fond en grande profondeur, mais aussi de déterminer dans quelle mesure des eaux prélevées dans un tube métallique plein à différentes profondeurs pouvaient avoir - ou non - une relative représentativité (par rapport à des eaux prélevées en face des perforations).

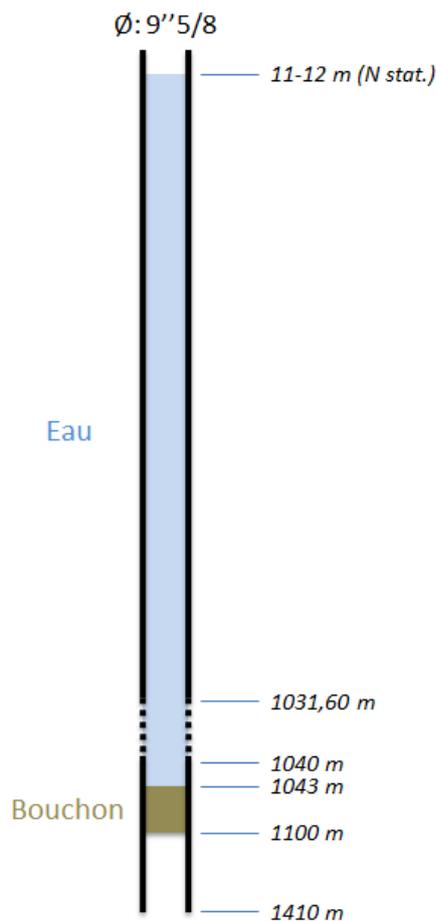


Figure 27 : Coupe schématique du forage Muret 104.

5.2. PRELEVEMENTS

Les paramètres physico-chimiques mesurés lors des différents prélèvements sont synthétisés dans le tableau 7, à l'exception de la température (cf. partie 2.5). Même si le protocole opératoire pour des prélèvements en grande profondeur n'était pas encore totalement abouti⁵, la lecture du tableau permet de confirmer que le prélèvement d'eau, à des profondeurs notoirement différentes de celles où l'eau est en capacité de circuler à travers les perforations du tubage, n'a pas de représentativité physico-chimique, et par conséquent chimique. La conductivité électrique est plus basse dans le tubage plein, le pH y est plus élevé, et la concentration en bicarbonates y est plus forte.

| Muret 104 | Nb. Litres purgés | EC-25°C (µS.cm ⁻¹) | pH | Eh (mV ESH) | Alcalinité (mg.L ⁻¹ HCO ₃) |
|--------------------------|-------------------|--------------------------------|------|-------------|---|
| 250 m (N ₂) | 8,5 | 4130 | 9,97 | -80 | 120,1 |
| 500 m (N ₂) | 8 | 4130 | 9,79 | 0 | 92,1 |
| 750 m (N ₂) | 12,5 | 4180 | 9,64 | 0 | 67,1 |
| 1035 m (N ₂) | 16 | 4270 | 9,19 | -10 | 48,8 |
| 1035 m (He) | 20 | 4380 | 8,83 | +20 | 49,4 |

Tableau 7 : Synthèse des prélèvements de fond à Muret 104.

Des analyses chimiques (éléments majeurs et traces) ont également été opérées dans ces prélèvements étagés en profondeur. Comme les tableau 8 et tableau 9 le démontrent, il existe une forte variabilité de la composition chimique selon que l'on se situe en sommet de colonne d'eau ou à la base, au niveau des perforations (1 035 m). Ceci est surtout vrai pour certains éléments majeurs : perte de Ca, Mg et SO₄, d'autant plus importante que l'on se rapproche de la surface, ce qui suggère une perte de minéralisation par précipitation ; Sr, Mn et Ba suivent également cette règle. A contrario, on observe une hausse de la concentration en bicarbonates et en Al. Les deux prélèvements opérés à 1 035 m peuvent présenter une variabilité pour certains éléments (Ca, F, Mg, SO₄, Sr), le second prélèvement étant systématiquement plus minéralisé.

Ceci traduit simplement un renouvellement plus important de l'eau à 1 035 m lorsque l'on augmente la quantité d'eau prélevée (pour rappel, ce forage n'a pas fait l'objet d'un pompage préalable). Une stimulation par pompage aurait probablement permis de prélever une eau encore un peu plus minéralisée.

⁵ Il sera vu ultérieurement que du gaz-vecteur peut contaminer les prélèvements réalisés pour évaluer les concentrations en gaz dissous (cf. 6.2.2).

| (mg.L ⁻¹) | Ca | Cl | F | Fe | HCO ₃ (labo) | HCO ₃ (terrain) | K | Mg | NH ₄ | Na | SO ₄ | SiO ₂ |
|-------------------------------|------|-------|------|-------|----------------------------|-------------------------------|------|------|-----------------|-------|-----------------|------------------|
| 250 m | 4.8 | 557.6 | 22.9 | <0.02 | 122 | 120.1 | 15.5 | 1.8 | 1.23 | 881.8 | 992.2 | < 0.5 |
| 500 m | 9.3 | 561.9 | 22.7 | <0.02 | 97 | 92.1 | 15.5 | 3.3 | 1.36 | 884.9 | 1043.0 | < 0.5 |
| 750 m | 15.3 | 561.0 | 21.8 | <0.02 | 74 | 67.1 | 15.4 | 5.3 | 0.74 | 895.6 | 1098.2 | < 0.5 |
| 1035 m (N₂) | 27.4 | 556.0 | 18.0 | <0.02 | 52 | 48.8 | 15.7 | 10.0 | 0.93 | 907.1 | 1154.7 | 0.8 |
| 1035 m (He) | 45.6 | 566.0 | 14.3 | <0.02 | 52 | 49.4 | 15.8 | 17.7 | 0.76 | 917.9 | 1277.4 | 1.3 |

Tableau 8 : Prélèvements de fond à Muret 104 - influence de la profondeur de prélèvement sur les résultats d'analyses chimiques - éléments majeurs (mg.L⁻¹).

| (µg.L ⁻¹) | Ag | Al | As | B | Ba | Be | Cd | Co |
|-------------------------------|--------|------|------|------|------|--------|--------|-------|
| 250 m | < 0.01 | 4.47 | 4.45 | 2415 | 14.3 | < 0.01 | 0.01 | <0.05 |
| 500 m | < 0.01 | 4.10 | 6.36 | 2323 | 18.2 | < 0.01 | 0.02 | <0.05 |
| 750 m | < 0.01 | 5.72 | 7.56 | 2317 | 19.3 | < 0.01 | 0.04 | <0.05 |
| 1035 m (N₂) | < 0.01 | 2.67 | 6.41 | 2385 | 23.3 | < 0.01 | 0.04 | <0.05 |
| 1035 m (He) | < 0.01 | 2.67 | 4.48 | 2292 | 23.2 | < 0.01 | < 0.01 | <0.05 |

| (µg.L ⁻¹) | Cr | Cu | Li | Mn | Ni | Pb | Sr | Zn |
|-------------------------------|------|------|-----|------|------|-------|------|------|
| 250 m | <0.1 | <0.1 | 226 | 1.49 | <0.1 | <0.05 | 2295 | 0.69 |
| 500 m | <0.1 | <0.1 | 238 | 2.14 | <0.1 | <0.05 | 2505 | 0.67 |
| 750 m | <0.1 | 0.13 | 235 | 2.92 | 0.12 | <0.05 | 2835 | 0.88 |
| 1035 m (N₂) | <0.1 | 0.11 | 232 | 30.7 | 0.23 | <0.05 | 3197 | 0.62 |
| 1035 m (He) | <0.1 | <0.1 | 234 | 117 | 0.37 | <0.05 | 3707 | 0.78 |

Tableau 9 : Prélèvements de fond à Muret 104 - influence de la profondeur de prélèvement sur les résultats d'analyses chimiques - éléments traces (µg.L⁻¹).
En haut : argent à cobalt ; en bas : chrome à zinc

6. Chimie des gaz dissous

Ce chapitre présente les analyses de la phase gazeuse faites sur les prélèvements opérés lors des investigations sur site.

6.1. METHODOLOGIE

Les prélèvements pour quantification des espèces gazeuses dissoutes ont été conditionnés en ampoules en verre préalablement mises sous vide, afin de libérer les gaz avant de procéder à une analyse par chromatographie en phase gazeuse. Les données sont donc exprimées initialement en pourcentage d'espèce gazeuse (tableau 10). Les concentrations en espèces gazeuses dissoutes sont ensuite calculées en utilisant la loi de Henry (tableau 11).

6.2. DONNEES EXPRIMEES EN POURCENTAGE DE PHASE GAZEUSE

6.2.1. Forages de Polastron, Saint-André, Lacquy

Des indicateurs de qualité sont à considérer pour les prélèvements de gaz dissous, puisque l'on utilise un gaz vecteur (N_2) qui peut aussi être présent naturellement dans le milieu (mais qui peut être apporté par ce gaz vecteur, notamment en fin de séquence de remontée de fluide), et que l'on réalise des opérations de transfert, sur site, dans des ampoules en verre sous vide (qui elles-mêmes peuvent plus ou moins bien conserver le gaz).

Un premier indicateur est la pression en gaz dans l'ampoule (tableau 10). Si celle-ci est très forte, proche de la pression atmosphérique, ce qui est le cas pour les prélèvements de Saint-André (320 m) et de Lacquy (435 m), deux hypothèses peuvent être invoquées. La première explication est qu'il s'agit d'une réalité, auquel cas il est fort probable que l'eau dégaze de manière importante une fois qu'elle est mise à pression atmosphérique - ce phénomène aurait dû être observé pour lesdits forages, ce qui n'est pas le cas. La seconde explication, très vraisemblable dans les deux cas considérés, est une contamination par de l'air atmosphérique, soit lors du prélèvement lui-même (peu vraisemblable, celui-ci étant opéré sous l'eau), soit résultant d'une mauvaise conservation de l'échantillon dans l'ampoule (défaut d'étanchéité du robinet à graisse par exemple). Une confirmation de cette contamination atmosphérique vient de la lecture du « pourcentage de contamination » (tableau 10) : il est supérieur à 90 % dans les deux cas, avec un rapport N_2/O_2 qui est très proche de celui de l'air atmosphérique (3,7). On se gardera donc de toute interprétation des mesures de Saint-André (320 m) et de Lacquy (435 m).

Dans une moindre mesure, le prélèvement de Lacquy (425 m) semble également contaminé par de l'air atmosphérique (N_2/O_2 assez peu différent de celui de l'atmosphère). Le calcul du « pourcentage de contamination » se base sur une procédure de correction d'air atmosphérique, qui suppose l'absence totale d'oxygène dans le prélèvement. Pour ce prélèvement Lacquy (425 m), le taux de contamination calculé est de 68 % ($21\% \times 0,68 = 14,28\%$ ⁶). Or, la présence de 68 % d'air dans l'ampoule devrait se traduire par une pression de gaz du même ordre de grandeur (soit environ 680 mbar), ce qui est loin d'être le cas (318 mbar). Une contamination par le gaz vecteur n'est pas réaliste (pureté de 99,999 %, traces d'oxygène inférieures à 2 ppm). Il semble

⁶ Concentration en O_2 dans l'atmosphère.

⁷ Concentration en O_2 dans l'ampoule.

donc qu'il y ait présence résiduelle d'oxygène dans le gaz libéré. Un même constat s'applique au prélèvement de Polastron (828 m), après pompage.

Lorsque les pressions dans l'échantillon sont basses (on sait que les forages ne dégazent pas spontanément au repos⁸) et que le rapport N₂/O₂ diffère nettement de celui de l'atmosphère, les prélèvements peuvent être regardés avec un degré de confiance plus élevé.

En prenant en compte les remarques précédentes, il semble possible de dresser le schéma suivant pour les cortèges gazeux dans les différents ouvrages :

- l'espèce majoritaire est l'azote (environ 90 % en volume du gaz libéré lors de la mise sous vide) ;
- une présence généralisée de CH₄, à des concentrations largement inférieures au pourcent à Polastron et Lacquy, mais pouvant être de quelques pourcents à Saint-André. Des alcanes supérieurs (C₂, C₃) sont aussi détectés dans les eaux de Polastron, les concentrations semblent supérieures dans le tube plein et inférieures dans la zone perforée (ces gaz ne sont plus détectés après renouvellement de l'eau par pompage). Ceci pourrait traduire une faible productivité en alcanes dans l'aquifère avec accumulation dans le tube plein sur le long terme, ou suggérer que ces alcanes ne sont pas originaires de l'horizon capté, mais issus d'une lente migration de ces gaz le long de l'extrados du forage, puis d'une migration dans le tube à la faveur des perforations. Notons également que la présence de CH₄ dans les aquifères de bassins sédimentaires est un phénomène qui est loin d'être rare, associé ou non à l'existence de ressources en hydrocarbures ou en charbon, les quantités pouvant cependant être supérieures en présence de ce type de ressources. Pour de plus amples informations, on pourra se référer aux travaux de Marty *et al.* (1988), Grossman *et al.* (1989), Vető *et al.* (2004), Darling et Gooddy (2006), Prinzhofer *et al.* (2009), Moya *et al.* (2016), Bell *et al.* (2017), Currell *et al.* (2017) ou encore Schloemer *et al.* (2018) ;
- une présence de CO₂, variable selon l'ouvrage, allant d'une quasi-absence à Lacquy à des teneurs plus importantes à Saint-André (quelques pourcents) ; Polastron présentant une concentration un peu supérieure à celle du CO₂ dans l'atmosphère. Pour ce dernier ouvrage, il semblerait que le CO₂ soit en abondance plus faible dans le tube plein que dans l'horizon perforé (perte par carbonatation ?), et en abondance plus faible avant pompage qu'après pompage (idem phénomènes de précipitation ?) ;
- une présence d'hélium lorsque les prélèvements sont faits au droit des perforations, et qu'ils ne sont pas trop contaminés par de l'air atmosphérique. L'abondance est de quelques centaines de ppm ; l'existence d'hélium en concentrations notables dans les grands bassins sédimentaires étant un phénomène rapporté de longue date, en lien avec les phénomènes de décroissance radioactive de l'uranium dans les formations crustales et la migration subséquente de l'hélium pour ultimement dégazer dans l'atmosphère. Les références suivantes pourront être consultées à ce sujet : Torgersen et Clarke (1985), Torgersen et Ivey (1985), Marty *et al.* (1993), Lehmann *et al.* (1996), Pinti et Marty (1998), Bethke *et al.* (1999), Kulongoski *et al.* (2003), Fourré *et al.* (2011), Aggarwal *et al.* (2014). Pour Polastron, on constatera que l'hélium est mesuré en concentration plus importante lorsque le forage a été stimulé (des pertes par diffusion pourraient exister au repos, d'autant que l'hélium n'est pas très soluble). Ceci pourrait aussi suggérer qu'il existe une alimentation active au niveau des perforations, mais pas de mouvements verticaux sur plusieurs dizaines de mètres dans le tube plein.

⁸ Cela n'interdit pas que l'eau puisse dégazer lorsqu'elle est soumise à agitation.

| | Polastron 764 m avant pompage | Polastron 828 m avant pompage | Polastron 828 m après pompage | Saint- André 320 m | Lacquy 425 m | Lacquy 435 m | Lacquy 445 m |
|-------------------------------------|--|--|--|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CO₂ | 0,076 (0,10) | 0,25 (0,37) | 0,41 (1,41) | 0,43 (4,72) | 0,036 (0,03) | 0,007 (0,02) | 0,018 |
| Ar | 0,49 (0,22) | 0,60 (0,41) | 0,59 (0) | 0,91 (0,65) | 0,85 (0,67) | 0,91 (0) | 0,0033 |
| O₂ | 7,85 (0) | 7,56 (0) | 15,3 (0) | 19,2 (0) | 14,2 (0) | 19,1 (0) | 0,35 |
| N₂ | 89,3 (96) | 89,8 (96,4) | 81,6 (91,1) | 78,6 (84,3) | 82,2 (90,8) | 77,8 (74,9) | 98 |
| He | <0,005 | 0,027 (0,042) | 0,045 (0,166) | <0,005 | 0,012 (0,035) | <0,005 | 0,023 |
| H₂ | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| H₂S | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| CH₄ | 1,35 (2,16) | 0,32 (0,50) | 0,022 (0,08) | 0,28 (3,36) | 0,35 (1,09) | 0,029 (0,33) | 0,11 |
| C₂H₆ | 0,0042 (0,007) | 0,0021 (0,003) | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| C₃H₈ | 0,0009 (0,0014) | 0,0004 (0,0006) | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| ∑C₄H₁₀ | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 | <0,0004 |
| C₅H₁₂ | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| C₆H₁₄ | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| somme | 99,1 (98,5) | 98,6 (97,7) | 98,0 (92,4) | 99,5 (93) | 97,7 (92,6) | 97,9 (75,5) | 98,5 |
| N₂/O₂ | 11,4 | 11,9 | 5,3 | 4,09 | 5,8 | 4,1 | 283 |
| Pression (mbar) | 96 | 168 | 82 | 1143 | 318 | 970 | 150 |
| % contamination | 37% | 36% | 73% | 92% | 68% | 91% | - |

Tableau 10 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en pourcentage de la phase gaz exsolvée lors de la mise sous vide du prélèvement. Le gaz vecteur est l'azote. Les valeurs entre parenthèses intègrent une correction de contamination atmosphérique (la concentration en oxygène est ramenée à zéro). Le pourcentage de contamination indiqué est une valeur indicative, qui correspondrait à une contamination par de l'air atmosphérique (N₂, O₂, Ar), pas à une contamination par du gaz vecteur (N₂ seul).

6.2.2. Forage de Muret 104

Les mesures de concentrations en gaz, opérées en 2014, dans les prélèvements du forage Muret 104 sont reportées dans le tableau 11. Un biais systématique - contamination avec le gaz vecteur N_2 - a été relevé dans les données, aussi une correction est établie, en se basant sur un prélèvement réalisé avec de l'hélium comme gaz vecteur. On notera toutefois que cette correction est indicative, le prélèvement à l'hélium montrant lui aussi une contamination de l'échantillon avec ce gaz (qui peut diffuser beaucoup plus facilement que l'azote et contaminera donc très facilement un prélèvement). La concentration d'azote sur laquelle la correction est pratiquée (88 %) est donc la concentration minimale en ce gaz dans les prélèvements. On remarquera que ce constat est tout à fait compatible avec celui posé pour les autres forages.

Pour rappel, seules les mesures faites à 1 035 m ont vocation à avoir une représentativité par rapport à l'aquifère, les mesures pratiquées plus haut dans la colonne d'eau étant rapportées à titre indicatif.

Hormis cette domination de l'azote dans le cortège gazeux, on retrouve, pour Muret 104, une faible abondance de CO_2 (il semble toutefois que la concentration au droit de l'horizon perforé soit un peu plus forte), la présence d'hélium (une concentration proche de 0,1 % soit 1 000 ppm semble pouvoir être proposée, homogène dans la colonne d'eau), et la présence d'alcanes. Pour ces derniers, outre le méthane (on préférera considérer une concentration un peu inférieure à 1 %), on trouve aussi des alcanes à chaîne carbonée plus longue, jusqu'au butane (C_4), ces gaz étant présents à quelques dizaines de ppm chacun. Il s'agit là d'un trait distinctif par rapport aux autres ouvrages, où les hydrocarbures à plus de 3 atomes de carbone n'ont pas été détectés dans les prélèvements.

| | Muret-104 250 m | Muret-104 500 m | Muret-104 750 m | Muret-104 1 035 m - N ₂ | Muret-104 1 035 m - He |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| CO₂ | 0,022 (0,027) | 0,024 (0,033) | 0,037 (0,063) | 0,12 (0,29) | 0,072 |
| Ar | 0,68 (0,68) | 0,50 (0,50) | 0,49 (0,49) | 0,63 (0,63) | 0,52 |
| O₂ | 1,76 (1,61) | 0,086 (0,077) | 0,94 (0,85) | 1,29 (1,17) | 0,10 |
| N₂ | 95,7 (87,9) | 97,8 (87,9) | 97,1 (87,9) | 96,7 (87,9) | 87,9 |
| He | 0,13 (0,30) | 0,049 (0,088) | 0,060 (0,13) | 0,060 (0,102) | 10,2 |
| H₂ | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| H₂S | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| CH₄ | 0,60 (4,28) | 0,53 (5,07) | 0,37 (3,02) | 0,54 (3,97) | 0,78 |
| C₂H₆ | 0,0044 (0,0046) | 0,0037 (0,0039) | 0,0025 (0,0026) | 0,020 (0,025) | 0,0056 |
| C₃H₈ | 0,0036 (0,0037) | 0,0033 (0,0035) | 0,0034 (0,0036) | 0,0080 (0,0088) | 0,0026 |
| ∑C₄H₁₀ | 0,0029 (0,0030) | 0,0019 (0,0020) | 0,0017 (0,0018) | <0,0004 | 0,0020 |
| C₅H₁₂ | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| C₆H₁₄ | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| somme | 98,9 (94,8) | 99,0 | 99,0 | 99,3 | 99,5 |
| N₂/O₂ | 54,4 | 59,7 | 48,4 | 19,4 | 76,9 |
| Pression (mbar) | 103 | 80 | 72 | 102 | 92 |
| % contamination | 8,4% | 0,4% | 4,5% | 6,1% | 0,5% |

Tableau 11 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en pourcentage de la phase gaz exsolvée lors de la mise sous vide du prélèvement. Le gaz vecteur est l'azote. Les valeurs entre parenthèses intègrent une correction de contamination par l'azote utilisé comme gaz vecteur (la concentration de référence est celle mesurée lors du prélèvement à l'hélium). Le pourcentage de contamination indiqué est une valeur indicative, qui correspondrait à une contamination par de l'air atmosphérique (N₂, O₂, Ar).

6.3. DONNEES EXPRIMEES EN CONCENTRATION (MOL.L⁻¹)

Traduites en mol.L⁻¹, les concentrations en gaz dissous sont basses sauf pour l'azote, quel que soit l'ouvrage considéré (tableau 12). Le tableau 13 fournit des points de comparaison avec la quantité de gaz dissous présente dans une eau douce en équilibre avec l'air atmosphérique et avec la solubilité maximale des mêmes gaz à pression atmosphérique. Pour l'espèce d'intérêt (N₂), cette solubilité maximale est également évaluée en conditions profondes (au niveau de la zone perforée, avec une chimie d'eau respectant les concentrations en Na et Cl déterminées à 828 m, respectivement 500 et 230 mg.L⁻¹).

A Polastron et à Lacquy, les concentrations en gaz dissous mesurées sont inférieures d'un à deux ordres de grandeur à la solubilité maximale à pression atmosphérique (sauf pour N₂). Plus en profondeur, la quantité de gaz potentiellement soluble étant encore supérieure, on est donc loin de la saturation. La seule exception est l'azote : les concentrations mesurées en surface dépassent la solubilité maximale à l'atmosphère. C'est donc majoritairement le dégazage de cette espèce que l'on constate sur site. L'agitation supplémentaire de l'eau a pour effet de libérer en sus d'autres espèces moins abondantes (CH₄ dans le cas présent, que l'on peut détecter en traces en agitant l'eau en surface). Au niveau des perforations, le dégazage ne se produit pas (pour Polastron, la solubilité est supérieure de 2 ordres de grandeur par rapport à celle de surface). En conséquence, l'azote est sous-saturé dans la colonne d'eau profonde (pas de dégazage spontané). Par contre, la mise en mouvement de la colonne d'eau (pompage) peut amener à remonter des niveaux profonds et donc à provoquer un dégazage léger (point de bulle dépassé). Pour la chimie Na-Cl de l'eau de Polastron, ce point de bulle peut exister sous 8 à 9 bars de pression (env. 180 à 190 m de profondeur/bride) en considérant une température de l'eau de 20°C. Comme le pompage a fait remonter l'eau du niveau perforé jusque vers 150 m de profondeur, ceci explique le dégazage léger constaté à l'exhaure du pompage. Une évaluation de la profondeur à laquelle le dégazage peut se produire est également possible pour Lacquy, en prenant en référence une température de 18°C et une salinité Na-Cl de 0,0062 mol/kg (inférieure de moitié à celle de Polastron, sur la base de la mesure de conductivité). La pression calculée est proche de 8 bars, soit environ 80 m de colonne d'eau. En conséquence, un brassage de la colonne d'eau pourrait entraîner un dégazage à N₂ majoritaire, les bulles nucléant vers 110 m/bride.

Il est difficile d'utiliser la donnée du prélèvement effectué à Saint André, en raison de la grande incertitude sur le prélèvement, et de l'incertitude plus grande encore sur les tentatives de corrections de la composition du cortège gazeux. En effet, selon cette procédure de correction, l'azote devrait être sursaturé, et devrait donc dégazer spontanément, phénomène qui n'a pas été constaté sur site et n'est pas connu régionalement, notamment dans les ouvrages plus profonds au droit des horizons perforés.

| | Polastron 764 m avant pompage | Polastron 828 m avant pompage | Polastron 828 m après pompage | Saint- André 320 m | Lacquy 425 m | Lacquy 435 m | Lacquy 445 m |
|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Température | 23°C | 25°C | 22°C | 21°C | 22°C | 22°C | 22°C |
| CO₂ | 5,7E-06 (7,5E-06) | 3,0E-05 (2,8E-05) | 4,3E-05 (1,1E-04) | 3,8E-04 (3,5E-04) | 1,0E-05 (2,3E-06) | 6,2E-06 (1,5E-06) | 2,0E-06 |
| Ar | 2,1E-05 (9,4E-06) | 3,9E-05 (1,8E-05) | 4,5E-05 (0) | 4,5E-04 (2,8E-04) | 1,5E-04 (2,9E-05) | 4,9E-04 (0) | 2,0E-07 |
| O₂ | 3,3E-04 (0) | 4,9E-04 (0) | 1,2E-03 (0) | 9,3E-03 (0) | 2,4E-03 (0) | 1,0E-02 (0) | 2,1E-06 |
| N₂ | 3,7E-03 (4,0E-03) | 5,7E-03 (4,0E-03) | 6,2E-03 (3,8E-03) | 3,7E-02 (3,5E-03) | 1,4E-02 (3,8E-03) | 4,0E-02 (3,1E-03) | 5,7E-03 |
| He | - | 1,7E-06 (1,7E-06) | 3,4E-06 (6,8E-06) | - | 2,0E-06 (1,4E-06) | - | 1,3E-06 |
| CH₄ | 5,7E-05 (9,1E-05) | 2,0E-05 (2,1E-05) | 1,7E-06 (3,4E-06) | 1,3E-04 (1,4E-04) | 5,9E-05 (4,6E-05) | 1,5E-05 (1,4E-05) | 6,4E-06 |
| C₂H₆ | 1,8E-07 (3,0E-07) | 1,4E-07 (1,3E-07) | - | - | - | - | - |
| C₃H₈ | 3,7E-08 (5,7E-08) | 2,5E-08 (2,5E-08) | - | - | - | - | - |

Tableau 12 : Analyses chimiques de la phase gaz dissoute des prélèvements de fond. Données exprimées en mol/l, calculées à la température du laboratoire. Les valeurs entre parenthèses intègrent une correction de contamination atmosphérique (la concentration en oxygène est ramenée à zéro).

| (mol.l ⁻¹) | Solubilité max. à P. atmo. | Solubilité max. en conditions fond de trou | Concentrations à l'équilibre avec l'air, à P. atmo. |
|------------------------|----------------------------------|--|--|
| CO₂ | 18°C : 4,0E-02 38°C : 2,3E-02 | | 18°C : 1,8E-05 38°C : 1,0E-05 |
| O₂ | 18°C : 1,4E-03 38°C : 1,0E-03 | | 18°C : 3,0E-04 38°C : 2,1E-04 |
| N₂ | 18°C : 7,1E-04 38°C : 5,0E-04 | 38°C, 70 bars, 0,0125 mol/kg NaCl : 3,5E-02 | 18°C : 5,6E-04 38°C : 4,1E-04 |
| He | 18°C : 3,8E-04 38°C : 3,5E-04 | | 18°C : 2,0E-09 38°C : 1,9E-09 |
| CH₄ | 18°C : 1,5E-03 38°C : 1,0E-03 | | 18°C : 2,8E-09 38°C : 1,9E-09 |

Tableau 13 : Solubilité maximale des gaz dissous (cas de Polastron) et saturation à l'équilibre avec l'atmosphère. Données exprimées en mol/l, pour une eau douce. La solubilité de N₂ en conditions fond de trou est calculée à partir du programme de Mao et Duan (2006) disponible à <http://gcmmodel.kl-edi.ac.cn/archives/programs.htm>.

7. Chimie des eaux

Ce chapitre vise à replacer la chimie des eaux des forages de Polastron, Saint-André, Lacquy et Muret 104, dans un contexte régional et à comparer ces nouveaux résultats aux compositions chimiques connues des eaux dans les forages avoisinants. Cette comparaison s'appuie principalement sur les concentrations en éléments majeurs, traces et isotopes.

7.1. MAJEURS ET TRACES

7.1.1. Forage de Polastron 101

Les eaux prélevées à Polastron 101 (Po101) sont minéralisées avec un TDS de l'ordre de 1 700 mg.L⁻¹. Ces eaux sont beaucoup plus minéralisées que les eaux habituellement prélevées dans la partie ouest des Sables Infra-Molassiques. En effet, les eaux de Po101 sont comparées à celles du forage AEP de Pléhaut (09545X0018), du piézomètre de Saint-Médard (10072X0026), du forage géothermique de Lamazère GLA1 (10071X0012) et du piézomètre de Puymaurin 2 (10078X0001), des puits relativement proches géographiquement (figure 28). Pléhaut, Saint-Médard et Lamazère captent l'aquifère des Sables Infra-Molassiques (André, 2002). Le forage de Puymaurin 2 a été transformé en piézomètre en 1970 et son tubage a été perforé entre 860 et 873 m de profondeur, au droit de la formation de Pont-Labau, datée du Thanétien (Roche et Grech, 1977), soit un niveau similaire à celui rencontré au forage de Saint-André SA-1 (cf. partie 3.1). Il est supposé ici que l'analyse des eaux de Puymaurin 2, réalisée fin octobre 1970, concerne l'eau de cet aquifère, sous-jacent des formations infra-molassiques. Cette hypothèse serait néanmoins à vérifier par le biais d'un nouveau prélèvement et de nouvelles analyses d'eaux. Les eaux provenant de forages situés autour de Po101 présentent un faciès bicarbonaté calcique et sont bien moins minéralisées que les eaux de Po101 (figure 29a).

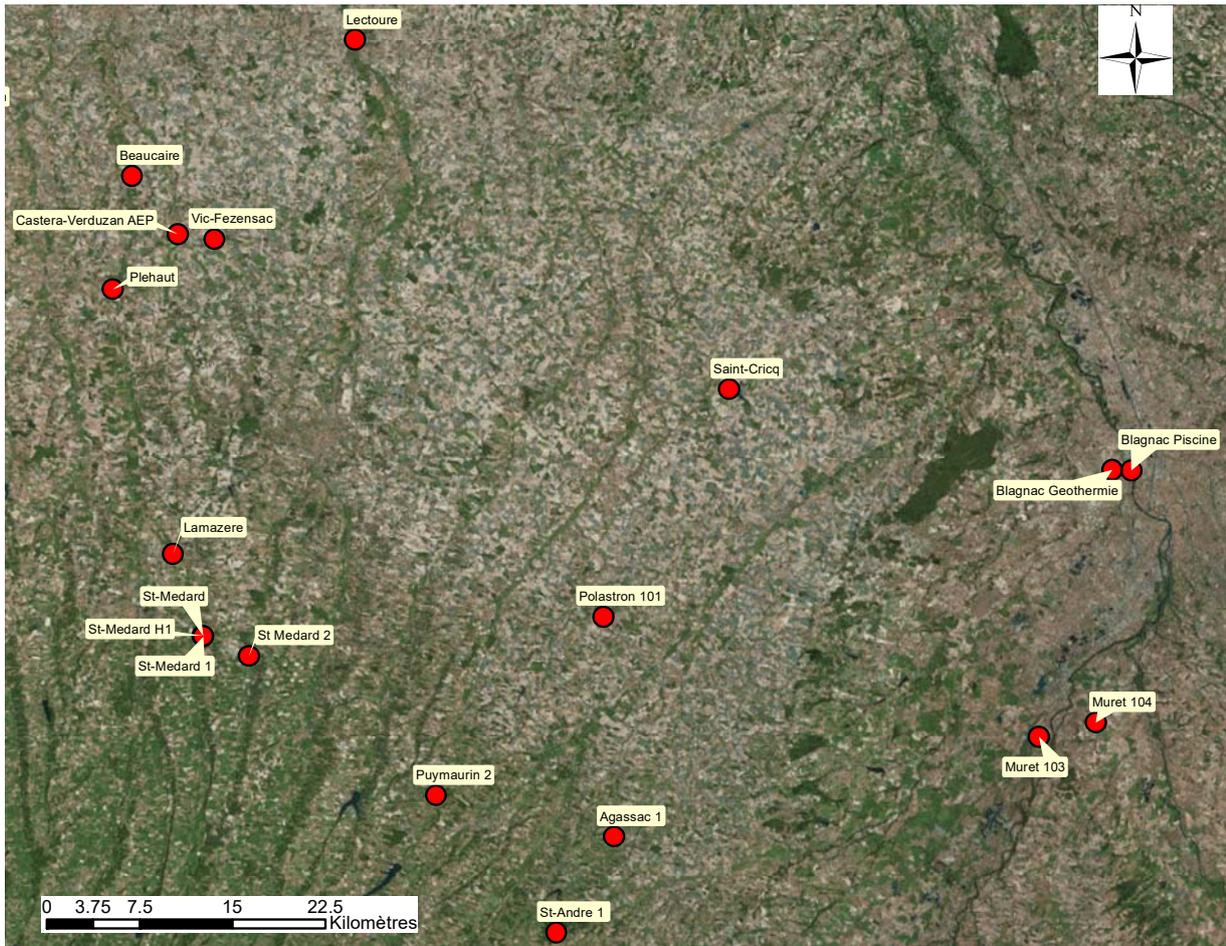


Figure 28 : Principaux forages utilisés pour la comparaison des eaux de Saint André 1 et Polastron 101.

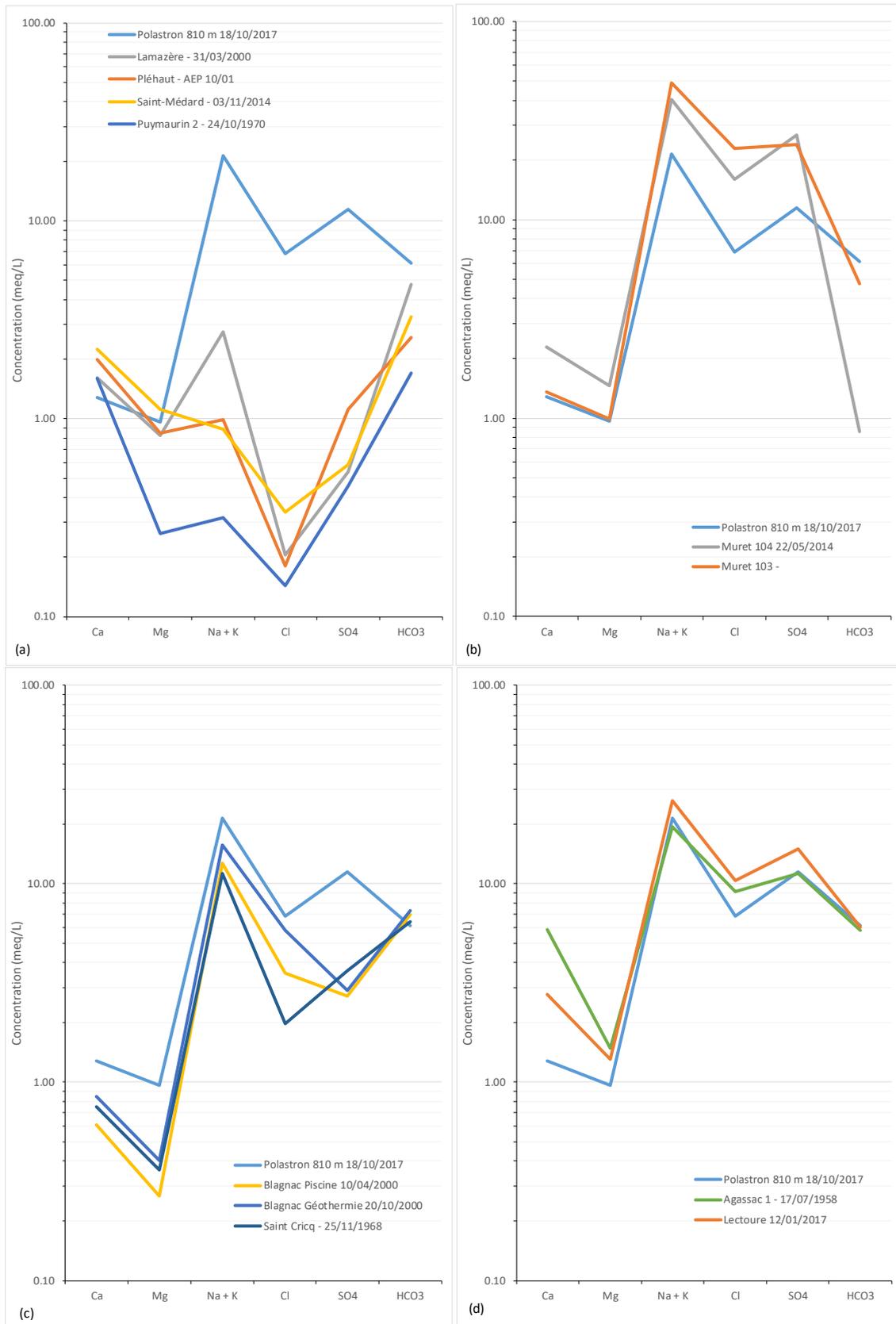


Figure 29 : Diagramme de Schoeller des eaux de Polastron. Comparaison (a) avec les eaux faiblement minéralisées de Pléhaut, Lamazère, Saint-Médard et Puymaurin 2 ; (b) avec les eaux de Muret 103 et Muret 104 ; (c) avec les eaux de Blagnac et Saint-Cricq ; (d) avec les eaux de Lectoure et Agassac 1.

Par leur salinité, les eaux de Po101 sont plutôt comparables aux eaux prélevées à Lectoure (09287X0023) : la conductivité des eaux est de 2 400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à Po101 contre 3 120 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à Lectoure (figure 29d). Les eaux de Po101 sont sensiblement plus minéralisées que celles prélevées à Blagnac (forage de la piscine (09838X0203) : 1 377 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et forage géothermie (09838X0421) : 1 668 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ - cf. André, 2002) et au piézomètre de Saint-Cricq (09824X0002 - cf. Kuhn *et al.*, 1970) mais moins concentrées que celles de Muret 103 (10097X0003 - cf. Roche, 1977) et Muret 104 (10098A0004 : 4 390 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (figure 29b-c). On remarquera les fortes similarités des eaux de Po101 avec celles du piézomètre d'Agassac 1 (10332X0001). Les données de composition chimique pour ce forage correspondent à des venues d'eau dans l'Eocène Inférieur, à des profondeurs comprises entre 2 108 et 2 140 m (Kuhn *et al.*, 1970). Les horizons échantillonnés sont des argiles et des marnes bariolées, avec des passages de sables plus ou moins grossiers, notamment entre 2 115 et 2 121 m, et entre 2 124 et 2 130 m.

Les eaux de Polastron sont de type sulfaté sodique, comme celles de Lectoure, d'Agassac 1 et de Muret 104. Ces 4 eaux sont enrichies en sulfates par rapport aux eaux de Blagnac et de Saint-Cricq. Autour de Polastron, d'autres forages pétroliers ont traversé l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, mais, à notre connaissance, il n'existe pas de donnée sur la chimie des eaux (Auch 2, Gimont 1, Avensac 1, Cadours 101).

Les eaux de Polastron 101 présentent des concentrations en éléments traces élevées, dans des gammes proches de celles mesurées dans les eaux de Lectoure et de Blagnac (tableau 14). On remarquera notamment les concentrations élevées en fluor (comprises entre 4 et 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de ces eaux.

| Forage | Date Prélèvement | Br | F | Li | Sr | Rb | B | Ba |
|----------------------|------------------|------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| POLASTRON 101 | 18/10/2017 | 1390 | 3 900 | 101.50 | 2 036 | | 1 762 | 29.39 |
| LECTOURE | 12/01/2017 | | 3 900 | 75.00 | 1 166 | | 1 445 | 20.40 |
| MURET 104 | 20/05/2014 | | 18 000 | 232.00 | 3197 | | 2385 | 23.3 |
| MURET 104 | 22/05/2014 | | 14 300 | 234.00 | 3707 | | 2292 | 23.2 |
| BLAGNAC (PISCINE) | 10/04/2000 | 640 | 4 600 | | 448 | 10.50 | | 105.00 |
| BLAGNAC (PISCINE) | 18/05/2006 | 470 | 4 550 | 245.50 | 288 | 12.00 | | |
| BLAGNAC (PISCINE) | 16/10/2006 | 560 | 4 610 | 253.00 | 300 | 11.00 | | |
| BLAGNAC (GEOTHERMIE) | 20/10/2000 | 440 | 4 100 | | 340 | 10.30 | | 92.00 |
| LAMAZERE | 31/03/2000 | 50 | 1 580 | | 1131 | 23.90 | | 396.00 |
| SAINT MEDARD | 03/11/2014 | 80 | 860 | | 1059 | 7.40 | | 88.00 |
| PUYMAURIN 2 | 24/10/1970 | | 800 | | | | | |

Tableau 14 : Concentrations (en $\mu\text{g}/\text{L}$) en éléments traces des eaux minéralisées autour du forage de Polastron 101.

7.1.2. Forage de Saint-André 1

Le forage pétrolier de Saint-André 1, transformé en piézomètre en 1975, a fait l'objet de perforations en face de la formation de Pont-Labau du Thanétien (cf. partie 3.1). Nous rappelons ici qu'il n'existe pas de cimentation dans l'espace annulaire au-dessus de 835 m de profondeur, ce qui peut le cas échéant entraîner des circulations d'eau avec d'autres niveaux potentiellement productifs. La composition chimique des eaux a été comparée à celle obtenue dans le piézomètre de Puymaurin 2 (10078X0001), qui capte le même horizon (Roche et Grech, 1977).

Comme le montre la figure 30, ces eaux sont très peu minéralisées, avec un faciès bicarbonaté calcique. Les eaux de Saint-André 1 ont sensiblement la même conductivité ($470 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que celle des eaux des formations infra-molassiques (comme au piézomètre de Saint Médard : $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ - cf. Conseil Général du Gers, 2014). Si les eaux de Puymaurin 2 et de Saint-André 1 présentent des concentrations très proches, des différences apparaissent notamment pour les concentrations en magnésium et en sulfates. Cependant, les conditions de prélèvements à Puymaurin 2 (analyse du 24/10/1970) ne sont pas connues et il est difficile de savoir si des biais liés à la technique d'échantillonnage (délai de réalisation du prélèvement après les perforations, technique de pompage...) n'affectent pas la composition chimique finale.

La plus faible minéralisation des eaux de Saint-André 1, par rapport à Polastron 101, se voit également, dans les éléments traces, avec des concentrations beaucoup plus faibles en bore, strontium, fluor et lithium (tableau 15). On notera en revanche la forte concentration en baryum des eaux de Saint-André 1. Cette concentration élevée est à corrélérer avec la faible concentration en sulfates (de l'ordre de $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), qui autorise des quantités en baryum dans l'eau relativement élevées (contrôle de la concentration par la solubilité de la barytine). L'origine de ce baryum en solution est difficile à établir car les données de forage ne mentionnent pas la présence de barytine dans la roche réservoir. Une autre origine pourrait être l'altération de silicates (ou l'interaction avec des argiles), qui contiennent tous plus ou moins de baryum.

| | | Polastron | Saint-André | Lacquy |
|------------------|------|-----------|-------------|--------|
| Ag | µg/l | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Al | µg/l | 1.72 | 0.53 | 14.19 |
| As | µg/l | 2.37 | 2.73 | 2.64 |
| B | µg/l | 1762 | 21.1 | 140.6 |
| Ba | µg/l | 29.39 | 798.31 | 88.03 |
| Be | µg/l | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| Br | µg/l | 1385 | 44 | 153 |
| Cd | µg/l | 0.02 | <0.01 | 0.01 |
| Co | µg/l | <0.05 | 0.45 | <0.05 |
| Cr | µg/l | 0.2 | <0.1 | 8.68 |
| Cu | µg/l | 0.13 | <0.1 | <0.1 |
| F | mg/l | 3.8 | 0.2 | 1.9 |
| Fe | mg/l | <0.02 | 2.742 | <0.02 |
| Li | µg/l | 101.48 | 10.95 | 21.78 |
| Mg | mg/l | 7.6 | 21 | 2.9 |
| Mn | µg/l | 4.45 | 141.38 | 1.21 |
| NH ₄ | mg/l | 0.72 | <0.05 | 0.63 |
| Ni | µg/l | 0.17 | 0.81 | 1.18 |
| PO ₄ | mg/l | <0.05 | <0.05 | <0.05 |
| Pb | µg/l | <0.05 | <0.05 | 0.06 |
| SiO ₂ | mg/l | 9.1 | 10 | 8.8 |
| Sr | µg/l | 2036.6 | 922.2 | 1324.3 |
| Zn | µg/l | 1.83 | 8.87 | <0.5 |

Tableau 15 : Concentrations en éléments traces dans les eaux des forages étudiés.

Les eaux prélevées à Saint-André 1 sont également moins minéralisées que les eaux que l'on peut prélever à proximité, comme au piézomètre de Saint-Médard (10072X0026), qui capte l'aquifère des Sables Infra-Molassiques, ou le piézomètre de Saint-Médard 1 (10072X0004), qui intercepte l'aquifère du Danien. On notera d'ailleurs la similitude de composition chimique de ces deux dernières eaux.

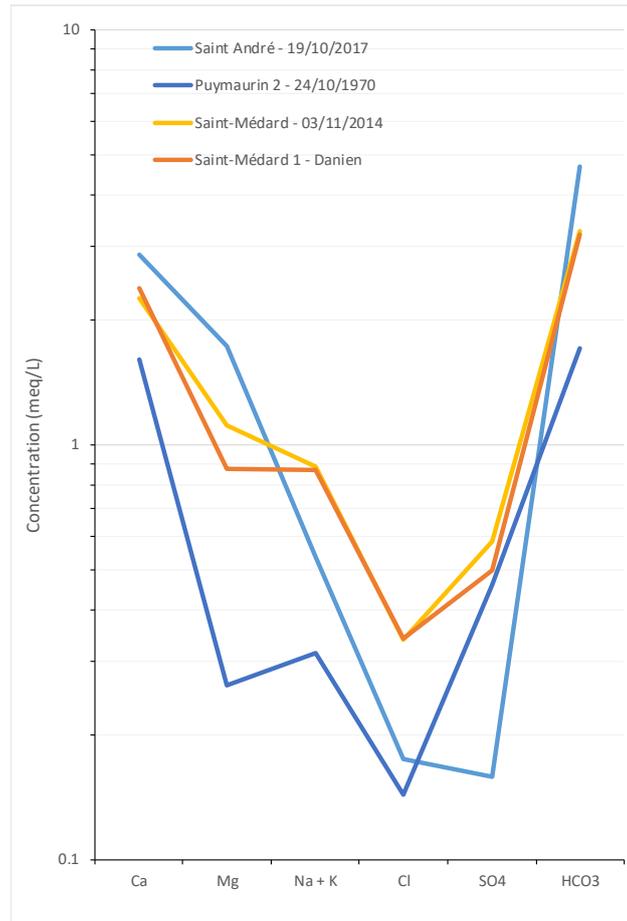


Figure 30 : Diagramme de Schoeller des eaux de Saint-André 1 (campagne de prélèvements 2017) et comparaison avec les eaux de deux piézomètres à Saint-Médard (Sables Infra-Molassiques et Danien) et Puymaurin 2 (formation de Pont-Labau).

7.1.3. Forage de Lacquy 101

Le forage de Lacquy 101 a été transformé en piézomètre en 1973. Selon les données de la littérature, ce forage est situé dans une zone où les aquifères infra-molassique et crétacé supérieur sont quasiment superposés et en communication (Chamayou et Roche, 1985). D'autre part, il avait été constaté que la cimentation est inexistante au droit du Crétacé Supérieur et des SIM et qu'elle n'isole pas les deux nappes. Il est donc fort probable que l'eau analysée soit un mélange d'eaux de divers horizons géologiques.

Aucune eau prélevée dans des forages voisins géographiquement n'a de composition similaire à l'eau échantillonnée à Lacquy 101 (figure 31). Comme le montre la figure 32, il semble donc que la composition chimique de l'eau de Lacquy 101 soit un mélange de différents pôles.

Un des pôles pourrait être des eaux peu profondes et peu concentrées comme les eaux du forage AEP de Créon (09267X0013 - cf. ADES) qui capte le réservoir aquitanien et helvétien, entre 35 et 53 m de profondeur. Ces eaux sont bicarbonatées calciques, mais, malgré leur faible profondeur, ne contiennent pas de nitrate (comme les eaux de Lacquy 101), ce qui semble indiquer une connexion limitée avec la surface.

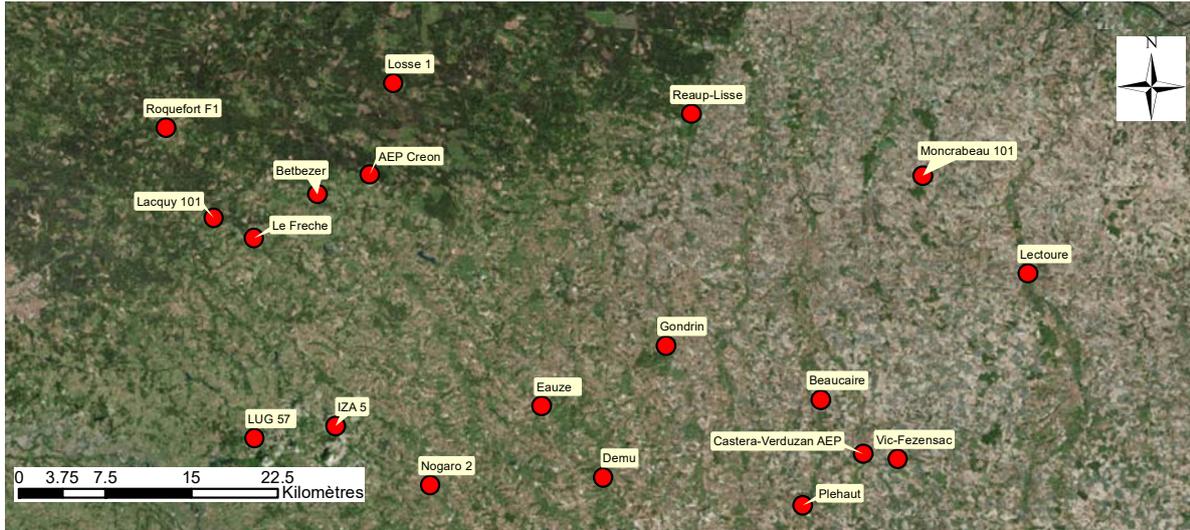


Figure 31 : Carte des principaux forages utilisés pour la comparaison des eaux de Lacquy 101.

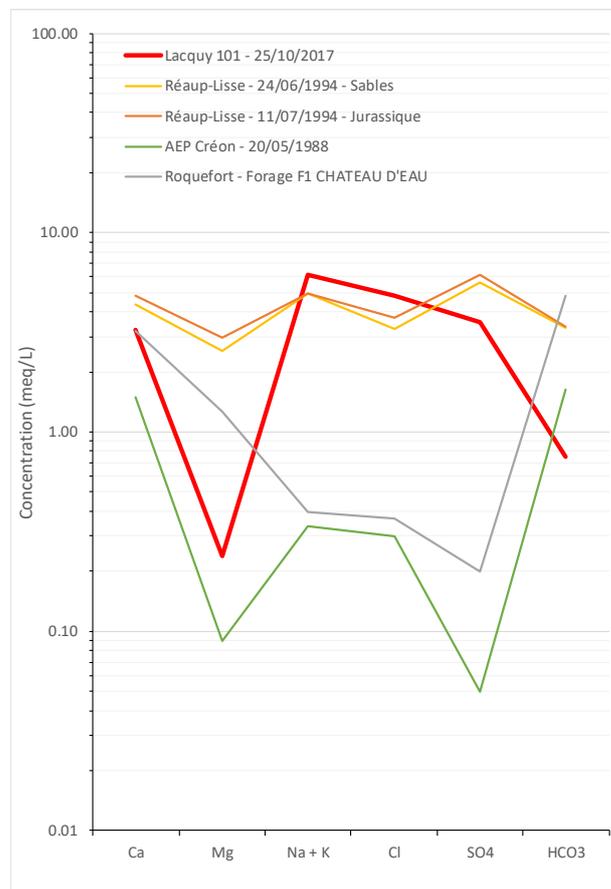


Figure 32 : Diagramme de Schoeller des eaux de Lacquy 101 (campagne de prélèvements 2017) et comparaison avec des eaux prélevées dans des forages proches géographiquement.

Les eaux de Lacquy 101 présentent également la particularité d'être chlorurées et sulfatées sodiques. Peu d'eaux au voisinage présentent des caractéristiques similaires, excepté celles du forage de Réaup-Lisse (09273X0205). Ce forage est sensiblement plus éloigné de Lacquy 101 mais, des analyses, menées en 1994 sur des eaux 1/ issues d'un niveau de sables et graviers de la base de l'Eocène (niveau intégré à la formation yprésienne des marnes de Gan) et 2/ de la

dolomie de Mano (Jurassique), montrent des eaux minéralisées avec des concentrations en sulfates, sodium et chlorures similaires à celles de Lacquy 101. Ces eaux ont également des concentrations en fluor relativement élevées (2,45 mg.L⁻¹ dans les sables yprésiens et 1,90 mg.L⁻¹ dans le Jurassique), soit des valeurs similaires aux 2,00 mg.L⁻¹ mesurés à Lacquy 101.

Afin de tenter de comprendre la composition des eaux de Lacquy, une modélisation géochimique a été réalisée avec le logiciel PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 2013). Des mélanges entre les différents pôles cités plus haut ont été testés. Comme le montre la figure 33 (gauche), il n'est pas possible de recréer la composition en éléments majeurs de l'eau de Lacquy 101, avec des eaux telles que celles de Créon et de Réaup-Lisse. Si le calcium et le magnésium sont bien représentés, les concentrations en chlorures, sulfates et sodium sont sous-estimées. Pour arriver à de telles concentrations en Na, Cl et SO₄, nous avons tenté un mélange avec les eaux de l'aquifère du Lias, prélevées au forage de Moncrabeau 101 (09282X0001). Les études, menées lors de sa foration dans les années 1960, ont montré que la salinité de ces eaux est très élevée (20-30 g.L⁻¹). Il s'avère que lorsque l'on mélange 1 % en volume de ces eaux avec celles de Créon, il est alors possible de reproduire la concentration de tous les ions des eaux de Lacquy 101 (à l'exception des sulfates - figure 33 droite). Cette simulation permet de proposer une hypothèse sur les eaux de Lacquy 101 qui pourraient être issues d'un mélange entre un pôle dilué d'eaux peu anciennes (comme le démontre l'activité en carbone 14 - voir paragraphe suivant) et un pôle très minéralisé beaucoup plus profond.

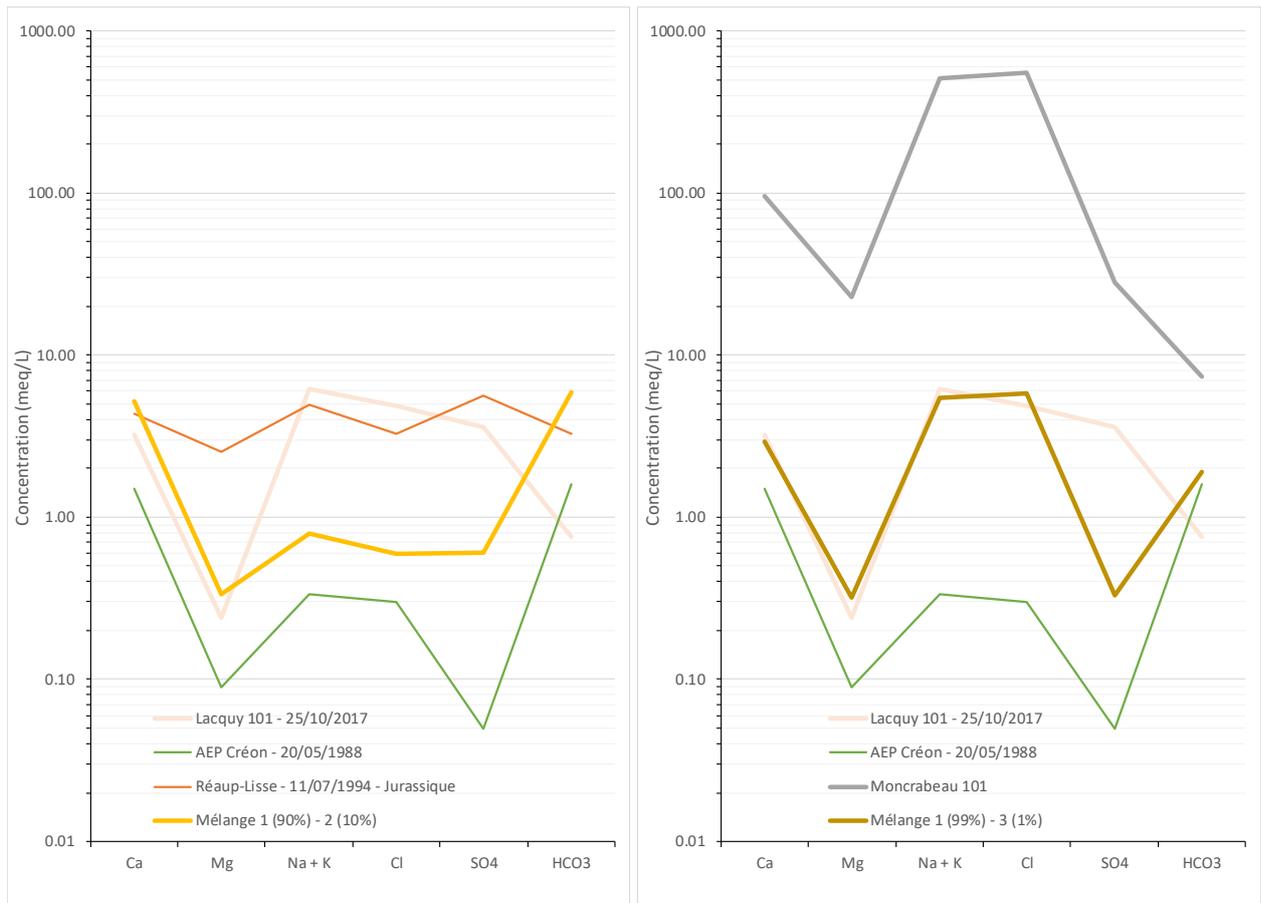


Figure 33 : Modélisation de mélanges d'eaux pour expliquer la composition chimique des eaux de Lacquy 101. A gauche, mélange de 90 % d'eau de Créon (Aquitainien) et 10 % d'eau de Réaup-Lisse (Jurassique). A droite, mélange de 99 % d'eau de Créon (Aquitainien) et de 1 % d'eau de Moncrabeau 101 (zone à anhydrite et dolomie à 1 473 m de profondeur).

7.2. ISOTOPIE

Les isotopes stables de la molécule d'eau permettent d'obtenir une estimation à la fois de l'origine de l'eau (météorique, eau de mer, évaporites...) mais aussi de la température moyenne de recharge et de l'altitude de la zone de recharge (Fontes, 1976 ; Blavoux, 1978 ; Blavoux, 1995 ; Clark et Fritz, 1997 ; Olive, 1997 ; Mook *et al.*, 2000). Si depuis la recharge, l'eau souterraine n'a pas subi de processus d'échanges à haute température ni d'évaporation, alors les compositions isotopiques, couplées dans un diagramme δD vs. $\delta^{18}O$ doivent se situer au voisinage de la droite des précipitations océaniques mondiales définie par Craig (1961). En un même lieu, en contexte froid (glaciaire), les eaux sont plus pauvres en isotopes lourds et les compositions plus négatives qu'en période interglaciaire.

Les données reportées sur la figure 34 montrent qu'une grande majorité des eaux de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques suit une tendance linéaire, et se situe entre la droite des eaux météoriques mondiales et la droite des précipitations mesurées à Dax (Blavoux *et al.*, 1993 ; Millot *et al.*, 2010).

Selon la figure 34, les eaux à l'est du bassin (Blagnac, Muret, Polastron, voire Lectoure) présentent des valeurs relativement élevées en isotopes lourds. Les valeurs de $\delta^{18}O$, comprises entre -6 et -7 ‰, semblent indiquer des conditions de recharge différentes par rapport à la zone ouest des Sables Infra-Molassiques. Dans cette zone est des SIM, on note également que les points s'écartent sensiblement de la droite météorique, avec un enrichissement en ^{18}O . Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet enrichissement, comme une phase d'évaporation des eaux lors de leur infiltration ou bien des mélanges avec des eaux plus profondes présentant des $\delta^{18}O$ enrichis ou bien des échanges eau-roche en contexte géothermal à haute température. Afin de compléter les mesures d'isotopes lourds de la molécule d'eau, les activités en ^{14}C et les concentrations en ^{13}C ont été déterminées dans les échantillons d'eau de Polastron 101. L'activité ^{14}C est relativement faible (3,2 pCm dans l'eau échantillonnée à 828 m de profondeur) alors que le $\delta^{13}C$ est de -10,2 ‰ (tableau 16). Le modèle de Pearson et Hanshaw (1970), qui permet d'estimer l'âge apparent des eaux en utilisant une correction basée sur la concentration en carbone 13, donne une valeur d'âge apparent de 21 700 ans BP, ce qui place ces eaux vers la fin de la dernière période glaciaire qui a touché le Bassin aquitain (Blavoux *et al.*, 1993 ; André *et al.*, 2019). Selon Andrieu *et al.* (1988), durant cette période, une sécheresse atmosphérique a touché le versant nord des Pyrénées et son piémont molassique, particulièrement au sud de Toulouse où des lœss ont été déposés dès -24 000 ans BP. Cette sécheresse pourrait expliquer que les eaux de recharge ont subi de faibles processus d'évaporation, ce qui pourrait ainsi justifier l'écart observé entre ces eaux et la droite météorique et l'enrichissement en ^{18}O .

Pour les eaux de Saint-André 1, qui proviennent de la formation thanétienne de Pont-Labau, les isotopes 13 et 14 du carbone (tableau 16) et le modèle de Pearson et Hanshaw (1970) permettent d'estimer l'âge apparent des eaux à environ 4 500 ans BP, ce qui semble indiquer des eaux relativement récentes. Or, ces eaux présentent des teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau (tableau 16 et figure 34), plus appauvries que celles observées dans des eaux récentes, comme à Bordes (André, 2002 ; André *et al.*, 2005). Les caractéristiques isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}C$, δD , $\delta^{18}O$) des eaux de Saint-André s'approchent de celles observées dans les eaux de Lotus 1 à Barbotan (André, 2002 ; André *et al.*, 2005). A ce stade, deux hypothèses peuvent expliquer l'âge apparent et l'appauvrissement en isotopes stables de la molécule d'eau des eaux de Saint-André 1 : des eaux récentes infiltrées à partir d'une aire de recharge d'altitude élevée ou bien un mélange entre des eaux météoriques anciennes (infiltrées lors de la période glaciaire) et des eaux météoriques récentes.

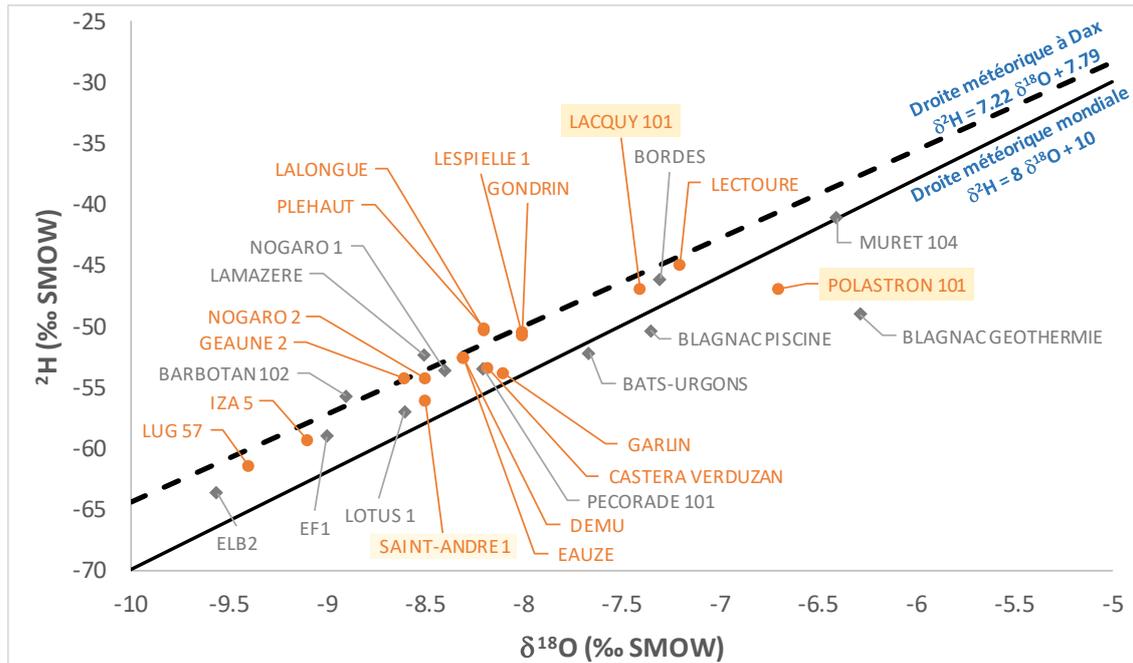


Figure 34 : Diagramme δD vs. $\delta^{18}O$ pour les eaux des Sables Infra-Molassiques. Analyses de janvier 2017 (symboles rouges) et analyses provenant de diverses campagnes plus anciennes (symboles verts). La droite météorique mondiale (Craig, 1961) est représentée par la droite noire en trait plein, et la droite météorique de Dax est représentée en pointillés (Millot et al., 2010).

Pour les eaux de Lacquy 101, le point s'aligne parfaitement sur la droite météorique locale. Les valeurs d'isotopes stables sont relativement élevées indiquant une potentielle recharge lors d'une période tempérée récente. Ceci semble cohérent avec l'âge apparent des eaux, estimé à -1 500 ans BP (à partir du modèle de Pearson et Hanshaw, 1970).

| | $\delta^{18}O_{H_2O}$ (‰ VSMOW) | $2\sigma_m$ | δD_{H_2O} (‰ VSMOW) | $2\sigma_m$ | $\delta^{13}C_{CTD}$ (‰ VPDB) | $2\sigma_m$ | Activité ^{14}C (pCm) | \pm (pCm) |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------|----------------|
| Polastron 11/10/17 | -6.7 | 0.1 | -46.9 | 0.8 | -10.2 | 0.1 | 3.2 | 0 |
| Polastron 18/10/17 | -6.7 | 0.1 | -46.6 | 0.8 | -10.2 | 0.1 | 3.2 | 0 |
| Saint-André 19/10/17 | -8.5 | 0.1 | -56.1 | 0.8 | -9.6 | 0.1 | 24.4 | 0.1 |
| Lacquy 445 m 26/10/17 | -7.4 | 0.1 | -47 | 0.8 | -13.9 | 0.1 | 50.4 | 0.2 |

Tableau 16 : Compositions des isotopes de la molécule d'eau et du carbone des eaux.

Concernant les isotopes du soufre ($\delta^{34}S$, tableau 17), les données mesurées dans Polastron 101 semblent indiquer une origine évaporitique du soufre des sulfates. Ces valeurs de 20 ‰ (CDT) sont proches des valeurs enregistrées à Dému, Saint-Médard, Lamazère (André et al., 2005) et à Muret 104. Cette origine évaporitique semble cohérente avec la présence de dépôts d'anhydrite, mentionnée au toit de l'aquifère, comme au forage d'Agassac 1 ou d'Auch 2. Dans la notice de la carte géologique d'Auch, Cruzel et al. (1973) signalent d'ailleurs que, au-dessus de l'aquifère infra-molassique, les passées détritiques des niveaux inférieurs de la molasse peuvent constituer des réservoirs. Compte tenu de la présence, à peu près constante, de gypse dans ces formations, l'eau risque d'être séléniteuse.

Les eaux de Saint-André 1 présentent des valeurs négatives à -16,0 ‰ CDT, avec une valeur de $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ proche de 5,8 ‰ VSMOW. Cette valeur traduit une origine très différente des sulfates dissous par rapport à celle établie pour Polastron 101. Cette zone pourrait être le siège d'une oxydation de composés sulfurés. Cette signature négative des isotopes du soufre des sulfates est assez singulière, car elle n'a été retrouvée qu'en un seul lieu dans les eaux des Sables Infra-Molassiques : dans les eaux des forages de Barbotan (André *et al.*, 2002).

Les eaux de Lacquy 101 ont une signature isotopique proche de 25 ‰ CDT, ce qui pourrait indiquer un début de processus de sulfato-réduction.

| | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $2\sigma_m$ | $\delta^{11}\text{B}$ (‰) | $2\sigma_m$ | $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ (‰ VCDT) | $2\sigma_m$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ (‰ VSMOW) | $2\sigma_m$ | $\delta^7\text{Li}$ (‰) | $2\sigma_m$ |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|---|-------------|--|-------------|----------------------------|-------------|
| Polastron 11/10/17 | 0.708517 | 0.000008 | 13.82 | 0.05 | 20.6 | 0.3 | 13.6 | 0.5 | 15.0 | 0.5 |
| Polastron 18/10/17 | 0.708498 | 0.000007 | 13.91 | 0.04 | 20.4 | 0.3 | 13.5 | 0.5 | 14.2 | 0.5 |
| Saint-André 19/10/17 | 0.708501 | 0.000006 | 19.14 | 0.11 | -16.0 | 0.3 | 5.8 | 0.5 | 19.7 | 0.5 |
| Lacquy 26/10/17 | 0.708319 | 0.000007 | 4.91 | 0.04 | 25.8 | 0.3 | 15 | 0.5 | 17.3 | 0.5 |

Tableau 17 : Compositions en isotopes (Sr, B, Li, S) des eaux.

Pour les trois forages, les signatures isotopiques en strontium ont des valeurs très proches ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de l'ordre de 0,7085) avec des concentrations en strontium relativement élevées (supérieures à 1 000 $\mu\text{g.L}^{-1}$). Ces valeurs sont compatibles avec la signature isotopique en Sr des évaporites d'âge éocène ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0,70723$; Palmer *et al.*, 2004), laissant supposer que le strontium provient de la dissolution d'évaporites. Ces valeurs sont également très proches des valeurs analysées dans le cadre du projet CARISMEAU (Négreil *et al.*, 2008b).

Concernant le bore, chaque forage présente un profil différent. Pour Polastron, les concentrations en bore sont élevées (de l'ordre de 1 700 $\mu\text{g.L}^{-1}$) avec un $\delta^{11}\text{B}$ de l'ordre de 14 ‰. Le bore de ces eaux semble provenir d'évaporites. A noter que cette signature est très proche de celle enregistrées dans les eaux de Muret 104 (Négreil *et al.*, 2008b). A Saint-André, le rapport isotopique est plus élevé (de l'ordre de 20 ‰) mais la concentration en bore est faible (20 $\mu\text{g.L}^{-1}$). Dans ce cas, le bore pourrait provenir d'interactions entre les eaux et des carbonates. Enfin, pour Lacquy 101, la concentration de l'ordre de 140 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et une valeur de $\delta^{11}\text{B}$ de l'ordre de 5 ‰ semblent indiquer des altérations avec des silicates.

8. Conclusions et perspectives

Les investigations conduites dans les trois anciens forages profonds de Polastron (32), Saint-André (31) et Lacquy (40) ont permis d'établir un état des lieux portant sur leur intégrité suite à leur reconversion en piézomètres (années 1970), et de confirmer leur connexion hydraulique effective avec les aquifères profonds infra-molassiques. Le forage de Saint-André est comblé partiellement par des matériaux meubles, mais ce bouchon est perméable et autorise un suivi hydraulique. Le forage de Lacquy présente par contre un surnageant huileux, qui a empêché d'appliquer l'ensemble du programme de caractérisation.

D'autre part, les diagraphies de production ont confirmé ce que les opérateurs de mesures savent par expérience mais qui ne bénéficie pas d'un traitement bibliographique : la caractérisation physico-chimique de la colonne d'eau présente dans le forage permet de savoir et maîtriser ce qui est effectivement prélevé dans l'ouvrage, et d'appréhender plus globalement la complexité du lien entre le forage et la (ou les) ressource(s) captée(s). Et dans le cas où des problématiques de qualité imposent d'opérer des prélèvements sélectifs dans certains horizons captés, cette caractérisation physico-chimique de la colonne d'eau est un préalable indispensable pour assurer la représentativité des échantillons.

Les analyses chimiques et isotopiques effectuées sur les échantillons sélectionnés apportent des éléments de connaissance complémentaires sur l'hydrogéochimie des systèmes aquifères captés et sur les périodes de recharge supposées, principalement dans des zones où nous disposons de très peu d'informations. Ainsi, Polastron 101 apporte des informations pertinentes sur la composition chimique des eaux, dans la partie est du département du Gers, zone où très peu de points de captage sont accessibles. Les résultats indiquent que l'eau y est particulièrement minéralisée, avec des compositions proches de celles rencontrées plus à l'est (Muret, Blagnac) ou plus au nord (Lectoure). Les analyses isotopiques indiquent que l'âge apparent est relativement ancien (de l'ordre de -21 000 ans BP) et que la minéralisation est en lien avec des apports évaporitiques. Les eaux auraient également subi des processus d'évaporation, en cohérence avec les observations à Blagnac et Muret. Les eaux de Saint-André présentent une minéralisation beaucoup plus faible, comparable à celle mesurée dans des forages voisins (comme Puymaurin 2). Malgré la profondeur du réservoir (environ 500 m), l'âge apparent des eaux est de l'ordre de -4 500 ans BP, synonyme d'une recharge récente ou d'un mélange avec des eaux jeunes. Les analyses dans les deux forages Polastron 101 et Saint-André confirment globalement les divergences de composition chimique entre les secteurs orientaux et occidentaux des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain et permettent d'affiner la limite entre les deux zones. Enfin, pour le forage de Lacquy situé dans la zone nord du système aquifère, les analyses des ions majeurs indiquent que les eaux prélevées sont un mélange de plusieurs pôles, dont un profond. Cependant, cette contribution profonde serait minoritaire, au vu du faible âge apparent mesuré.

Enfin, les analyses des gaz dissous, effectuées à partir des prélèvements dans ces anciens forages répartis sur trois départements (Gers, Haute-Garonne et Landes), ont permis d'établir les profils principaux des nappes profondes dans ce vaste secteur du Bassin aquitain : prédominance de l'azote, présence généralisée de méthane et présence d'hélium. La présence de ces phases gazeuses dans les aquifères profonds est concordante avec les observations rapportées dans d'autres grands bassins sédimentaires.

D'un point de vue global, les investigations conduites viennent étayer la connaissance sur les caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères profonds du sud du Bassin aquitain. Ces premières indications sur l'état des forages amènent également un certain nombre de

questionnements sur la représentativité des mesures et prélèvements effectués dans ces ouvrages profonds du territoire et sur leur intégrité. Ainsi, si le retour à l'équilibre thermique après pompage se fait rapidement dans la colonne d'eau contenue dans le forage, il apparaît que la modification potentielle de minéralisation peut se maintenir durant des mois, affectant en conséquence la densité de la colonne d'eau et donc sa hauteur piézométrique. Le forage de Polastron 101 en est un très bon exemple. Il convient de mesurer et consigner les modifications physico-chimiques apportées à l'occasion de pompages, voire d'injections, dans ces ouvrages patrimoniaux de suivi piézométrique, afin d'être en mesure de reconstituer par le calcul une chronique piézométrique corrigée.

En termes de physico-chimie, l'exemple du forage de Polastron 101 montre qu'un simple renouvellement de la colonne d'eau dans le forage et la réalisation d'un prélèvement positionné de manière adaptée peuvent permettre de restituer une eau que l'on pourra considérer comme représentative de l'aquifère. Ce résultat ne peut s'obtenir que sur la base de diagraphies physico-chimiques portant sur l'ensemble de la colonne d'eau et réalisées avant et pendant/après pompage. Le forage de Saint-André et plus encore celui de Lacquy montrent néanmoins qu'un tel prélèvement ne peut être espéré dans tous les ouvrages profonds.

De façon plus générale, les investigations conduites permettent :

- de confirmer la représentativité des mesures piézométriques effectuées au droit des trois ouvrages investigués ;
- d'aborder, au travers de l'exemple de Polastron 101, la question de l'influence temporelle, sur la piézométrie mesurée, de la minéralisation de la colonne d'eau d'un ouvrage profond : le retour à la cote piézométrique initiale, si retour à l'équilibre il y a, se fait à un rythme bien plus lent que lorsque la colonne est soumise à un changement de température ; la cinétique des différentes réactions chimiques à même de se produire au sein de la colonne pourrait expliquer cette temporalité. Cette expérience de terrain permet en tout cas d'étayer l'existence de variations de cote piézométrique à la suite d'un pompage ou d'une injection d'eau, sans pour autant remettre en cause la représentativité de la mesure ;
- de conforter le schéma d'écoulement régional déduit notamment de l'âge des eaux (-21 000 ans BP à Polastron 101 et -4 500 ans BP à Saint-André) mais aussi de leur composition chimique (André, 2002).

9. Bibliographie

Agence Financière de Bassin Adour Garonne (A.F.B.A.G.) (1974) – Transformation du forage pétrolier Polastron 101 en piézomètre de la nappe infra-molassique, 10 p.

Aggarwal P.K., Matsumoto T., Sturchio N.C., Chang H.K., Gastmans D., Araguas-Araguas L.J., Jiang W., Lu Z.-T., Mueller P., Yokochi R. et al., 2014, Continental Degassing of 4He by Surficial Discharge of Deep Groundwater, *Nature Geoscience* 8(35), <http://www.nature.com/doi/10.1038/ngeo2302>

André L. (2002) - Geochemical contribution to the understanding of deep groundwater flows. Application to the Infra-Molassic Sands Aquifer in Aquitaine Basin, France. PhD thesis - University of Bordeaux 3 - Science and Technology.

André L., Franceschi M., Pouchan P., Atteia O. (2002) - Origin and evolution of sulfur in the Infra-Molassic Sands Aquifer from Aquitaine Basin. *C.R. Géosciences*, 334, 749-756.

André L., Franceschi M., Pouchan P., Atteia O. (2005) - Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, South–West France. *Journal of Hydrology*, 305(1-4), 40-62.

André L., Cabaret O., Douez O., Saplairoles M., Wuilleumier A. (2019) – Projet GAIA. Année 4. Avancement des volets hydrogéologique et hydrogéochimique. Rapport d'étape. BRGM/RP-69126-FR, 121 p., 82 ill., 12 ann.

Andrieu V., Hubschman J., Jalut G., Herail G. (1988) – Chronologie de la déglaciation des Pyrénées françaises. Dynamique de sédimentation et contenu pollinique des paléolacs : application à l'interprétation du retrait glaciaire. *Bulletin de l'association française pour l'étude du Quaternaire*. 1988-2/3, p. 55-67.

Bell R.A., Darling W.G., Ward R.S., Basava-Reddi L., Halwa L., Manamsa K., Ó Dochartaigh B.E., 2017. A baseline survey of dissolved methane in aquifers of Great Britain. *Science of The Total Environment* 601–602, 1803–1813.

Bethke C.M., Zhao X., Torgersen T., 1999, Groundwater flow and the 4He distribution in the Great Artesian Basin of Australia, *Journal of Geophysical Research* 104(B6), 12999–13011.

Blavoux B. (1978) - Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse de doctorat Pierre et Marie Curie. 316 p.

Blavoux B., Dray M., Fehri A., Olive P., Groning M., Sonntag C., Hauquin J.P., Pelissier-Hermitte G., Pouchan P. (1993) - Paleoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine Basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases, Intern. Symp. on App. of Isotope Tech., 293–305, Vienne.

Blavoux B. (1995) - Apports des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale. *La Houille Blanche*, n° 2/3, p. 51-58.

Chamayou J. et Roche J. (1985) – La nappe Infra-Molassique dans les régions Midi-Pyrénées et Aquitaine (Partie Sud). Etat des connaissances et surveillance piézométrique. Rapport du BRGM 85-AGI-010-MPY-AQI. 75 pages

Clark I., Fritz P. (1997) - Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New-York. 328 p.

Conseil Général du Gers (2014). Surveillance des aquifères gersois : Campagne de mesure 2014. Rapport du Conseil Général. 74 pages.

Craig H. (1961) – Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702–1703.

Crouzel F., avec la collaboration de Kieken M. et Paris J-P. (1973). Notice de la carte géologique d'Auch. Editions BRGM.

Currell M., Banfield D., Cartwright I., Cendón D.I., 2017. Geochemical indicators of the origins and evolution of methane in groundwater: Gippsland Basin, Australia. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 13168–13183.

Darling W.G., Goody D.C., 2006. The hydrogeochemistry of methane: Evidence from English groundwaters. *Chemical Geology* 229, 293–312.

Fontes J.-C. (1976). Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 208 p.

Fourré E., Jean-Baptiste P., Dapoigny A., Lavielle B., Smith T., Thomas B., Vinsot A., 2011, Dissolved helium distribution in the Oxfordian and Dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area, *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1511–1520.

Gal F., avec la collaboration de André L., Bentivegna G., Decouchon E., Grandemange A. (2016) – Investigations sur les forages de Labruguière et de Valdurenque – Comparaison de différentes approches d'échantillonnage (pompage et prélèvement de fond), Rapport final BRGM/RP-65934-FR, 131 p.

Grossman E.L., Coffman B.K., Fritz S.J., Wada H., 1989. Bacterial production of methane and its influence on ground-water chemistry in east-central Texas aquifers. *Geology* 17, 495–499.

Kuhn H., Maget Ph., Roche J. (1970) – La nappe Infra-Molassique dans la région Midi-Pyrénées. Rapport du BRGM 70-SGN-301-MPY. 110 pages

Kulongoski J.T., Hilton D.R., Izbicki J.A., 2003, Helium Isotope Studies in the Mojave Desert, California: Implications for Groundwater Chronology and Regional Seismicity, *Chemical Geology* 202(1), 95–113.

Lehmann B.E., Loosli H.H., Purtschert R., Andrews J.N., 1996, A Comparison of Chloride and Helium Concentrations in Deep Groundwaters, IAEA: International Atomic Energy Agency, 3-17, http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:27061799.

Lide D.R. (2005). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th Edition. CRC Press, 2712 p.

Mao S. et Duan Z. (2006) - A thermodynamic model for calculating nitrogen solubility, gas phase composition and density of the N₂-H₂O-NaCl system, *Fluid Phase Equilibria* 248, 103–114.

Marty B., Criaud A., Fouillac C., 1988. Low enthalpy geothermal fluids from the Paris sedimentary basin—1. Characteristics and origin of gases. *Geothermics* 17, 619–633.

Marty B., Torgersen T., Meynier V., O'Nions R.K., de Marsily G., 1993, Helium Isotope Fluxes and Groundwater Ages in the Dogger Aquifer, Paris Basin, *Water Resources Research* 29(4), 1025–1035.

Millot R., Petelet-Giraud E., Guerrot C., Négrel P. (2010) - Multi-isotopic composition ($\delta^7\text{Li}$ – $\delta^{11}\text{B}$ – δD – $\delta^{18}\text{O}$) of rainwaters in France: Origin and spatio-temporal characterization. *Applied Geochemistry*, 25, 1510–1524.

Mook W.G., de Vries J.J. (2000) - Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle - Principles and Applications. Technical Documents in Hydrology, vol. 1-6, UNESCO/IAEA, Paris

Moya C.E., Raiber M., Taulis M., Cox M.E., 2016. Using environmental isotopes and dissolved methane concentrations to constrain hydrochemical processes and inter-aquifer mixing in the Galilee and Eromanga Basins, Great Artesian Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 539, 304–318.

Négrel P., Roy S., Petelet-Giraud E., Brenot A., Millot R., Dutartre P., Fournier I., (2008a). Les outils de diagraphie chimique pour la caractérisation des masses d'eau – Principes et exemple d'application, *TSM* 11, 29 - 46, <https://doi.org/10.1051/tsm/200811029>

Négrel Ph., Petelet-Giraud E., Brenot A., Millot R., Innocent Ch. (2008b) – Caractérisation isotopique et géochimique des masses d'eau dans la bassin Adour-Garonne : interconnexions et hétérogénéités – CARISMEAU. Rapport BRGM/RP-56291-FR.

Olive P. (1997) - Introduction à l'hydrologie isotopique. Paris 6 Pierre et Marie Curie 62 p.

Palmer M.R., Helvaci C., Fallick A.E. (2004) – Sulphur, sulphate oxygen and strontium isotope composition of Cenozoic Turkish evaporates. *Chemical Geology*, 209, 341-356.

Parkhurst D.L., Appelo, C.A.J. (2013) - Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p.

Pearson F.J., Hanshaw B.B. (1970). Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating In *Isotope Hydrology 1970*, IAEA Symposium 129, Mars 1970, Vienne, pp. 271-286.

Pinti D.L., Marty B., 1998, The Origin of Helium in Deep Sedimentary Aquifers and the Problem of Dating Very Old Groundwaters. *Geological Society, London, Special Publications* 144(1), 53-68.

Prinzhofer A., Girard J.P., Buschaert S., Huiban Y., Noirez S., 2009. Chemical and isotopic characterization of hydrocarbon gas traces in porewater of very low permeability rocks: The example of the Callovo-Oxfordian argillites of the eastern part of the Paris Basin. *Chemical Geology* 260, 269–277.

Roche J., Grech B. (1977). Surveillance piézométrique des nappes profondes dans la région Midi-Pyrénées. Etat des relevés au 01/08/1977. Rapport 77-SGN-396-MPY. 44 pages.

Roche J. (1977). La nappe Infra-Molassique dans la région Midi-Pyrénées. Mise à jour des connaissances au 01/10/1977. Rapport 77-SGN-404-MPY. 60 pages.

Schloemer S., Oest J., Illing C.J., Elbracht J., Blumenberg, M., 2018. Spatial distribution and temporal variation of methane, ethane and propane background levels in shallow aquifers – A case study from Lower Saxony (Germany). *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19, 57–79.

Seguin J.J. (2000). Quelques éléments théoriques et pratiques sur les effets densitaires dans les aquifères. Application au cas de l'aquifère thermal de Dax. Note BRGM sur les effets densitaires dans les aquifères. 24 p., 3 annexes.

Torgersen T., Clarke W.B., 1985, Helium Accumulation in Groundwater, I: An Evaluation of Sources and the Continental Flux of Crustal 4He in the Great Artesian Basin, Australia, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 1211–1218.

Torgersen T., Ivey G.N., 1985, Helium accumulation in groundwater. II: A model for the accumulation of the crustal 4He degassing flux, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2445–2452.

United States Environmental Protection Agency (2002). EPA Region 6 – UIC pressure falloff testing guideline – Third Revision

Vandenberghe A. (1966). La nappe sous-molassique aux environs de Muret (Haute-Garonne). Résultats des travaux effectués sur le forage Mu 104. Rapport BRGM DSGR.66.A.38.

Vető I., Futó I., Horváth I., Szántó Z., (2004). Late and deep fermentative methanogenesis as reflected in the H-C-O-S isotopy of the methane-water system in deep aquifers of the Pannonian Basin (SE Hungary). *Organic Geochemistry* 35, 713–723.

AFNOR, Essais des eaux – évaluation de la teneur en sels dissous à partir de la détermination de la conductivité hydraulique théorique, Norme NF T90-111, septembre 1975.

AFNOR - Forage d'eau et de géothermie — Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages (2014). Norme NF-X-10-999, août 2014.

Annexe 1

Estimation de l'impact de la densité sur le niveau piézométrique

Compte tenu du fort contraste de conductivité (minéralisation) entre la colonne d'eau et la zone des perforations, nous avons cherché à calculer quel serait l'impact sur le niveau piézométrique si la colonne était constituée de l'eau la plus minéralisée. En supposant que l'eau contient uniquement du NaCl, il est possible de déterminer une salinité équivalente et donc d'en déduire la masse volumique de l'eau, en fonction de la température. Sur la colonne au repos, la masse volumique varie donc de 0,999 280 g.cm⁻³ au sommet de la colonne (à 15°C) à 0,993 017 g.cm⁻³ (à 39°C) en fond de puits, juste au-dessus des perforations. Après pompage, la conductivité est constante et la variation de masse volumique est due au gradient de température : elle varie de 0,998 982 g.cm⁻³ à 20°C (en sommet de colonne) à 0,993 554 g.cm⁻³ à 39°C, en fond de puits.

En faisant l'hypothèse que la masse volumique varie linéairement dans le forage :

$$\rho_{av,pomp} = 8.6986 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 017 \text{ et } \rho_{ap,pomp} = 7.5389 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 554$$

En supposant que la pression est identique au toit des perforations, avant et après pompage, il vient

$$(\rho_M \cdot g \cdot Z)_{av,pomp} = (\rho_M \cdot g \cdot Z)_{ap,pomp}$$

Où ρ_M est la masse volumique moyenne du fluide. La relation est donnée par Seguin (2000)

$$\rho_{M,av,pomp}(z) = \frac{1}{Z_{obs} - Z_{toit}} \cdot \int_0^{720} (8.6986 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 017) \cdot dz$$

$$\rho_{M,ap,pomp}(z) = \frac{1}{Z_{obs} - Z_{toit}} \cdot \int_0^z (7.5389 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 554) \cdot dz$$

En supposant $Z_{toit} = 0$ (position au sommet des perforations) et $Z_{obs,av,pomp} = 720$ m (côte mesurée avant pompage), il vient :

$$\frac{720}{720 - 0} \cdot \int_0^{720} (8.6986 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 017) \cdot dz = \frac{z}{Z_{obs} - 0} \cdot \int_0^z (7.5389 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 554) \cdot dz$$

$$\int_0^{720} (8.6986 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 017) \cdot dz = \int_0^z (7.5389 \cdot 10^{-6} \cdot z + 0.993\ 554) \cdot dz$$

$$\left[\frac{8.6986 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot z^2 + 0.993\ 017 \cdot z \right]_0^{720} = \left[\frac{7.5389 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot z^2 + 0.993\ 554 \cdot z \right]_0^z$$

$$\left[\frac{8.6986 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 720^2 + 0.993\ 017 \cdot 720 \right] = \left[\frac{7.5389 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot z^2 + 0.993\ 554 \cdot z \right]$$

$$3.7695 \cdot 10^{-6} \cdot z^2 + 0.993\ 554 \cdot z - 717.2269 = 0$$

Soit $z = 719,65$ m. Il y aurait donc un écart de l'ordre de 40 cm entre la colonne d'eau au repos et la colonne d'eau après pompage.

Annexe 2

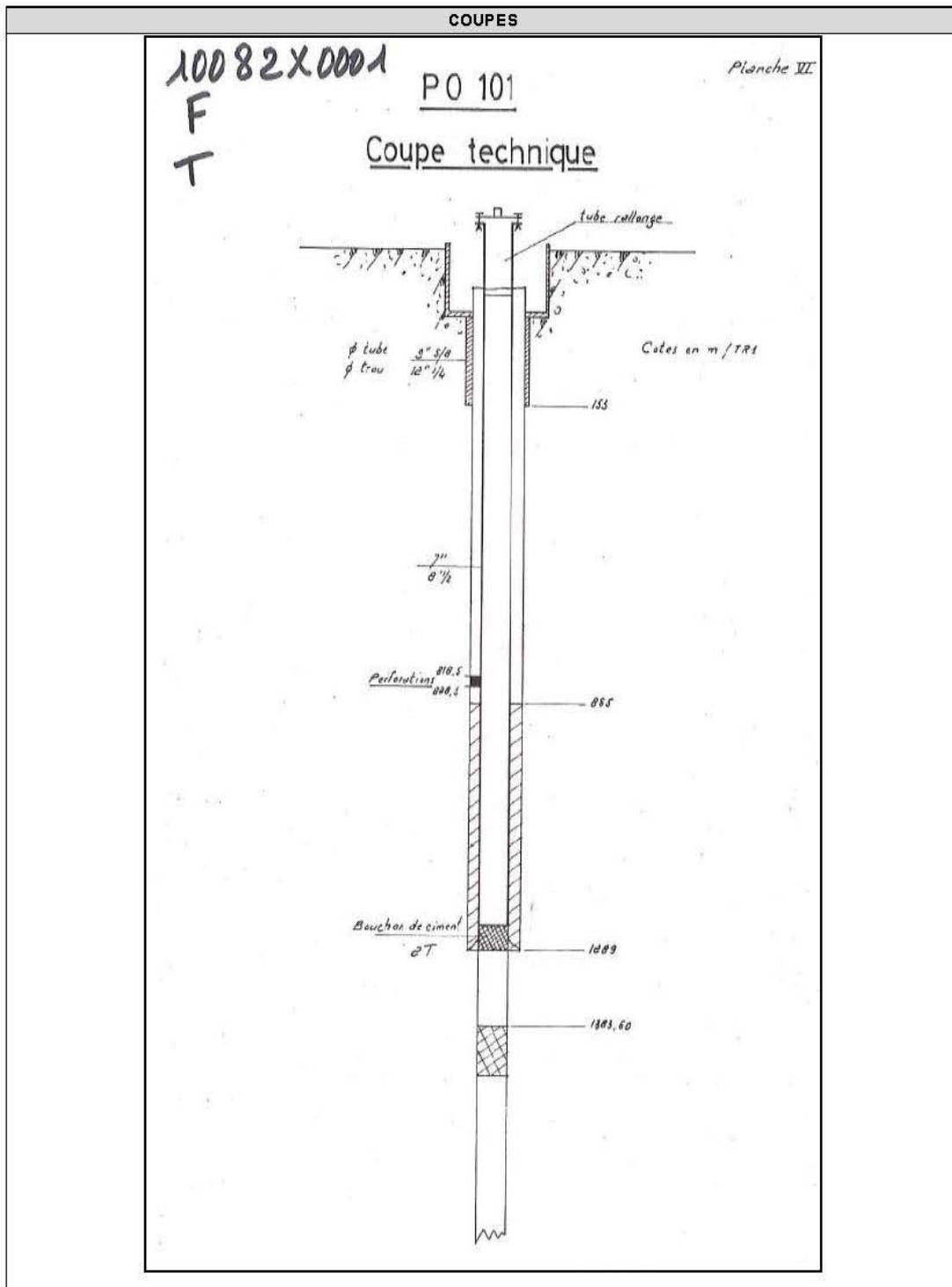
Fiche descriptive du forage Polastron 101

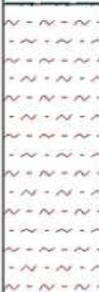
FORAGE POLASTRON 101

| LOCALISATION | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----------|-------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|-----------|---------|---------------|
| <i>Commune</i> | Polastron (32) | | | | | | | | | | |
| <i>Lieu-dit</i> | Piquemil | | | | | | | | | | |
| <i>Code BSS</i> | 10082X0001/F (BSS002HRNC) | | | | | | | | | | |
| <i>Coordonnées RGF93</i> | X = 528 283 Y = 6 271 467 | | | | | | | | | | |
| <i>Altitude au sol (mNGF)</i> | 215 (estimé) | | | | | | | | | | |
| <i>Géologie de surface</i> | Formations de pente issues de la molasse | | | | | | | | | | |
| <i>Coupe géologique / lithologique</i> | <table border="1"> <tr> <td>0 – 412 m</td> <td>Oligocène à Burdigalien</td> </tr> <tr> <td>412 - 775 m</td> <td>Yprésien sup. à Oligocène</td> </tr> <tr> <td>775 – 836 m</td> <td>Yprésien sup. à Bartonien</td> </tr> <tr> <td>836 – 887 m</td> <td>Paléocène</td> </tr> <tr> <td>> 887 m</td> <td>Maastrichtien</td> </tr> </table> | 0 – 412 m | Oligocène à Burdigalien | 412 - 775 m | Yprésien sup. à Oligocène | 775 – 836 m | Yprésien sup. à Bartonien | 836 – 887 m | Paléocène | > 887 m | Maastrichtien |
| 0 – 412 m | Oligocène à Burdigalien | | | | | | | | | | |
| 412 - 775 m | Yprésien sup. à Oligocène | | | | | | | | | | |
| 775 – 836 m | Yprésien sup. à Bartonien | | | | | | | | | | |
| 836 – 887 m | Paléocène | | | | | | | | | | |
| > 887 m | Maastrichtien | | | | | | | | | | |
| <i>Accessibilité</i> | Chemin empierré en descente sur 150 m environ (portant par temps sec) Virage à gauche pour longer la parcelle cultivée sur 70 m environ (portant par temps sec) Forage en lisière de parcelle forestière | | | | | | | | | | |
| <i>Contraintes potentielles</i> | Quelques arbustes dans l'environnement immédiat. Débroussaillage autour du forage pour dégager une aire de travail Contacter le propriétaire pour l'autorisation de débroussailler (BRGM) Contacter l'exploitant agricole pour valider la compatibilité du planning (BRGM) | | | | | | | | | | |
| <i>Contact</i> | - | | | | | | | | | | |

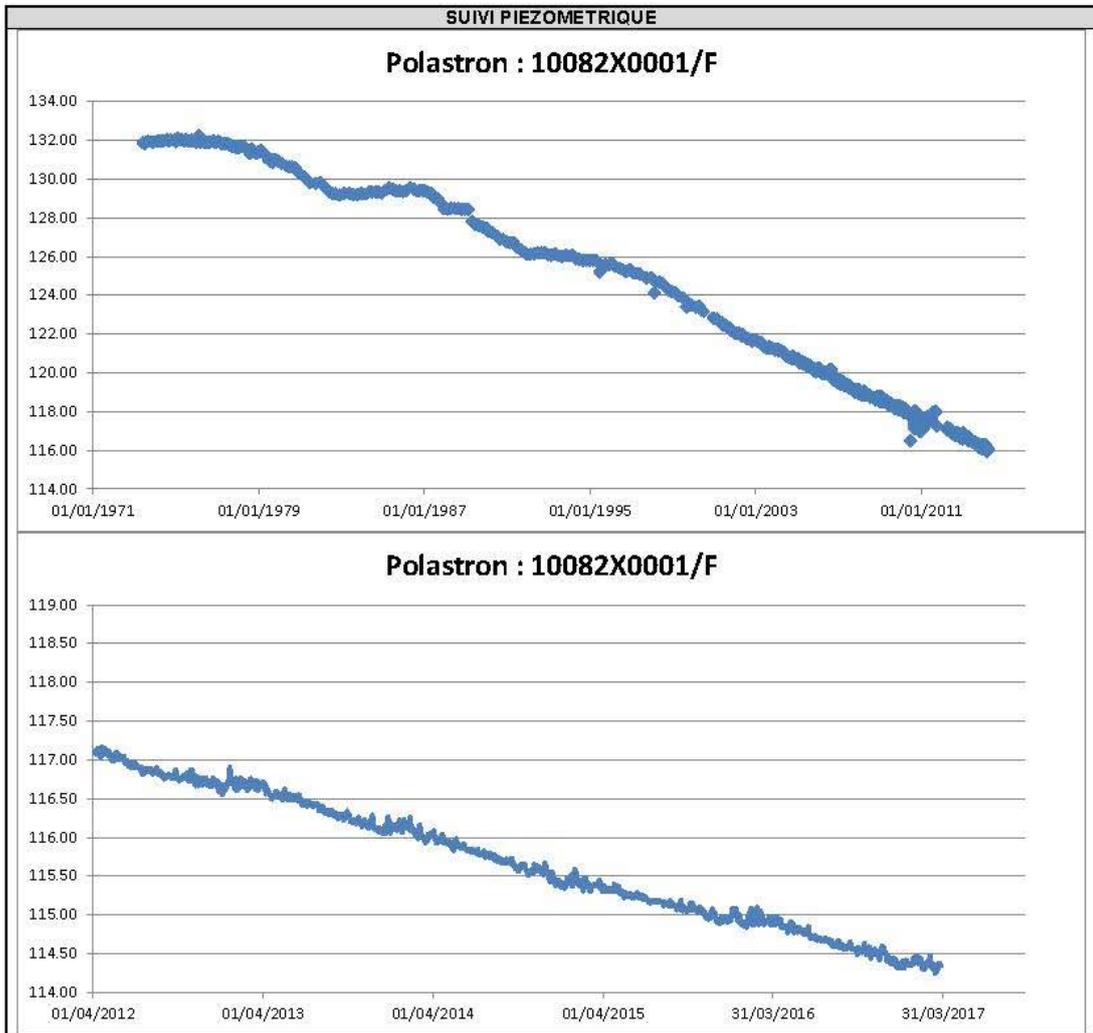
| COUPE TECHNIQUE | |
|--|---|
| <i>Nature :</i> | Forage |
| <i>Utilisation :</i> | Piézomètre |
| <i>Repère des mesures</i> | - |
| <i>Profondeur originelle (m) :</i> | 2 751 m |
| <i>Profondeur actuelle théorique (m)</i> | 1 289 m (d'après documents historiques) |
| <i>Date de réalisation</i> | 1957 |
| <i>Aquifère capté :</i> | Sables de Lussagnet |
| <i>Détail de la coupe technique intérieure</i> | |
| <i>Nature / diamètre (mm)</i> | Tube plein API 7" |
| <i>profondeur (m)</i> | 0 à 1 289 m |
| <i>Nature / diamètre (mm)</i> | |
| <i>profondeur (m)</i> | |
| <i>Nature / diamètre (mm)</i> | |
| <i>profondeur (m)</i> | |
| <i>Profondeur des perforations (m)</i> | 818,5 à 828,5 m |
| <i>Niveau piézométrique (m NGF)</i> | Autour de 116 m NGF |

| DONNEES HYDRAULIQUES | |
|----------------------|--------------------------------|
| <i>Date</i> | <i>Actions et observations</i> |
| | |



| Profondeur | Formation | Lithologie | Lithologie | Stratigraphie |
|------------|-----------------------------------|---|---|--------------------------------|
| 412.00 | |  | Burdigalien à Oligocène ? Argile et marne jaunâtres, localement sableuses, concrétions calcaires. | Oligocène à Burdigalien |
| | |  | Oligocène à Eocène ? Marne jaunâtre à grisâtre, localement sableuse, graviers siliceux, passages gréseux, concrétions calcaires. | Yprésien supérieur à Oligocène |
| | |  | Sable et gravier siliceux, peu de marne jaunâtre. | |
| | |  | Argile brun rougeâtre à petites intercalations sableuses. | |
| 775.00 | |  | Sable blanc et marne rouge violacé. | Yprésien supérieur à Bartonien |
| 797.00 | Formation des Sables de Lussagnet |  | Calcaire gris beige à beige crème, vacuolaire à géodes, microgrumeleux, pseudoolithique, passées de calcaire bréchique à matrice d'argile bariolée. | |
| 812.00 | |  | Dolomie blanche et beige blanchâtre, vacuolaire, pseudoolithique, strates d'argile verte. | Paléocène |
| 836.00 | Formation d'Arcet |  | Argile sableuse, bariolée, rougeâtre, grisâtre, grès argileux. | Maastrichtien |
| 864.00 | |  | Argile sableuse, grise à noirâtre, débris charbonneux à 990 m. | |
| 887.00 | | | | |
| 955.00 | | | | |





Annexe 3

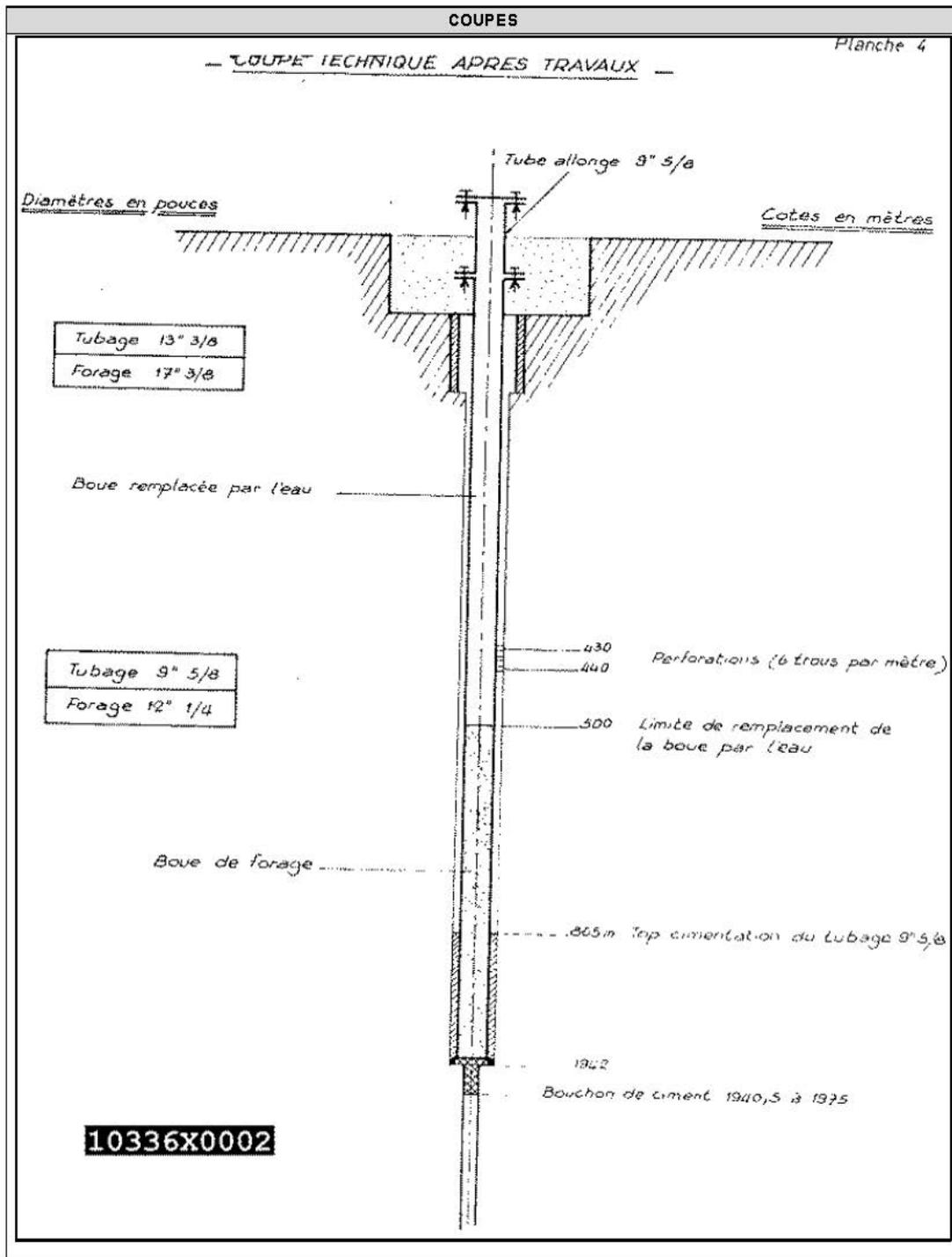
Fiche descriptive du forage Saint-André

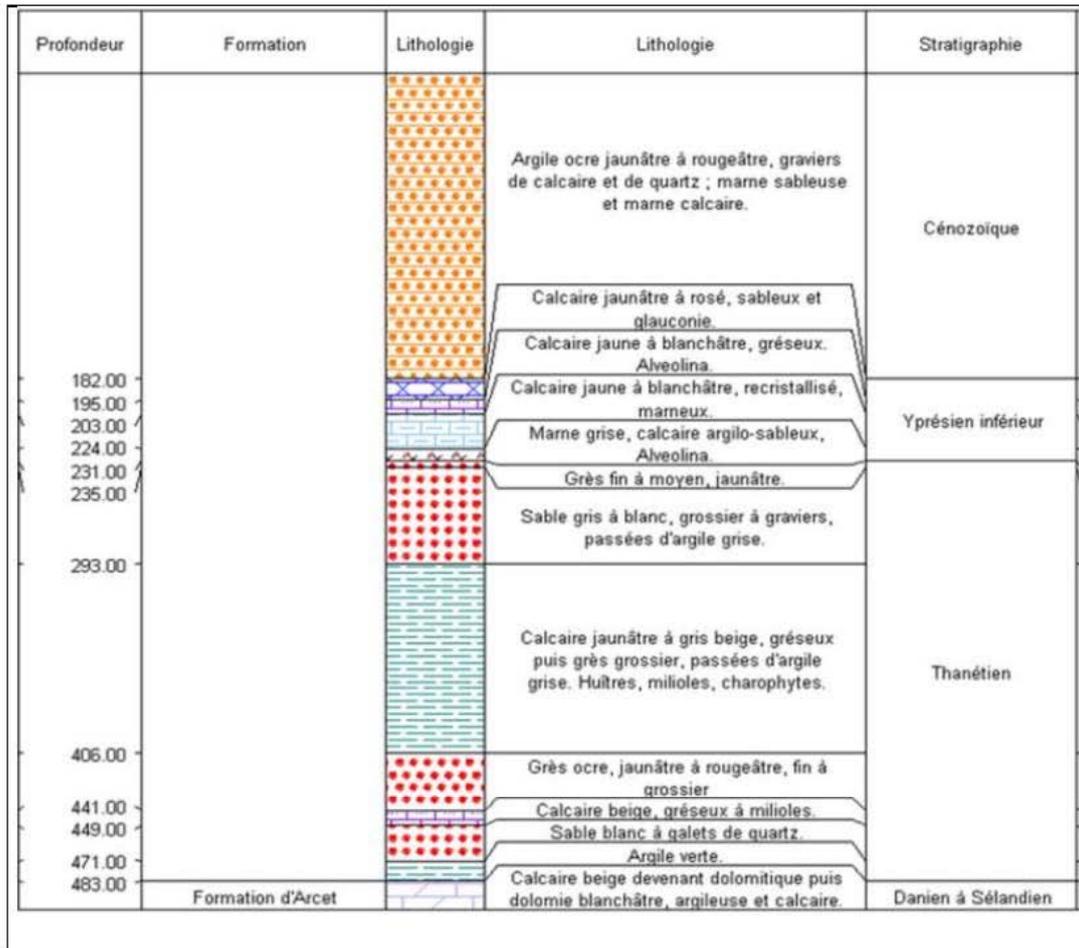
FORAGE SAINT ANDRE

| LOCALISATION | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|-----------|------------|-------------|--------------------|-------------|-----------|---------|--------------------|
| Commune | Saint André (31) | | | | | | | | |
| Lieu-dit | Piquemil | | | | | | | | |
| Code BSS | 10336X0002/F (BSS002KEHH) | | | | | | | | |
| Coordonnées RGF93 | X = 524 490 Y = 6 245 706 | | | | | | | | |
| Altitude au sol (mNGF) | 305 (estimé) | | | | | | | | |
| Géologie de surface | Alluvions récentes, sur mames et molasses de l'Helvétien | | | | | | | | |
| Coupe géologique / lithologique | <table border="1"> <tr> <td>0 - 182 m</td> <td>Cénozoïque</td> </tr> <tr> <td>182 - 231 m</td> <td>Yprésien inférieur</td> </tr> <tr> <td>231 - 483 m</td> <td>Thanétien</td> </tr> <tr> <td>> 483 m</td> <td>Danien à Séländien</td> </tr> </table> | 0 - 182 m | Cénozoïque | 182 - 231 m | Yprésien inférieur | 231 - 483 m | Thanétien | > 483 m | Danien à Séländien |
| 0 - 182 m | Cénozoïque | | | | | | | | |
| 182 - 231 m | Yprésien inférieur | | | | | | | | |
| 231 - 483 m | Thanétien | | | | | | | | |
| > 483 m | Danien à Séländien | | | | | | | | |
| Accessibilité | Chemin plat empierré sur 1 km environ, quelques passages boueux Plate-forme bétonnée autour du forage | | | | | | | | |
| Contraintes potentielles | Privilégier temps sec | | | | | | | | |
| Contact | - | | | | | | | | |

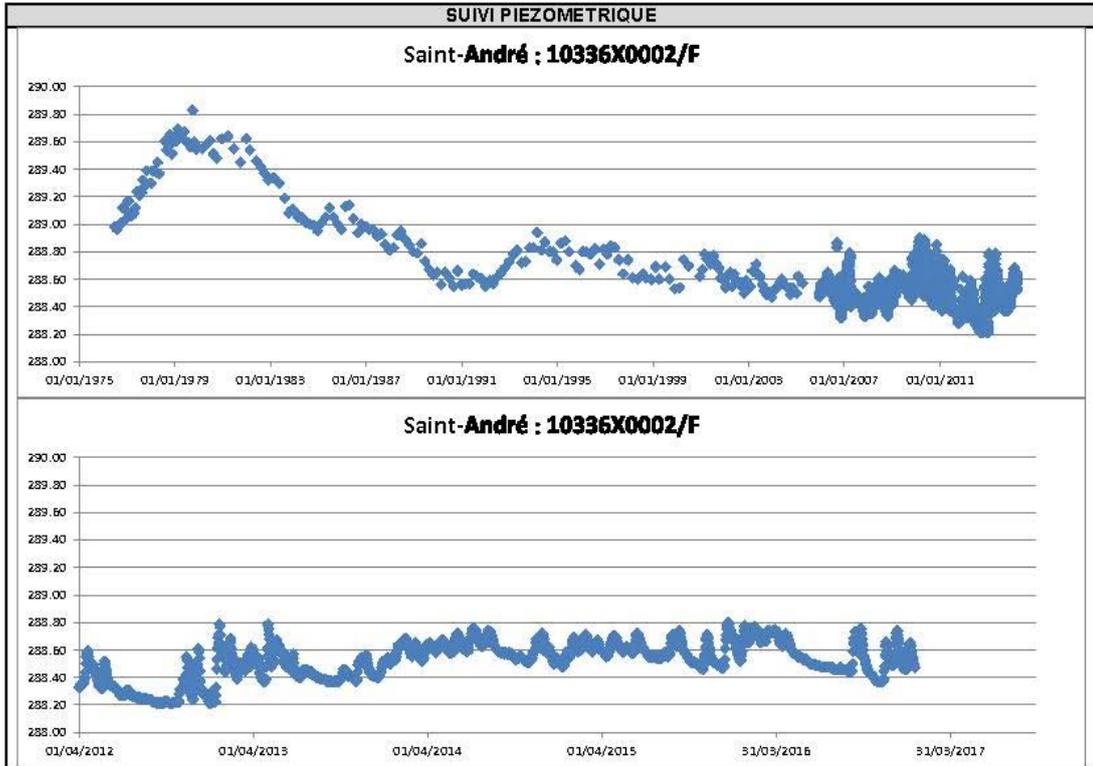
| COUPE TECHNIQUE | |
|---|--|
| Nature : | Forage |
| Utilisation : | Piézomètre |
| Repère des mesures | - |
| Profondeur originelle (m) : | 4 202 m |
| Profondeur actuelle théorique (m) | 1 940,5 m (en boue de 1 940,5 à 500 m) |
| Date de réalisation | 1957 |
| Aquifère capté : | Sables de Lussagnet |
| Détail de la coupe technique intérieure | |
| Nature / diamètre (mm) | Tube plein API 9"5/8 |
| profondeur (m) | 0 à 1 942 m |
| Nature / diamètre (mm) | |
| profondeur (m) | |
| Nature / diamètre (mm) | |
| profondeur (m) | |
| Profondeur des perforations (m) | 430 à 440 m |
| Niveau piézométrique (m/repère) | Autour de 288 m NGF |

| DONNEES HYDRAULIQUES | |
|----------------------|-------------------------|
| Date | Actions et observations |
| | |









Annexe 4

Fiche descriptive du forage de Lacquy

FORAGE DE LACQUY

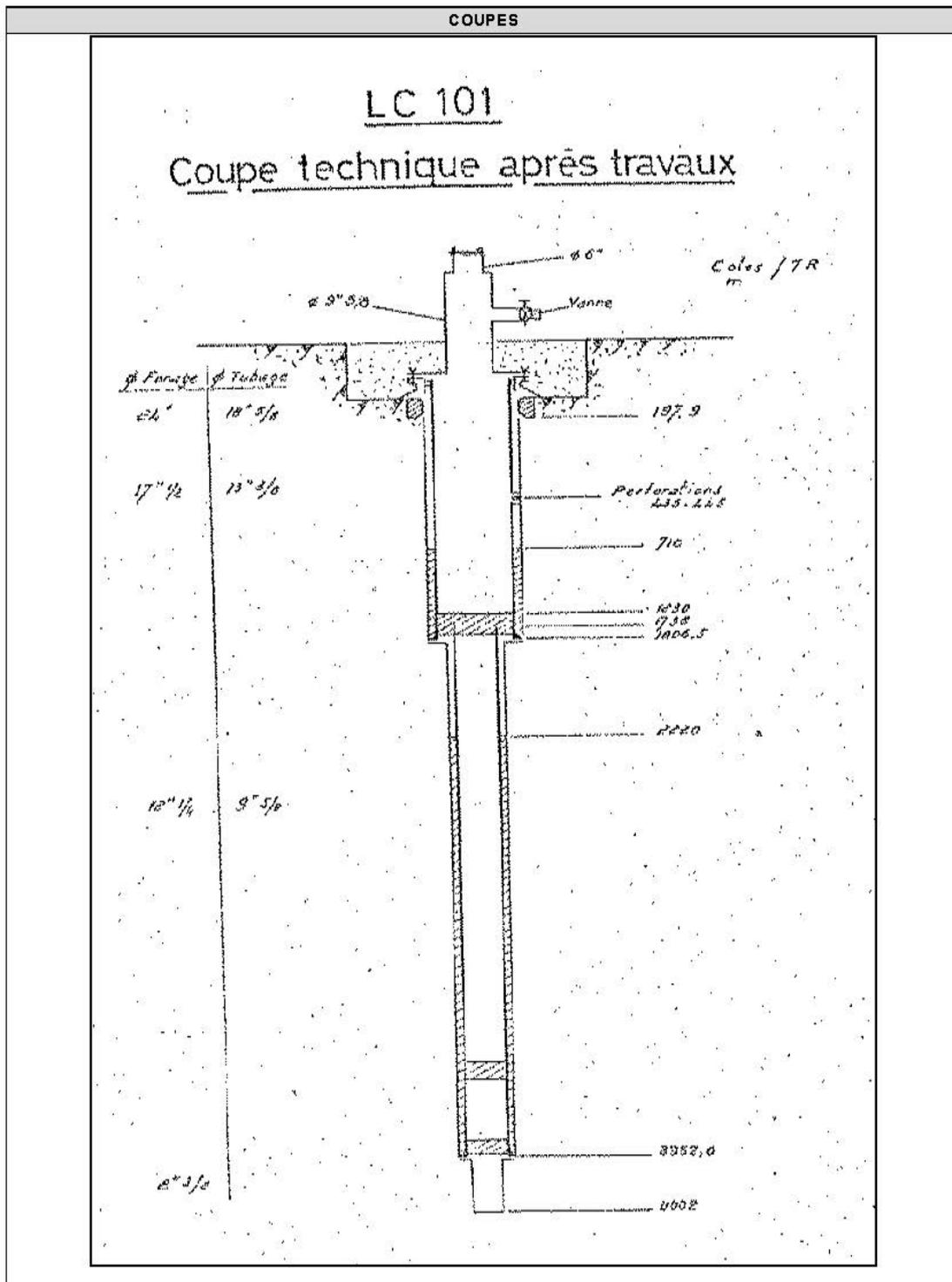
| LOCALISATION | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|-----------|---------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-----------|---------|------------------------|
|  | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Commune | Lacquy (40) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lieu-dit | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Code BSS | 09266X0004/LC101 (BSS002CXHS) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coordonnées RGF93 | X = 437 385 Y = 6 323 348 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Altitude au sol (mNGF) | 110 (estimé) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Géologie de surface | Plio-Quaternaire - Formation des Sables Fauves | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coupe géologique / lithologique | <table border="1"> <tr> <td>0 – 171 m</td> <td>Miocène</td> </tr> <tr> <td>171 – 351 m</td> <td>Stampien</td> </tr> <tr> <td>351 – 430 m</td> <td>Bartonien</td> </tr> <tr> <td>430 – 499 m</td> <td>Yprésien supérieur</td> </tr> <tr> <td>499 – 548 m</td> <td>Maastrichtien</td> </tr> <tr> <td>548 – 625 m</td> <td>Cénomaniens</td> </tr> <tr> <td>625 – 641 m</td> <td>Aptien inférieur</td> </tr> <tr> <td>641 – 1 060 m</td> <td>Tithonien</td> </tr> <tr> <td>> 1 060</td> <td>Kimméridgien supérieur</td> </tr> </table> | 0 – 171 m | Miocène | 171 – 351 m | Stampien | 351 – 430 m | Bartonien | 430 – 499 m | Yprésien supérieur | 499 – 548 m | Maastrichtien | 548 – 625 m | Cénomaniens | 625 – 641 m | Aptien inférieur | 641 – 1 060 m | Tithonien | > 1 060 | Kimméridgien supérieur |
| 0 – 171 m | Miocène | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 171 – 351 m | Stampien | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 351 – 430 m | Bartonien | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 430 – 499 m | Yprésien supérieur | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 499 – 548 m | Maastrichtien | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 548 – 625 m | Cénomaniens | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 625 – 641 m | Aptien inférieur | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 641 – 1 060 m | Tithonien | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 1 060 | Kimméridgien supérieur | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Accessibilité | Chemin goudronné depuis la route, fermé par portail, sur 300 m Bifurcation à droite, traverser espace enherbé sur 70 m (sol portant par temps sec) Plate-forme bétonnée ancienne (+0,3/0,4 m par rapport au terrain naturel) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contraintes potentielles | Accès impératif par temps sec Débroussaillage léger sur l'espace enherbé, autour de la plate-forme et du forage pour favoriser l'accès (selon gabarit) Plate-forme légèrement surélevée par rapport au terrain naturel, formant une butte | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contact | M. ACHILI (gestionnaire) : 06 89 99 76 70 M. TARTAS Philippe (agriculteur locataire) : 06 08 88 34 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

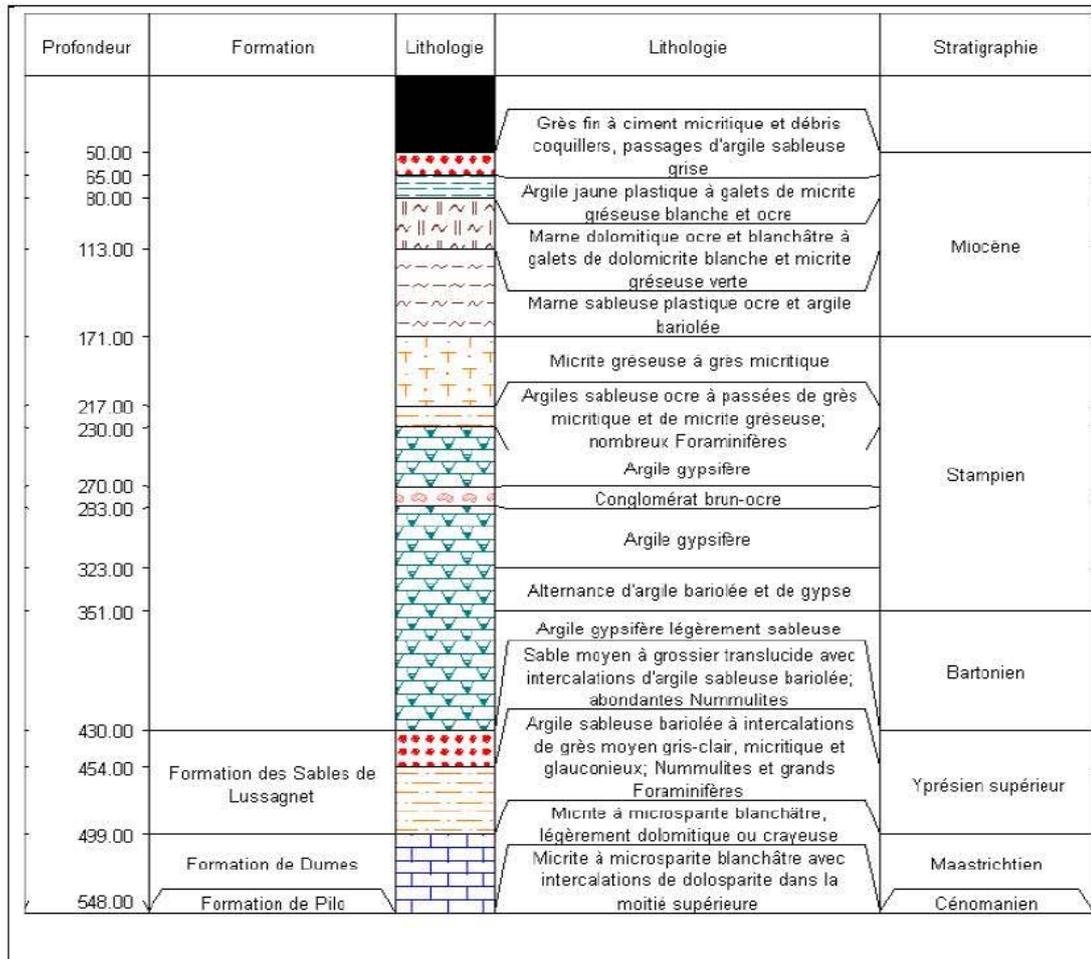
COUPE TECHNIQUE

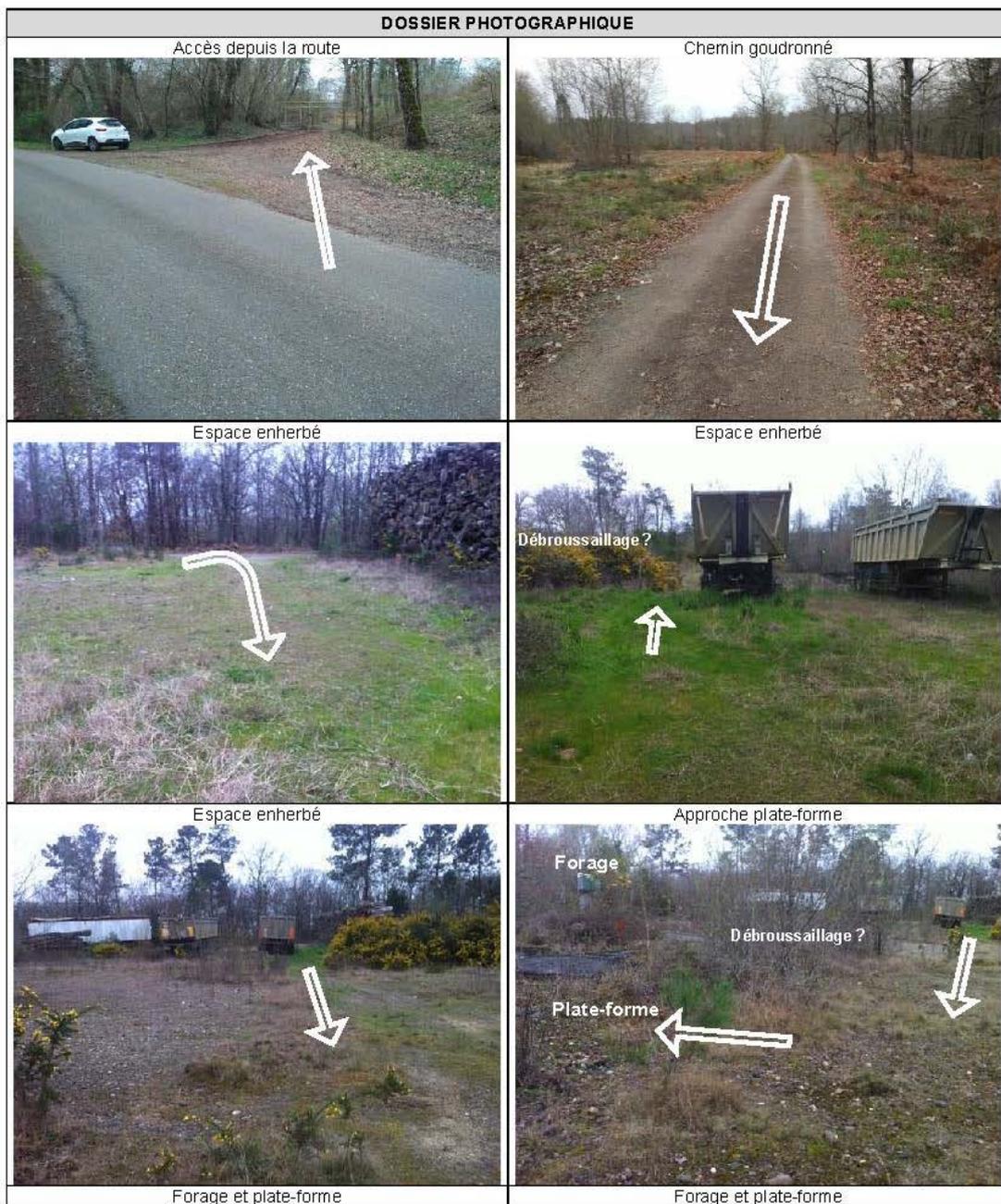
| | |
|---|---|
| Nature : | Forage |
| Utilisation : | Piézomètre |
| Repère des mesures | - |
| Profondeur originelle (m) : | 4 002 m |
| Profondeur actuelle théorique (m) | 1 230 m (d'après documents historiques) |
| Date de réalisation | 1972 |
| Aquifère capté : | Sables de Lussagnet |
| Détail de la coupe technique intérieure | |
| Nature / diamètre (mm) | Tube plein API 13"3/8 |
| profondeur (m) | 0 à 1 806,5 m |
| Nature / diamètre (mm) | Tube plein API 9"5/8 |
| profondeur (m) | 1 738 à 3 962 m |
| Nature / diamètre (mm) | Trou nu 8"3/8 |
| profondeur (m) | 3 962 à 4 002 m |
| Profondeur des perforations (m) | 435 à 445 m |
| Niveau piézométrique (m NGF) | Autour de 78 m NGF |

DONNEES HYDRAULIQUES

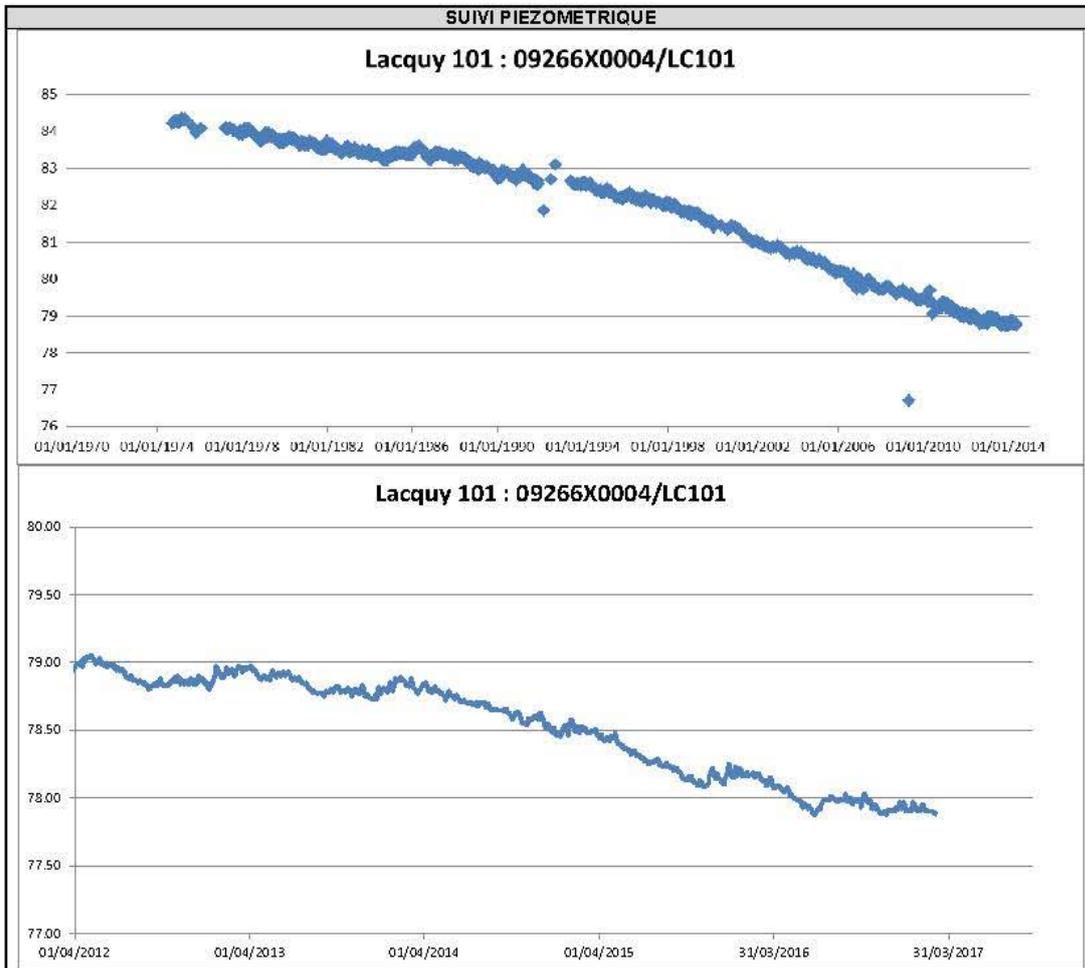
| Date | Actions et observations |
|-------------|---|
| 1983 - 1984 | Injection – retour à l'équilibre rapide |











Annexe 5

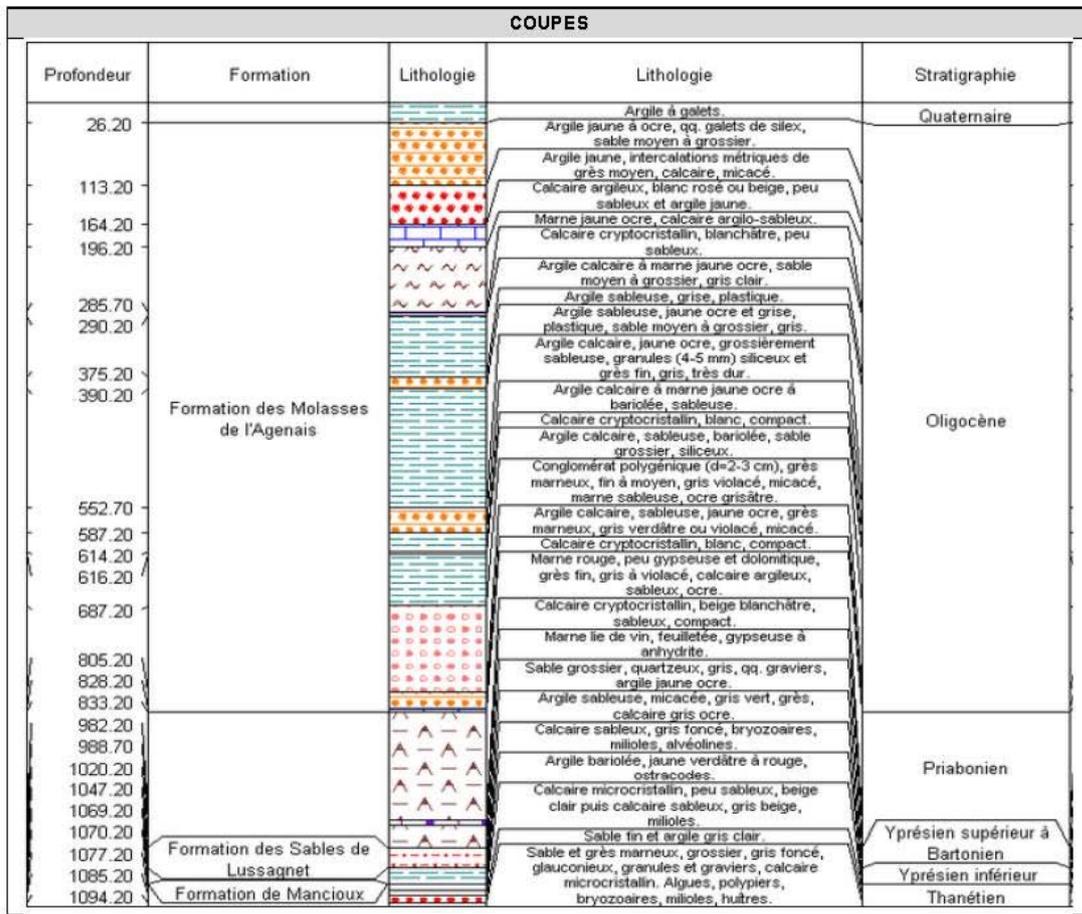
Fiche descriptive du forage Muret 104

FORAGE MURET 104

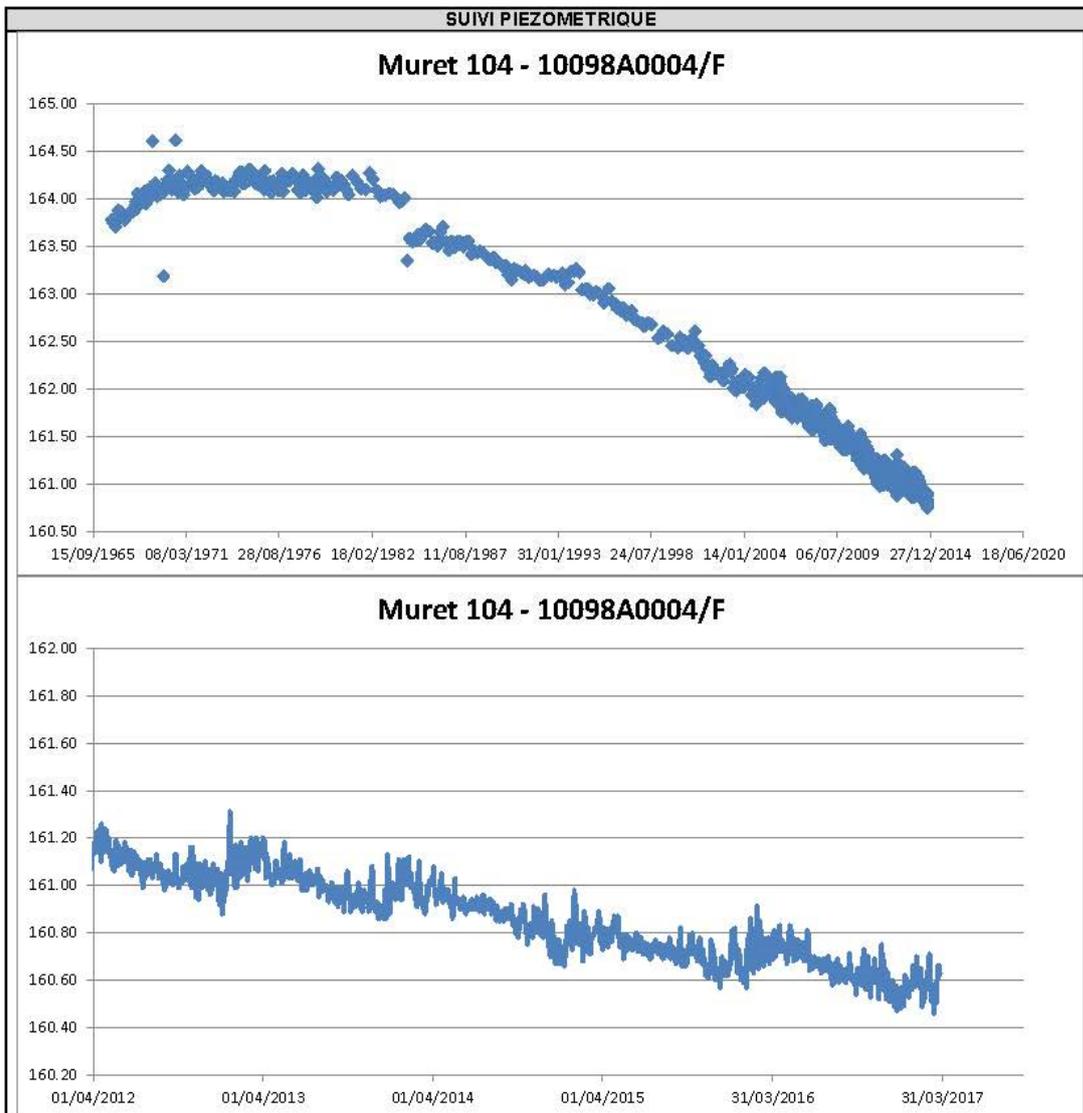
| LOCALISATION | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------|-------------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|
| Commune | Eaunes (31) | | | | | | | | | | | | |
| Lieu-dit | Ganties | | | | | | | | | | | | |
| Code BSS | 10098A0004/F (BSS002HVPP) | | | | | | | | | | | | |
| Coordonnées RGF93 | X = 568 116 Y = 6 262 833 | | | | | | | | | | | | |
| Altitude au sol (mNGF) | 175 (estimé) | | | | | | | | | | | | |
| Géologie de surface | Quaternaire – Alluvions des basses terrasses | | | | | | | | | | | | |
| Coupe géologique / lithologique | <table border="1"> <tr> <td>0 – 26 m</td> <td>Quaternaire</td> </tr> <tr> <td>26 – 833 m</td> <td>Oligocène</td> </tr> <tr> <td>833 – 1 020 m</td> <td>Priarbonien</td> </tr> <tr> <td>1 020 – 1 047 m</td> <td>Yprésien sup. à Bartonien</td> </tr> <tr> <td>1 047 – 1 069 m</td> <td>Yprésien inf.</td> </tr> <tr> <td>> 1 069 m</td> <td>Thanétien</td> </tr> </table> | 0 – 26 m | Quaternaire | 26 – 833 m | Oligocène | 833 – 1 020 m | Priarbonien | 1 020 – 1 047 m | Yprésien sup. à Bartonien | 1 047 – 1 069 m | Yprésien inf. | > 1 069 m | Thanétien |
| 0 – 26 m | Quaternaire | | | | | | | | | | | | |
| 26 – 833 m | Oligocène | | | | | | | | | | | | |
| 833 – 1 020 m | Priarbonien | | | | | | | | | | | | |
| 1 020 – 1 047 m | Yprésien sup. à Bartonien | | | | | | | | | | | | |
| 1 047 – 1 069 m | Yprésien inf. | | | | | | | | | | | | |
| > 1 069 m | Thanétien | | | | | | | | | | | | |
| Accessibilité | A 25 m environ de la route Sur une parcelle utilisée occasionnellement pour le stockage de matériaux. Terrain portant par temps sec Accessible en avril 2017 | | | | | | | | | | | | |
| Contraintes potentielles | Contact avant intervention pour valider le passage (BRGM) | | | | | | | | | | | | |
| Contact | - | | | | | | | | | | | | |

| COUPE TECHNIQUE | |
|---|---|
| Nature : | Forage |
| Utilisation : | Piézomètre |
| Repère des mesures | - |
| Profondeur originelle (m) : | 1 410 m |
| Profondeur actuelle théorique (m) | 1 043 m (d'après documents historiques) |
| Date de réalisation | 1965 |
| Aquifère capté : | Sables de Lussagnet |
| Détail de la coupe technique intérieure | |
| Nature / diamètre (mm) | Tube plein API 9"3/8 |
| profondeur (m) | 0 à 1 088,9 m |
| Nature / diamètre (mm) | Trou nu 8"1/2 |
| profondeur (m) | 1 088,9 à 1 404,5 m |
| Nature / diamètre (mm) | Trou nu 6"3/16 |
| profondeur (m) | 1 404,5 à 1 410 m |
| Profondeur des perforations (m) | 1 031,6 à 1 040 m |
| Niveau piézométrique (m/repère) | Autour de 160 m NGF |

| DONNEES HYDRAULIQUES | |
|----------------------|--|
| Date | Actions et observations |
| janvier 1984 | Pompage à 1,5 m ³ /h. Pas de retour au niveau piézométrique initial |







Annexe 6

Diagnostic du forage Polastron 101 - Rapport Hydro Assistance



BRGM

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE



OCTOBRE 2017

DIAGNOSTIC D'OUVRAGE

FORAGE PO 101- 32130 POLASTRON
BSS002HRNC (10082X0001/F)

Examen endoscopique
Diagraphies de production

Référence rapport : HA_05-2018/04

Département du Gers

SIEGE SOCIAL
2 Allée Dache Dize
40180 HINX
Tél : 05.58.98.55.66 – Fax : 05.58.98.47.72



<http://www.hydro-assistance.fr>

Agence BORDEAUX
33 Rue El Alamein
33400 TALENCE
Tél : 05.56.90.82.41 – Fax : 05.56.90.82.42

SARL au capital de 740 000 € - R.C.S. DAX 499 405 587 - SIRET 499 405 587 00019 - Code APE 7112 B

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1 PRESENTATION DE L'INTERVENTION..... | 1 |
| 1.1- MOTIF D'INTERVENTION | 2 |
| 1.2- DATES D'INTERVENTION | 2 |
| 1.3- OBJECTIFS..... | 2 |
| 1.4- MESURES REALISEES..... | 2 |
| 1.5- OPERATEURS | 2 |
| 2 LOCALISATION DE L'OUVRAGE | 3 |
| 2.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE | 4 |
| 2.2- COORDONNEES | 4 |
| 3 PRESENTATION DE L'OUVRAGE | 5 |
| 3.1- IDENTIFICATION | 6 |
| 3.2- PHOTOGRAPHIE DU SITE..... | 6 |
| 3.3- ORIGINE DES MESURES | 6 |
| 3.4- DONNEES HYDROGEOLOGIQUES | 6 |
| 4 COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE | 7 |
| 4.1- COUPE TECHNIQUE | 8 |
| 4.1.1) D'après les documents existants | 8 |
| 4.1.2) D'après l'examen endoscopique..... | 8 |
| 4.2- COUPE GEOLOGIQUE DISPONIBLE..... | 8 |
| 5 JOURNAL DES TRAVAUX..... | 9 |
| 6 EXAMEN ENDOSCOPIQUE | 11 |
| 7 MESURES | 13 |
| 7.1- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE | 14 |
| 7.2- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION APRES POMPAGE | 14 |
| 7.3- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION EN POMPAGE (Q = 4.2 M ³ /H) | 15 |
| 8 BILAN | 16 |

Table des annexes

ANNEXE 1 PRESENTATION DU SITE

ANNEXE 2 COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

ANNEXE 3 SUIVI DE POMPAGE DU 16 OCTOBRE 2017

ANNEXE 4 DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

ANNEXE 5 EXAMEN ENDOSCOPIQUE

1

PRESENTATION DE L'INTERVENTION

1.1- Motif d'intervention

DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE

1.2- Dates d'intervention

09 ET 16-17 OCTOBRE 2017

1.3- Objectifs

- contrôle du vieillissement et de l'état mécanique des équipements
- caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'ouvrage

1.4- Mesures réalisées

Le 09 octobre 2017

- **Examen endoscopique**
Caméra numérique couleur à visées axiale et radiale
Réalisé sans pompage : de 0 à 951.40 mètres
- **Diagraphies de production naturelle**
Température, conductivité, flux : de 108.50 à 947.70 mètres
pH, redox, oxygène dissous : de 108.50 à 948.10 mètres

Les 16 et 17 octobre 2017

- **Pompages**
Pompe immergée : diamètre 4"
Installée à : 150 m/repère
Débit pompé : 4.3 m³/h
- **Diagraphies de production après pompage (Q_{moy} = 4.2 m³/h)**
Série 1 : (à la descente)
Température, conductivité : de 102.00 à 949.80 mètres
pH, redox, oxygène dissous : de 101.80 à 949.80 mètres

Série 2 : (à la remontée)
Température, conductivité : de 101.70 à 949.70 mètres
pH, redox, oxygène dissous : de 99.60 à 949.70 mètres
- **Diagraphies de production en pompage (Q = 4.2 m³/h)**
Température, conductivité : de 197.30 à 797.00 mètres

1.5- Opérateurs

1^{ère} intervention : Alain CHAPITEAU
Frank LARRERE

2^{ème} intervention : Christophe FATA
Philippe MANCEAU

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

2.1- Situation géographique



Département : Gers (32)
 Commune : Polastron
 Localisation : lieu-dit "Piquemil"
 Référence cadastrale : section B - parcelle 4



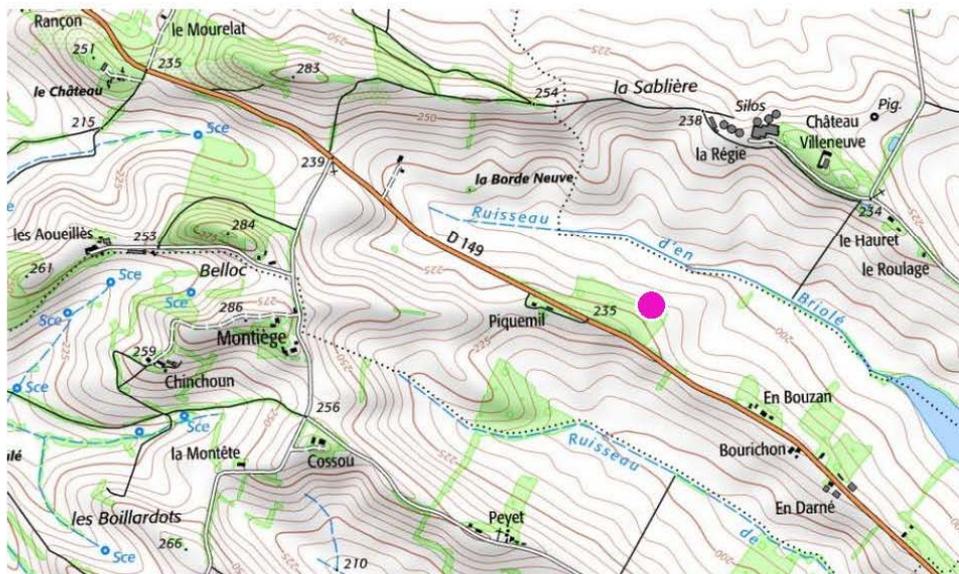
2.2- Coordonnées

Coordonnées Lambert-93 (en mètres) :

X = 528 380

Y = 6271 334

Z = 215 m NGF



Carte IGN : Samatan - 19440

3

PRESENTATION DE L'OUVRAGE

3.1- Identification

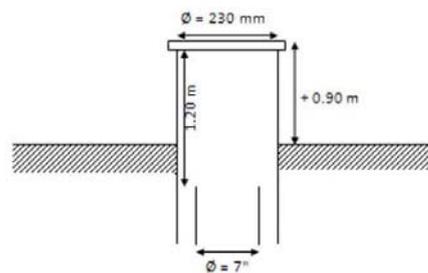
| | |
|------------------------|--|
| Indice BRGM : | BSS002HRNC (ancien code : 10082X0001/F) |
| Dénomination : | forage PO 101 |
| Date de création : | 1957 |
| Profondeur théorique : | 1289 mètres |
| Utilisation : | suivi piézométrique de la nappe infra-molassique |

3.2- Photographie du site



3.3- Origine des mesures

| | |
|------------|--|
| Repère : | bride en acier - diamètre interne 230 mm |
| Position : | + 0.90 m/sol |



3.4- Données hydrogéologiques

| | |
|-------------------|---|
| Aquifère capté : | Yprésien supérieur à Bartonien (Eocène) - Sables de Lussagnet |
| Niveau statique : | NS = - 102.28 m/repère (09/10/2017) |
| | NS = - 102.80 m/repère (16/10/2017) |

COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE

4.1- Coupe technique

4.1.1) D'après les documents existants

▪ La foration

- de 0 à 153 m : diamètre 12^{n1/4} (311 mm)
- de 153 à 1289.10 m : diamètre 8^{n1/2} (216 mm)
- de 1289.10 à 2751.20* m : diamètre 6" (152 mm)

* profondeur initiale avant transformation en piézomètre

▪ Les équipements

- de 0 à 153 m : tube en acier, diamètre 9^{n5/8}, espace annulaire cimenté
- de 0 à 1289 m : tube en acier, diamètre 7", espace annulaire cimenté à partir de 865 mètres
- à 1289 m : perforations de 818.50 à 828.50 mètres
bouchon de ciment

4.1.2) D'après l'examen endoscopique

- de 0 à 1.20 m : tube en acier, diamètre interne 230 mm
- de 1.20 à 951.40 m : tube en acier, diamètre 7"
perforations non repérées car encroûtement des parois marqué
- à 951.40 m : base de l'ouvrage - dépôts

4.2- Coupe géologique disponible

| Profondeurs | Lithologie | Stratigraphie |
|-------------|---|--------------------------------|
| 0 - 412 m | Argile et marne jaunâtres, localement sableuses, concrétions calcaires | Oligocène à Burdigalien |
| 412 - 775 m | Marne jaunâtre à grisâtre, localement sableuse, graviers siliceux, passages gréseux, concrétions calcaires | Yprésien supérieur à Oligocène |
| 775 - 797 m | Sable et graviers siliceux, peu de marne jaunâtre | Yprésien supérieur à Bartonien |
| 797 - 812 m | Argile brun rougeâtre à petites intercalations sableuses | |
| 812 - 836 m | Sable blanc et marne rouge violacé | |
| 836 - 864 m | Calcaire gris beige à beige crème, vacuolaire à géode, microgrumeleux, pseudoolithique, passées de calcaire bréchique à matrice d'argile bariolée | Paléocène |
| 864 - 887 m | Dolomie blanche et beige blanchâtre, vacuolaire, pseudoolithique, strates d'argile verte | Maastrichtien |
| 887 - 955 m | Argile sableuse, bariolée, rougeâtre, grisâtre, grès argileux | |
| 955 - 990 m | Argile sableuse, grise à noirâtre, débris charbonneux à 990 mètres | |

| Dates | Heures | Opérations |
|-------------------------------------|--------|---|
| 1^{ère} INTERVENTION | | |
| 09/10/2017 | 10h00 | Arrivée su site et mise en place du matériel |
| | 10h55 | Réalisation de l'examen endoscopique en régime statique |
| | 15h05 | Réalisation des diagraphies de production naturelle (température, conductivité, pH, redox, oxygène dissous et flux) |
| | 17h30 | Repli du matériel |
| | 19h30 | Départ du site |
| 2^{ème} INTERVENTION | | |
| 16/10/2017 | 09h00 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 10h50 | Mise en place de la pompe de test 4" à 150 mètres |
| | 12h23 | Début du pompage au débit moyen de 4.3 m ³ /h |
| | 12h30 | Dysfonctionnement de la sonde de mesures |
| | 16h25 | Arrêt du pompage |
| | 16h40 | Manutention de la pompe de test pour réparation de la sonde de mesures |
| | 18h30 | Réalisation de deux séries de diagraphies de production après pompage (température, conductivité, pH, redox, oxygène dissous) |
| | 20h30 | Repli du matériel |
| | 21h00 | Départ du site |
| 17/10/2017 | 07h30 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 09h50 | Mise en place de la pompe de test 4" à 150 mètres |
| | 11h02 | Début du pompage au débit moyen de 4.3 m ³ /h |
| | 12h05 | Réalisation de diagraphies de production en pompage (température, conductivité) |
| | 13h00 | Essais de mesures ponctuelles de flux (Heat Pulse) <ul style="list-style-type: none"> ▪ à 840 mètres ▪ à 830 mètres ▪ à 817 mètres ▪ à 800 mètres |
| | 13h40 | Réalisation d'une seconde série de diagraphies de production en pompage (température et conductivité) |
| | 14h31 | Arrêt du pompage |
| | 14h35 | Remontée de la pompe de test |
| | 15h00 | Repli du matériel |
| | 16h00 | Départ du site |

6

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

L'examen endoscopique sur cet ouvrage n'a pu être réalisé qu'au droit de la partie supérieure accessible et non condamnée de cet ouvrage et notamment au niveau de la chambre de pompage ; la condamnation du sommet de la zone en trou nu à la profondeur de 1289 mètres étant surmontée de dépôts et de sédiments.

La partie émergée de la chambre de pompage présente un état de vieillissement apparent modéré, qui reste néanmoins marquée par la présence d'une croûte oxydée d'aspect homogène et continue, au niveau de laquelle de petits nodules sont visibles.

Les filetages des raccords vissés entre tubes restent globalement tous bien visibles.

Hormis la disparition des filetages au droit des raccords entre tubes jusqu'à la profondeur de 250 mètres environ, qui atteste d'un remplissage de matières qui semble être d'origine, l'aspect général des parois situées au droit de la partie immergée est globalement satisfaisant. Seules des traces de frottements sont visibles sous la forme de stries verticales à partir de profondeur de 191 mètres sous le repère.

A partir de la profondeur de 206 mètres, l'état des parois s'améliore encore davantage et seules quelques traces résiduelles de dépôts restent présentes et sont plus visibles au droit des raccords vissés entre tubes. Cet aspect plutôt uniforme se prolonge jusqu'à la profondeur de 776 mètres, avec la présence de quelques zones présentant des traces de frottements, qui s'accompagnent localement de petites plaques de dépôt, en particulier entre les profondeurs de 750 et 776 mètres.

A partir de 776 mètres, des dépôts blanchâtres sous forme de petites plaques apparaissent progressivement.

En dessous de la profondeur de 780 mètres sous le repère, de petits encroûtements apparaissent, en particulier à partir de 789 mètres où les parois deviennent blanches et grisâtres. Cette croûte de dépôts est marquée par de nombreuses traces de frottements horizontaux et verticaux.

Au droit de la zone de perforations théorique comprise entre les profondeurs de 818 à 829 mètres environ, une modification notable de l'aspect des parois est évidente avec notamment un éclaircissement général où des marbrures grisâtres et des traces d'incrustations plus marquées restent cependant visibles.

La présence des perforations au droit de cette zone n'a pas pu être constatée visuellement lors de cet examen endoscopique, celles-ci étant vraisemblablement masquées sous les dépôts.

La section du tubage en acier comprise entre les profondeurs de 829 à 860 mètres sous le repère présente de nombreux dépôts visibles sous la forme de plaques et de croûtes parfois épaisses.

A partir de la profondeur de 860 mètres, l'aspect des parois redevient visuellement plus sain et peu de traces d'incrustations ou de dépôts sont visibles. Cet aspect de bonne conservation apparente se prolonge jusqu'à la profondeur de 915 mètres sous le repère.

De 915 mètres à 951.40 mètres, les parois des tubages sont à nouveau marquées par des concrétions plus ou moins épaisses. A 944 mètres sous le repère, elles apparaissent sous forme de plaques peu épaisses et clairsemées.

La base de l'ouvrage a été atteinte à la profondeur de 951.40 mètres, soit à près de 338 mètres au-dessus de la profondeur théorique de l'ouvrage correspondant au sommet de la zone d'obturation annoncée de 1289 mètres.

S'il devait s'agir d'un comblement de dépôts, le volume calculé représenterait environ 8 à 9 m³.

7

MESURES

7.1- Diagraphies de production naturelle

L'ensemble des paramètres physico chimiques enregistré est révélateur de la nature statique de la colonne d'eau observée entre le sommet des mesures, correspondant globalement au niveau piézométrique, et la profondeur de la zone de perforations annoncée vers 820 mètres, au niveau de laquelle plusieurs points d'inflexion marquent l'ensemble des profils.

La partie supérieure des mesures se caractérise notamment par un gradient de température très significatif de la nature statique de la colonne d'eau dans ce contexte, avec $1.04^{\circ}\text{C}/30$ mètres jusqu'à la profondeur de 816 mètres.

En dessous de cette limite, la présence de points d'inflexion marque le sommet d'une colonne d'eau dont la physico-chimie contrastée et la variation du gradient de température notamment, de $0.87^{\circ}\text{C}/30$ mètres, atteste de la nature dynamique de la colonne d'eau où le forage est le lieu d'une très lente circulation ascendante. Ainsi, cet échange inter-nappes se produit depuis la zone de comblement atteinte vers la profondeur de 949 mètres en direction de la zone de perforations située au droit des profondeurs comprises entre 818 et 828 mètres sous le repère.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 108.50 mètres :
 - température : 16.4°C
 - conductivité : $1032 \mu\text{S}/\text{cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.7
 - potentiel redox : 72.6 mV
 - oxygène dissous : 3.6%

- à la base des mesures, à 948.10 mètres :
 - température : 42.4°C
 - conductivité : $2337 \mu\text{S}/\text{cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.7
 - potentiel redox : -375.6 mV
 - oxygène dissous : 0%

7.2- Diagraphies de production après pompage

Les deux séries de diagraphies présentent sensiblement les mêmes profils. Elles ont été réalisées respectivement 2h05 après le pompage pour la série 1 effectuée en descendant puis 2h55 après l'arrêt du pompage pour la série 2 effectuée en remontant.

Dans ces conditions où l'ouvrage présentait une phase hydrodynamique transitoire de récupération de pression, les profils mesurés et comparés à ceux obtenus forage "au repos" sont révélateurs de l'absence de pénétrations d'eaux d'origines "étrangères" et de physico-chimie contrastée au droit des zones de tubes pleins situées de part et d'autre de la zone de perforations annoncée.

Seuls les secteurs correspondants à la base partiellement occultée atteinte vers la profondeur de 949 mètres et la zone de perforations participent à la production d'eau lorsque le forage est sollicité dans cette gamme de rabattement.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

Série 1

- au début des mesures, à 102.00 mètres :
 - température : 20.2°C
 - conductivité : 1090 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 9.8
 - potentiel redox : 198.2 mV
 - oxygène dissous : -
- à la base des mesures, à 949.80 mètres :
 - température : 42.4°C
 - conductivité : 2084 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 9.0
 - potentiel redox : 160.7 mV
 - oxygène dissous : 0%

Série 2

- au début des mesures, à 101.70 mètres :
 - température : 19.5°C
 - conductivité : 1058 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 9.9
 - potentiel redox : 172.4 mV
 - oxygène dissous : -
- à la base des mesures, à 949.70 mètres :
 - température : 42.4°C
 - conductivité : 2083 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.9
 - potentiel redox : 161.0 mV
 - oxygène dissous : 1%

7.3- Diagraphies de production en pompage ($Q = 4.2 \text{ m}^3/\text{h}$)

Les diagraphies de production réalisées en régime dynamique ont été mises en œuvre au droit de la partie du forage équipée de tubes pleins, à savoir entre 197.30 et 797 mètres.

La verticalité parfaite des profils obtenus conforte les premiers constats qui témoignent de l'absence de pénétrations d'eaux d'origines "étrangères" et de physico-chimie contrastée au droit des zones de tubes pleins situées de part et d'autre de la zone de perforations annoncée.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 197.30 mètres :
 - température : 28.4°C
 - conductivité : 2466 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)
- à la base des mesures, à 797.00 mètres :
 - température : 38.6°C
 - conductivité : 2471 $\mu\text{S/cm}$ (corrigée à 25°C)

8

BILAN

Le niveau piézométrique le plus haut a été mesuré lors de la première intervention du 09 octobre 2017, à la profondeur de 102.28 mètres sous le repère pris au niveau de la bride supérieure des tubes en acier de diamètre 9^{5/8}, située à 0.90 mètre au-dessus du sol.

L'examen visuel de l'ensemble des équipements de la chambre de pompage matérialisé par des tubages en acier de diamètre 7" a permis de constater la nature structurelle globalement bien préservée de cette partie des éléments constitutifs de l'ouvrage.

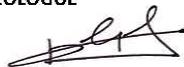
Seuls deux secteurs davantage marqués par les incrustations et les dépôts ont été mis en évidence, dans un premier temps au droit des profondeurs comprises entre 100 et 200 mètres environ puis, dans un second temps, au droit de la zone de perforations située entre 818 et 828 mètres sous le repère.

L'examen endoscopique effectué dans cet ouvrage a dû être interrompu à la profondeur de 951.40 mètres sous le repère, au niveau d'une zone de dépôts rendant inaccessible les niveaux sous-jacents aux outils de contrôles et de mesures. La base théorique de ce piézomètre se situe vers 1289 mètres.

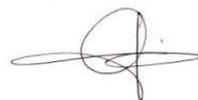
Les séries de diagraphies réalisées avant la phase de pompage puis après le pompage ont permis de matérialiser l'existence d'un échange inter-nappes ascendant, qui se produit lorsque l'ouvrage n'est pas pompé, précisément entre la base de l'ouvrage occultée par des dépôts à la profondeur de 950 mètres environ et la zone de perforations située entre les profondeurs de 818 et 828 mètres.

Fait à Talence, le 26 mars 2018

Rédacteur : **Karine EUZENAT**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE



Vérificateur : **Alain CHAPITEAU**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE
Responsable Agence Gironde



Approbateur : **Sébastien DANGOUMAU**
Gérant

ANNEXES



<http://www.hydro-assistance.fr>

Annexe 1

PRESENTATION DU SITE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Présentation du site



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

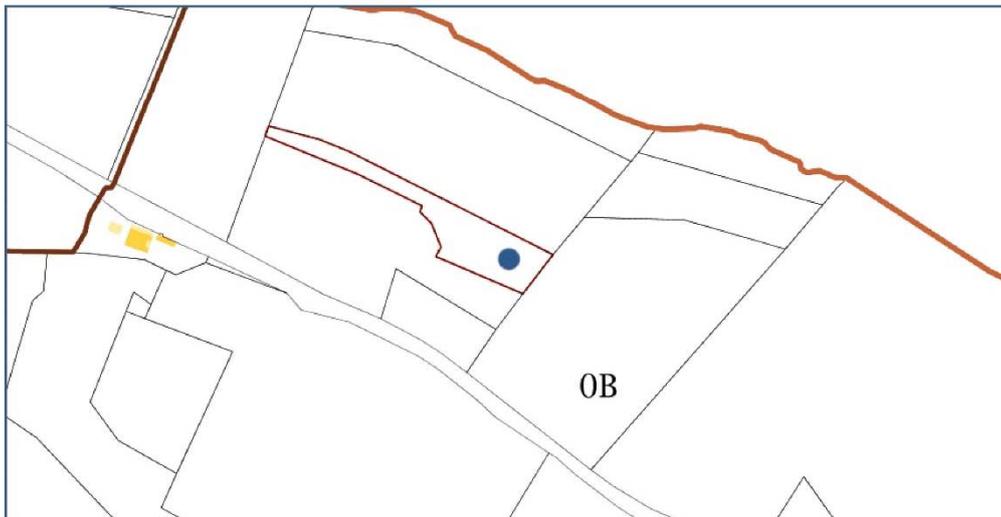
Adresse : lieu-dit "Piquemil"

Réf. cadastrale : section B - parcelle 4

Vue aérienne



Extrait cadastral



Annexe 2

COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

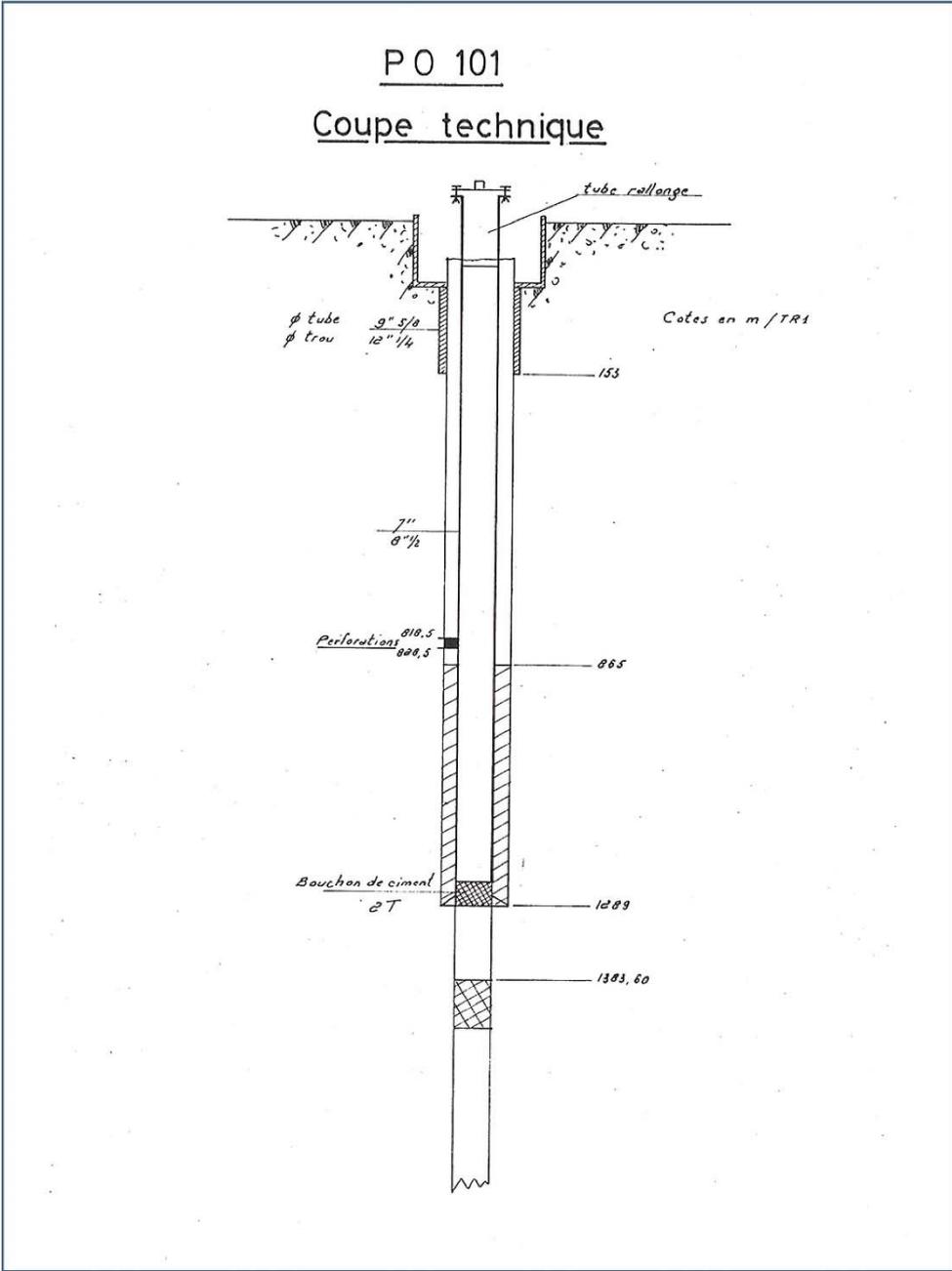
HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Coupe technique de l'ouvrage



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101



Annexe 3

SUIVI DE POMPAGE DU 16 OCTOBRE 2017

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Suivi de pompage du 16 octobre 2017



Commune : Polastron (32)

Repère des mesures = bride du tube 9"5/8 en acier - diamètre interne 230 mm = + 0.90 m/sol

Forage : PO 101

Niveau statique = - 102.80 m/repère



Hydro Assistance Ingénierie

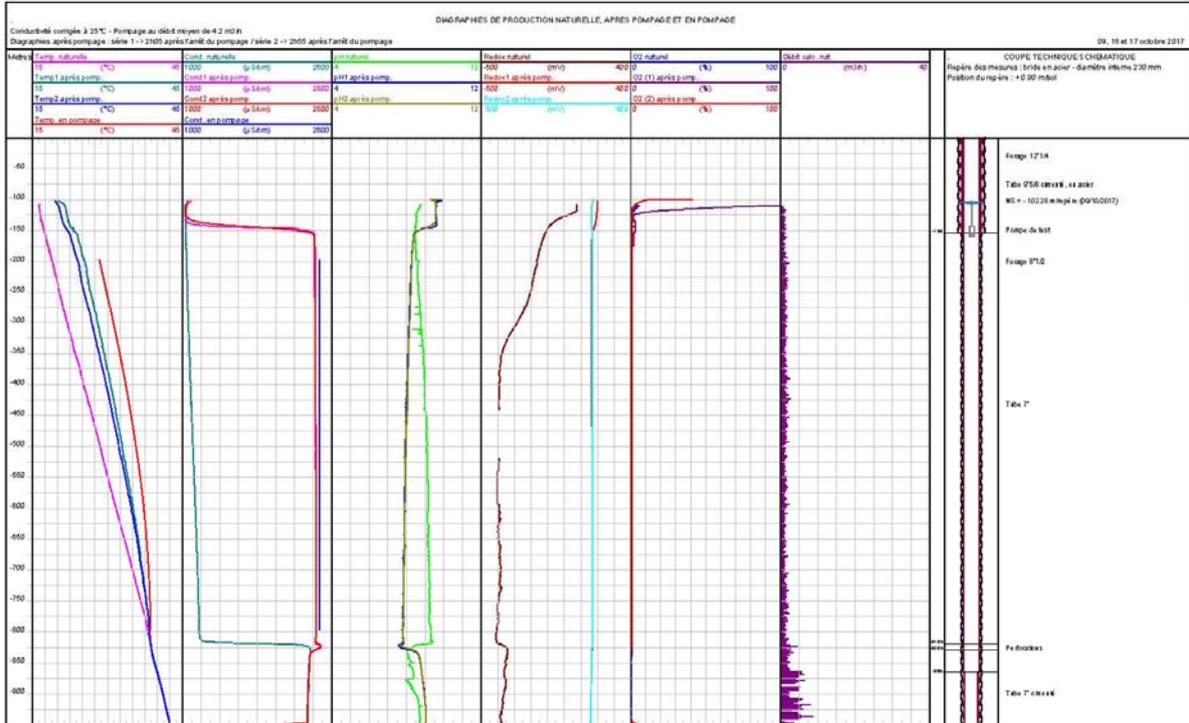
Suivi de pompage

Annexe 4

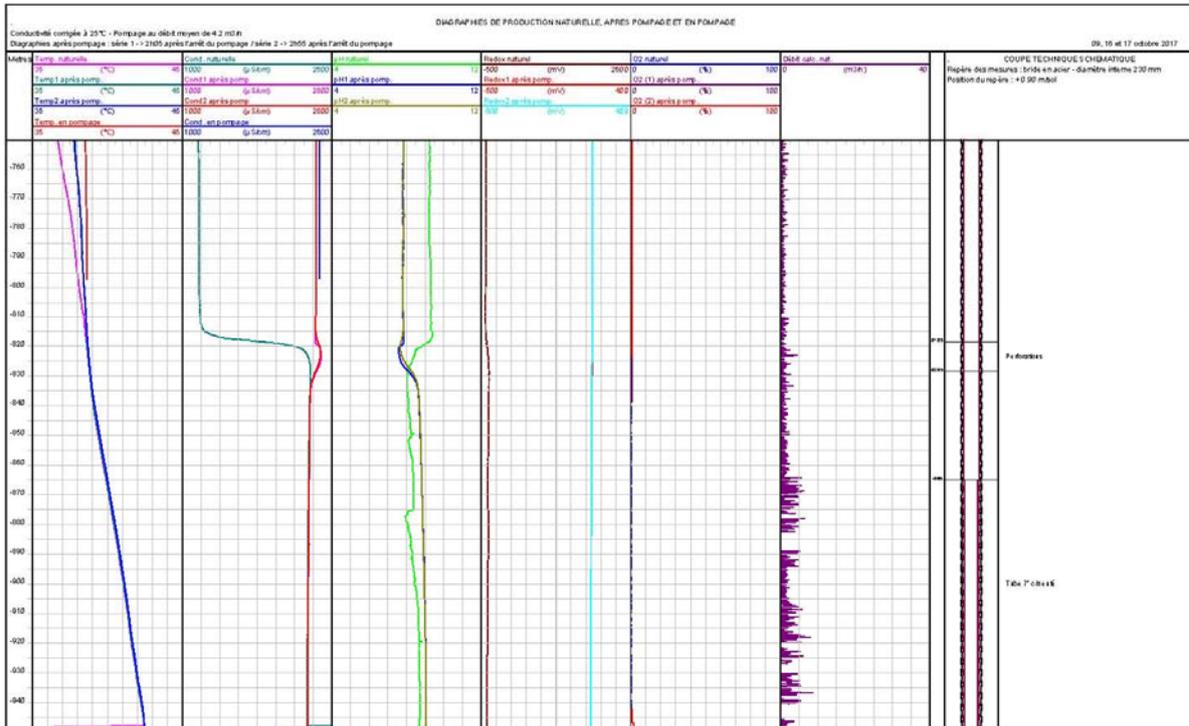
DIAGRAPHIES DE PRODUCTION



Commune : Polastron (32)
Forage : PO 101



Commune : Polastron (32)
Forage : PO 101



Annexe 5

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

Date d'intervention : 09/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 7" (1/5)



Tube en acier - diamètre 7"



Trace d'oxydation
Présence de petits nodules d'oxydation



Oxydation visuellement superficielle
Aspect homogène des parois



Paroi relativement saine
avec légère oxydation



Raccord vissé entre tubes



Partie immergée - Oxydation superficielle
Aspect homogène des parois

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique

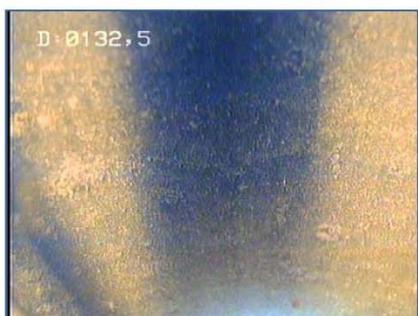


Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

Date d'intervention : 09/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 7" (2/5)



Présence de dépôts fins sous forme d'une croûte continue et homogène



Raccord vissé masqué par les dépôts



Raccord vissé masqué par les dépôts
Aspect globalement satisfaisant



Paroi plutôt propre
traces de frottements visibles



Paroi uniforme relativement propre



Paroi uniforme relativement propre

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

Date d'intervention : 09/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 7" (3/5)



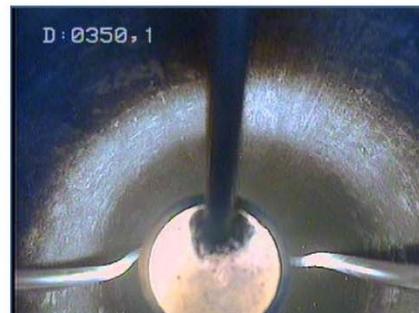
Paroi uniforme relativement propre



Raccord vissé plutôt propre
Filetage nettement visible



Paroi uniforme relativement propre
Traces de frottements visibles



Paroi propre



Apparition de quelques marbrures blanchâtres



Paroi uniforme relativement propre

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

Date d'intervention : 09/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 7" (4/5)



Paroi uniforme relativement propre



Paroi uniforme propre



Raccord vissé visible et propre



Paroi propre



Paroi propre



Paroi uniforme relativement propre

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Polastron (32)

Forage : PO 101

Date d'intervention : 09/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 7" (5/5)



Etat des parois uniforme relativement propre



Paroi uniforme propre - Raccord entre tubes légèrement marqué par des dépôts



Paroi uniforme propre - Raccord entre tubes légèrement marqué par des dépôts



Paroi uniforme propre - Raccord entre tubes légèrement marqué par des dépôts



Paroi propre
Présence de zones de plaquage



Zone de tubage où les parois
sont davantage marquées par les dépôts

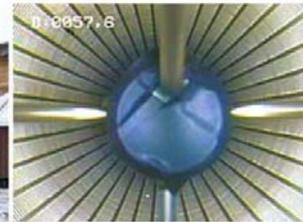
Annexe 7

Diagnostic du forage Saint-André - Rapport Hydro Assistance



BRGM

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE



OCTOBRE 2017

DIAGNOSTIC D'OUVRAGE

FORAGE "SAINT ANDRE"- 31420 SAINT ANDRE

BSS002KEHH (10336X0002/F)

**Examen endoscopique
Diagraphies de production**

Référence rapport : HA_05-2018/06

Département des Landes

SIEGE SOCIAL
2 Allée Dache Dize
40180 HINX
Tél : 05.58.98.55.66 – Fax : 05.58.98.47.72



<http://www.hydro-assistance.fr>

Agence BORDEAUX
33 Rue El Alamein
33400 TALENCE
Tél : 05.56.90.82.41 – Fax : 05.56.90.82.42

SARL au capital de 740 000 € - R.C.S. DAX 499 405 587 - SIRET 499 405 587 00019 - Code APE 7112 B

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1 PRESENTATION DE L'INTERVENTION..... | 1 |
| 1.1- MOTIF D'INTERVENTION | 2 |
| 1.2- DATES D'INTERVENTION | 2 |
| 1.3- OBJECTIFS..... | 2 |
| 1.4- MESURES REALISEES..... | 2 |
| 1.5- OPERATEURS | 2 |
| 2 LOCALISATION DE L'OUVRAGE | 3 |
| 2.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE | 4 |
| 2.2- COORDONNEES | 4 |
| 3 PRESENTATION DE L'OUVRAGE | 5 |
| 3.1- IDENTIFICATION | 6 |
| 3.2- PHOTOGRAPHIES DU SITE | 6 |
| 3.3- ORIGINE DES MESURES | 6 |
| 3.4- DONNEES HYDROGEOLOGIQUES | 6 |
| 4 COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE | 7 |
| 4.1- COUPE TECHNIQUE | 8 |
| 4.1.1) D'après les documents existants | 8 |
| 4.1.2) D'après l'examen endoscopique..... | 8 |
| 4.2- COUPE GEOLOGIQUE DISPONIBLE..... | 8 |
| 5 JOURNAL DES TRAVAUX..... | 9 |
| 6 EXAMEN ENDOSCOPIQUE | 11 |
| 7 DIAGRAPHIES DE PRODUCTION..... | 13 |
| 7.1- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE | 14 |
| 7.2- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION EN POMPAGE (Q = 3.8 M ³ /H)..... | 14 |
| 7.3- DIAGRAPHIES DE PRODUCTION APRES POMPAGE | 15 |
| 8 BILAN | 16 |

Table des annexes

- ANNEXE 1 PRESENTATION DU SITE**
- ANNEXE 2 COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE**
- ANNEXE 3 SUIVI DE POMPAGE**
- ANNEXE 4 DIAGRAPHIES DE PRODUCTION**
- ANNEXE 5 EXAMEN ENDOSCOPIQUE**

1

PRESENTATION DE L'INTERVENTION

1.1- Motif d'intervention

DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE

1.2- Dates d'intervention

10 ET 18 OCTOBRE 2017

1.3- Objectifs

- contrôle du vieillissement et de l'état mécanique des équipements
- caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'ouvrage

1.4- Mesures réalisées

- **Examen endoscopique**
Caméra numérique couleur à visées axiale et radiale
Réalisé sans pompage : de 0 à 339.30 mètres
- **Pompage**
Pompe immergée : diamètre 4"
Installée à : entre 60 et 150 m/repère
Débit pompé : 5 m³/h
- **Diagraphies de production naturelle**
Température, conductivité, flux : de 18.40 à 334.70 mètres
pH, redox : de 18.40 à 333.50 mètres
- **Diagraphies de production en pompage (Q = 3.8 m³/h)**
Température, conductivité, flux : de 179.80 à 334.70 mètres
pH, redox : de 179.80 à 334.70 mètres
- **Diagraphies de production après pompage (Q_{moy} = 4.4 m³/h)**
Température, conductivité, flux : de 59.80 à 334.70 mètres
pH, redox : de 59.80 à 334.70 mètres

1.5- Opérateurs

- 1^{ère} intervention : Frank LARRERE
- 2^{ème} intervention : Christophe FATA
Alexandre BANCELIN
- 3^{ème} intervention : Christophe FATA
Frank LARRERE

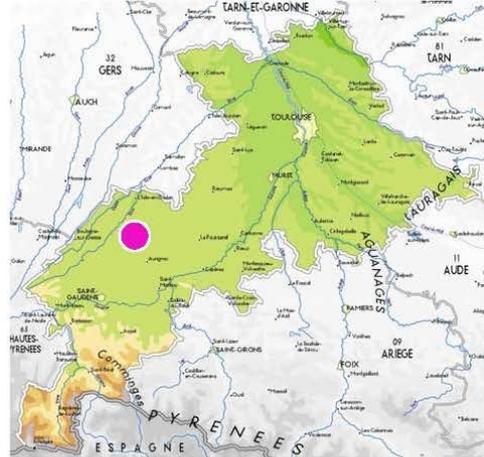
2

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

2.1- Situation géographique



Département : Haute-Garonne (31)
 Commune : Saint André
 Localisation : bois du Morthé
 Référence cadastrale : section A - parcelle 4



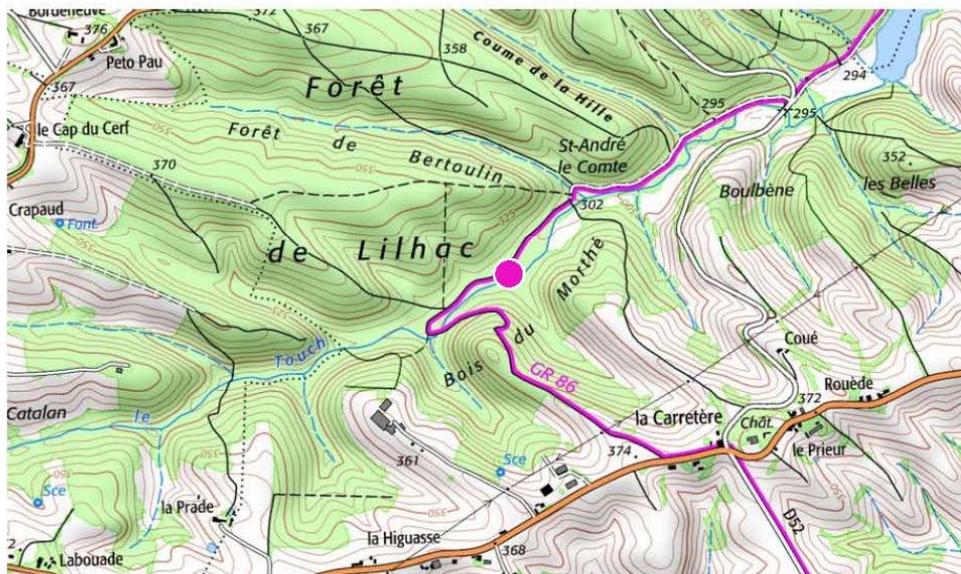
2.2- Coordonnées

Coordonnées Lambert-93 (en mètres) :

X = 524 506

Y = 6245 715

Z = 305 m NGF



Carte IGN : Saint Frajou - 19450



3

PRESENTATION DE L'OUVRAGE

3.1- Identification

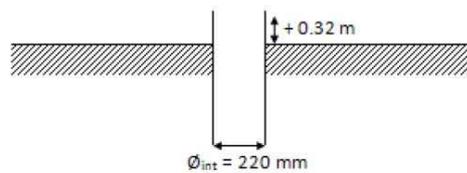
| | |
|------------------------|---|
| Indice BRGM : | BSS002KEHH (ancien code : 10336X0002/F) |
| Dénomination : | forage "Saint André" |
| Date de création : | 1957 |
| Profondeur théorique : | 1940.50 mètres |
| Utilisation : | suiwi piézométrique |

3.2- Photographies du site



3.3- Origine des mesures

| | |
|------------|---|
| Repère : | sommet du tube en acier - diamètre interne 220 mm |
| Position : | + 0.32 m/sol |



3.4- Données hydrogéologiques

| | |
|-------------------|---|
| Aquifère capté : | Thanétien (Paléocène) - Sables de Lussagnet |
| Niveau statique : | NS = - 17.10 m/repère (10/10/2017) |
| | NS = - 17.13 m/repère (18/10/2017) |

COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE

4.1- Coupe technique

4.1.1) D'après les documents existants

▪ La foration

- de 0 à 104.40 m : diamètre 17^{n3/8} (441 mm)
- de 104.40 à 1947.20 m : diamètre 12^{n1/4} (311 mm)
- de 1947.20 à 4202.40* m : diamètre 8^{n1/2} (216 mm)

* profondeur initiale avant transformation en piézomètre

▪ Les équipements

- de 0 à 103.86 m : tube de nature non précisé, diamètre 13^{n3/8}, espace annulaire cimenté
- de 0 à 1942 m : tube de nature non précisé, diamètre 9^{n5/8}, espace annulaire cimenté à partir de 865 mètres perforations de 430 à 440 mètres
- à 1940.50 m : bouchon de ciment

4.1.2) D'après l'examen endoscopique

- de 0 à 339.30 m : tube en acier, diamètre 13^{n3/8}
- à 339.30 m : arrêt de la vidéo - dépôts mous

4.2- Coupe géologique disponible

| Profondeurs | Lithologie | Stratigraphie |
|-------------|---|---------------|
| 0 - 182 m | Argile ocre jaunâtre à rougeâtre, graviers de calcaire et de quartz ; marne sableuse et marne calcaire | Cénozoïque |
| 182 - 195 m | Calcaire jaunâtre à rosé, sableux et glauconie | Yprésien |
| 195 - 203 m | Calcaire jaune à blanchâtre, gréseux, Alveolina | |
| 203 - 224 m | Calcaire jaune à blanchâtre, recristallisé, marneux | |
| 224 - 231 m | Marne grise, calcaire argilo-sableux, Alveolina | |
| 231 - 235 m | Grès fin à moyen, jaunâtre | |
| 235 - 293 m | Sable gris à blanc, grossier à graviers, passées d'argile grise | Thanétien |
| 293 - 406 m | Calcaire jaunâtre à gris beige, gréseux puis grès grossier, passées d'argile grise, huîtres, millioles, charophytes | |
| 406 - 441 m | Grès ocre, jaunâtre à rougeâtre, fin à grossier | |
| 441 - 449 m | Calcaire beige, gréseux à millioles | |
| 449 - 471 m | Sable blanc à galet de quartz | |
| 471 - 483 m | Argile verte | |

| Dates | Heures | Opérations |
|-------------------------------------|----------------|---|
| 1^{ère} INTERVENTION | | |
| 10/10/2017 | 08h00 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 09h30 | Réalisation de l'examen endoscopique en régime statique Arrêt de la vidéo à 339.30 mètres sur des dépôts |
| | 11h10 | Réalisation des diagraphies de production naturelle (température, conductivité, pH, potentiel redox et flux) |
| | 13h00 | Repli du matériel |
| | 13h30 | Départ du site |
| 2^{ème} INTERVENTION | | |
| 18/10/2017 | 08h00 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 08h35 | Mise en place de la pompe de test 4" à 60 mètres |
| | 09h04 | Début du pompage au débit de 5 m ³ /h |
| | 09h31 | Arrêt du pompage - Dénoyage de la pompe de test Attente des instructions de la part du BRGM pour la poursuite de l'opération |
| | 10h12 | Descente de la pompe de test à 150 mètres |
| | 11h25 | Début du pompage au débit moyen 5.2 m ³ /h |
| | 14h12 | Réalisation des diagraphies de production en pompage (température, conductivité, pH et potentiel redox) - Pompage au débit moyen de 3.8 m ³ /h |
| | 14h54 | Arrêt du pompage |
| | 15h45 | Remontée de la pompe de test |
| | 16h30 | Réalisation des diagraphies de production après pompage (température, conductivité, pH et potentiel redox) |
| | 17h35 | Repli du matériel |
| 18h00 | Départ du site | |

6

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

Les équipements en acier de la chambre de pompage - de diamètre interne 220 mm- présentent un état globalement satisfaisant.

Toutefois au droit de la partie émergée, la présence d'une croûte d'oxydation généralisée est visible. La dégradation sommaire des équipements sous la forme d'un phénomène d'exfoliation de l'épaisseur de l'acier est accompagnée d'une croûte de dépôts. Ces deux phénomènes restent visuellement très superficiels et ne semblent pas présenter un préjudice significatif pour l'intégrité mécanique de cette partie des éléments tubulaires.

La colonne d'eau atteinte à la profondeur de 17.10 mètres est fortement marquée sur les premiers mètres par la présence de nombreuses matières en suspension qui ne permettent pas une visibilité optimale de la paroi des équipements.

Les premiers mètres des parois immergées se caractérisent par un aspect plutôt sombre qui, à l'image de la partie émergée, sont marqués par une croûte d'oxydation qui leur confère un aspect noirâtre.

L'aspect général des parois s'améliore avec la profondeur et seule une fine croûte de dépôts subsiste. Les raccords vissés entre tubes attestent de la faible épaisseur de dépôts avec des filets restés globalement bien dégagés.

Cette fine croûte de dépôts ainsi que les parois sous-jacentes présentent localement des variations de teintes et d'aspect en profondeur avec notamment des aspects annelés visibles à 28.50 mètres, entre 81 et 91 mètres ou de 112 à 121 mètres.

On notera également la présence ponctuelle de traces de frottements qui participent à rendre un aspect marbré aux parois des équipements.

A 269 mètres, la présence de traces verticales singulières est notée. La coupe technique d'origine qui ne précise pas la présence d'un dispositif spécifique à cette cote ne permet pas de statuer sur l'origine de ces traces.

A partir de 290 mètres sous le repère, l'état des parois est nettement amélioré avec la disparition de l'essentiel des dépôts et des phénomènes de corrosion superficiels.

En dessous de la profondeur de 323 mètres, des traces de dépôts et de matières indurées apparaissent jusqu'à la base occultée de l'ouvrage.

Celle-ci est atteinte à la profondeur de 339.30 mètres sous le repère sur un lit de dépôts fins et pulvérulents.

L'ouvrage ne présentant pas de réduction de diamètre jusqu'à sa base, située à la profondeur théorique de 1940.50 mètres qui constitue la zone d'obturation suite à la transformation du forage en piézomètre, il est probable que ces dépôts ne constituent qu'un obstacle intermédiaire et suspendu.

A noter que la coupe technique d'origine précise que, suite à la condamnation du forage à la profondeur de 1940.50 mètres, le forage avait été laissé partiellement en boue entre la profondeur de 500 mètres et la base.

7

DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

7.1- Diagraphies de production naturelle

Au droit de la zone investiguée, la thermographie présente un gradient de température globalement linéaire avec une valeur proche de 0.85°C pour 30 mètres, qui est sensiblement plus faible que le gradient géothermique moyen théorique.

L'allure du profil de minéralisation globale, qui est parfaitement verticale sur la hauteur de la mesure, ne présente aucune anomalie qui aurait pu révéler la présence d'une interférence extérieure pouvant être la pénétration et éventuellement la circulation d'une eau de physico-chimie contrastée.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 18.40 mètres :
 - température : 12.2°C
 - conductivité : 237 µS/cm (corrigée à 25°C)
 - pH : 7.8
 - potentiel redox : 65.1 mV
- à la base des mesures, à 333.50 mètres :
 - température : 21.0°C
 - conductivité : 229 µS/cm (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.7
 - potentiel redox : -417.5 mV

7.2- Diagraphies de production en pompage (Q = 3.8 m³/h)

L'allure générale des profils obtenus atteste de l'origine unique et basse des eaux produites, localisées à la base de la mesure correspondant au sommet de la zone occultée par les dépôts, à la profondeur de 334 mètres sous le repère.

Cette position basse des arrivées d'eau permettrait de confirmer la nature suspendue de l'obstacle, au travers duquel les eaux qui transitent présentent notamment des caractéristiques de température qui attestent de leur origine plus profonde.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 179.80 mètres :
 - température : 20.1°C
 - conductivité : 404 µS/cm (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.3
 - potentiel redox : 162.4 mV
- à la base des mesures, à 334.70 mètres :
 - température : 22.8°C
 - conductivité : 484 µS/cm (corrigée à 25°C)
 - pH : 7.4
 - potentiel redox : 183.3 mV

7.3- Diagraphies de production après pompage

Les profils des différents paramètres observés lors des diagraphies de production réalisées après pompage attestent de la présence d'un phénomène de récupération de pression.

Dans ces conditions, aucun artéfact n'a permis de relever l'existence d'un défaut de tubage qui aurait permis l'intrusion d'eau de physico-chimie contrastée. La totalité des eaux produites permettant la récupération de pression est également issue de la base de la mesure située au niveau de la zone d'obturation.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 59.80 mètres :
 - température : 15.4°C
 - conductivité : 266 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 8.4
 - potentiel redox : 174.2 mV

- à la base des mesures, à 334.70 mètres :
 - température : 22.7°C
 - conductivité : 486 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (corrigée à 25°C)
 - pH : 7.3
 - potentiel redox : 185.3 mV

8

BILAN

Le niveau piézométrique mesuré le 10 octobre 2017 était situé à 17.10 mètres sous le repère pris au sommet du tube en acier de diamètre interne 220 mm, situé à 0.32 mètre au-dessus du sol.

Les équipements de la chambre de pompage, matérialisés par des tubes en acier de diamètre interne 220 mm, présentent un état structurel visuellement et globalement très satisfaisant, bien qu'ils soient marqués au droit de la partie émergée par des phénomènes conjoints d'oxydation et d'exfoliation.

Au droit de la partie immergée, les parois internes présentent également un état de conservation singulièrement satisfaisant pour un ouvrage réalisé en 1957.

Hormis les premiers mètres de tubage situés au droit de la zone de battement nappe en particulier, où les phénomènes de vieillissement sont toujours prématurés, l'essentiel des équipements auscultés ne présente qu'une fine croûte de dépôts plus ou moins uniforme, qui peut être marquée de manière aléatoire par des aspects annelés ou bien par des traces de frottements dont certaines sont plus importantes.

A la profondeur 269 mètres sous le repère, la présence de traces verticales symétriques d'origine inconnue et non mentionnée dans la coupe technique de l'ouvrage a été identifiée.

En dessous de la profondeur de 323 mètres, les équipements en acier sont marqués par la présence de nodules concrétionnés en positions éparées.

L'inspection vidéo a dû être interrompue à la profondeur de 339.30 mètres sous le repère au droit de dépôts fins d'aspect très pulvérulents sans avoir atteint la zone de perforations indiquée entre les profondeurs de 430 et 440 mètres.

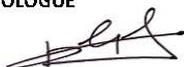
A noter que la coupe technique d'origine transmise indiquait une base théorique située à la profondeur de 1940.50 mètres, surmontée d'une colonne de boue remontant jusqu'à la profondeur de 500 mètres sous le repère.

Les séries de diagraphies de production (naturelle, en pompage et après pompage) témoignent de l'absence d'entrée d'eau parasite au droit des 339 premiers mètres de la chambre de pompage.

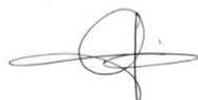
L'origine des eaux produites sous l'effet des sollicitations de l'ouvrage par pompage indique que l'ensemble des eaux pompées est issu de la zone d'obstruction, qui semble par ailleurs être traversée par ces flux.

Fait à Talence, le 26 mars 2018

Rédacteur : **Karine EUZENAT**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE



Vérificateur : **Alain CHAPITEAU**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE
Responsable Agence Gironde



Approbateur : **Sébastien DANGOUMAU**
Gérant

ANNEXES



<http://www.hydro-assistance.fr>

Annexe 1

PRESENTATION DU SITE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Présentation du site



Commune : Saint André (31)

Forage : "Saint André"

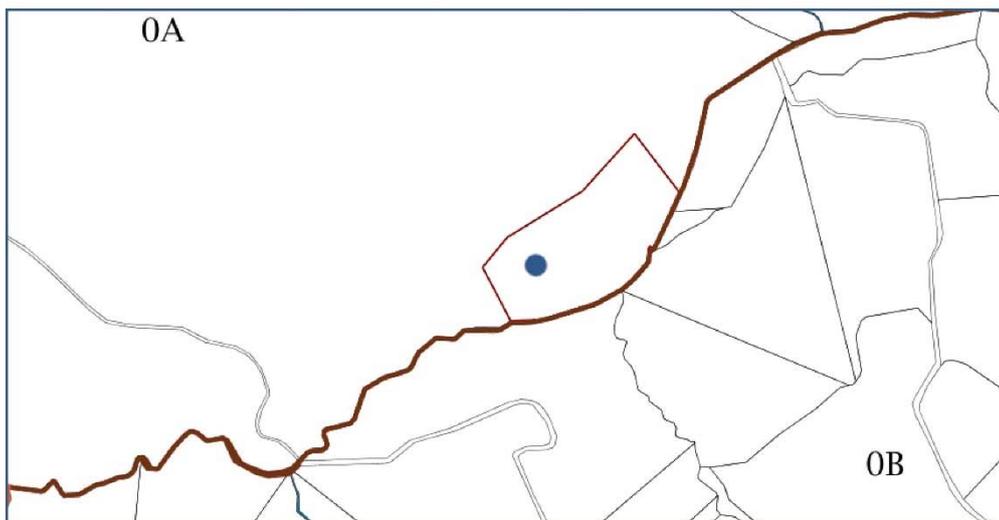
Adresse : bois du Morthé

Réf. cadastrale : section A - parcelle 4

Vue aérienne



Extrait cadastral



Hydro Assistance Ingénierie

Présentation du site

Annexe 2

COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

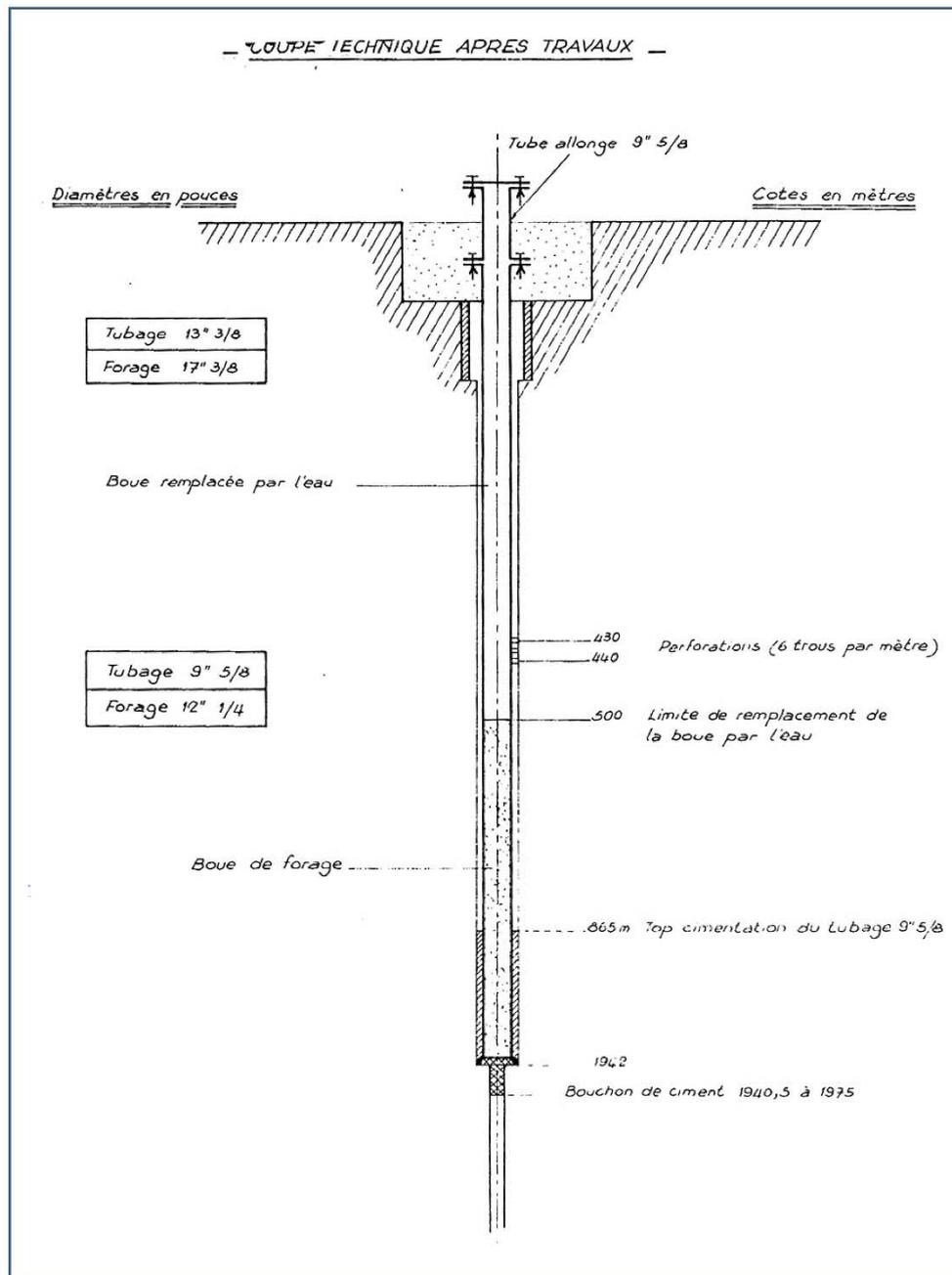
HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Coupe technique de l'ouvrage



Commune : Saint André (31)

Forage : "Saint André"



Annexe 3

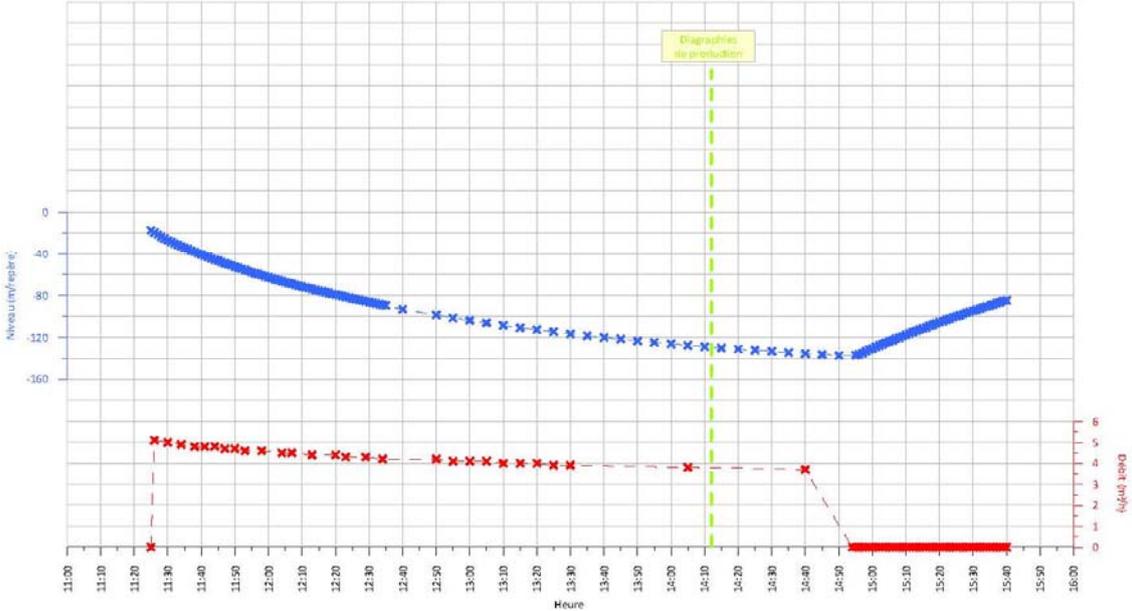
SUIVI DE POMPAGE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Suivi de pompage du 18 octobre 2017 (relevés manuels)



Commune : Saint André (31) Repère des mesures = sommet du tube en acier - diamètre interne 220 mm = + 0.32 m/sol
Forage : "Saint André" Niveau statique = - 17.13 m/repère



Annexe 4

DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

Annexe 5

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Saint André (31)

Forage : "Saint André"

Date d'intervention : 10/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 220 mm (1/3)



Oxydation et exfoliation
au droit de la partie émergée



Présence d'une croûte d'oxydation fine



Présence de matières en suspension
Croûte de dépôts visible au droit d'un raccord



Paroi des équipements plus propre
Croûte de dépôts peu épaisse



Aspect annelé des parois



Présence d'une fine croûte de dépôts

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Saint André (31)

Forage : "Saint André"

Date d'intervention : 10/10/2017

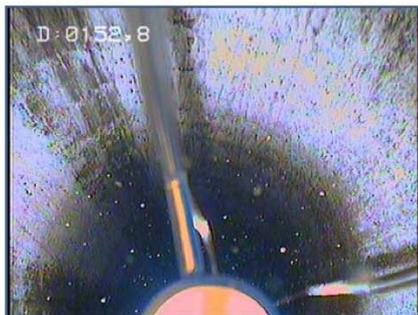
Chambre de pompage en acier - diamètre 220 mm (2/3)



Tubages globalement propres
Présence d'une fine croûte de dépôts



Raccord vissé entre tubes
Présence d'une fine croûte de dépôts



Tubage plus propre



Traces de frottements sur les parois



Raccord vissé - légère oxydation



Tubage propre
Présence de stries/rayures

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Saint André (31)

Forage : "Saint André"

Date d'intervention : 10/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 220 mm (3/3)



Traces verticales symétriques singulières



Tubage plus propre



Tube propre



Tube propre



Apparition de nodules concrétionnés



Base de l'examen endoscopique
Présence de sédiments meubles

Annexe 8

Diagnostic du forage de Lacquy - Rapport Hydro Assistance



BRGM

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE



OCTOBRE ET DECEMBRE 2017

DIAGNOSTIC D'OUVRAGE

FORAGE LC 101 - 40120 LACQUY
BSS002CXHS (09266X0004/LC101)

Examen endoscopique
Diagraphies de production

Référence rapport : HA_05-2018/05

Département des Landes

SIEGE SOCIAL
2 Allée Dache Dize
40180 HINX
Tél : 05.58.98.55.66 – Fax : 05.58.98.47.72



<http://www.hydro-assistance.fr>

Agence BORDEAUX
33 Rue El Alamein
33400 TALENCE
Tél : 05.56.90.82.41 – Fax : 05.56.90.82.42

SARL au capital de 740 000 € - R.C.S. DAX 499 405 587 - SIRET 499 405 587 00019 - Code APE 7112 B

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| 1 PRESENTATION DE L'INTERVENTION..... | 1 |
| 1.1- MOTIF D'INTERVENTION | 2 |
| 1.2- DATES D'INTERVENTION | 2 |
| 1.3- OBJECTIFS..... | 2 |
| 1.4- MESURES REALISEES..... | 2 |
| 1.5- OPERATEURS | 2 |
| 2 LOCALISATION DE L'OUVRAGE | 3 |
| 2.1- SITUATION GEOGRAPHIQUE | 4 |
| 2.2- COORDONNEES | 4 |
| 3 PRESENTATION DE L'OUVRAGE | 5 |
| 3.1- IDENTIFICATION | 6 |
| 3.2- PHOTOGRAPHIES DU SITE | 6 |
| 3.3- ORIGINE DES MESURES | 6 |
| 3.4- DONNEES HYDROGEOLOGIQUES | 6 |
| 4 COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE | 7 |
| 4.1- COUPE TECHNIQUE | 8 |
| 4.1.1) D'après les documents existants | 8 |
| 4.1.2) D'après l'examen endoscopique..... | 8 |
| 4.2- COUPE GEOLOGIQUE DISPONIBLE..... | 8 |
| 5 JOURNAL DES TRAVAUX..... | 10 |
| 6 EXAMEN ENDOSCOPIQUE | 12 |
| 7 DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE | 14 |
| 8 BILAN | 16 |

Table des annexes

ANNEXE 1 PRESENTATION DU SITE

ANNEXE 2 COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

ANNEXE 3 DIAGRAPHIES DE PRODUCTION

ANNEXE 4 EXAMEN ENDOSCOPIQUE

1

PRESENTATION DE L'INTERVENTION

1.1- Motif d'intervention

DIAGNOSTIC DE L'OUVRAGE

1.2- Dates d'intervention

11 ET 19-20 OCTOBRE 2017
20 DECEMBRE 2017

1.3- Objectifs

- tentative de contrôle du vieillissement et de l'état mécanique des équipements
- caractérisation du fonctionnement hydrodynamique de l'ouvrage

1.4- Mesures réalisées

- **Examen endoscopique**
Caméra numérique couleur à visées axiale et radiale
Réalisé sans pompage : de 0 à 49* mètres
** Arrêt de la vidéo - Présence d'hydrocarbures*
- **Pompages**
Pompe immergée : diamètre 4"
Installée à : entre 36 et 72 m/repère
- **Diagraphies de production naturelle**
Température, conductivité, flux : de 32 à 1232 mètres

1.5- Opérateurs

- 1^{ère} intervention : Frank LARRERE
- 2^{ème} intervention : Christophe FATA
Alexandre BANCELIN
- 3^{ème} intervention : Christophe FATA
Frank LARRERE

2

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

2.1- Situation géographique



Département : Landes (40)
 Commune : Lacquy
 Localisation : lieu-dit "Mauserbit"
 Référence cadastrale : section D - parcelle 83



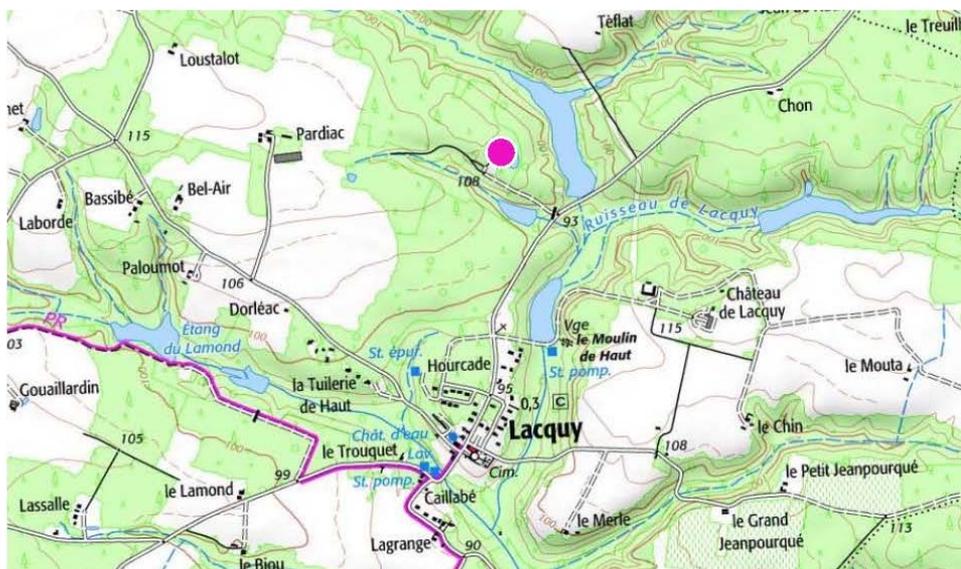
2.2- Coordonnées

Coordonnées Lambert-93 (en mètres) :

X = 437 393

Y = 6323 354

Z = 110 m NGF



Carte IGN : Labastide d'Armagnac - 16410

0 500 m

3

PRESENTATION DE L'OUVRAGE

3.1- Identification

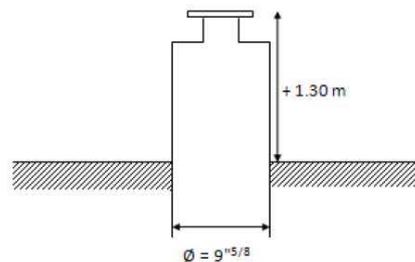
| | |
|------------------------|---|
| Indice BRGM : | BSS002CXHS (ancien code : 09266X0004/LC101) |
| Dénomination : | forage LC 101 |
| Date de création : | 1957 |
| Profondeur théorique : | 1230 mètres |
| Utilisation : | suivi piézométrique |

3.2- Photographies du site



3.3- Origine des mesures

| | |
|------------|--|
| Repère : | bride en acier - diamètre interne 154 mm |
| Position : | + 1.30 m/sol |



3.4- Données hydrogéologiques

| | |
|-------------------|---|
| Aquifère capté : | Yprésien supérieur (Eocène) - Sables de Lussagnet |
| Niveau statique : | NS = - 31.40 m/repère (11/10/2017) |
| | NS = - 31.35 m/repère (20/12/2017) |

COUPES TECHNIQUE ET GEOLOGIQUE

4.1- Coupe technique

4.1.1) D'après les documents existants

▪ La foration

- de 0 à 197.90 m : diamètre 24" (610 mm)
- de 197.90 à 1806.50 m : diamètre 17^{1/2}" (444 mm)
- de 1806.50 à 3962 m : diamètre 12^{1/4}" (311 mm)
- de 3962 à 4002* m : diamètre 8^{3/8}" (213 mm)

* profondeur initiale avant transformation en piézomètre

▪ Les équipements

- de 0 à 197.90 m : coffrage, tube de soutènement - diamètre 18^{5/8}", espace annulaire cimenté
- de 0 à 1806.50 m : tube de nature non précisé, diamètre 13^{3/8}", espace annulaire cimenté à partir de 710 mètres perforations de 435 à 445 mètres
- à 1230 m : bouchon de ciment

4.1.2) D'après l'examen endoscopique

- de 0 à 0.10 m : tube en acier, diamètre interne 154 mm
- de 0.10 à 49 m : tube en acier, diamètre 13^{3/8}"
- à 49 m : arrêt de la vidéo - forte présence d'hydrocarbures au sein de l'ouvrage

4.2- Coupe géologique disponible

| Profondeurs | Lithologie | Stratigraphie |
|-------------|--|--------------------|
| 0 - 50 m | - | - |
| 50 - 65 m | Grès fin à ciment micritique et débris coquilliers, passages d'argile sableuse grise | Miocène |
| 65 - 80 m | Argile jaune plastique à galets de micrite gréseuse blanche et ocre | |
| 80 - 113 m | Marne dolomitique ocre et blanchâtre à galets de dolomicrite blanche et micrite gréseuse verte | |
| 113 - 171 m | Marne sableuse plastique ocre et argile bariolée | |
| 171 - 217 m | Micrite gréseuse à grès micritique | Stampien |
| 217 - 230 m | Argile sableuse ocre à passées de grès micritique et de micrite gréseuse ; nombreux Foraminifères | |
| 230 - 270 m | Argile gypsifère | |
| 270 - 283 m | Conglomérat brun-ocre | |
| 283 - 323 m | Argile gypsifère | Bartonien |
| 323 - 351 m | Alternance d'argile bariolée et de gypse | |
| 351 - 430 m | Argile gypsifère légèrement sableuse | |
| 430 - 454 m | Sable moyen à grossier translucide avec intercalations d'argile sableuse bariolée ; abondantes Nummulites | Yprésien supérieur |
| 454 - 499 m | Argile sableuse bariolée à intercalations de grès moyen gris-clair, micritique et glauconieux ; Nummulites et grands foraminifères | |

| Profondeurs | Lithologie | Stratigraphie |
|---------------|---|------------------------|
| 499 - 548 m | Micrite à microsparite blanchâtre, légèrement dolomitique ou crayeuse | Maastrichtien |
| 548 - 587 m | Micrite à microsparite blanchâtre avec intercalations de dolosparite dans la moitié supérieure | Cénomanién |
| 587 - 594 m | Marne pyriteuse gris-foncé | |
| 594 - 625 m | Micrite beige claire | |
| 625 - 641 m | Microsparite grise, légèrement argileuse, graveleuse et oolithes, passées d'argile grise | Aptien inférieur |
| 641 - 850 m | Dolomicrite beige, blanchâtre à crème, rares gravelles et oolithes ; présence de glauconie ; passées de dolomicrite argileuse de 680 à 685 mètres et d'argile gris-vert pyriteuse de 740 à 760 mètres | Tithonien |
| 850 - 895 m | Dolomicrite beige compacte à intercalations de micrite dolomitique blanche (vers 870 mètres) | |
| 895 - 956 m | Dolomicrite grise légèrement argileuse | |
| 956 - 980 m | Dolomicrite grise argileuse ; zone fracturée à calcite cristalline abondante | |
| 980 - 1060 m | Dolomicrite grise légèrement argileuse | Kimméridgien supérieur |
| 1060 - 1492 m | Micrite grise à gris-beige légèrement argileuse et pyriteuse, très localement à passées sableuses ou anhydritiques | |

| Dates | Heures | Opérations |
|-------------------------------------|----------------|---|
| 1^{ère} INTERVENTION | | |
| 11/10/2017 | 08h00 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 09h15 | Réalisation de l'examen endoscopique en régime statique jusqu'à la profondeur de 49 mètres Remontée de la caméra compte tenu de la présence d'hydrocarbures Arrêt du chantier |
| | 10h45 | Repli du matériel |
| | 11h00 | Départ du site |
| 2^{ème} INTERVENTION | | |
| 19/10/2017 | 08h00 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 08h45 | Mise en place d'une pompe de test de 4" à la profondeur de 36 mètres |
| | 09h11 | Début du pompage |
| | 09h16 | Arrêt du pompage - Dénoyage de la pompe de test Rajout d'un tube à la colonne d'exhaure - Pompe de test à 42 mètres |
| | 09h18 | Reprise du pompage |
| | 09h24 | Arrêt du pompage - Dénoyage de la pompe de test Rajout d'un tube à la colonne d'exhaure - Pompe de test à 48 mètres |
| | 09h30 | Reprise du pompage (environ 1000 litres pompés en cumulé) |
| | 09h35 | Arrêt du pompage - Dénoyage de la pompe de test Attente des instructions de la part du BRGM pour la poursuite de l'opération |
| | 10h30 | Rajout de 4 tubes à la colonne d'exhaure - Pompe de test à 72 mètres |
| | 12h13 | Reprise du pompage (environ 2000 litres pompés en cumulé) |
| | 12h43 | Arrêt du pompage Repli du matériel de surface |
| 13h00 | Départ du site | |
| 20/10/2017 | 08h15 | Arrivée sur site et mise en place |
| | 08h50 | Remontée de la pompe de test |
| | 09h30 | Repli du matériel |
| | 09h45 | Départ du site |
| 3^{ème} INTERVENTION | | |
| 20/12/2017 | 08h30 | Arrivée sur site et mise en place du matériel |
| | 09h30 | Réalisation des diagraphies de production naturelle |
| | 13h20 | Repli du matériel |
| | 13h50 | Départ du site |

6

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

La chambre de pompage en acier - de diamètre 13^{n3/8} - a pu être observée dans le détail entre le sommet des équipements et la profondeur de 49 mètres sous le repère.

Dès le sommet des équipements, à la profondeur de 1 mètre sous le repère, la présence d'un piquage latéral désolidarisé des tubages de la chambre de pompage est mise en évidence. Celui-ci a également été identifié à l'extérieur de l'ouvrage par une sortie latérale cassée, visible au niveau du sol.

A la profondeur de 2.50 mètres sous le repère, un raccord entre tubes semble également désolidariser les éléments tubulaires situés de part et d'autre.

Les éléments tubulaires sous-jacents - caractérisés par des tubages en acier de diamètre 13^{n3/8} - présentent un état de conservation globalement satisfaisant malgré la présence d'une croûte oxydée associée à quelques dépôts localisés de faible épaisseur.

Jusqu'à la profondeur de 19 mètres sous le repère environ, le forage est régulièrement marqué par des tâches plus sombres, semblables à des auréoles d'humidité.

A partir de la profondeur de 25 mètres, les parois sont plus sombres et les phénomènes de corrosion se densifient avec l'apparition de petites plaques d'acier semblables à des prémices d'exfoliation de l'épaisseur de l'acier.

La présence d'hydrocarbures se fait ressentir dès 30 mètres, la paroi présentant un environnement plutôt gras et brillant.

Le niveau statique atteint à la profondeur de 31.40 mètres est marqué par la présence d'une épaisseur de quelques centimètres de surnageant pouvant être des hydrocarbures.

Les parois immergées présentent également un état mécanique visuel globalement très satisfaisant où quasiment aucunes incrustations ni dépôts n'ont été observés.

L'examen endoscopique a été poursuivi jusqu'à la profondeur de 49 mètres sous le repère où la décision d'interrompre les investigations a été prise en vue de limiter la longueur de câble de logging encrassée et souillée par les substances d'hydrocarbures surnageantes constatées au niveau piézométrique.

Piquage latéral endommagé à 1 m/repère



Hydrocarbures présents sur la caméra



DIAGRAPHIES DE PRODUCTION NATURELLE

L'allure générale de la thermographie est révélatrice de l'état d'une colonne d'eau statique, avec notamment un gradient de température moyen proche de 0.9°C pour 30 mètres, équivalent au gradient géothermique moyen des terrains encaissants avec lesquels la colonne d'eau forme un équilibre.

Le profil de minéralisation global présente une graduation verticale globalement linéaire avec la profondeur, qui attesterait d'une augmentation de la conductivité de la colonne d'eau avec la profondeur. Ce phénomène est souvent observé au droit de forages présentant la même typicité, à savoir des ouvrages profonds contenant une colonne d'eau statique dont la conductivité est globalement élevée.

L'analyse plus détaillée de ces profils permet de mettre en évidence l'existence d'un secteur de contrastes, où la linéarité des profils est rompue. Ces zones de distinctions qui sont centrées au droit de la zone de perforations annoncée entre les profondeurs de 435 et 445 mètres sous le repère, sont représentées par une importante anomalie négative visible sur le profil de conductivité et une légère anomalie positive marquant la thermographie.

A noter que la perturbation de ces profils peut difficilement être mise en relation avec les petites phases de pompage réalisées deux mois auparavant. En effet, les volumes prélevés représentant environ 2000 litres n'auraient eu d'influence que sur environ 25 mètres de colonne d'eau dans le meilleur des cas, lors de la période de récupération de pression, et non pas sur près de 280 mètres.

Le cas échéant, l'inflexion du profil de conductivité peut être la conséquence d'un ancien pompage plus conséquent, dont l'emprunte des eaux contrastées de la récupération de pression serait restée figée dans l'ouvrage en l'absence de circulation inter-nappes lorsque l'ouvrage n'est pas volontairement sollicité.

Les caractéristiques moyennes de la colonne d'eau sont les suivantes :

- au début des mesures, à 35.00 mètres :
 - température : 13.7°C
 - conductivité : 1181 µS/cm (corrigée à 25°C)

- à la base des mesures, à 1230 mètres :
 - température : 47.3°C
 - conductivité : 1625 µS/cm (corrigée à 25°C)

8

BILAN

Le niveau piézométrique mesuré le 20 décembre 2017 était situé à 31.35 mètres sous le repère pris au niveau de la bride supérieure de diamètre interne 154 mm, située à 1.30 mètre au-dessus du sol.

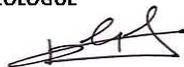
Les équipements de la chambre de pompage - matérialisés par des tubes en acier de diamètre 13^{n3/8} - présentent un aspect globalement très satisfaisant au niveau desquels aucunes traces de dégradations significatives n'ont été observées au droit des zones investiguées visuellement, à savoir jusqu'à la profondeur de 49 mètres sous le repère.

Pour des raisons de protection sanitaire des matériels d'investigation, l'examen endoscopique a dû être interrompu à la profondeur de 49 mètres, pour limiter la zone de souillure du câble de logging par l'épaisseur centimétrique de surnageant d'hydrocarbures présente au niveau piézométrique, à la profondeur de 31.40 mètres sous le repère.

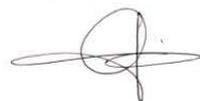
Les diagraphies de production naturelle (mesures de température et de conductivité) témoignent de la nature statique de la colonne d'eau dont la caractérisation géochimique a été effectuée entre les profondeurs de 32 mètres et 1232 mètres.

Fait à Talence, le 26 mars 2018

Rédacteur : **Karine EUZENAT**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE



Vérificateur : **Alain CHAPITEAU**
Ingénieur HYDROGEOLOGUE
Responsable Agence Gironde



Approbateur : **Sébastien DANGOUMAU**
Gérant

ANNEXES



<http://www.hydro-assistance.fr>

Annexe 1

PRESENTATION DU SITE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Présentation du site



Commune : Lacquy (40)

Forage : LC 101

Adresse : lieu-dit "Mauserbit"

Réf. cadastrale : section D - parcelle 83

Vue aérienne



Extrait cadastral



Hydro Assistance Ingénierie

Présentation du site

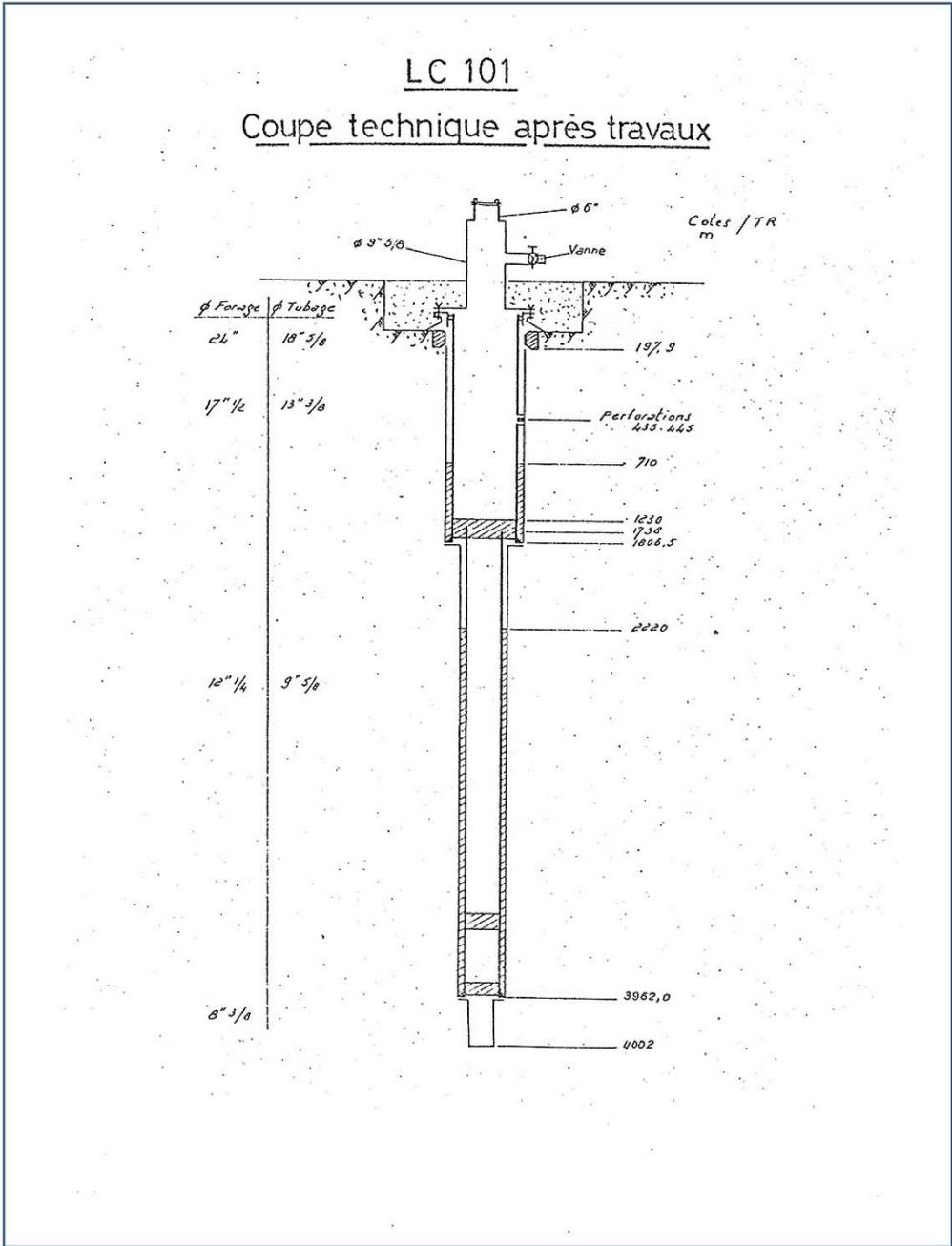
Annexe 2

COUPE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE



Commune : Lacquy (40)

Forage : LC 101

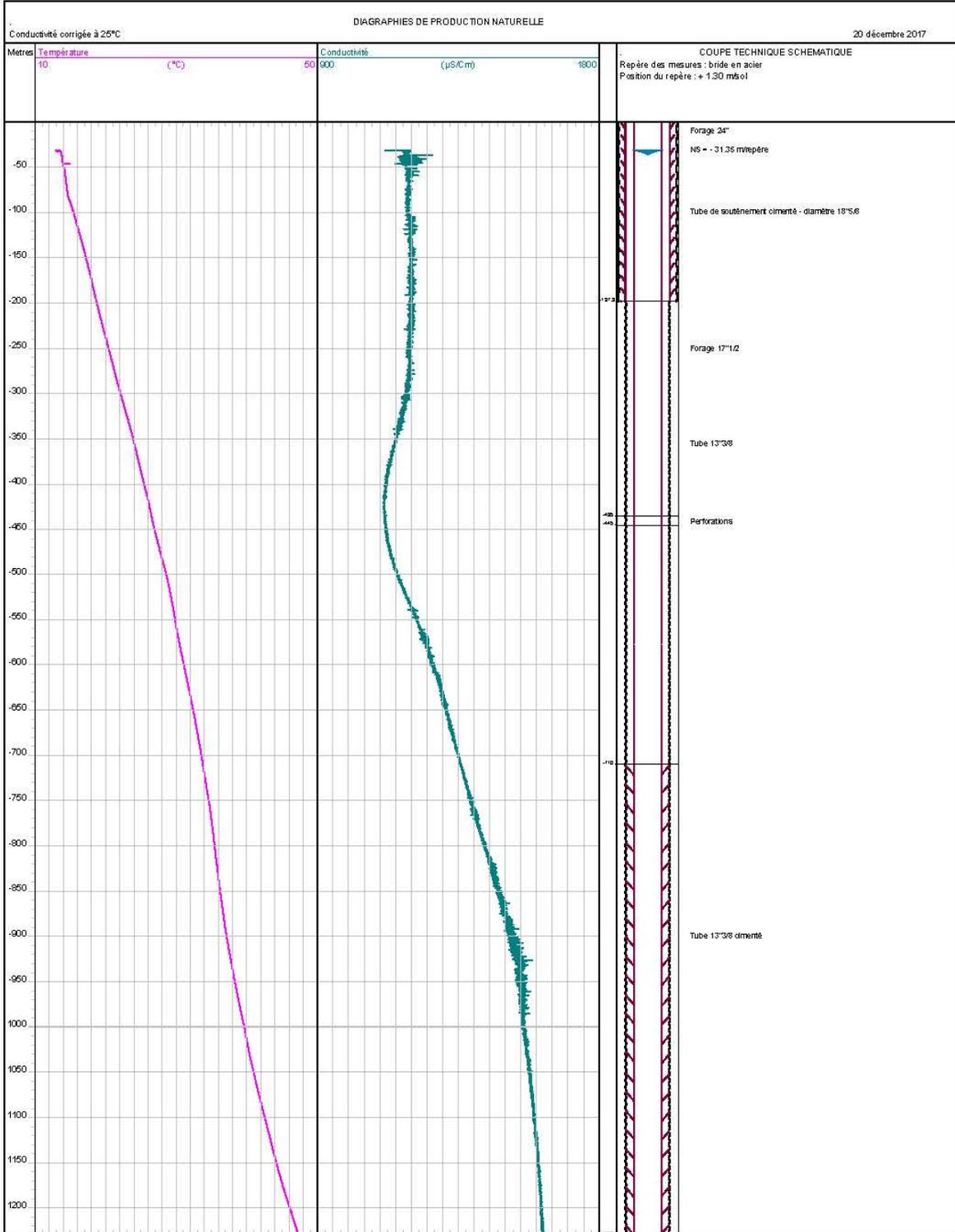


Annexe 3

DIAGRAPHIES DE PRODUCTION



Commune : Lacquy (40)
Forage : LC 101



Annexe 4

EXAMEN ENDOSCOPIQUE

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Lacquy (40)

Forage : LC 101

Date d'intervention : 11/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 13^{3/8} (1/2)



Tube plein en acier - diamètre 13^{3/8}



Désolidarisation entre le piquage latéral et le tube de la chambre de pompage



Jonction singulière entre deux tubages



Aspect globalement satisfaisant



Raccord vissé, filetage partiellement recouvert par les dépôts et les incrustations



Légère croûte de dépôts et exfoliation

HYDRO ASSISTANCE INGENIERIE

Examen endoscopique



Commune : Lacquy (40)

Forage : LC 101

Date d'intervention : 11/10/2017

Chambre de pompage en acier - diamètre 13^{3/8} (2/2)



Aspect gras de la paroi des parois



Plan d'eau présentant un surnageant gras et sombre (hydrocarbures)



Aspect gras de la caméra lié à la traversée de l'épaisseur d'hydrocarbures surnageants



Partie immergée
Aspect globalement satisfaisant



Partie immergée
Aspect globalement satisfaisant



Arrêt de l'examen endoscopique



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 - www.brgm.fr

Direction régionale Nouvelle Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70