

Etude de l'hétérogénéité verticale dans la colonne d'eau de stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines

CONSEQUENCES POUR LES OPERATIONS D'ECHANTILLONNAGE

F. Gal, J.P. Ghestem

Février 2019

Document final

Avec le soutien de :
**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT



Contexte de programmation et de réalisation

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du programme scientifique et technique AQUAREF pour la période 2017-2018, thème C, «Amélioration des méthodes d'échantillonnage ».

Auteur (s) :

Frédéric Gal
BRGM
f.gal@brgm.fr

Jean-Philippe Ghestem
BRGM
jp.ghestem@brgm.fr

Vérification du document :

Bénédicte Lepot
INERIS
benedicte.lepot@ineris.fr

Nathalie Guigues
LNE
nathalie.guigues@lne.fr

Les correspondants

AFB : Nicolas Gaury, nicolas.gaury@afbiodiversite.fr
Gaelle Deronzier, gaelle.deronzier@afbiodiversite.fr

Etablissement : Jean-Philippe Ghestem, jp.ghestem@brgm.fr

Référence du document : GAL F., GHESTEM JP. - Etude de l'hétérogénéité verticale dans la colonne d'eau de stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines - Rapport AQUAREF 2018 - BRGM/RP-68688-FR- 141 p.

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>National</i>
Niveau géographique :	<i>National</i>
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document</i>

RESUME

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des actions AQUAREF visant à l'amélioration des opérations d'échantillonnage dans le contexte de la surveillance réglementaire en application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Ce rapport concerne le contexte des échantillonnages en eau souterraine, en puits ou en forage. Il est rédigé par le BRGM dans le cadre de la convention de partenariat BRGM-AFB 2016-2018.

L'objectif du rapport est de déterminer, pour quelques stations faisant partie des réseaux de surveillance des agences de l'eau, s'il existe des hétérogénéités verticales et/ou latérales de qualité dans la colonne d'eau et, le cas échéant, les conséquences en termes de fiabilité et de représentativité de la donnée que la présence de telles hétérogénéités pourrait engendrer. Pour cela, des investigations sur site ont été réalisées sur des stations de surveillance de caractéristiques hydrogéologiques variées et disposant d'équipements variés.

En 2017, les investigations ont été opérées sur 3 stations implantées dans le bassin Adour Garonne, en parallèle de la réalisation de prélèvements réglementaires par le prestataire assurant le suivi. Ces stations sont des puits de diamètre important, pour lesquels la réalisation d'un pompage qui respecte le critère de purge équivalent à 3 fois le volume de la colonne d'eau, peut amener à pomper des volumes d'eau très conséquents et pouvant dépasser les 100 m³. Afin de déterminer s'il était possible d'atteindre une bonne représentativité physico-chimique et chimique des prélèvements avant l'atteinte d'un tel volume de pompage, des diagraphies physico-chimiques (mesure des paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur) ont été opérées. Le but est de déterminer s'il existe - ou non - des variations physico-chimiques en fonction de la profondeur ou en fonction de la position latérale de l'outil de mesure, et d'en tirer des enseignements sur les protocoles de purge existants.

En 2018, les investigations ont été pratiquées sur 6 stations implantées dans le bassin Loire Bretagne. Elles ont été plus complètes qu'en 2017 et ont consisté à appliquer les méthodes de diagraphie physico-chimique et également les méthodes classiques de pompage, couplées à des prélèvements au cours de ces phases de pompage. Les stations ont fait l'objet d'une diagraphie avant pompage et après pompage, le pompage lui-même ayant fait l'objet de prélèvements réguliers. Lorsque les stations ont révélé, lors des diagraphies, la présence d'hétérogénéités verticales, alors des diagraphies complémentaires ont été réalisées, pour mieux suivre l'influence du pompage. Des pompages ont également pu être réalisés à plusieurs profondeurs lorsque la colonne d'eau présentait des stratifications notables.

Outre des variations attendues de température en fonction de la profondeur, les profils de diagraphie opérés en 2017 ont permis de mettre en évidence, dans les 3 ouvrages suivis, l'existence de gradients de conductivité électrique, ou de plusieurs horizons caractérisés par des conductivités électriques différentes malgré la faible profondeur – quelques mètres – de ces ouvrages. Parfois, des variations de pH sont également associées. Pour ce type d'ouvrage de diamètre important, l'existence de tels contrastes pour des hauteurs d'eau réduites – un peu plus de 3 m – souligne combien il est important de positionner les dispositifs de pompage au plus bas – en maintenant cependant une zone tampon avec le fond – afin de s'assurer que l'on pompe préférentiellement des eaux issues de la base de l'ouvrage, le cuvelage n'étant pas crépiné. Les eaux présentes dans la partie supérieure du cuvelage peuvent en effet être diluées par des infiltrations d'eaux moins minéralisées ou des ruissellements depuis la surface.

Les investigations réalisées en 2018, sur des ouvrages de géométries plus variées, mettent en évidence les mêmes variations de température dans la colonne d'eau, et également de fréquentes variations de conductivité électrique, voire de pH, lorsque les ouvrages ne sont pas sollicités.

Pour les 3 ouvrages AEP du bassin Loire Bretagne ayant fait l'objet d'investigations, les hétérogénéités de conductivité électrique sont généralement gommées par le pompage, et les différents prélèvements qui peuvent être faits ne renvoient qu'une faible variabilité de la composition chimique. Ces stratifications ne semblent donc pas de nature à remettre en cause la représentativité des

échantillonnages si ceux-ci sont réalisés dans le respect des recommandations habituelles, à savoir un positionnement des pompes en bas d'ouvrage, et une purge préalable à l'échantillonnage. Il conviendra toutefois de prêter attention à certains matériaux utilisés (canalisation en acier, point de piquage en laiton) et sur les relargages d'éléments en trace qu'ils peuvent induire.

Les investigations réalisées sur les 3 autres ouvrages du bassin Loire Bretagne (puits, forage peu profond et forage profond) ont mis en évidence des situations plus complexes. Pour le puits, la réalisation de pompages à plusieurs profondeurs permet de déterminer que les principaux niveaux producteurs sont les horizons profonds. Toutefois, compte tenu de la structuration marquée de ce puits, qui persiste lorsque les volumes pompés sont assez faibles, des doutes subsistent quant à la représentativité des échantillonnages réalisés avec la pompe en place, positionnée approximativement au milieu de la colonne d'eau. Une rapide évaluation suggère qu'il faudrait plus de 8 heures de pompage pour drainer l'eau des horizons profonds au niveau de la pompe en place.

Pour le forage peu profond du bassin Loire Bretagne, les pompages à plusieurs profondeurs permettent de solliciter de manière différentielle la production de niveaux faiblement aquifères. Ceci a un impact direct sur les suivis réglementaires : si la profondeur de la pompe est modifiée, ou si les interfaces entre les différents niveaux producteurs varient au cours de l'année, par exemple en réponse aux précipitations, alors une variabilité des mesures et des analyses peut être attendue.

La réalisation d'un pompage dans le forage profond du bassin Loire Bretagne ne présente pas de complexité particulière, bien qu'elle ne puisse être échantillonnée en respectant les protocoles d'usage, tant pour la profondeur de déploiement de la pompe, plus de 165 m au-dessus des horizons producteurs, que pour le volume d'eau à pomper (plus de 4 heures pour 1 volume de colonne d'eau). Les investigations montrent combien il est crucial de purger au minimum une fois le volume de la colonne d'eau, afin de s'affranchir des phénomènes parasites d'interactions entre l'eau et un tube plein, ou d'alimentation non désirée en eau à la base du tube plein. Le pompage pratiqué durant cette étude a porté sur un volume supérieur (1,5 fois le volume de la colonne d'eau), et les suivis de l'exhaure démontrent que la représentativité n'est sans doute pas encore totalement atteinte, alors même que la stabilité des paramètres physico-chimiques peut être atteinte sur 3 mesures consécutives réalisées sur 10 minutes voire sur une durée plus longue.

Par ailleurs, en marge des objectifs initiaux, plusieurs constatations d'erreurs ou de doutes quant aux localisations exactes des points de prélèvement ont été relevées. Elles permettent de rappeler que l'identification sans ambiguïté du point à échantillonner reste le premier objectif du gestionnaire et de l'opérateur sur le terrain.

En résumé, cette étude a permis, sur quelques stations choisies de façon relativement aléatoire, d'illustrer le type d'information qui peut être apporté par la réalisation de diagraphies physico-chimiques, notamment en termes de connaissance des stations. De façon générale, sur 6 des 9 stations étudiées dans le bassin Loire Bretagne, même si ces diagraphies ont mis en évidence des stratifications de la colonne d'eau, principalement au repos, elles ne conduisent pas à conclure à un impact sur les données de surveillance pour autant que les recommandations techniques sur l'échantillonnage soient correctement suivies (positionnement de la pompe, critères de purge). A l'inverse, pour les 3 autres stations, des comportements complexes ou des spécificités d'ouvrage semblent de nature à induire des variabilités sur les données de surveillance (en éléments en traces, mais possiblement sur d'autres analytes), au-delà de la simple variation temporelle des masses d'eau.

L'objectif n'est pas de recommander de généraliser ce type d'opérations de diagraphie sur l'ensemble des stations de surveillance. Il est plutôt d'illustrer les potentialités offertes par l'outil et de suggérer qu'il soit utilisé, au cas par cas (par exemple dans les contextes suivants : ouvrages anciens, absence de coupe, ouvrages très profonds, stations montrant des chroniques temporelles difficilement exploitables, nouveaux ouvrages intégrés au réseau de surveillance...) afin d'améliorer ou de confirmer la représentativité des données de surveillance.

Mots clés (thématique et géographique) :

Diagraphie physico-chimique - pompage - représentativité du prélèvement
Réseaux de surveillance Adour-Garonne et Loire-Bretagne

STUDY OF VERTICAL HETEROGENEITY IN THE WATER COLUMN OF SOME STATIONS FROM THE FRENCH GROUNDWATER SURVEILLANCE MONITORING NETWORK

F. Gal, J.P. Ghestem

ABSTRACT

This report is part of the AQUAREF actions aimed at improving sampling operations in the context of regulatory surveillance in application of the European Water Framework Directive. This report deals with the context of groundwater sampling, in wells or in boreholes. It forms part of the BRGM actions under the BRGM-AFB 2016-2018 partnership agreement.

The objective of the report is to determine, for some stations belonging to the monitoring networks of water agencies, whether there are vertical and/or lateral heterogeneities in the water column and, where appropriate, the consequences such heterogeneities may have on the monitoring protocols. This may concern the reliability and the representativeness of the data where such heterogeneities occur. For this, on-site investigations were carried out at monitoring stations of various characteristics.

In 2017, investigations were carried out on three stations in the Adour-Garonne basin, in parallel with regulatory sampling by the recipient. These stations are wells of large diameter, for which the achievement of a pumping meeting the purging criterion of 3 times the volume of the water column, can lead to pump very large volumes, possibly exceeding 100 m³. In order to determine if it was possible to achieve a good physico-chemical and chemical representativeness of samples before reaching such a volume, physico-chemical loggings (measurement of physico-chemical parameters as a function of depth) were operated. The purpose was to determine if there were - or not - vertical or lateral physico-chemical variations and to build on these results to determine how pertinent the existing purging protocols are.

In 2018, investigations were carried out on six stations in the Loire-Brittany basin. The investigations were more comprehensive than in 2017 and consisted in applying physico-chemical logging methods and conventional pumping methods, coupled with sampling during the pumping phases. The stations were logged before pumping and after pumping, samples being regularly taken during the pumping phases. When chemical profiles revealed that some vertical heterogeneities exist, then complementary logging profiles were made to better understand the influence of the pumping process. Pumping was also done at different depths when the water column showed significant physico-chemical stratifications.

In addition to the expected temperature variations as a function of depth, the logging profiles operated in 2017 have highlighted, in the three wells monitored, the existence of electrical conductivity gradients, or of several horizons characterized by different electrical conductivities even if the wells were shallow (a few meters of depth). Sometimes pH variations are also associated. For such large diameter wells, the existence of such contrasts for reduced water heights (3 m) underlines how important it is to set the pumping device close to the bottom of the well, to ensure that water is pumped preferentially from the base of the well. Water present in the upper part of the casing can be diluted by infiltration of less mineralized water or runoff from the surface.

The investigations carried out in 2018, on boreholes of more different geometries, also highlight temperature variations in the water column and frequent variations in electrical conductivity, or even pH, when the structures are logged before pumping.

For the three water supply wells investigated, the heterogeneities of electrical conductivity generally disappear when pumping, and the samples return only a low variability of their chemical composition. Stratifications of the water column therefore do not seem likely to call into question the representativeness of the samplings if they are performed in accordance with the usual recommendations, namely a positioning of the pump at the bottom of the well and a purge prior to sampling. However, it will be necessary to pay attention to some of the materials used (steel pipe, brass stitching sampling point) and the release of trace elements that they can induce.

The investigations carried out in 2018 on the three other locations (well, shallow borehole and deep borehole) make it possible to explore more complex cases. For the well, pumping performed at several depths allows to determine which that the main producing levels are the deep horizons. However,

given the physico-chemical structure of this well, which persists when the volumes pumped are quite low, doubts remain as to the representativeness of the samplings carried out with the indwelling pump, positioned approximately in the middle of the water column. A quick evaluation suggests that it would take more than 8 hours of pumping to drain the water from the deep horizons at the level of the indwelling pump.

For the shallow borehole, pumping at several depths makes it possible to solicit differentially the production of low productive aquifer levels. This has a direct impact on regulatory monitoring: if the depth of the pump is modified, or if the interfaces between the different production levels vary during the year, for example in response to rainfall, then a variability of the measurements and subsequent analyzes can be expected.

Pumping in the deep borehole was not particularly complex, although it cannot be sampled according to the routine protocols, both for the depth of deployment of the pump, more than 165 m above producing horizons, and for the volume of water to be pumped (more than 4 hours for 1 volume of water column). The investigations show how crucial it is to purge at least once the volume of the water column, in order to get rid of unwanted phenomena such as interactions between water and borehole casing or unwanted supply of water at the base of the casing. The pumping performed during this study relies on a higher volume (1.5 times the volume of the water column). The monitoring of the discharge show that representativeness is not fully achieved, even though the stability of the physico-chemical parameters can be reached on three consecutive measurements carried out over 10 minutes or even over a longer period.

In addition to the initial objectives, several doubts about the exact locations of the sampling points were noted. They make it possible to recall that the unambiguous identification of the point to sample remains the first objective of the manager and the operator in the field.

In summary, this study has allowed, on some stations chosen in a relatively random manner, to illustrate the type of information that can be provided by physico-chemical profiles, particularly in terms of knowledge of the stations. In general, on six of the nine stations studied, even though these loggings have revealed the existence of some stratifications of the water column, they do not lead to an impact on the monitoring data as long as the technical recommendations on sampling are correctly followed (pump positioning, purge criteria). Conversely, for the other three stations, complex behaviors or particular borehole geometries seem likely to induce variability on the monitoring data (trace elements, but possibly on other analytes), beyond the simple temporal variation of water bodies.

The aim of this study is not to recommend generalizing this type of logging operations on all monitoring stations. The aim is rather to illustrate the potentialities offered by such tool and to suggest that it can be of interest on a case-by-case basis, to improve or to confirm the representativeness of the monitoring data. Such investigations may be useful e.g. in the following contexts: old boreholes, absence of information on the borehole structure, deep boreholes, stations showing temporal data difficult to exploit, new boreholes integrated into the surveillance network ...

Key words (thematic and geographical area) :

Physico-chemical logging - pumping - representativeness of the sampling
Adour-Garonne and Loire-Bretagne surveillance networks



Etude de l'hétérogénéité verticale dans la colonne d'eau de stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines

Conséquences pour les opérations d'échantillonnage

Rapport final

BRGM/RP-68688-FR

Février 2019



Etude de l'hétérogénéité verticale dans la colonne d'eau de stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines

Conséquences pour les opérations d'échantillonnage
Rapport final

BRGM/RP-68688-FR
Février 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2017-2018

F. Gal, J.P. Ghestem

Vérificateur :

Nom : N. Baran

Fonction : Correspondant APP,
Direction des Laboratoires

Date : 18/02/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Ph. Négrel

Fonction : Directeur Adjoint Direction
des Laboratoires

Date : 27/02/2019

Signature :



Mots-clés : diagraphe physico-chimique – pompage – représentativité - échantillonnage

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

Gal F., Ghestem J.P. (2019) – Etude de l'hétérogénéité verticale dans la colonne d'eau de stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines – Conséquences pour les opérations d'échantillonnage, Rapport final. Rapport final. BRGM/RP-68688-FR, 134 p.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des actions AQUAREF visant à l'amélioration des opérations d'échantillonnage dans le contexte de la surveillance réglementaire en application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Ce rapport concerne le contexte des échantillonnages en eau souterraine, en puits ou en forage. Il est rédigé par le BRGM dans le cadre de la convention de partenariat BRGM-AFB 2016-2018.

L'objectif du rapport est de déterminer, pour quelques stations faisant partie des réseaux de surveillance des agences de l'eau, s'il existe des hétérogénéités verticales et/ou latérales de qualité dans la colonne d'eau et, le cas échéant, les conséquences en termes de fiabilité et de représentativité de la donnée que la présence de telles hétérogénéités pourrait engendrer. Pour cela, des investigations sur site ont été réalisées sur des stations de surveillance de caractéristiques hydrogéologiques variées et disposant d'équipements variés.

En 2017, les investigations ont été opérées sur 3 stations implantées dans le bassin Adour Garonne, en parallèle de la réalisation de prélèvements réglementaires par le prestataire assurant le suivi. Ces stations sont des puits de diamètre important, pour lesquels la réalisation d'un pompage qui respecte le critère de purge équivalent à 3 fois le volume de la colonne d'eau, peut amener à pomper des volumes d'eau très conséquents et pouvant dépasser les 100 m³. Afin de déterminer s'il était possible d'atteindre une bonne représentativité physico-chimique et chimique des prélèvements avant l'atteinte d'un tel volume de pompage, des diagraphies physico-chimiques (mesure des paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur) ont été opérées. Le but est de déterminer s'il existe – ou non – des variations physico-chimiques en fonction de la profondeur ou en fonction de la position latérale de l'outil de mesure, et d'en tirer des enseignements sur les protocoles de purge existants.

En 2018, les investigations ont été pratiquées sur 6 stations implantées dans le bassin Loire Bretagne. Elles ont été plus complètes qu'en 2017 et ont consisté à appliquer les méthodes de diagraphie physico-chimique et également les méthodes classiques de pompage, couplées à des prélèvements au cours de ces phases de pompage. Les stations ont fait l'objet d'une diagraphie avant pompage et après pompage, le pompage lui-même ayant fait l'objet de prélèvements réguliers. Lorsque les stations ont révélé, lors des diagraphies, la présence d'hétérogénéités verticales, alors des diagraphies complémentaires ont été réalisées, pour mieux suivre l'influence du pompage. Des pompages ont également pu être réalisés à plusieurs profondeurs lorsque la colonne d'eau présentait des stratifications notables.

Outre des variations attendues de température en fonction de la profondeur, les profils de diagraphie opérés en 2017 ont permis de mettre en évidence, dans les 3 ouvrages suivis, l'existence de gradients de conductivité électrique, ou de plusieurs horizons caractérisés par des conductivités électriques différentes malgré la faible profondeur — quelques mètres — de ces ouvrages. Parfois, des variations de pH sont également associées. Pour ce type d'ouvrage de diamètre important, l'existence de tels contrastes pour des hauteurs d'eau réduites — un peu plus de 3 m — souligne combien il est important de positionner les dispositifs de pompage au plus bas — en maintenant cependant une zone tampon avec le fond — afin de s'assurer que l'on pompe préférentiellement des eaux issues de la base de l'ouvrage, le cuvelage n'étant pas crépiné. Les eaux présentes dans la partie supérieure du cuvelage peuvent en effet être diluées par des infiltrations d'eaux moins minéralisées ou des ruissellements depuis la surface.

Les investigations réalisées en 2018, sur des ouvrages de géométries plus variées, mettent en évidence les mêmes variations de température dans la colonne d'eau, et également de fréquentes variations de conductivité électrique, voire de pH, lorsque les ouvrages ne sont pas sollicités.

Pour les 3 ouvrages AEP du bassin Loire Bretagne ayant fait l'objet d'investigations, les hétérogénéités de conductivité électrique sont généralement gommées par le pompage, et les différents prélèvements qui peuvent être faits ne renvoient qu'une faible variabilité de la composition chimique. Ces stratifications ne semblent donc pas de nature à remettre en cause la représentativité des échantillonnages si ceux-ci sont réalisés dans le respect des recommandations habituelles, à savoir un positionnement des pompes en bas d'ouvrage, et une purge préalable à l'échantillonnage. Il conviendra toutefois de prêter attention à certains matériaux utilisés (canalisation en acier, point de piquage en laiton) et sur les relargages d'éléments en trace qu'ils peuvent induire.

Les investigations réalisées sur les 3 autres ouvrages du bassin Loire Bretagne (puits, forage peu profond et forage profond) ont mis en évidence des situations plus complexes. Pour le puits, la réalisation de pompages à plusieurs profondeurs permet de déterminer que les principaux niveaux producteurs sont les horizons profonds. Toutefois, compte tenu de la structuration marquée de ce puits, qui persiste lorsque les volumes pompés sont assez faibles, des doutes subsistent quant à la représentativité des échantillonnages réalisés avec la pompe en place, positionnée approximativement au milieu de la colonne d'eau. Une rapide évaluation suggère qu'il faudrait plus de 8 heures de pompage pour drainer l'eau des horizons profonds au niveau de la pompe en place.

Pour le forage peu profond du bassin Loire Bretagne, les pompages à plusieurs profondeurs permettent de solliciter de manière différentielle la production de niveaux faiblement aquifères. Ceci a un impact direct sur les suivis réglementaires : si la profondeur de la pompe est modifiée, ou si les interfaces entre les différents niveaux producteurs varient au cours de l'année, par exemple en réponse aux précipitations, alors une variabilité des mesures et des analyses peut être attendue.

La réalisation d'un pompage dans le forage profond du bassin Loire Bretagne ne présente pas de complexité particulière, bien qu'elle ne puisse être échantillonnée en respectant les protocoles d'usage, tant pour la profondeur de déploiement de la pompe, plus de 165 m au-dessus des horizons producteurs, que pour le volume d'eau à pomper (plus de 4 heures pour 1 volume de colonne d'eau). Les investigations montrent combien il est crucial de purger au minimum une fois le volume de la colonne d'eau, afin de s'affranchir des phénomènes parasites d'interactions entre l'eau et un tube plein, ou d'alimentation non désirée en eau à la base du tube plein. Le pompage pratiqué durant cette étude a porté sur un volume supérieur (1,5 fois le volume de la colonne d'eau), et les suivis de l'exhaure démontrent que la représentativité n'est sans doute pas encore totalement atteinte, alors même que la stabilité des paramètres physico-chimiques peut être atteinte sur 3 mesures consécutives réalisées sur 10 minutes voire sur une durée plus longue. Par ailleurs, en marge des objectifs initiaux, plusieurs constatations d'erreurs ou de doutes quant aux localisations exactes des points de prélèvement ont été relevées. Elles permettent de rappeler que l'identification sans ambiguïté du point à échantillonner reste le premier objectif du gestionnaire et de l'opérateur sur le terrain.

En résumé, cette étude a permis, sur quelques stations choisies de façon relativement aléatoire, d'illustrer le type d'information qui peut être apporté par la réalisation de diagraphies physico-chimiques, notamment en termes de connaissance des stations. De façon générale, sur 6 des 9 stations étudiées dans le bassin Loire Bretagne, même si ces diagraphies ont mis en évidence des stratifications de la colonne d'eau, principalement au repos, elles ne conduisent pas à

conclure à un impact sur les données de surveillance pour autant que les recommandations techniques sur l'échantillonnage soient correctement suivies (positionnement de la pompe, critères de purge). A l'inverse, pour les 3 autres stations, des comportements complexes ou des spécificités d'ouvrage semblent de nature à induire des variabilités sur les données de surveillance (en éléments en traces, mais possiblement sur d'autres analytes), au-delà de la simple variation temporelle des masses d'eau.

L'objectif n'est pas de recommander de généraliser ce type d'opérations de diagrapie sur l'ensemble des stations de surveillance. Il est plutôt d'illustrer les potentialités offertes par l'outil et de suggérer qu'il soit utilisé, au cas par cas (par exemple dans les contextes suivants : ouvrages anciens, absence de coupe, ouvrages très profonds, stations montrant des chroniques temporelles difficilement exploitables, nouveaux ouvrages intégrés au réseau de surveillance...) afin d'améliorer ou de confirmer la représentativité des données de surveillance.

Sommaire

1. Contexte et objectifs	27
1.1. CONTEXTE GENERAL	27
1.2. CHOIX DES STATIONS ET INVESTIGATIONS REALISEES.....	28
1.3. STRUCTURE DU RAPPORT.....	29
1.4. REMERCIEMENTS	29
2. Caractéristiques des stations étudiées	31
3. Matériel.....	35
4. Investigations sur des ouvrages de gros diamètre.....	37
4.1. STATION DE LAYRAC-SUR-TARN.....	37
4.2. STATION DE GRENADE	42
4.3. STATION DE FINHAN	47
5. Investigations sur des ouvrages de diamètre plus faible.....	53
5.1. STATION DE LA GUERCHE SUR L'AUBOIS.....	53
5.1.1. Mode opératoire.....	53
5.1.2. Diagraphie	55
5.1.3. Prélèvement.....	58
5.1.4. Analyses de laboratoire.....	62
5.1.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire	63
5.2. STATION D'ESTIVAREILLES.....	64
5.2.1. Mode opératoire.....	64
5.2.2. Diagraphie	65
5.2.3. Prélèvement.....	67
5.2.4. Analyses de laboratoire.....	68
5.2.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire	70
5.3. STATION DE LA PEROUILLE – PERTURBRAULT	70
5.3.1. Mode opératoire.....	70
5.3.2. Diagraphie	71
5.3.3. Prélèvement.....	75
5.3.4. Analyses de laboratoire.....	82

5.3.5.	Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire	83
5.4.	STATION DE VATAN	84
5.4.1.	Mode opératoire	84
5.4.2.	Diagraphie	86
5.4.3.	Prélèvement	89
5.4.4.	Analyses de laboratoire	91
5.4.5.	Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire	92
5.5.	STATION DE SUEVRES	93
5.5.1.	Mode opératoire	93
5.5.2.	Diagraphie	94
a)	Pompage à 4,3 m de profondeur	97
b)	Pompage à 5,5 m de profondeur	98
c)	Pompage à 6,8 m de profondeur	102
d)	Pompage à 7,3 m de profondeur	102
e)	Informations relatives aux pompages réalisés à différentes profondeurs	105
5.5.3.	Prélèvement	105
5.5.4.	Analyses de laboratoire	109
5.5.5.	Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire	111
6.	Investigations sur un ouvrage profond	113
6.1.	MODE OPERATOIRE	113
6.2.	DIAGRAPHIE	114
6.3.	PRELEVEMENT	119
6.4.	ANALYSES DE LABORATOIRE	124
6.5.	CONSEQUENCES SUR LES RESULTATS DE SURVEILLANCE REGLEMENTAIRE	126
7.	Conclusion	129
8.	Références	133
9.	Annexes	135
	Incertitudes relatives à la nomenclature des ouvrages	135
9.1.	STATION DE LA GUERCHE SUR L'AUBOIS	135
9.2.	STATION D'ESTIVAREILLES	136
9.3.	STATION DE LA PEROUILLE – PERTURBRAULT	136

9.4. STATION DE VATAN – AEP DE LA SOURCE DES SEIGNEURS	137
9.5. STATION DE SUEVRES	138
9.6. STATION DE BRETTEES	139

Liste des figures

Figure 1 : localisation des 3 stations ayant fait l'objet d'investigations en 2017.	31
Figure 2 : localisation des 6 stations ayant fait l'objet de mesures et de prélèvements en 2018.	33
Figure 3 : puits de Layrac – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton (le fond de l'ouvrage est visible par transparence).	37
Figure 4 : puits de Layrac – implantation des diagraphies.	38
Figure 5 : Layrac – diagraphie au centre du puits.	40
Figure 6 : Layrac – récapitulatif des différentes diagraphies – la mesure O2-005 est erronée (capteur obturé par de la boue).	41
Figure 7 : puits de Grenade – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton.	42
Figure 8 : puits de Grenade – implantation des diagraphies.	43
Figure 9 : Grenade – diagraphie au centre du puits.	45
Figure 10 : Grenade – récapitulatif des différentes diagraphies.	46
Figure 11 : puits de Finhan – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton.	47
Figure 12 : puits de Finhan – implantation des diagraphies.	48
Figure 13 : Finhan – diagraphie au centre du puits.	50
Figure 14 : Finhan – récapitulatif des différentes diagraphies.	51
Figure 15 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station de La Guerche sur l'Aubois.	54
Figure 16 : station de La Guerche sur l'Aubois : aperçu des actions menées sur site (diagraphie dans la colonne d'eau, prélèvement au seau et pompage) ; la flèche jaune indique le point de référence utilisé pour la mesure des niveaux d'eau dans l'ouvrage. ...	54
Figure 17 : station de La Guerche sur l'Aubois : diagraphie initiale dans la colonne d'eau.	57
Figure 18 : station de La Guerche sur l'Aubois : données comparées de diagraphie en température et en conductivité électrique ; diagraphie initiale au centre du puits (11:20), répétition au centre du puits après remontée de l'outil (11:28), descente au voisinage de la paroi en béton (11:37) et descente pour venir toucher le sommet du tube métal (11:41).	58
Figure 19 : station de La Guerche sur l'Aubois : suivi du pompage ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.	61
Figure 20 : station de La Guerche sur l'Aubois : données comparées de diagraphie en potentiel redox – données recalées sur un potentiel identique à 50 cm de profondeur. ...	62
Figure 21 : station de La Guerche sur l'Aubois : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).	63
Figure 22 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station d'Estivareilles et aperçu des investigations réalisées sur site.	65
Figure 23 : station d'Estivareilles : diagraphies dans la colonne d'eau.	66
Figure 24 : station d'Estivareilles : suivi du pompage ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.	68

Figure 25 : station d'Estivareilles : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).	69
Figure 26 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station de La Pérouille et aperçu des investigations réalisées sur site.	71
Figure 27 : station de La Pérouille : exemple de diagraphie initiale (les données des deux diagraphies étant très semblables, seuls les deux profils de température sont figurés).	73
Figure 28 : station de La Pérouille : détail des diagraphies pratiquées avant pompage (11:15), en cours d'action de pompage (15:35), et en fin de pompage (17:15).	74
Figure 29 : station de la Pérouille : suivi du pompage ; vue synthétique.	76
Figure 30 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 1 m de colonne d'eau (10,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché. ...	78
Figure 31 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 2 m de colonne d'eau (11,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché. ...	78
Figure 32 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 3 m de colonne d'eau (12,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché. ...	79
Figure 33 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 4 m de colonne d'eau (13,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché. ...	79
Figure 34 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 5 m de colonne d'eau (14,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché. ...	80
Figure 35 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 6 m de colonne d'eau (15,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché ; l'étoile indique la période durant laquelle une diagraphie a été faite dans le puits (diagraphie de 15:35).	80
Figure 36 : station de la Pérouille : suivi du pompage avec la pompe à demeure ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.	81
Figure 37 : station de la Pérouille : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).	83
Figure 38 : principales caractéristiques techniques de la Source des Seigneurs à la station AEP de Vatan et aperçu des investigations réalisées sur site.	85
Figure 39 : suivi du niveau piézométrique de la Source des Seigneurs lors des phases de pompage pour remplissage du château d'eau (zones grisées) et lors des phases d'arrêt de pompage.	86
Figure 40 : station de Vatan : diagraphies initiales (réalisées alors que le pompage AEP était actif).	88
Figure 41 : station de Vatan : diagraphie finale (hors pompage AEP).	89
Figure 42 : station de Vatan : suivi du pompage avec pompe MP1 ; vue synthétique ; les flèches indiquent les moments auxquels les prélèvements sont déclenchés.	90
Figure 43 : station de Vatan : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Cr, Co, Ag, Cd et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).	92
Figure 44 : principales caractéristiques techniques du puits de la Fosse Thibaudeau (Suèvres) et aperçu des investigations réalisées sur site.	94
Figure 45 : station de Suèvres : diagraphie initiale.	96

Figure 46 : station de Suèvres : détail des diagraphies pratiquées (à 09:55, 10:20, 10:55 et 11:20) durant le pompage à 4,3 m de profondeur (pompage de 09:15 à 11:15). La diagraphie avant pompage (08:40) est indiquée en référence.	100
Figure 47 : station de Suèvres : détail de la diagraphie pratiquée (à 12:00) durant le pompage à 5,5 m de profondeur (pompage de 11:30 à 12:10). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 4,3 m (11:20) sont indiquées en référence.	101
Figure 48 : station de Suèvres : détail des diagraphies pratiquées (à 12:35, 13:45 et 14:05) durant le pompage à 6,8 m de profondeur (pompage de 12:10 à 12:50 et de 13:30 à 14:05). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 5,5 m (12:00) sont indiquées en référence.	103
Figure 49 : station de Suèvres : détail de la diagraphie pratiquée (à 13:10) durant le pompage à 7,3 m de profondeur (pompage de 12:50 à 13:30). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 6,8 m (12:35) sont indiquées en référence.	104
Figure 50 : station de Suèvres : suivi du pompage ; vue synthétique.	107
Figure 51 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 80 cm de colonne d'eau (4,3 m de profondeur) ; les flèches indiquent le moment où des prélèvements sont réalisés.	107
Figure 52 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 2 m de colonne d'eau (5,5 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.	108
Figure 53 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 3,3 m de colonne d'eau (6,8 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.	108
Figure 54 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 3,8 m de colonne d'eau (7,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.	109
Figure 55 : station de Suèvres : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).	110
Figure 56 : principales caractéristiques techniques du forage des Linottes (Brettes) et aperçu des investigations réalisées sur site.	114
Figure 57 : station de Brettes : diagraphie initiale ; le cartouche présente un détail sur les profils de conductivité électrique et de température à la base du tube plein et dans le trou nu.	117
Figure 58 : station de Brettes : diagraphie à l'issue du pompage (08/11/18 – 17:30 ; données en température, conductivité électrique et oxygène dissous) et diagraphie pratiquée le lendemain matin (09/11/18 – 09:00 ; données en température et conductivité électrique).	119
Figure 59 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec boîtiers WTW ; paramètres débit, conductivité électrique et pH ; les flèches indiquent les heures de prélèvement des échantillons.	120
Figure 60 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec boîtiers WTW ; paramètres température, potentiel redox et oxygène dissous.	121
Figure 61 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec la sonde de diagraphie ; paramètres température, conductivité électrique et oxygène dissous.	121
Figure 62 : station de Brettes : analyses chimiques sur éléments majeurs (en mg/L ; ne sont pas représentés les éléments inférieurs à la limite de quantification : NO ₂ <0,01 mg/L ; NO ₃ <0,5 mg/L ; PO ₄ <0,05 mg/L ; CO ₃ <10 mg/L).	125
Figure 63 : station de Brettes : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Cr, Ni, Co, Cu,	

Ag, Cd et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).
 126

Figure 64 : La Guerche sur l'Aubois : implantation des ouvrages (cercles jaunes) et localisation de
 l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire (cercle bleu). 135

Figure 65 : Estivareilles : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi
 réglementaire. 136

Figure 66 : La Pérouille : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi
 réglementaire. 137

Figure 67 : Vatan : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi
 réglementaire. 138

Figure 68 : Suèvres : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi
 réglementaire. 139

Figure 69 : Brettes : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi
 réglementaire. 140

Figure 70 : Brettes : correction des incohérences dans la BSS 140

Liste des tableaux

Tableau 1 : caractéristiques des captages visités en 2017 ; * : pas d'indication de date de mesure.	32
Tableau 2 : caractéristiques des captages visités en 2018 ; * : pas d'indication de date de mesure ; ** : pour l'ouvrage de Brettes, deux codes BSS sont attribués ; voir annexe à ce sujet ; *** l'ouvrage de Brettes n'est pas utilisé, mais il a été foré dans ce but.	34
Tableau 3 : caractéristiques des capteurs montés sur les sondes de diagraphie Idronaut – données constructeur ; PE : pleine échelle ; * : mode eau douce.	35
Tableau 4 : caractéristiques des capteurs WTW.....	36
Tableau 5 : Layrac – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).....	37
Tableau 6 : Grenade – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).....	42
Tableau 7 : Finhan – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).....	47
Tableau 8 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage au seau et à l'échantillonnage en pompage (station de La Guerche sur l'Aubois).	59
Tableau 9 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage en pompage (station d'Estivareilles).....	67
Tableau 10 : paramètres physico-chimiques mesurés suite aux échantillonnages en pompage à différentes profondeurs (station de la Pérouille).....	81
Tableau 11 : caractéristiques des pompages à différentes profondeurs (station de la Pérouille) ; l'équivalent hauteur de colonne d'eau est calculé en considérant le volume d'eau présent dans un cylindre de 1 m de diamètre ; la contribution potentielle de l'aquifère est le rapport entre l'équivalent hauteur de colonne d'eau et le rabattement constaté lors du pompage.	82
Tableau 12 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage en pompage avec pompe MP1 (station de Vatan).	91
Tableau 13 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – comparaison entre mesures au boîtier WTW et mesures avec la sonde de diagraphie Idro 316.	106

1. Contexte et objectifs

1.1. CONTEXTE GENERAL

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des actions AQUAREF visant à l'amélioration des opérations d'échantillonnage dans le contexte de la surveillance réglementaire en application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. De façon plus précise, il concerne le contexte des échantillonnages en eau souterraine. Il est rédigé par le BRGM dans le cadre de la convention de partenariat BRGM-AFB 2016-2018.

Si une grande partie des masses d'eau souterraines est suivie grâce à des puits ou des forages qui ne présentent pas, *a priori*, de géométrie complexe ou d'hétérogénéités verticales dans la colonne d'eau, une autre partie peut présenter de telles « difficultés » pouvant rendre plus complexe les opérations d'échantillonnage. Des questions spécifiques liées à la représentativité des échantillons d'eaux souterraines sont ainsi régulièrement citées dans la littérature (par exemple McMillan *et al.*, 2015). Même dans des environnements d'apparente faible complexité hydrologique, l'échantillonnage des eaux souterraines aux fins de la surveillance peut ne pas être simple. Souvent, les puits de surveillance n'ont pas été conçus spécifiquement pour de telles opérations. Ils font par exemple partie de champs captants ou sont des ouvrages forés à d'autres fins et convertis en puits de surveillance. Certains puits peuvent faire l'objet de pompages fréquents à des débits très élevés, ce qui entraîne un abaissement important de la nappe phréatique, ce qui n'est pas souhaitable. Il peut s'agir de puits de grand diamètre dans lesquels la purge à faible débit est virtuelle. Il peut aussi s'agir de puits à longue crépine recoupant plusieurs couches de propriétés chimiques différentes (Mayo, 2010), voire d'ouvrages en trou nu. Lorsque les puits sont vieux, les paramètres hydrologiques des niveaux de production ne sont souvent pas, ou mal, connus. Un questionnement spécifique existe également sur l'influence des écoulements verticaux potentiellement présents dans des ouvrages à longue crépine (Church et Granato, 1996), en particulier lorsque les débits de pompage ne suffisent pas pour surmonter ces écoulements (McMillan *et al.*, 2014). Dans de tels cas, un régime hydraulique permanent peut être atteint bien avant que l'eau captée ne soit représentative de la chimie de l'aquifère (McMillan *et al.*, 2014). Des interrogations peuvent également exister lorsque l'on se réfère à des forages peu profonds mis en place à proximité de rivières, car ces puits peuvent être influencés par la variation annuelle de la température de l'eau sous les cours d'eau et par son influence possible sur les écoulements verticaux à l'intérieur du puits (Anderson, 2005).

Si le présent rapport n'a pas pour objectif de réaliser une synthèse bibliographique de la problématique de la représentativité de l'échantillonnage, il a celui de s'intéresser, pour des stations faisant partie des réseaux de surveillance des agences de l'eau, aux éventuelles hétérogénéités verticales de la colonne d'eau et, le cas échéant aux conséquences en termes de fiabilité et de représentativité de la donnée.

Pour essayer de mieux comprendre ce que ces hétérogénéités peuvent induire dans les protocoles de suivi, des investigations ont été réalisées en 2017 et 2018 sur des stations de surveillance de caractéristiques variées. Elles ont principalement consisté à appliquer des méthodes de diagrapie physico-chimique c'est-à-dire à enregistrer en continu les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (pH, conductivité, température, oxygène, ...) en fonction de la profondeur de l'ouvrage.

1.2. CHOIX DES STATIONS ET INVESTIGATIONS REALISEES

Le choix des stations pour réaliser de telles études, visant non seulement à appliquer une méthodologie (diagraphie), mais aussi le cas échéant à identifier des hétérogénéités verticales de la colonne d'eau, est un exercice complexe qui peut difficilement résulter d'une démarche formalisée. Dans cette étude, des contacts ont été pris avec des agences et des préleveurs afin de cibler quelques stations de surveillance pouvant être pertinentes, de par leur caractéristiques d'ouvrage ou de par les résultats des chroniques de surveillance. Ces choix restent cependant difficilement justifiables avec précision. Ils ont comme avantages d'aboutir à un jeu de stations appartenant aux réseaux de contrôle de surveillance et de couvrir des typologies variées. Ils ne peuvent être considérés comme représentatifs de l'ensemble des stations des réseaux de surveillance.

Les investigations ont été réalisées en 2017 et en 2018. Elles sont basées sur la réalisation de diagraphies géochimiques, et, en 2018, de pompages et d'analyses de laboratoire. Diverses typologies d'ouvrages sont couvertes : ouvrages de large diamètre (>2,5m), peu profonds (3 stations) ; ouvrages de diamètres plus réduits (30 à 120 cm), potentiellement un peu plus profonds (5 stations) ; et enfin une station constituée par un forage profond.

En 2017, dans le cadre d'échanges avec l'agence de l'eau Adour Garonne concernant des visites sur site AQUAREF, et suite à des échanges entre le BRGM et le Laboratoire Départemental de Haute Garonne (LDE31 EVA), laboratoire en charge d'échantillonnages en eau souterraine sur le bassin Adour Garonne, les diagraphies physico-chimiques ont été réalisées dans 3 ouvrages implantés au Nord de l'agglomération toulousaine (Layrac-sur-Tarn, Grenade et Finhan). Ces ouvrages présentent des difficultés de surveillance car il s'agit de puits de gros diamètre, pour lesquels la réalisation d'un pompage qui respecte le critère de purge de 3 fois le volume de la colonne d'eau, peut amener à pomper des volumes très conséquents, pouvant dépasser 100 m³.

Le but recherché avec la réalisation de diagraphies géochimiques est d'essayer de déterminer s'il existe – ou non – des hétérogénéités (verticales et/ou latérales) dans la colonne d'eau. Les longues séquences de pompage déjà réalisées lors des prélèvements réglementaires ne montrent qu'une faible variabilité des paramètres physico-chimiques et des concentrations en éléments dissous, ce qui suggère que les aquifères captés par ces puits sont assez homogènes (en tout cas dans la zone à laquelle la pompe est disposée, au tiers inférieur du puits). Cependant, compte tenu des difficultés pratiques posées par les échantillonnages dans ces puits, la confirmation ou non de l'absence d'hétérogénéité permettrait de mieux répondre à la question sous-jacente qui consiste à déterminer si de tels ouvrages doivent toujours faire l'objet de purges importantes (3 fois le volume), si des hétérogénéités sont mises en évidence, ou s'il serait envisageable, en cas de totale homogénéité de la colonne d'eau, de réduire la quantité d'eau pompée.

En 2018, le choix de stations a été réalisé en partenariat avec l'agence de l'eau Loire Bretagne, en se focalisant sur quelques stations qui présentaient des anomalies de chroniques temporelles sur certains paramètres physico-chimiques. Cinq stations ont été sélectionnées par l'agence de l'eau Loire Bretagne. En complément, une station du bassin Adour Garonne, intéressante en raison de sa très grande profondeur a également été étudiée.

Tirant partie du retour d'expérience des campagnes 2017, les investigations sur les ouvrages en 2018 ont été plus détaillées qu'en 2017. Toutes les stations ont fait l'objet, au minimum, d'une diagraphie avant toute intervention sur l'ouvrage et d'un prélèvement. Sur certaines stations, pour

lesquelles les données disponibles sur la base de données ADES indiquent une variabilité parfois importante de certains paramètres, les diagraphies ont pu être réalisées à plusieurs reprises, notamment pour évaluer l'influence du pompage. De même, le pompage a pu être réalisé à plusieurs profondeurs, selon les indications fournies par la diagraphie initiale. C'est notamment le cas lorsqu'une stratification de la colonne d'eau est mise en évidence. La durée minimum de présence sur une station a été de 2h30 et la durée maximum a été d'une journée complète.

1.3. STRUCTURE DU RAPPORT

Dans ce rapport, il a été choisi de présenter les investigations ouvrage par ouvrage, et de façon détaillée, afin d'illustrer les réflexions et éventuelles méthodologies spécifiques d'investigation mises en place au cours des différentes missions. Avant cette présentation détaillée, le choix des stations puis le matériel utilisé pour pratiquer les mesures sur site sont présentés.

Les investigations sur site sont ensuite réparties dans trois chapitres :

- Ouvrages de large diamètre ;
- Ouvrages de plus petit diamètre ;
- Ouvrage profond.

Au sein de chacun de ses chapitres sont présentées, par station, les diagraphies réalisées, et le cas échéant les pompages et résultats d'analyses chimiques. Des interprétations sont proposées et un paragraphe de conclusion discute les conséquences éventuelles sur les échantillonnages réglementaires de la station considérée.

Le chapitre de conclusion offre une synthèse des principaux enseignements, présentée de façon transverse à l'ensemble des ouvrages.

Enfin, une annexe présente quelques retours d'expérience identifiés au cours de cette étude, en marge des objectifs initiaux, et qui concernent des incertitudes liées à la nomenclature des ouvrages.

1.4. REMERCIEMENTS

Les auteurs du rapport remercient, pour leur aide dans la réalisation de cette étude :

- Mr Paiusco, du Laboratoire Départemental 31 : Eau - Vétérinaire – Air pour l'aide à la sélection de 3 sites sur le bassin Adour Garonne et l'accompagnement lors de la réalisation des opérations de diagraphies sur ces sites ;
- Mr Canal, de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne pour l'aide à la sélection de sites sur le bassin Loire Bretagne.

2. Caractéristiques des stations étudiées

En 2017, trois stations du réseau de surveillance de l'AEAG ont fait l'objet de diagraphies sans analyses chimiques complémentaires : Layrac-sur-Tarn, Grenade et Finhan (Figure 1). La première station est implantée dans la plaine alluviale du Tarn, les deux autres stations sont implantées dans la plaine alluviale de la Garonne.

Les principales caractéristiques des 3 ouvrages suivis sont synthétisées dans le Tableau 1. Il s'agit dans les 3 cas d'ouvrages peu profonds mais de très gros diamètre.

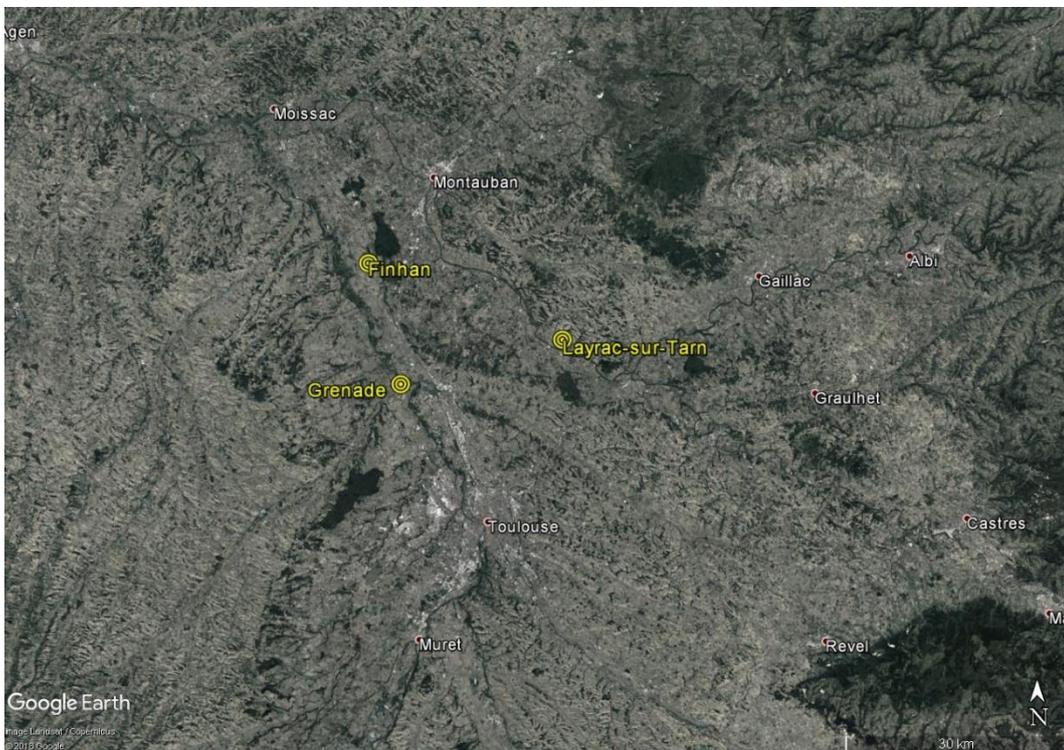


Figure 1 : localisation des 3 stations ayant fait l'objet d'investigations en 2017.

	Layrac-sur-Tarn	Grenade	Finhan
Code BSS	09576X0065/F BSS002ELMD	09567X0222/F BSS002EJYM	09562X0016/F BSS002EGQZ
Locations GPS WGS84	43,82493327°N 1,56846783°E	43,77076135°N 1,29898457°E	43,91734492°N 1,24487179°E
Profondeur (m / sol)	7	7,06	6,53
Niveau statique (m / sol)*	3	3	3 – 3,3
Diamètre (m)	3	2,6	3,3
Date d'implantation	1949	1947	1962
Géologie	Quaternaire alluvionnaire	Quaternaire alluvionnaire	Alluvions anciens
Matériau	Paroi béton	Paroi béton	Paroi béton
Utilisation	Eau collective	Eau collective	Eau collective
Type	Qualitomètre	Qualitomètre	Qualitomètre

Tableau 1 : caractéristiques des captages visités en 2017 ; * : pas d'indication de date de mesure.

Les investigations plus détaillées, opérées en 2018, ont portées sur 5 stations du réseau AELB (en Août 2018) et sur une sixième station du réseau AEAG (en Novembre 2018). Ces stations sont localisées sur la Figure 2. Les principales caractéristiques des ouvrages sont reportées dans le Tableau 2. Compte tenu des incertitudes sur certains ouvrages, les données de ce Tableau 2 se rapportent aux ouvrages réellement visités, et pas aux codes BSS référencés dans les fiches stations communiquées par l'AELB. Les données de la BSS, plus parcellaires pour certains ouvrages, sont complétées par des constatations faites sur site lors des mesures.



Figure 2 : localisation des 6 stations ayant fait l'objet de mesures et de prélèvements en 2018.

	La Guerche sur l'Aubois	Estivareilles	La Pérouille	Vatan	Suèvres	Brettes**
Code BSS	05481X0013/P2AEP BSS001LTPM	06191X0088/P5 BSS001PUÉE	05702X0012/P BSS001MUNL	05185X0005/HYAEP BSS001KFRR	04291X0065/P BSS001DUPU	06611X0087/S BSS001RQXX 06611X0088/F BSS001RQXY
Localisation GPS WGS84	46,93476999°N 2,96170339°E	46,43616109°N 2,60656275°E	46,71504386°N 1,53567737°E	47,06030776°N 1,86168676°E	47,66114513°N 1,46481225°E	45,99848516°N 0,03901928°E 45,99829214°N 0,03838164°E
Profondeur (m / sol)	7,83	4,5	14,3	10,6	7,5	264
Niveau statique (m / sol)	1,62*	0,70 (01/04/1952)	5,70*	0,40*	2,82 (08/06/1982)	25,73 (05/06/2003)
Diamètre (cm)	60	110	100	200 jusqu'à 8,5 m 120 au-delà	30	17,8 jusqu'à 201 m Trou nu au-delà
Implantation	1939	-	1988	1971	1982	2002
Géologie	Calcaires et marnes captifs du Dogger	Alluvions du Cher	Sables et argiles Eocène de la Brenne	Calcaires et marnes du Jurassique supérieur	Alluvions de la Loire	Calcaires fissurés captifs du Lias
Matériau	Paroi béton	Paroi béton	Brique/pierre	Paroi béton	PVC	Acier/trou nu
Utilisation	Eau collective	Eau collective	Eau aspersion	Eau collective	Eau aspersion	Eau collective***
Type	-	Qualitomètre	Qualitomètre	Qualitomètre	-	Qualitomètre

Tableau 2 : caractéristiques des captages visités en 2018 ; * : pas d'indication de date de mesure ; ** : pour l'ouvrage de Brettes, deux codes BSS sont attribués ; voir annexe à ce sujet ; *** l'ouvrage de Brettes n'est pas utilisé, mais il a été foré dans ce but.

3. Matériel

Deux sondes de diagraphie de marque Idronaut ont été utilisées (modèles 303Plus en 2017 et 316Plus en 2018) toutes deux munies de capteurs de température, pH, potentiel redox, oxygène dissous (mesure électrochimique) et conductivité électrique. Les caractéristiques des différents capteurs sont reportées dans Tableau 3. Les données de pH sont présentées à la température du fluide, les données de potentiel redox sont normalisées à l'électrode de référence hydrogène (ESH), et les données de conductivité électrique sont normalisées à 25°C.

		Idro303Plus				Idro316Plus			
		Gamme	Précision	Résolution	Temps réponse	Gamme	Précision	Résolution	Temps réponse
Capteurs	Pression (dbar)	0-1000	0,05% PE	0,0015% PE	50 ms	0-1000	0,05% PE	0,002% PE	50 ms
	Température (°C)	-1 à +50	0,005	0,001	50 ms	-3 à +50	0,003	0,0002	50 ms
	Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0-7000*	5	0,1	50 ms	0-70000	3	0,25	50 ms
	pH (électrolyte à gel)	0-14	0,01	0,001	3 s	0-14	0,01	0,001	3 s
	Potentiel redox (mV)	-1000 à +1000	1	0,1	3 s	-1000 à +1000	1	0,1	3 s
	O₂ dissous (mg.L⁻¹) (% sat.)	0-50 0-500%	0,1 1%	0,01 0,1%	3 s	0-50 0-500%	0,1 1%	0,01 0,1%	3 s
Dimensions	Longueur	50 cm				71 cm			
	Diamètre	50 mm				89 mm			
	Poids	1,5 kg				8 kg			
	Matériau	Acier 316L				Titane GR5			

Tableau 3 : caractéristiques des capteurs montés sur les sondes de diagraphie Idronaut – données constructeur ; PE : pleine échelle ; * : mode eau douce.

En 2018, lorsque les pompages sont réalisés, le suivi des paramètres physico-chimiques est opéré en surface avec des boîtiers WTW munis de sonde de conductivité électrique (TetraCon 925), de pH (Sentix 940), de potentiel redox (Sentix ORP 900) et d'oxygène dissous par mesure optique (FDO 925). Les caractéristiques constructeurs sont reportées dans le Tableau 4.

Le matériel utilisé pour le pompage est une pompe MP1 Grundfos munie d'un régulateur de débit. Le tuyau monté d'origine sur cette pompe est en LDPE.

	Gamme	Précision	Résolution	Temps de réponse
Température (°C) – couplée au capteur de conductivité	-5 à +100	± 0,1	0,1	-
Conductivité électrique (μS.cm⁻¹)	1-2000000 (-5 à +70°C)	± 0,5% valeur	0,1 (0 à 200) 1 (200 à 200)	t ₉₉ < 20s
pH (électrolyte à gel)	0-14 (0 à +80°C)	± 0,004	0,001	-
Potentiel redox (mV – électrolyte KCl 3M)	-1250 à +1250 (0 à +100°C)	± 0,2	-	-
O₂ dissous (mg.L⁻¹ et % saturation)	0-20 0-200% (0 à +50°C)	± 1,5%	0,01 0,1%	t ₉₀ < 30s t ₉₉ < 60s

Tableau 4 : caractéristiques des capteurs WTW.

4. Investigations sur des ouvrages de gros diamètre

4.1. STATION DE LAYRAC-SUR-TARN

Un historique des mesures sur site est disponible dans ADES ; le Tableau 5 présente une synthèse pour les principaux paramètres physico-chimiques.

Lors des mesures sur site (Figure 3), la profondeur totale a été mesurée à 7,13 m, le niveau statique à 3,80 m, la référence de mesure étant prise à la base de la plaque de béton assurant la couverture du puits (la hauteur de la colonne d'eau est donc proche de 3,30 m).

Quatre diagraphies ont été réalisées, selon la géométrie présentée en Figure 4.

	Température (°C)	Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH	Potentiel redox (mV)	O ₂ dissous (mg.L ⁻¹)
Code Sandre	1301	1303	1302	1330	1311
Layrac	13 – 17	620 – 760	7,1 – 7,4	164 – 346	6 – 8

Tableau 5 : Layrac – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).



Figure 3 : puits de Layrac – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton (le fond de l'ouvrage est visible par transparence).



Figure 4 : puits de Layrac – implantation des diagraphies.

Le résultat des diagraphies est présenté en Figure 5 (diagraphie au centre de l'ouvrage) et en Figure 6 (diagraphies le long des 4 profils, paramètre par paramètre).

Les profils de **température** montrent qu'il existe un net gradient négatif entre l'eau en sommet d'ouvrage et l'eau en base d'ouvrage. La température en fond de trou est classique pour une eau souterraine de proche surface en fin d'été (proche de 16°C). La température plus élevée au sommet est à relier au forçage thermique exercé par l'atmosphère sur le cuvelage béton et sur la couverture béton au cours de l'été. La température vers 6 m de profondeur (tiers inférieur de la colonne d'eau) est tout à fait comparable aux chroniques rapportées dans le Tableau 5 (17°C). La température est homogène dans le puits, un très léger effet de paroi pouvant peut-être être suggéré pour le profil Layrac005, acquis très près du cuvelage béton (température légèrement plus faible entre 5,5 et 6 m de profondeur).

La **conductivité électrique** est le paramètre le plus intéressant à examiner dans ce puits. Il existe un fort gradient entre 4,5 et 5,5 m de profondeur, l'eau présente en sommet d'ouvrage étant nettement moins conductrice ($\cong 450 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que l'eau présente dans le fond de l'ouvrage ($\cong 800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Ce gradient est présent dans tout le puits, le tiers inférieur de la colonne d'eau présentant une conductivité homogène. L'alimentation de l'ouvrage se faisant principalement par le fond de celui-ci, on peut en conclure qu'en conditions d'équilibre (hors pompage), seuls les 1,5 derniers mètres sont représentatifs de l'aquifère. Cette variation de conductivité est peut-être liée à l'infiltration d'eaux moins minéralisées (et/ou de ruissellement) depuis les parties supérieures du cuvelage, ou via les tuyaux que l'on peut voir dans la paroi du cuvelage (Figure 4). Ceci

pourrait expliquer que des eaux moins minéralisées, très légèrement moins denses, soient présentes en surface, l'effet de densité pouvant être renforcé par le contraste de température entre le haut et le bas de l'ouvrage (un effet de ce contraste de température pouvant être une évaporation d'eau dans le puits, qui amènerait à la condensation d'eau moins minéralisée sous le capot de protection en béton, eau qui retomberait ensuite par gravité). Quel(s) que soi(en)t le ou les phénomènes conduisant à ce contraste de conductivité, un prélèvement ne sera représentatif que dans le tiers inférieur de la colonne d'eau, seule partie où les mesures rapportées dans ADES (Tableau 5) correspondent aux mesures de diagraphie. Il ne faut cependant pas exclure le fait que certaines valeurs basses de conductivité électrique rapportées dans les chroniques temporelles ADES puissent être liées à des niveaux de pompage insuffisamment profonds, ou liées à une sollicitation préférentielle des horizons supérieurs lors du pompage. Ceci montre donc bien l'importance de réaliser les pompages vers la base de la colonne d'eau dans ce type d'ouvrage large.

Les profils de **pH** montrent que la valeur de ce paramètre diminue jusque vers 5 m de profondeur pour ensuite se stabiliser autour de 7,1, une fois encore dans la gamme des valeurs connues (Tableau 5).

Le **potentiel redox** admet des valeurs un peu plus basses au sommet de la colonne d'eau, puis il se stabilise à partir de 5,5 m de profondeur autour de +310 mV, valeur comparable à celles indiquées dans le Tableau 5. La variation est cependant très faible (± 10 mV) entre le sommet et la base de l'ouvrage, dans l'incertitude instrumentale de ce type de capteur, comme le montrent les écarts de valeur du potentiel entre les différents profils réalisés dans le puits.

La valeur de la saturation en **oxygène dissous** est remarquablement stable le long de la colonne d'eau. Les valeurs du dernier profil (Layrac005) ne doivent pas être considérées (capteur obturé par de la boue à la fin de l'acquisition Layrac004, et non nettoyé entre l'acquisition Layrac004 et l'acquisition Layrac005). Les valeurs mesurées sont conformes à celles des bases de données (Tableau 5).

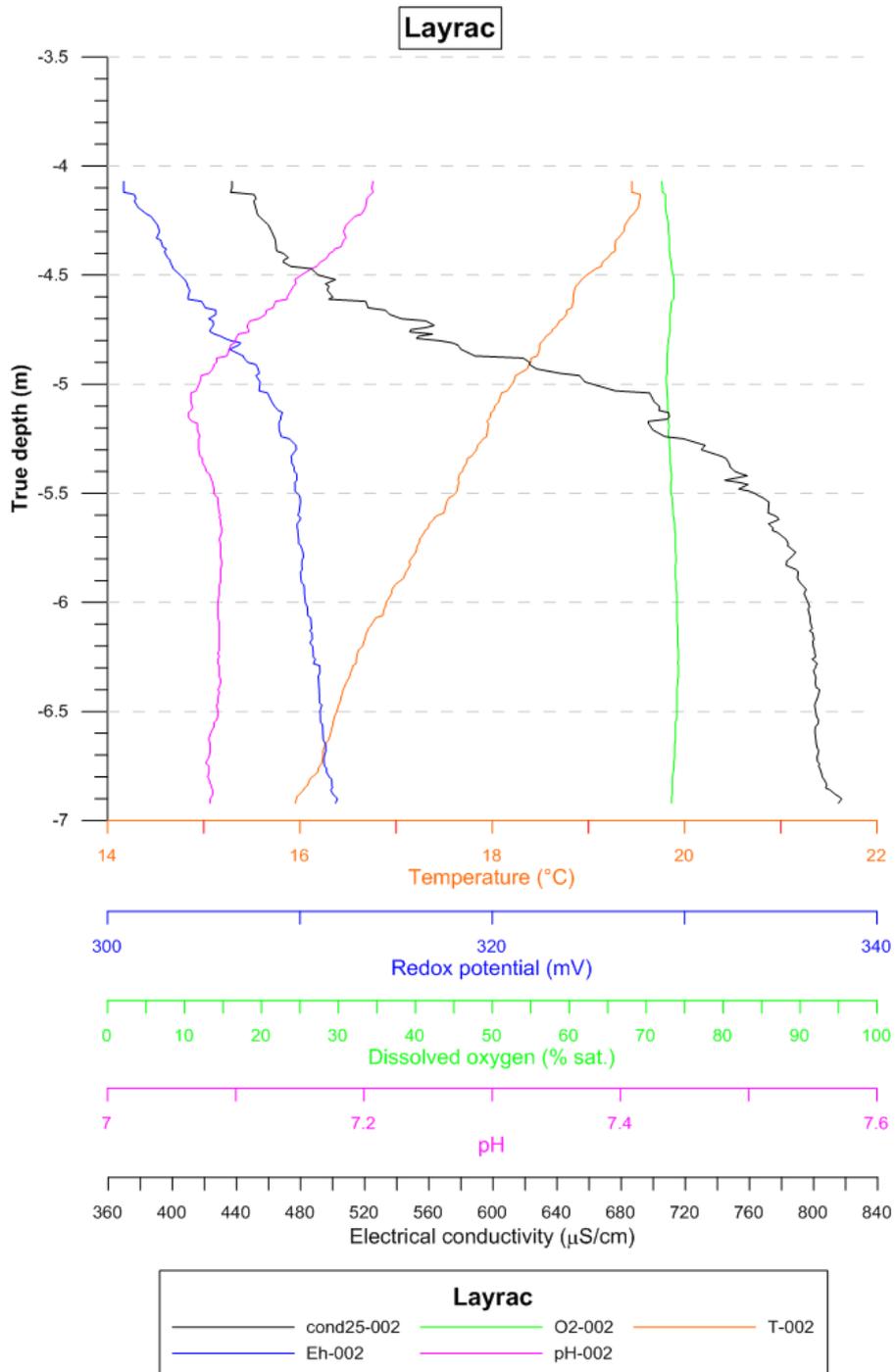


Figure 5 : Layrac – diagraphie au centre du puits.

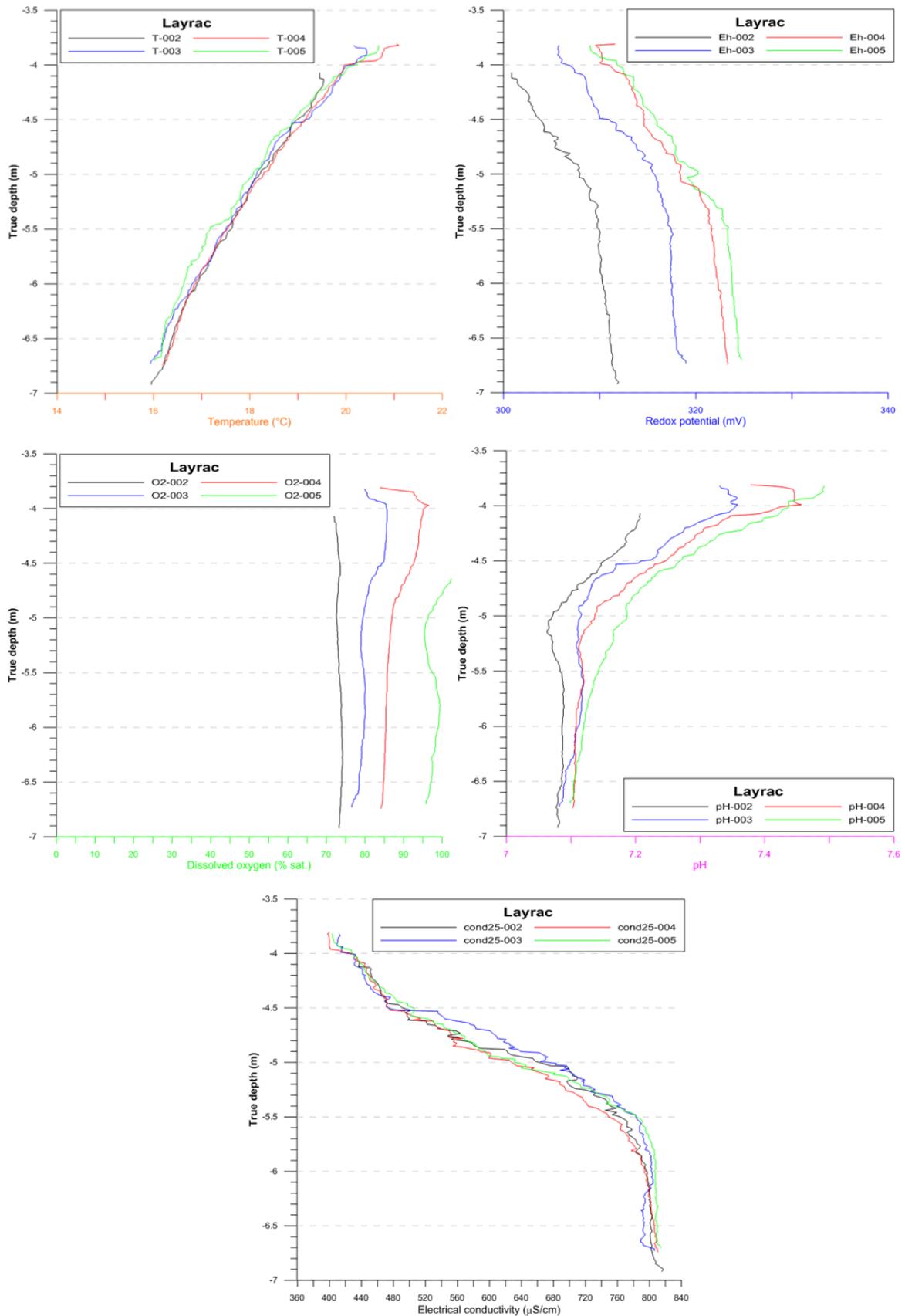


Figure 6 : Layrac – récapitulatif des différentes diagraphies – la mesure O2-005 est erronée (capteur obturé par de la boue).

4.2. STATION DE GRENADE

Un historique des mesures sur site est disponible dans ADES ; le Tableau 6 offre une synthèse pour les principaux paramètres physico-chimiques.

Lors des mesures sur site (Figure 7), la profondeur totale a été mesurée à 12,47 m, le niveau statique à 5,02 m, la référence de mesure étant prise en haut de la plaque de béton assurant la couverture du puits (la hauteur de la colonne d'eau est donc proche de 7,50 m).

Quatre diagraphies ont été réalisées, selon la géométrie présentée en Figure 8.

	Température (°C)	Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH	Potentiel redox (mV)	O ₂ dissous (mg.L ⁻¹)
Code Sandre	1301	1303	1302	1330	1311
Grenade	14 – 15	709 – 843	7,1 – 7,2	96 – 239	0,2 – 1,1

Tableau 6 : Grenade – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).



Figure 7 : puits de Grenade – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton.

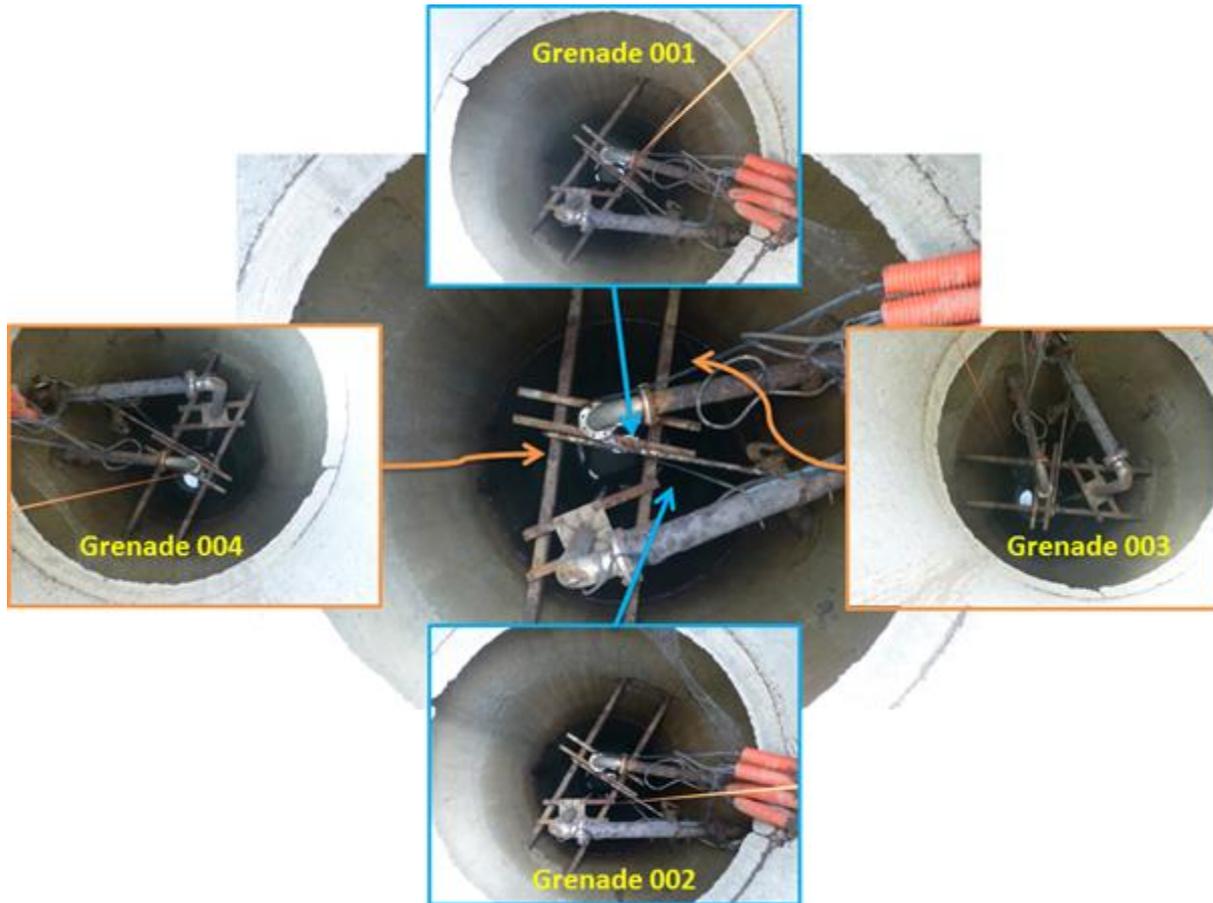


Figure 8 : puits de Grenade – implantation des diagraphies.

Pour cet ouvrage, il existe un gros désaccord entre les données de profondeur rapportées dans la BSS (7 m) et les données issues de mesures à la sonde piézométrique (cf. supra). Ces données de profondeur (un peu plus de 12 m) sont confirmées par les mesures de diagraphie, trois d'entre-elles parvenant à cette profondeur. Seule l'une d'elles (Grenade003), réalisée un peu plus près du cuvelage, n'y parvient pas, une résistance ayant été ressentie vers 8 m, ce qui est plus proche de la profondeur rapportée en BSS. Aucun document n'a été trouvé pour permettre d'expliquer cet écart de profondeur.

Le résultat des diagraphies est présenté en Figure 9 (diagraphie au centre de l'ouvrage) et en Figure 10 (diagraphies le long des 4 profils, paramètre par paramètre).

L'existence d'une discontinuité vers 8 m de profondeur ressort assez clairement sur les données de **température**, très homogènes entre les différentes acquisitions. Comme à Layrac, il existe un net gradient négatif entre l'eau en sommet d'ouvrage et l'eau vers 7 m de profondeur (2°C de baisse en 2 m) ; ensuite, le profil de température s'aplatit, pour être très légèrement supérieur à 14°C entre 7 et 11 m de profondeur, puis diminuer à nouveau jusqu'à 12 m. On notera qu'une température de 14-15°C est donnée par les mesures antérieures (Tableau 6), ce qui suggère que les pompages qui sont pratiqués amènent à prélever une eau qui provient de cet horizon inférieur. Il est donc vraisemblable que les suivis soient majoritairement opérés dans la partie inférieure du puits, et qu'en conséquence ils le soient également dans la zone à conductivité électrique plus

élevée. L'existence d'un forçage thermique¹ sur l'eau présente en sommet de colonne est sans doute encore à évoquer. Pour les horizons plus profonds, dont on ne connaît pas le mode d'alimentation (existence d'un cuvelage ou trou nu ?), il semblerait qu'une bonne partie (entre 7 et 11 m) soit très homogène (soit brassage dans le puits, soit, plus vraisemblablement, l'horizon capté est très homogène et à forte productivité). La baisse de température en fond de trou est plus difficile à interpréter – en tout cas, les effets du gradient géothermique naturel ne sont pas encore sensibles.

La **conductivité électrique** est une nouvelle fois le paramètre le plus intéressant à examiner. Toutes les diagraphies mettent en évidence une zone supérieure moins conductrice (710-720 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), entre 5 et 8 m de profondeur, une zone de gradient positif entre 8 et 9m, puis une deuxième zone de conductivité plus élevée (760-770 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), valeurs compatibles avec la variabilité constatée ces dernières années (Tableau 6). Une diagraphie (Grenade002) présente ce gradient sur une épaisseur de colonne d'eau supérieure (entre 8 et 9,5 m), mais les conductivités en sommet et en base de la zone de gradient sont identiques à celles mesurées lors des autres acquisitions. Une très légère hétérogénéité spatiale pourrait donc exister, peut-être liée à des perturbations engendrées par les tuyaux des pompes installées à demeure dans le puits (Figure 7).

Le premier profil de **pH** (Grenade001) présente des valeurs variables entre 9 et 12 m de profondeur (la variabilité n'est toutefois que de $\pm 0,1$ unité). La valeur du pH est assez stable jusqu'à 9 m de profondeur (proche de 7,2), ensuite elle diminue très légèrement pour redevenir stable à partir de 11 m (vers 7,15). Il n'existe pas d'hétérogénéité latérale dans l'ouvrage, la gamme 7,1-7,2 étant d'ailleurs la gamme typique mesurée sur l'eau de Grenade (Tableau 6). L'origine de cette très faible variabilité n'est en tout cas pas à rechercher du côté de la température de l'eau, une baisse de température ayant plutôt tendance à entraîner une hausse du pH.

Les mesures de **potentiel redox** réalisées au centre de l'ouvrage (Grenade001) sont également bruitées, les mesures ultérieures ne le sont pas, sans raison apparente car aucun réglage ou paramétrage de la sonde n'a été entrepris entre les acquisitions (ceci se retrouvera pour le pH). La variation du redox le long de la verticale n'est pas significative. De même, il n'existe pas de variation latérale nette dans l'ouvrage. Les valeurs ici rapportées, entre 280 et 300 mV, sont toutefois plus élevées que celles rapportées par ADES (Tableau 6).

Sur les premiers centimètres de la colonne d'eau, la saturation en **oxygène dissous** est relativement élevée, ensuite elle décroît très rapidement à 30% de saturation puis diminue régulièrement jusque vers 10% de saturation en base d'ouvrage (valeurs compatibles avec celles reportées dans le Tableau 6). Cette configuration se retrouve pour chaque acquisition.

En l'absence de données actualisées sur la géométrie du puits, il semble plus indiqué de considérer l'horizon profond comme représentatif de l'aquifère ; c'est celui pour lequel les différents paramètres admettent le moins de variabilité et dont les valeurs des suivis réglementaires sont les plus proches de celles mesurées en diagraphie.

¹ Influence de la température extérieure sur le cuvelage (les mesures sont faites en été).

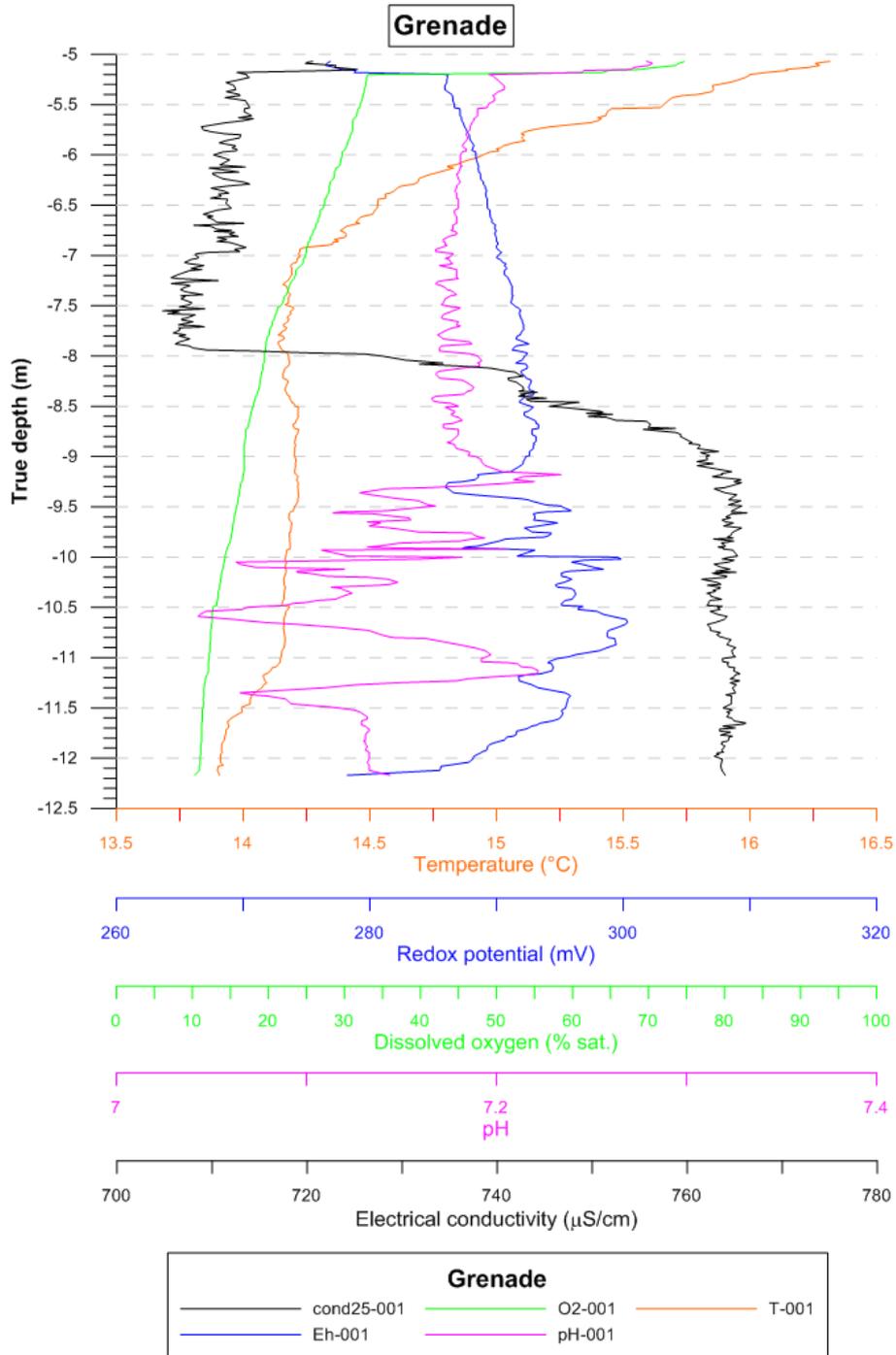


Figure 9 : Grenade – diagraphie au centre du puits.

Hétérogénéité verticale colonne d'eau

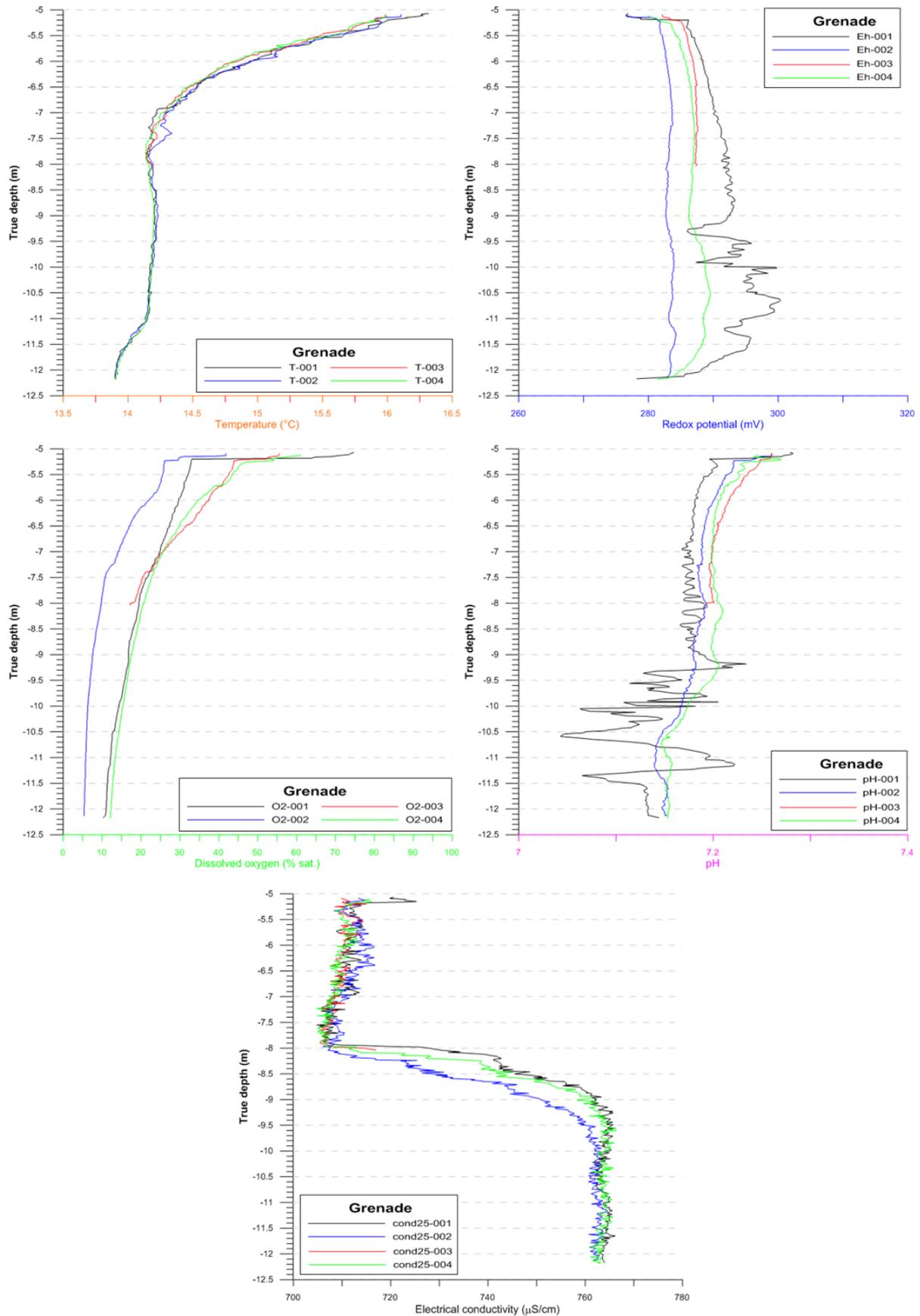


Figure 10 : Grenade – récapitulatif des différentes diagraphies.

4.3. STATION DE FINHAN

Un historique des mesures sur site est disponible dans ADES ; le Tableau 7 offre une synthèse pour les principaux paramètres physico-chimiques.

Lors des mesures sur site (Figure 11), la profondeur totale a été mesurée à 7,52 m, le niveau statique à 3,76 m, la référence de mesure étant prise en haut de la plaque de béton assurant la couverture du puits (la hauteur de la colonne d'eau est donc proche de 3,80 m).

Cinq diagraphies ont été réalisées, selon la géométrie présentée en Figure 12.

	Température (°C)	Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	pH	Potentiel redox (mV)	O ₂ dissous (mg.L ⁻¹)
Code Sandre	1301	1303	1302	1330	1311
Finhan	12 – 18	392 – 792	6,6 – 7,9	105 – 357	0,6 – 6,2

Tableau 7 : Finhan – historique 2014-2015 des paramètres physico-chimiques (valeur minimale – valeur maximale).



Figure 11 : puits de Finhan – à gauche : vue d'ensemble ; à droite : vue de l'intérieur du cuvelage béton.



Figure 12 : puits de Finhan – implantation des diagaphies.

Le résultat des diagaphies est présenté en Figure 13 (diagaphie au centre de l'ouvrage) et en Figure 14 (diagaphies le long des 5 profils, paramètre par paramètre).

Comme pour les autres puits, la **température** en sommet d'ouvrage est supérieure à celle mesurée à sa base. Le gradient n'est cependant pas régulier, plus fort sur le 1^{er} mètre (perte de 2°C), moins fort ensuite (moins 1°C en 2,5 m). Ceci se retrouve pour les 5 acquisitions réalisées dans cet ouvrage de gros diamètre dont l'alimentation se fait visiblement majoritairement par le fond nonobstant la présence, comme à Layrac, de potentiels points d'alimentation en eau de ruissellement (Figure 12). On notera cependant que dans la partie supérieure de l'ouvrage de très subtiles hétérogénéités de température peuvent exister, alors qu'en dessous de 5,5 m de profondeur, les profils de température sont rigoureusement identiques. Ceci est bien compatible avec une alimentation par le fond de l'ouvrage. La température trouvée à ce niveau est exactement la médiane des données historiques (Tableau 7).

Il existe un très fort gradient positif de **conductivité électrique** dans les 50 premiers centimètres de la colonne d'eau (+100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), puis 2 zones plus homogènes s'individualisent entre 4,5 et 6m ($\cong 710 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) puis entre 6,5 m et le fond (720-730 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Une ultime hausse – mais d'amplitude faible – peut se produire au fond (mise en suspension de particules lorsque l'outil touche la base de l'ouvrage). La gamme de conductivité électrique rapportée dans ADES (Tableau 7) dépasse largement la gamme de conductivité relevée lors des diagaphies, ce qui

pourrait suggérer que le pompage n'a pas toujours été pratiqué en fond d'ouvrage et/ou que des écoulements parasites, moins minéralisés, se produisent ponctuellement dans l'ouvrage.

Les valeurs du **pH** sont très homogènes à une profondeur donnée. Elles admettent par contre une importante variabilité sur la hauteur : valeurs très légèrement basiques en sommet de colonne (> 7,4, sauf dans le cas de Finhan001, réalisée à proximité des tubulures des pompes), fort gradient négatif dans le mètre suivant (pH proche de 7), puis diminution faible ensuite pour atteindre une valeur asymptotique en base d'ouvrage (6,8-6,9), ce qui est plutôt dans la gamme inférieure des bases de données (Tableau 7).

La variation du **potentiel redox** le long de la verticale n'est pas significative. La valeur moyenne est proche de +300 mV et il ne semble pas exister d'hétérogénéité importante d'un endroit à un autre dans le puits (les variations sont plutôt à mettre sur le compte de la faible reproductibilité du capteur). Le potentiel mesuré est toutefois compatible avec les données préexistantes (Tableau 7).

Les valeurs de saturation en **oxygène dissous** semblent un peu inférieures pour l'acquisition menées entre les 2 pompes (Finhan001), ou pour le moins le gradient négatif qui existe dans le 1^{er} mètre aux autres endroits est moins visible. En dessous de 5 m de profondeur, la saturation devient inférieure à 40% et reste relativement stable jusqu'au fond du puits, bien que les chroniques renvoient une grande variabilité (Tableau 7).

Ici encore, la partie inférieure de l'ouvrage semble être celle à privilégier pour obtenir un fluide représentatif. Des pompages ou prélèvements à des niveaux supérieurs peuvent engendrer des résultats non représentatifs, au moins en ce qui concerne les paramètres physico chimiques étudiés (notamment conductivité, pH).

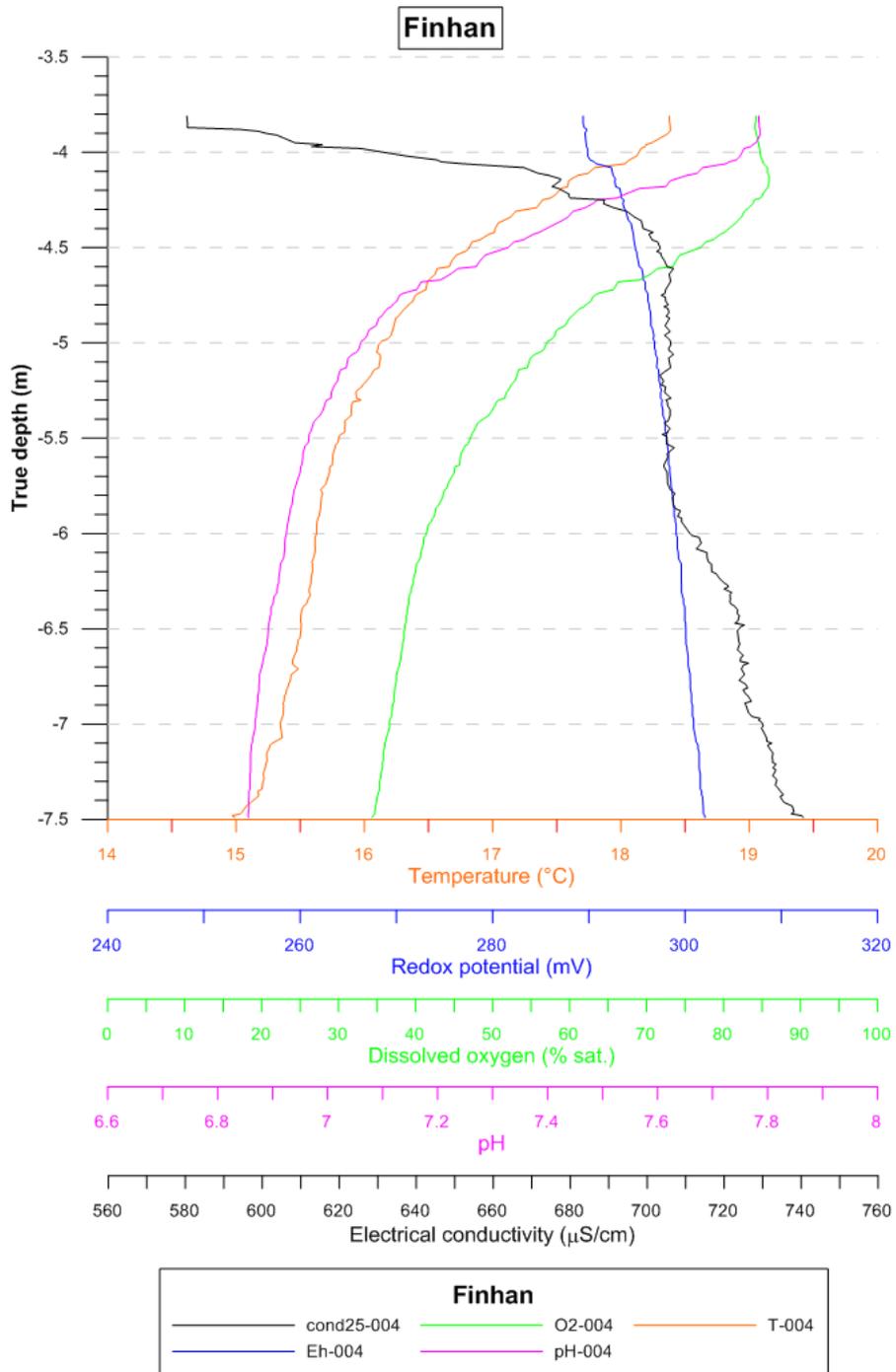


Figure 13 : Finhan – diagraphie au centre du puits.

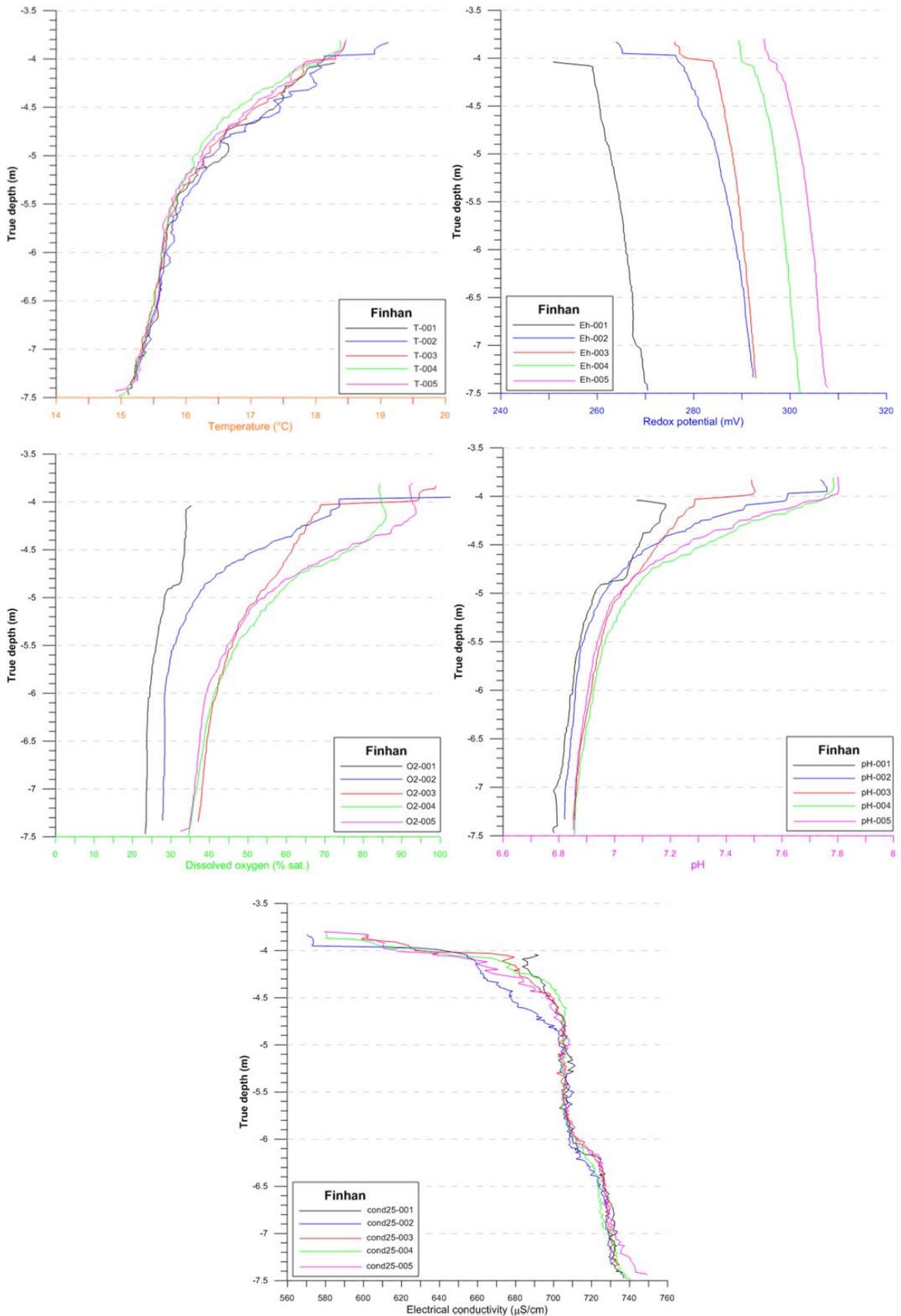


Figure 14 : Finhan – récapitulatif des différentes diagraphies.

5. Investigations sur des ouvrages de diamètre plus faible

5.1. STATION DE LA GUERCHE SUR L'AUBOIS

5.1.1. Mode opératoire

La station a été visitée le 27/08/18 entre 10:15 et 13:30.

Après discussion avec le représentant des Services Techniques de la Mairie (voir §5.1), les investigations ont été orientées sur l'ouvrage 05481X0013/P2AEP (nouvelle nomenclature : BSS001LTPM²), relié à la station de pompage par une tranchée drainante équipée d'une conduite plongeant dans l'ouvrage (Figure 15). C'est cet ouvrage qui correspond aux photos rapportées dans la fiche station (voir annexe). Lorsqu'il fait l'objet de prélèvements, cet ouvrage n'est pas ouvert, les échantillons sont prélevés directement à la sortie du pompage par aspiration, dans le local technique, des vannes permettant d'isoler chaque conduite avant que le flux d'eau ne soit centralisé puis orienté vers le château d'eau.

On remarquera la présence, dans l'ouvrage, du tuyau reliant le captage au local technique où sont regroupées les pompes, et qui présente une corrosion de surface (Figure 15 et Figure 16). Ce tuyau est vraisemblablement en acier, au moins pour sa partie externe ; il n'est pas possible de déterminer s'il est chemisé intérieurement par un autre matériau. De même, le tube métallique de 60 cm de section³ paraît lui-même être en acier et en partie corrodé. La présence de fer à l'état oxydé, entraînant la précipitation d'hydroxydes de fer (et potentiellement d'autres éléments), est bien visible dans le cuvelage en béton (étiage estival), et illustre par ailleurs l'important battement de la nappe au cours de l'année.

Les investigations réalisées sur cet ouvrage n'ont pas concerné le prélèvement sur conduite dans la station de pompage. Il s'est agi d'abord de réaliser une diagraphie de la colonne d'eau en statique (hors pompage). Le puits étant d'abord muni d'un cuvelage béton puis d'un tubage métallique, des diagraphies complémentaires ont été réalisées pour déterminer i) la profondeur à laquelle le tubage métallique était présent et ii) si l'eau qui est comprise entre le cuvelage béton et le tubage métallique pouvait avoir des propriétés physico-chimiques différentes (Figure 16). Le tube métallique étant topographiquement plus bas que la buse en béton, et ce tubage ayant un diamètre bien inférieur, de l'eau est présente entre le tube et la buse en béton. Des prélèvements étant indiqués dans la fiche station comme étant réalisés au seau, il convient de vérifier que l'eau dans cet espace n'est pas chimiquement différente de l'eau produite par les crépines dans la partie tubée en métal. Un prélèvement au seau a donc été réalisé, uniquement dans l'objectif d'appliquer un des modes de prélèvement cités sur la fiche station. On rappelle que ce type de

² Cet ouvrage est nommé PN1 par les Services Techniques.

³ Selon les coupes techniques disponibles dans la BSS pour les ouvrages nommés Puits n°1 et Puits n°2. Ce tubage en acier est présent sur 4 m de hauteur, les 2 premiers mètres étant en tube plein, les 2 derniers mètres étant en tube à éléments lamellaires (crépine).

prélèvement n'est pas recommandé par AQUAREF, il ne permet d'ailleurs pas d'atteindre la colonne d'eau dans le tube en métal. Ce prélèvement au seau a été suivi d'une phase de pompage en utilisant une pompe immergée (Grundfos MP1) directement descendue dans l'ouvrage, dans le tubage métallique (Figure 16). Un autre prélèvement a alors été réalisé, les modalités étant détaillées en §5.1.3.

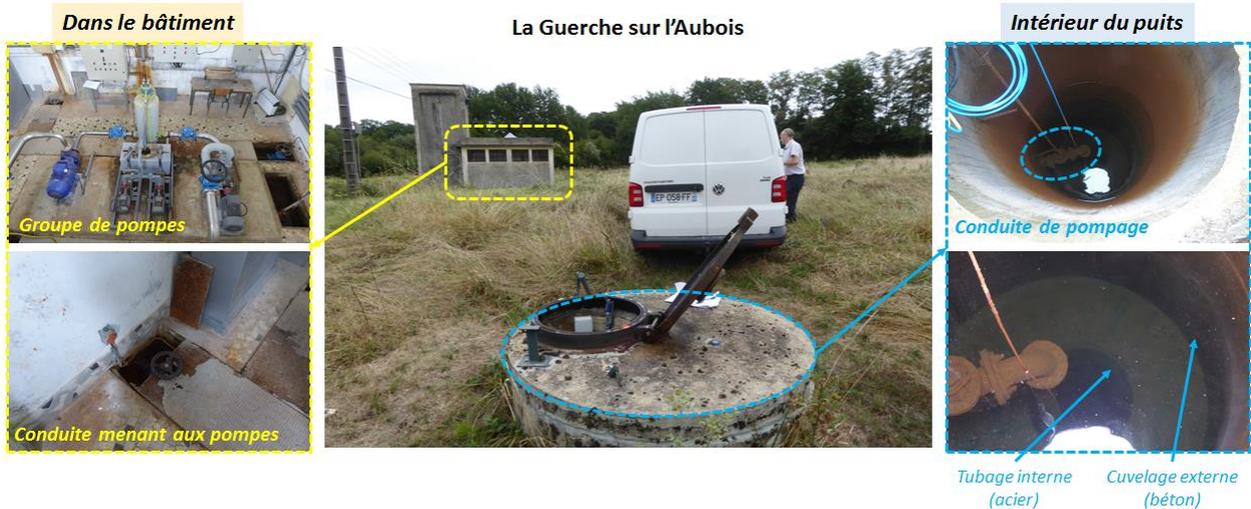


Figure 15 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station de La Guerche sur l'Aubois.



Figure 16 : station de La Guerche sur l'Aubois : aperçu des actions menées sur site (diagraphie dans la colonne d'eau, prélèvement au seau et pompage) ; la flèche jaune indique le point de référence utilisé pour la mesure des niveaux d'eau dans l'ouvrage.

5.1.2. Diagraphie

Toutes les diagraphies présentées dans ce rapport ont pour point de référence altimétrique le sommet de l'ouvrage. Pour la station de la Guerche sur l'Aubois, la référence est prise au niveau de la marque orange visible sur le cerclage supportant le capot en métal protégeant le captage, à la limite supérieure de ce cerclage métallique fixe (Figure 16). Ce cerclage est 59 cm au-dessus du niveau du sol. Le niveau statique au point de référence est de -2,14 m.

La diagraphie initiale, réalisée en statique, est présentée en Figure 17. Cinq paramètres physico-chimiques ont été suivis : température, conductivité électrique exprimée à 25°C, teneur en oxygène dissous, potentiel redox normalisé au potentiel de l'Electrode Standard Hydrogène et pH (exprimé à la température de mesure).

Comme l'on peut s'y attendre, certains paramètres, et en particulier la **température**, montrent un profil influencé par la géométrie du puits (Figure 17). Ainsi, le sommet de la colonne d'eau, qui se trouve en contact avec une colonne d'air elle-même soumise à l'influence du forçage thermique atmosphérique sur le cuvelage en béton, présente un net gradient négatif sur quelques dizaines de centimètres (12,74 à 12,54°C⁴). Ensuite, la température se stabilise jusqu'au passage dans le tube plein⁵, vers 5,20-5,40 m de profondeur, où la légère variation qui est visible peut sans doute être, pour partie, reliée à une différence d'état thermique entre la masse d'eau comprise dans un ouvrage béton de gros diamètre et la masse d'eau comprise dans un tube métallique de diamètre bien inférieur. Entre 6,40 m et 7,80 m de profondeur, la température est stable. Elle augmente ensuite nettement, ce qui peut correspondre, aux incertitudes de géométrie de l'ouvrage près, au passage dans la zone crépinée du tubage métallique. Dans la zone crépinée, la température continue d'augmenter, sauf vers le bas, où l'on peut proposer soit une perturbation liée à l'approche du fond de l'ouvrage, soit l'existence d'un niveau aquifère ayant des propriétés hydrauliques différentes. S'il existe, cet horizon est sans doute plus productif, car il présente un gradient de température nettement plus faible (la partie entre 8,20 m et 8,80 m est régie par un gradient de +8°C/100 m, largement supérieur au gradient géothermique moyen de +3°C/100 m), qui indique que la circulation d'eau est plus efficace pour homogénéiser la température. Dans cette optique, on peut proposer que le gradient de +8°C/100 m corresponde seulement à un rééquilibrage thermique entre l'eau présente dans le tube métallique plein, potentiellement mal renouvelée, et l'eau produite en base de crépine, à l'équilibre thermique avec l'aquifère. On remarquera que la seconde diagraphie réalisée dans le tubage fournit des indications similaires (Figure 18)⁶.

⁴ Le fabricant indique une précision de 0,003°C pour ce capteur, une variation de quelques centièmes de degrés peut donc être considérées comme indicatrice d'un réel changement de température dans la masse d'eau.

⁵ La coupe technique présentée dans la Figure 17 n'est pas celle de l'ouvrage ayant fait l'objet des mesures, elle est tirée d'une coupe technique donnée par la BSS pour l'ouvrage P1. Cette coupe paraît néanmoins réaliste pour ce qui concerne la localisation du passage cuvelage béton – tube métallique (voir Figure 18). Pour la localisation de l'implantation des crépines, une incertitude plus grande existe, aucune inspection endoscopique (passage caméra) n'ayant été réalisée.

⁶ Les profils peuvent présenter quelques différences, mais la localisation des zones où un gradient de température existe et des zones où ce gradient n'existe pas reste identique. Les petites différences sont plus certainement attribuables au passage de l'outil de diagraphie, qui induit forcément un brassage de l'eau lors de la descente puis lors de la remontée.

Les données de **conductivité électrique** apportent des indications complémentaires (Figure 17). Il n'existe pas vraiment de variation dans la partie comprise dans le cuvelage béton et dans le tube plein (variabilité inférieure à 3% entre les différents passages de sonde), ce qui peut indiquer que des phénomènes secondaires (par exemple précipitation de phases minérales), s'ils ont lieu, ne concernent sans doute pas des espèces ioniques majeures. La plus grosse variation se trouve autour de 8 m de profondeur, au passage dans la crépine. Le sommet de la crépine semble un peu plus conducteur (max. $160 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), tandis que la base a une conductivité similaire à celle mesurée plus haut dans le tube plein (proche de $150 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). La conductivité est par ailleurs stable entre 8,80 m et le fond. Cette structuration disparaît lors du second passage de la sonde de diagraphie (Figure 18). Ceci semble bien indiquer que l'alimentation se fait préférentiellement par le dernier mètre de l'ouvrage, et que le sommet de la crépine, qui peut éventuellement produire une eau très légèrement plus minéralisée, n'a qu'une contribution minimale à l'alimentation en eau de l'ouvrage.

Le profil du **pH** en fonction de la profondeur ne montre qu'une variabilité très faible (Figure 17). Les plus gros écarts sont mesurés dans le cuvelage béton, zone qui n'est pas directement alimentée par l'eau des crépines. En conséquence, ces variations n'ont pas de signification quant aux propriétés de l'aquifère. Dans la crépine, la valeur du pH est comprise entre 5,7 et 5,8, la légère augmentation à l'approche du fond pouvant être liée à une interaction des fines qui peuvent être mises en suspension par le mouvement de l'outil de diagraphie.

Les valeurs du **potentiel redox** sont également très peu variables tant que l'on reste dans la zone mal renouvelée (tube plein et cuvelage béton). Dans la crépine, le potentiel tend à diminuer.

La relation avec la saturation en **oxygène dissous** est peu visible, ce paramètre restant pratiquement constant dans toute la colonne d'eau (autour de 60%). On pourra signaler que l'interaction avec la colonne d'air présente dans le cuvelage béton, si elle a une influence en température, n'amène pas à modifier la saturation en oxygène dans l'eau (pas d'oxygénation secondaire).

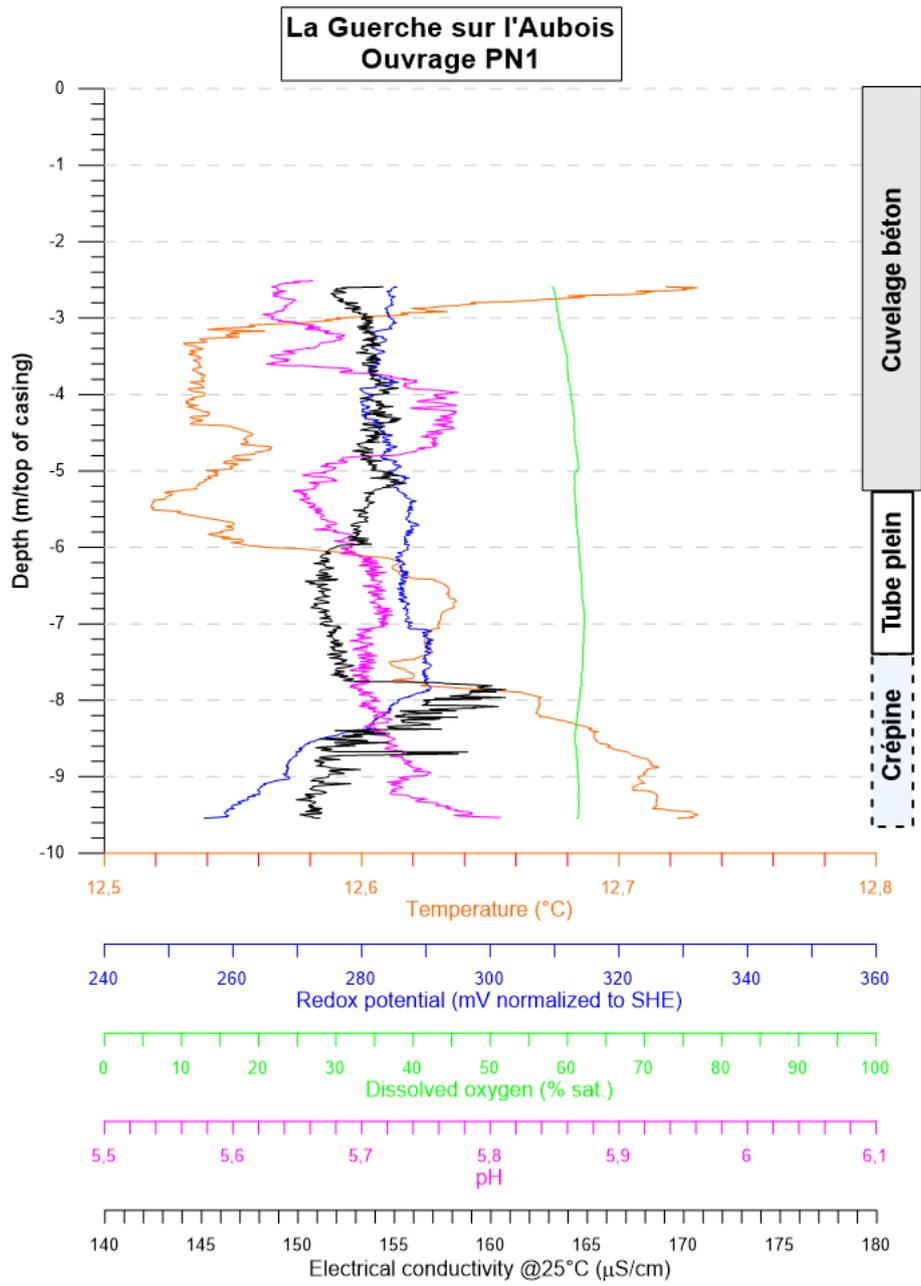


Figure 17 : station de La Guerche sur l'Aubois : diagraphie initiale dans la colonne d'eau.

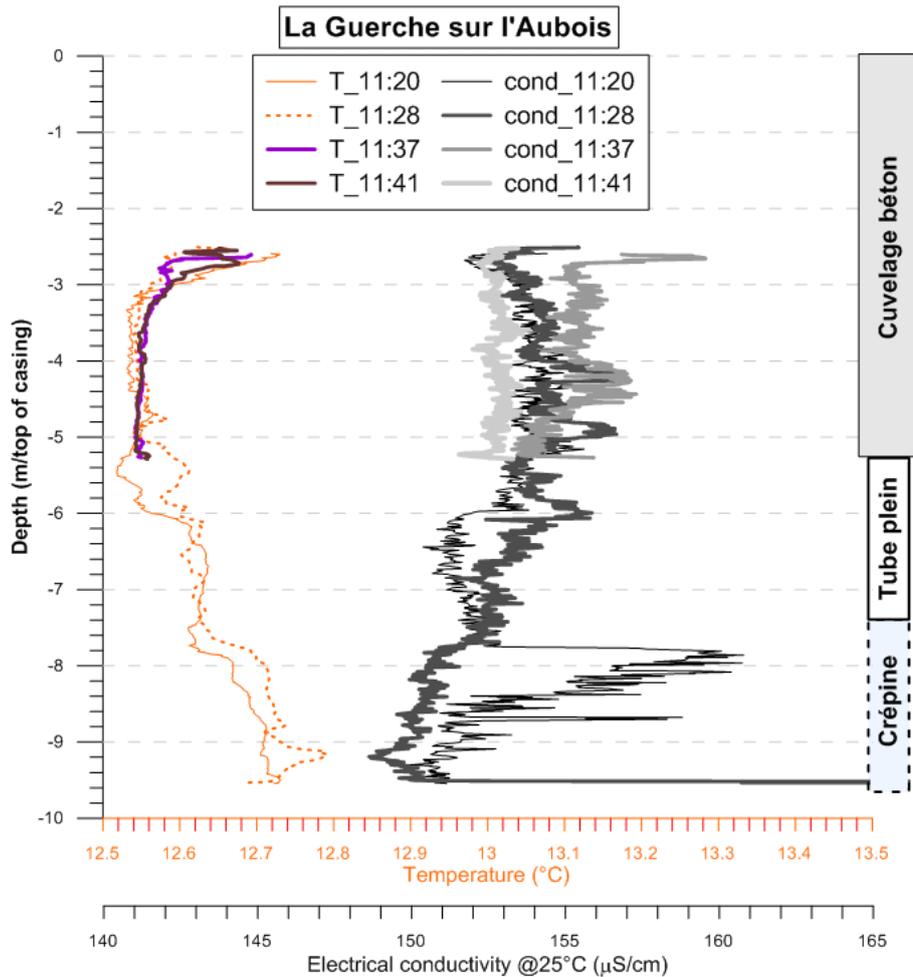


Figure 18 : station de La Guerche sur l'Aubois : données comparées de diagraphie en température et en conductivité électrique ; diagraphie initiale au centre du puits (11:20), répétition au centre du puits après remontée de l'outil (11:28), descente au voisinage de la paroi en béton (11:37) et descente pour venir toucher le sommet du tube métal (11:41).

5.1.3. Prélèvement

Un protocole de prélèvement au seau étant mentionné dans la fiche station du réseau de surveillance AELB, il a donc d'abord été procédé à un tel prélèvement (Figure 16). Ce mode de prélèvement est sans doute assez peu représentatif dans le cas présent car le sommet de la colonne d'eau est en interaction avec un gros volume d'air⁷, la surface peut présenter des traces de surnageant⁸, et les mesures physico-chimiques dans la colonne d'eau indiquent que le sommet de cette colonne peut présenter des caractéristiques différentes de celles existant plus en profondeur (Figure 17). On notera toutefois qu'il semble, selon les indications recueillies auprès

⁷ Oxydation potentielle de certains composés, l'eau étant par ailleurs plus facilement soumise aux variations de température (voire de pression) atmosphérique, le cuvelage en béton étant exposé en surface.

⁸ Précipitation potentielle de certains composés.

des Services Techniques, que les prélèvements soient préférentiellement faits sur la conduite menant au groupe de pompage, auquel cas le biais représenté par un prélèvement en surface d'une eau mal renouvelée disparaît.

Le prélèvement au seau a été effectué à 12:00. Les paramètres physico-chimiques mesurés en surface sont reportés dans le Tableau 8. Un prélèvement cations/anions a été opéré en respect des recommandations AQUAREF (Figure 16).

Méthode	Température (°C)	Conductivité électrique à 25°C ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	Potentiel redox (mV ESH)	O ₂ dissous (mg.L ⁻¹ et % de saturation)
Seau	13,8	155,3	5,51	+410	6,42 63,7%
Pompage	14,2	148,5	5,69	+395	6,12 61,1%

Tableau 8 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage au seau et à l'échantillonnage en pompage (station de La Guerche sur l'Aubois).

Après le prélèvement au seau, un second prélèvement a été effectué par pompage. La pompe MP1 a été descendue à 1 m du fond, soit vraisemblablement en milieu de crépine. Le pompage a été réalisé à un débit de 720 L.h⁻¹ pendant 5 minutes, puis augmenté à 850 L.h⁻¹ pendant 30 minutes, avant que le prélèvement ne soit initié (Figure 19). Un volume d'un peu plus de 500 l a donc été purgé, représentant une petite moitié du volume d'eau présent dans les 4 mètres de tube acier (diamètre 60 cm) et une fois le volume d'eau présent dans la crépine (en considérant que celle-ci a une hauteur de 2 m). Il s'agit là d'un volume de purge faible en regard des recommandations techniques AQUAREF. Toutefois, l'ouvrage appartenant à un champ captant, la problématique d'une stagnation prolongée de l'eau dans un tubage est un peu moins prégnante.

Durant le pompage, la conductivité électrique évolue très légèrement, passant de 152 à 148,5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, soit une variation à peine supérieure à 2% (Figure 19). Comparé au critère de stabilité préconisé dans le guide de recommandation technique AQUAREF (variation inférieure à 5% pour une eau de conductivité électrique inférieure à 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), il y a donc invariance de la conductivité électrique pendant le pompage. On remarquera que le prélèvement réalisé au seau, dans le cas présent, fournit une valeur de conductivité qui s'écarte également peu de la valeur en pompage. Enfin, en comparant aux données acquises durant les diagraphies, et notamment la seconde⁹, il apparaît que l'eau pompée au début correspond en tout point à celle présente vers 8,50 m de profondeur, et qu'il est possible que l'eau pompée en fin d'opération soit plutôt issue d'un niveau un peu plus profond (autour de 9,20 m), ce qui tendrait à renforcer le constat d'une alimentation préférentielle de l'ouvrage par les niveaux les plus profonds.

Les pH et teneurs en oxygène dissous mesurés en fin de pompage correspondent également aux données mesurées directement dans le fond de l'ouvrage.

⁹ Figure 18 : données de conductivité de 11:28.

La valeur de température diffère sensiblement (environ 1,5°C), mais cela peut être un biais lié à l'utilisation d'une pompe MP1 avec 90 m de tuyau LDPE, une grande partie de celui-ci étant exposé en surface à l'influence de l'atmosphère. Le débit de pompage n'est sans doute pas suffisant pour rafraîchir correctement le tuyau. On mesure donc une température plus élevée à l'exhaure du pompage. C'est un artefact assez fréquent lors des opérations d'échantillonnage par pompage. La température extérieure peut impacter, de façon variable suivant les conditions de température extérieures, les mesures réalisées en surface.

Enfin, les données de potentiel redox sont variables entre mesures in-situ¹⁰ et mesures en surface. Plus qu'une variabilité du milieu, il faut incriminer une mauvaise reproductibilité entre les sondes, particulièrement celle de la sonde de diagraphie, et plutôt considérer les valeurs mesurées en surface comme représentatives¹¹. Toutefois, on peut accorder un certain crédit à la variabilité dans la colonne d'eau : si l'on ramène les données à une origine commune (Figure 20), on peut constater que la variabilité entre toutes les mesures opérées n'est plus que de l'ordre de 10% au maximum. Ainsi les mesures pratiquées sur toute la hauteur de la colonne d'eau indiquent que le redox est maximum au passage tube plein – crépine puis diminue dans la crépine, l'écart entre les mesures étant proche de 10%.

¹⁰ La Figure 18 ne rapporte que les mesures initiales ; les autres diagraphies réalisées dans l'ouvrage ont également fourni des résultats différents : de +270 à +300 mV à 9 m de profondeur ; de +285 à + 350 mV à 5 m de profondeur.

¹¹ Ceci appelle 2 remarques : i) la vérification de la sonde redox utilisée en surface, sur un boîtier WTW, donne une incertitude de +7 mV entre valeur lue et valeur du tampon (+220 mV) ; cette vérification n'a pas été faite, pour des contraintes pratiques, sur l'électrode de la sonde Idronaut ; ii) malgré l'incertitude forte qui entache les mesures, et notamment la variabilité de la valeur au départ de chaque mesure, les variations mesurées au cours de l'acquisition d'un profil dans la colonne d'eau ont une signification.

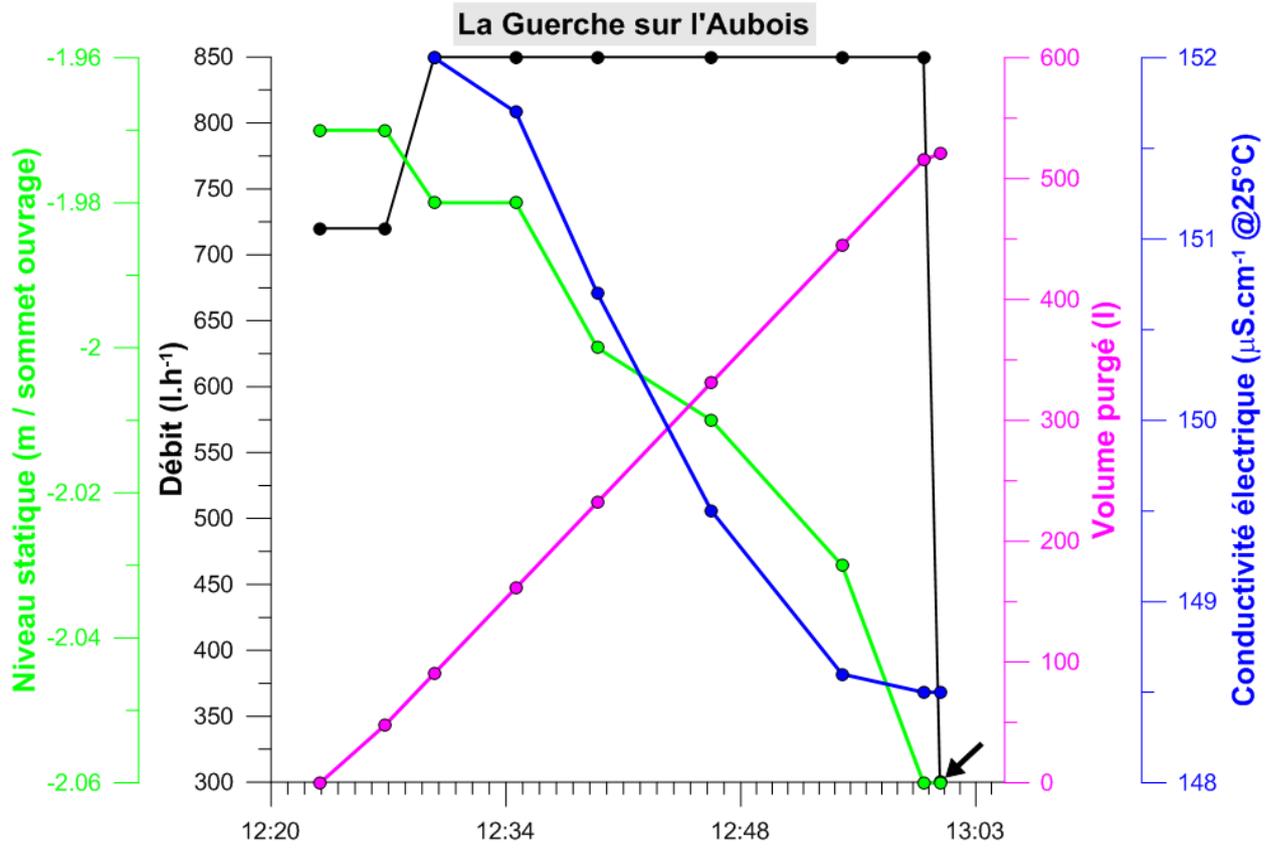


Figure 19 : station de La Guerche sur l'Aubois : suivi du pompage ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

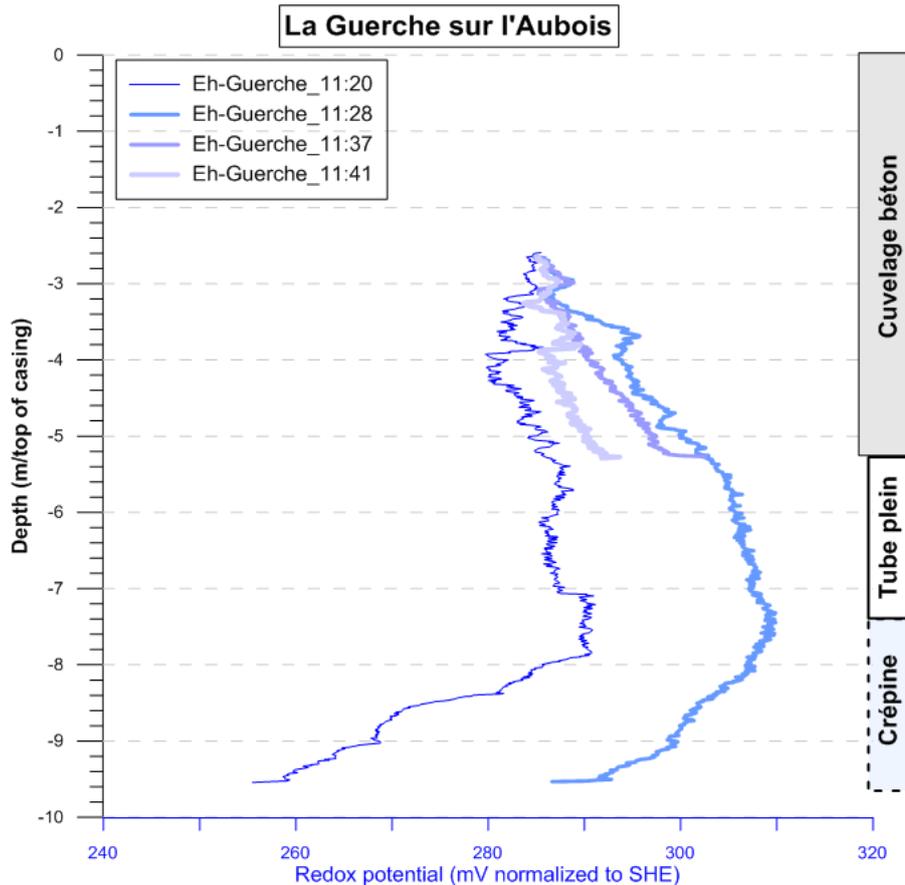


Figure 20 : station de La Guerche sur l'Aubois : données comparées de diagrapie en potentiel redox – données recalées sur un potentiel identique à 50 cm de profondeur.

5.1.4. Analyses de laboratoire

Le prélèvement au seau et le prélèvement en pompage ont été doublés afin de tester la reproductibilité analytique et la reproductibilité du prélèvement. Quatre analyses sont donc rapportées dans la Figure 21. On ne considère que les éléments quantifiables, donc supérieurs à la LQ (limite de quantification) ; Ag et Pb sont donc exclus.

La reproductibilité entre les prélèvements réalisés en double est très correcte, avec un écart entre -12% (Zn) et +12% (Cu) pour 2 analyses pratiquées sur un prélèvement au seau et un écart entre -15% (Zn) et +8% (Ba) pour 2 analyses pratiquées sur un prélèvement en pompage.

La comparaison entre prélèvement au seau et prélèvement en pompage suggère sur cette station qu'il n'y a pas de différences majeures entre les 2 protocoles. On notera cependant que les prélèvements réalisés au seau ont tendance à être très légèrement plus riches en Al, Co, Zn. A *contrario* les prélèvements en pompage auraient tendance à être légèrement plus riches en Cu et As, ce qui pourrait suggérer que le chimisme de l'eau est très légèrement différent entre le sommet de la colonne d'eau (prélèvement au seau) et la base de la colonne d'eau (pompage). Les différences sont toutefois faibles, et les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique notamment) dont on dispose ne permettent pas de déterminer si ces très légères différences de concentrations en éléments en trace sont plutôt indicatrices d'une variation de chimisme ou plutôt révélatrices de légers biais des systèmes d'échantillonnage (contamination

résiduelle bien que les systèmes aient été rincés après leur dernière utilisation). Néanmoins, les prélèvements en pompage ayant tendance à être un peu moins « riches » en éléments traces, on peut sans doute considérer qu'un prélèvement au seau aura une représentativité moins bonne qu'un prélèvement en pompage, ce qui est d'ailleurs souligné dans les guides techniques AQUAREF.

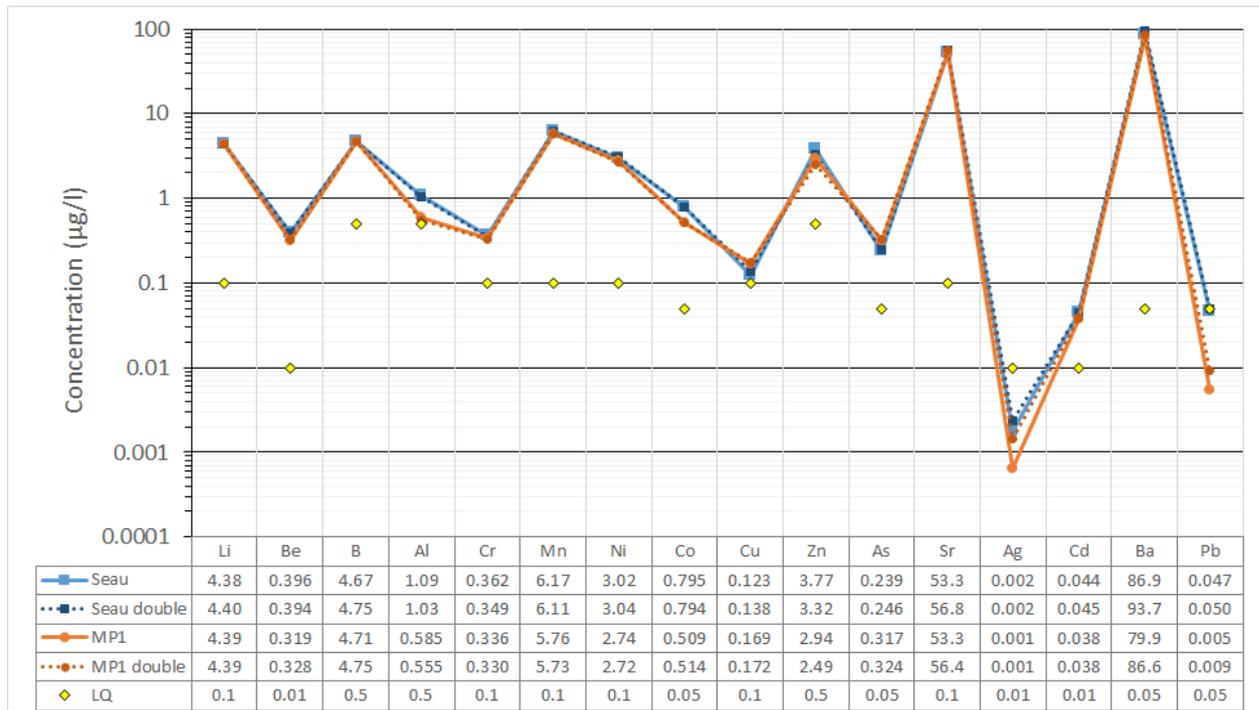


Figure 21 : station de La Guerche sur l'Aubois : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

5.1.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire

Il est vraisemblable que le prélèvement, indiqué dans la fiche station comme pouvant être pratiqué au seau, soit en fait opéré sur la conduite amenant l'eau du captage au groupe de pompage. Pour rappel, l'utilisation d'un seau ou d'un bailer n'est pas une pratique recommandée par AQUAREF. L'échantillonnage est réalisé avec un seau ou un bailer dans le cadre de ce rapport uniquement en raison de la mention de l'utilisation de ces moyens dans les fiches station.

Ce faisant, l'eau n'est prélevée que lors d'une phase active de pompage. En conséquence, les hétérogénéités relevées dans la colonne d'eau, qui auraient pu altérer la représentativité du prélèvement si celui-ci avait été réalisé au seau directement au captage, ne sont sans doute pas de mise. Un pompage léger avec une pompe MP1 n'a indiqué qu'une très faible variabilité de la masse d'eau, qui ne présente qu'une très légère évolution dans la partie crépinée de l'ouvrage. Le pompage avec une pompe à demeure impliquant des débits bien supérieurs, ces très légères évolutions seront gommées, et l'eau produite sera une eau représentative de celle produite par l'intervalle crépiné, modulée par la transmissivité de chaque horizon producteur. Si une variabilité

temporelle doit exister, son origine est intrinsèque, et sera à rechercher dans des contributions possiblement variables des différents horizons captés par la crépine.

5.2. STATION D'ESTIVAREILLES

5.2.1. Mode opératoire

La station a été visitée le 27/08/18 entre 15:30 et 18:00.

Le puits n°16 de cette zone regroupant de multiples captages (Figure 22) est aisément identifiable sur la parcelle – on remarquera toutefois qu'il y a incohérence entre cette dénomination et la référence BSS qui lui est attribuée (voir annexe).

La partie fixe du capot permettant d'ouvrir le captage, qui sert de référentiel aux mesures de profondeur, est implantée très largement au-dessus du niveau de la prairie, afin d'éviter des invasions d'eau de surface lors des crues du Cher (Figure 22). La base de cette protection est constituée par une corolle bétonnée surmontée d'un cuvelage béton de gros diamètre, l'intérieur étant constitué de ce même cuvelage béton sur toute la hauteur hors-sol. Des reprises récentes de maçonnerie sont visibles à l'extérieur de ce cuvelage. A l'intérieur, une échelle très corrodée permet de descendre dans l'ouvrage, qui se compose d'une autre buse béton de diamètre inférieur, sur laquelle deux poutrelles métalliques, également corrodées et portant traces de placages en bois se désagrégeant, sont posées. Ces deux poutrelles supportent un tube métallique plongeant vers la base de l'ouvrage, tube qui présente également des traces de corrosion. Bien que l'eau soit claire, il n'est pas possible de déterminer formellement si un corps de pompe est placé dans l'ouvrage, ou si l'aspiration se fait depuis la station de pompage, implantée un peu plus de 200 m au Nord. Cette seconde option est sans doute plus vraisemblable, aucune alimentation électrique n'ayant été aperçue dans l'ouvrage. Le niveau de l'eau est assez bas et laisse apparaître la présence d'une buse béton largement ajourée dans ce qui doit constituer les deux derniers mètres de la colonne d'eau (Figure 22). Tous les constituants en béton qui doivent régulièrement être sous eau ont un aspect noirâtre.

Comme pour l'ouvrage précédent, deux diagraphies ont été réalisées en préalable à toute autre investigation, de part et d'autre de la conduite reliant l'ouvrage à la station de pompage (voir §5.2.2). Ensuite, en cohérence avec la fiche station qui indique ce mode de prélèvement comme possible, un prélèvement a été réalisé au bailer (on rappelle que ce mode de prélèvement n'est pas recommandé par AQUAREF), puis la pompe MP1 a été descendue dans l'ouvrage afin de procéder à prélèvement par pompage (voir §5.2.3).

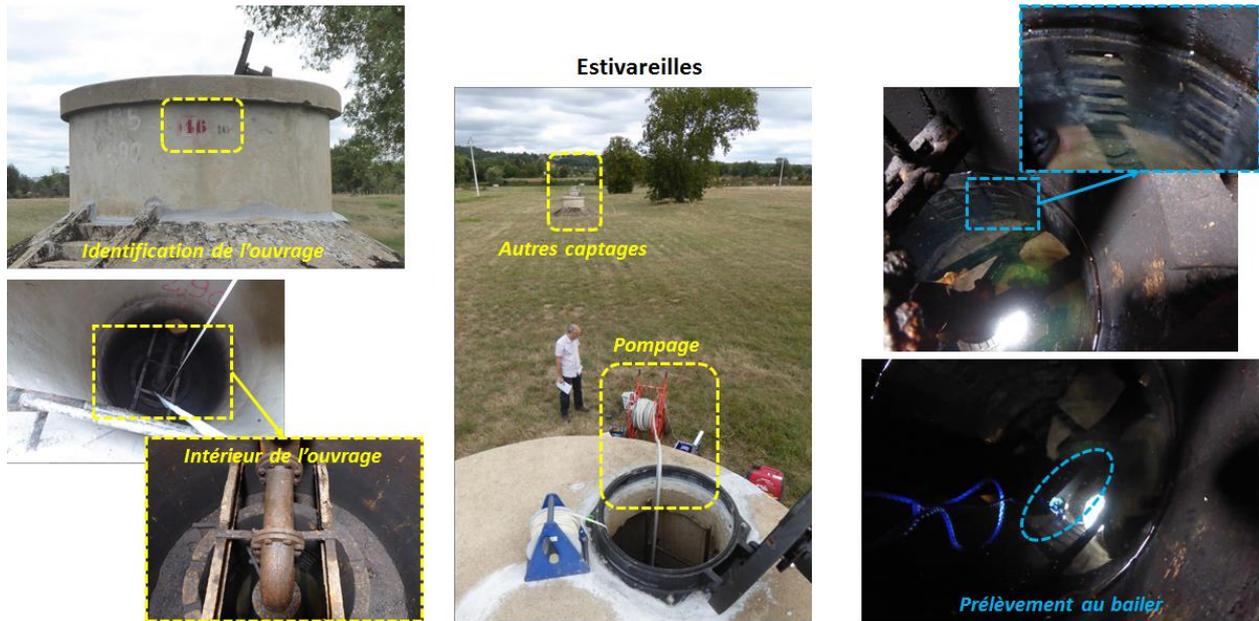


Figure 22 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station d'Estivareilles et aperçu des investigations réalisées sur site.

5.2.2. Diagraphie

Par rapport au cerclage métallique de référence, le niveau d'eau est situé à -4,54 m. La colonne d'eau présente dans l'ouvrage est peu importante, approchant à peine 2,50 m (Figure 23). Les deux diagraphies permettent néanmoins de mettre en évidence quelques caractéristiques.

Les profils de **température** indiquent que le sommet de la colonne d'eau est fortement influencé par la présence d'un important volume d'air, plus chaud, dans l'ouvrage. La perturbation thermique disparaît rapidement, et l'on peut identifier le passage de la paroi béton pleine à la paroi béton perforée un peu en dessous de 5 m de profondeur. A cette profondeur, le gradient thermique devient nul, et la colonne d'eau présente, sur environ 2 mètres, une température constante proche de 16,2°C.

Les profils de **conductivité électrique** fournissent des informations similaires, et il n'est pas possible de déterminer si l'alimentation en eau se fait par un horizon particulier ou sur toute la hauteur crépinée. La conductivité est assez élevée, supérieure à 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Les données de **pH** permettent également de bien individualiser le passage dans la crépine. A l'inverse des autres paramètres, et de manière reproductible, le pH n'est pas constant dans la colonne d'eau. Il admet une baisse de 0,1 unité entre 5,40 et 6,40 m, avant de se stabiliser voire de réaugmenter légèrement à l'approche de la base de l'ouvrage. Ceci pourrait suggérer une alimentation plus conséquente via la base de l'ouvrage.

Mis à part une différence de valeur initiale entre les deux diagraphies, déjà mentionnée précédemment, les profils de **potentiel redox** sont quasiment identiques. Ils montrent une inflexion au passage dans la crépine et sont assez stables dans la colonne d'eau.

L'**oxygène dissous** est proche de la saturation dans les premiers centimètres de la colonne d'eau, puis sa valeur diminue rapidement, et encore plus au passage dans la crépine. Les

dernières dizaines de centimètres de la colonne d'eau marquent une stabilisation de la saturation vers des valeurs basses (à peine supérieures à 30%), ce qui, là encore, peut suggérer que cet horizon est assez homogène et sans doute contributeur pour une bonne part à la production d'eau dans l'ouvrage. On soulignera aussi que ces valeurs sont assez basses pour une nappe alluviale à faible distance de la rivière (le Cher n'est guère qu'à une centaine de mètres au Sud-Ouest).

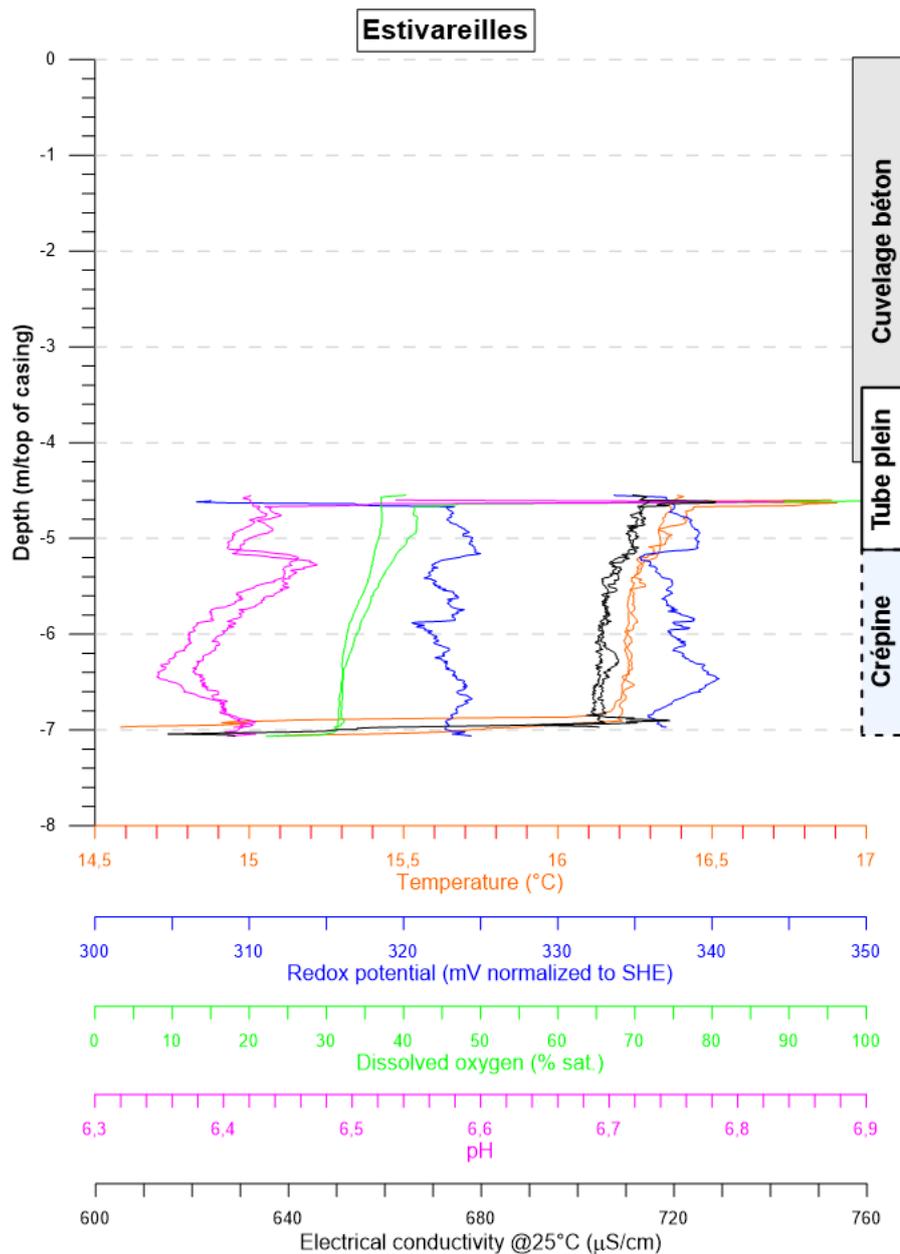


Figure 23 : station d'Estivareilles : diagraphies dans la colonne d'eau.

5.2.3. Prélèvement

Un premier prélèvement a été pratiqué avec un bailer, afin d'évaluer l'incertitude qui peut être engendrée sur l'analyse chimique lors de l'utilisation de cet outil dans le contexte présent (prélèvement dans la partie pleine du cuvelage béton, sans atteinte de la partie crépinée). Ce mode de prélèvement n'est pas celui qui est utilisé dans le cadre du suivi réglementaire, le prélèvement étant fait par pompage. Ce prélèvement au bailer est donc uniquement opéré à titre comparatif. Peu d'informations complémentaires sur la façon dont le pompage réglementaire est opéré sont disponibles, la fiche station se limitant à décrire un prélèvement directement au puits, plusieurs puits se rejoignant à la station de pompage. Les différents ouvrages pouvant être sollicités journalièrement, il n'est pas possible de déterminer si, lors du suivi régulier, une pompe est descendue dans l'ouvrage pour opérer un pompage assez long, ou si l'action de pompage est brève, étant considéré que l'eau dans l'ouvrage est régulièrement renouvelée par l'intermédiaire des pompages pratiqués par la station.

Le prélèvement (cations/anions) au bailer a été réalisé à 16:00, le bailer, neuf, ayant préalablement été rincé 3 fois à l'eau du site. Les paramètres physico-chimiques n'ont pas été mesurés sur ce prélèvement.

Ensuite, la pompe MP1 a été descendue à 50 cm au-dessus du fond, dans ce qui semble être, selon la diagraphie, le principal horizon producteur. Le pompage a été réalisé à un débit de 600 L.h⁻¹ pendant 5 minutes, puis augmenté à 900 L.h⁻¹ pendant 30 minutes, avant que le prélèvement ne soit initié (Figure 24). Un volume d'un peu plus de 500 l a donc été purgé, ce qui représente moins d'un quart du volume d'eau présent dans la colonne d'eau et un peu plus d'un quart du volume d'eau présent dans la crépine¹². On soulignera que l'on s'écarte des recommandations AQUAREF relatives aux volumes de purges des ouvrages, mais que l'on procède à des investigations dans un ouvrage implanté champ captant et très régulièrement sollicité. Les paramètres physico-chimiques mesurés à stabilisation sont consignés dans le Tableau 9.

Méthode	Température (°C)	Conductivité électrique à 25°C (µS.cm ⁻¹)	pH	Potentiel redox (mV ESH)	O ₂ dissous (mg.L ⁻¹ et % de saturation)
Pompage	17,8	710	6,42	+370	2,91 31,3%

Tableau 9 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage en pompage (station d'Estivareilles).

Lors du pompage, la conductivité électrique n'a pas varié (variation inférieure à 0,5%), tout comme la saturation en oxygène – une grande part de la variabilité étant de surcroît uniquement liée à la 1^{ère} mesure (Figure 24). Les mesures in-situ, considérées vers 6,5 m de profondeur (Figure 23), sont tout à fait concordantes avec les mesures en pompage pour ces deux

¹² Le diamètre interne est de 110 cm, pour une hauteur de colonne d'eau de 2,40 m dont 2 m dans la crépine. L'utilisation d'une pompe MP1 dans ce type d'ouvrage trouve sa limite : par construction, son débit maximum est de 2 m³.h⁻¹, débit maximum ici bridé par l'utilisation d'un tuyau de faible diamètre et d'une jupe de refroidissement (en respect des spécifications constructeur).

paramètres (l'oxygène dissous a une valeur proche de 31,7% de saturation en diagraphie, et la conductivité électrique une valeur proche de 705 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Il en est de même pour le pH (6,4 in-situ). Comme mentionné précédemment pour La Guerche sur l'Aubois, la température est supérieure en sortie de pompage, et très vraisemblablement pour la même raison. Le potentiel redox diffère également, mais l'écart relatif entre les 2 mesures (+370 mV en sortie de pompage, +325 à +340 mV in-situ) est un peu moins fort (autour de 10%).

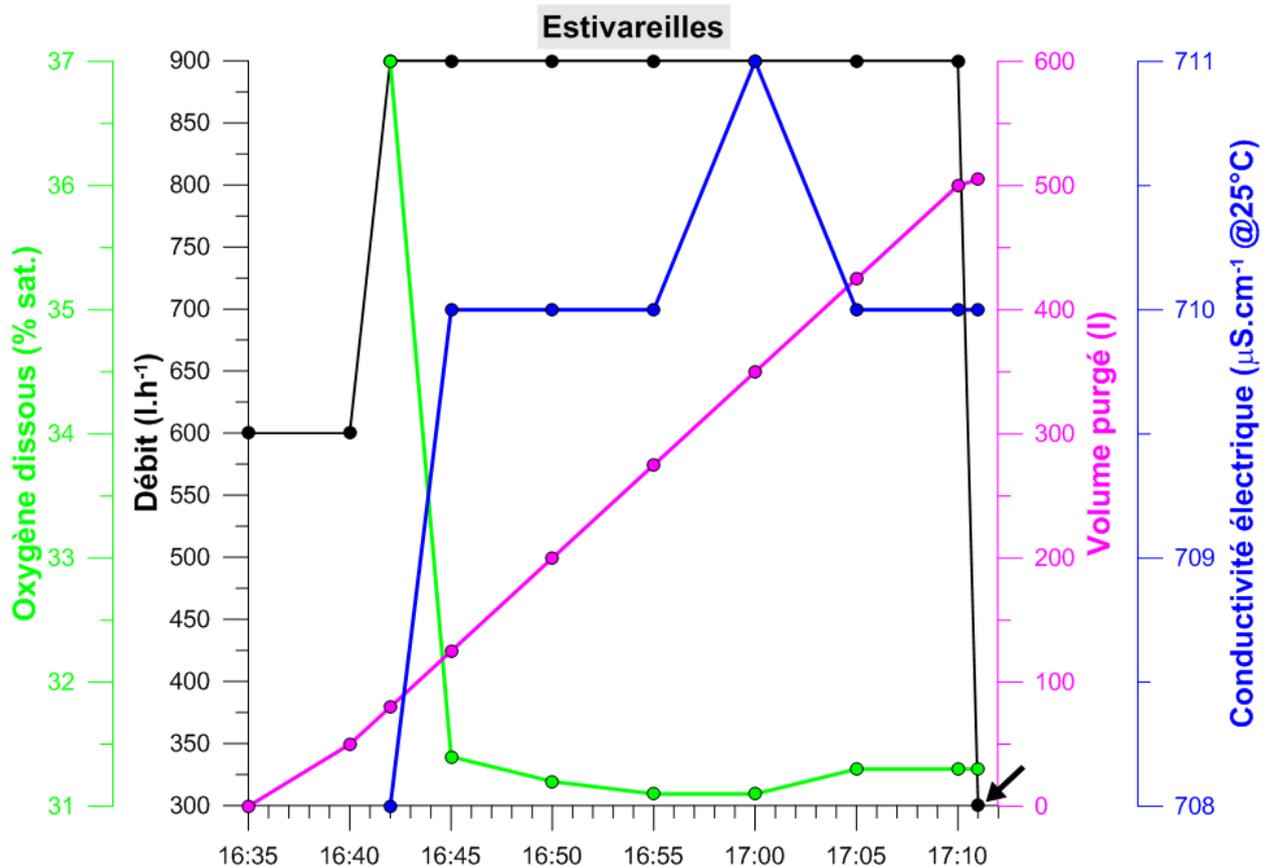


Figure 24 : station d'Estivareilles : suivi du pompage ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

5.2.4. Analyses de laboratoire

Comme pour la station de La Guerche sur l'Aubois, les prélèvements faits à Estivareilles, tant au bailer qu'en pompage, ont été dupliqués (Figure 25). Une nouvelle fois, certains éléments sont en dessous de la limite de quantification et ne sont pas considérés (Ag, Pb).

La reproductibilité entre les doubles est très correcte, avec une dispersion comprise entre 3% (Al) et 20% (Be) pour 2 analyses pratiquées sur un prélèvement au bailer et une dispersion comprise entre 8% (Cr) et 12% (Cd) pour 2 analyses pratiquées sur un prélèvement en pompage.

Les écarts entre prélèvement au bailer et prélèvement en pompage sont très faibles pour certains éléments (Li, Be, B, Mn, As, Sr, Cd, Ba), par contre, pour d'autres éléments (Cr, Ni, Co), les

prélèvements en pompage apparaissent plus riches que les prélèvements au bailer. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces écarts :

- L'horizon échantillonné n'est pas le même, et l'on pourrait admettre une variation chimique des éléments en trace entre deux niveaux, d'autant que le niveau proche de la surface, échantillonné avec le bailer, n'est pas directement au droit des perforations dans la cimentation.
- La pompe MP1, qui a pourtant fonctionné durant plus de 30 minutes, ou le tuyau branché sur la pompe (rincé également pendant 30 minutes), présentent une contamination résiduelle, les eaux de La Guerche sur l'Aubois étant plus riches en Cr (0,33 à 0,36 $\mu\text{g.L}^{-1}$), Ni (2,7 à 3 $\mu\text{g.L}^{-1}$) et Co (0,5 à 0,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$). Le bailer utilisé était neuf, il ne présentait pas ce risque. Cette hypothèse est mentionnée par principe. En effet, compte tenu des faibles différences de niveaux de concentrations entre les 2 sites, du temps de purge et donc de rinçage d'au moins 30 minutes, une contamination résiduelle de cette ordre parait très improbable. L'hypothèse la plus vraisemblable est une différence de représentativité. Les écarts constatés sont faibles mais significatifs au regard des répétitions effectuées.

A l'inverse, pour Zn, les résultats obtenus avec le bailer sont légèrement plus élevés que ceux obtenus par pompage.

Dans tous les cas, il est rappelé que les recommandations techniques AQUAREF proscrivent l'utilisation du bailer dans ces applications courantes de surveillance.

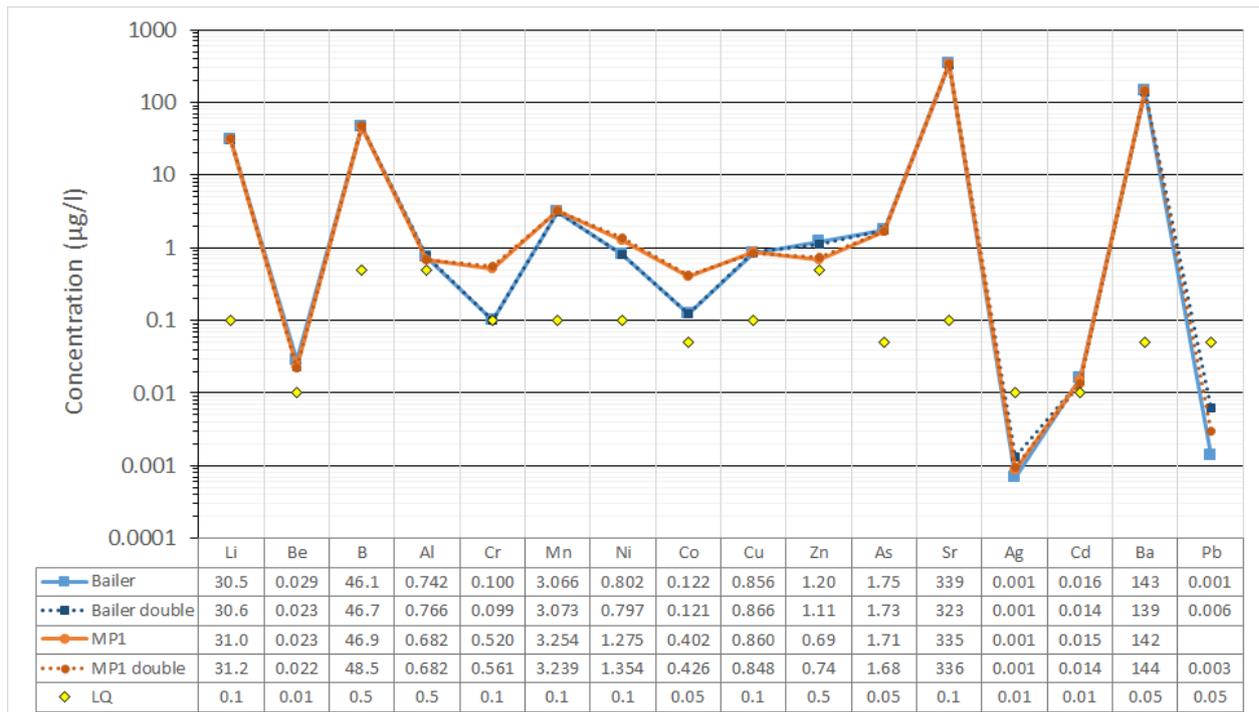


Figure 25 : station d'Estivareilles : analyses chimiques sur éléments traces (en $\mu\text{g/L}$). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

5.2.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire

Peu d'indications sont mentionnées dans la fiche station quant au mode opératoire utilisé pour pratiquer le pompage. L'ouvrage faisant partie d'un champ captant, il est régulièrement sollicité. D'autre part, le pompage léger pratiqué avec une pompe MP1 n'a pas permis de mettre en évidence de changements physico-chimiques dans la colonne d'eau. Si une variabilité temporelle existe dans les chroniques chimiques ou physico-chimiques, ce sera sans doute en relation avec le contexte hydrogéologique local (plaine alluviale hétérogène spatialement). Au cours de l'année, en liaison avec des épisodes de crue ou au contraire d'étiage, il est possible que la production d'eau ne soit pas toujours réalisée par les mêmes niveaux, ce qui peut induire des variations de chimisme de l'eau.

5.3. STATION DE LA PEROUILLE – PERTURBRAULT

5.3.1. Mode opératoire

La station a été visitée le 28/08/18 entre 10:30 et 17:30.

La localisation de cet ouvrage ne peut pas prêter à confusion avec celle d'un autre puits. Le puits n'avait pas été récemment utilisé pour des fins agricoles, les seules sollicitations possibles étant donc celles liées à la surveillance réglementaire. L'ouvrage est un puits classique à paroi de pierres maçonnées, vraisemblablement sur toute la hauteur pour assurer la résistance mécanique à la pression des terrains (Figure 26). En conséquence, si l'alimentation se réalise à la base de l'ouvrage (diamètre interne proche de 100 cm), elle peut aussi se faire sur toute la hauteur du puits, par infiltration via les joints de ciment, les défauts de cimentation ou d'empierrement. La partie haute de l'ouvrage (partie visible) est en briques. Quelques dizaines de centimètres sous la surface, un raccord de maçonnerie est bien visible (Figure 26). Il n'est pas possible de déterminer si des infiltrations d'eaux de ruissellement sont possibles via cette discontinuité.

Le niveau statique, pris en référence sur la margelle, une fois la plaque métallique de protection ôtée, est de 9,44 m, la profondeur totale, estimée à l'aide de la sonde piézométrique, étant proche de 15,30 m.

Deux diagraphies ont été réalisées à l'arrivée sur site (voir §5.3.2). Ensuite, il a été procédé à des pompages séquentiels tous les mètres (voir §5.3.3). Chaque séquence de pompage a fait l'objet d'un prélèvement. Enfin, un dernier prélèvement a été fait pour se conformer aux échantillonnages réalisés par les prestataires de l'agence de l'eau, en mettant en route la pompe installée à demeure dans l'ouvrage et en réalisant le prélèvement à l'exhaure de ce pompage. Deux autres diagraphies ont par ailleurs été réalisées au milieu des séquences de pompage et suite au dernier pompage.

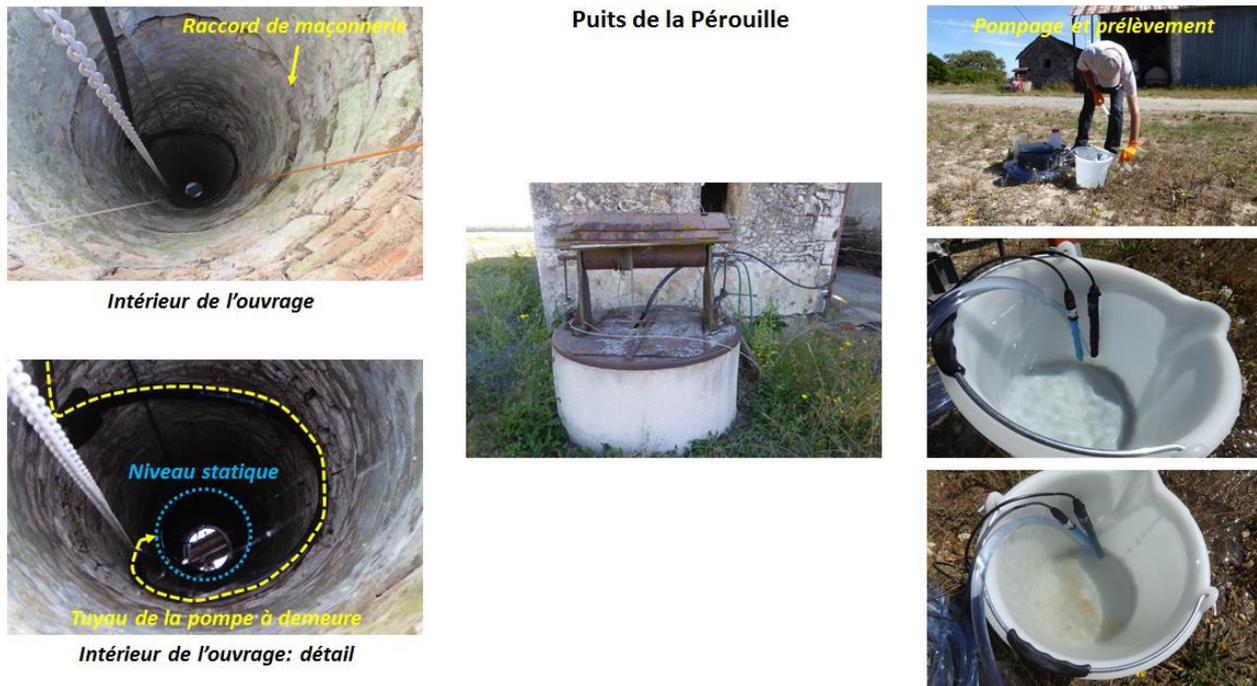


Figure 26 : principales caractéristiques techniques de l'ouvrage prélevé à la station de La Pérouille et aperçu des investigations réalisées sur site.

5.3.2. Diagraphie

Les profils initiaux étant très semblables pour les paramètres physico-chimiques, la Figure 26 ne présente qu'une des deux acquisitions faites¹³. Pour certains paramètres, la colonne d'eau présente une variabilité importante selon la profondeur.

La **température** est ainsi plus élevée à l'interface eau/air présent dans le puits, mais cela ne constitue pas une particularité de ce puits. Toutefois, on constate qu'un gradient négatif existe jusque vers 13,5 m de profondeur, soit sous 4 m de colonne d'eau (la température passe de plus de 13°C à 12,7°C environ). La température se stabilise ensuite sur environ 1 mètre, puis semble commencer à réaugmenter en base d'ouvrage.

Plus intéressantes sont les données de **conductivité électrique**. Plusieurs compartiments de conductivité assez stable semblent exister, chacun séparé par des zones de gradient plus fort. On distingue :

- De 9,5 à 10,4 m de profondeur, une zone de faible conductivité ($420 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ;
- Une nette augmentation de conductivité jusqu'à 11,6 m de profondeur ($480 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ;
- Une zone de conductivité moyenne proche de $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ de 11,6 à 13,4 m de profondeur ; Un gradient de conductivité existe néanmoins dans cet intervalle, mais il est plus faible que dans l'horizon supérieur et dans l'horizon inférieur.
- A nouveau une nette augmentation de conductivité jusqu'à 14,6 m de profondeur ($660 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ;

¹³ A l'exemple des mesures de température, les profils sont identiques ; la seule différence est pour le potentiel redox.

- A cette profondeur, un saut de conductivité existe, puisque l'on passe en quelques centimètres à $780 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;
- Enfin, la conductivité semble se stabiliser autour de $800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ dans les derniers 50 cm du puits.

Ce profil complexe, dans lequel plusieurs zones d'alimentation, chimiquement différentes, semblent exister, a justifié la réalisation de pompages à plusieurs niveaux, afin de déterminer comment réagissait(ent) le/les niveau(x) aquifère(s) à une sollicitation de leur production.

Une complexité existe également pour les mesures de **pH**. L'horizon supérieur (9,5-10,4 m) a une valeur proche de 5,6, l'horizon médian (11,6-13,4 m) présente une valeur un peu inférieure en moyenne (5,5) – avec l'existence de 2 zones distinctes entre 12,2 et 12,6 m de profondeur (pH de 5,52, stable) et entre 12,6 et 13,2 m de profondeur (pH de 5,44, stable), et enfin l'horizon inférieur, où le pH n'est pas stable, mais atteint des valeurs supérieures à 6. Il semble donc que l'aquifère capté, rapporté aux sables et argiles éocènes de la Brenne, soit assez hétérogène¹⁴. Ceci peut être compréhensible si l'on considère des alternances de passées sableuses – potentiellement aquifères – et de passées argileuses – potentiellement aquicludes.

A l'opposé des autres paramètres, les mesures de **potentiel redox** sont assez peu informatives, suggérant seulement l'existence d'un potentiel un peu plus élevé dans la moitié inférieure du puits.

Les mesures de saturation en **oxygène dissous** semblent également pouvoir être raccordées au schéma complexe précédemment ébauché. L'horizon supérieur est le plus riche en oxygène dissous (75% de saturation) tandis que l'horizon médian l'est moins (65%). Il n'est pas possible de déterminer une valeur d'équilibre pour l'horizon profond, peut-être parce qu'il n'est capté que sur une faible hauteur. Néanmoins, cet horizon est appauvri en oxygène dissous (<55%).

¹⁴ On signalera qu'un forage proche (BSS001MUNQ ; voir anexe) permet de disposer, à 160 m de distance, des informations géologiques suivantes : argile sableuse de 0,5 à 4 m de profondeur ; sable argileux avec parfois présence d'éléments grossiers de 4 à 10 m ; argile sableuse de 10 à 17,5 m de profondeur.

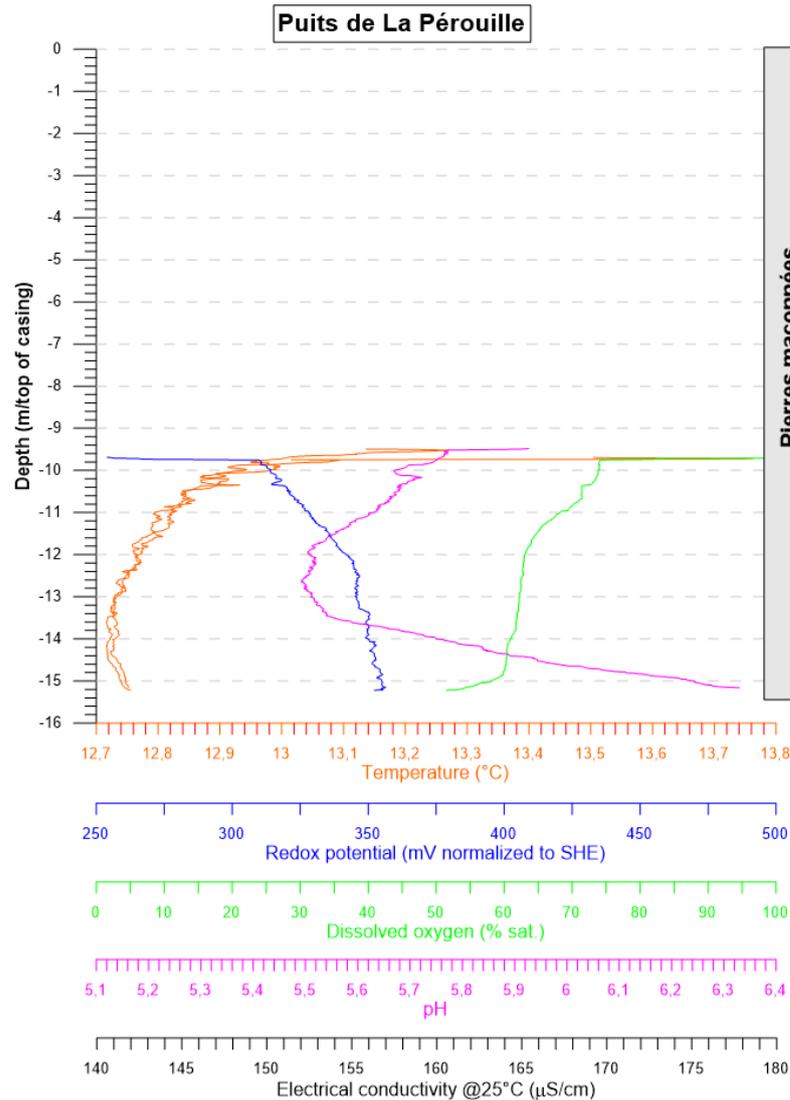


Figure 27 : station de La Pérouille : exemple de diagraphie initiale (les données des deux diagraphies étant très semblables, seuls les deux profils de température sont figurés).

La réalisation de diagraphies durant la phase de pompage à plusieurs niveaux (voir §5.3.3) permet de mettre en évidence des variations complémentaires (Figure 28).

Les différents profils de **température** présentent toujours un gradient négatif entre 9,5 m de profondeur et 13,4 m de profondeur. Dans le détail, le pompage semble provoquer l'apparition d'un palier de température vers 11,6 m de profondeur (diagraphie de 15:35) qui n'est pas totalement résorbé 1h30 plus tard. Un pompage pouvant provoquer une anomalie locale de température, l'apparition d'une anomalie thermique localisée peut uniquement résulter de l'action de pompage. Le fait que l'anomalie thermique ne soit pas totalement résorbée après un certain temps peut laisser à penser que l'anomalie thermique ne résulte pas du seul effet de pompage. Ceci pourrait suggérer qu'une alimentation en eau se produit aux alentours de 12 m de profondeur, et peut-être encore plus vers 12,4 m (apparition d'une légère anomalie thermique à 17:15). En-dessous, la température est très stable entre 13,4 et 14 m de profondeur, puis des anomalies thermiques apparaissent ensuite, particulièrement à l'issue des pompages. Un pic vers

14,2 m de profondeur mesuré à 17:15 est ainsi particulièrement visible. Ce pic semble refléter l'état thermique de l'aquifère sollicité par le pompage. En effet, si un biais lié à un réchauffement engendré par la pompe MP1 peut exister (l'anomalie est localisée autour du 5^{ème} niveau de déploiement de la pompe, proche de 14,3 m de profondeur), il existe un décalage temporel entre le moment auquel le pompage a été réalisé à cette profondeur (avant 15:00) et le moment où la diagraphie est faite (17:15). D'autre part, la diagraphie réalisée peu de temps après le pompage sous 5 m de colonne d'eau (15:35) ne montre pas cette anomalie de température. Enfin, cette anomalie ne peut pas être provoquée par le fonctionnement de la pompe à demeure, dont on montrera qu'elle est positionnée à 13 m de profondeur (voir §5.3.3).

Si certaines évolutions semblent exister en température, cela est moins vrai en considérant les données de **pH** et de **conductivité électrique**. On peut toutefois remarquer que la profondeur de certaines interfaces, et principalement celle présentes à partir de 13 m de profondeur, semblent remonter au fur et à mesure des sollicitations par pompage. Par ailleurs, à quelques dizaines de centimètres au-dessus du fond, la conductivité électrique diminue un peu au fur et à mesure de l'avancement des pompages. Ceci pourrait suggérer que l'alimentation se réalise majoritairement par le fond de l'ouvrage, et que les contributions latérales sont moindres. La diagraphie de 17:15 montre assez bien ce mécanisme, avec une épaisseur de colonne d'eau conductrice plus importante en fond de puits. Cela peut aussi résulter du fait que la quantité d'eau pompée vers la base de l'ouvrage est supérieure à celle pompée dans les niveaux sus-jacents. Néanmoins, un enseignement fort à tirer de ces mesures est la constance des différences de physico-chimie dans la colonne d'eau même lorsqu'on la sollicite par pompage (un peu plus de 1,3 m³ ont été pompés au cours des investigations, soit environ 1/3 du volume total de la colonne d'eau). Ceci traduit donc bien une structuration intrinsèque de la colonne d'eau.

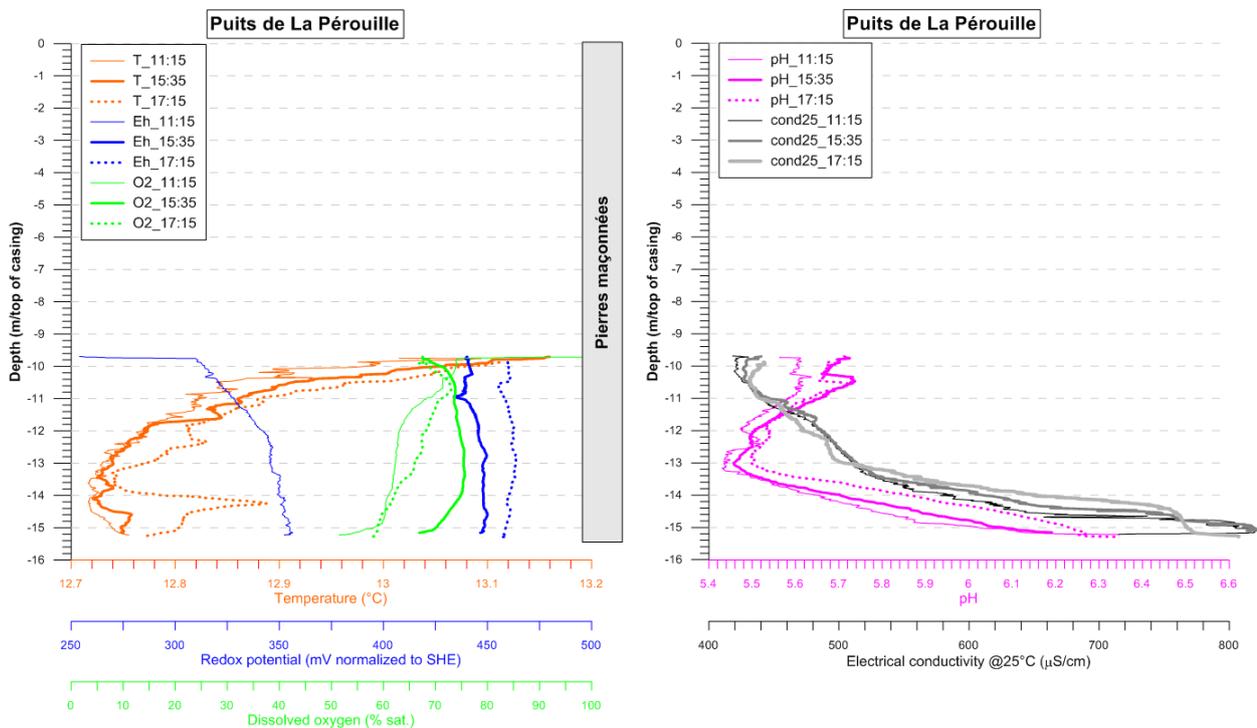


Figure 28 : station de La Pérouille : détail des diagraphies pratiquées avant pompage (11:15), en cours d'action de pompage (15:35), et en fin de pompage (17:15).

5.3.3. Prélèvement

Les prélèvements de la surveillance réglementaire sont réalisés au robinet, après utilisation de la pompe à demeure (voir §5.3.1). Ce protocole a été suivi, mais à l'issue des autres investigations, notamment les pompages à différentes profondeurs, qui sont maintenant décrits.

Compte tenu de la variabilité de certains paramètres physico-chimiques dans la colonne d'eau, il a été choisi de descendre la pompe MP1 par pas de 1 mètre dans la colonne d'eau, le premier pompage étant effectué sous environ 1 m de colonne d'eau. Par rapport au sommet de la margelle du puits, les pompages sont donc successivement réalisés à 10,3 m, 11,3 m, 12,3 m, 13,3 m, 14,3 m et 15,3 m (niveau très proche du fond). On précisera que ces pompages ne sont pas destinés à provoquer une purge « globale » de l'ouvrage. Compte tenu du diamètre du puits (110 cm), le volume d'eau présent par mètre de colonne d'eau est proche de 1 m³ (950 l). Ils sont destinés à opérer une sollicitation de l'ouvrage dans une tranche d'eau réduite, pour essayer de comprendre comment la réalimentation peut se dérouler. Une comparaison avec l'évolution du niveau statique est donc impérative, pour déterminer si le volume d'eau soustrait correspond seulement à un rabattement de la nappe ou si une autre alimentation en eau est sollicitée. Dans le 1^{er} cas, on peut alors supposer que l'horizon sollicité par le pompage n'est pas productif, et que le pompage n'est pas suffisant pour stimuler la production d'autres niveaux (pompe trop éloignée par exemple et débit de pompage trop faible). Dans le 2nd cas, on peut supposer que l'alimentation peut se faire au niveau de l'horizon sollicité, mais également via d'autres horizons, si ceux-ci ont des propriétés hydrauliques plus favorables.

La Figure 29 présente un résumé de ces pompages à différentes profondeurs, ainsi que les évolutions constatées lors de l'utilisation de la pompe à demeure. On rappelle que la 1^{ère} mesure rapportée au début de chaque pompage à un niveau donné peut ne pas être représentative : il faut un certain laps de temps pour purger le tuyau de la pompe MP1 (90 m de long). Chaque session de pompage est ensuite présentée de manière individuelle entre la Figure 29 (sous 1 m de colonne d'eau) et la Figure 35 (sous 6 m de colonne d'eau). La Figure 36 présente les mesures obtenues en utilisant la pompe à demeure. Le Tableau 10 présente les mesures des paramètres physico-chimiques lorsque les prélèvements ont été réalisés aux différents niveaux. Enfin, le Tableau 11 regroupe des informations relatives à la colonne d'eau : volume pompé, rabattement mesuré, et potentielle contribution de l'aquifère à l'alimentation en eau lors du pompage¹⁵.

¹⁵ Voir paragraphe précédent.

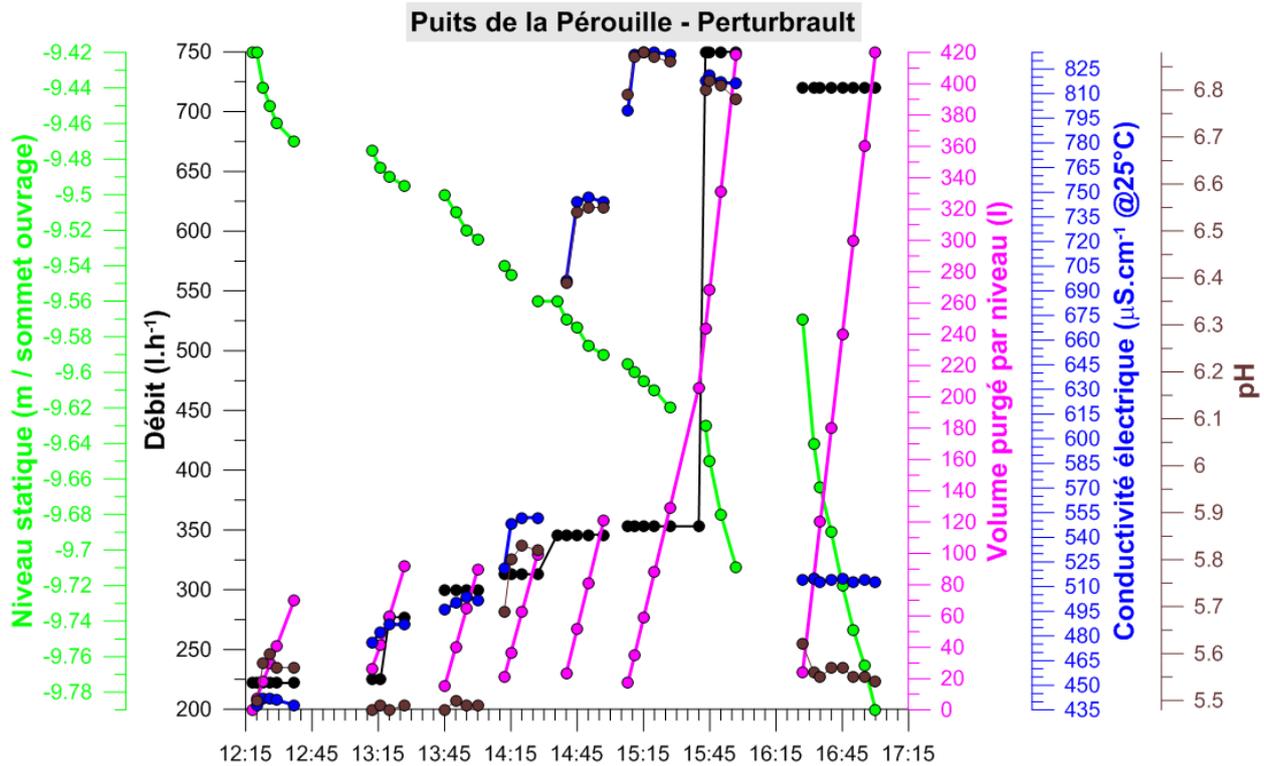


Figure 29 : station de la Pérouille : suivi du pompage ; vue synthétique.

Avant de discuter des résultats, une précision doit être apportée quant à la détermination de la profondeur à laquelle est installée la pompe à demeure. La Figure 36 et le Tableau 10 montrent que le pompage fournit une eau dont le pH est proche de 5,5 et la conductivité électrique est proche de $510 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La Figure 28 est alors utilisée. Un pH de 5,5 peut se trouver dans un intervalle compris entre 11,4 et 13,4 m de profondeur. On sait donc déjà que la pompe n'est pas au fond de l'ouvrage. Une conductivité de $510 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ne peut guère être mesurée que vers 13 m de profondeur, quel que soit le degré de pompage que l'on considère. On peut ainsi déterminer avec une bonne confiance que la pompe se situe aux alentours de 13 m de profondeur.

Les résultats obtenus durant les pompages suggèrent que les niveaux supérieurs de la colonne d'eau sont sans doute peu ou pas productifs. Ainsi, sous **1 m de colonne d'eau** (Figure 30), un pompage à très faible débit ($220 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) provoque un rabattement non négligeable. En raisonnant uniquement en termes de rapport de volume, on peut supposer que les 70 litres pompés proviennent aux 2/3 d'une contribution de l'aquifère, le tiers restant provenant de la simple vidange de la colonne d'eau. Toutefois, il est vraisemblable que cette contribution diminue si le débit de pompage venait à augmenter, car alors le rabattement serait accru et la contribution de l'aquifère vers 1 m de profondeur atteindrait rapidement son maximum. Dans une telle configuration, on pourrait aussi constater une intrusion d'eaux plus profondes, ce qui n'est pas le cas ici, car la conductivité et le pH correspondent aux mesures déterminées à une profondeur équivalente lors des diagraphies (Figure 28). L'horizon vers 1 m de profondeur a donc vraisemblablement une productivité limitée.

Sous **2 m de colonne d'eau** (Figure 31), la situation est un peu moins favorable, la production d'eau ne compensant que 60% du volume pompé. Ici, la situation semble identique à celle relevée plus haut (faible productivité de l'horizon autour de 2 m de profondeur), peut-être modulée par un pompage un peu plus fort en fin de suivi (passage du débit de pompage de 225 à $280 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$),

qui pourrait amener à produire un horizon un peu plus lointain. Toutefois, cette contribution d'un autre horizon, si elle existe, est limitée, car les pH et conductivité mesurés en pompage, comparés à ceux déterminés en diagraphie, circonscrivent la zone d'influence à un horizon de colonne d'eau proche de la profondeur à laquelle la pompe est déployée.

Sous **3 m et 4 m de colonne d'eau** (Figure 32 et Figure 33), avec un débit de pompage de 300 à 320 L.h⁻¹, la productivité semble plus élevée, le volume pompé étant compensé à plus de 70% par une production d'eau par l'aquifère. Une nouvelle fois, les données de pH et de conductivité semblent suggérer une production d'eau assez localisée, car, particulièrement sous 4 m de colonne d'eau, toute incursion d'eau plus profonde se traduirait par une nette hausse des valeurs de ces deux paramètres.

Sous **5 m et 6 m de colonne d'eau** (Figure 34 et Figure 35), plus de 80% de l'eau semble être produite par l'aquifère, ce qui tend à renforcer le constat précédemment établi de plus forte contribution à l'alimentation par les niveaux profonds. Le pompage sous 5 m de colonne d'eau n'est sans doute ni assez long, ni à débit suffisant, pour induire une remontée de l'eau produite en base d'ouvrage vers cette profondeur (ce que suggère par ailleurs la diagraphie réalisée à 17:15, à l'issue de tous les pompages). Sous 6 m de colonne d'eau, le pompage a été opéré à 2 débits. Le premier est faible, de l'ordre de 350 L.h⁻¹, afin de rester dans des conditions de faible sollicitation de l'aquifère. A ce débit, l'aquifère compense 82% de la quantité d'eau pompée. Une forte hausse du débit (passage à 750 L.h⁻¹) se traduit par une baisse plus nette du niveau statique, mais la productivité de l'aquifère compense encore 76% de l'eau pompée. Les caractéristiques physico-chimiques sont invariantes, ce qui souligne que l'on sollicite toujours le même niveau producteur, que la Figure 28 permet de localiser, sans trop d'incertitude, à la base de l'ouvrage.

Outre la localisation de la pompe à demeure, la Figure 36 permet également de confirmer que l'alimentation en eau sous 3 à 4 m de colonne d'eau n'est toutefois pas négligeable, ce que les données reportées dans les Figure 32 et Figure 33 laissaient entrevoir (cf. supra). En effet, la pompe à demeure a un débit non réglable mesuré à 720 L.h⁻¹, plus de 2 fois supérieur aux débits utilisés sous 3 et 4 m de colonne d'eau. Si le niveau autour de 13 m de profondeur n'avait qu'une faible productivité, des variations de la conductivité (ou du pH) auraient dû être constatées durant la demi-heure de pompage. Or, ce n'est pas le cas, les paramètres physico-chimiques sont stables. Il semble donc que l'on soit en présence d'un aquifère où plusieurs niveaux producteurs contribuent à l'alimentation en eau, avec une productivité supérieure dans la moitié inférieure de l'ouvrage, et plus faible vers le sommet de la colonne d'eau. Si un battement important de la nappe existe au cours de l'année, il se peut que d'autres niveaux soient amenés à être sollicités, par exemple les niveaux actuellement dénoyés. Il se pourrait aussi que les interfaces (zone de variation rapide des paramètres physico-chimiques) mis en évidence ne soient pas toujours à la même cote dans la colonne d'eau, selon la charge hydraulique imposée par les niveaux sus- et sous-jacents.

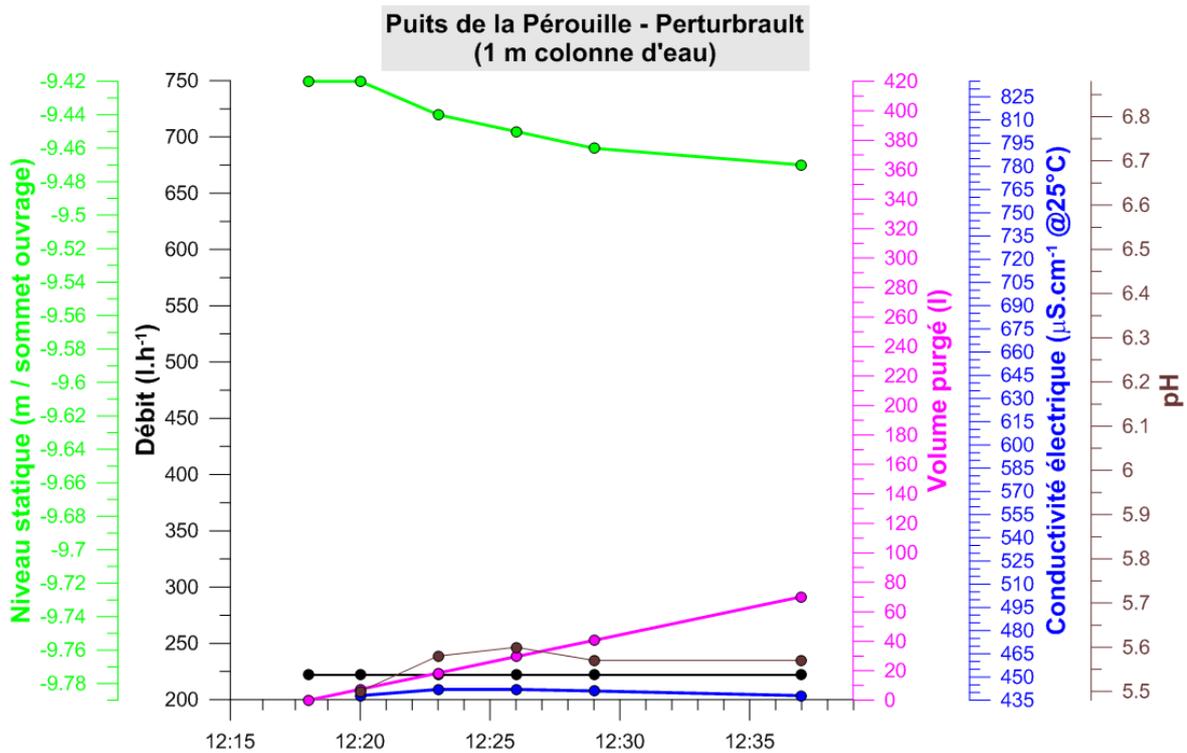


Figure 30 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 1 m de colonne d'eau (10,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

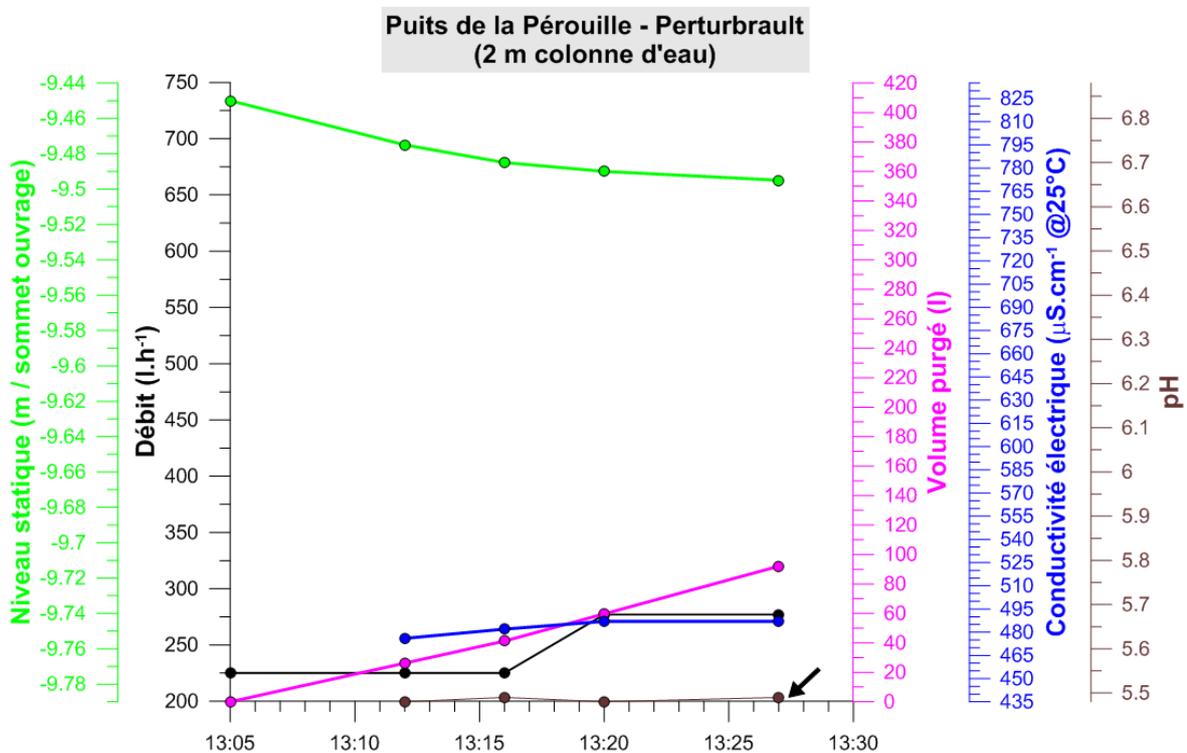


Figure 31 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 2 m de colonne d'eau (11,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

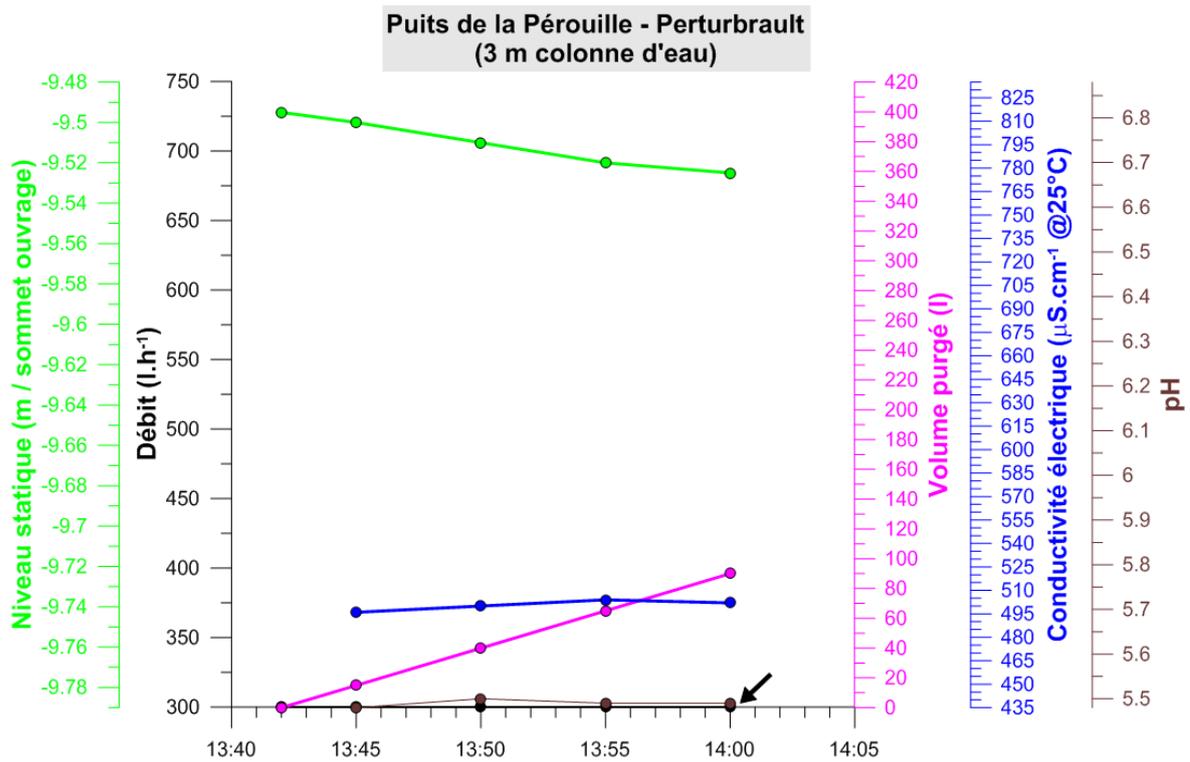


Figure 32 : station de la Pérueille : suivi du pompage sous 3 m de colonne d'eau (12,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

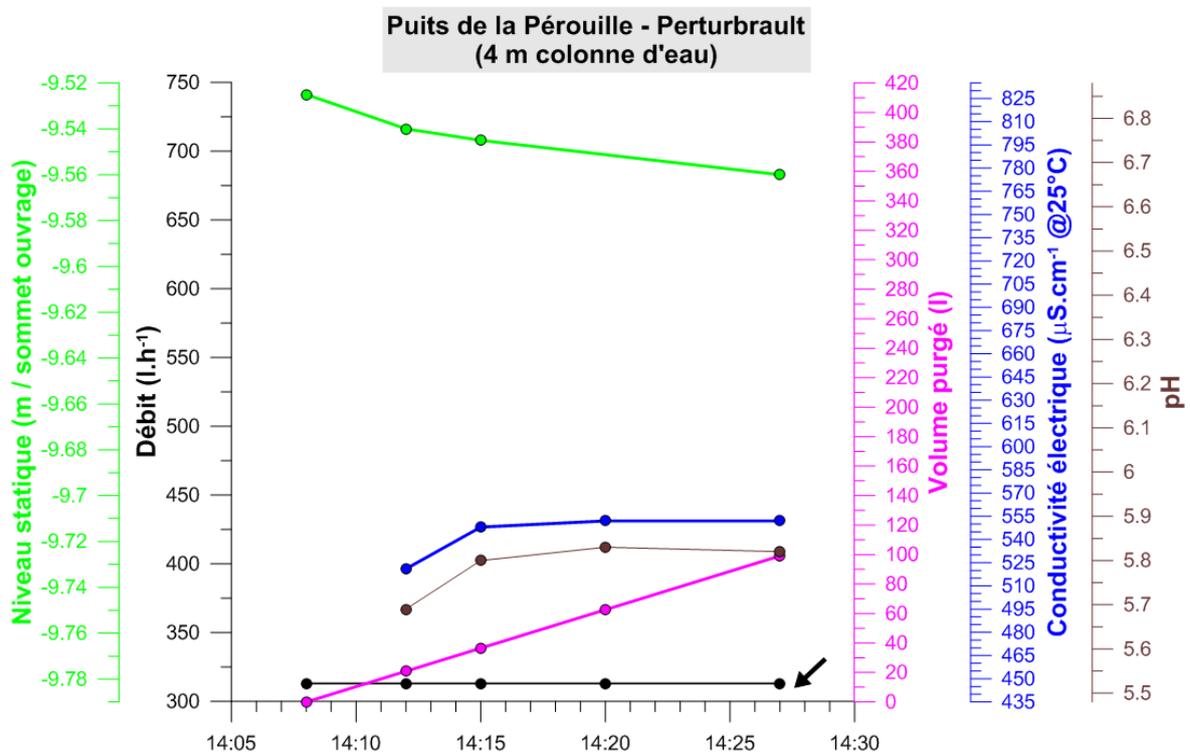


Figure 33 : station de la Pérueille : suivi du pompage sous 4 m de colonne d'eau (13,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

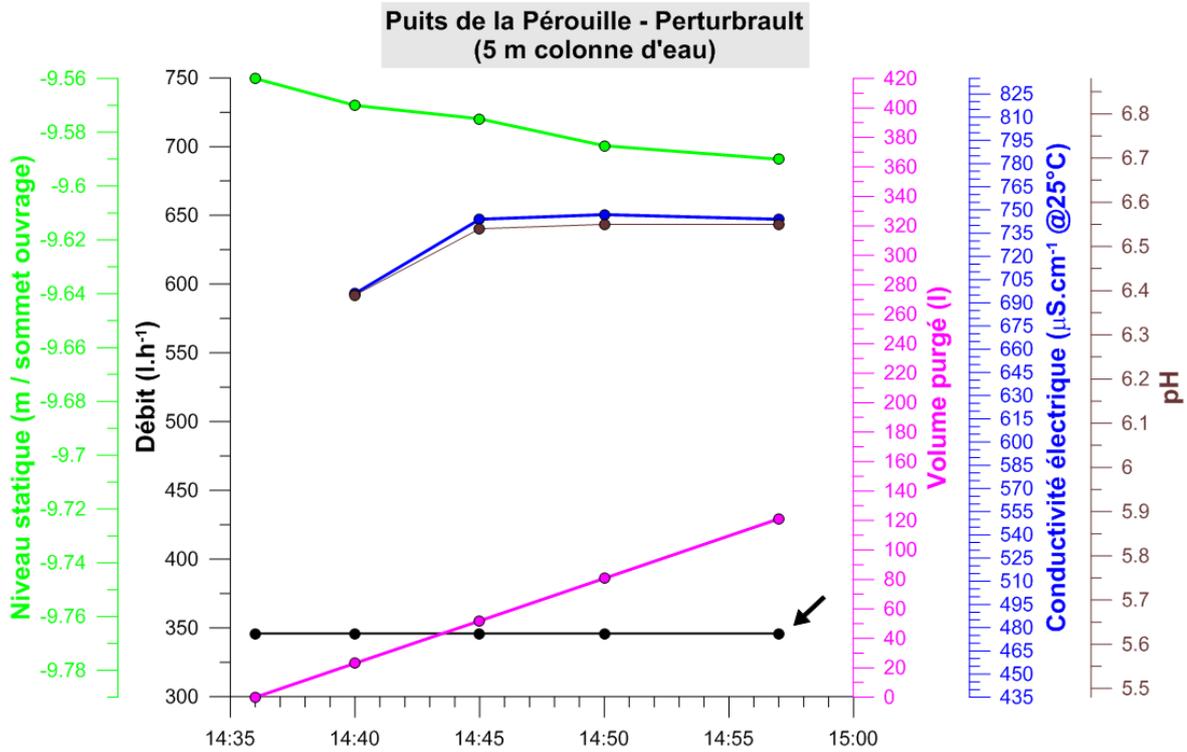


Figure 34 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 5 m de colonne d'eau (14,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

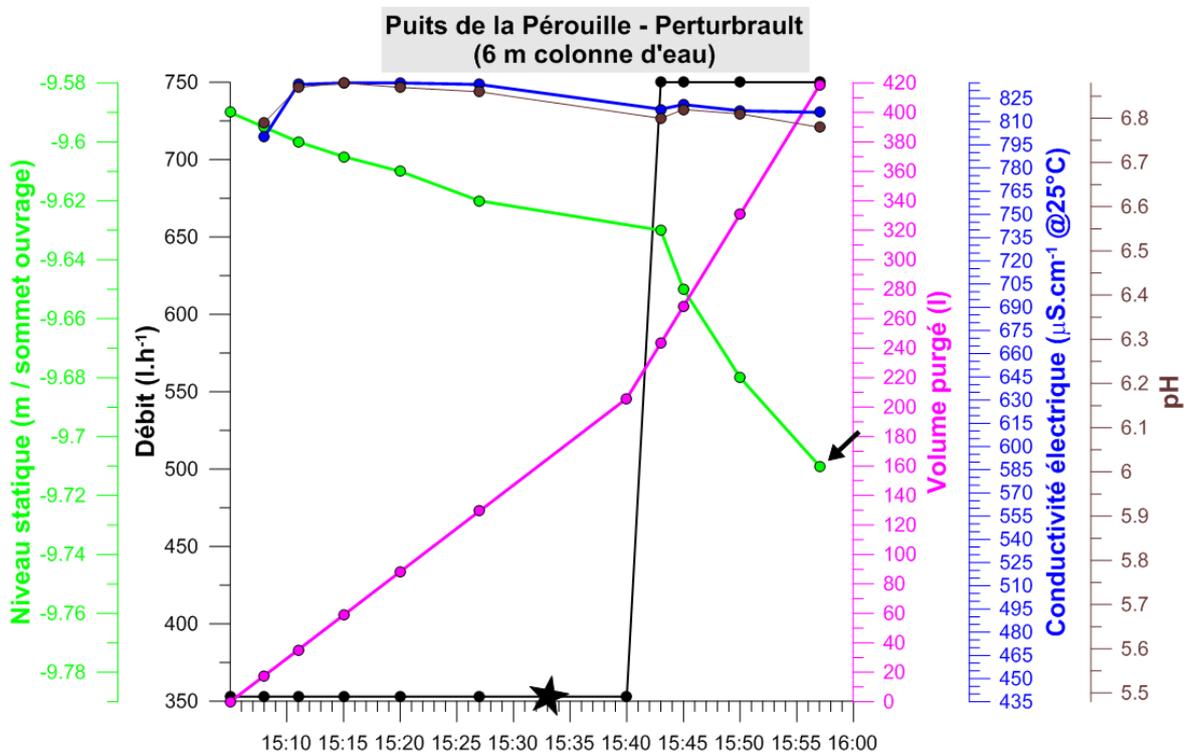


Figure 35 : station de la Pérouille : suivi du pompage sous 6 m de colonne d'eau (15,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché ; l'étoile indique la période durant laquelle une diagraphie a été faite dans le puits (diagraphie de 15:35).

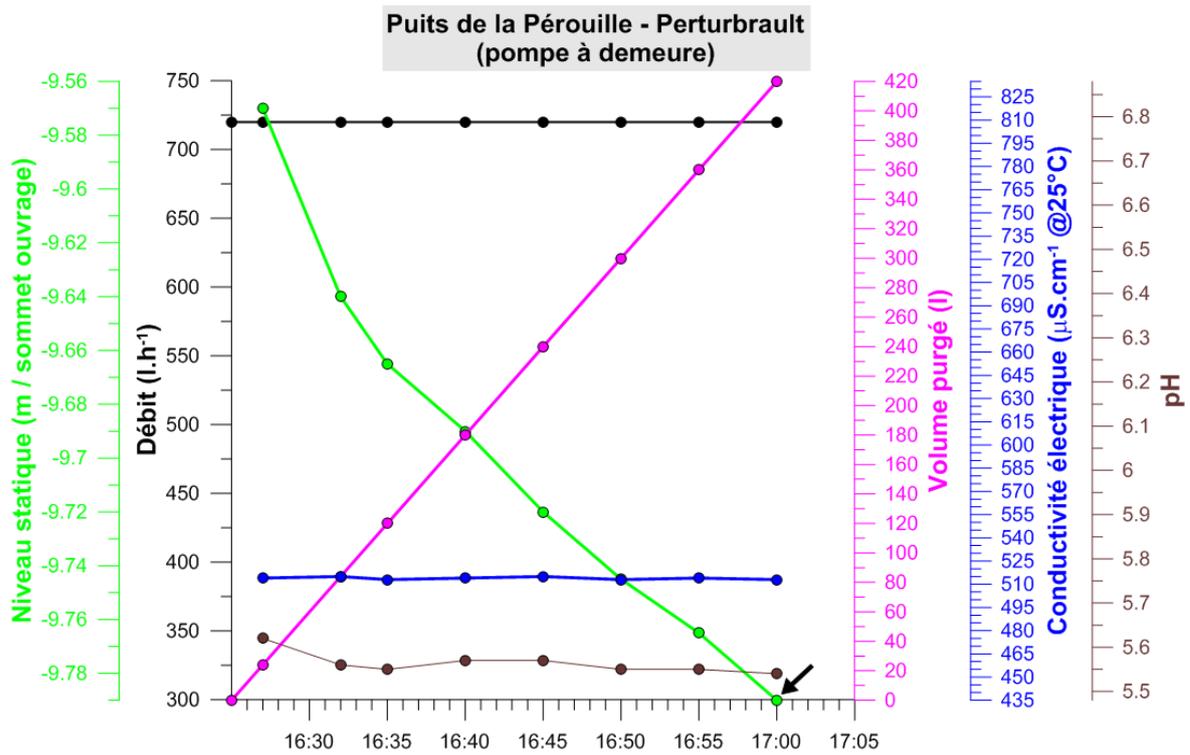


Figure 36 : station de la Pérouille : suivi du pompage avec la pompe à demeure ; la flèche indique le moment où le prélèvement est déclenché.

	Pompage 1 m	Pompage 2 m	Pompage 3 m	Pompage 4 m	Pompage 5 m	Pompage 6 m	Pompe à demeure
Température (°C)	17,3	16,6	16,6	16,5	16,3	15,5	14,4
Conductivité électrique à 25°C (μS.cm ⁻¹)	438	487	502	552	744	816	513
pH	5,57	5,49	5,49	5,82	6,55	6,78	5,54

Tableau 10 : paramètres physico-chimiques mesurés suite aux échantillonnages en pompage à différentes profondeurs (station de la Pérouille).

Méthode	Profondeur/haut margelle (m)	Volume pompé (l)	Equivalent hauteur colonne d'eau (cm)	Rabattement effectif (cm)	Contribution potentielle aquifère
Pompage 1 m	10,3	70	8,9	5	66%
Pompage 2 m	11,3	90	11,7	4,5	62%
Pompage 3 m	12,3	90	11,7	3	74%
Pompage 4 m	13,3	100	12,7	3,5	72%
Pompage 5 m	14,3	120	15,3	3	80%
Pompage 6 m	15,3	130 + 290	16,6 + 37	3 + 9	82% - 76%
Pompe à demeure	13	420	53,5	22	59%

Tableau 11 : caractéristiques des pompages à différentes profondeurs (station de la Pérouille) ; l'équivalent hauteur de colonne d'eau est calculé en considérant le volume d'eau présent dans un cylindre de 1 m de diamètre ; la contribution potentielle de l'aquifère est le rapport entre l'équivalent hauteur de colonne d'eau et le rabattement constaté lors du pompage.

5.3.4. Analyses de laboratoire

Les analyses sur éléments traces sont rapportées dans la Figure 37. Comme déjà mentionné pour les stations précédentes, les données pour Ag et Pb ne sont pas à considérer car inférieures à la limite de quantification.

Si l'on excepte le lithium¹⁶, toutes les autres espèces admettent une variabilité significative à forte suivant l'endroit où le prélèvement est réalisé. Cette variabilité n'est pas forcément en relation avec la conductivité électrique du niveau : ainsi, les concentrations en Be sont plus élevées dans les 4 premiers mètres de la colonne d'eau que dans les 2 derniers mètres (environ 3 fois moins). Il en est de même pour Al et Ni (respectivement environ 2 fois moins et 1,5 fois moins en base de colonne d'eau). D'autres éléments ont un comportement inverse, comme B, Mn, As, Sr Cd et Ba, plus abondants dans les niveaux inférieurs. Ceci confirme que la colonne d'eau n'est pas homogène et que chaque niveau peut être caractérisé par un chimisme qui lui est propre. La position vers 4 m de profondeur de la pompe en place est également confirmée par ces analyses.

Par ailleurs, pour quelques éléments, des différences existent entre les mesures faites à plusieurs niveaux dans la colonne d'eau et les mesures issues du prélèvement avec la pompe à demeure. Ainsi, la concentration en Cu est 5 fois plus importante avec la pompe à demeure, tout comme, en moindre proportion, la concentration en Zn. Ceci pourrait indiquer la présence d'un alliage à base de cuivre dans le circuit de pompage. *A contrario*, le prélèvement avec la pompe à demeure

¹⁶ Le pourcentage de variation entre concentration minimale et concentration maximale est de 16%.

est moins riche en Cr et à un degré moindre en Co, ce qui pourrait suggérer une contribution liée à la pompe MP1 pour ces deux éléments¹⁷.



Figure 37 : station de la Pérouille : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

5.3.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire

Les investigations ont permis de déterminer que la pompe à demeure, utilisée pour le suivi réglementaire, est implantée vers 13 m de profondeur. Ces investigations ont aussi permis de mettre en évidence une stratification de la colonne d'eau, qui apparaît peu modifiée par la réalisation de pompages à plusieurs profondeurs. D'autre part, l'utilisation de la pompe à demeure pendant une demi-heure n'a pas permis de mettre en évidence une forte variabilité des paramètres physico-chimiques, ce qui peut indiquer que l'horizon au niveau duquel la pompe est déployée, a une bonne productivité. On n'attend donc pas de fortes incertitudes sur le chimisme de l'eau lors du prélèvement en utilisant cette pompe. Par contre, les investigations réalisées pour ce rapport n'ont été faites qu'une seule fois, en fin d'été. Elles ne présagent absolument pas de la structuration de la colonne d'eau et de son évolution durant l'année. Par exemple, une variation du niveau statique pourrait impliquer une variation de la profondeur des interfaces de conductivité électrique. A 13 m de profondeur, on peut soit envisager que la conductivité augmente (remontée

¹⁷ Ceci n'est cependant pas confirmé par les acquisitions faites le lendemain, avec des concentrations mesurées à l'exhaure de la pompe MP1 plus de 2 fois inférieures à celles mesurées à La Pérouille avec la pompe à demeure.

des niveaux profonds à la faveur d'une mise en charge hydraulique par exemple), soit qu'elle diminue (plongée de niveaux sus-jacents moins conducteurs à la faveur d'une percolation d'eaux de surface à partir d'horizons aquifères moins profonds voire percolation plus directe via la zone non saturée). Si de telles variations existent au cours de l'année, alors elles pourraient avoir un impact sur le suivi réglementaire, la stratification de la colonne d'eau évoluant au cours de l'année. De même, une modification de la profondeur d'installation de la pompe à demeure aurait également un impact sur les horizons pompés, ce qui, en retour, aurait un impact sur les concentrations en éléments dissous, celles-ci étant différentes entre les deux-tiers supérieurs et le tiers inférieur de la colonne d'eau.

L'ouvrage de la Pérouille étant un puits en pierres maçonnées, toute ou partie de l'alimentation en eau peut se faire via le fond de l'ouvrage (bien que l'existence d'alimentations latérales soit fortement suggérée par les investigations). La chimie observée au fond du puits est alors celle qui est la plus représentative de la chimie de la masse d'eau. Le pompage pratiqué lors des essais n'a pas été suffisamment long pour renouveler trois fois le volume du puits – il faudrait déjà 6 heures à 750 L.h⁻¹ pour renouveler une fois la colonne d'eau. La pompe à demeure ayant un débit un peu inférieur, il faudrait également presque 19 heures de pompage en continu pour atteindre ces 3 volumes. Or, la dernière diagraphie suggère que l'horizon du fond, le plus conducteur, remonte de quelques dizaines de centimètres (environ +40 cm en 100 minutes) lorsque le pompage vient à être opéré à débit assez important (>700 L.h⁻¹). En extrapolant ce fonctionnement, il faudrait 400 minutes supplémentaires pour que cet horizon de plus forte conductivité atteigne la pompe à demeure. Ce qui amènerait à pomper durant près de 8h30 un volume de 6,25 m³ (environ 1,4 fois le volume de la colonne d'eau) pour espérer drainer à l'exhaure de la pompe l'eau produite par le fond de l'ouvrage – cette hypothèse supposant par ailleurs que l'on ne draine que cet horizon. Une telle durée paraît peu compatible avec la réalisation de tournées dans le cadre d'un marché. Une autre approche serait de ne pas utiliser la pompe à demeure, et de descendre, près du fond, une autre pompe, ce qui permettrait de drainer l'eau du fond tout en restant dans des durées acceptables (de l'ordre de 1h30 à 2h00 à 750 L.h⁻¹).

La station de la Pérouille présente une forte stratification verticale notamment concernant la conductivité. Les critères de purge peuvent difficilement être respectés. Il est donc probable que la stabilisation de paramètres physico chimique soit le critère utilisé pour déclencher les prélèvements. Dans le cas présent, le respect de ce critère n'est sans doute pas suffisant pour assurer que l'horizon profond, qui semble le plus représentatif, soit échantillonné. Cela renvoie une fois de plus à la recommandation de positionner les pompes au plus près du fond de l'ouvrage sur ce type de station, afin de maximiser l'échantillonnage d'une eau représentative. Cette situation est malheureusement difficilement détectable sans réaliser une diagraphie et des essais de pompage.

5.4. STATION DE VATAN

5.4.1. Mode opératoire

La station a été visitée le 29/08/18 entre 09:30 et 14:30.

Le personnel technique du délégataire de gestion de l'AEP de Vatan nous a permis de lever une ambiguïté qui existait quant à la localisation exacte du point de prélèvement (voir annexe). Les investigations ont donc été réalisées directement à la source, d'abord au seau puis au bailer (voir les commentaires sur ces 2 modes d'échantillonnage, non recommandés par AQUAREF, dans

les sections précédentes), et enfin en introduisant une pompe MP1 dans le captage (Figure 38). Un prélèvement a également été fait sur un piquage récemment installé sur la canalisation d'amené de l'eau du captage vers la station de pompage.

Une documentation abondante existe en BSS sur cette source. On sait ainsi que le cuvelage béton visible à l'extérieur (diamètre 2 m) s'étend jusqu'à 9 m de profondeur, et qu'à partir de 8,5 m jusque vers 11 m de profondeur (10,6 m rapportés dans la fiche prestataire) des buses perforées de plus faible diamètre (1,2 m) sont implantées, au sein d'un massif filtrant. L'ouvrage capte les calcaires du Séquanien. Il est rapporté comme étant artésien lors de son creusement (débit d'écoulement naturel de $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), ce qui explique la présence d'un trop plein dans l'ouvrage, qui limite la hauteur maximum d'eau. Celle-ci a été estimée comme étant entre 2,4 et 2,5 m sous le sommet du cerclage en métal retenant le capot de fermeture. Ce niveau maximum est souligné par un passage net entre le béton grisé et un dépôt ferrugineux uniforme (Figure 38).

Il faut également signaler que les premières acquisitions, notamment les 2 diagraphies initiales et les prélèvements au seau et au bailer, ont été réalisées alors que l'ouvrage était en pompage pour alimenter le château d'eau (2 conduites sont visibles dans l'ouvrage ; Figure 38). Le pompage était actif à l'ouverture de l'ouvrage à 09:30. La baisse du niveau statique est très franche lors des phases de pompage comme en témoigne la Figure 39. Le pompage ne s'est arrêté qu'à 11:17, peu de temps après que la pompe MP1 ait été descendue dans l'ouvrage. Les pompes à demeure se sont brièvement remises en marche entre 13:45 et 13:59, alors qu'une troisième diagraphie débutait. Une quatrième diagraphie a été acquise une fois le niveau statique revenu à une cote proche de celle mesurée avant cette brève remise en route des pompes.

Compte-tenu des effets importants sur le niveau liés au pompage destiné au remplissage du château d'eau, et de la remontée très rapide du niveau dès que ce pompage, à très haut débit, cesse (Figure 39), il est inutile d'espérer voir une quelconque influence sur le niveau d'eau lorsqu'un pompage est entrepris avec la pompe MP1.

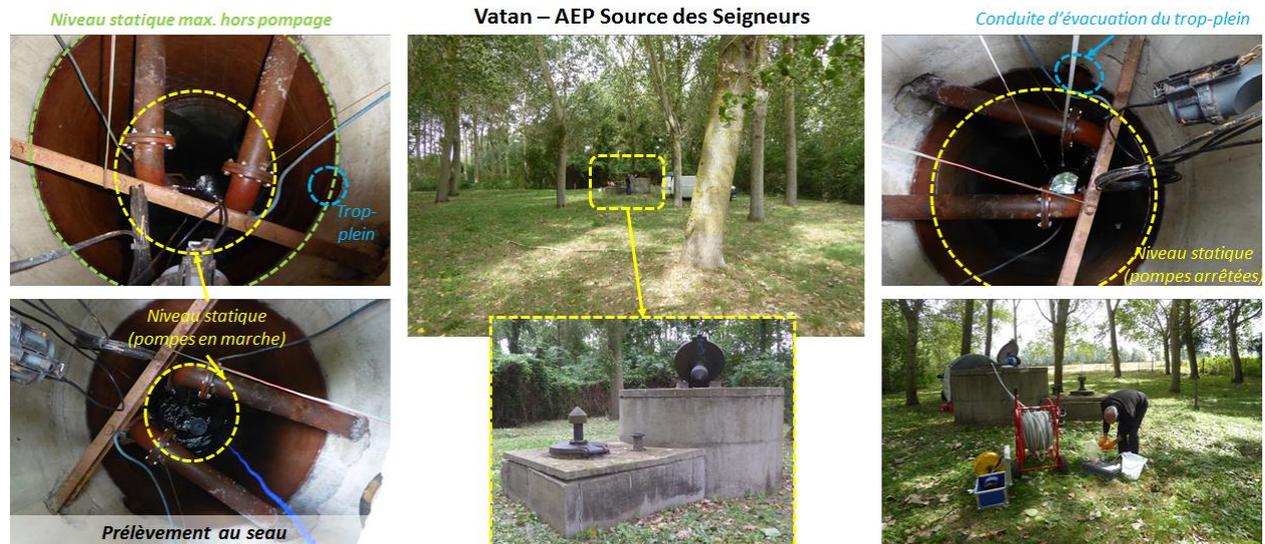


Figure 38 : principales caractéristiques techniques de la Source des Seigneurs à la station AEP de Vatan et aperçu des investigations réalisées sur site.

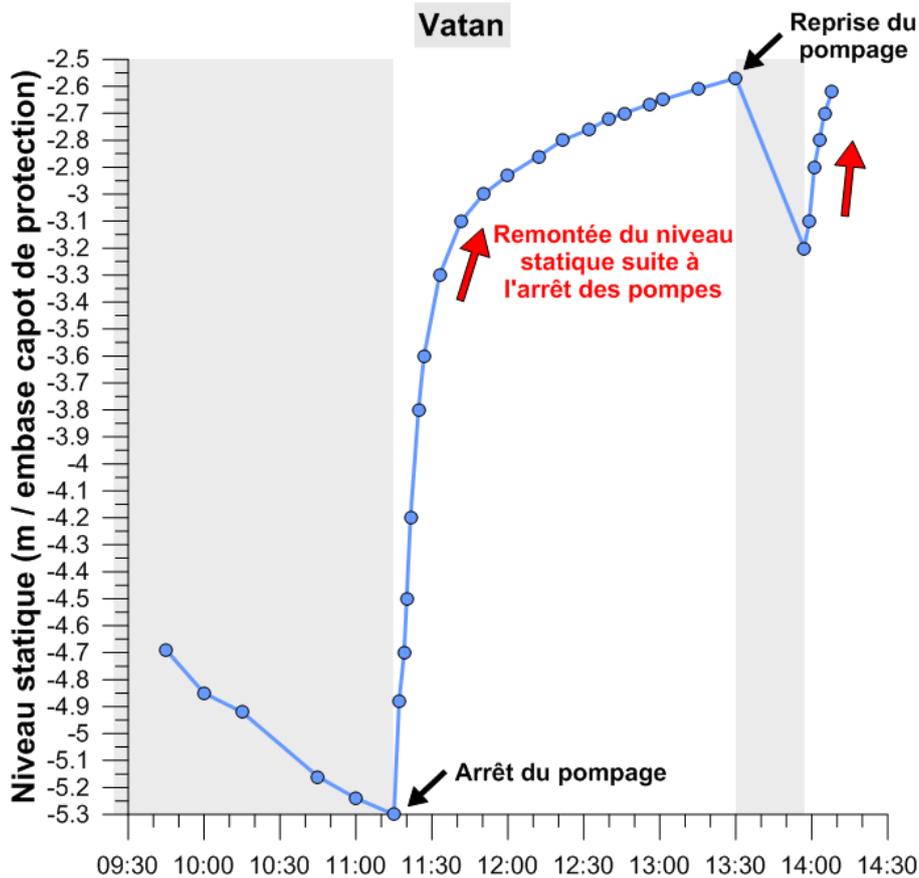


Figure 39 : suivi du niveau piézométrique de la Source des Seigneurs lors des phases de pompage pour remplissage du château d'eau (zones grisées) et lors des phases d'arrêt de pompage.

5.4.2. Diagraphie

Les deux diagraphies initiales sont présentées en Figure 40. En raison du pompage, ces diagraphies peuvent présenter un biais quant à la position verticale d'éventuelles hétérogénéités¹⁸. Ce biais est à écarter pour la dernière diagraphie, réalisée hors pompage, et présentée en Figure 41.

Le profil de **température**, en sommet de colonne d'eau, donc dans le cuvelage béton, présente, comme pour les stations précédentes, une anomalie thermique sur quelques dizaines de centimètres. Cette anomalie existe quel que soit le niveau d'eau dans l'ouvrage, et montre bien que cet horizon n'est pas renouvelé lors du pompage. Lors du pompage, la température s'équilibre autour de 12,3°C avant que l'on ne pénètre dans la crépine, ce qui pourrait indiquer que le pompage exerce une influence dès 8 m de profondeur, ou, plus probablement, que l'eau présente à partir de 8 m de profondeur est une eau fraîchement renouvelée, le pompage pouvant s'activer aléatoirement. L'alimentation se faisant par la crépine, tout arrêt du pompage provoque

¹⁸ La baisse du niveau statique étant assez rapide, l'indication de profondeur fournie par le capteur de pression de la sonde peut être faussée (approfondissement réel plus grand que l'approfondissement enregistré par le capteur).

une remontée brutale du niveau d'eau, donc une alimentation par le fond, et l'eau qui remonte a les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la crépine. Ce phénomène de remontée de l'eau de type piston à l'issue du pompage est bien illustrée par les données de température de la Figure 40, invariantes de 5 m de profondeur à la base de l'ouvrage.

Les données de **conductivité électrique** doivent se considérer au regard de cette forte productivité dans les horizons calcaires captés en base d'ouvrage. Ce paramètre varie tout au plus de $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ dans la colonne d'eau, ce qui est une variation insignifiante inférieure à 1%. Le niveau aquifère capté, de grande productivité, apparaît donc chimiquement homogène. La seule déviation qui peut être remarquée correspond à l'arrivée au fond de l'ouvrage, et à l'interaction avec les fines qui y sont déposées.

Le profil de **pH** ne montre également que de faibles variations. Les 1ères diagraphies montrent une valeur un peu plus basse en sommet de colonne d'eau, et la remontée de l'eau à l'issue du pompage permet de résorber cet effet sur une grande partie de la colonne. Seule une légère inflexion vers 9,5 m de profondeur semble être pérenne, mais son amplitude est très faible (<0,1 unité au maximum).

Le **potentiel redox** est assez peu variable dans la colonne d'eau et n'apporte guère d'information.

Le profil de saturation en **oxygène dissous** n'est pas plus informatif, il souligne juste que l'eau produite est assez pauvre en oxygène, conclusion déjà mentionnée dans le rapport 71-SGN-347 -BDP produit à l'issue de la réalisation de ce captage.

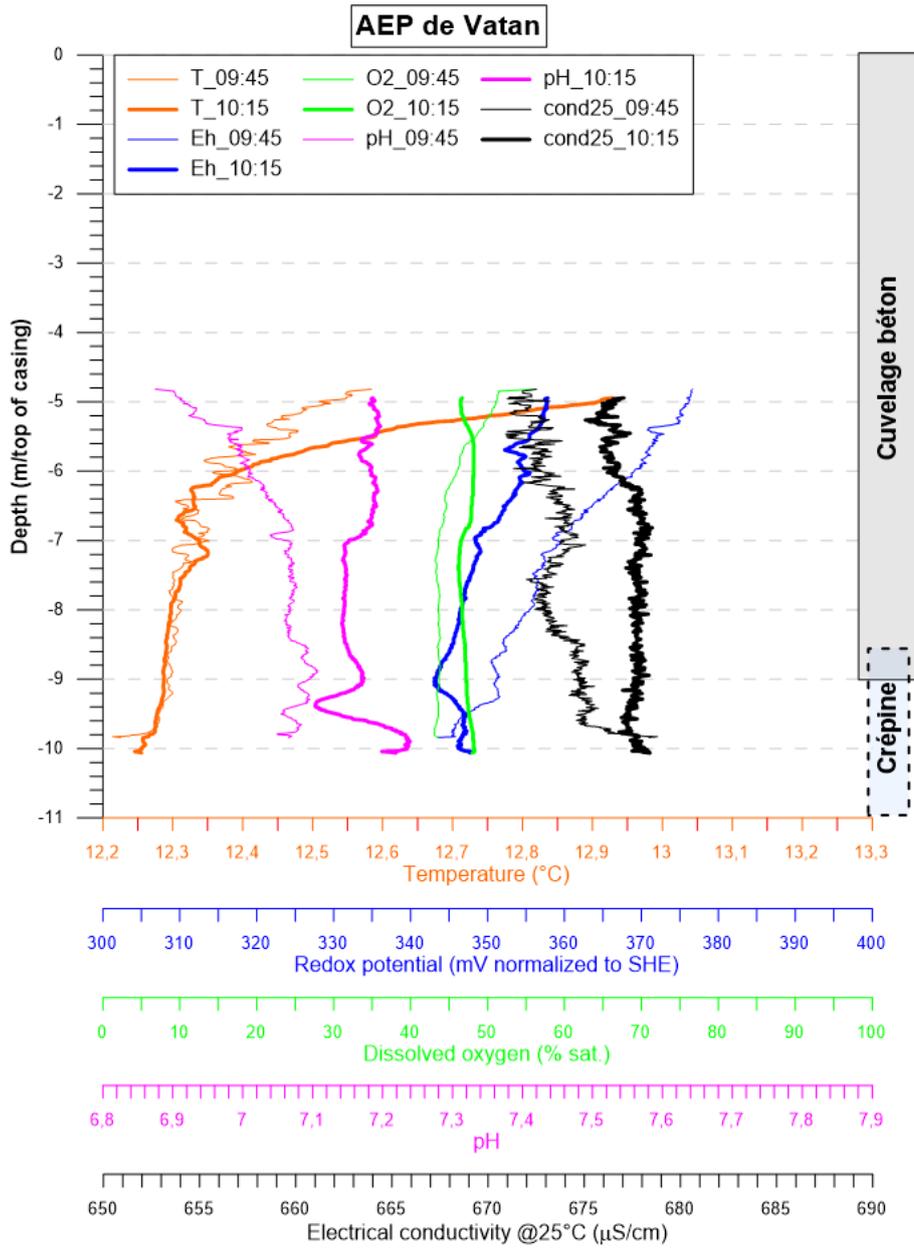


Figure 40 : station de Vatan : diagraphies initiales (réalisées alors que le pompage AEP était actif).

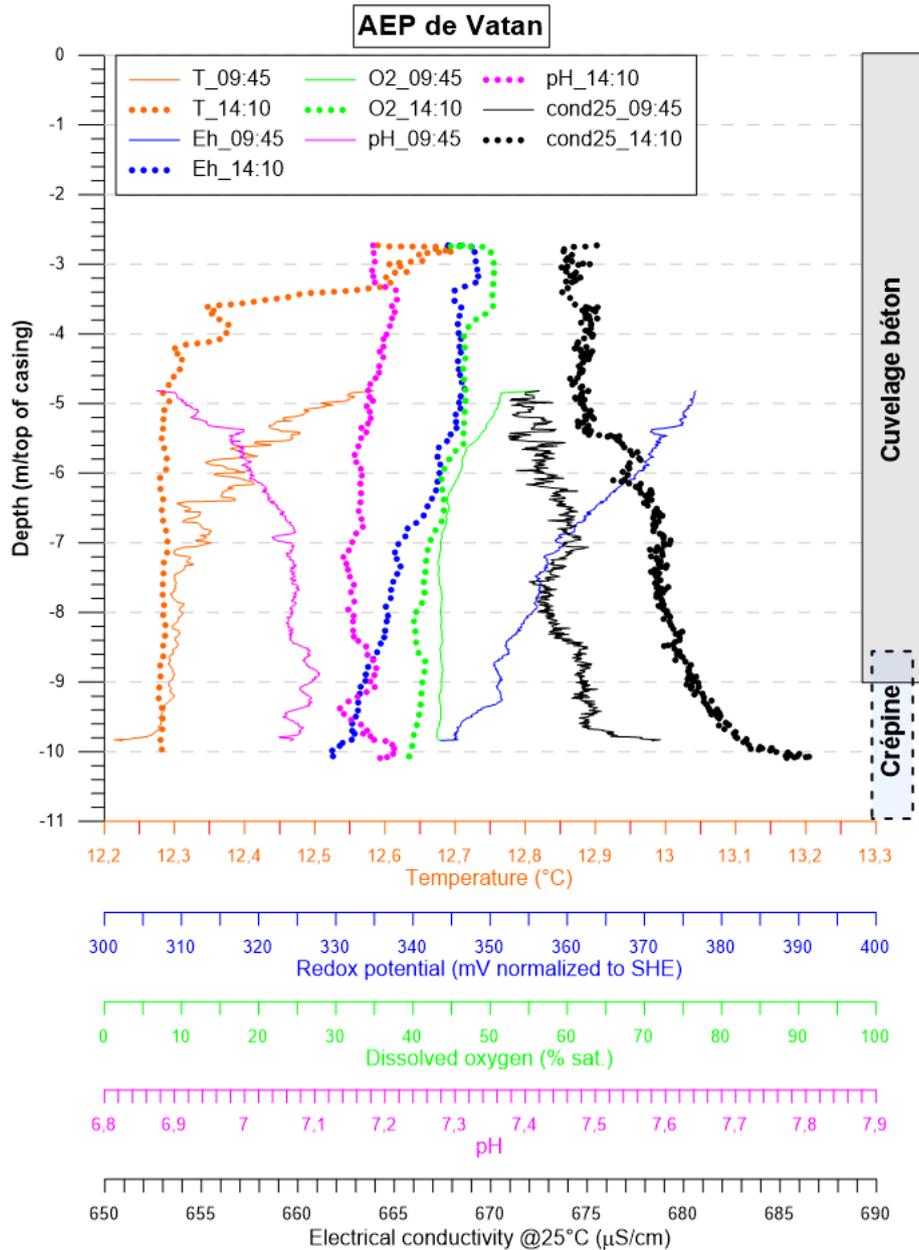


Figure 41 : station de Vatan : diagraphie finale (hors pompage AEP).

5.4.3. Prélèvement

Les prélèvements réalisés au seau et au bailer ont été conditionnés pour analyse ultérieure mais n'ont pas fait l'objet de mesures physico-chimiques sur site. Ils ont de toute façon uniquement exploré la tranche supérieure de la colonne d'eau, dont certains paramètres (Figure 40) sont différents de ceux de l'eau fraîchement renouvelée (voir §5.4.2).

Trois prélèvements ont été opérés en utilisant la pompe MP1, après que le pompage pour alimentation du château d'eau ait cessé. Le 1^{er} pompage a été opéré 30 cm au-dessus du fond de l'ouvrage (donc autour de 10 m de profondeur, le référentiel étant le sommet de la partie fixe de l'embase du capot de protection), le 2nd pompage a été opéré 3 m au-dessus (donc autour de

7 m de profondeur), et le 3^{ème} pompage a été opéré en proche surface (autour de 4 m de profondeur). Les prélèvements ont été opérés à 3 niveaux différents, dont 2 en dehors de la crépine, afin d'assurer un bon contrôle sur la chimie de la colonne d'eau dans le cas où des informations auraient été omises à la lecture des données de diagraphie sur site. Comme précédemment indiqué (voir §5.4.1), les évolutions du niveau statique ne sont pas à relier à une influence de ces pompages avec pompe MP1. Les données acquises durant le pompage sont reportées en Figure 42 tandis que les paramètres physico-chimiques finaux mesurés au moment de l'échantillonnage sont consignés dans le Tableau 12.

Quelle que soit la profondeur considérée, les volumes purgés avec la pompe MP1 sont très faibles comparés aux volumes d'eau présents dans l'ouvrage, qui sont proches de 314 litres pour 10 cm de hauteur dans le cuvelage béton et encore de 113 litres pour 10 cm de hauteur pour ce qui concerne la crépine. Le pompage dans la crépine a donc tout au plus représenté un volume équivalent à 24 cm de hauteur de colonne d'eau, et ceux réalisés dans le cuvelage béton entre 5,7 cm (profondeur : 7 m) et 5,1 cm (profondeur : 4 m) de hauteur de colonne d'eau. L'accord¹⁹ entre les mesures rapportées dans le Tableau 12 et les données extraites de la diagraphie finale (Figure 41 et Tableau 12) est excellent, ce qui confirme le caractère d'influence très ponctuelle des pompages réalisés à la pompe MP1.

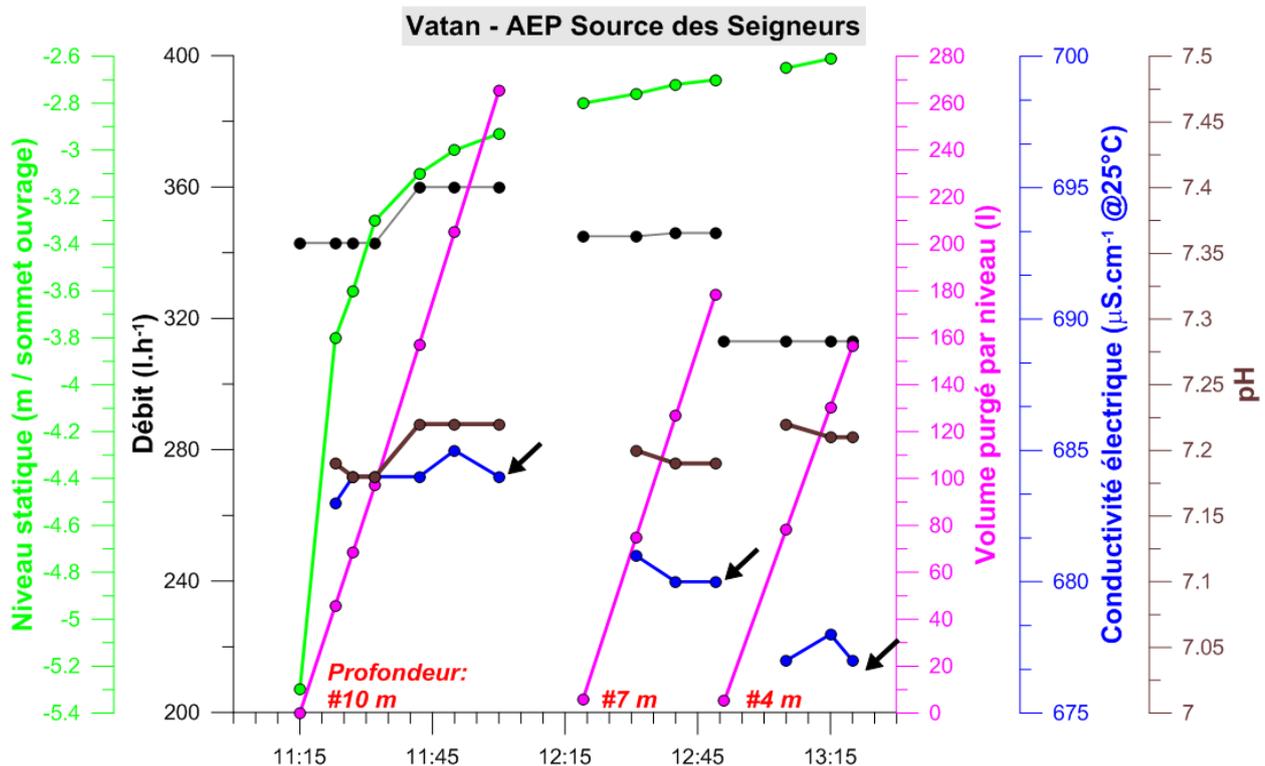


Figure 42 : station de Vatan : suivi du pompage avec pompe MP1 ; vue synthétique ; les flèches indiquent les moments auxquels les prélèvements sont déclenchés.

¹⁹ Données de température non considérées (influence du forçage atmosphérique sur le tuyau).

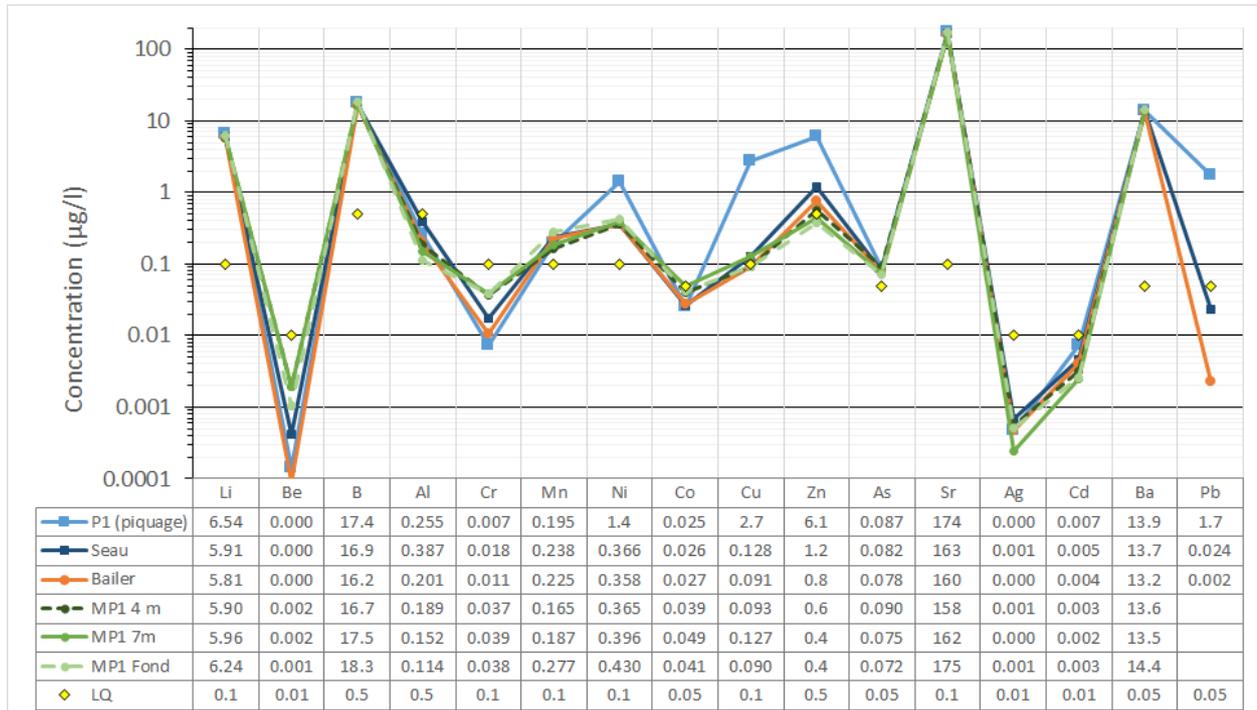
	Pompage à 10 m	Diagraphie à 10 m	Pompage à 7 m	Diagraphie à 7 m	Pompage à 4 m	Diagraphie à 4 m
Température (°C)	14,1	12,28	14,1	12,28	15	12,36
Conductivité électrique à 25°C ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	684	684	680	679	677	675
pH	7,22	7,21	7,19	7,16	7,21	7,2

Tableau 12 : paramètres physico-chimiques mesurés suite à l'échantillonnage en pompage avec pompe MP1 (station de Vatan).

5.4.4. Analyses de laboratoire

Les différentes analyses chimiques sont rapportées en Figure 43. Les analyses pour les éléments Be, Cr, Co, Ag, Cd et Pb (sauf pour le prélèvement au point de piquage) ne sont pas à considérer car inférieures à la limite de quantification.

Comme les données de diagraphie le suggéraient, il ne semble pas exister de différence importante dans la composition chimique de l'eau selon la méthode de prélèvement employé – d'autant que le fort battement de la nappe engendré par les pompages pour alimenter le château d'eau permettent de bien renouveler l'eau dans le puits. Une exception est cependant à signaler et concerne le prélèvement fait au point de piquage récemment installée (voir annexe). La présence de laiton au niveau de ce piquage semble provoquer une contamination en Cu et Zn (les deux composants essentiels du laiton), ainsi qu'en Pb et Ni, deux adjuvants couramment employés pour augmenter l'usinabilité et les propriétés mécaniques de l'alliage. Cette contamination peut être la conséquence d'un temps de purge relativement bref après l'installation du piquage, mais procéder au suivi via ce piquage nécessitera, au minimum, de réaliser des contrôles d'innocuité des matériaux, voire, ce qui serait sans doute préférable, de remplacer le laiton par un autre matériau plus inerte (inox par exemple).



V

Figure 43 : station de Vatan : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Cr, Co, Ag, Cd et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

5.4.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire

La fiche station de l'agence de l'eau indique que les prélèvements peuvent être réalisés au seau ou au bailier (on rappelle que ce mode de prélèvement n'est pas recommandé). Ces modes d'échantillonnage ne sont pas recommandés dans le guide technique AQUAREF car de façon générale ils ne permettent pas d'échantillonner l'eau au droit des horizons producteurs. Toutefois, dans le cas présent, la station étant très régulièrement sollicitée par pompage à haut débit, l'eau qui est présente dans le cuvelage béton présente une assez faible variation de ses paramètres physico-chimiques en référence à ceux qui sont mesurés vers le fond de l'ouvrage (la température sera le paramètre le plus affecté), du moins lorsque les mesures et prélèvements sont réalisés peu de temps après la fin d'une phase de pompage via la pompe en place. Les échantillonnages par pompage ne semblent pas poser de difficultés compte tenu de l'homogénéité de la colonne d'eau. Par défaut la recommandation reste dans ce type d'ouvrage de placer la pompe dans le fond de l'ouvrage. La mise en place (apparemment en cours par le gestionnaire) d'un point de piquage sur la canalisation reliant l'ouvrage à la station de pompage pourrait faciliter les échantillonnages. Il faudra toutefois s'assurer de l'innocuité chimique des matériaux employés pour réaliser ce piquage (connecteur relié à la bride sur la canalisation principale et robinet permettant de prélever). A l'heure actuelle, le robinet en laiton semble responsable de la présence de certains éléments traces métalliques lorsque le prélèvement est effectué à ce piquage.

5.5. STATION DE SUEVRES

5.5.1. Mode opératoire

La station a été visitée le 30/08/2018 entre 08:30 et 14:30.

Des discussions préalables à la campagne sur site ont permis de déterminer qu'il existait une incohérence entre la dénomination de l'ouvrage et sa localisation dans les fiches de suivi réglementaire. Le suivi a donc été fait sur le puits de la Fosse Thibaudeau et non sur le puits de la Boire (voir annexe).

Le puits de la Fosse Thibaudeau (Figure 44) présente un avant trou protégé par un tubage métallique de diamètre interne 55 cm, sur une hauteur d'environ 2 m. Quelques imperfections sont visibles dans ce casing métallique (traces de coupures, ce qui pourrait permettre des infiltrations dans l'espace annulaire). En surface, celui-ci est implanté au milieu d'une dalle cimentée. Le forage en lui-même démarre un peu au-dessus cette cote, il est tubé en PVC. Le sommet du tube PVC est cassé en certains endroits, ce qui diminue sa hauteur par rapport à la partie remblayée de l'espace annulaire. Ce tube est en fait un tube de crépine, laquelle est donc en partie dénoyée. Quelques déchets sont présents dans l'ouvrage²⁰. Le fond de l'ouvrage a été déterminé autour de 7,6 m de profondeur, à l'aide de la sonde piézométrique.

Comme pour les autres ouvrages, les investigations ont d'abord consisté en la réalisation d'une diagraphie initiale, puis la mise en œuvre de pompages à plusieurs profondeurs : à 4,3 m de profondeur soit sous 80 cm d'eau ; à 5,5 m de profondeur soit sous 2 m d'eau ; à 6,8 m de profondeur soit sous 3,3 m d'eau et à 7,3 m de profondeur soit sous 3,8 m d'eau. Ces séquences de pompages sont complétées régulièrement par des descentes de la sonde de diagraphie²¹, afin d'évaluer l'influence du pompage sur la colonne d'eau. La fiche station indique un échantillonnage en pompage, à l'aide d'une pompe descendue dans la colonne d'eau^{22, 23}.

²⁰ Boite à vers utilisée pour la pêche.

²¹ Au total 10 passages de sonde ont été réalisés.

²² Pompe de type « Super Twister », qui a des capacités de pompage moindres qu'une pompe MP1, dès lors que le niveau statique n'est pas très proche du niveau du sol.

²³ Il n'est guère possible de déterminer quel est le volume purgé qui correspond au temps indiqué dans la fiche de suivi réglementaire. Une durée de 1h45 est rapportée pour purger l'ouvrage, mais il y a une incertitude sur le diamètre qui est considéré pour calculer le volume de l'ouvrage : la fiche ne rapporte qu'un diamètre de 600 mm, qui correspond à celui du tube métallique externe (300 mm pour la crépine PVC). Toutefois, si l'on considère la capacité de purge d'une pompe Super Twister placée à 7,5 m de profondeur avec 4 m de colonne d'eau (autour de 700 à 750 L.h⁻¹), une durée de 1h45 peut permettre de pomper entre 1,2 et 1,3 m³, ce qui représente environ 4 fois le volume d'eau présent dans une colonne de 4 m de haut et de 300 mm de diamètre (0,285 m³).

Puits de la fosse Thibaudeau (Suèvres)



Figure 44 : principales caractéristiques techniques du puits de la Fosse Thibaudeau (Suèvres) et aperçu des investigations réalisées sur site.

5.5.2. Diagraphie

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, de nombreuses diagraphies ont été faites, et, pour leur grande majorité, il faut les interpréter en tenant compte des paramètres de pompage qui sont détaillés au paragraphe 5.5.3.

Seule la première diagraphie est réalisée dans l'ouvrage avant toute action de pompage (Figure 45).

Le profil de **température** montre un fort gradient négatif entre le sommet et la base de la colonne d'eau (perte de 2°C entre 4 et 6 m de profondeur). La température en surface est influencée par les conditions atmosphériques externes avec un réchauffement lié à la présence d'un tubage et d'un capot métallique soumis des heures durant à l'ensoleillement. L'atténuation de cette perturbation thermique n'est pas totale, l'épaisseur de la colonne d'eau ne le permettant sans doute pas. On constate toutefois que la diminution de température se fait plus lentement à partir de 6 m de profondeur.

Le profil de **conductivité électrique** permet d'individualiser 2 compartiments séparés par une zone de gradient positif entre 4,5 et 5,5 m de profondeur. Il est donc possible que l'alimentation de l'ouvrage se fasse à au moins 2 niveaux, le niveau supérieur étant moins conducteur (660-670 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que le niveau inférieur (710-720 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Les mesures de **pH** semblent également être différentes entre le sommet de la colonne d'eau et sa base, la valeur passant de 6,7 à 7.

Cette stratification verticale ne se retrouve guère dans les données de **potentiel redox**.

A l'inverse, les données d'**oxygène dissous** sont également marquées par une inflexion nette autour de 5 m de profondeur. L'horizon supérieur est plus riche en oxygène (70-80%) que le niveau inférieur, qui est fortement appauvri en oxygène (20-30%).

Cette structuration de la colonne d'eau en écoulement naturel²⁴ a incité, comme pour l'ouvrage de La Pérouille, à réaliser pour cette étude des pompages à différentes profondeurs et à différents débits, afin de déterminer comment la colonne d'eau réagit lorsqu'elle est sollicitée. Aucune précision n'étant donnée dans la fiche station quant à la profondeur de déploiement de la pompe utilisée dans le cadre du suivi réglementaire, les profondeurs de déploiement de la pompe MP1 ont donc été choisies sur la base des données issues de la diagraphie de reconnaissance (Figure 45). Ces investigations, détaillées dans les paragraphes suivants, sont donc relatives à des positionnements de la pompe à 4,30 m, 5,50 m, 6,80 m et 7,30 m de profondeur.

²⁴ Pour rappel le tubage est crépiné toute hauteur.

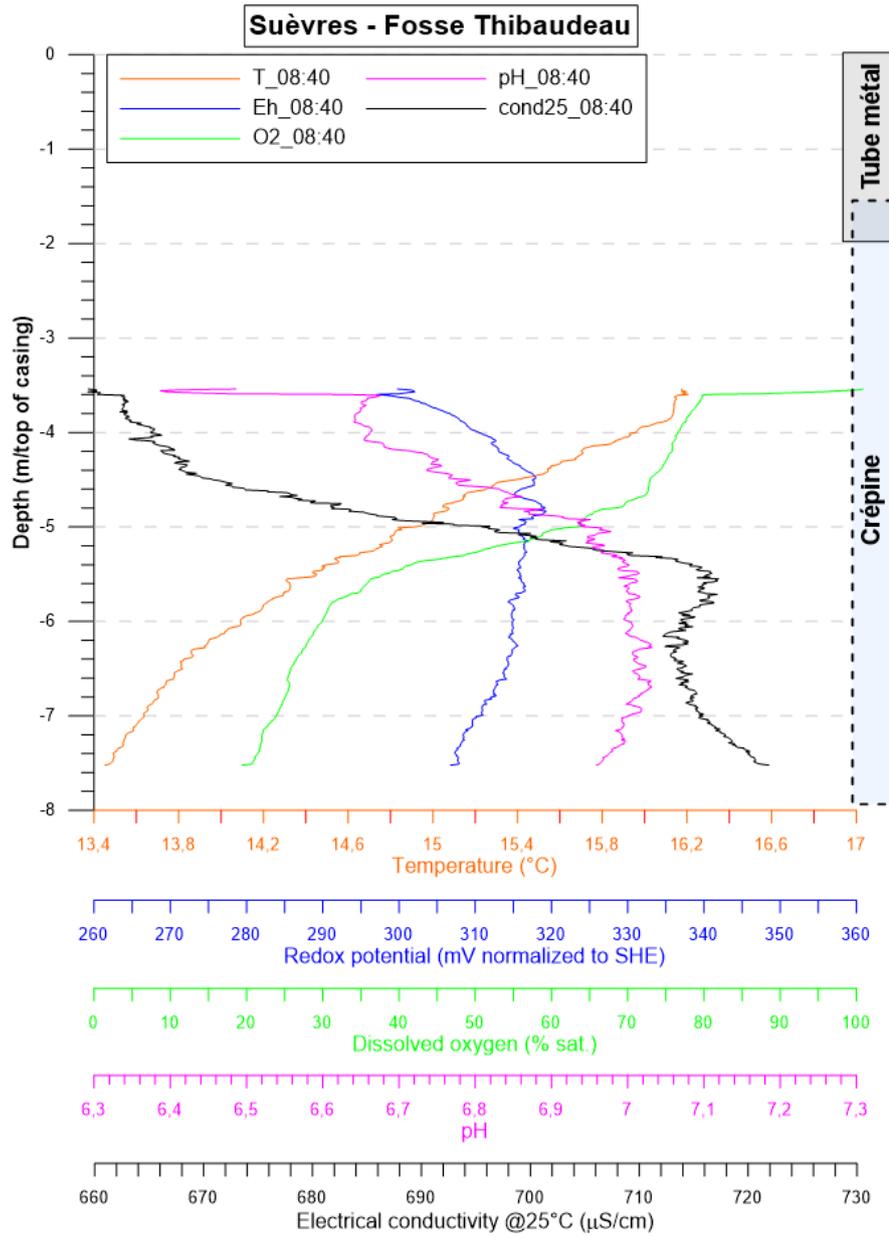


Figure 45 : station de Suèvres : diagraphie initiale.

a) Pompage à 4,3 m de profondeur

Les diagraphies pratiquées durant la phase de pompage à 4,3 m de profondeur sont rapportées dans la Figure 46. Des informations relatives aux débits utilisés durant le pompage peuvent être trouvées dans la Figure 51. Les données de potentiel redox ne seront pas discutées, les profils restant verticaux. A titre indicatif une purge d'un volume d'une fois la colonne d'eau (environ 300 L) est atteinte à 10:30 (1h15 après le début du pompage) et un volume de deux fois la colonne d'eau est atteint à la fin de la séquence de pompage à 4,3 m de profondeur (soit vers 11:15).

Même s'il existe une petite variabilité, les profils de **température**, comparés à celui acquis initialement, montrent, comme attendu²⁵, que le sommet de la colonne d'eau n'est pas affecté par le pompage. La température vers 4,3 m de profondeur tend à diminuer au cours du pompage, mais cet effet n'est sans doute que transitoire. La dernière diagraphie (11:20), réalisée quelques minutes après l'arrêt du pompage, montre déjà une ré-augmentation de la température. Ceci pourrait indiquer que l'eau se remet rapidement à l'équilibre thermique avec son encaissant. Ceci pourrait aussi être une conséquence d'un débit de pompage plus élevé en fin d'acquisition à 4,3 m de profondeur, la pompe s'échauffant plus. Outre ce phénomène en fin de pompage, il est intéressant de constater que la baisse de température se fait de manière graduelle lorsque le pompage est effectué à faible débit (entre 250 et 400 L.h⁻¹). Il n'y a de surcroît aucun effet de réchauffement lié à la présence de la pompe. Cette remontée progressive d'eau plus froide peut être interprétée comme la sollicitation d'un horizon producteur plus profond, dont on pourrait proposer qu'il se situe environ 1 m sous le niveau auquel la pompe est déployée. Le corollaire de ce constat est que la productivité de l'aquifère autour de 4,3 m de profondeur doit être très limitée.

Ce schéma semble conforté par les données de **conductivité électrique**. Toutes les diagraphies réalisées durant le pompage montrent la remontée de l'épaulement de conductivité, initialement présent vers 5,5 m de profondeur (autour de 715 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), vers un niveau proche de 4,5 à 5 m de profondeur. Tout se passe comme si l'on avait translaté cet horizon vers le haut. Une considération purement géométrique indique que le volume d'eau présent dans un mètre de colonne d'eau est proche de 70 litres. La remontée de l'épaulement est constatée dès 09:55, après 40 minutes de pompage autour de 250 L.h⁻¹, soit un volume proche de 160 litres. Une interprétation est donc de considérer que cette remontée est liée pour moitié à un effet piston (translation vers le haut du niveau à forte conductivité), par vidange du mètre de colonne d'eau sus-jacent (horizon entre 4,5 et 5,5 m de profondeur), et pour l'autre moitié à une contribution de l'aquifère via un ou des horizons localisés en dessous de 5,5 m de profondeur (par exemple entre 5,5 et 6 m de profondeur, si l'on se base sur l'allure des courbes de conductivité). La poursuite du pompage, et/ou la hausse du débit de pompage, provoquent de surcroît l'apparition d'une zone de plus faible conductivité électrique entre 6 et 7 m de profondeur (autour de 690 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Son existence était à peine décelable lors de la 1^{ère} diagraphie. L'existence de deux niveaux productifs dans l'aquifère semble donc pouvoir être proposée. Pour finir, on notera également que la conductivité électrique au-dessus de la pompe évolue aussi. Ceci est sans doute le résultat d'une remontée d'eau plus conductrice qui se mélange avec l'eau moins conductrice initialement présente dans le forage. Ce phénomène peut aussi être un artéfact lié au passage répété de la sonde de diagraphie, dont le diamètre est non négligeable, un brassage de cette partie de la colonne d'eau, qui, sur la base des données de température, ne semble pas sollicitée, étant alors tout à fait possible, et de plus en plus visible à mesure que le nombre de passage de la sonde augmente, ce que les données de conductivité semblent aussi indiquer

²⁵ Hormis des cas particuliers de drainance verticale ou de très forts contrastes de perméabilité, un pompage a plutôt tendance à solliciter les horizons qui sont à la cote à laquelle la pompe est déployée, ou des niveaux sous-jacents.

Les informations fournies par le **pH** sont également intéressantes. L'action de pompage²⁶ a pour effet de provoquer une rapide homogénéisation de la colonne d'eau sur toute sa hauteur, à une valeur proche de 7,1, seule une légère diminution restant visible à la base de l'ouvrage. Les deux horizons de conductivité électrique différente ne sont pas identifiables avec ces données pH.

Enfin, les profils d'**oxygène dissous** viennent compléter les informations²⁷. Au fur et à mesure du pompage, on constate également que l'interface entre zone assez riche en oxygène et zone appauvrie, initialement présente entre 4,5 et 5,5 m de profondeur, remonte progressivement. A la fin, il est possible de déterminer que l'horizon moins conducteur, dont on soupçonne l'existence entre 6 et 7 m de profondeur, est très appauvri (15% de saturation). La zone plus riche est presque totalement résorbée, ce qui semble suggérer que l'horizon plus conducteur (autour de 5,5 m de profondeur) est également peu riche en oxygène.

b) Pompage à 5,5 m de profondeur

La diagraphie pratiquée durant la phase de pompage à 5,5 m de profondeur est rapportée dans la Figure 47. Des informations relatives aux débits utilisés durant le pompage peuvent être trouvées dans la Figure 52. Les effets du pompage sont ici moins forts. A titre indicatif la purge de trois fois le volume de la colonne d'eau (environ 900 L) est atteinte à 10:45 (15 minutes après le début du pompage à 5,5 m de profondeur). En fin de pompage à 5,5 m, le volume total purgé est de 1,1 m³.

Le profil de **température** est assez peu perturbé, sauf à l'endroit où la pompe était déployée. Toutefois, le refroidissement de la colonne d'eau se poursuit, une tendance à l'homogénéisation entre 6 m de profondeur et le fond semblant se dessiner.

La **conductivité électrique** est le paramètre connaissant le plus de variations. La pompe a été descendue dans le niveau de conductivité élevée (710-720 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Si on constate toujours la présence de l'anomalie au-dessus de la pompe, en dessous, les eaux pompées présentent des conductivités plus faibles. La zone de basse conductivité, précédemment caractérisée par une valeur proche de 680 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, admet maintenant des valeurs encore plus basses (670 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Le pompage sollicite donc encore plus cet horizon producteur, et particulièrement dans l'intervalle 6,4-7 m de profondeur. Enfin, l'horizon plus conducteur en fond de forage est toujours présent, le pompage n'influençant pas sa géométrie.

Le profil du **pH** n'est pas informatif, le pompage initial ayant permis de renouveler la colonne d'eau. Ce paramètre permet juste de constater que le pH reste stable lorsque les volumes pompés augmentent. Il représente donc le pH d'équilibre de l'aquifère.

Les données d'**oxygène dissous** ne reflètent plus la belle évolution mise en évidence lors du pompage à 4,3 m de profondeur. Avec un pompage à 5,5 m, il semblerait que des niveaux un

²⁶ On remarquera, pour la diagraphie de 09:55, le signal pH bruité lorsque la sonde s'est trouvée au voisinage de la pompe. Ce constat peut s'étendre aux autres capteurs électrochimiques (potentiel redox et chlorures). La sonde de diagraphie a donc dû être approfondie en venant se paralléliser à la pompe, ce qui a provoqué un bruit au niveau de la réponse des capteurs.

²⁷ Dans ce qui suit, on ne considèrera pas la mesure de 10:20, qui s'écarte un peu des autres, pour une raison indéterminée.

peu plus riches en oxygène soient sollicités, seule la zone en dessous de 6,8 m de profondeur restant caractérisées par une importante désoxygénation.

Hétérogénéité verticale colonne d'eau

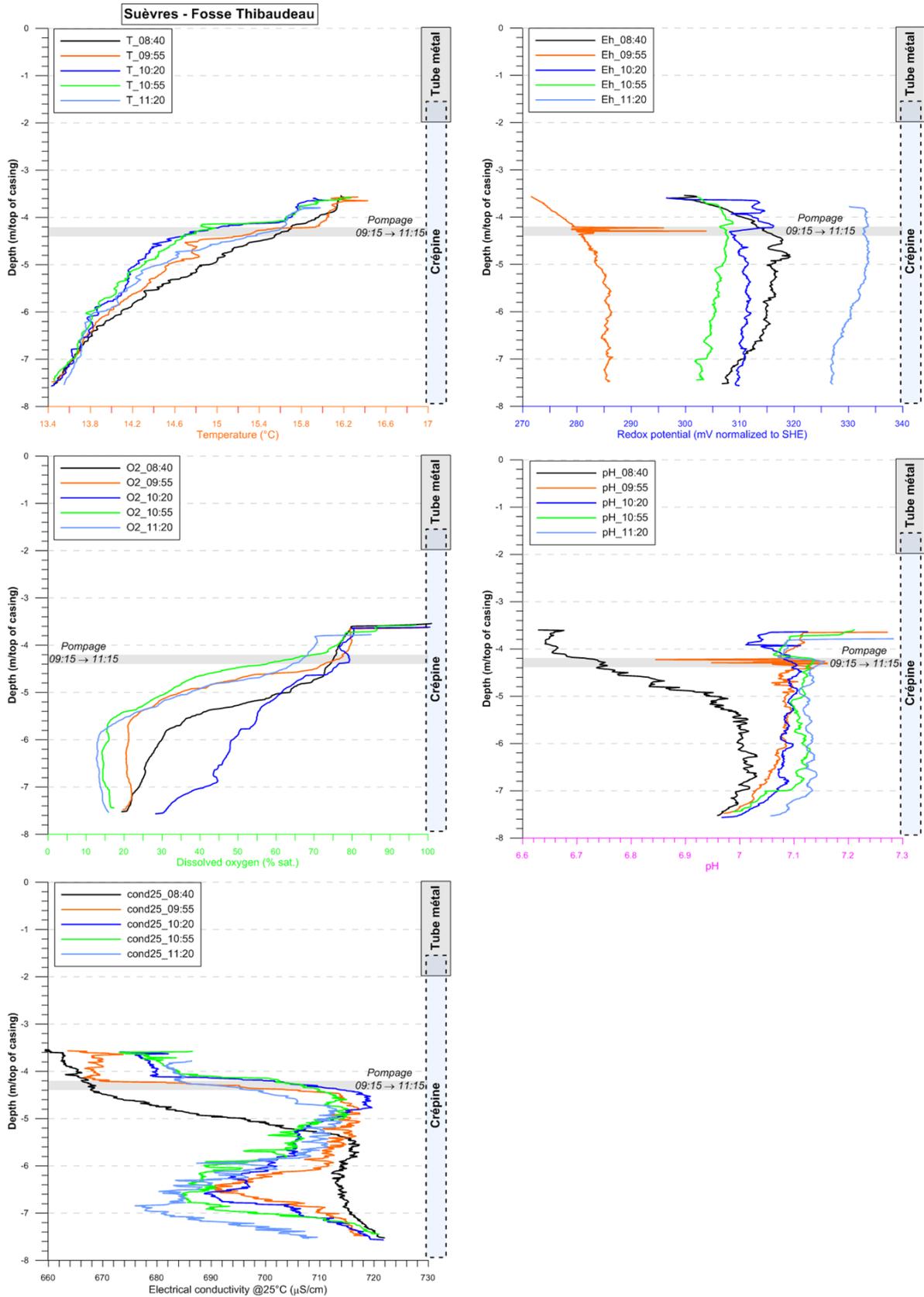


Figure 46 : station de Suèvres : détail des diagraphies pratiquées (à 09:55, 10:20, 10:55 et 11:20) durant le pompage à 4,3 m de profondeur (pompage de 09:15 à 11:15). La diagraphie avant pompage (08:40) est indiquée en référence.

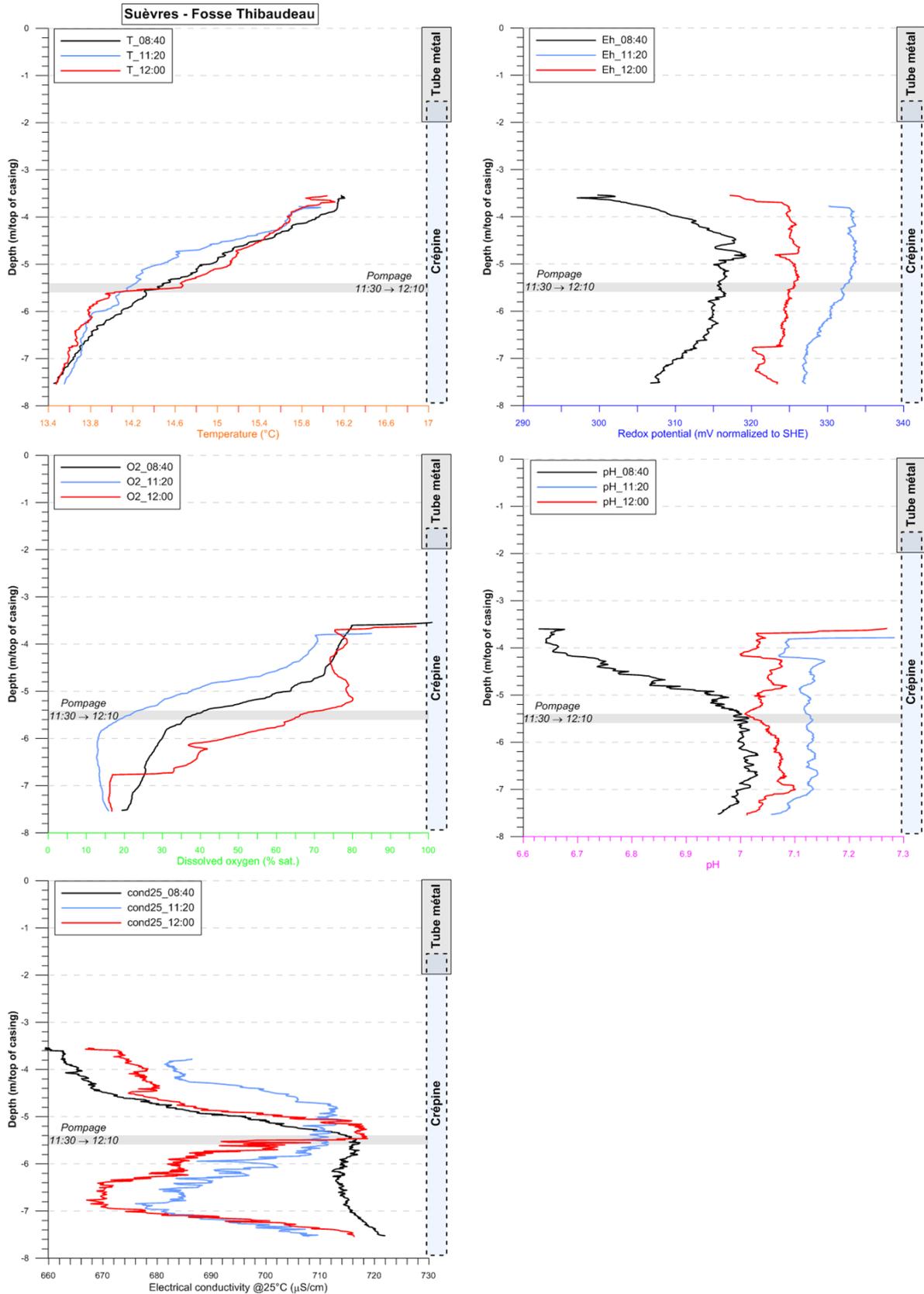


Figure 47 : station de Suèvres : détail de la diagraphie pratiquée (à 12:00) durant le pompage à 5,5 m de profondeur (pompage de 11:30 à 12:10). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 4,3 m (11:20) sont indiquées en référence.

c) Pompage à 6,8 m de profondeur

Les diagraphies pratiquées durant la phase de pompage à 6,8 m de profondeur sont rapportées dans la Figure 48. Des informations relatives aux débits utilisés durant le pompage peuvent être trouvées dans la Figure 53. On rappelle que ce pompage a été entrepris en 2 sessions, la pompe ayant été, dans l'intervalle, descendue plus profondément (à 7,3 m). La Figure 48 est donc à interpréter à l'aune de ces deux épisodes distincts. A la fin de la 1^{ère} séquence de pompage à 6,8 m, le volume total purgé est de 1,25 m³. A l'issue de la 2^{nde} séquence, ce volume est de 2,1 m³ (soit 7 fois le volume de la colonne d'eau).

Le 1^{er} épisode de pompage à 6,8 m de profondeur perturbe le gradient de **température**. Si l'eau en-dessous de la pompe reste à une température identique à celle relevée avant toute intervention, ou à l'issue des pompages à 4,3 m et 5,5 m, la situation est différente pour les horizons situés au-dessus de la pompe. Cette perturbation thermique se propage jusque vers 5,5 m de profondeur. Elle est même renforcée lors du 2^{ème} épisode de pompage, mais une partie de cet effet peut-être lié au pompage pratiqué dans l'intervalle à 7,3 m de profondeur (Figure 49). De surcroît le 2^{ème} pompage a été opéré à débit élevé, ce qui peut également élever localement la température (effet thermique lié à l'échauffement de la pompe). Il semblerait donc que l'on puisse modifier l'état thermique d'équilibre de l'horizon moins conducteur implanté entre 6 et 7 m de profondeur ; ceci pourrait signifier que sa productivité est assez faible.

Les profils de **conductivité électrique** semblent également le suggérer. La zone à faible conductivité dont l'apparition avait résulté du pompage à 5,5 m de profondeur se résorbe progressivement. Le pompage de 12:35 montre qu'il existe encore à la profondeur de déploiement de la pompe, une zone de faible conductivité. Dès que l'on considère un horizon au-dessus de la pompe, on voit que la conductivité augmente rapidement, ce qui tend à suggérer qu'en dehors d'une sollicitation par pompage, cette partie de l'aquifère est peu contributive à l'alimentation en eau. Ceci pourrait expliquer qu'en écoulement naturel seule une légère déflexion dans le profil de conductivité puisse être remarquée entre 6 et 7 m de profondeur.

Les autres paramètres mesurés ne semblent pas apporter de contraintes supplémentaires permettant de mieux caractériser l'influence du pompage à 6,8 m de profondeur.

d) Pompage à 7,3 m de profondeur

La diagraphie pratiquée durant la phase de pompage à 7,3 m de profondeur est rapportée dans la Figure 49. Des informations relatives aux débits utilisés durant le pompage peuvent être trouvées dans la Figure 54. Le volume total purgé en fin de pompage à 7,3 m de profondeur est de 1,6 m³ (un peu plus de 5 fois le volume de la colonne d'eau).

On discutera ici uniquement du profil de **conductivité électrique**, les informations fournies par le profil de température étant identiques à celles présentées dans la discussion du 2^{ème} pompage à 6,8 m de profondeur. Ce profil de conductivité est proche du profil final établi à 14:05 (Figure 48). Dès que la zone de faible conductivité entre 6 et 7 m n'est plus sollicitée, son influence disparaît rapidement, pour ne plus donner lieu qu'à l'existence d'une zone de conductivité élevée à compter de 5,5 m de profondeur, et une zone de conductivité de moins en moins élevée au-dessus de ce niveau.

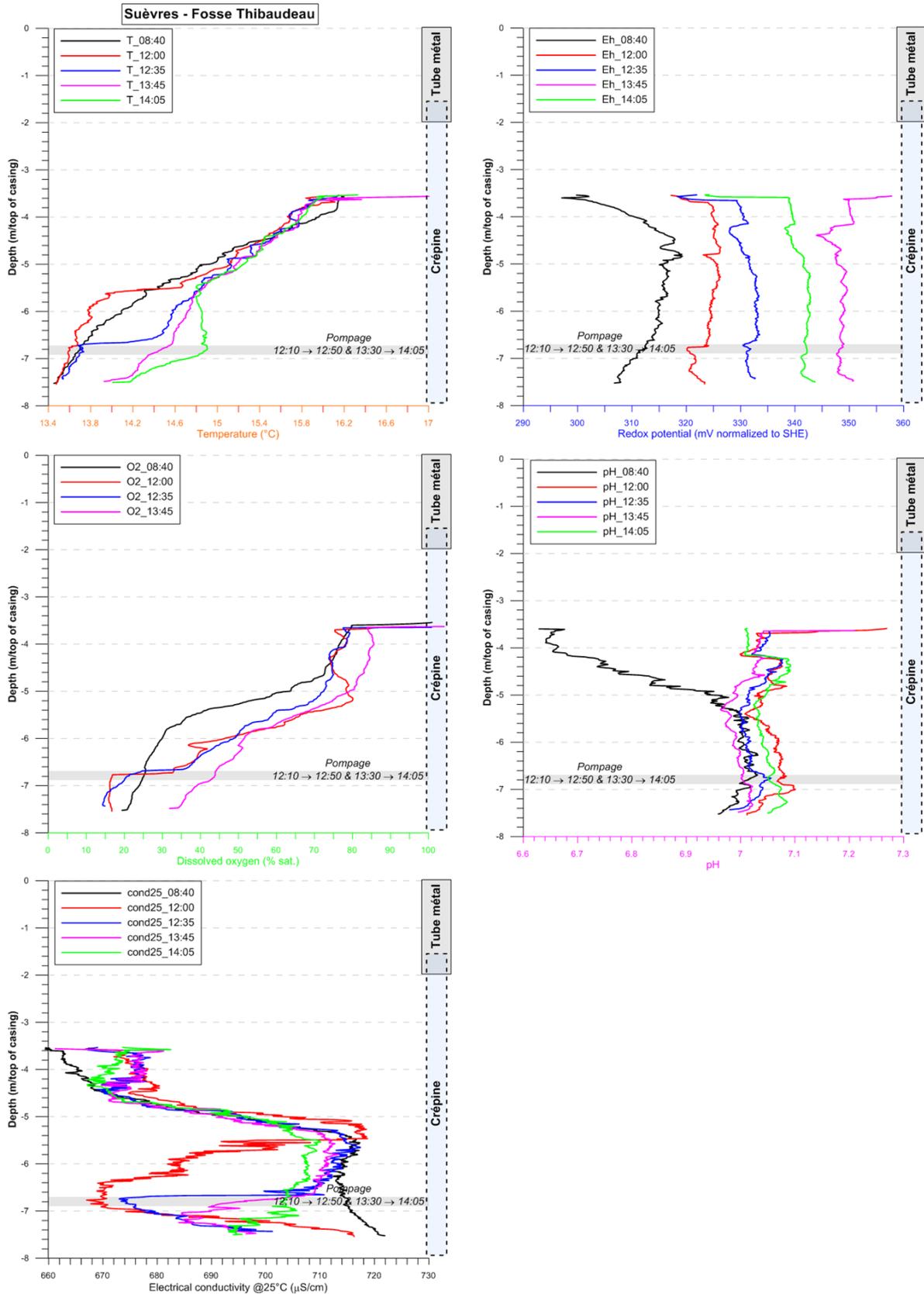


Figure 48 : station de Suèvres : détail des diagraphies pratiquées (à 12:35, 13:45 et 14:05) durant le pompage à 6,8 m de profondeur (pompage de 12:10 à 12:50 et de 13:30 à 14:05). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 5,5 m (12:00) sont indiquées en référence.

Hétérogénéité verticale colonne d'eau

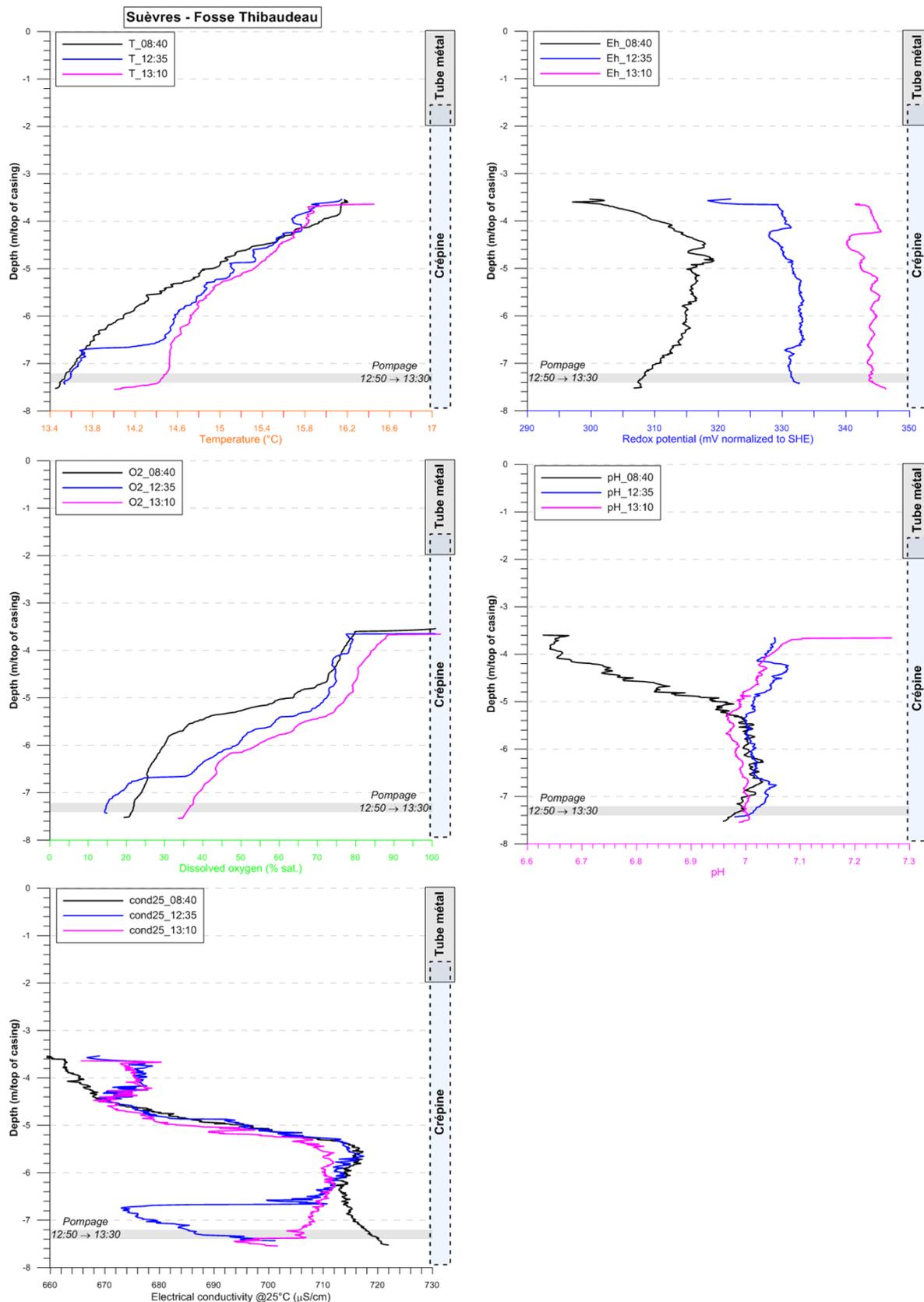


Figure 49 : station de Suèvres : détail de la diagraphie pratiquée (à 13:10) durant le pompage à 7,3 m de profondeur (pompage de 12:50 à 13:30). La diagraphie avant pompage (08:40) et la diagraphie en fin de pompage à 6,8 m (12:35) sont indiquées en référence.

e) Informations relatives aux pompages réalisés à différentes profondeurs

A l'issue de cette série de pompages opérés à plusieurs niveaux, il semble possible de proposer le schéma suivant :

- Productivité très limitée des horizons en face de la crépine autour de 4,3 m de profondeur ;
- Existence de niveaux producteurs en-dessous de 5,5 m de profondeur :
 - o Au moins un niveau a une conductivité assez élevée (710-720 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).
 - o Entre 6 et 7 m de profondeur, existence d'un autre niveau, de faible productivité, mais de conductivité plus basse (670-680 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), qui ne contribue que lorsqu'il est sollicité de manière assez proche. Ce niveau est très appauvri en oxygène. On pourrait interpréter la hausse du taux d'oxygène et la hausse de conductivité à cette profondeur, lorsque le pompage vers 6,8 m, comme un tarissement progressif de la venue d'eau (sur-pompage d'un horizon faiblement productif).
 - o Il est difficile de statuer sur la productivité de l'aquifère en base d'ouvrage, les pompages pratiqués à 6,8 et 7,3 m de profondeur ayant eu tendance à produire une eau de conductivité proche de 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Peut-être faut-il voir dans les valeurs initialement mesurées, un peu plus élevées, l'influence des dépôts potentiellement présents en fond de trou, et l'interaction avec une eau moins renouvelée qui se traduirait par une petite hausse de conductivité.
- Ce schéma d'alimentation, assez complexe pour un ouvrage peu profond, suggère qu'une grande attention doit être portée sur le positionnement de la pompe lors de la réalisation des suivis réglementaires. De même, le débit de pompage utilisé pourra, suivant la profondeur à laquelle la pompe est déployée, induire la sollicitation d'horizons peu productifs et peu conducteurs (faible débit), ou, à l'opposé, provoquer leur épuisement rapide et ne solliciter que les horizons plus producteurs et plus conducteurs.
- Enfin, ces investigations n'ont été réalisées qu'en fin de période estivale, avec un étiage marqué. Elles ne présagent pas des évolutions pouvant exister durant l'année, et, notamment, de la possibilité d'une variation de la profondeur de l'interface majeur autour de 5 m de profondeur, ou de la possibilité d'une plus grande contribution de l'horizon moins conducteur entre 6 et 7 m de profondeur en période de hautes eaux.

Il est difficile de déterminer quel est l'horizon le plus représentatif de l'aquifère ciblé. La crépine, présente sur presque toute la hauteur du forage, ne permet pas cette sélectivité. Les pompages, dont le volume dépasse largement celui préconisé pour les surveillances réglementaires, ne permettent que de mettre en évidence une production d'eau complexe. Dans l'optique d'une surveillance de long terme, l'on aura sans doute plutôt intérêt à positionner la pompe à une profondeur fixe, vers la base de l'ouvrage (7 m), afin d'être moins influencé par la production d'eau par les niveaux les moins profonds.

5.5.3. Prélèvement

Comme abordé précédemment, les pompages ont été réalisés de manière séquentielle, avec des débits variables et à des profondeurs augmentant graduellement. La Figure 50 offre un aperçu synthétique des acquisitions, lesquelles sont détaillées en Figure 51 pour le pompage à 4,3 m de profondeur, en Figure 52 pour le pompage à 5,5 m, en Figure 53 pour les deux pompages opérés à 6,8 m et en Figure 54 pour le pompage opéré à 7,3 m de profondeur.

Les variations de conductivité électrique et les variations de pH constatées en surface, à l'exhaure du pompage, sont en très bon accord avec les mesures réalisées in-situ dans la colonne d'eau

lors des diagraphies. D'autre part, les valeurs mesurées par la sonde de diagraphie ou le boîtier WTW, placés à l'exhaure, sont également en très bon accord (Tableau 13).

A titre d'exemple, à 4,3 m de profondeur, une nette hausse de la conductivité électrique est visible au cours des 40 premières minutes de pompage. Cette hausse traduit bien la remontée progressive de l'interface initialement présent entre 5 et 6 m de profondeur (Figure 48) et donc la sollicitation d'horizons plus profonds que la profondeur à laquelle la pompe est déployée. Il a été proposé que le début du pompage manifeste la remontée d'eau avec une alimentation se faisant par des horizons situés sous 5,5 m de profondeur (voir §5.5.2.b). Lorsque les volumes pompés croissent, la remontée de l'horizon de conductivité plus forte s'estompe, et laisse graduellement place à la production d'un horizon un peu moins conducteur. Toutefois, à partir de 1,5 fois le volume de la colonne d'eau et jusqu'à abstraction de plus de 2 fois le volume de la colonne d'eau (740 l pompés, pour un volume de colonne de 300 l), on constate que le pompage rentre dans une phase assez stable, avec production de 2 niveaux, l'un autour de 5 m, plus conducteur, l'autre en-dessous de 6 m, moins conducteur. L'augmentation du débit en fin d'acquisition ne semble pas changer la production de ces deux niveaux, et il semble donc que l'on atteigne un régime permanent. La conséquence est qu'il n'est pas possible d'échantillonner le niveau inférieur avec la pompe en faible profondeur.

La descente de la pompe à 5,5 m ne permet toujours pas de prélever ce niveau, même si on tend à faire remonter la zone de conductivité basse à quelques dizaines de centimètres sous la pompe. La pompe n'ayant pas été poussée à son maximum, il est difficile de déterminer si l'on peut l'échantillonner en plaçant la pompe à mi-hauteur dans la colonne d'eau.

La descente de la pompe un peu au-dessus de 7 m permet de solliciter ce niveau, tout en utilisant un débit assez faible. Il semble en effet qu'un pompage plus fort sollicite préférentiellement les niveaux plus conducteurs, peut-être en créant une drainance verticale dans l'ouvrage et/ou dans le massif filtrant.

L'utilisation d'un pompage à un débit unique et élevé dans cet ouvrage produira donc une eau assez conductrice, sans doute représentative de l'horizon le plus transmissif, et ce indépendamment de la position de la pompe. *A contrario*, un pompage moins fort, réalisé vers la base de l'ouvrage, sera à même de faire produire l'horizon moins conducteur. Dans le cadre de cette action, il n'est pas possible de conclure sur l'horizon représentatif de la masse d'eau à échantillonner sur cette station.

	Boîtier WTW	Sonde diagraphie
Température (°C)	15,6	15,63
Conductivité électrique à 25°C ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	713	710
pH	7,01	7,015

Tableau 13 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – comparaison entre mesures au boîtier WTW et mesures avec la sonde de diagraphie Idro 316.

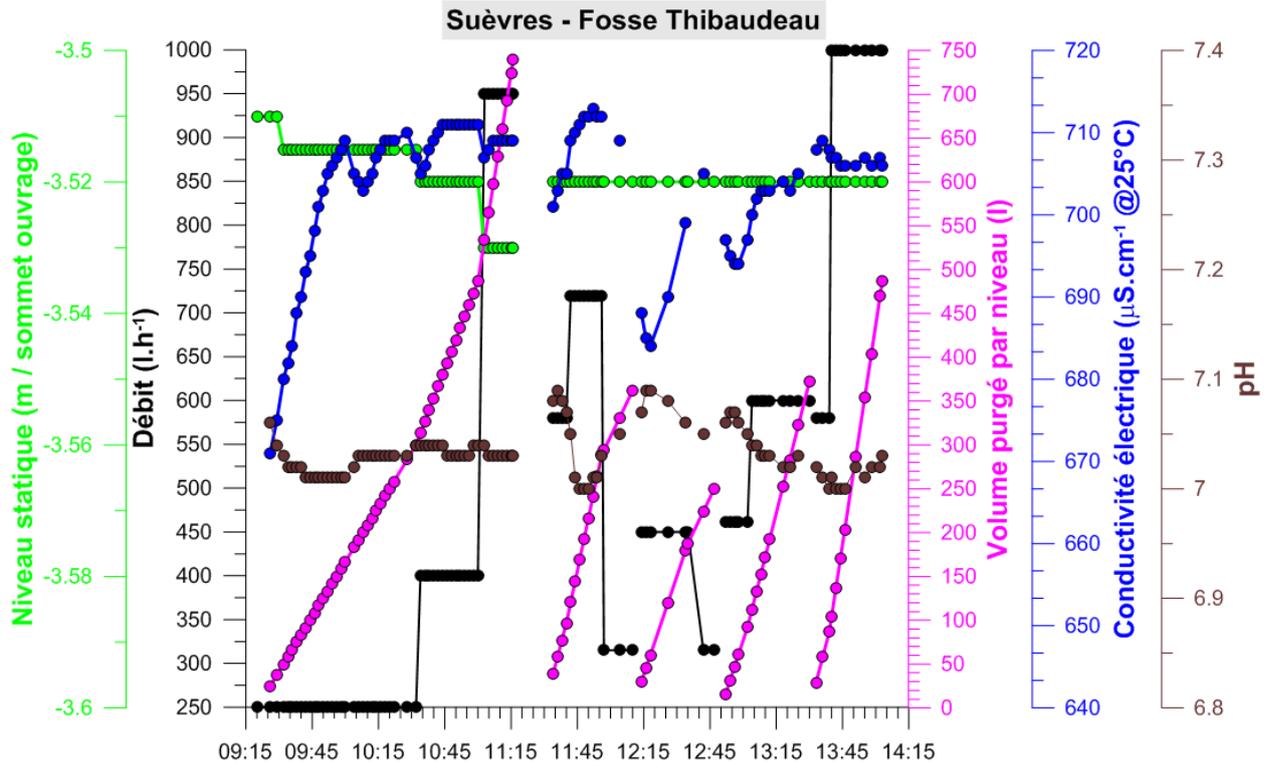


Figure 50 : station de Suèvres : suivi du pompage ; vue synthétique.

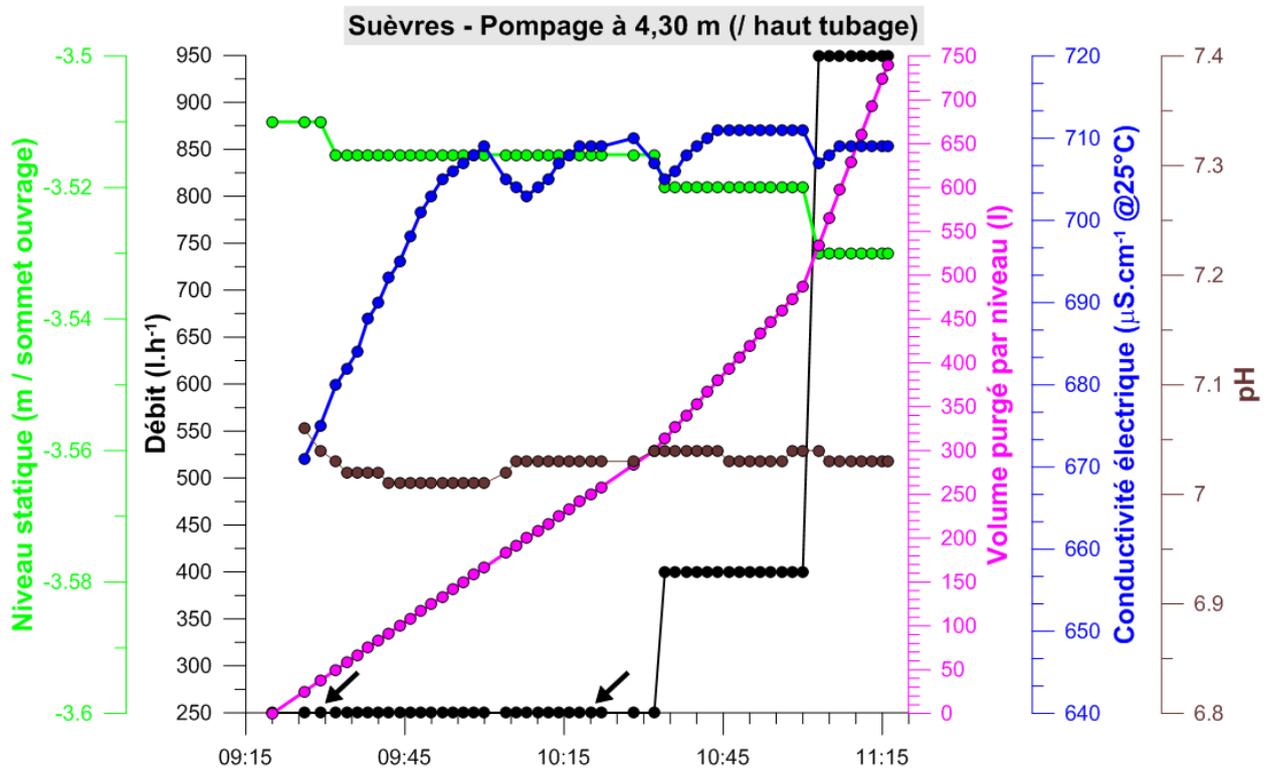


Figure 51 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 80 cm de colonne d'eau (4,3 m de profondeur) ; les flèches indiquent le moment où des prélèvements sont réalisés.

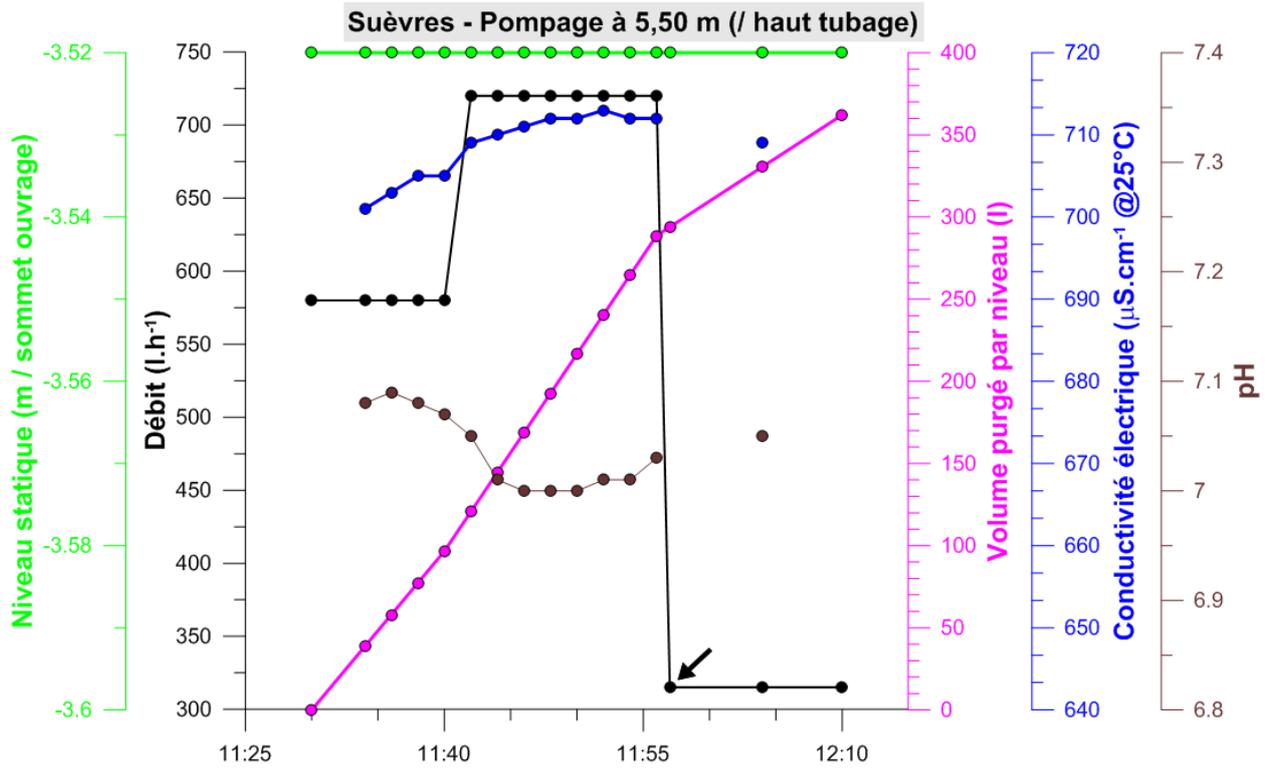


Figure 52 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 2 m de colonne d'eau (5,5 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.

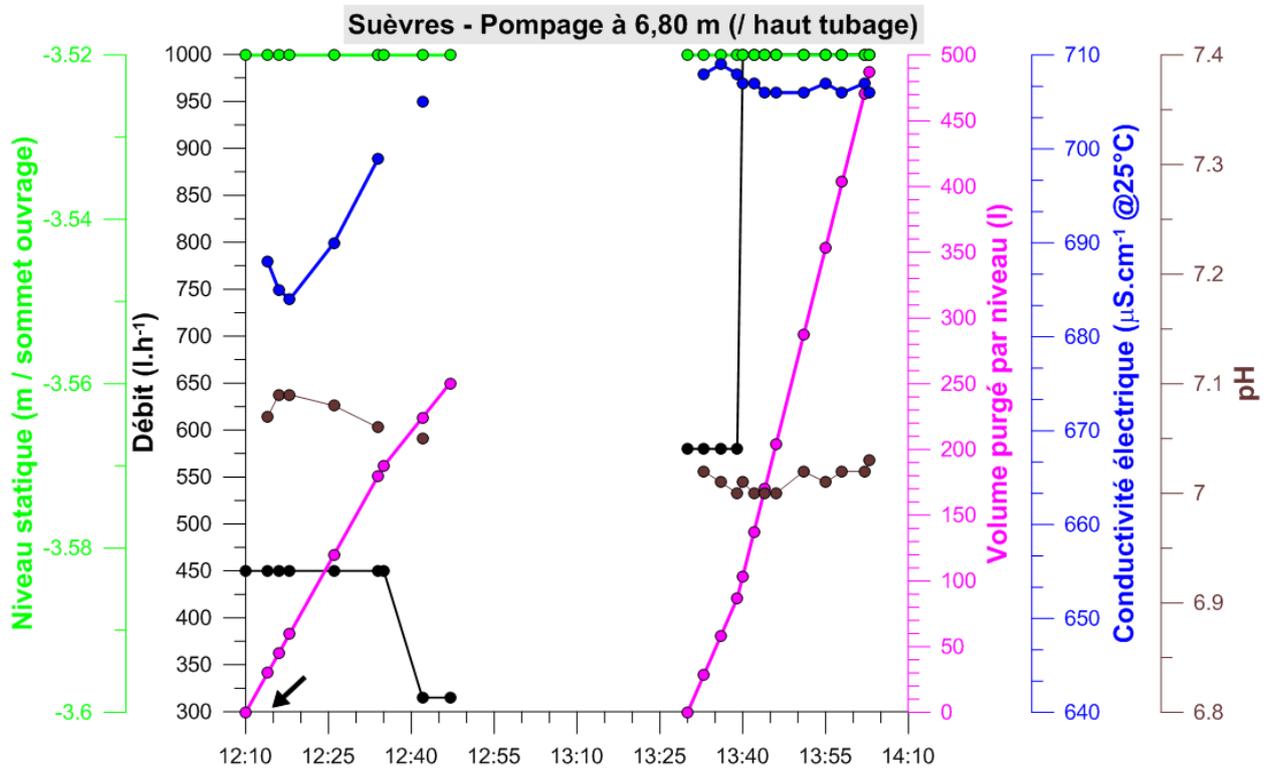


Figure 53 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 3,3 m de colonne d'eau (6,8 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.

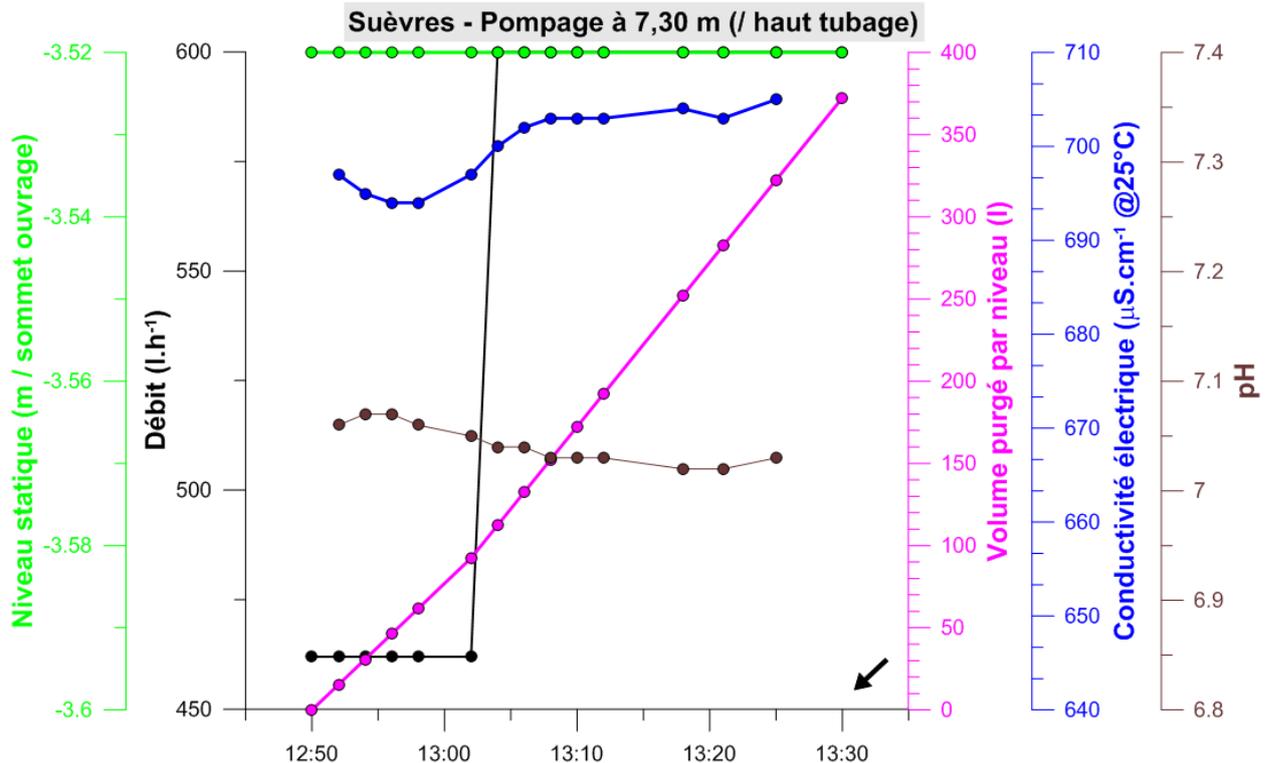


Figure 54 : station de Suèvres : suivi du pompage sous 3,8 m de colonne d'eau (7,3 m de profondeur) ; la flèche indique le moment où le prélèvement est réalisé.

5.5.4. Analyses de laboratoire

Les différentes analyses réalisées sur l'ouvrage de Suèvres sont présentées dans la Figure 55. Les analyses pour Be, Ag et Pb ne sont pas à considérer car inférieures à la limite de quantification ; Al et Cr sont également très proches du seuil de quantification.

Pour certains éléments, les écarts sont faibles en fonction de la profondeur à laquelle ils ont été opérés ; c'est le cas pour Li, B, Ni, Sr et Ba (écart entre valeur minimale et valeur maximale <50%), et à peine supérieurs pour Cd (<60%). D'autres éléments affichent une variabilité proche d'un facteur 2 (Al, Cr et Cu). Si, pour Cr et Cu, il semble que les prélèvements effectués au sommet de la colonne d'eau soient un peu plus riches, c'est moins vrai pour Al. Il ne semble pas possible de mettre en évidence une réelle influence de la purge sous faible recouvrement d'eau, les écarts entre prélèvement à 4,3 m de profondeur à t zéro et t + 1 heure étant faibles.

Seul un élément s'écarte de ce constat, Zn. Il est trouvé à des niveaux très élevés dans la colonne d'eau, tout particulièrement au sommet et en début de pompage, puis sa concentration semble diminuer jusqu'à 6,8 m, où une forte augmentation est notée. La variabilité totale entre minima et maxima atteint un facteur 12. En base d'ouvrage, la concentration diminue fortement. Sur la base des valeurs de conductivité, ceci pourrait suggérer que l'eau présente en sommet de colonne d'eau, dans l'ouvrage au repos, a un chimisme proche de celle que l'on retrouve vers 6,8 m de

profondeur lors du pompage²⁸. Ce constat est toutefois à nuancer en considérant l'autre élément ayant une forte variabilité (facteur 4), Mn. Pour ces 2 éléments, on constate donc une forte variation des concentrations en fonction de la profondeur de la pompe. Il est probable que ces variations, liées à la structuration de l'ouvrage, impactent la variabilité des données de surveillance.

Il est donc difficile d'établir un schéma de fonctionnement clair de l'ouvrage de Suèvres lorsqu'il est sollicité par pompage. Il est néanmoins assez clair que des variations compositionnelles assez franches peuvent exister pour certains éléments – il en ira de même pour les éléments majeurs, ceux qui influencent la conductivité électrique. Il serait donc nécessaire de déterminer de manière précise quel est l'horizon à considérer pour viser à une représentativité long-terme des prélèvements. Il conviendrait aussi de veiller à déployer tout le temps la pompe à la même profondeur²⁹ lors des prélèvements, idéalement à la profondeur définie comme représentative, pour éviter d'échantillonner des niveaux différents – sous réserve que ceux-ci n'aient pas une profondeur variable dans le temps, en réponse aux épisodes pluvieux (l'ouvrage est très proche de la Loire, en contexte alluvionnaire). De même, afin d'éviter de drainer des niveaux différents, il serait opportun de définir quel débit de purge doit être appliqué pour ne drainer que ce niveau représentatif.

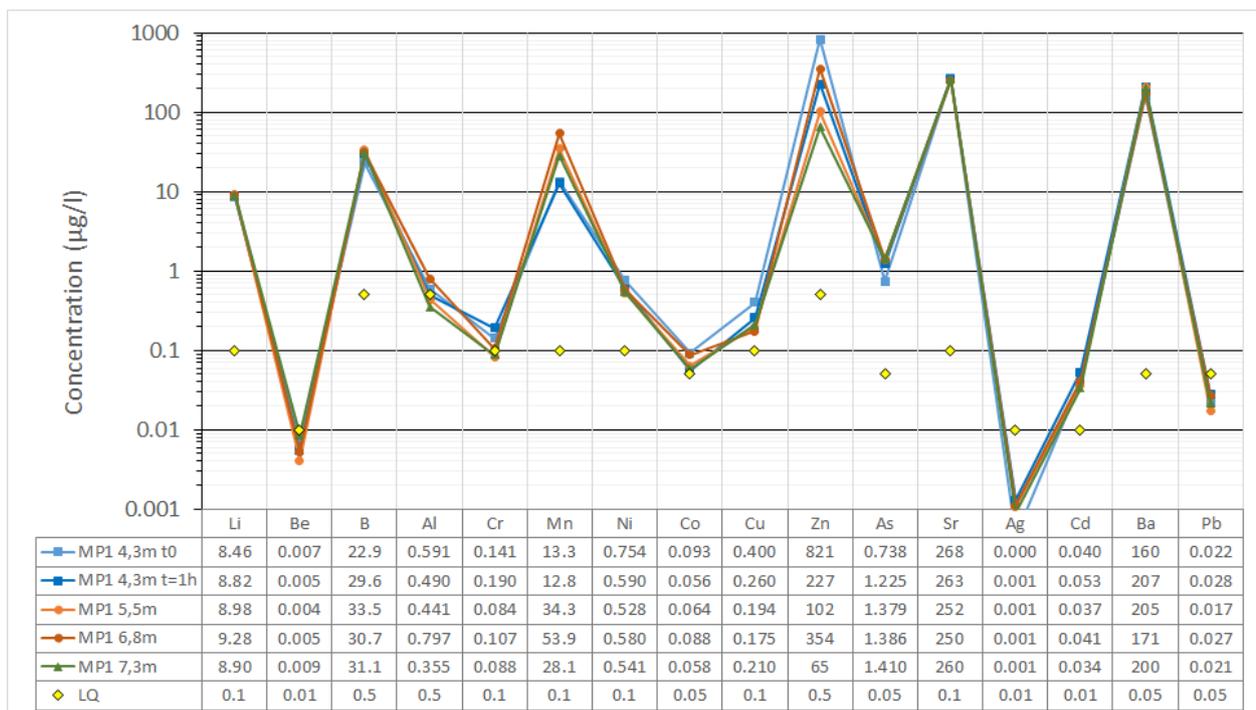


Figure 55 : station de Suèvres : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Ag et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

²⁸ A minima, la forte concentration en Zn pourrait être expliquée par la présence de Zn dans la venue d'eau vers 6,8 m de profondeur.

²⁹ La référence n'est pas une hauteur de colonne d'eau dans le cas présent, mais une profondeur par rapport au sommet du tubage (par exemple 7 m).

5.5.5. Conséquences sur les résultats de surveillance réglementaire

Pour cette station, il existe très peu d'indications, dans la fiche station, sur le mode de réalisation du pompage, et notamment sur la profondeur de mise en place de la pompe. Les investigations pratiquées sur cet ouvrage ont montré que la colonne d'eau était stratifiée, que la crépine était en partie dénoyée, et que les pompages ne permettaient pas de résorber totalement la stratification de la colonne d'eau. En conséquence, on ne maîtrise pas la variation de cette stratification au cours de l'année, en réponse à des fluctuations du niveau statique. Il est donc assez vraisemblable, surtout si la profondeur de pompage varie ou si les temps de purge varient, que des variations soient détectées dans la composition chimique de l'eau échantillonnée, ce que les prélèvements en éléments traces suggèrent.

6. Investigations sur un ouvrage profond

Il s'agit de la station de Brettes.

6.1. MODE OPERATOIRE

La station a été visitée le 08/11/2018 entre 09:00 et 18:00. Une dernière diagraphie a été opérée le lendemain matin entre 8:50 et 9:30 (venue sur site du bureau d'étude Qualyse, en charge du suivi qualité pour le compte de l'AELB).

Comme évoqué précédemment, il existe une incohérence dans la localisation géographique de l'ouvrage dans la BSS, qui propose deux ouvrages distants d'une quarantaine de mètres, alors qu'un seul est accessible (voir annexe)³⁰.

Le forage des Linottes est un forage profond (264 m) qui atteint l'interface entre remplissage sédimentaire et socle granitique. C'est le seul ouvrage investigué dans cette campagne de caractérisation qui capte un horizon aquifère en trou nu (diamètre 155 mm). Les horizons supérieurs, dont l'aquifère du Dogger, reconnu comme ayant une faible productivité lors du forage, sont protégés par un tubage plein en acier de diamètre externe 178 mm (diamètre interne 163 mm). Plus en surface, ce tube acier est doublé par un autre tube acier de diamètre externe 244 mm, de 0 à 56,5m de profondeur. Les données rapportées en BSS sont très complètes³¹ et indiquent que les tubes pleins n'ont pas fait l'objet de cimentation annulaire. Le forage a été développé uniquement par soufflage après sa réalisation (pas d'acidification), puis a fait l'objet de pompages par paliers (jusqu'à 75 m³/h), puis enfin de diagraphies (diagraphie différée dans l'ouvrage au repos et diagraphie de production, en pompage jusqu'à 52 m³/h). Ces dernières investigations ont permis de déterminer qu'il existe un niveau producteur principal (90% de l'eau produite par le forage) entre 243 et 249 m de profondeur et un second niveau productif entre 249 et 262 m de profondeur (environ 10% de l'eau produite), ces deux niveaux ayant des caractéristiques physico-chimiques comparables. Enfin, au contact du socle, une eau plus minéralisée est présente (débit non mesurable).

En surface, aucun dommage n'est visible sur le tube métallique, mais celui-ci n'est pas ceinturé d'une dalle béton, et il n'est pas non plus fermé, seul un capot métallique pivotant le protégeant d'infiltrations directes lors de précipitations (Figure 56). Il n'a pas été possible de descendre la sonde de diagraphie jusqu'à la profondeur nominale du forage ; la sonde repose sur des matériaux durs aux alentours de 247 m de profondeur. Il n'est pas possible de déterminer si cela est la conséquence d'une réduction de diamètre suite à un effondrement dans la partie trou nu, ou si cela est la conséquence d'un déversement inopiné d'un objet depuis la surface. De même, on ne peut pas déterminer s'il s'agit juste du glissement d'un bloc ou si l'obstruction est sur une hauteur plus importante.

Comme l'ouvrage de Brettes est profond, les investigations ont été adaptées : diagraphie initiale, puis pompage de longue durée à une profondeur fixe (35 m ; cette profondeur est quasiment identique à celle utilisée par Qualyse lors de ses suivis) – ce pompage étant par ailleurs monitoré

³⁰ Il est encore plus vraisemblable qu'un seul ouvrage ait été implanté dans la zone, et non deux.

³¹ Rapport HydroInvest HI-2002060234 et rapport SARL Etudes Recherches Matériaux ERM-02-127-FC-AV-190.

en surface dans le bac d'exhaure (Figure 56) – puis diagraphie post-pompage. Il n'a pas été réalisé de diagraphie en pompage, cette opération nécessitant un équipement plus lourd (treuil motorisé notamment).

Forage des Linottes (Brettes)

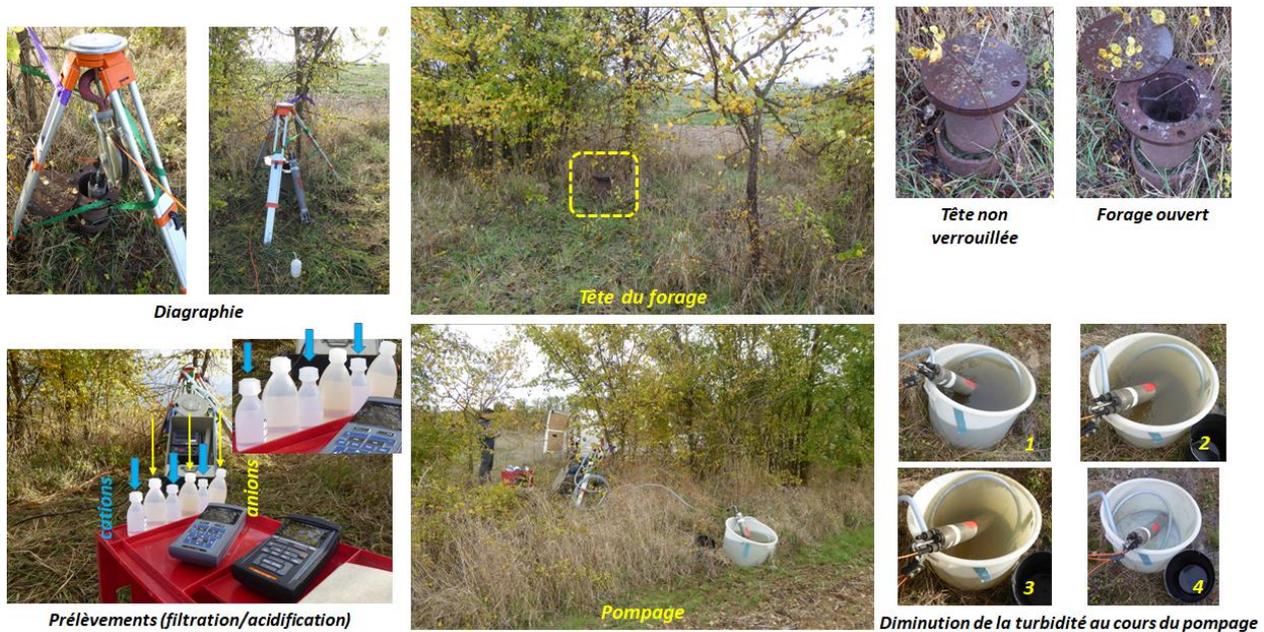


Figure 56 : principales caractéristiques techniques du forage des Linottes (Brettes) et aperçu des investigations réalisées sur site.

6.2. DIAGRAPHIE

La diagraphie réalisée initialement dans le forage de Brettes est présentée en Figure 57. Outre la non-possibilité, déjà évoquée, d'atteindre la base de l'ouvrage, cette diagraphie permet de déterminer les points suivants :

- **Température** : en raison de la profondeur importante de l'ouvrage, il est possible de déterminer plusieurs zones distinctes :
 - o Une zone supérieure, dans le tube plein, entre le niveau statique (proche de 26 m de profondeur) et environ 50 m de profondeur, avec un gradient thermique d'environ +2,7°C par 100 m ;
 - o Une zone intermédiaire, également dans le tube plein, de 50 à 200 m de profondeur environ, où le gradient est plus fort, proche de +3,5°C par 100 m (soit un peu plus que le gradient géothermique moyen de 3°C par 100 m) ;
 - o Enfin, une zone inférieure, dans la partie trou nu, où le gradient diminue à nouveau, pour approcher +2,6°C par 100 m.

- Le gradient thermique faible dans la zone supérieure peut soit être une conséquence des pompages³², soit indiquer qu'il existe des circulations d'eau (non captées) à l'extérieur du tubage, qui perturbent le gradient géothermique moyen.
 - Ensuite, la zone intermédiaire présente un gradient régulier, un peu supérieur à celui déterminé en 2002 (+3,1°C/100 m). Plus en détail, vers 145 m de profondeur, une petite perturbation du gradient est visible ; elle a été attribuée par HydroInvest à la présence de petites circulations d'eau dans le Dogger.
 - Une rupture de pente est nettement visible à la base du tube plein (ce constat est conforme à celui porté par HydroInvest), puis la diminution du gradient traduit une homogénéisation thermique reliée à la présence d'un aquifère assez épais et assez productif (90% de l'alimentation en eau se fait entre 243 et 249 m de profondeur, avec une arrivée majoritaire vers 246 m). Un tel changement est également rapporté en 2002.
- Le profil de **conductivité électrique** est sans doute l'un des plus informatifs présentés dans ce rapport :
- De la surface de l'eau jusque vers 34 m de profondeur, la conductivité est stable, proche de 570 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Un saut existe à 34 m, pour amener à une conductivité un peu supérieure à 580 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Ce saut est à relier à la profondeur à laquelle les pompages réglementaires sont pratiqués : au-dessus de 34 m, l'eau n'est jamais renouvelée, alors qu'elle l'est en dessous.
 - De 34 m à 200 m de profondeur, la conductivité ne se stabilise jamais, et présente une courbe hyperbolique reliant un pôle peu minéralisé (celui de 34 m) à un pôle nettement plus minéralisé juste au-dessus du pied du tube acier (715 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Cette augmentation de la conductivité électrique est à relier aux interactions chimiques avec le tube plein, et à la minéralisation subséquente de l'eau. On notera que de tels phénomènes sont très rapides car ils avaient déjà été notés en 2002, alors que le forage était très récent. Par contre, ils n'avaient pas la même ampleur à l'époque (430 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ relevés au niveau piézométrique et 465 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 201 m)³³. Une des conséquences est qu'il est absolument impératif de purger au minimum tout le volume de la colonne d'eau entre la profondeur à laquelle la pompe est descendue et la base du tube plein, pour espérer collecter une eau moins impactée par les interactions avec le tube plein.
 - Un pic de conductivité électrique est donc atteint aux alentours de 200 m de profondeur (corrosion du tube plein³⁴ – ce pic est donc « artificiel »), puis, dans le trou nu, la conductivité électrique va diminuant³⁵. La baisse de la conductivité est lente, ce qui traduit bien la très faible productivité des horizons captés en sommet de trou nu (pour autant qu'il y en ait une – HydroInvest ne rapporte pas de production d'eau à cette profondeur). Seul un passage en dessous de 230 m de profondeur permet de trouver une relative stabilisation de la conductivité, cette stabilisation étant plus nette en dessous de 240 m (661 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ entre 243 et

³² Un pompage est pratiqué une fois par an, en juin. Toutefois, cette hypothèse semble peu réaliste, car la température rapportée par HydroInvest à 28 m de profondeur en 2002 était de 13,2°C, température très proche de celle mesurée vers 26 m en 2018 (13,3-13,4°C), ce qui suggère que l'ouvrage est en équilibre thermique avec son encaissant (l'influence d'un forçage atmosphérique à ces profondeurs est peu vraisemblable).

³³ On rappellera que l'intervention de Novembre 2018 intervient environ 5 mois après la réalisation d'un pompage.

³⁴ On peut proposer que la corrosion soit ici plus intense car l'eau est en contact potentiel avec l'extrados et l'intrados du tubage.

³⁵ On est ici dans un schéma inverse de celui qui prévalait dans le tube plein : l'alimentation en eau par les horizons producteurs situés en dessous de 200 m de profondeur permet de diluer l'effet de la minéralisation artificielle par interaction avec le tube.

247 m). On signalera que cette conductivité est nettement supérieure à celle rapportée par HydroInvest dans cette gamme de profondeur (proche de 500 $\mu\text{S.cm}^{-1}$).

- Le profil de **pH** n'offre pas de valeurs aberrantes pour une eau d'aquifère carbonaté (pH légèrement basique), mais le pH en base d'ouvrage, dans la zone productrice, est un peu inférieur à celui qui prévaut dans le tube plein. Bien que moins flagrant que dans le cas de la conductivité électrique, on peut aussi identifier des changements de pH au niveau de la profondeur de déploiement de la pompe et au niveau du passage tube plein – trou nu. Le pH dans l'horizon producteur est proche de 7,8, ce qui est exactement la valeur rapportée sur un prélèvement de 2003, pour une température très proche (21°C)³⁶.
- Le profil de **potentiel redox** est quasiment invariant dans la colonne d'eau, sauf dans la partie qui n'est jamais renouvelée, au-dessus de 34 m de profondeur. On peut juste noter une très légère variation et une tendance à une légère augmentation dans la partie trou nu.
- La concentration en **oxygène dissous** est très rapidement très basse (anoxie), ce qui indique que l'eau souterraine a un temps de trajet suffisamment long pour que sa teneur initiale en O₂ soit abattue par des réactions consommatrices d'oxygène. On notera quelques traces résiduelles en sommet de colonne d'eau, en lien avec la présence d'air dans la partie non-ennoyée de l'ouvrage. Les données rapportées en bibliographie sur des analyses in-situ³⁷ mentionnent une valeur bien plus élevée (7,4 mg.L⁻¹ soit environ 70-75% de saturation dans les conditions de température et conductivité électrique de l'eau) qui est sans doute à relier à une agitation de l'eau.
- Donné à titre illustratif, le profil de **chlorures** n'est guère informatif, étant, comme le redox, quasiment invariant dans la colonne d'eau.

³⁶ Rapport ERM-02-127-FC-AV-190 ; une analyse pratiquée en 2002 donnait un pH de 7,6 à 20°C.

³⁷ Analyses du 12 juin 2013 reportées en annexe du rapport ERM-02-127-FC-AV-190.

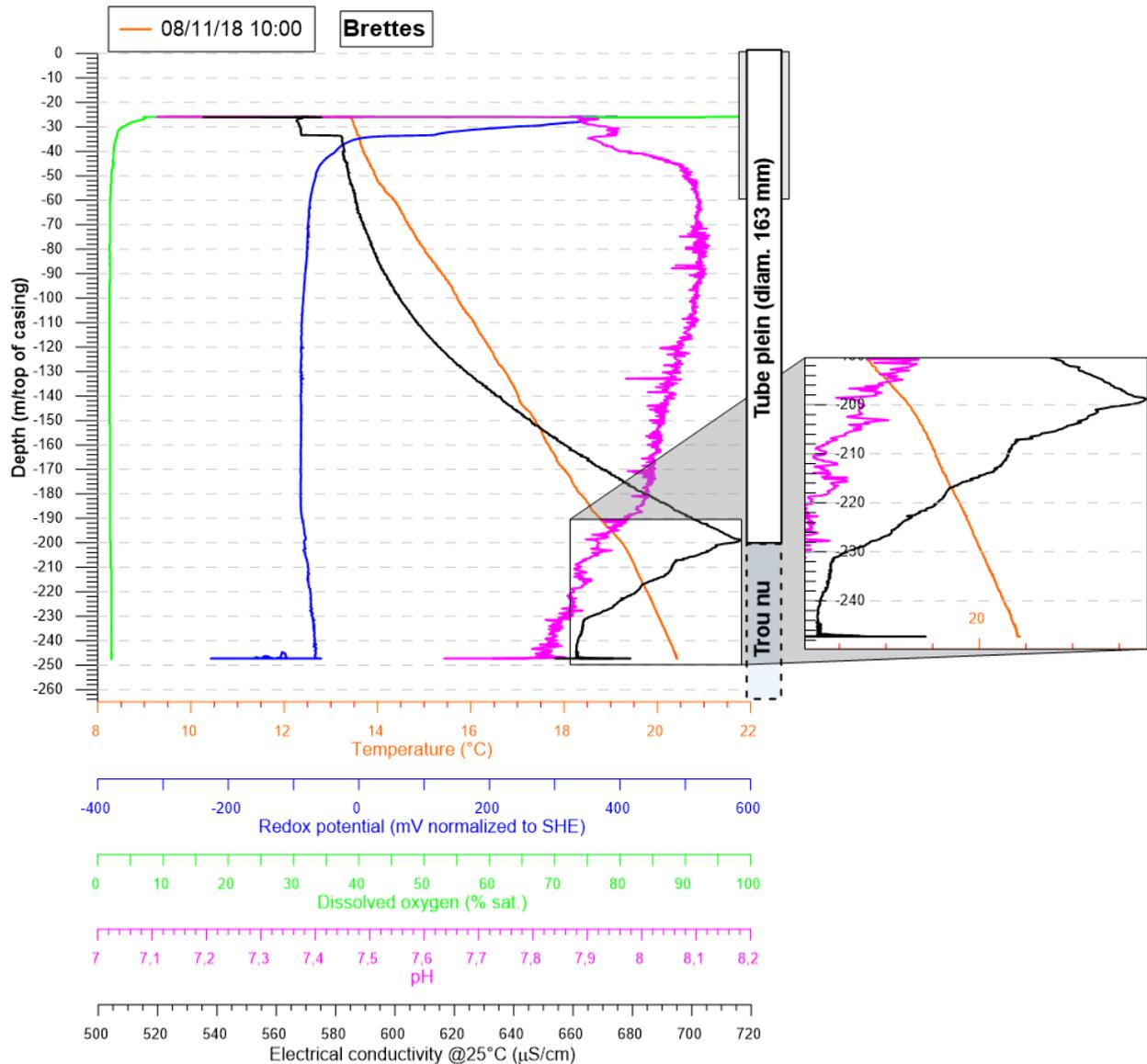


Figure 57 : station de Brettes : diagraphie initiale ; le cartouche présente un détail sur les profils de conductivité électrique et de température à la base du tube plein et dans le trou nu.

A l'issue de cette 1^{ère} diagraphie, une phase de pompage a été entreprise sur plusieurs heures. Les paramètres physico-chimiques ont été suivis à l'exhaure du pompage avec la sonde de diagraphie (voir §6.3), puis une 2^{nde} diagraphie a été réalisée à l'issue de la phase de pompage, pour déterminer la façon dont le renouvellement de l'eau s'était réalisé. On précisera que l'électrode de référence pour la mesure du pH et du potentiel redox a été endommagée durant les acquisitions, aucune valeur pour ces paramètres n'étant donc fournie. Cette 2^{nde} diagraphie est présentée en Figure 58, elle est complétée par une 3^{ème} diagraphie faite le lendemain matin, afin de mieux contraindre l'évolution de l'ouvrage après une quinzaine d'heures sans sollicitation.

Le profil d'**oxygène dissous** après pompage est invariant, confirmant le constat d'absence d'oxygène dans l'eau produite dans le trou nu.

Le profil de **température** après pompage indique que le pompage permet d'homogénéiser la température dans le trou nu, aux alentours de 20-21°C. Lorsque l'eau remonte dans le tube plein, elle se refroidit progressivement, en raison de l'inertie thermique du tube acier. Ainsi, la température n'est plus que de 17°C à l'entrée dans la pompe, à 35 m de profondeur. Plus haut, l'eau n'est pas renouvelée, et en conséquence il existe un gradient thermique très fort (phénomène diffusif). Le profil de température réalisé le lendemain matin montre que le rééquilibrage thermique est un processus rapide dans le trou nu, plus lent dans le tube acier, mais ce phénomène est de toute façon transitoire.

Les profils de **conductivité électrique** sont une fois encore les plus intéressants. Celui réalisé immédiatement après la phase de pompage permet de déterminer que celui-ci a bien renouvelé la colonne d'eau (7 m³ ont été pompés sur une durée de 4h30 – le volume d'eau entre 25 et 264 m de profondeur est de 4,8 m³). Toutefois, le profil de conductivité n'est pas totalement invariant, alors que cela était mis en évidence dans les investigations de 2002, certes concernant des volumes pompés conséquemment supérieurs. En 2018, la production d'eau en-dessous de 240 m de profondeur semble être plus minéralisée (> 600 µS.cm⁻¹), à moins qu'il ne s'agisse d'une influence plus forte des horizons minéralisés profonds (interface sédiments/socle), mais dont il a été établi qu'ils n'avaient qu'une très faible contribution à l'alimentation en eau de l'ouvrage (contribution déterminée à 5% par HydroInvest). Par ailleurs, ce test de pompage avait déterminé, pour des débits bien supérieurs, que la remontée de l'horizon plus conducteur ne se faisait sentir qu'à partir de 250 m de profondeur. Entre 230 m et 235 m de profondeur, un très léger gradient est apparent, mais ne concerne qu'une variabilité de 10 µS.cm⁻¹ (gamme de 570 à 580 µS.cm⁻¹) qui ne représente qu'une variabilité inférieure à 2%, peu significative. En conséquence, il semble que l'eau produite par l'horizon 243-249 m ait une minéralisation plus élevée actuellement (autour de 570 à 580 µS.cm⁻¹ alors qu'elle était proche de 500 µS.cm⁻¹ précédemment). Si l'on considère un fonctionnement de type piston pour la remontée d'eau, avec une production d'eau à 246 m de profondeur (soit 220 m de colonne donc un volume de 4,5 m³), un pompage de 7 m³ doit être suffisant pour amener l'eau de cet horizon de 246 m au niveau de la pompe. C'est ce que la diagraphie post-pompage semble indiquer.

Le profil de conductivité obtenu le lendemain matin permet de déterminer que l'eau renouvelée aux environs du niveau le plus producteur a des caractéristiques physico-chimiques stables sur quelques heures. Par contre, la corrosion du tubage vers 200 m de profondeur a une influence très forte sur le chimisme de l'eau (« re-minéralisation » artificielle très rapide), ce phénomène semblant avoir un impact encore plus rapide sur les horizons en trou nu que sur l'eau présente dans le tube plein. La conductivité est en effet modifiée sur une vingtaine de mètres, puisque ce n'est qu'à partir de 220 m de profondeur que l'on retrouve une valeur conforme à celle mesurée immédiatement après pompage. L'allure de la courbe de conductivité incite même à suggérer qu'il existe un phénomène de drainage vertical de l'eau depuis 200 m de profondeur vers des horizons plus profonds, ce qui pourrait aussi indiquer que des écoulements verticaux se sont mis en place (ceux-ci n'ont pas été constatés dans les investigations précédentes).

Pour conclure, l'obstruction de l'ouvrage aux alentours de 247 m de profondeur semble avoir une incidence sur le chimisme de l'eau. Que l'on considère sa valeur en écoulement naturel (660 µS.cm⁻¹) ou lors du pompage (580 µS.cm⁻¹), la conductivité électrique reste plus élevée que celle constatée, à une profondeur identique, lors de la réalisation du forage (500 µS.cm⁻¹). Il est possible que le blocage rencontré à 247 m impacte la circulation des eaux aux alentours de cette profondeur, par exemple en facilitant une remontée d'eaux plus minéralisées (présentes vers 260 m de profondeur).

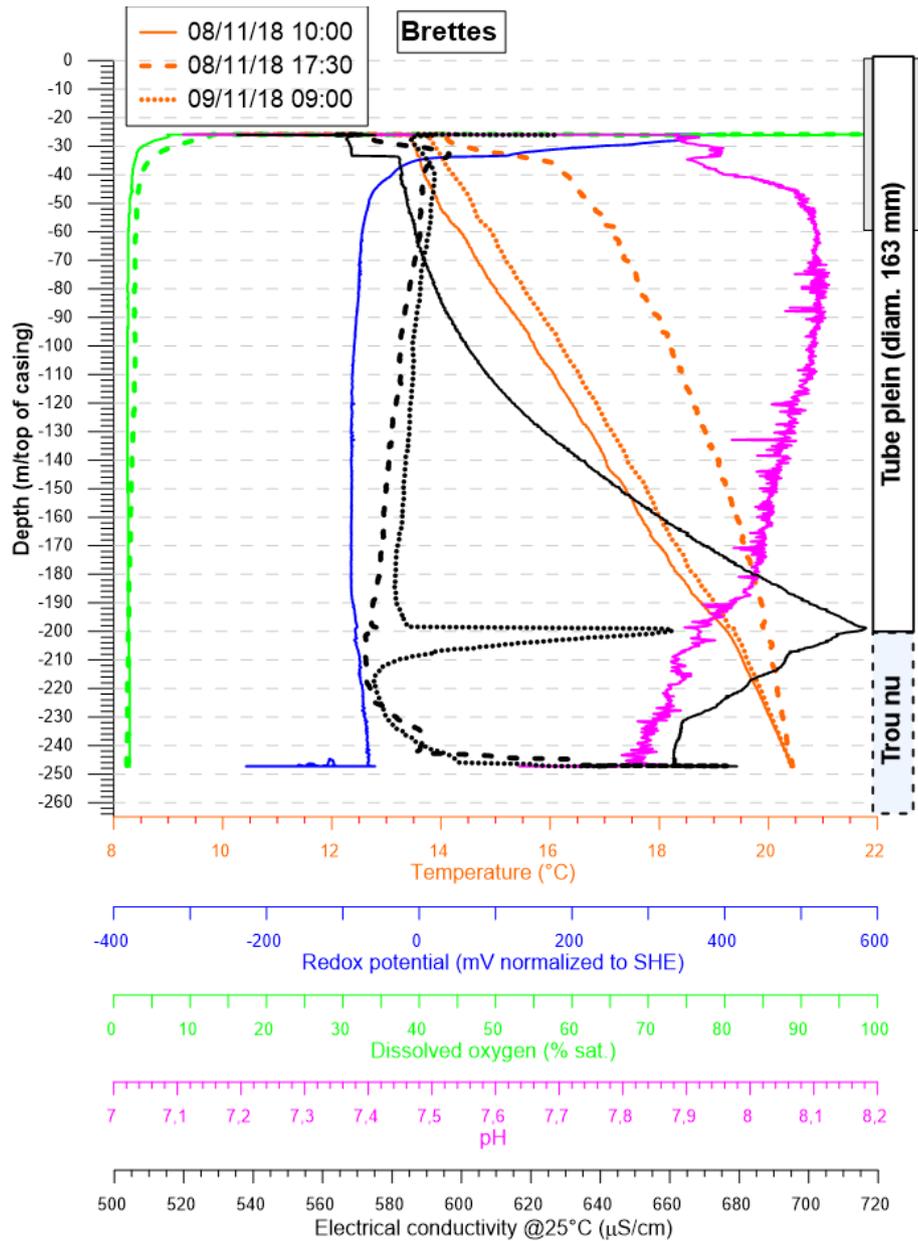


Figure 58 : station de Brettes : diagraphie à l'issue du pompage (08/11/18 – 17:30 ; données en température, conductivité électrique et oxygène dissous) et diagraphie pratiquée le lendemain main (09/11/18 – 09:00 ; données en température et conductivité électrique).

6.3. PRELEVEMENT

Compte tenu de la profondeur de l'ouvrage, il est seulement possible de pratiquer un pompage avec une pompe assez légère (type Grundfos MP1) qui n'a pas les capacités d'être descendue

au droit des crépines³⁸. Pour avoir des conditions comparables à celles utilisées lors du suivi réglementaire, il était aussi important d'adopter une profondeur de pompage similaire, ce qui a été fait en descendant la pompe aux alentours de 35 m de profondeur (par rapport à la surface), ce qui amène à faire le pompage sous environ 10 m de colonne d'eau.

Le pompage a été pratiqué à 3 débits différents sur une durée totale de 4h30. La Figure 59 et la Figure 60 présentent les résultats du suivi pratiqué à l'exhaure avec les boîtiers WTW (méthodologie identique à celle utilisée pour les autres suivis). La Figure 61 présente les acquisitions réalisées avec la sonde Idro316 (pour rappel, l'électrode de référence étant hors service, les données de pH et potentiel redox ne sont pas présentées). Ces figures permettent également d'évaluer les incertitudes de mesure entre différents appareillages. Quatre prélèvements ont été opérés afin de suivre la chronique de pompage et la purge progressive de l'ouvrage, notamment dans le but d'examiner les effets de la corrosion du tubage sur la chimie de l'eau.

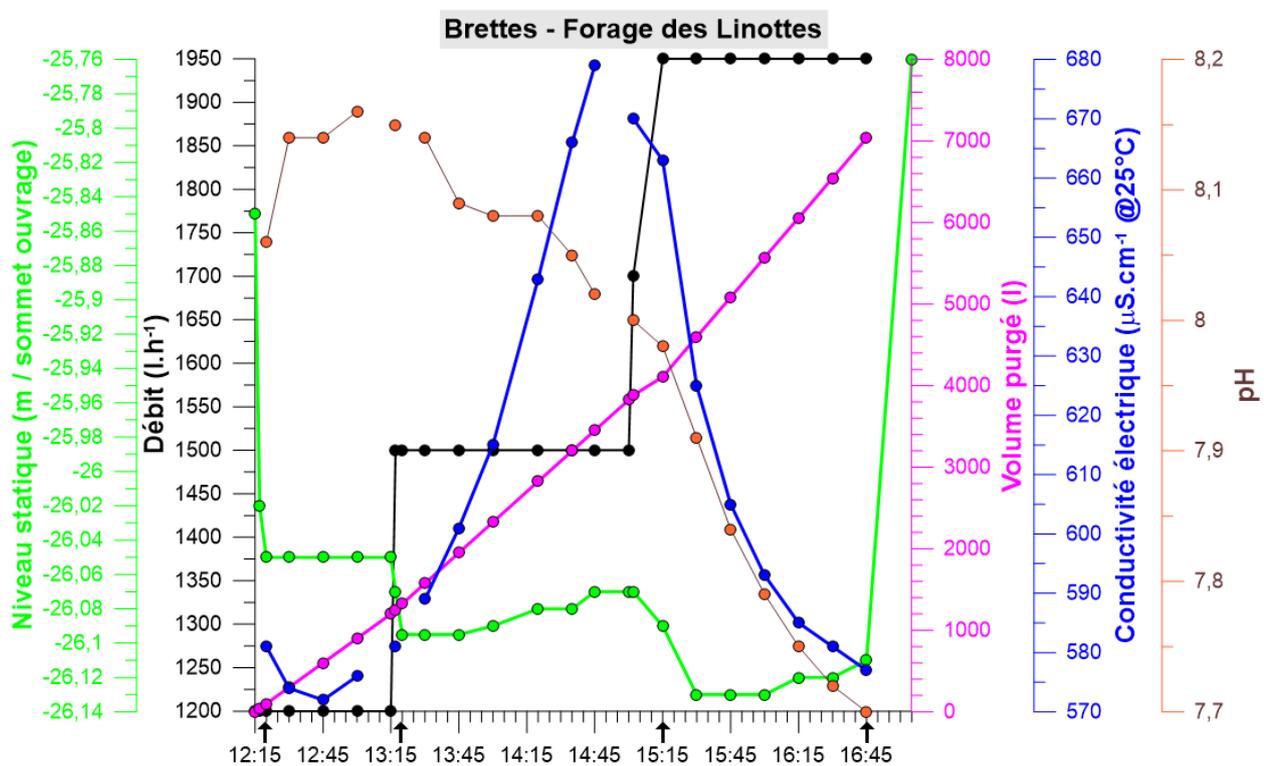


Figure 59 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec boîtiers WTW ; paramètres débit, conductivité électrique et pH ; les flèches indiquent les heures de prélèvement des échantillons.

³⁸ Par construction la profondeur maximale de pompage est de 90 m. Pour cette intervention de Novembre 2018, la pompe utilisée est une version plus ancienne que celle utilisée en Août, ne pouvant pas être descendue à plus de 50 m, mais offrant la possibilité, grâce à un diamètre de tuyau plus gros (type Tricoflex® de 19 mm de diamètre interne), de pomper jusqu'à environ 2 m³.h⁻¹ (les version plus modernes étant limitées à environ 1 m³.h⁻¹ lorsqu'elles sont utilisées avec le tuyau LDPE livré en standard, de 13 mm de diamètre interne).

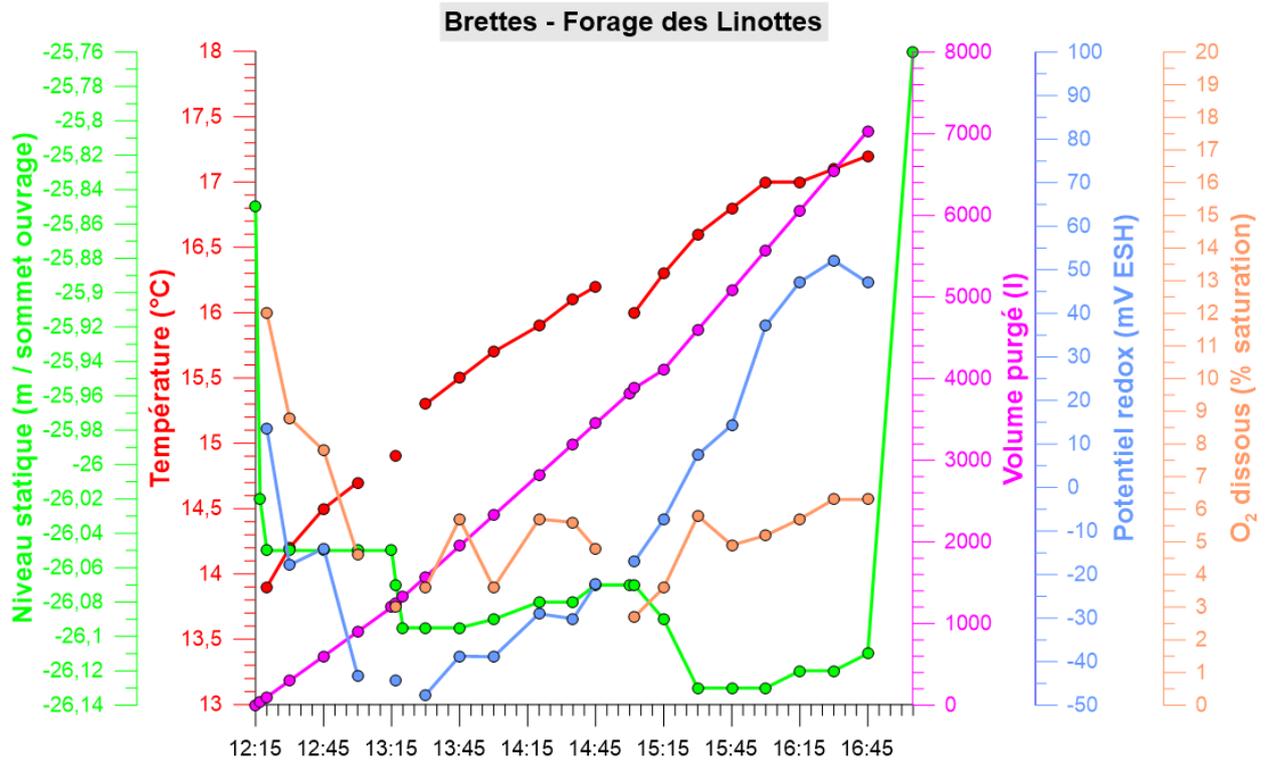


Figure 60 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec boîtiers WTW ; paramètres température, potentiel redox et oxygène dissous.

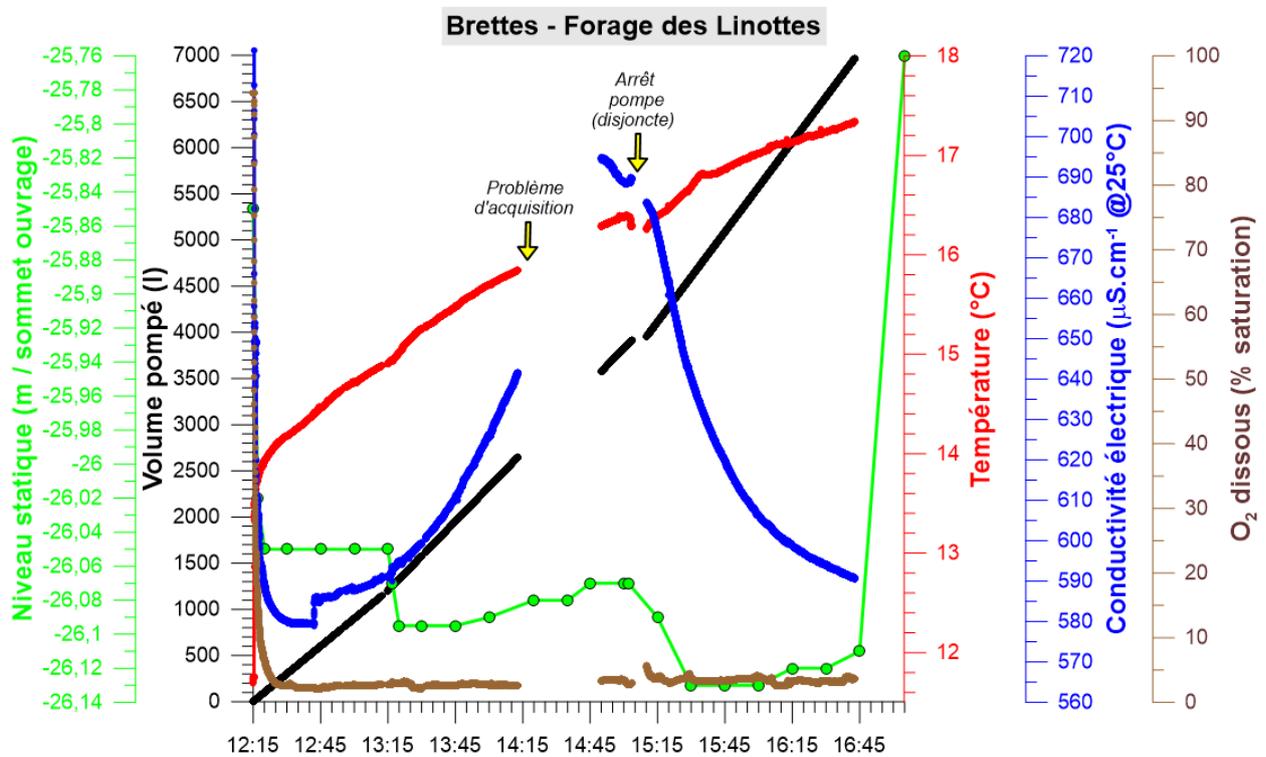


Figure 61 : station de Brettes : suivi du pompage à l'exhaure avec la sonde de datalogger ; paramètres température, conductivité électrique et oxygène dissous.

L'examen comparatif des courbes de volume pompé (et de débit) et des courbes d'évolution du **niveau statique** indique (Figure 59, Figure 60) :

- Qu'un pompage à un peu plus d'1 m³/h induit un rabattement très modéré (20 cm environ) qui se stabilise rapidement ;
- Qu'une hausse du débit de pompage se traduit naturellement par une nouvelle baisse du niveau statique, d'une dizaine de centimètres au maximum ;
- Que sur des durées de pompage longues, à débit constant, on constate une remontée progressive du niveau statique, ce que deux phénomènes peuvent expliquer :
 - o Soit un phénomène de dilatation thermique de la colonne d'eau, celle-ci devenant de plus en plus chaude à mesure que le pompage est opéré. Un tel phénomène peut être suffisant pour expliquer les variations de niveau observées³⁹.
 - o Soit une légère stimulation de la production de l'ouvrage induite par le pompage. Le pompage tel qu'il est pratiqué n'est pas destiné à la stimulation, d'autant que les débits de production déterminés lors des tests initiaux sont supérieurs, avec un débit spécifique à 1 heure de 3 m³.h⁻¹.m⁻¹. L'ouvrage semblant obstrué à 247 m de profondeur, un pompage à un débit supérieur à celui utilisé lors des suivis réglementaires pourrait décolmater certains horizons producteurs dans l'ouvrage, ce qui pourrait indiquer la présence d'un bouchon (?) diminuant la productivité de l'ouvrage.
 - o Une autre conséquence est qu'il n'est pas possible de déterminer, sur un temps court, avec un débit de pompage relativement faible, si cet obstacle en profondeur influe sur la nature de l'eau produite, en favorisant la sollicitation d'horizons différents de ceux sollicités lors des tests de pompage de 2002.
- Qu'à l'issue du pompage, le niveau statique remonte rapidement à un niveau supérieur à celui déterminé avant pompage (une dizaine de centimètres en moins), ce qui est une conséquence de l'arrêt du pompage couplée au phénomène de dilatation thermique de l'eau.
- Ceci fait apparaître l'intérêt que présenterait un contrôle de l'état de l'ouvrage, par exemple par une inspection endoscopique (passage caméra), ce qui permettrait de statuer sur la nature du blocage à 247 m de profondeur et d'examiner l'état du tube acier vers 200 m de profondeur.

Les chroniques obtenues sur les paramètres physico-chimiques suggèrent les remarques suivantes (Figure 59, Figure 60 et Figure 61) :

- La **température** augmente graduellement au cours du pompage. Plutôt qu'un effet de réchauffement lié au fonctionnement de la pompe, il faut invoquer un réchauffement graduel principalement lié au processus de purge du forage, l'eau étant progressivement amenée depuis les horizons producteurs jusqu'à la pompe (modulo le refroidissement induit par le contact avec le tube acier plus froid). C'est également ce qu'indiquait la diaggraphie réalisée juste après le pompage (Figure 58) : la température au niveau de la pompe (35 m de profondeur) était très proche de 17°C. On remarquera qu'un arrêt inopiné de la pompe aux alentours de 15:00 se traduit par un décrochage de la

³⁹ En considérant la compressibilité de l'eau pure et en convertissant la conductivité électrique de l'eau de Brettes en équivalent NaCl, il est possible de calculer un écart de densité entre le niveau statique (0,999632976) et 245 m de profondeur (0,998850489) qui est de l'ordre de 0,078%. Rapporté à la hauteur de colonne d'eau, cet écart de densité peut se traduire par un écart de niveau de l'ordre de 17 cm.

température lorsque le pompage reprend, ce qui souligne combien le refroidissement induit par le tube acier intervient rapidement dès que le mouvement cesse dans la colonne d'eau.

- Le profil de **conductivité électrique** est très similaire à celui observé lors de la diagraphie initiale, et traduit une purge de l'ouvrage qui s'opère selon un fonctionnement de type piston :
 - En début de pompage, on purge progressivement la colonne d'eau présente dans le tube acier, jusqu'à atteindre un pic de conductivité lorsque l'on draine les niveaux proches de 200 m de profondeur. Géométriquement, le volume entre 25,8 et 201 m de profondeur est proche de 3,7 m³. Le pic de conductivité observé sur la Figure 59 intervient après le pompage d'environ 3,5 m³ d'eau, ce qui est très cohérent compte tenu des incertitudes dans la mesure du débit (mesure au seau). Une bonne cohérence est également observée entre les mesures de conductivité faites en fond de trou (720 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et celles opérées à l'exhaure (autour de 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).
 - Ensuite, on draine des eaux venant du trou nu, et la conductivité électrique baisse progressivement, comme ce que l'on pouvait observer dans l'ouvrage au repos (Figure 57). Le volume d'eau de 201 à 247 m de profondeur est d'environ 0,9 m³, celui de 201 à 264 m d'environ 1,2 m³. Après pompage de 4,5 m³ d'eau, la conductivité est proche de 660 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ce qui correspond une nouvelle fois à la mesure faite en diagraphie (Figure 58). On peut donc encore supposer que le fonctionnement est de type piston, et donc que la production d'eau se fait effectivement par des niveaux très proches de 247 m. Ceci concorde également avec les données HydroInvest, indiquant une production majoritaire entre 243 et 249 m, et une production particulièrement notable à 246 m.
 - Pourtant, lorsque l'on poursuit le pompage, la conductivité continue de baisser, pour atteindre en fin de pompage une valeur proche de 580 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, sans doute pas encore asymptotique, mais qui ne semble pas devoir fortement varier ultérieurement si l'on prolonge virtuellement la courbe de conductivité (Figure 59 et Figure 61). Ceci indique que l'eau présente au repos en base d'ouvrage n'est pas directement celle produite par l'aquifère. D'autre part, il ne semble pas que l'on puisse produire une eau à 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, comme celle produite lors des tests de pompage en 2002. Ceci amène à un questionnement sur l'influence du potentiel bouchon à 247 m de fond sur la production d'eau (tant en qualité qu'en quantité).
- Le profil de **pH** est tout à fait conforme à celui qui est attendu si l'on se réfère au fonctionnement de type piston tel que suggéré par la chronique de conductivité. Au début, on pompe une eau à pH plus élevé (8,1), valeur que l'on atteignait vers 80 m de profondeur au repos (Figure 57). Ceci correspond à un volume d'environ 1 m³ à pomper, et c'est bien ce que l'on détermine à la lecture de la Figure 59. Le reste de la chronique du pH mesuré à l'exhaure du pompage n'est qu'une baisse progressive de ce paramètre, avec une valeur finale proche de 7,7. La valeur mesurée au repos à 247 m est légèrement plus élevée (7,8), mais pas assez différente pour qu'il soit possible d'apporter des précisions quant à la sollicitation d'horizons similaires ou différents de ceux déterminés en 2002. L'ensemble de l'aquifère étant carbonaté, il est normal que le pH ne soit pas un critère discriminant ici. Par contre, on peut suggérer que l'eau de l'interface granite/sédiments ne soit pas drainée par le pompage tel qu'il a été fait, car il aurait été vraisemblable que le pH diminue plus nettement (et que la conductivité croisse plus).
- Compte tenu du schéma de fonctionnement ci-avant décrit, les profils d'**oxygène dissous** (Figure 60 et Figure 61) n'apportent pas de contrainte supplémentaire, et montrent surtout des variations qui sont plus à relier à une variation du bruit de fond des électrodes et à une légère influence du pompage, qu'à des variations significatives.
- Enfin, le potentiel redox (Figure 60) varie légèrement, connaissant une baisse au début du pompage puis ensuite une hausse régulière. La diagraphie initiale est compatible avec

cette évolution (Figure 57). Toutefois, mais l'on rentre là dans le champ de la représentativité de la mesure du potentiel redox, on pourra remarquer des valeurs très différentes entre mesure in-situ et mesure en sortie pompage (50 à 100 mV d'écart), ce qui amène à relativiser la précision que l'on peut attendre de ces mesures.

6.4. ANALYSES DE LABORATOIRE

Les différentes analyses réalisées sur l'ouvrage de Brettes sont présentées dans la Figure 62 (éléments majeurs) et dans la Figure 63 (éléments en trace). Pour ce qui concerne les éléments en trace, les analyses pour Co, Cu, Ag, Cd et Pb ne sont pas à considérer car inférieures à la limite de quantification ; de même, les 2 premiers prélèvements sont inférieurs au seuil de quantification pour les éléments Be, Cr et Ni. Pour les éléments majeurs, il en est de même pour NO₂, NO₃, PO₄ et CO₃.

L'eau de la station de Brettes est bicarbonatée calcique magnésienne, quelle que soit la durée de pompage considérée (Figure 62). Conformément à ce que l'on pouvait attendre des chroniques de pompage (Figure 59 et Figure 61), il existe une variabilité chimique, qui se traduit notamment par une variation de conductivité électrique lorsque les eaux de la base du tube plein sont pompées. Ce pompage d'une eau un peu plus minéralisée correspond à l'échantillon prélevé à 15:20. Cette eau est plus riche en HCO₃ (+13%), Ca-Mg-K (+20%), et enfin SO₄ (+32%). Ces éléments ne peuvent pas provenir de la seule interaction avec le tube plein, il est donc vraisemblable qu'il existe un autre niveau aquifère sus-jacent (situé derrière le tube plein, à une profondeur un peu inférieure à 200 m) qui soit drainé par le tube plein et qui vienne contribuer à l'alimentation en eau du forage à la jonction tube plein – trou nu. Cette contribution est très réduite en volume, puisqu'elle est rapidement compensée, lors d'un pompage, par la contribution du niveau producteur principal vers 246 m de profondeur.

Les autres prélèvements (Figure 62), qui correspondent soit à l'eau présente dans le tube plein⁴⁰, soit à l'eau produite par le principal niveau producteur⁴¹, diffèrent assez peu chimiquement : 1% d'écart en HCO₃ et Cl, 2% en Na, autour de 5% en Mg et K, soit une variation non significative analytiquement. D'autres éléments ont des concentrations plus variables dans la colonne d'eau : SO₄ (5,5%), Ca (8%) et surtout SiO₂ (31%) et Fe (53%). Ceci témoigne de l'existence de phénomènes d'interaction entre l'eau et le tube plein : enrichissement artificiel en fer de l'eau dans le tube plein, appauvrissement en Ca, SO₄ et SiO₂ de l'eau dans le tube plein, sans doute à la faveur de précipitation contre le tube (gypse ou anhydrite et silice amorphe). Il est également possible qu'une partie de la variabilité des analyses chimiques provienne de la présence de colloïdes⁴² de petites tailles qui ne sont pas éliminés lors de la filtration sur site (à 0,45 µm).

Cette perte d'information chimique liée à des phénomènes secondaires dans le tube plein est encore plus visible lorsque l'on considère les éléments en trace (Figure 63). Outre l'apport en fer, l'interaction avec le tube plein se traduit par une hausse des concentrations en Cr et Ni dans les eaux y interagissant. Un fort enrichissement en manganèse est également visible (x5). A

⁴⁰ Prélèvement de 12:20 (début de pompage ; eau provenant d'environ 45 m de profondeur) et de 13:20 (après pompage d'environ 1,2 m³ soit une eau provenant d'une profondeur d'environ 100 à 110 m).

⁴¹ Prélèvement de 16:40 (fin de pompage, après soutirage de 7 m³ d'eau).

⁴² Ceci pourrait expliquer que l'eau reste un peu teintée suite à sa filtration ; voir Figure 56.

contrario, d'autres éléments sont appauvris dans les eaux présentes dans le tube plein : c'est le cas pour Ba, Sr, As et surtout Be, qui n'est plus détecté dans le tube plein. Pour Al, le premier prélèvement (12:20) est plus riche, ce qui pourrait résulter d'un possible relargage par le système de pompage – mais il faut rappeler que ce prélèvement n'est jamais à considérer dans le cadre d'un suivi réglementaire, puisqu'aucun critère, tant de volume de purge que de stabilité de paramètres physico-chimiques, n'est respecté. Enfin, on notera que l'eau qui est produite à l'interface tube plein – trou nu est enrichie en lithium, bore et strontium, et que celle produite par le principal horizon producteur est enrichie en baryum et en arsenic (supérieur au seuil de 10 µg/l pour l'eau potable).

Lorsqu'il est sollicité par pompage, l'ouvrage de Brettes semble avoir un fonctionnement assez classique, la purge permettant, à terme, de drainer l'eau provenant du principal horizon producteur. Il convient toutefois de souligner que cette purge doit nécessairement amener à pomper au minimum une fois le volume de la colonne d'eau (à un débit de 1 m³/h, la purge prend environ 4h30). Une purge insuffisante entrainerait le prélèvement soit d'une eau ayant stagné – et interagi – avec le tube plein, soit d'une eau qui provient de l'horizon existant à la jonction entre le tube plein et le trou nu – dont la chimie est plus minéralisée. Dans les deux cas, l'échantillonnage serait biaisé.



Figure 62 : station de Brettes : analyses chimiques sur éléments majeurs (en mg/L ; ne sont pas représentés les éléments inférieurs à la limite de quantification : NO₂<0,01 mg/L ; NO₃<0,5 mg/L ; PO₄<0,05 mg/L ; CO₃<10 mg/L).

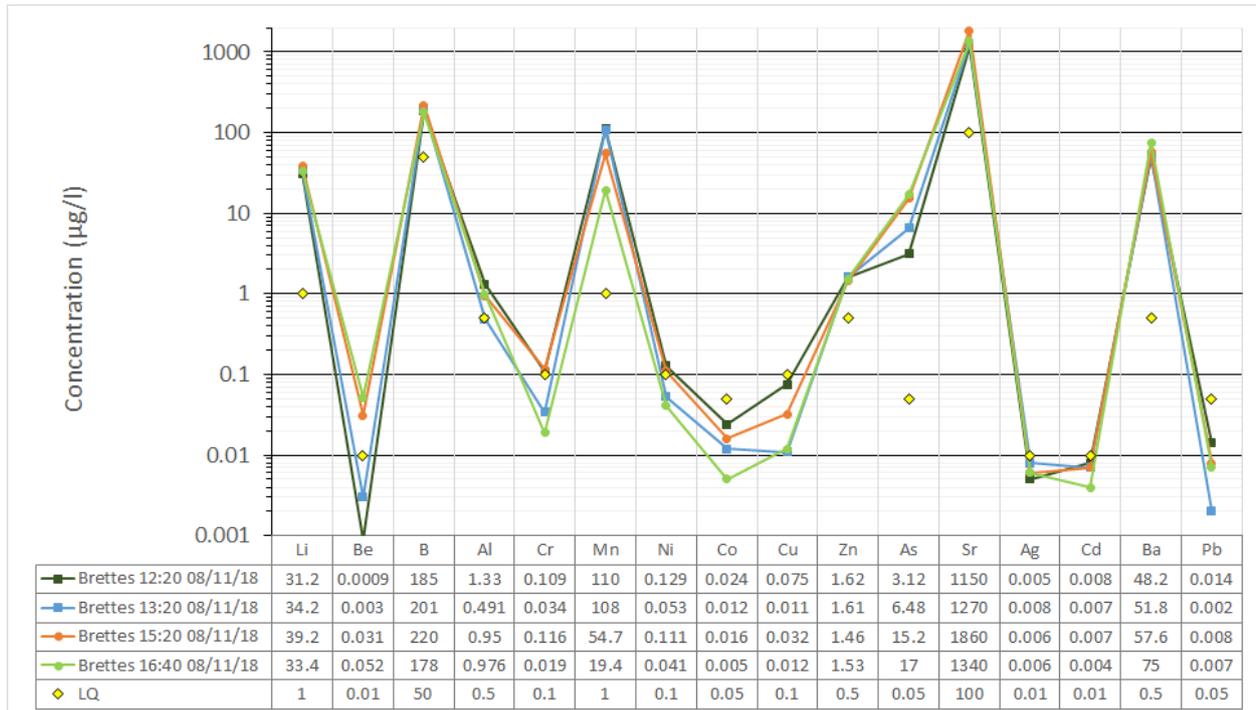


Figure 63 : station de Brettes : analyses chimiques sur éléments traces (en µg/L). Les données inférieures à la limite de quantification (LQ), pour les éléments Be, Cr, Ni, Co, Cu, Ag, Cd et Pb, sont uniquement présentées à titre indicatif (données qualitatives).

6.5. CONSEQUENCES SUR LES RESULTATS DE SURVEILLANCE REGLEMENTAIRE

La station de Brettes présente la particularité de ne pouvoir être échantillonnée en respectant les protocoles d'usage, tant pour la profondeur de mise en place de la pompe que pour le volume d'eau à pomper. Le forage est en effet trop profond pour disposer la pompe en face des niveaux producteurs (dans la partie en trou nu), et son volume est trop conséquent pour pouvoir être purgé plusieurs fois en un temps relativement court avec des pompes à débit relativement faible. Il paraît difficile de recommander de purger 3 fois un volume d'environ 4 m³, ce qui, à un débit de 1 m³.h⁻¹, prendrait un temps peu compatible avec la réglementation du travail.

Les prélèvements réglementaires semblent opérés actuellement en purgeant une fois le volume de la colonne d'eau. Cette étude permet de montrer que le protocole paraît tout juste suffisant pour parvenir à échantillonner une eau issue d'une profondeur correspondant à celle des niveaux producteurs, sans que l'on soit sûr de réellement stimuler⁴³ la production d'eau dans ces horizons. En effet, le pompage pratiqué en Novembre dans le cadre de cette action a porté sur un volume supérieur (environ 1,5 fois le volume de la colonne d'eau), et les suivis de l'exhaure démontrent que la représentativité n'est sans doute pas encore complètement atteinte (les chroniques de pH

⁴³ Par stimuler l'on n'entend pas pratiquer un test de pompage, l'on veut seulement souligner le fait de produire une eau en sollicitant la production par les horizons producteurs sur une certaine durée, qui permet de dépasser le stade du simple remplacement d'une fois le volume d'eau présent dans le trou nu.

ou de conductivité électrique n'ont pas atteint une valeur asymptotique), alors même que la stabilité des paramètres physico-chimiques peut être atteinte sur 3 mesures consécutives réalisées sur 10 minutes voire sur une durée plus longue⁴⁴. Par ailleurs, il paraît indispensable de pomper un volume minimum d'environ 4 m³ afin de s'assurer que l'on purge l'eau présente à la jonction entre le tube acier et le trou nu, car des phénomènes d'interaction avec le tubage y ont cours.

Le suivi réglementaire de ce forage étant récent (2016), le recul sur la variabilité potentielle de la chimie de l'eau est sans doute trop faible pour déterminer si une variabilité existe dans ces chroniques, auquel cas une source de cette variabilité pourrait être à rechercher du côté de cette représentativité sans doute améliorable du prélèvement.

⁴⁴ Ce qui constitue un critère de stabilité pouvant permettre de déclencher un prélèvement. En référence à la Figure 59 et à la Figure 61 : entre 16:30 et 16:45, la température varie de 0,1°C (17,1 à 17,2°C ; critère de stabilité sur 10 minutes : variation inférieure à 0,2°C) ; le pH varie de 0,02 unité (7,72 à 7,7 ; critère de stabilité sur 10 minutes : variation inférieure à 0,05 unité) ; la conductivité varie de 0,7% (581 à 577 µS.cm⁻¹; critère de stabilité sur 10 minutes : variation inférieure à 2%).

7. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'illustrer, sur quelques stations de réseaux de surveillance des eaux souterraines, les possibles difficultés liées à la présence d'hétérogénéité verticale des masses d'eau, l'intérêt des techniques de diagraphie physico-chimique et les enseignements à en tirer concernant les recommandations pour les opérations d'échantillonnage.

L'étude, réalisée sur 2017 et 2018, s'est intéressée à plusieurs types de stations choisies dans les bassins Adour Garonne et Loire Bretagne, pour lesquelles des doutes et questions se posent sur la représentativité des prélèvements réalisés :

- Trois ouvrages peu profonds mais de large diamètre. Ces stations sont caractérisées par de très gros volumes d'eau entraînant des difficultés à respecter les recommandations techniques de purge de l'ouvrage.
- Cinq stations pour lesquelles l'agence de l'eau s'interrogeait quant à la cohérence de certaines données de surveillance. Ces stations se sont avérées être des stations plus traditionnelles (puits AEP, puits de ferme, ...)
- Une station caractérisée par une très grande profondeur (plus de 200 m). Sur cette station la problématique vient de l'impossibilité actuelle de positionner une pompe au droit de la zone crépinée et de l'importance du volume à purger.

La méthodologie a consisté à réaliser, sur toutes ces stations, des profils de diagraphies physico-chimiques sur les paramètres température, conductivité électrique, pH, potentiel redox et oxygène dissous, et de donc de suivre l'évolution de ces paramètres dans les ouvrages en fonction de la profondeur. En complément, sur certaines stations, des séquences de pompages à différentes profondeurs ou à débit variable ont été réalisées, afin de mieux comprendre le fonctionnement des ouvrages et de déterminer si une partie de la variabilité temporelle des chroniques de surveillance pouvait être expliquée par la réponse de l'ouvrage lorsqu'il est sollicité. Quelques échantillonnages, destinés à l'analyse au laboratoire des concentrations en éléments majeurs et métaux traces, ont également été réalisés sur certains sites, afin de déterminer les variations du chimisme de l'eau et compléter les suivis de paramètres physico-chimiques par diagraphie.

Concernant les trois ouvrages de gros diamètre, il n'a pas été constaté l'existence d'hétérogénéités latérales significatives des paramètres physico-chimiques, ce qui indique que l'implantation du dispositif de pompage, même si elle varie dans le temps, n'a sans doute pas un impact fort sur les mesures et sur les analyses chimiques subséquentes. Par contre, même lorsque la colonne d'eau n'atteint que quelques mètres d'épaisseur dans un ouvrage (de gros diamètre), il est possible de mettre en évidence des hétérogénéités en fonction de la profondeur. Certaines évolutions sont classiques, comme celle de la température, qui peut être influencée, dans la partie supérieure de la colonne d'eau, par la température de l'air sus-jacent et/ou la température du cuvelage formant l'ouvrage. D'autres évolutions sont sans doute moins communément connues, mais ont été relevées sur plusieurs stations et par exemple à la station de Layrac-sur-Tarn. La conductivité électrique dans cet ouvrage est ainsi variable selon la profondeur que l'on considère, moins forte au sommet de la colonne d'eau, augmentant graduellement sur quelques mètres, avant d'atteindre une valeur stable dans les derniers 1,5 m de l'ouvrage. Le pH évolue aussi dans la colonne d'eau, des valeurs stables (et proches de la neutralité) n'étant également atteintes qu'en base d'ouvrage. L'existence de tels contrastes pour des hauteurs d'eau réduites (un peu plus de 3 m) souligne combien il est important de positionner

les dispositifs de pompage au plus bas (en maintenant cependant une zone tampon avec le fond) afin, dans le cas présent, de s'assurer que l'on pompe préférentiellement des eaux issues de la base de l'ouvrage, le cuvelage n'étant pas crépiné. Les eaux présentes dans la partie supérieure du cuvelage peuvent en effet être diluées par des infiltrations d'eaux moins minéralisées ou des ruissellements depuis la surface.

La typologie des ouvrages suivis en 2018 est plus diverse. Les stations de La Guerche sur l'Aubois, d'Estivareilles et de Vatan sont des AEP assez peu profonds, la station de La Pérouille est un puits d'environ 15 m de profondeur, la station de Suèvres est un petit forage de moins de 8 m de profondeur, et la station de Brettes est un forage très profond de plus de 260 m. Il en ressort des caractéristiques et des comportements très variables d'un ouvrage à l'autre.

Pour trois de ces stations (La Guerche sur l'Aubois, Estivareilles et Vatan), des stratifications faibles des ouvrages peuvent être notées, notamment avant pompage. Ces stratifications ne semblent cependant pas de nature à remettre en cause la représentativité des échantillonnages si ceux-ci sont réalisés dans le respect des recommandations habituelles, à savoir un positionnement des pompes en bas d'ouvrage, et une purge préalable à l'échantillonnage. Dans le cadre de cette étude, des échantillonnages au seau et au bailer ont été réalisés sur deux de ces sites, en cohérence avec des indications de la fiche station. Ces modes d'échantillonnage ne permettent d'accéder qu'à des horizons superficiels et sont donc à proscrire notamment compte tenu des stratifications, mêmes faibles, observées. Ils sont d'ailleurs proscrits par défaut dans les recommandations AQUAREF sur l'échantillonnage en eau souterraine dans le cadre des programmes de surveillance de la Directive Cadre Eau. Malgré les indications sur les fiches station, il n'est pas possible d'affirmer que les prélèvements actuels soient faits selon ces modes d'échantillonnage. Sur un des ouvrages, le gestionnaire a mis en place récemment un piquage entre le puits et la station de pompage afin de simplifier les échantillonnages. Dans l'absolu, cette solution pourrait être pertinente car elle permet de profiter d'un pompage à haut débit assurant un renouvellement suffisant du fluide. Cependant, les matériaux utilisés pour la réalisation du piquage devront être discutés avec le gestionnaire car ils peuvent induire des risques de contamination (laiton, plastique).

Le cas des 3 autres stations s'est avéré plus complexe.

Le puits de La Pérouille-Perturbault (15 m de profondeur dont 6 m de colonne d'eau) est à paroi de pierres maçonnées. Il est donc possible que l'alimentation en eau se fasse à n'importe quel niveau (par le fond, mais aussi en latéral, avec éventuellement des contributions par ruissellement depuis la surface lors de fortes précipitations). Des pompages séquentiels ont été réalisés, entrecoupés par des acquisitions de profils physico-chimiques. Les diagraphies ont mis en évidence des variations de température en fonction de la profondeur, mais aussi des variations de conductivité électrique et de pH, assez complexes. Ces variations semblent permettre d'individualiser plusieurs compartiments (paramètre stable) séparés par des zones de gradient (augmentation ou diminution du paramètre). Ces contrastes de physico-chimie dans la colonne d'eau semblent persistants, y compris après pompage. Les résultats obtenus durant les pompages suggèrent que les niveaux supérieurs de la colonne d'eau sont sans doute peu ou pas productifs. A partir de 3 à 4 m de colonne d'eau, la production de l'aquifère semble plus élevée, et devient plus forte vers la base de l'ouvrage, ce qui indique, en conditions de basses eaux, que ces sont les horizons profonds qui alimentent principalement le puits. Conséquence d'une structuration complexe de la colonne d'eau, le chimisme est également variable d'un horizon à l'autre, et cette structuration de l'eau dans le puits est peu modifiée par la réalisation de pompages à plusieurs profondeurs. Il semble que les prélèvements opérés avec la pompe à demeure soient plus riches en Cu et Zn, ce qui pourrait indiquer la présence d'un alliage à base de cuivre dans le circuit de pompage. Compte tenu de la structuration marquée de ce puits, des doutes subsistent quant à la représentativité des échantillonnages réalisés avec la pompe en place,

positionnée approximativement au milieu de la colonne d'eau. En effet, la chimie observée au fond du puits étant sans doute la plus représentative de la chimie de la masse d'eau, il faudrait sans doute privilégier un positionnement de la pompe plus bas dans l'ouvrage, qui permettrait de solliciter l'horizon profond sur des durées de pompage acceptables. Actuellement, la purge de trois fois le volume de la colonne d'eau avec la pompe en place est difficilement envisageable (durée proche de 19 heures, débit de 720 L/h). Les données de diagraphie suggèrent par ailleurs qu'une durée minimale de pompage de 8h30, avec la pompe en place, serait nécessaire pour espérer drainer à l'exhaure l'eau produite par le fond de l'ouvrage (volume à extraire de 6,25 m³, soit environ 1,4 fois le volume de la colonne d'eau).

Le forage de Suèvres, peu profond (7,6 m), présente également des variations de température dans la colonne d'eau et des variations de conductivité électrique qui suggèrent, au repos, la possible existence de deux niveaux de conductivité différente. En complément des diagraphies, les essais de pompages à différentes profondeurs ont mis en évidence un schéma de fonctionnement très complexe pour un forage peu profond, ce qui conduit à se poser des questions sur les niveaux de pompage les plus adaptés pour viser la représentativité. Des variations de composition chimique fortes existent également en fonction de la profondeur. Le débit de pompage, et la profondeur de déploiement de la pompe, pourront induire la sollicitation d'horizons peu productifs et peu conducteurs (faible débit), ou, à l'opposé, provoquer leur épuisement rapide et ne solliciter que les horizons plus producteurs et plus conducteurs. De plus, les investigations ont été réalisées en fin de période estivale, avec un étiage marqué. Elles ne présagent pas des évolutions pouvant exister durant l'année. Pour cette station, il ne serait donc pas étonnant de trouver une variabilité temporelle assez importante dans les données du suivi réglementaire, en lien, au moins partiellement, avec les modalités de mise en œuvre de l'échantillonnage.

Le forage le plus profond étudié (forage de Brettes – 247 m atteints lors des investigations), montre un profil de conductivité électrique au repos avec de très fortes variations : augmentation constante jusqu'à la base du tube métallique plein (vers 200 m), puis stabilisation progressive dans le trou nu, jusqu'au fond de l'ouvrage où se situent les niveaux producteurs (vers 243-247 m). Dans le tube plein, les variations observées sont le signe d'une corrosion importante de l'ouvrage. Une diagraphie effectuée 15h après la fin de pompage montre que l'influence de la corrosion est relativement rapide, à la fois dans le tube plein mais aussi vers les horizons inférieurs. L'allure de la courbe de conductivité incite même à suggérer qu'il existe un phénomène de drainance verticale de l'eau depuis 200 m de profondeur vers des horizons plus profonds, ce qui pourrait aussi indiquer que des écoulements verticaux se sont mis en place. La station de Brettes présente la particularité de ne pouvoir être échantillonnée en respectant les protocoles d'usage, tant pour la profondeur de déploiement de la pompe, située habituellement vers 35 m de profondeur, nettement au-dessus du trou nu et des horizons producteurs, que pour le volume d'eau à pomper (volume trop conséquent pour pouvoir être pompé en un temps court avec des pompes à débit relativement faible). Les prélèvements de surveillance réglementaire sont opérés en purgeant environ une fois le volume de la colonne d'eau (contre 3 recommandés). Ce protocole paraît tout juste suffisant pour parvenir à échantillonner une eau issue d'une profondeur correspondant à celle des niveaux producteurs. Le pompage pratiqué durant cette étude a porté sur un volume supérieur d'environ 1,5 fois le volume de la colonne d'eau, et les suivis de l'exhaure démontrent que la représentativité n'est sans doute pas encore totalement atteinte, alors même que la stabilité des paramètres physico-chimiques peut être atteinte sur 3 mesures consécutives réalisées sur 10 minutes voire sur une durée plus longue. Il paraît indispensable de pomper un volume minimum d'environ 4 m³ afin de s'assurer que l'on purge l'eau présente à la jonction entre le tube acier et le trou nu, car des phénomènes d'interaction avec le tubage y ont cours.

Parmi les conclusions de l'étude, en marge des objectifs initiaux, plusieurs constatations d'erreurs, de doutes quant aux localisations exactes des points de prélèvement ont été relevées, liées à la fiche station ou au référencement BSS... Elles permettent de rappeler que l'identification sans ambiguïté du point à échantillonner reste le premier objectif du gestionnaire et de l'opérateur sur le terrain.

En résumé, cette étude a permis, sur quelques stations choisies de façon relativement aléatoire, d'illustrer le type d'information qui peut être apporté par la réalisation de diagraphies physico-chimiques, notamment en termes de connaissance des stations. De façon générale, sur 6 des 9 stations étudiées, même si ces diagraphies ont mis en évidence des stratifications de la colonne d'eau, principalement au repos, elles ne conduisent pas à conclure à un impact sur les données de surveillance pour autant que les recommandations techniques sur l'échantillonnage soient correctement suivies (positionnement de la pompe, critères de purge). A l'inverse, pour les 3 autres stations, des comportements complexes ou des spécificités d'ouvrage semblent de nature à induire des variabilités sur les données de surveillance (en éléments en traces, mais possiblement sur d'autres analytes), au-delà de la simple variation temporelle des masses d'eau.

L'objectif n'est pas de recommander de généraliser ce type d'opérations de diagraphie sur l'ensemble des stations de surveillance. Il est plutôt d'illustrer les potentialités offertes par l'outil et de suggérer qu'il soit utilisé, au cas par cas (par exemple dans les contextes suivants : ouvrages anciens, absence de coupe, ouvrages très profonds, stations montrant des chroniques temporelles difficilement exploitables, nouveaux ouvrages intégrés au réseau de surveillance...) afin d'améliorer ou de confirmer la représentativité des données de surveillance.

8. Références

- Anderson, M.P., 2005. Heat as a Ground Water Tracer. *Groundwater* 43(6), 951–968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>.
- Church, P.E., Granato, G.E., 1996. Bias in Ground-Water Data Caused by Well-Bore Flow in Long-Screen Wells. *Groundwater* 34(2), 262–273. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb01886.x>.
- Mayo, A.L., 2010. Ambient Well-Bore Mixing, Aquifer Cross-Contamination, Pumping Stress, and Water Quality from Long-Screened Wells: What Is Sampled and What Is Not? *Hydrogeology Journal* 18(4), 823–837. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0568-2>.
- McMillan, L. A., Rivett, M.O., Tellam, J.H., Dumble, P., Sharp, H., 2014. Influence of Vertical Flows in Wells on Groundwater Sampling. *Journal of Contaminant Hydrology* 169, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2014.05.005>.
- McMillan, L.A., Rivett, M.O., Tellam, J.H., Dumble, P., 2015. Groundwater Quality Sampling at Contaminated Sites: The Long And The Short Of It, <https://www.envirotech-online.com/article/water-wastewater/9/in-situ-inc/groundwater-quality-sampling-at-contaminated-sites-the-long-and-the-short-of-it/1827/download>.

9. Annexes

Incertitudes relatives à la nomenclature des ouvrages

9.1. STATION DE LA GUERCHE SUR L'AUBOIS

Les données de la fiche station indiquent comme point de prélèvement (croix rouge dans la Figure 64) un bâtiment dans lequel sont regroupées plusieurs pompes et conduites, qui permettent de prélever dans plusieurs ouvrages et d'envoyer l'eau au château d'eau voisin. S'il est vrai que l'eau du point de suivi réglementaire peut être prélevée directement sur un point de piquage dans ce bâtiment (ce qui est pratiqué lors des prélèvements de routine, comme indiqué par le responsable technique de la commune), au sens strict, ce piquage ne correspond pas à l'implantation physique du puits (le bâtiment permet de centraliser plusieurs tranchées drainantes).

L'autre point d'achoppement réside dans la nomenclature BSS du point de suivi : si la BSS attribue effectivement le n° 05481X002/P1EAP (BSS001LTPA) au point situé au niveau de la croix rouge (Figure 64), le point sur lequel le suivi est fait (cercle de bleu dans la Figure 64) n'a pas cette codification. En conséquence, le suivi est pratiqué sur l'eau provenant d'un autre ouvrage, de référence 05481X0013/P2EAP (BSS001LTPM). Ce point est dénommé PN1 par les services techniques de la commune. Il existe aussi deux ouvrages P1 et P2 implantés au Sud de la parcelle. L'ouvrage P2 est équipé d'une pompe à demeure, et fait l'objet d'un suivi par prélèvement direct au château d'eau, les pompes des autres ouvrages étant alors mises à l'arrêt. L'ouvrage P1 ne semble pas avoir été récemment suivi.

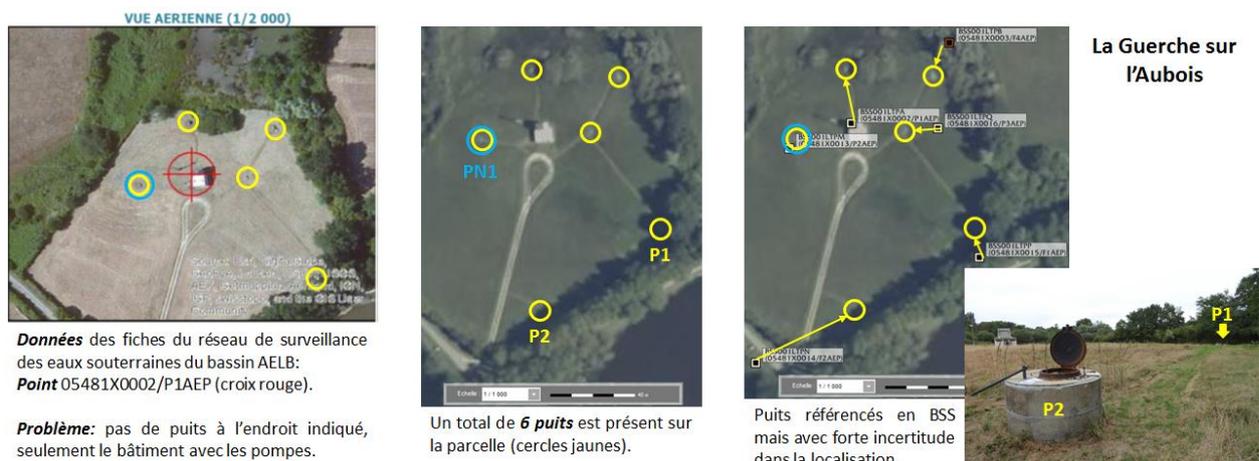


Figure 64 : La Guerche sur l'Aubois : implantation des ouvrages (cercles jaunes) et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire (cercle bleu).

9.2. STATION D'ESTIVAREILLES

On retrouve pour cette station un problème de localisation et de nomenclature. La Figure 65 présente la localisation supposée du point de prélèvement (croix rouge) et la localisation du point BSS correspondant au puits n°16 (cercle noir). De nombreux ouvrages sont présents en bordure du Cher. La localisation du puits n°16 ne prête guère à confusion, tant sur la base des indications fournies par le personnel technique de la station de pompage que sur la base de l'identification par affichage du numéro sur le cuvelage de l'ouvrage (Figure 22). Il semble donc qu'il y ait mauvaise attribution de l'ouvrage, celle-ci ayant sans doute été basée sur la numérotation de la BSS. L'ouvrage faisant l'objet du suivi est donc le 06191X0088/P5 (BSS001PUJEE) et non le 06191X0137/P16.

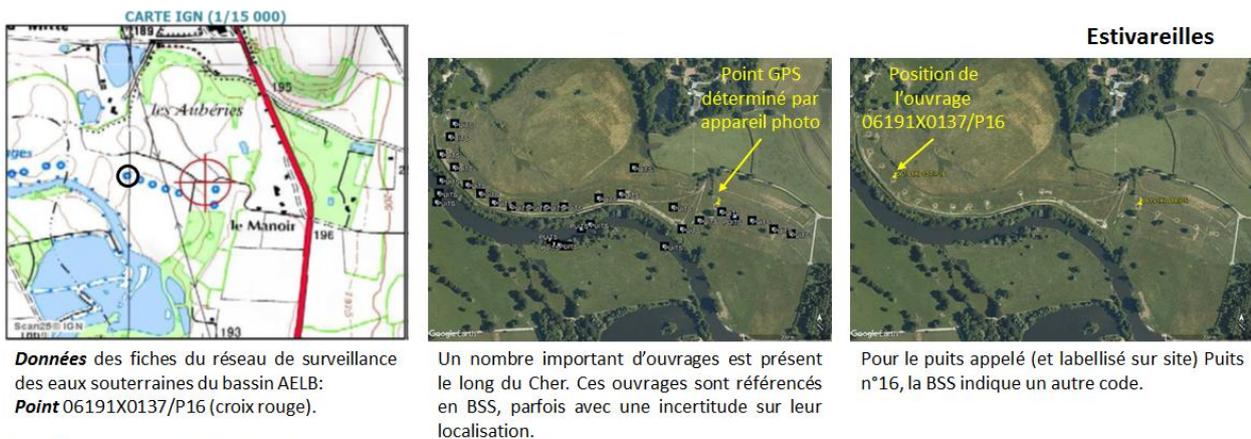


Figure 65 : Estivareilles : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire.

9.3. STATION DE LA PERUILLE – PERTURBRAULT

Pour cette station, il n'y a pas de confusion possible quant à la localisation de l'ouvrage du réseau de surveillance. La BSS rapporte l'existence de 2 autres ouvrages proches, mais qui sont des forages (Figure 66).

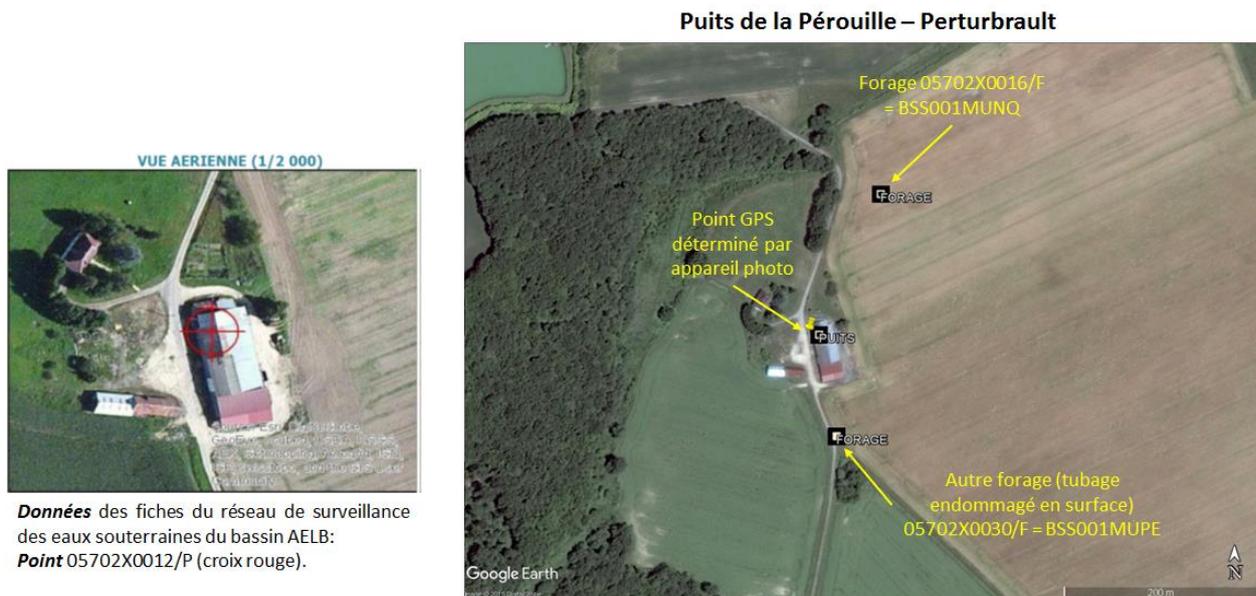


Figure 66 : La Pérouille : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire.

9.4. STATION DE VATAN – AEP DE LA SOURCE DES SEIGNEURS

Pour cette station, la référence BSS est correcte, mais la localisation n'est pas tout à fait adéquate. Comme pour la station de La Guerche sur l'Aubois, la localisation reportée dans la fiche station correspond à celle de la station de pompage, qui n'est pas physiquement le lieu où est implanté l'ouvrage. Celui-ci est cis quelques centaines de mètres plus au Nord (Figure 67). Par contre, le rattachement au code BSS 05185X0005/HYAEP (BSS001KFRR) est correct. On signalera également que le nouveau concessionnaire gérant l'alimentation en eau de la ville de Vatan⁴⁵ a très récemment implanté au point de piquage sur la canalisation reliant l'ouvrage à la station de pompage (Figure 67). Ce point de piquage est constitué d'un tubage plastique rigide muni à son extrémité d'un robinet laiton. Les prélèvements réglementaires n'ont encore jamais été fait via ce piquage. Compte tenu des risques de contamination liés à l'utilisation du laiton, il semble nécessaire d'échanger avec le gestionnaire afin d'étudier, par exemple, le remplacement du laiton par de l'inox. Le tubage plastique peut également être source de contamination.

⁴⁵ La SAUR, en remplacement de la Lyonnaise des Eaux.



Données des fiches du réseau de surveillance des eaux souterraines du bassin AELB:
Point 05185X0005/HYAEP (croix rouge).

Problème: l'endroit indiqué correspond à la station de pompage, pas à la source.

À la station de pompage, la BSS mentionne l'existence d'un forage 05185X0040/FAEP (BSS001KFTC), qui n'est pas celui faisant l'objet de la surveillance réglementaire. Toutefois, une canalisation provenant de la source arrive à la station de pompage: un regard existe, sur lequel un point de piquage avec un robinet en laiton a été implanté mi-2018.

Figure 67 : Vatan : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire.

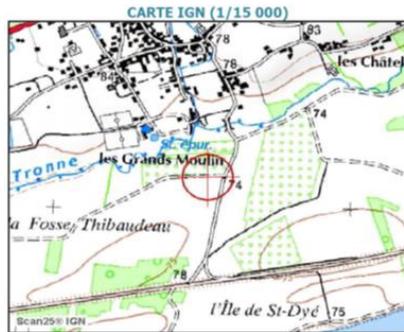
9.5. STATION DE SUEVRES

La fiche station de Suèvres présente également des incertitudes. La localisation cartographique (croix rouge, Figure 68) et la description de l'accès sont corrects et correspondent bien au point faisant l'objet d'une surveillance, ainsi que nous l'a confirmé l'exploitant agricole utilisant ce forage. Par contre, le code BSS et le nom attribué à cet ouvrage ne sont pas corrects.

Le nom et le code actuellement attribués⁴⁶ sont ceux d'un ouvrage qui est implanté plus au Sud (Figure 68), en bordure de la levée bordant la Loire. Le nom et le code qui sont à attribuer sont respectivement celui de la Fosse Thibaudeau et 04291X0065/P (BSS001DUPU). De plus, le « vrai » Puits de la Boire ne fait que 2,85 m de profondeur et présentait, en 1982, des indices de contamination probable liés à la proximité avec une sablière (données BSS).

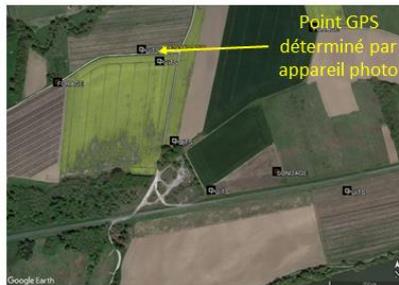
Il faut également mentionner que les données ADES attribuent, de manière erronée, les mesures réalisées à la Fosse Thibaudeau à des mesures faites au Puits de la Boire.

⁴⁶ Puits de la Boire, code 04291X0068/P (BSS001DUPX).



Données des fiches du réseau de surveillance des eaux souterraines du bassin AELB:
Point 04291X0068/P (croix rouge).

Problème: l'endroit indiqué ne correspond pas au puits de la Boire, mais au puits de la Fosse Thibaudeau.



Plusieurs ouvrages sont présents en bordure de Loire. La BSS en référence 2 au voisinage immédiat du point localisé en GPS (incertitude de localisation dans la BSS) mais un seul correspond à la description.

Puits de la fosse Thibaudeau (Suèvres)



Ce puits est le celui de la Fosse Thibaudeau; le puits de la Boire est plus au Sud, tout contre la levée. Il n'est plus utilisé (la BSS indique qu'il peut être submergé lors de crues).

Figure 68 : Suèvres : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire.

9.6. STATION DE BRETTE

La fiche station pour l'ouvrage de Brettes n'a pas été consultée. Néanmoins, des incohérences sont apparues en consultant la BSS. Celles-ci sont synthétisées dans la Figure 69. Il n'existe physiquement qu'un seul ouvrage sur la parcelle, mais deux numéros avaient été attribués dans la BSS, avec de surcroît deux implantations différentes, distantes d'environ 40 m. Des documents différents étaient affectés à chacun des ouvrages, mais ils correspondaient dans un cas au rapport d'implantation de l'ouvrage, et dans le second au rapport présentant les résultats des tests de pompage – le 1^{er} rapport citant par ailleurs les résultats du 2nd rapport. Les coupes techniques étaient également strictement identiques. En toute évidence, toutes les informations étaient à attribuer à un seul et même ouvrage, lequel ouvrage ne correspond d'ailleurs pas géographiquement aux implantations référencées en BSS (Figure 69). Ces erreurs ont été signalées au gestionnaire de la BSS⁴⁷ afin qu'un correctif soit apporté (Figure 70).

⁴⁷ Procédure pour signaler ce type d'erreur : contacter le correspondant BSS régional, dans le cas présent, Poitou Charente, à l'adresse mail : BSS POC bss.poc@brgm.fr. Les correspondants nationaux BSS et ADES peuvent aussi être informés (BSS BRGM : bss@brgm.fr ; ADES : ades@brgm.fr).



Problème: pas de forage aux coordonnées indiquées.

Figure 69 : Brettes : implantation des ouvrages et localisation de l'ouvrage inclus dans le suivi réglementaire.



mer. 21/11/2018 14:12
BSS BRGM
RE: question BSS

À Gal Frederick
Cc BSS BRGM

Bonjour,

Nous avons supprimé le dossier 06611X0088 (BSS001RQXY), et rajouté ses scans au dossier 06611X0087 (BSS001RQXX).

Cordialement,

Pierre DUFOUR

Direction des Géoressources
3 av. Claude-Guillemain - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France

Figure 70 : Brettes : correction des incohérences dans la BSS



Centre scientifique et technique
Direction des Laboratoires
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr