





# Investigations sur les forages de Labruguière et de Valdurenque – Comparaison de différentes approches d'échantillonnage (pompage et prélèvement de fond)

Rapport final

**BRGM/RP-65934-FR**

Juin 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM  
RP16LAB019 (VROUMF) et PDR13AQI02 (GAIA)

**F. Gal**

Avec la collaboration de

**L. André, G. Bentivegna, E. Decouchon, A. Grandemange**

## Vérificateur :

Nom : C. Berho

Fonction : Responsable Scientifique  
de programme

Date :  
14/06/16

Signature :



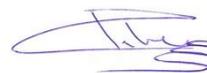
## Approbateur :

Nom : N. Pédron

Directeur du BRGM Aquitaine

Date : 05/12/2016

Signature :



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

Version initiale Juin 2016  
Version révisée Mai 2017

**Mots-clés** : Hydrogéologie, Pompage, Prélèvement de fond, Chimie des eaux, Diagraphie géochimique

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

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

## Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de deux programmes scientifiques ayant contribué à parité au financement de l'opération de démonstration faisant l'objet du présent rapport. Cette opération a été initiée par le BRGM.

**Le 1<sup>er</sup> projet contributeur** est un projet de recherche interne du BRGM (projet de « maturation » VROUMF) visant à valider les usages du dispositif de prélèvement en profondeur de fluides « GazOGaz ». Ce dispositif a fait l'objet d'un brevet publié à l'INPI sous le n° 2 996 249 et délivré le 26/09/2014 sous la référence 12 59214. Ce projet de maturation s'inscrit dans l'Action 2.3. « Contribuer à la gestion durable des ressources en eau » du contrat Etat-BRGM (2013-2017). Il a déjà permis de tester à plus de 1000 m de profondeur le dispositif sur le forage Muret 104 (forage atteignant les Sables Infra-Molassiques du Bassin aquitain).

**Le 2<sup>ème</sup> projet contributeur** est le programme scientifique GAIA, financé par TIGF, l'Agence de l'Eau Adour Garonne et le BRGM, et piloté par le BRGM. Ce projet vise à améliorer la connaissance géologique et hydrogéologique des aquifères profonds du Sud du Bassin aquitain, s'inscrivant en cela dans la lignée des travaux de recherche conduits au cours des vingt dernières années sur ces aquifères. On vise ici à qualifier la représentativité des échantillonnages par emploi du préleveur de fond en vue de futures acquisitions en très grande profondeur dans le Bassin aquitain (Sables Infra-Molassiques).

**Dans le cadre de ces deux projets**, il a donc été convenu de réaliser une opération de démonstration visant à comparer les résultats de chimie des fluides collectés soit classiquement par opérations de pompage soit par opérations de prélèvements de fond, sur des ouvrages implantés dans la région de Castres (Labruguière 10122X0055/F et Valdurenque 09866X0074/F). Ces anciens captages AEP sont implantés dans des horizons sableux et argileux, de productivités différentes mais faibles, sous recouvrement calcaire et marno-calcaire.

**Les deux ouvrages** ont fait l'objet d'investigations entre le 29/02 et le 03/03/2016. Elles ont consisté en la pratique alternée de diagraphies physico-chimiques (température, conductivité électrique, teneur en oxygène dissous, pH et potentiel redox), puis de prélèvements de fond (profondeur déterminée en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques selon la verticale) et enfin de séquences de pompage (faisant elles aussi l'objet de prélèvements). Trois cycles diagraphie – prélèvement de fond – pompage ont ainsi été réalisés sur chaque ouvrage, les débits de pompage étant ajustés en fonction de la productivité de l'aquifère et les positionnements des prélèvements de fond choisis en fonction des résultats des diagraphies (sommet de la crépine + horizon producteur). Par la suite, des analyses chimiques des éléments majeurs et traces ont été réalisées au laboratoire, afin de déterminer factuellement les similitudes, mais aussi les différences, entre les prélèvements réalisés via le préleveur de fond et les prélèvements réalisés selon la méthode classique de pompage.

**La réalisation de prélèvements de fond** semble donc pouvoir s'envisager avec un bon degré de confiance dans le cadre d'ouvrages pour lesquels les horizons producteurs sont connus – et particulièrement si ceux-ci ont une faible productivité. Cette connaissance est idéalement issue d'investigations par diagraphie géochimique, mais toute information sur l'ouvrage en lui-même (données de foration, test de production, ...) est utile à considérer. Autrement, les prélèvements de fond sont réalisés en aveugle, et leur représentativité peut n'être que partielle si l'ouvrage n'est pas sollicité par pompage (prélèvement à 130 m à Labruguière). Si le préleveur de fond est correctement positionné, l'eau qui peut être extraite avant pompage ou après pompage ne présente qu'une faible variabilité chimique (prélèvement à 163 m à Labruguière). Dans le cas d'ouvrages à productivité légèrement supérieure (ici représenté par Valdurenque), un prélèvement de fond peut toujours être réalisé pour caractériser les différentes venues d'eau si celles-ci sont chimiquement contrastées, ce que ne permet pas un pompage classique. Si les venues d'eau sont homogènes, pompage et prélèvement de fond fourniront des informations très semblables dès lors que l'ouvrage aura été suffisamment purgé. Le cas d'étude présent permet en effet de bien mettre en relief l'importance de la maîtrise des paramètres de la purge, les données issues des pompages successifs dans le forage de Labruguière ayant montré que l'on peut attribuer de manière erronée un caractère représentatif à des paramètres physico-chimiques (mesures stables en pompage) alors que ceux-ci diffèrent des paramètres réellement mesurés dans l'ouvrage au niveau des zones productrices.

**Dans le cas d'ouvrages très profonds**, en cas d'absence ou d'impossibilité de connaître avec précision les zones productrices, une option pourrait être d'opérer une sollicitation modérée de l'ouvrage par pompage avant de procéder à des prélèvements de fond – pour autant que le niveau statique ou son rabattement permettent une telle sollicitation avec des pompes sises à moins de 100 m de profondeur. La présente étude montre que le renouvellement de l'eau dans la crépine est un processus suffisamment rapide (y compris à Labruguière) pour permettre de disposer d'une eau représentative de l'aquifère, et ceci y compris en l'absence de prélèvement. Positionner le système de prélèvement de fond dans la crépine (si possible au droit des venues d'eau) après une durée relativement courte de pompage permettrait alors d'obtenir une eau représentative des conditions fond de trou, sans devoir recourir à l'utilisation de pompes de forte puissance et/ou de fort débit sur de longues périodes de temps.

**Cette méthode mixte**, couplant sollicitation modérée par pompage et prélèvement de fond, pourrait peut-être également être envisagée pour des ouvrages très colmatés. Certains se signalent par des temps de retour à l'équilibre après pompage qui peuvent s'avérer extrêmement longs (plusieurs mois à plusieurs années pour recouvrer le niveau piézométrique mesuré avant une opération de pompage). Même si le pompage induit un fort rabattement qui est très long à se résorber, il induit un renouvellement d'eau dans le(s) horizon(s) producteur(s). Si un pompage échouera dans tous les cas à faire remonter l'eau renouvelée, un prélèvement de fond pourra quand même être réalisé. Il sera néanmoins nécessaire de trouver un optimum temporel entre délai nécessaire à l'alimentation en eau par l'horizon producteur et possible évolution de cette eau dans le forage (a fortiori si le tubage n'est pas en inox).

# Sommaire

<b>1. Contexte</b> .....	<b>13</b>
1.1. POURQUOI CETTE ETUDE ?.....	13
1.2. PRELEVEMENT DE FOND : LE DISPOSITIF BRGM.....	13
<b>2. Ouvrage de Labruguière (10122X0055/F)</b> .....	<b>17</b>
2.1. MODALITES D'INTERVENTION SUR L'OUVRAGE.....	17
2.2. DIAGRAPHIES .....	18
2.2.1. Diagraphie du 29/02/16.....	18
2.2.2. Diagraphie du 01/03/16.....	21
2.2.3. Diagraphies du 02/03/2016.....	23
a) Diagraphie du 02/03/2016 matin .....	23
b) Diagraphie du 02/03/2016 après-midi .....	26
2.2.4. Diagraphies du 03/03/2016 .....	30
a) Diagraphie du 03/03/2016 matin .....	30
b) Diagraphie du 03/03/2016 après-midi .....	35
2.2.5. Récapitulatif des diagraphies .....	41
2.3. PRELEVEMENTS DE FOND .....	47
2.3.1. Prélèvements de fond à 130 m .....	49
2.3.2. Paramètres à 150 m .....	51
2.3.3. Prélèvements de fond à 163 m .....	52
2.3.4. Prélèvements pour mesure des gaz rares.....	54
2.4. POMPAGE ET PRELEVEMENTS EN POMPAGE .....	56
2.4.1. Pompage du 01/03/16.....	58
2.4.2. Pompage du 02/03/16.....	60
2.4.3. Pompage du 03/03/16.....	62
2.5. ANALYSES CHIMIQUES.....	64
<b>3. Valdurenque</b> .....	<b>73</b>
3.1. MODALITES D'INTERVENTION SUR L'OUVRAGE.....	73
3.2. DIAGRAPHIES .....	74
3.2.1. Diagraphie du 29/02/16.....	75
3.2.2. Diagraphies du 01/03/16.....	78
a) Diagraphie du 01/03/16 matin .....	78
b) Diagraphie du 01/03/16 après-midi .....	80
3.2.3. Diagraphie du 02/03/16.....	82

3.2.4. Diagraphies du 03/03/16 .....	86
a) Diagraphie du 03/03/16 matin.....	86
b) Diagraphie du 03/03/16 mi-journée.....	89
c) Diagraphie du 03/03/16 après-midi.....	95
3.2.5. Récapitulatif des diagraphies.....	97
3.3. PRELEVEMENTS DE FOND.....	104
3.3.1. Prélèvements de fond à 81 m.....	106
3.3.2. Prélèvements de fond à 119 m.....	108
3.4. POMPAGE ET PRELEVEMENTS EN POMPAGE .....	110
3.4.1. Pompage du 01/03/16 .....	111
3.4.2. Pompage du 02/03/16 .....	114
3.4.3. Pompage du 03/03/16 .....	116
3.4.4. Comparaison des mesures en pompage acquises par la sonde Idronaut et via les boîtiers WTW.....	118
3.5. ANALYSES CHIMIQUES .....	120
<b>4. Conclusions .....</b>	<b>129</b>

## Liste des figures

Figure 1 : principe du dispositif de prélèvement de fond BRGM « GazOGaz ».....	15
Figure 2 : piézomètre de Labruguière – vue générale et rappel schématique de la coupe technique. ....	18
Figure 3 : sonde Idronaut 316Plus utilisée pour les investigations dans le forage de Labruguière.	19
Figure 4 : diagraphie réalisée le 29/02/16 sur le piézomètre de Labruguière. ....	20
Figure 5 : diagraphie réalisée le 01/03/16 sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16. ....	22
Figure 6 : diagraphie réalisée le 02/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16. ....	24
Figure 7 : diagraphie réalisée le 02/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres). ....	25
Figure 8 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16.....	27
Figure 9 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres). ....	28
Figure 10 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 2400 litres supplémentaires) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos). ....	29

Figure 11 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie initiale du 29/02/16.....	31
Figure 12 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).....	32
Figure 13 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 au matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos).....	33
Figure 14 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 après-midi (après pompage de 1600+2400 litres).....	34
Figure 15 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie initiale du 29/02/16.....	36
Figure 16 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).....	37
Figure 17 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 au matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos).....	38
Figure 18 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 après-midi (après pompage de 1600+2400 litres).....	39
Figure 19 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 03/03/16 au matin (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos).....	40
Figure 20 : récapitulatif des profils de température ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.....	42
Figure 21 : récapitulatif des profils de conductivité électrique ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.....	43
Figure 22 : récapitulatif des profils de pH ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.....	45
Figure 23 : récapitulatif des profils de potentiel redox ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.....	46
Figure 24 : état de l'eau et des filtres 0,45 µm à l'issue de la 1 <sup>ère</sup> séquence de pompage : présence importante de fines – piézomètre de Labruguière.....	47
Figure 25 : à gauche du forage : dispositif de prélèvement de fond (bouteille d'azote, enrouleur avec tuyau bitube) ; à droite du forage : matériel nécessaire au pompage – piézomètre de Labruguière.....	48
Figure 26 : vue de détail du dispositif de prélèvement de fond en fonctionnement – piézomètre de Labruguière.....	48
Figure 27 : vue d'ensemble du dispositif d'échantillonnage des gaz rares couplé au système de prélèvement de fond – piézomètre de Labruguière.....	55
Figure 28 : vue de détail du dispositif d'échantillonnage des gaz rares couplé au système de prélèvement de fond – piézomètre de Labruguière.....	55

Figure 29 : vue d'ensemble du site lors des phases de pompage – piézomètre de Labruguière.	57
Figure 30 : détail de l'exhaure du pompage et aperçu du monitoring physico-chimique à l'aide de la sonde Idronaut 316Plus – piézomètre de Labruguière.	57
Figure 31 : suivi temporel du rabattement de la nappe – piézomètre de Labruguière.	58
Figure 32 : suivi temporel des débits de pompage – piézomètre de Labruguière.	58
Figure 33 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 01/03/16 – piézomètre de Labruguière.	60
Figure 34 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 02/03/16. Les grandes variations durant l'enregistrement correspondent à des retraits de la sonde du bac d'exhaure – piézomètre de Labruguière.	61
Figure 35 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 03/03/16. Les grandes variations durant l'enregistrement correspondent à des retraits de la sonde du bac d'exhaure – piézomètre de Labruguière.	63
Figure 36 : état de la pompe MP1 à l'issue de la 1 <sup>ère</sup> séquence de pompage le 01/03/2016 – piézomètre de Labruguière.	65
Figure 37 : état visuel des flaconnages anions (filtration 0,45 µm) ; à gauche et à droite, suite à prélèvement de fond ; au centre, suite à pompage – piézomètre de Labruguière.	65
Figure 38 : diagramme de Schoeller, éléments majeurs, prélèvements de Labruguière (PF : prélèvement de fond ; POMP : prélèvement en pompage). Pour le prélèvement du 01/03/2016 en pompage, la teneur en SO <sub>4</sub> mesurée au laboratoire est inférieure au seuil de détection (<0,5 mg/l).	66
Figure 39 : écart de concentration en HCO <sub>3</sub> entre les déterminations sur site (par titration à la burette au HCl 0,1 mol/l) et au laboratoire – piézomètre de Labruguière.	67
Figure 40 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.	70
Figure 41 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces (µg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.	71
Figure 42 : évolution temporelle des indices de saturation pour quelques espèces minérales en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.	72
Figure 43 : piézomètre de Valdurenque – vue générale et rappel schématique de la coupe technique.	75
Figure 44 : irisations et surnageant à la surface de l'eau dans le piézomètre de Valdurenque lors de la 1 <sup>ère</sup> descente de la sonde Idronaut 303 (visible au centre du tubage) le 29/02.	76
Figure 45 : diagraphie initiale réalisée le 29/02/16 dans le piézomètre de Valdurenque.	78
Figure 46 : diagraphie réalisée le 01/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque.	80
Figure 47 : diagraphie réalisée le 01/03/16 après-midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau, et comparaison à la diagraphie réalisée le matin, avant pompage.	82

Figure 48 : diagraphie réalisée le 02/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 matin, avant pompage.....	84
Figure 49 : diagraphie réalisée le 02/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres.....	85
Figure 50 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 au matin, avant tout pompage.....	87
Figure 51 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres.....	88
Figure 52 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 02/03, après le second pompage.....	89
Figure 53 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3600 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 au matin, avant tout pompage. ....	91
Figure 54 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres. ....	92
Figure 55 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 02/03, après le second pompage. ....	93
Figure 56 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 03/03, avant le dernier pompage. ....	94
Figure 57 : récapitulatif des diagraphies réalisées le 03/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, au matin (après pompage cumulé de 10700 litres d'eau et une nuit de repos), à midi (après pompage de 3900 litres supplémentaires) et en début d'après-midi (remontée de la sonde de diagraphie). ....	96
Figure 58 : récapitulatif des profils de température ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque. ....	98
Figure 59 : détail des variations de température dans la crépine (mesure après pompage du 01/03). Le tableau détaille 6 horizons, déterminés graphiquement par des variations de pente du gradient thermique, pour lesquels des gradients locaux sont calculés. Si ce gradient est plus fort que le gradient thermique moyen, alors la température n'est pas homogénéisée par une bonne circulation de fluide, ce qui suggère que l'horizon n'est pas producteur ou qu'il a une mauvaise perméabilité – piézomètre de Valdurenque.....	99
Figure 60 : récapitulatif des profils d'oxygène dissous ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque. ....	101
Figure 61 : récapitulatif des profils de conductivité électrique ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.....	102

Figure 62 : récapitulatif des profils de pH ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.....	103
Figure 63 : récapitulatif des profils de potentiel redox ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque. ....	104
Figure 64 : couplage du système de prélèvement de fond à la sonde Idronaut. Remarquer le colmatage du filtre (partie apparente du préleveur de fond, lui-même protégé par du scotch rouge) – piézomètre de Valdurenque.....	105
Figure 65 : eau pompée en début de purge à 45 m de profondeur le 01/03 – piézomètre de Valdurenque.....	106
Figure 66 : aperçu des dépôts remontés par la sonde Idronaut (oxydes et/ou hydroxydes de fer notamment) – piézomètre de Valdurenque. ....	110
Figure 67 : suivi temporel du rabattement de la nappe ; les flèches indiquent le moment où le pompage est stoppé (suivi de la remontée du niveau statique) – piézomètre de Valdurenque.....	111
Figure 68 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 01/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque. ....	113
Figure 69 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 02/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque. ....	115
Figure 70 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 03/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque. ....	117
Figure 71 : comparaison des paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage par la sonde Idronaut et par les boîtiers WTW – piézomètre de Valdurenque.....	118
Figure 72 : diagramme de Schoeller, éléments majeurs, prélèvements de Valdurenque (PF : prélèvement de fond ; POMP : prélèvement en pompage). ....	121
Figure 73 : écart de concentration en HCO <sub>3</sub> entre les déterminations sur site (par titration à la burette au HCl 0,1 mol/l) et au laboratoire – piézomètre de Valdurenque. ....	122
Figure 74 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque.....	124
Figure 75 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces (µg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque.....	125
Figure 76 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque – échelles des ordonnées adaptées des échelles utilisées pour les données de Labruguière. ....	126
Figure 77 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces (µg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) –	

piézomètre de Valdurenque – échelles des ordonnées adaptées des échelles utilisées pour les données de Labruguière..... 127

Figure 78 : évolution temporelle des indices de saturation pour quelques espèces minérales en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière..... 128

## Liste des tableaux

Tableau 1 : chronologie des interventions sur le piézomètre de Labruguière ; \* signale qu'un prélèvement a été fait sur le système de prélèvement de fond pour analyse des gaz rares (CENBG). Le volume total d'eau présent dans l'ouvrage le 29/02/16 est évalué à 4600 litres (niveau statique à -26 m environ). ..... 17

Tableau 2 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 130 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 2 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière. .... 49

Tableau 3 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de contrôle à 150 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 2,5 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière. .... 52

Tableau 4 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 163 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 3 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière. .... 53

Tableau 5 : chronologie des interventions sur le piézomètre de Valdurenque. Le volume total d'eau présent dans l'ouvrage le 29/02/16 est évalué à 4140 litres (niveau statique à -10 m environ) en prenant en compte la coupe technique du forage, dont 2950 litres situés au-dessus de la résistance rencontrée à -85 m de profondeur..... 74

Tableau 6 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 81 m de profondeur – piézomètre de Valdurenque. .... 107

Tableau 7 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 119 m de profondeur. \*Les données du 01/03 n'ont pas fait l'objet d'un prélèvement, les données présentées – à titre indicatif – correspondent au 1<sup>er</sup> cycle de purge, le clapet s'étant ensuite bouché (des tentatives ultérieures n'ont pas permis de s'affranchir de ce point) – piézomètre de Valdurenque. .... 109

## Liste des annexes

Annexe 1 Température atmosphérique..... 135

Annexe 2 Coupes techniques des forages de Labruguière et Valdurenque..... 139



# 1. Contexte

## 1.1. POURQUOI CETTE ETUDE ?

Deux ouvrages implantés dans des horizons sableux et argileux sous recouvrement calcaire et marno-calcaire ont fait l'objet d'investigations destinées à comparer les données obtenues avec la méthode classique de prélèvement par pompage et avec la méthode de prélèvement de fond. Ce rapport présente les données acquises sur site et les données chimiques (éléments majeurs et traces) issues des analyses au laboratoire.

Les deux ouvrages sélectionnés (Labruguière 10122X0055/F et Valdurenque 09866X0074/F) sont implantés dans la région de Castres, et captent des niveaux assez peu productifs. Ces anciens captages AEP sont maintenant essentiellement utilisés à des fins de surveillance piézométrique (réseau quantité) et ne font pas l'objet de suivi régulier de leur qualité.

Les investigations ont été menées en parallèle par 2 équipes du BRGM entre le 29/02 et le 03/03/2016. Elles sont présentées séparément pour chaque ouvrage, mais l'approche retenue est commune. Elle consiste en la pratique alternée de diagraphies physico-chimiques (température, conductivité électrique, teneur en oxygène dissous, pH et potentiel redox – utilisation de sondes Idronaut 303 et 316<sup>1</sup>), puis de prélèvements de fond (profondeur déterminée en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques selon la verticale) et enfin de séquences de pompage (faisant elles aussi l'objet de prélèvements et de mesures physico-chimiques à l'aide de boîtiers WTW<sup>2</sup>).

## 1.2. PRELEVEMENT DE FOND : LE DISPOSITIF BRGM

En résultat de plusieurs années de développements, tests et améliorations, le BRGM a déposé en Septembre 2012 un brevet relatif à un dispositif de prélèvement en profondeur de fluides (dispositif « GazOGaz »), publié à l'INPI sous le n° 2 996 249 et délivré le 26/09/2014 sous la référence 12 59214. Si le concept de prélèvement de fond n'est pas nouveau, des dispositifs commerciaux existant depuis plusieurs années, l'outil récemment breveté se singularise par les aspects suivants :

- Une mise en œuvre aisée : le dispositif étant basé sur le principe d'alternances de cycles de compression/décompression à l'aide d'un gaz vecteur neutre faisant jouer des clapets, le déploiement en forage ne nécessite que l'emploi de tubes plastiques et clapets en inox. A contrario, les dispositifs commerciaux sont plus lourds à mettre en œuvre, et, ce faisant, plus coûteux.

<sup>1</sup> Les calibrations ont porté sur le pH (calibration en 1 point, pH 7), sur l'oxygène dissous (calibration en 1 point, 100% de saturation à l'atmosphère saturée d'humidité) ; les paramètres conductivité électrique et potentiel redox ont été vérifiés avant utilisation avec respectivement un standard à 1413  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à 25°C et +220 mV à 25°C.

<sup>2</sup> Les calibrations sont faites en 2 points sur le pH (pH 4,01 et 6,87) avec un contrôle sur un tampon 9,18 ; la saturation de l'oxygène dissous à l'atmosphère saturée en humidité est contrôlée, le zéro est déterminé en plongeant l'électrode dans de l'eau additionnée de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . Les contrôles sur la conductivité électrique et le potentiel redox sont les mêmes que ceux opérés avec les sondes Idronaut.

- Une mise en œuvre possible en milieu ATEX<sup>3</sup>, le système déployé en forage ne comprenant que des dispositifs mécaniques, avec une mise à la masse assurée par le filin servant de câble porteur (pas de dispositif électromécanique).
- Une quantité de fluide échantillonnée à priori non limitée, au contraire de nombreux dispositifs commerciaux, qui nécessitent une remontée en surface d'un outil de volume fini et faible (rares sont les systèmes permettant de prélever plus d'un litre à la fois).
- Certains dispositifs (U-tube sampler<sup>4</sup>) utilisent aussi des gaz vecteurs pour collecter les fluides en profondeur, mais ils sont installés à demeure dans un ouvrage (géométrie figée). L'outil BRGM est totalement mobile dans la colonne d'eau et peut être laissé à demeure ou retiré.
- Un transfert en surface facile : le dispositif BRGM permet de recueillir le fluide directement en surface par écoulement, ou en conditions contrôlées si le contenu en gaz a besoin d'être préservé (Figure 1).

L'outil a été mis en œuvre dans différents contextes (prélèvements d'eaux carbo-gazeuses, suivi d'ennoiement minier et des émanations de CH<sub>4</sub> associées, monitoring d'aquifères profonds – notamment dans les Sables Infra-Molassiques) et a permis de déployer l'outil jusqu'à 1035 m de profondeur (forage Muret 104, code BSS 10098A0004/F). Les résultats de ces investigations ont fait l'objet d'une communication en congrès<sup>5</sup>, deux autres communications étant prévues courant 2016, l'une sur les investigations rapportées dans le présent rapport<sup>6</sup>, l'autre sur des comparaisons des concentrations en gaz dissous mesurées sur des prélèvements réalisés à l'aide de 3 dispositifs différents de prélèvement de fond<sup>7</sup>.

---

<sup>3</sup> ATmosphères EXplosibles.

<sup>4</sup> Freifeld B.M., Trautz R.C., Kharaka Y.K., Phelps T.J., Myer L.R., Hovorka S.D., Collins D.J., 2005, The U-tube: A novel system for acquiring borehole fluid samples from a deep geologic CO<sub>2</sub> sequestration experiment, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110, B10203, doi:10.1029/2005JB003735, 2005.

Freifeld B. M., 2010, The U-tube: A new paradigm in borehole fluid sampling, Scientific Drilling, doi:10.2204/iodp.sd.8.07, 2009, <https://escholarship.org/uc/item/6dn5q5rp>.

<sup>5</sup> Gal F., Brach M., Pauwels H., 2014, A new sampling method for collecting fluids at depth, Fourth EAGE CO<sub>2</sub> Geological Storage Workshop, Stavanger, 22-24 April 2014 (<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00939961>).

<sup>6</sup> Gal F., André L., Petelet-Giraud E., Wuilleumier A., Aquifer sampling using ball check-valves system: what about sample representativeness?, 43rd IAH CONGRESS, Sep 2016, Montpellier, France. (<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01325596>).

<sup>7</sup> Gal F., Lions J., Grellier S., Squarcioni P., Barrière J., Deep aquifer sampling and the use of ball check-valves systems, 13th Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT13), Nov 2016, Lausanne, Switzerland. (<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01325600>).

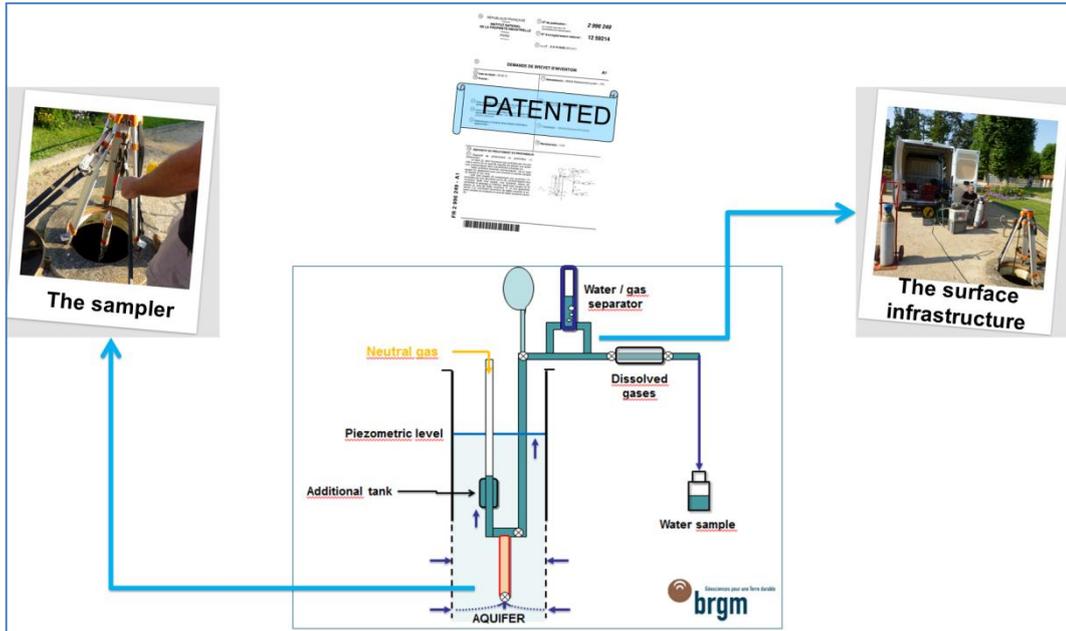


Figure 1 : principe du dispositif de prélèvement de fond BRGM « GazOGaz ».



## 2. Ouvrage de Labruguière (10122X0055/F)

### 2.1. MODALITES D'INTERVENTION SUR L'OUVRAGE

Le chronogramme d'intervention sur cet ouvrage est reporté ci-après (Tableau 1). Dans les sections suivantes, les investigations sont rapportées par type de méthode (diagraphie physico-chimique, prélèvement de fond et pompage).

Date	Début	Fin	Action	Prof. (m)	Nom de l'échantillon
29/02/16	15:30	15:50	Diagraphie		
01/03/16	09:25	10:10	Prélèvement de fond	130	Labruguière 01/03/16 10:10 PF130
	10:23	10:37	Prélèvement de fond	150	
	10:50	12:21	Prélèvement de fond	163	Labruguière 01/03/16 11:51 PF163*
	13:07	16:21	Pompage (env. 1600 l)	45	Labruguière 01/03/16 13:07 POMP Labruguière 01/03/16 16:05 POMP*
	16:55	17:01	Diagraphie		
02/03/16	08:48	09:28	Prélèvement de fond	130	Labruguière 02/03/16 09:28 PF130
	09:44	09:55	Prélèvement de fond	150	
	10:18	11:18	Prélèvement de fond	163	Labruguière 02/03/16 11:05 PF163*
	11:45	11:58	Diagraphie		
	13:20	15:50	Pompage (env. 2400 l)	45	Labruguière 02/03/16 13:20 POMP Labruguière 02/03/16 15:50 POMP
	16:20	16:35	Diagraphie		
03/03/16	08:40	08:49	Diagraphie		
	09:22	10:01	Prélèvement de fond	130	Labruguière 03/03/16 10:01 PF130
	10:11	10:28	Prélèvement de fond	150	
	10:42	11:30	Prélèvement de fond	163	Labruguière 03/03/16 11:30 PF163
	12:20	15:30	Pompage (env. 3300 l)	45	Labruguière 03/03/16 12:28 POMP Labruguière 03/03/16 15:30 POMP
	15:55	16:04	Diagraphie		
	16:58	17:19	Prélèvement de fond	130	Labruguière 03/03/16 17:19 PF130
	17:34	17:50	Prélèvement de fond	163	Labruguière 03/03/16 17:50 PF163

Tableau 1 : chronologie des interventions sur le piézomètre de Labruguière ; \* signale qu'un prélèvement a été fait sur le système de prélèvement de fond pour analyse des gaz rares (CENBG). Le volume total d'eau présent dans l'ouvrage le 29/02/16 est évalué à 4600 litres (niveau statique à -26 m environ).

## 2.2. DIAGRAPHIES

La coupe technique simplifiée de l'ouvrage est rappelée en Figure 2 et une coupe détaillée en Annexe 2. Le tube acier est cimenté de 0 à 120 m. Le niveau statique après retrait de l'enregistreur automatique de niveau était de -26,18 m par rapport au haut du tubage à 15:30.



Figure 2 : piézomètre de Labruguière – vue générale et rappel schématique de la coupe technique.

### 2.2.1. Diagraphie du 29/02/16

Une première diagraphie physico-chimique a ensuite été réalisée le 29/02 sans aucune sollicitation préalable de l'ouvrage (Figure 3). Elle représente donc l'état d'équilibre du forage avec la masse d'eau et son évolution éventuelle au sein du tubage (dans les crépines et surtout dans le tube plein). Le résultat est reporté en Figure 4.



*Figure 3 : sonde Idronaut 316Plus utilisée pour les investigations dans le forage de Labruguière.*

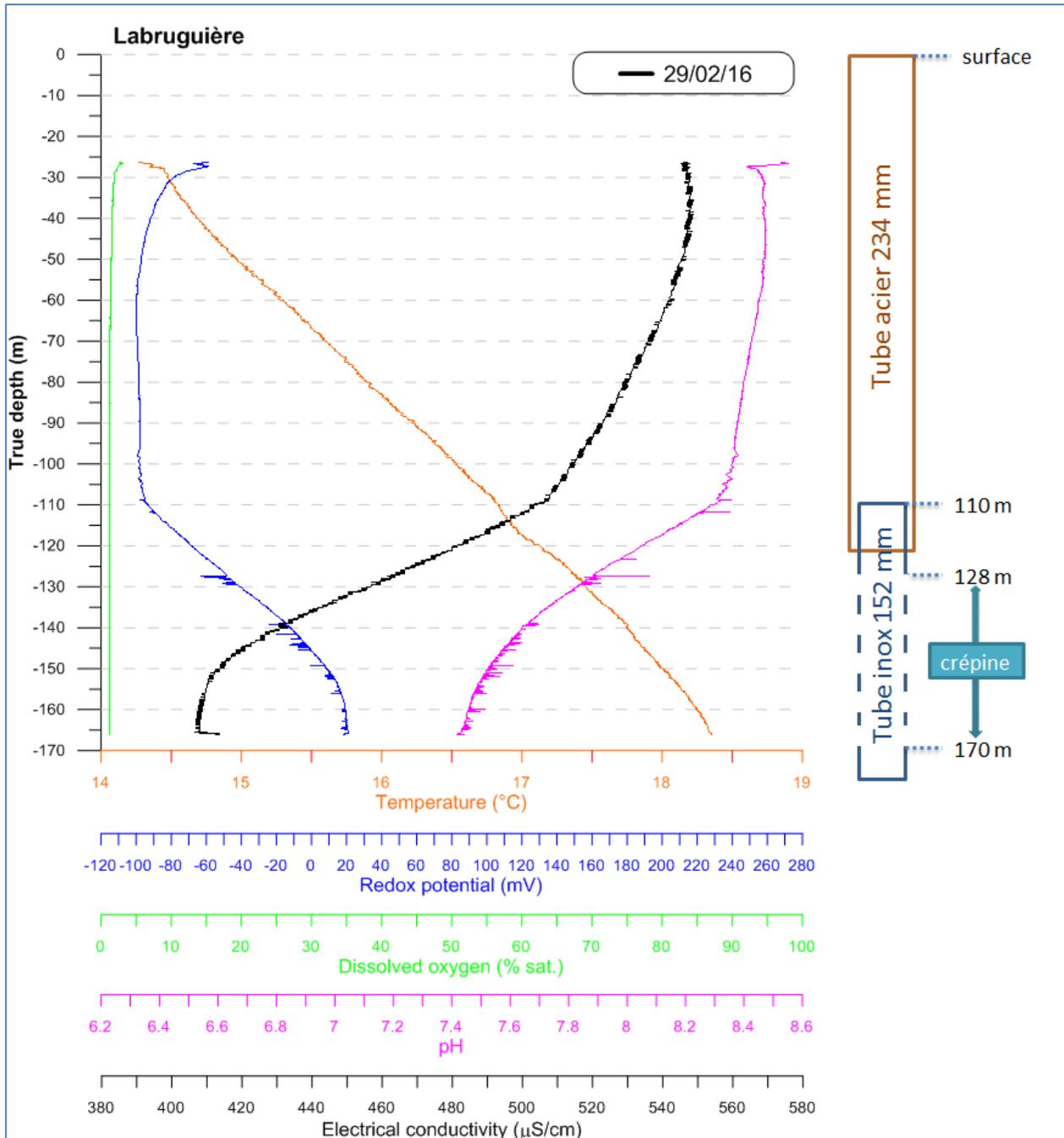


Figure 4 : diagraphie réalisée le 29/02/16 sur le piézomètre de Labruguière.

Cette 1<sup>ère</sup> diagraphie permet de constater que :

- L'outil descend pratiquement jusqu'au fond de l'ouvrage, seuls les derniers mètres étant constitués par un dépôt impénétrable par l'outil (les données présentées ont été filtrées, la pénétration dans le culot de décantation se traduisant par une évolution erratique des paramètres et une brutale hausse de conductivité électrique).
- La *température* augmente pratiquement linéairement depuis 30 m sous la surface jusqu'à 165 m. Le gradient moyen qui peut être calculé est de 29,7°C par km, soit très proche du gradient thermique moyen en domaine continental ( $T^{\circ} = -0,0297 \times \text{prof.} +$

13,53 ;  $r^2 = 0,9988$  sur 9500 données). Tout au plus peut-on noter une très légère inflexion juste avant le passage dans les crépines, mais cette inflexion n'a qu'un impact local et ne se répercute pas sur les mesures dans les crépines. L'ensemble de l'eau présente dans l'ouvrage est donc à l'équilibre thermique avec son encaissant.

- La teneur en *oxygène dissous* est nulle dans toute la colonne d'eau (la valeur affichée est proche de 1% de saturation, mais cela correspond à la précision intrinsèque du capteur), avec peut-être une très légère présence d'oxygène dans les 1ers mètres de la colonne d'eau (max. 2,6% de saturation – on peut aussi considérer que ce signal qui diminue rapidement correspond au temps de mise à l'équilibre du capteur électrochimique).
- Les autres paramètres présentent une structuration qui est clairement dépendante de la partie du forage dans laquelle ils sont mesurés (zone crépinée ou tube plein) :
  - o La *conductivité électrique* (corrigée à 25°C) est ainsi la plus forte dans le tube plein, variant depuis 550  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au sommet de la colonne d'eau jusqu'à environ 500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au passage dans le tube crépiné. La diminution de la conductivité est ensuite très forte jusqu'à atteindre un palier proche de 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à partir de 150 m de profondeur. Ceci peut suggérer que l'alimentation en eau se fait surtout à la base de l'ouvrage (conductivité constante sur une quinzaine de mètres d'épaisseur) et que toute la variabilité mesurée au-dessus de cet horizon 150-165 m est en grande partie une conséquence d'interactions avec le tubage, ces interactions étant maximales dans le tube plein (en acier, pas en inox). Dans la partie haute des crépines, l'allure de la courbe de conductivité traduit alors soit un mélange progressif entre 2 pôles (eau fraîche provenant du fond et eau ayant interagi avec le tube métal en haut) soit une hétérogénéité de chimisme de l'eau au sein d'un aquifère multicouche à intercalations argileuses et/ou des interactions entre l'eau et la matrice plus importantes au sommet de la crépine (les passées argileuses sont plus épaisses au sommet de la crépine qu'à la base de la crépine).
  - o Le *pH* admet un profil en fonction de la profondeur pratiquement identique à celui de la conductivité. Dans le tubage plein, le pH varie entre 8,3 et 8,5, ce qui est une gamme un peu élevée pour ce type d'aquifère. Le passage dans la crépine se traduit par une très forte baisse, pour atteindre 7,4 à 7,5 unités pH en base d'ouvrage. Notons au passage que ce type de valeur de pH montre qu'il n'y a pas d'interactions avec d'éventuels résidus de foration (boues, cimentation) qui auraient sédimentés en base d'ouvrage et n'auraient pas été nettoyés lors du développement de l'ouvrage.
  - o Enfin, le *potentiel redox* a un profil opposé à celui du pH et de la conductivité, montrant des valeurs plus faibles dans le tube plein (milieu plutôt réducteur) et des valeurs proches de l'équilibre en base d'ouvrage.

### 2.2.2. Diagraphie du 01/03/16

Une seconde diagraphie a été faite le 01/03 suite à la réalisation de prélèvements de fond en matinée et d'un pompage dans l'après-midi (Tableau 1) ; le résultat est présenté en Figure 5. Suite au pompage d'environ 1600 litres, le niveau statique est abaissé et n'est remonté qu'à - 35 m par rapport au haut du tubage, 30 minutes après la fin du pompage.

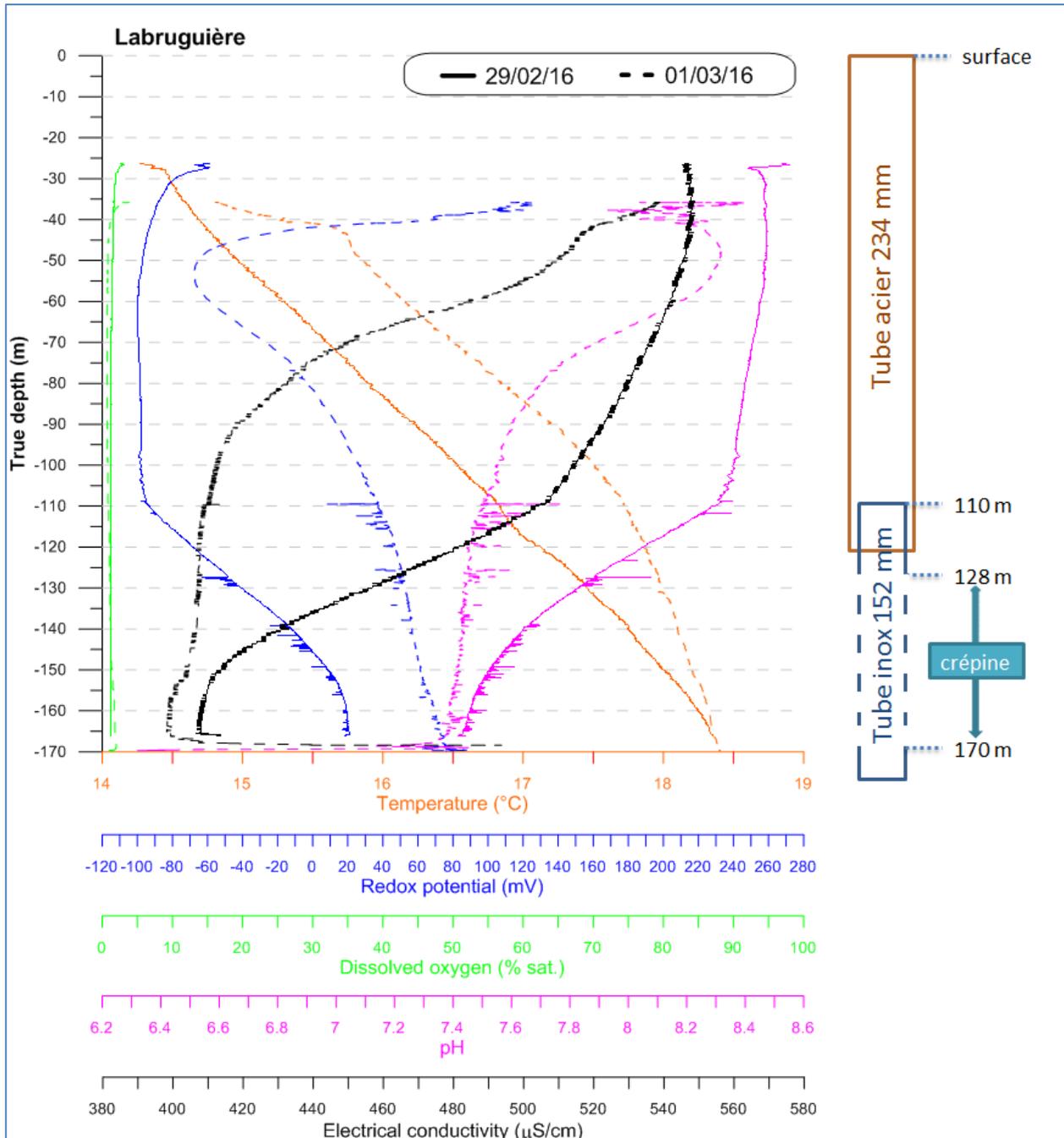


Figure 5 : diagraphie réalisée le 01/03/16 sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16.

La comparaison avec la diagraphie initiale suggère que :

- Le pompage a permis de drainer une partie des dépôts présents en base d'ouvrage, puisque la sonde a pu pénétrer pratiquement jusqu'à 170 m de profondeur. Rappelons toutefois que seuls 1600 litres ont été extraits, soit environ 35% du volume d'eau initialement présent dans le forage (on est donc encore loin des préconisations de volume de purge pour parvenir à la représentativité de l'opération de pompage).

- Le profil de *température* est nettement modifié par l'action de pompage. Ce profil semble bien suggérer que l'alimentation en eau se fait par la base de l'ouvrage (température proche de 18,4°C) et que cette eau plus chaude envahit progressivement l'ouvrage vers le haut (la température est toujours supérieure à 18°C dans la partie haute de la crépine). Par contre, une rupture de pente importante se localise vers 110 m de profondeur, au passage dans le tube plein. L'eau n'y étant pas renouvelée latéralement, elle se trouve sans doute refroidie par effet d'inertie thermique du tube plein (la pente moyenne est celle du gradient géothermique). La partie supérieure de la colonne d'eau n'est presque pas renouvelée (diminution très rapide de la température), ce qui indique bien que l'eau pompée à 45 m de profondeur est une eau profonde et pas une eau provenant de la partie du tubage située au-dessus de la pompe. Le rabattement observé (plus de 10 m au cours du pompage) a donc fait descendre un « bouchon » d'eau non renouvelée qui se trouve peu sollicité par le processus de pompage.
- De manière logique, la teneur en *oxygène dissous* ne change pas : si l'alimentation se fait par une eau dépourvue d'oxygène, il n'y a pas de raison de trouver un changement pour ce paramètre.
- Le profil de *conductivité électrique* diffère nettement du profil mesuré le 29/02. On constate également une homogénéisation de la colonne d'eau dans la crépine (400 à 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), vers des valeurs représentatives de la conductivité en base d'ouvrage, alors que l'eau présente dans le tube plein n'est pas encore totalement renouvelée ; en conséquence la conductivité tend vers les valeurs mesurées le 29/02 au sommet de la colonne d'eau.
- Comme pour la conductivité, le *pH* est homogène dans la partie crépinée (autour de 7,4, la valeur mesurée en base d'ouvrage le 29/02), et n'est pas encore représentative dans la partie tubée pleine.
- Enfin, le *potentiel redox* tend également à être plus homogène dans la crépine, et non représentatif au-dessus. Il existe une variabilité plus grande dans la mesure de ce paramètre (+20 mV en base d'ouvrage le 29/02, +80 mV le 01/03), mais la mesure précise in-situ de ce paramètre est difficile à établir, aussi vaut-il mieux se référer à la variabilité du paramètre le long de la colonne d'eau et déterminer si l'eau a tendance à être représentative de conditions plutôt oxydantes ou plutôt réduites.

### 2.2.3. Diagraphies du 02/03/2016

Deux diagraphies ont été opérées le 02/03, la 1<sup>ère</sup> en fin de matinée après prélèvement de fond mais avant pompage, la seconde après pompage de 2400 litres supplémentaires (pour aboutir à un volume cumulé de purge sur 2 jours d'environ 85% du volume initial de la colonne d'eau).

#### a) Diagraphie du 02/03/2016 matin

La diagraphie réalisée après prélèvement de fond est présentée en Figure 6 (comparaison avec la 1<sup>ère</sup> diagraphie du 29/02) et en Figure 7 (comparaison avec la diagraphie du 01/03 suite au pompage de 1600 litres). Le niveau statique est remonté à -27 m (soit presque 1 m en deçà du niveau d'équilibre constaté le 29/02), ce qui signifie que le pompage perturbe assez durablement le niveau piézométrique. En conséquence, soit l'aquifère a une faible production, soit le colmatage de la crépine ralentit le retour à l'équilibre du niveau statique.

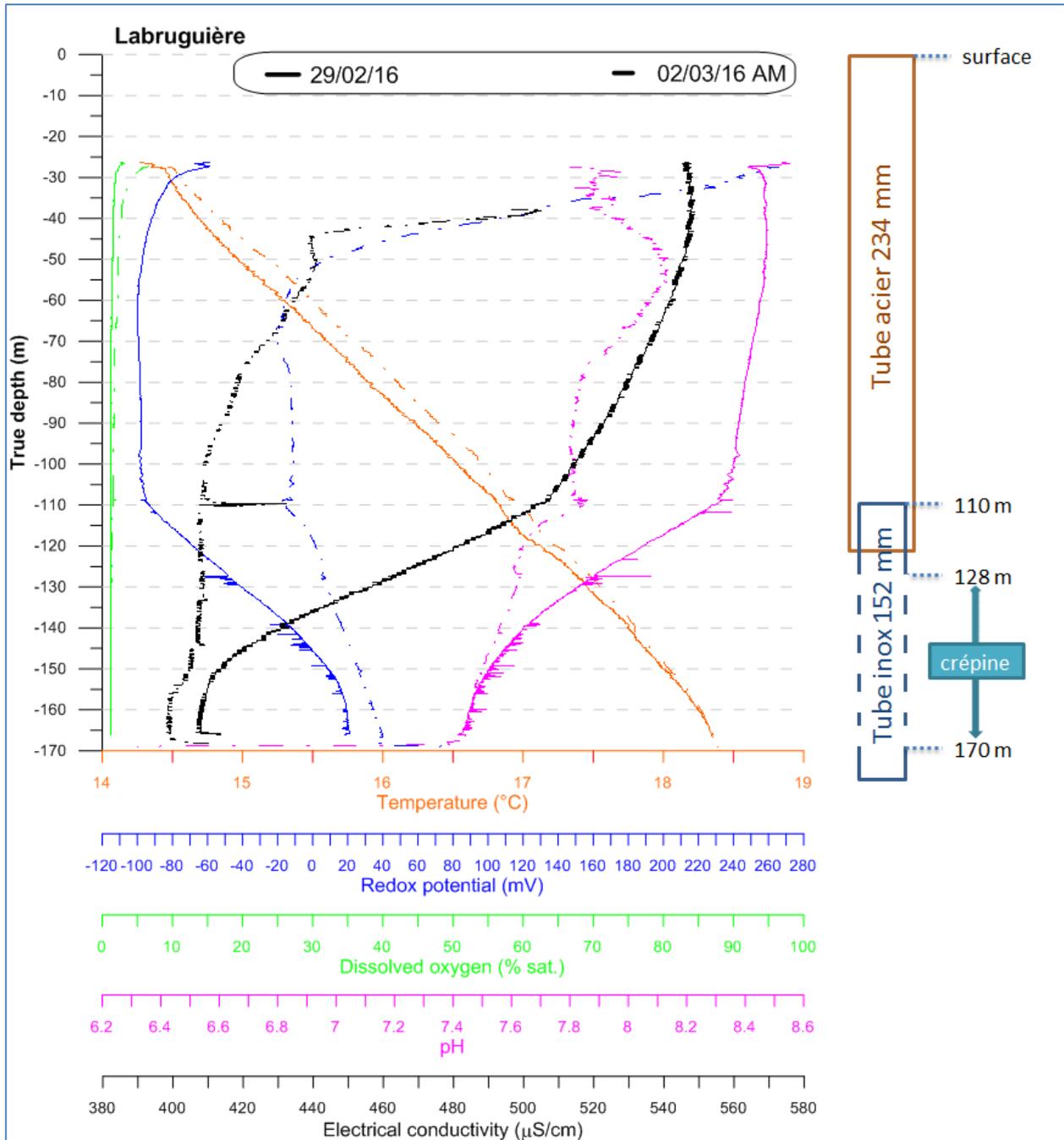


Figure 6 : diagraphie réalisée le 02/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16.

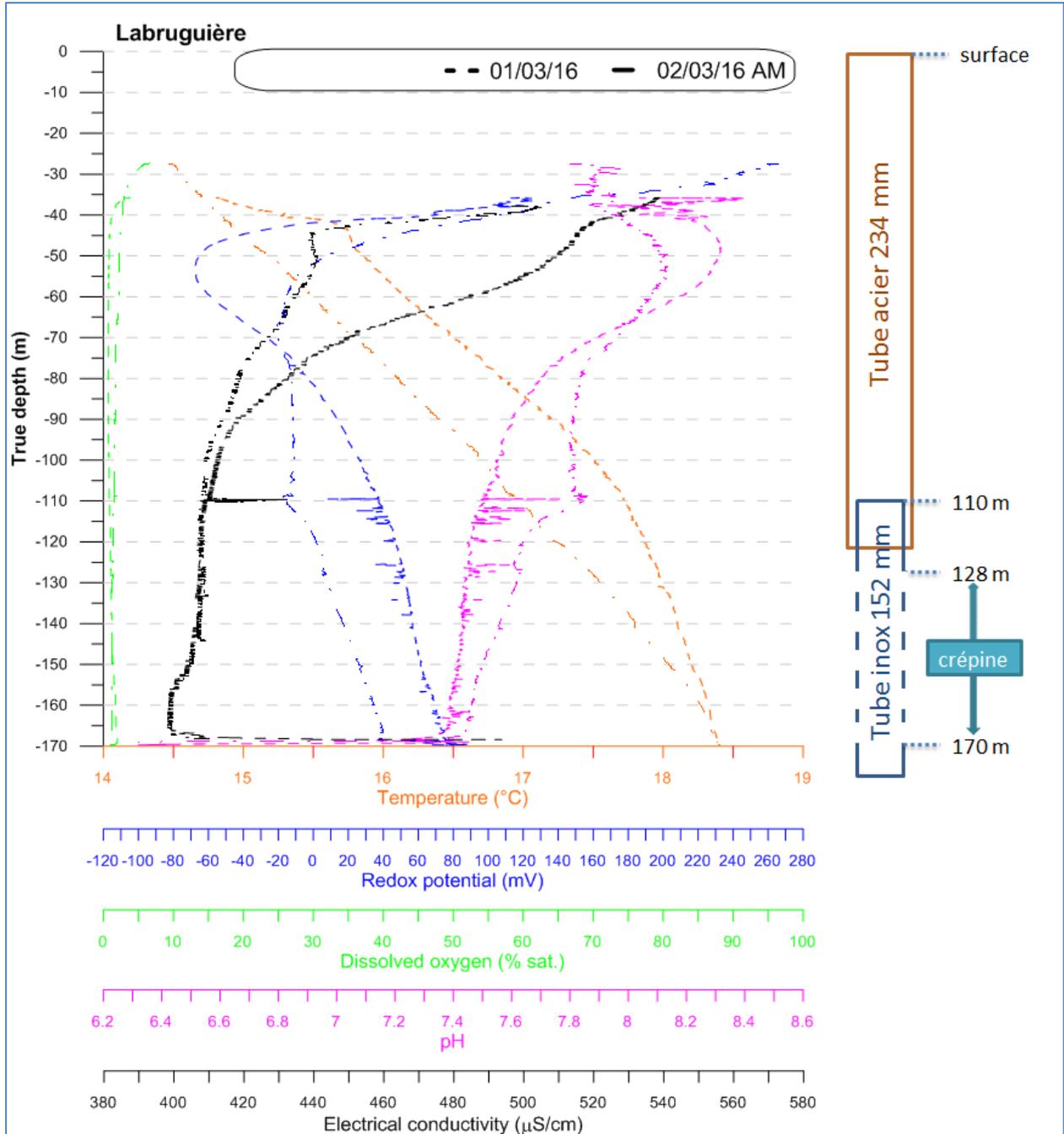


Figure 7 : diagraphie réalisée le 02/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).

La comparaison avec les données précédentes permet de déterminer que :

- L'eau revient assez rapidement à l'équilibre thermique avec le forage ; la perturbation suite au pompage devient assez faible une vingtaine d'heures après l'arrêt du pompage. Elle n'est plus perceptible dans la crépine, mais subsiste, de l'ordre du dixième de degré, dans le tubage plein.
- Le profil en oxygène dissous n'est pas affecté – et n'a pas de raison de l'être.

- Le profil de *conductivité électrique* n'est pas modifié dans la crépine après 20 heures de repos de l'ouvrage.
- Le profil de *pH* tend à être plus homogène dans la crépine, et reste perturbé dans le tube plein.
- Le *potentiel redox* a un profil comparable à celui qui a été mesuré après le 1er cycle de pompage.

#### b) Diagraphie du 02/03/2016 après-midi

La diagraphie opérée dans l'après-midi, après pompage, est présentée dans les Figure 8, Figure 9 et Figure 10, qui présentent respectivement l'allure des paramètres comparés à la diagraphie initiale du 29/02, à la diagraphie du 01/03 et à la diagraphie du 02/03 au matin. Il ressort de ces figures que :

- Le profil de *température* suite au pompage est très similaire à celui obtenu le 01/03 après pompage, avec un réchauffement un peu plus important de la colonne d'eau dans la partie tubée pleine, vraisemblablement lié à un volume d'eau pompé plus important ayant entraîné un réchauffement plus important du tubage. On note cependant qu'il n'est pas possible, au débit de pompage utilisé – qui est imposé par la faible productivité de l'aquifère – de parvenir à avoir une température homogène dans l'ensemble de la crépine (existe d'un gradient entre 18,4°C à 170 m et 18°C à 130 m).
- Le profil en *oxygène dissous* demeure plat.
- Le profil de *conductivité électrique* est différent de ceux précédemment mesurés. La conductivité en base d'ouvrage demeure dans la gamme 400 – 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , mais la 2<sup>nde</sup> séquence de pompage, au lieu d'amener à une stabilisation de la conductivité dans la colonne d'eau, fait ressortir des hétérogénéités dans la partie entre 110 et 128 m de profondeur. Un saut de conductivité est surtout visible au passage du télescopage de tubage à 110 m. Cette variation de conductivité pourrait être soit une conséquence du pompage (remise en suspension des fines bloquées dans l'inter-annulaire et de l'eau associée, de chimisme modifié par l'interaction avec les particules), soit liée à un effet de cross-flow (écoulement transversal).
- Le *pH* s'homogénéise dans la colonne d'eau au droit de la crépine, mais également dans le tube plein, ce qui semble signer une purge progressive de l'eau dans cette partie de l'ouvrage.
- Le *potentiel redox* a un profil assez proche de celui mesuré le 01/03 et le 02/03 au matin.

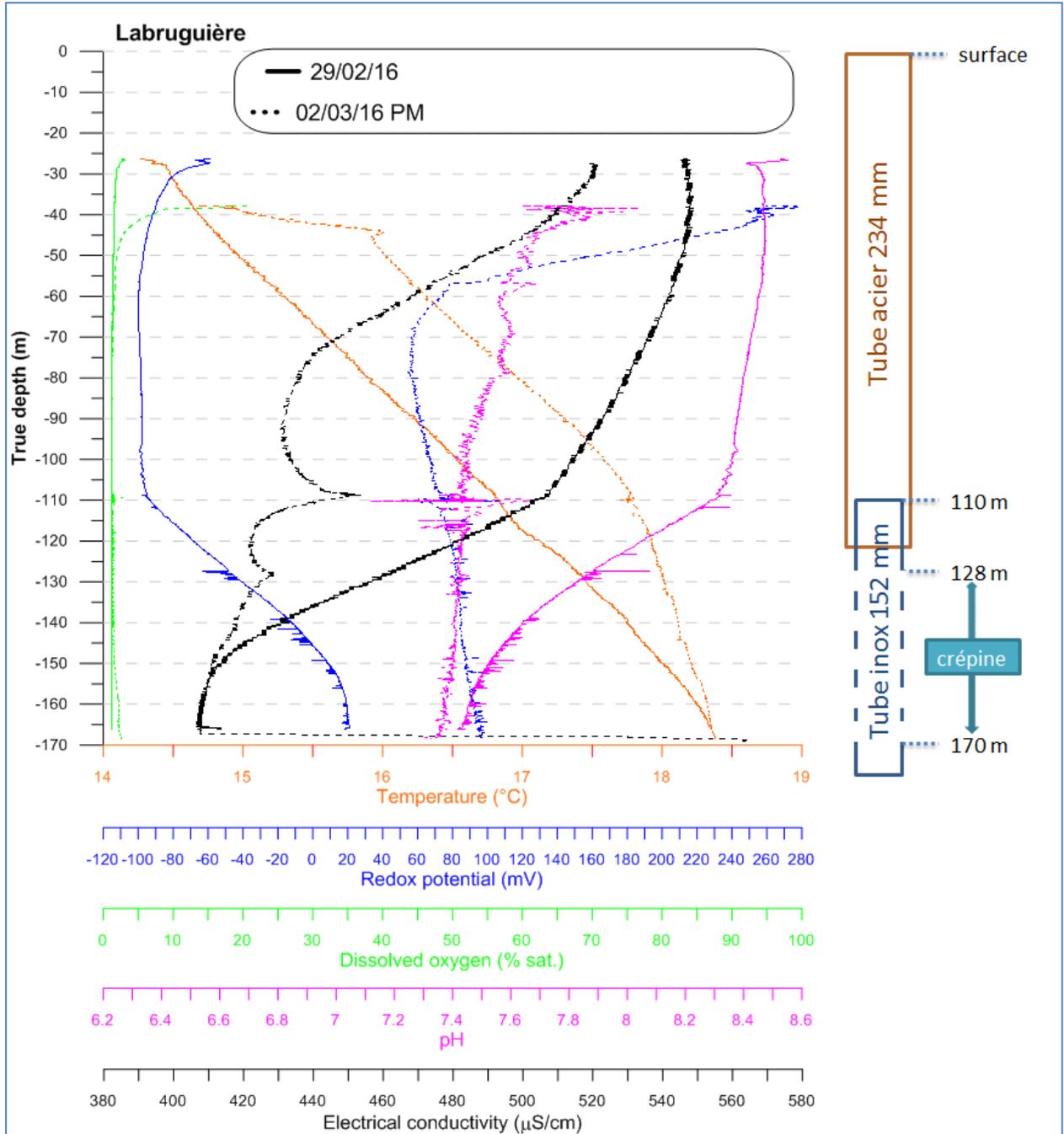


Figure 8 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 29/02/16.

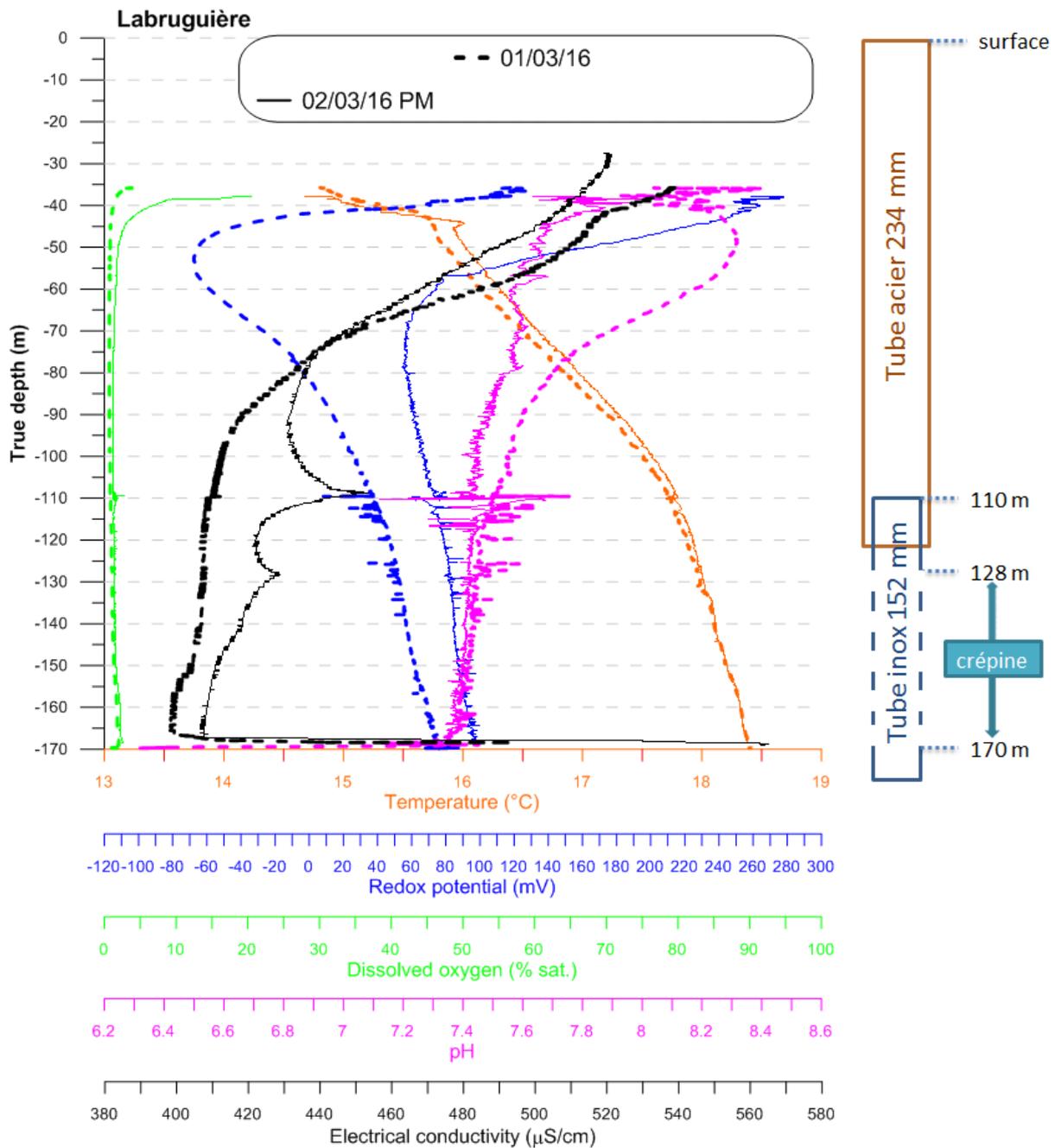


Figure 9 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).

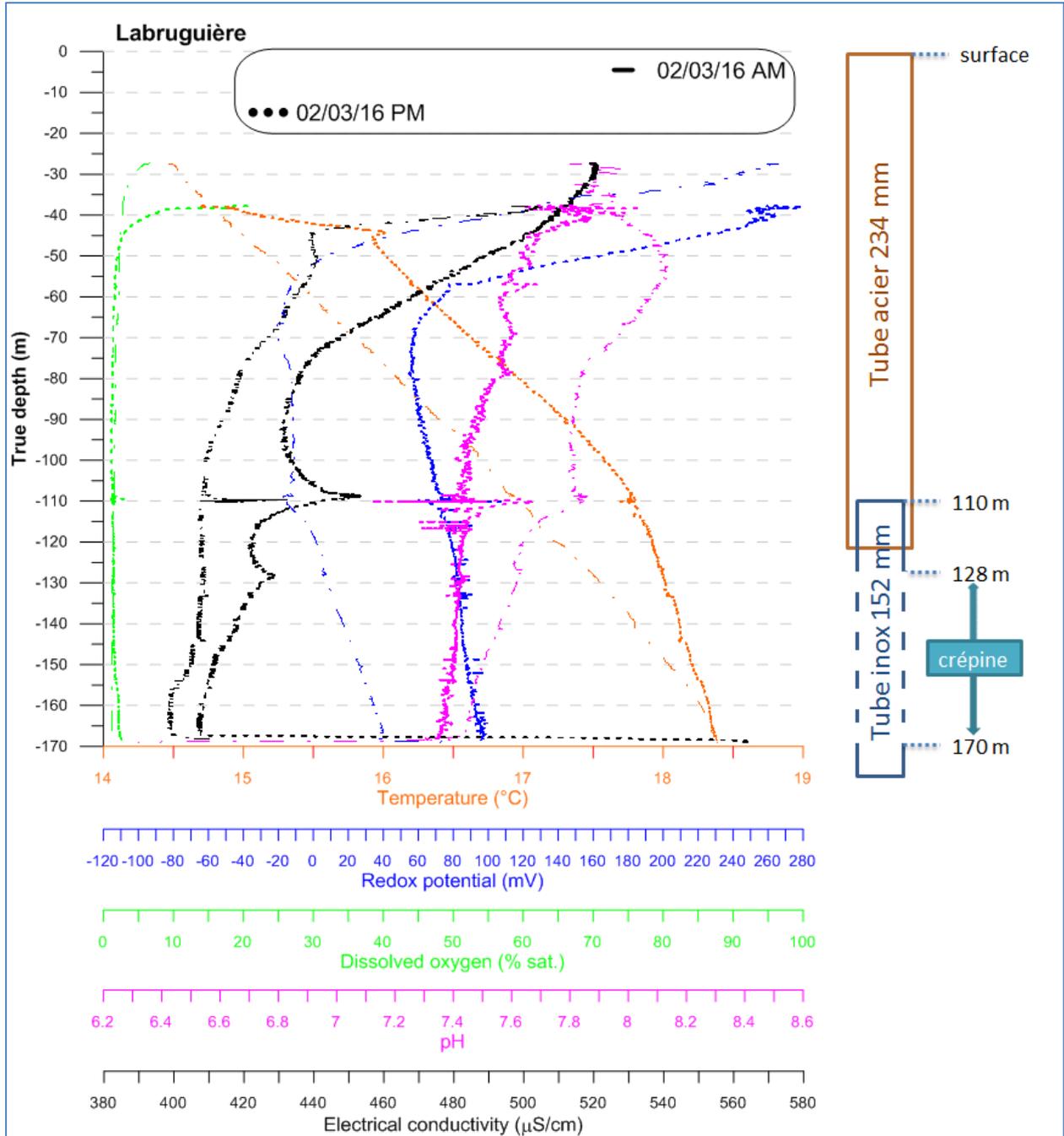


Figure 10 : diagraphie réalisée le 02/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 2400 litres supplémentaires) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos).

#### 2.2.4. Diagraphies du 03/03/2016

Cette dernière journée a vu la réalisation d'une diagraphie en début de matinée, avant toute nouvelle intervention sur le forage, ainsi qu'à l'issue de la 3<sup>ème</sup> session de pompage (environ 3300 litres pompés, amenant à avoir pompé en 3 fois environ 1,6 fois le volume initial de la colonne d'eau).

##### a) Diagraphie du 03/03/2016 matin

Le niveau statique est remonté à -26,83 m, soit légèrement plus haut que celui constaté la veille. Les différentes mesures sont reportées dans les Figure 11 (comparaison à la 1<sup>ère</sup> diagraphie du 29/02), Figure 12 (comparaison à la diagraphie du 01/03 après pompage de 1600 litres), Figure 13 (comparaison à la diagraphie du 02/03 au matin) et Figure 14 (comparaison à la diagraphie du 02/03 après-midi, avec pompage cumulé de 4000 litres). Il ressort que :

- La mise à l'équilibre *thermique* avec l'encaissant, telle que déjà constatée sur la Figure 6, est toujours nettement sensible après une nuit sans sollicitation de l'ouvrage.
- Le profil en *oxygène dissous* est toujours plat.
- La *conductivité électrique* est toujours proche de  $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en base d'ouvrage, et que la structuration bimodale qui a commencé à apparaître à l'issue du pompage le 02/03 est toujours visible.
- La valeur du *pH* ne semble plus guère varier, et s'homogénéise de plus en plus.
- Le *potentiel redox* admet également un profil qui ne varie plus guère d'une diagraphie à l'autre, seule la partie sommitale de la colonne d'eau n'étant pas homogénéisée.

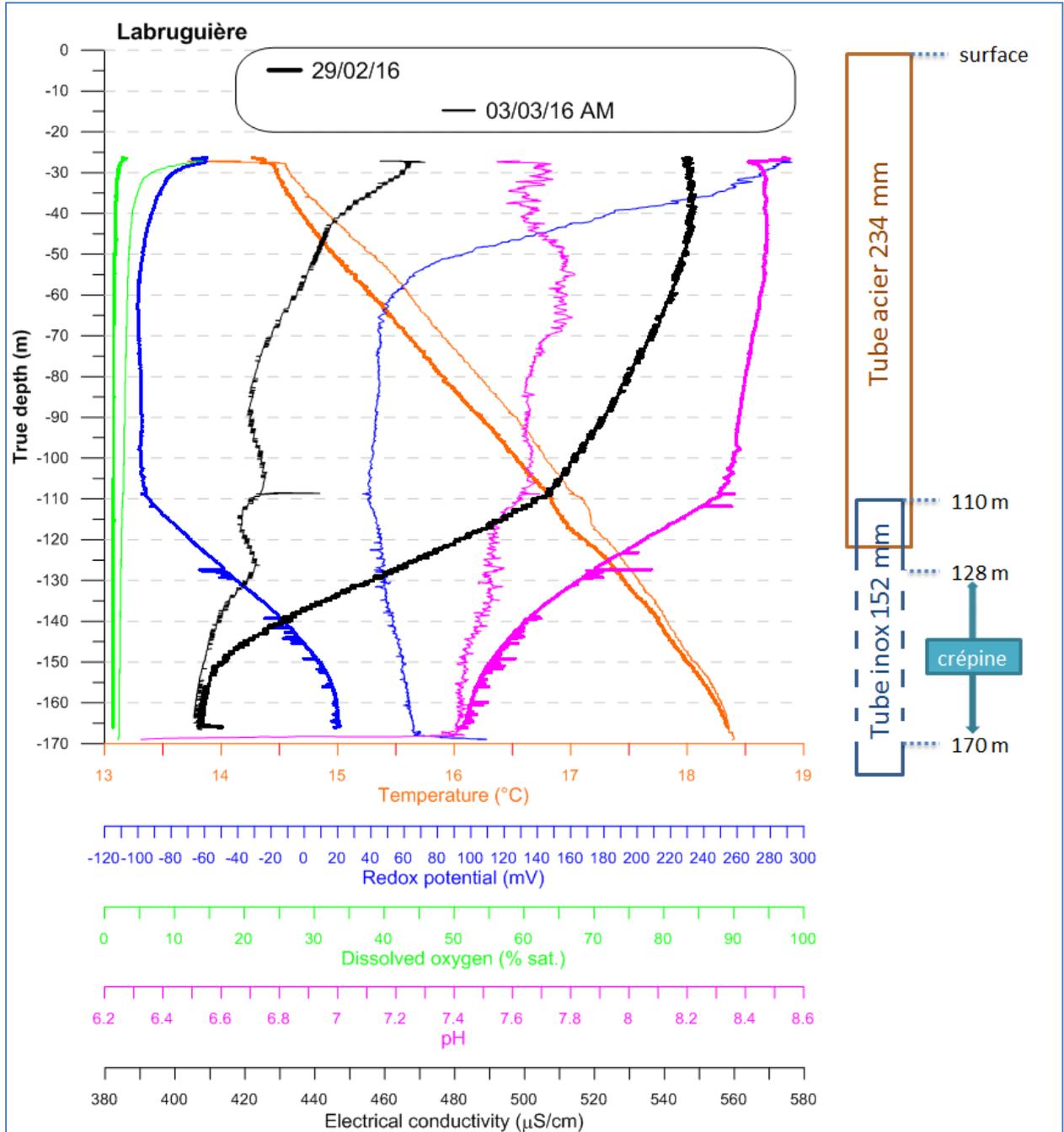


Figure 11 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie initiale du 29/02/16.

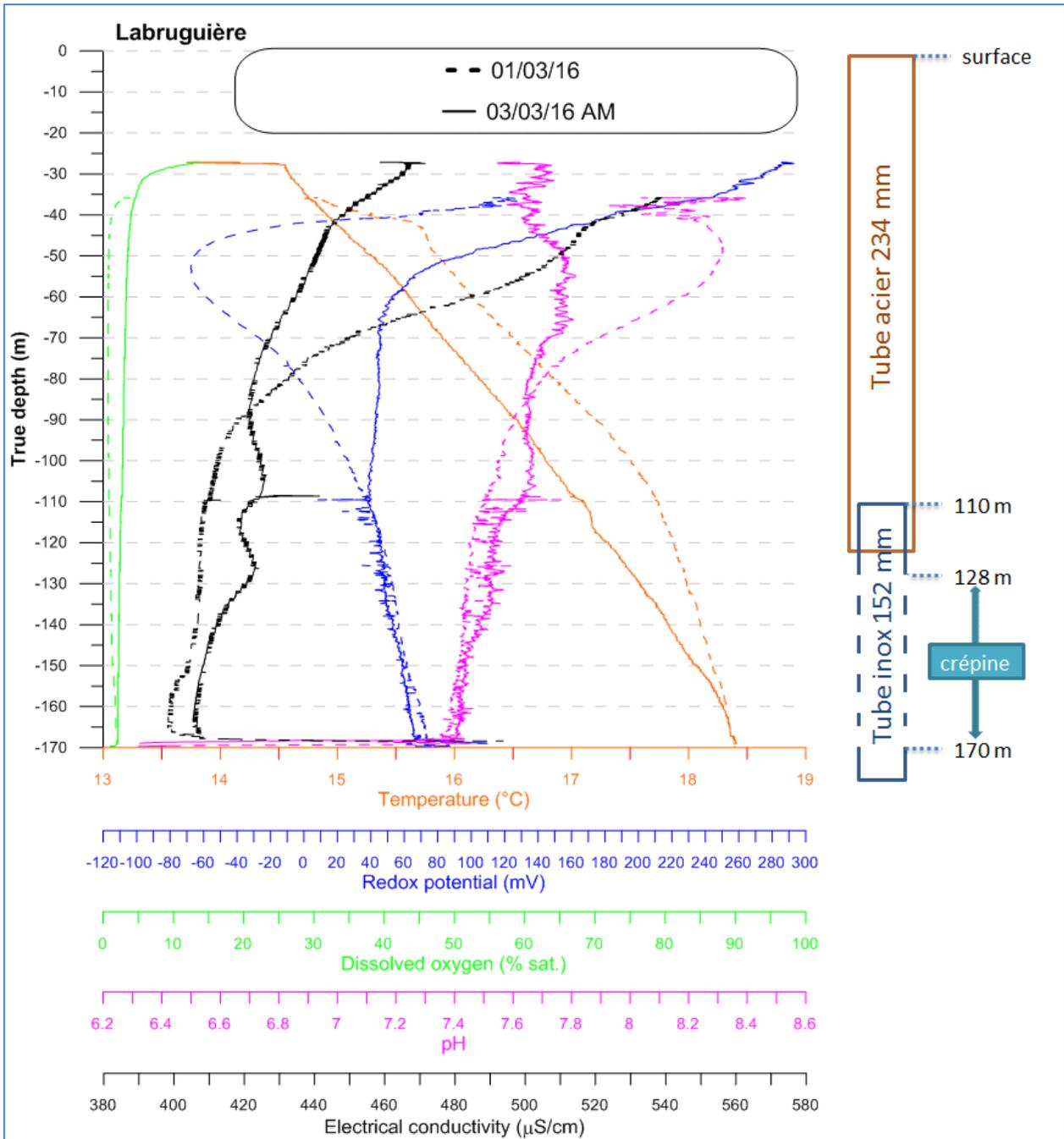


Figure 12 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).

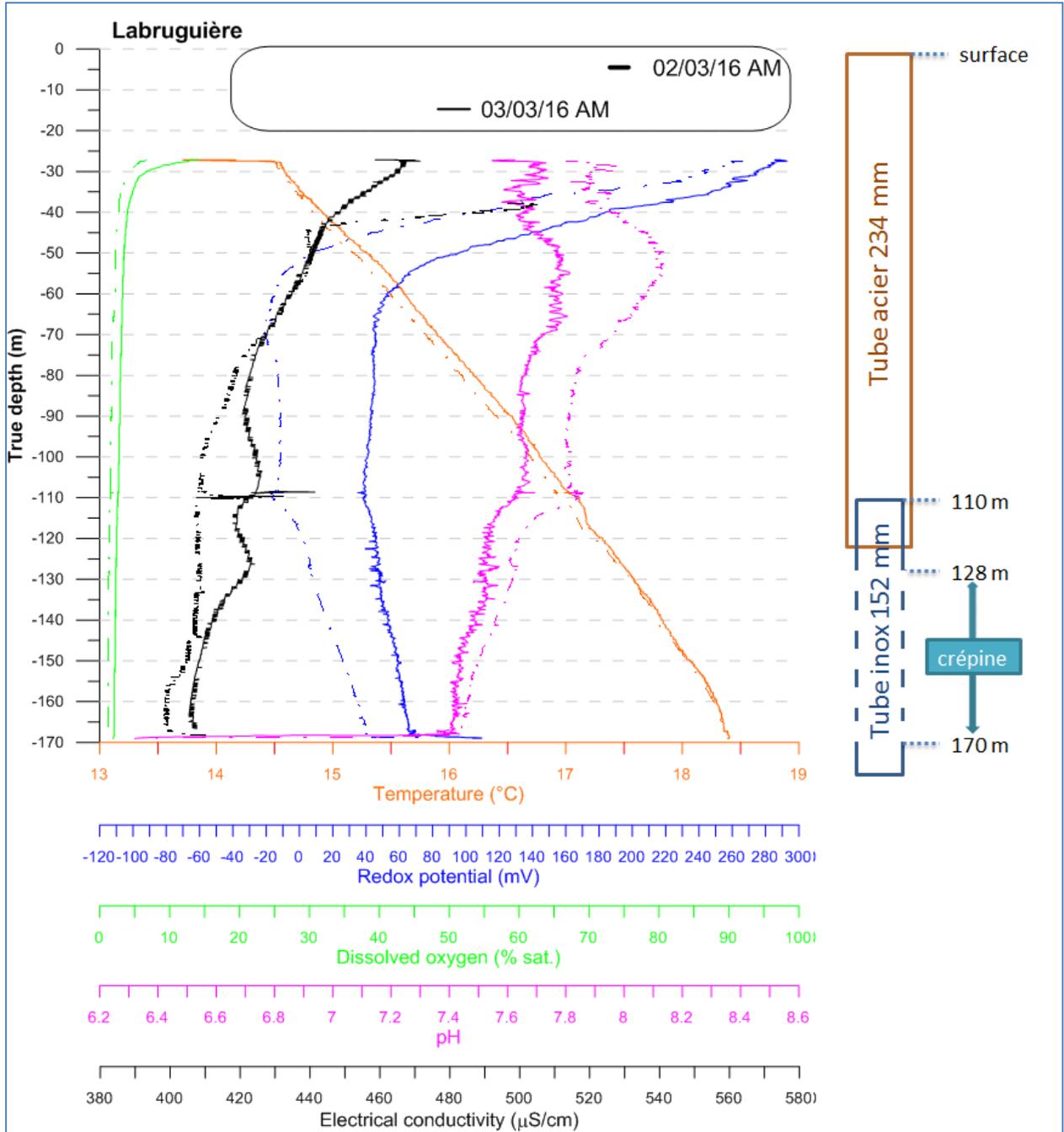


Figure 13 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 au matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos).

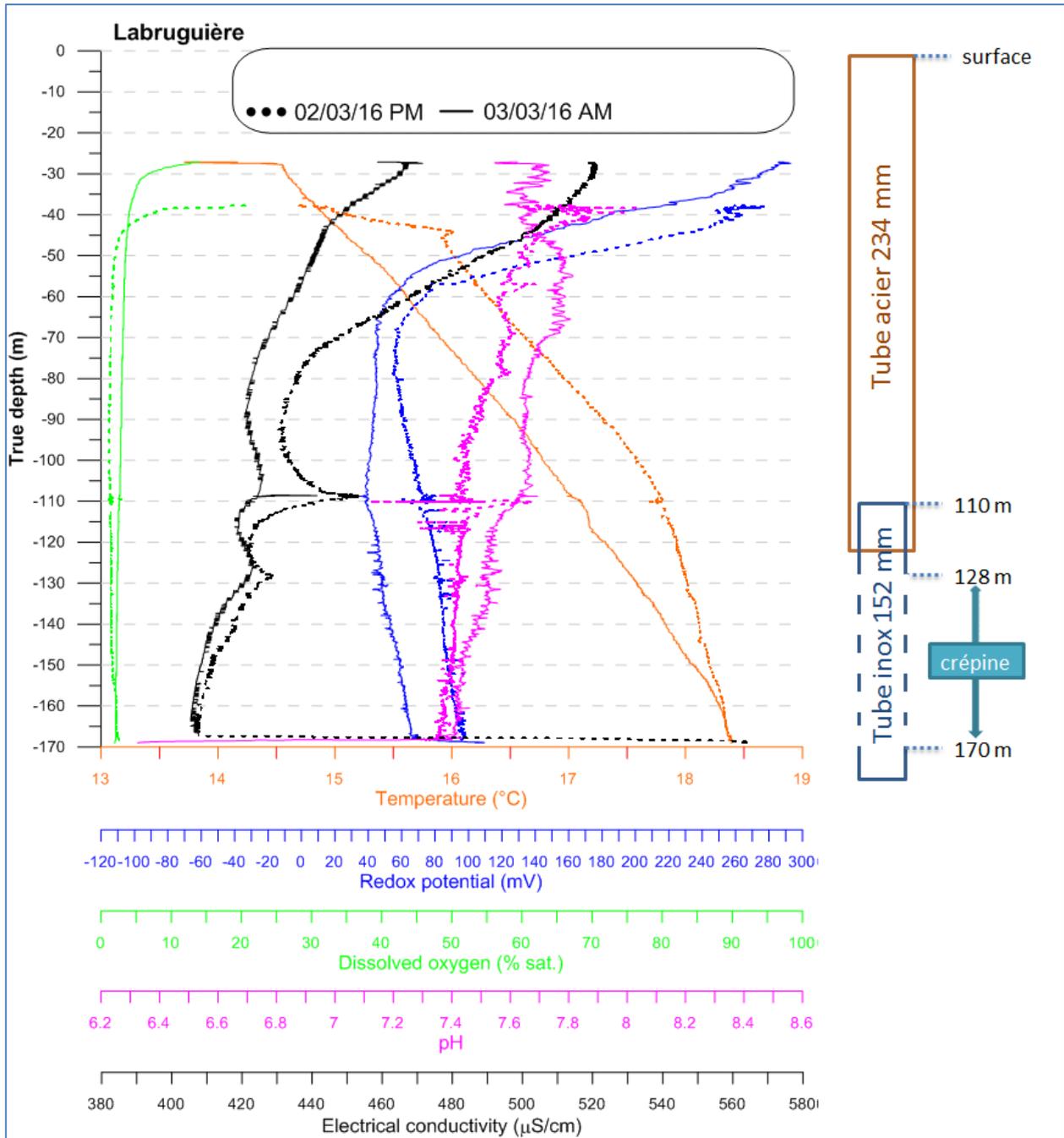


Figure 14 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 après-midi (après pompage de 1600+2400 litres).

## b) Diagraphie du 03/03/2016 après-midi

Cette diagraphie fait donc suite au pompage de 7300 litres dans l'ouvrage, dont 3300 litres ont été pompés durant les 3 heures précédentes. Le débit de purge ayant été augmenté, afin de purger au minimum 1 fois le volume de l'ouvrage (1,6 fois le volume au final), le niveau statique lors de la réalisation de la diagraphie était très bas (-39,45 m).

La diagraphie est comparée à la 1<sup>ère</sup> diagraphie du 29/02 (Figure 15), à la diagraphie du 01/03 après pompage de 1600 litres (Figure 16), à la diagraphie du 02/03 au matin (Figure 17), à la diagraphie du 02/03 après-midi, après pompage cumulé de 4000 litres (Figure 18) et à la diagraphie du 03/03 au matin (Figure 19).

Il est alors possible de constater que :

- La *température* suite au pompage tend à être de plus en plus homogène dans la crépine, même si l'influence du gradient géothermique semble toujours faire diminuer de quelques dixièmes de degré la température au sommet de la crépine. Le réchauffement de l'eau est de plus en plus important dans le tube plein, ce qui signifie que l'on renouvelle correctement la colonne d'eau sous la pompe, la partie supérieure n'étant pas purgée (on remarque particulièrement bien l'inflexion vers -45 m qui correspond à l'emplacement de la pompe).
- La teneur en *oxygène dissous* ne varie pas.
- La *conductivité électrique* est toujours légèrement plus basse dans la partie basse de la crépine – zone d'alimentation la plus probable. La structure bimodale résultant de la phase de pompage du 02/03 n'apparaît pas pérenne, et semble donc à attribuer à une remobilisation d'éléments suite au pompage et pas à une hétérogénéité de l'aquifère.
- Le *pH* après pompage est remarquablement homogène dans la crépine et jusque vers 60 m de profondeur.
- Le *potentiel redox* semble avoir atteint un profil d'équilibre en conditions très légèrement oxydantes (non réductrices pour le moins).

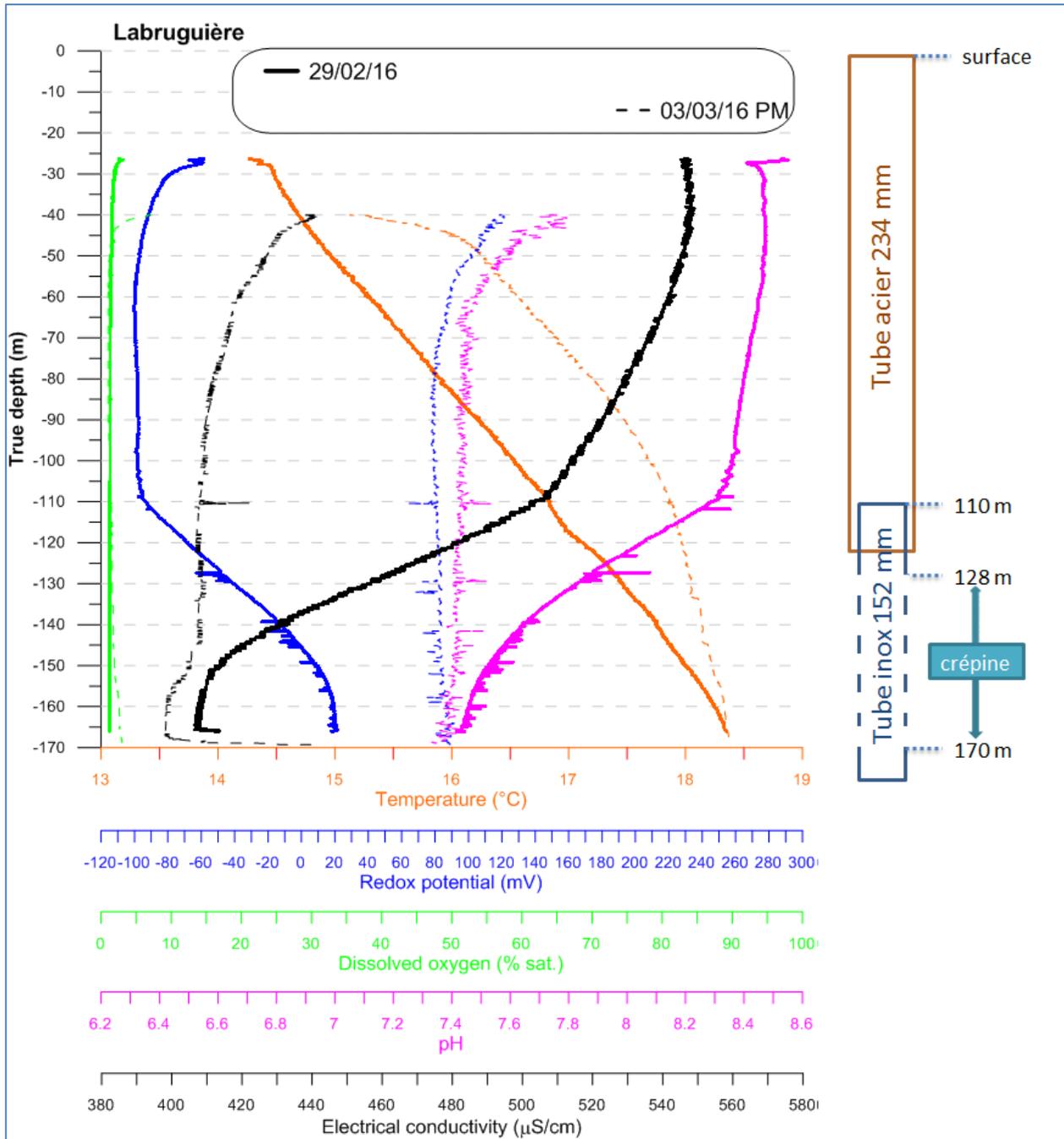


Figure 15 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie initiale du 29/02/16.

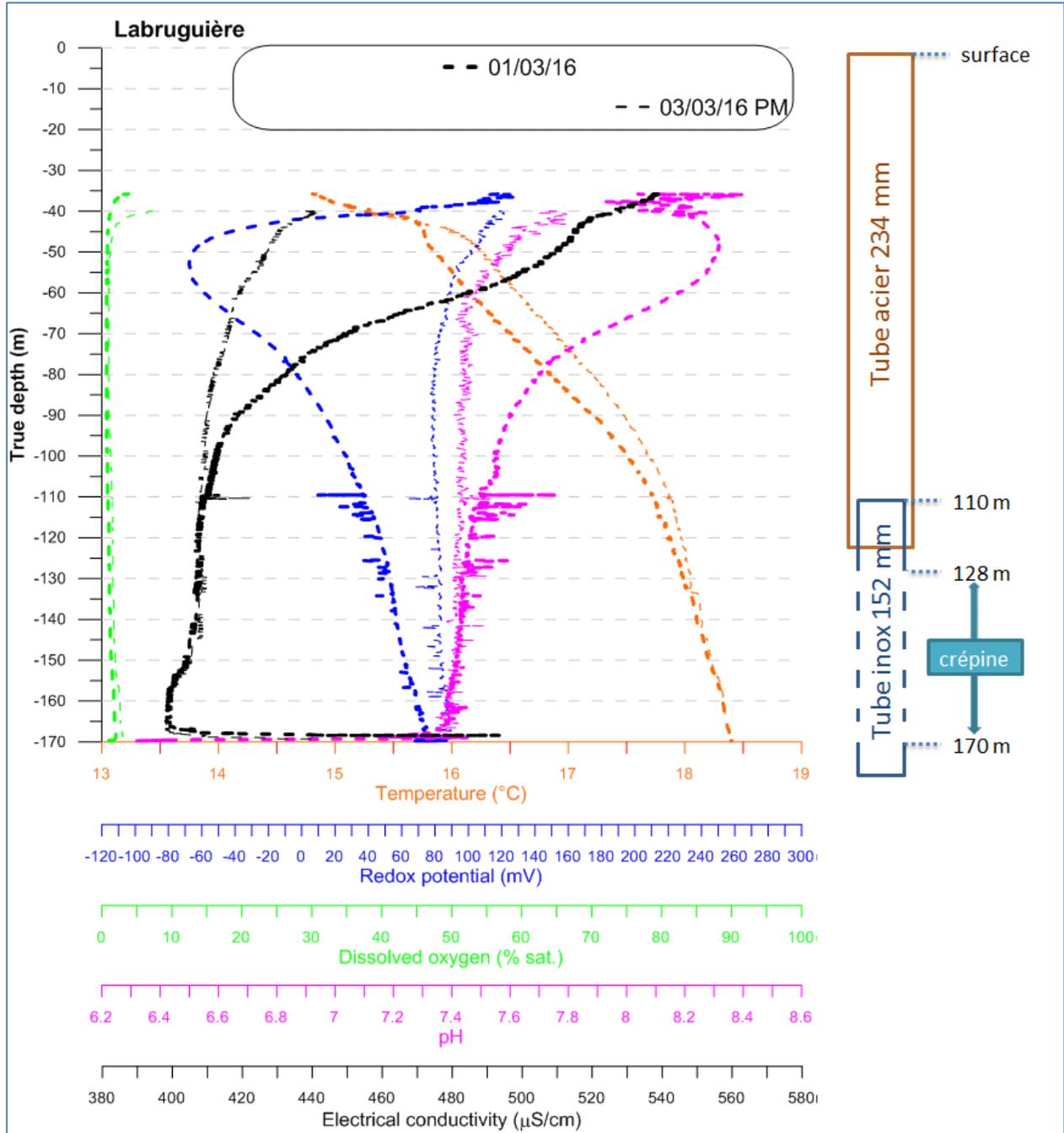


Figure 16 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 01/03/16 (après pompage de 1600 litres).

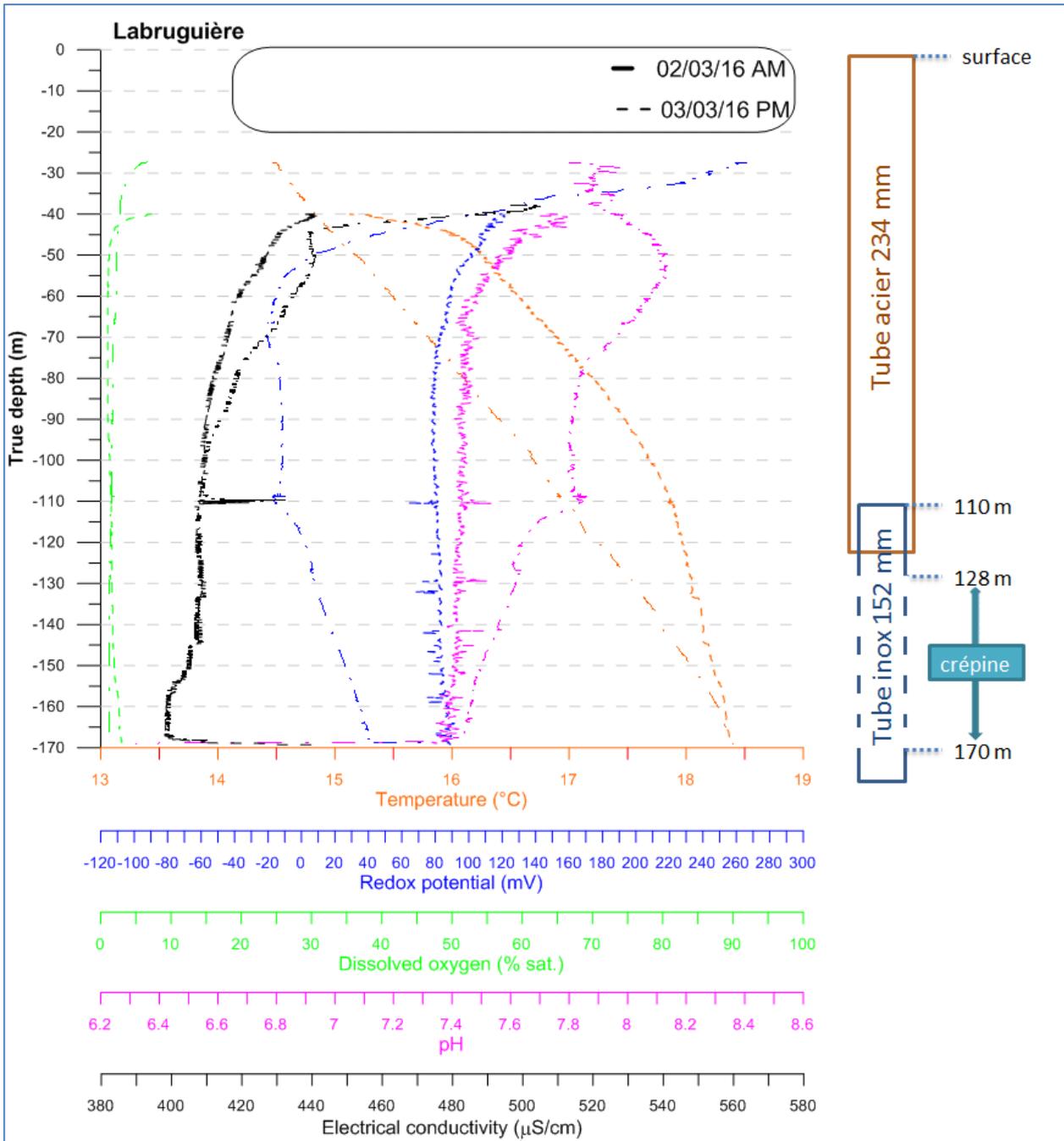


Figure 17 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 au matin (après pompage de 1600 litres et une nuit de repos).

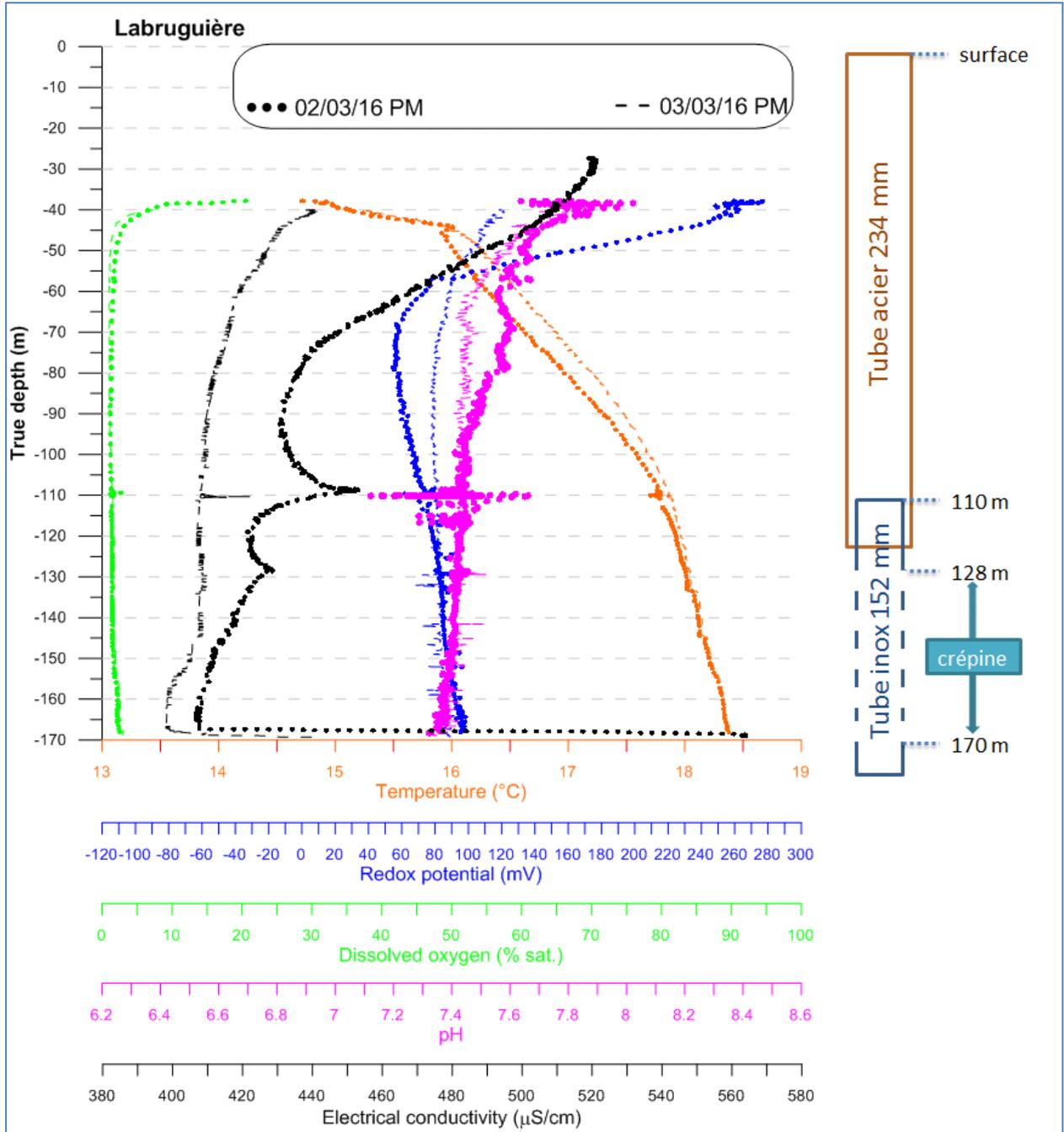


Figure 18 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 02/03/16 après-midi (après pompage de 1600+2400 litres).

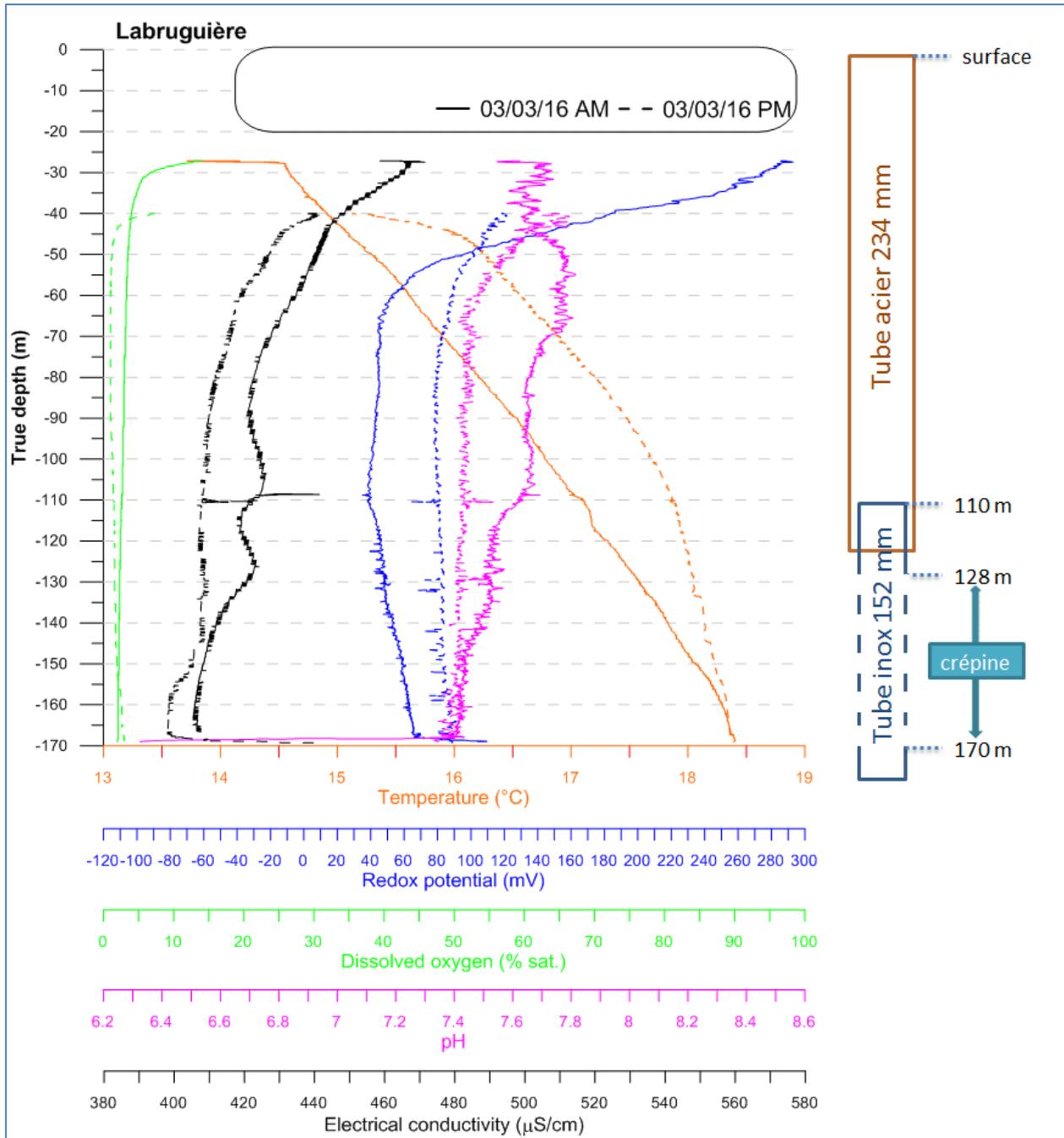


Figure 19 : diagraphie réalisée le 03/03/16 après-midi sur le piézomètre de Labruguière (après pompage de 1600+2400+3300 litres) et comparaison à la diagraphie du 03/03/16 au matin (après pompage de 1600+2400 litres et une nuit de repos).

### 2.2.5. Récapitulatif des diagraphies

Les changements de *température* suite à un pompage sont clairement visibles dans la Figure 20. Plus le volume d'eau soustrait augmente, plus le renouvellement de l'eau dans la partie tubée pleine est efficace, sans pour autant être total. Enfin, l'eau qui est présente au-dessus de la pompe n'est pas bien renouvelée : le pompage déplace vers le bas cette eau plus froide, et tout au plus peut-on noter une légère augmentation de température par transfert thermique. Dans les conditions utilisées lors des investigations (pompage séquentiel avec interruptions assez longues), il n'est pas possible d'homogénéiser totalement la colonne d'eau dans les crépines, même en pompant un volume d'eau supérieur à celui présent dans cette partie du tubage (le 03/03, 3300 litres ont été pompés, représentant 1,6 fois le volume d'eau présent initialement dans le forage, 3 fois le volume d'eau présent dans le tubage inox et 4,3 fois celui présent au droit de la crépine). Il est possible que le pompage sans interruption de 3 fois le volume de la colonne d'eau amène à nuancer ce constat (on tendrait sans doute vers une meilleure homogénéisation thermique dans l'ensemble de la colonne d'eau), mais cela constitue une opération qui est difficilement réalisable sur une journée de travail normale, eu égard au faible débit de pompage qui doit être utilisé pour ne pas dénoyer la pompe.

Les phases de repos nocturnes permettent, outre une remontée du niveau statique vers des cotes un peu inférieures à la cote initiale, de constater une rapide remise à l'équilibre thermique de l'eau renouvelée dans le forage avec l'encaissant. Certes, l'équilibre initial n'est pas totalement atteint, et il l'est d'autant moins que le volume d'eau pompé est important. Toutefois, cela suggère que même en ayant renouvelé l'eau, la prise d'un échantillon à partir d'horizons peu profonds peut amener à la collecte d'une eau refroidie, ce qui pourrait amener à des modifications du chimisme de l'eau (en fonction des cinétiques des processus mis en jeu).

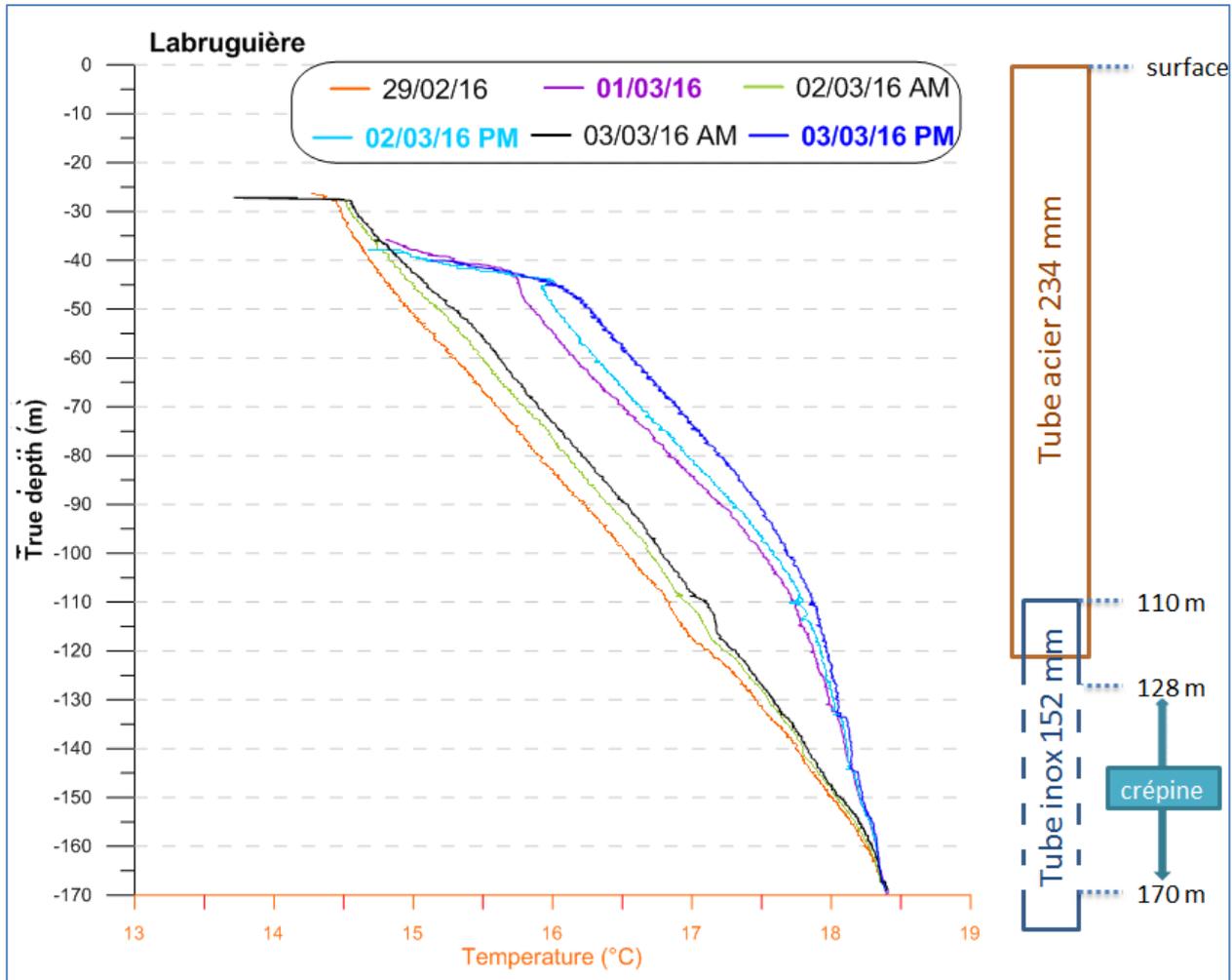


Figure 20 : récapitulatif des profils de température ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.

Les différents profils de *conductivité électrique* sont reportés dans la Figure 21. La 1<sup>ère</sup> mesure se distingue très clairement, et n'est pas représentative de l'aquifère sauf dans les horizons les plus profonds (à partir de 150 m), ce qui suggère, comme précédemment mentionné, que l'alimentation se fait préférentiellement par ces niveaux profonds. Les phases de pompage permettent – comme pour la température – d'homogénéiser la colonne d'eau, avec une possible influence de matériel ou d'eau présents dans l'inter-annulaire au niveau du télescopage de tubage vers 110 m de profondeur (sauts de conductivité du 02/03 après-midi et du 03/03 matin). Hormis ce point, dès qu'un certain volume d'eau a été extrait, la conductivité électrique devient rapidement homogène dans la crépine. On pourrait être tenté de voir une légère différence entre le haut (128 à 145 m) et le bas de la crépine (155 – 170 m), avec un passage de 410 à 400  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , soit une variabilité de 2,5%, cet écart étant reproductible d'une mesure à l'autre. Toutefois, si l'on se réfère aux critères de stabilité préconisés lors de la réalisation de prélèvements en pompage, on admet qu'une eau de conductivité inférieure à 500  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a une conductivité stable tant que ce paramètre a une variabilité inférieure à 5%. L'écart entre 400 et 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  n'est sans doute pas significatif en termes de représentativité du prélèvement.

Les phases de repos nocturnes ne se traduisent pas par une variabilité particulière, il n'y a donc vraisemblablement pas de modification forte du chimisme de l'eau dans le cas de cet ouvrage.

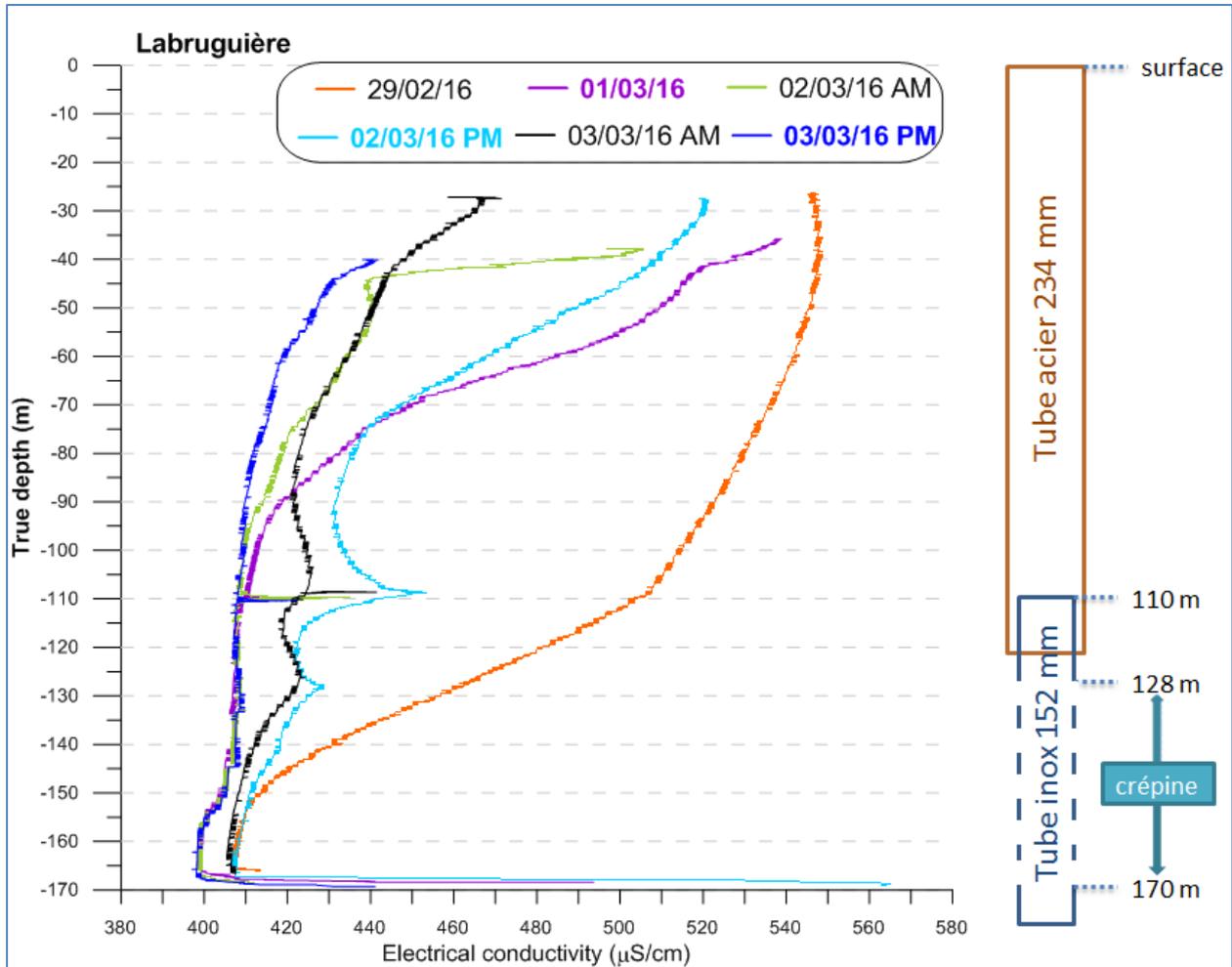


Figure 21 : récapitulatif des profils de conductivité électrique ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.

Les modifications mesurées pour le *pH* sont illustrées par la Figure 22. Comme pour la conductivité électrique, toutes les données convergent vers un *pH* proche de 7,4 à la base de l'ouvrage (horizon 155 – 170 m). Les phases de pompage permettent de progressivement homogénéiser la valeur de ce paramètre dans la crépine, puis dans la partie tubée pleine, jusque vers 70 m de profondeur le 03/03. A noter que dans le cas de cet ouvrage à faible productivité, où le pompage ne peut que difficilement être réalisé selon les critères classiques (à rabattement constant et en purgeant entre 1 et 3 fois le volume de la colonne d'eau), il n'est pas possible d'obtenir le *pH* du fond de trou au niveau de la pompe.

Si l'on envisageait de faire un prélèvement au terme du pompage d'au minimum 1 fois le volume de la colonne d'eau, on serait confronté à une configuration où l'on ne serait que difficilement capable de mettre en évidence une variabilité du *pH* (cf. chronique en pompage, paragraphe 2.4) – ou d'autres paramètres – ce qui induirait donc l'échantillonnage d'une eau

qui n'est pas réellement représentative des conditions régnant au droit de la zone crépinée. En effet, on considère que la stabilité physico-chimique de l'eau est atteinte pour des variations, sur une durée de 10 minutes, inférieures à 0,2°C pour la température, inférieures à 0,05 unité pour le pH et inférieures à 5% pour la conductivité électrique.

En prenant en référence le suivi du 1<sup>er</sup> pompage le 01/03, on a :

- A 15:50 : 16,109°C, 521  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  et 8,343 unité pH (soit 8,34) ;
- A 16:00 : 16,158°C, 521  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  et 8,338 unité pH (soit 8,34) ;
- La variation est donc de 0,3% pour la température (0,049°C  $\ll$  0,2°C), 0% pour la conductivité et 0,06% pour le pH (0,005 unité  $\ll$  0,05 unité). Ce qui signifie donc que l'eau apparaît physico-chimiquement stable, donc représentative de l'aquifère, alors qu'elle ne l'est pas réellement, notamment en se basant sur la valeur du pH, qui est différente des valeurs mesurées en diagraphie. On peut toutefois objecter que cette 1<sup>ère</sup> purge est loin de respecter le critère d'au moins une fois le volume de l'ouvrage.

Même en se référant au 3<sup>ème</sup> pompage (volume cumulé de purge supérieur à 1 fois le volume de la colonne d'eau), on pose un constat identique :

- A 15:20 : 16,565°C, 431  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  et 7,741 unité pH (soit 7,74) ;
- A 15:30 : 16,634°C, 431  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  et 7,72 unité pH ;
- La variation est donc de 0,41% pour la température (0,069°C  $\ll$  0,2°C), 0% pour la conductivité et 0,27% pour le pH (0,021 unité  $<$  0,05 unité).

Les phases de repos nocturnes se traduisent par une hausse assez sensible du pH dans la partie supérieure de la crépine et surtout dans le tube plein, ce qui suggère l'existence d'interactions avec le tubage ou les plaquages de fines qui pourraient exister le long de celui-ci.

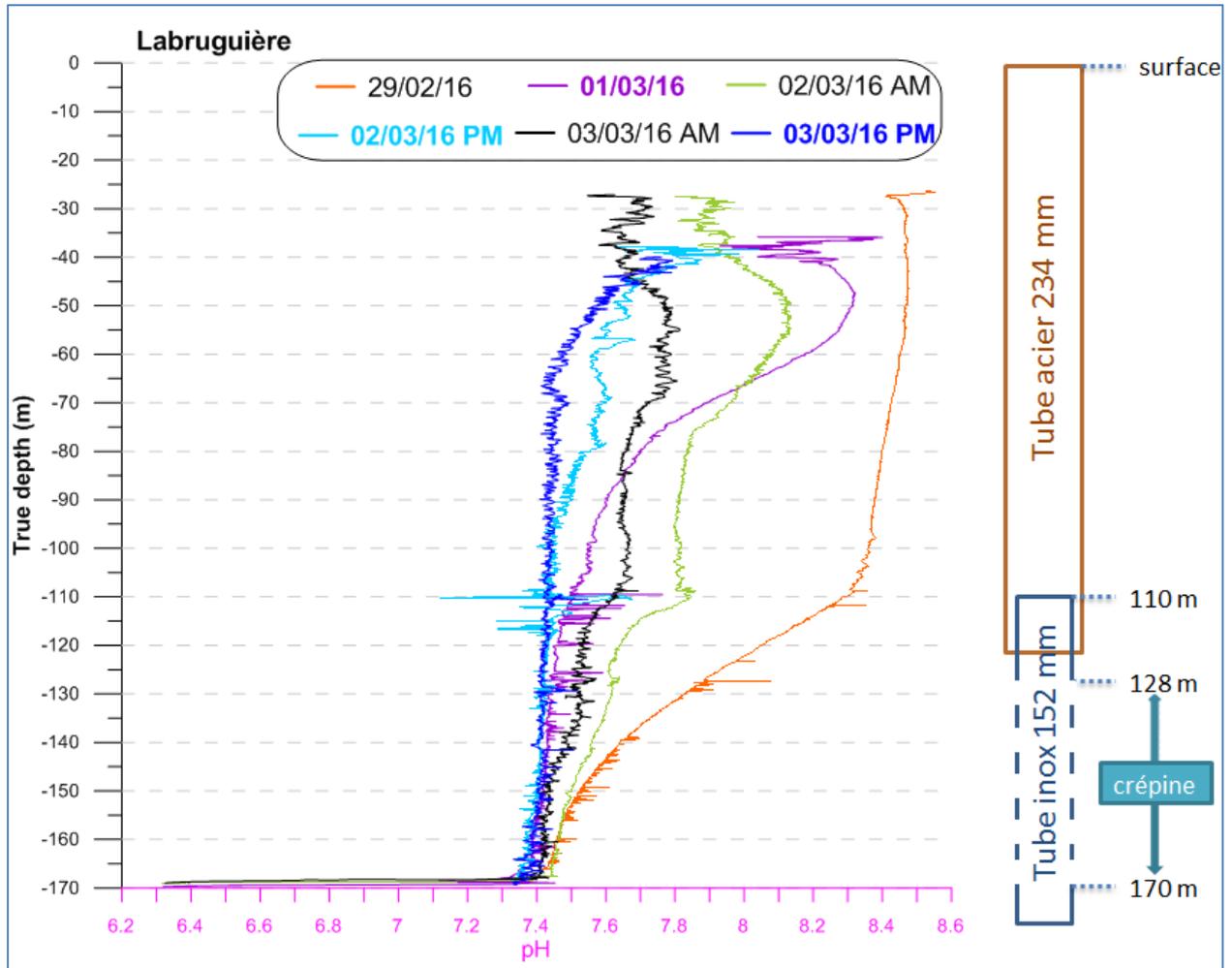


Figure 22 : récapitulatif des profils de pH ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.

Enfin, les évolutions du potentiel redox sont reportées dans la Figure 23. Comme pour les autres paramètres, les phases de pompage permettent d'homogénéiser la colonne d'eau, et ce d'autant plus que le volume pompé est grand. Le profil d'équilibre indique des conditions légèrement oxydantes sans variabilité spécifique le long de la crépine. Si la base de la crépine reste en milieu oxydant, l'eau (renouvelée) présente en son sommet passe de conditions « milieu légèrement réduit » à des conditions « milieu légèrement oxydant ».

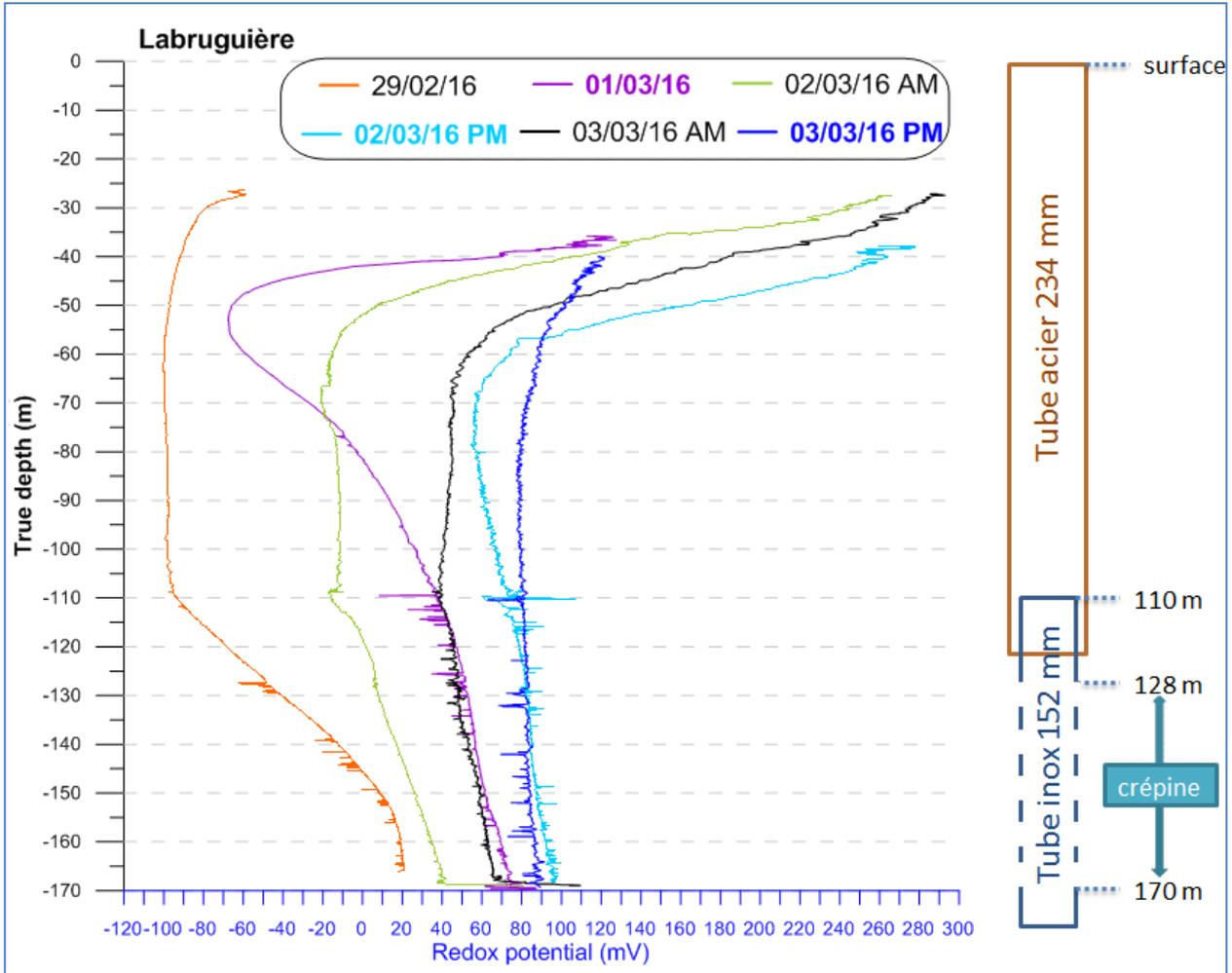


Figure 23 : récapitulatif des profils de potentiel redox ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Labruguière.

### 2.3. PRELEVEMENTS DE FOND

Les différentes périodes de réalisation des prélèvements de fond sont rappelées dans le Tableau 1. Les premiers prélèvements de fond ont été réalisés après la diagraphie initiale, afin de collecter une eau dans l'état d'équilibre de forage. Compte tenu des informations fournies par cette diagraphie, il a été choisi de réaliser un prélèvement à 130 m de profondeur (partie haute de la crépine), de faire un contrôle des paramètres physico-chimiques à 150 m de profondeur, puis de faire un autre prélèvement à 163 m de profondeur (lors de la 1<sup>ère</sup> diagraphie, la sonde a commencé à pénétrer dans le bouchon vaseux vers 165 m, aussi il a été choisi de faire le prélèvement un peu plus haut).

Par la suite, les pompages successifs ont permis de purger en partie l'ouvrage (Figure 24), la sonde pouvant alors descendre jusqu'à 170 m environ. Par soucis d'homogénéité, il a été choisi de ne pas modifier la profondeur du prélèvement. Les autres prélèvements ont donc été réalisés après les séquences successives de pompage, afin de suivre la façon dont l'eau se renouvelle dans l'ouvrage, et de pouvoir comparer cette évolution avec celle établie sur le suivi de pompage.



Figure 24 : état de l'eau et des filtres 0,45 µm à l'issue de la 1<sup>ère</sup> séquence de pompage : présence importante de fines – piézomètre de Labruguière.

Le principe du prélèvement de fond repose sur l'utilisation du dispositif de prélèvement en profondeur mis au point par le BRGM, qui permet de faire remonter un fluide dans un tube d'un tuyau bitube, l'autre tube servant à réguler une pression de gaz pousseur (azote) servant à ouvrir et fermer les clapets situés au niveau de l'horizon à prélever. L'infrastructure de surface est présentée en Figure 25. Une vue plus détaillée est fournie en Figure 26, et permet de visualiser le flux d'eau créé lors de la remontée du fluide en surface (diamètre interne du tuyau 4 mm).



Figure 25 : à gauche du forage : dispositif de prélèvement de fond (bouteille d'azote, enrouleur avec tuyau bitube) ; à droite du forage : matériel nécessaire au pompage – piézomètre de Labruguière.



Figure 26 : vue de détail du dispositif de prélèvement de fond en fonctionnement – piézomètre de Labruguière.

### 2.3.1. Prélèvements de fond à 130 m

Les données afférentes au suivi des prélèvements faits sur cet horizon sont rapportées dans le Tableau 2. Compte tenu du mode opératoire du préleveur de fond, lors de chaque session de prélèvement, la 1<sup>ère</sup> remontée d'eau (1<sup>er</sup> cycle) dans le système n'est pas représentative de l'horizon de prélèvement et doit être uniquement considérée comme étant une *purge du système*. En effet – sauf à utiliser un bitube neuf à chaque fois – il n'est jamais possible de totalement purger le bitube par soufflage d'azote (même en faisant circuler de l'eau de rinçage). Il reste donc de l'eau résiduelle dans ce bitube, qui doit être expulsée lors du 1<sup>er</sup> cycle de remontée d'eau, qui constitue uniquement une séquence de rinçage. Ceci est particulièrement visible pour la 1<sup>ère</sup> remontée d'eau du 01/03 (conductivité électrique élevée).

C'est également pour cette raison que l'on pratique plusieurs autres purges avant de procéder au prélèvement proprement dit. Dans le Tableau 2, on voit que les paramètres physico-chimiques se stabilisent à partir de la 3<sup>ème</sup> remontée d'eau. Par sécurité, on a donc procédé au moins à 3 cycles de remontée d'eau, et généralement à 5 cycles, pour faire le prélèvement.

n° de cycle	date	heure	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> dissous (% sat.)	pH	Conductivité @25°C (µS/cm)	Pot. redox (corrigé, mV)
1	<i>01/03/2016</i>	<i>9:25</i>	<i>4.4</i>	<i>27.6</i>	<i>8.37</i>	<i>566</i>	<i>236</i>
2		9:38	7.3	14.6	8.19	490	80
3		9:48	9.3	19.3	8.11	460	53
4		9:59	10.6	16.8	8.1	458	41
5		10:10	10.6	28	8.08	459	52
1	<i>02/03/2016</i>	<i>8:48</i>	<i>8.2</i>	<i>18</i>	<i>7.99</i>	<i>444</i>	<i>124</i>
2		8:59	9.4	14.6	7.91	433	134
3		9:09	10.1	12.8	7.83	425	92
4		9:19	10.5	12.8	7.77	422	82
5		9:28	10.6	12.2	7.71	423	85
1	<i>03/03/2016</i>	<i>9:22</i>	<i>6.4</i>	<i>15.7</i>	<i>7.13</i>	<i>449</i>	<i>137</i>
2		9:34	7.5	13.1	7.61	428	118
3		9:44	8.3	7.2	7.68	421	73
4		9:53	8.7	7.5	7.76	424	70
5		10:01	8.9	10.9	7.7	424	75
1	<i>03/03/2016</i>	<i>16:58</i>	<i>8.6</i>	<i>14</i>	<i>6.7</i>	<i>420</i>	<i>132</i>
2		17:11	9.4	8.1	7.07	416	110
3		17:19	10	6.5	7.33	414	92

Tableau 2 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 130 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 2 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière.

Comme pour les diagraphies, il est donc possible de discuter les différents paramètres physico-chimiques, qui sont mesurés cette fois-ci en surface, dans l'eau recueillie en sortie du tuyau (Figure 26) :

- La *température* mesurée en surface ne peut être considérée comme représentative de la température en fond de trou. Ceci est principalement lié au fait que le bitube

descendu dans l'ouvrage n'est pas à l'équilibre thermique avec celui-ci, et qu'il est donc nécessaire qu'il se réchauffe. D'autre part, une partie du bitube restant en surface, les conditions climatiques lors des mesures sur site (vent fort et pluie fréquente avec une température inférieure à 10°C) exercent également un biais sur ce paramètre. Dans le cas d'un monitoring pérenne sur un ouvrage, ces 2 biais peuvent facilement être surmontés, d'une part en laissant le dispositif en place et d'autre part en réduisant au maximum la longueur de bitube en surface. Le dispositif ici employé étant mobile et adaptable à la géométrie de nombreux forages, ce biais ne peut pas facilement être évité. Toutefois, la remontée du fluide dans le bitube est rapide, le temps d'interaction et de refroidissement est donc réduit. On constate par ailleurs que plus on réalise de cycles de remontée d'eau, plus la température augmente. Si le temps n'est pas une contrainte, rajouter des cycles permettra d'obtenir une eau moins refroidie. Par ailleurs, en conditions climatiques plus clémentes, ce biais sera encore réduit. Par contre, pour des horizons plus profonds, dont la température dépasse les températures atmosphériques, un léger refroidissement de l'eau entre le point de prélèvement et la surface sera inévitable.

- La teneur en *oxygène dissous* est exprimée en pourcentage de saturation, pour éviter le biais inhérent à une mesure de concentration en mg/l qui serait directement dépendante de la température de l'eau. Ce pourcentage de saturation est nettement supérieur à celui qui est mesuré dans l'ouvrage (quasi nul). Il n'y a pas d'oxygénation possible dans le bitube lors de la remontée du fluide (le seul gaz qui peut être en contact avec l'eau est l'azote). Cette aération artificielle provient du mode de mesure de ce paramètre. Afin d'éviter toute contamination du fluide par une éventuelle fuite d'électrolyte provenant des électrodes de mesure (les électrodes pH et redox contiennent du KCl 3 mol/l), il est d'usage de ne pas faire la mesure directement dans le récipient servant à collecter l'eau mais dans un bécher additionnel. En cumulant cet effet (volume d'échantillon réduit pouvant interagir avec l'atmosphère) avec des effets d'aération supplémentaires (par exemple, pour prendre la photographie illustrant la Figure 26, on a retiré l'extrémité du tuyau d'arrivée d'eau du fond du seau, ce qui aère fortement l'eau), il est malheureusement possible de mesurer des teneurs en oxygène dissous erronées. Pour un suivi plus rigoureux, il faudrait donc faire circuler l'eau dans une enceinte fermée pour faire le suivi physico-chimique, ce qui est facilement réalisable (mais un peu moins pratique d'utilisation).
- La *conductivité électrique* ramenée à 25°C est un paramètre qui ne souffre pas des problèmes de température (puisque normalisée à une température de référence) ou d'aération. En conséquence, ces mesures doivent être directement comparées à celles des diagraphies. Deux cas sont à considérer :
  - o Cas du 01/03 : le prélèvement de fond fait ici suite à une diagraphie préliminaire, et aucun pompage n'a été réalisé dans l'ouvrage. On a donc une structure de conductivité avec des valeurs approchant les 460  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au sommet de la crépine (-130 m) et des valeurs proches de 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en base de crépine (par ex. Figure 21). En excluant le 1<sup>er</sup> cycle (purge), on trouve des valeurs entre 458 et 460  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pour les 3 derniers cycles de remontée d'eau. C'est exactement la valeur indiquée par la diagraphie.
  - o Autres jours : le forage est progressivement purgé, selon les modalités discutées précédemment (cf. paragraphe 2.2). On constate que le 1<sup>er</sup> cycle fournit déjà des valeurs moins exotiques que le 01/03, et qu'à nouveau à partir du 3<sup>ème</sup> cycle la valeur de la conductivité électrique est très stable (autour de 422  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  les 02/03 et 03/03 au matin, autour de 415  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  le 03/03 après-midi). Ces mesures sont très proches de celles indiquées par les diagraphies, respectivement entre 420 et 423  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (02/03 et 03/03 au matin) et 408  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à l'issue du pompage du 03/03. Les incertitudes sont donc

pratiquement négligeables (2% au maximum – rappelons que le critère de stabilité est de 5%).

- Le *pH*, comme la conductivité, devient stable à partir du 3<sup>ème</sup> cycle de remontée d'eau. Pour comparer aux diagraphies, il faut tenir compte de la différence de température entre l'eau à -130 m (autour de 18°C) et l'eau sur laquelle la mesure est faite en surface (entre 9 et 10,5°C). Le delta de pH maximum à rajouter aux mesures faites en diagraphie est de +0,03 à +0,04 unité pH (le pH diminue avec la température pour une solution donnée).
  - o Le 01/03, le pH mesuré en surface est de 8,08, celui mesuré la veille à -130 m est proche de 7,87 (soit 7,9 corrigé) ;
  - o Le 03/03 matin, le pH mesuré en surface est de 7,7, celui mesuré à -130 m est proche de 7,53 (soit 7,57 corrigé) ;
  - o Le 03/03 après-midi, le pH mesuré en surface est de 7,33, celui mesuré à -130 m est proche de 7,42 (soit 7,45 corrigé) ;
  - o On constate donc qu'il existe un léger écart entre les 2 mesures, inférieur à 0,2 unité pH et parfois proche de 0,1 unité pH. Le critère de stabilité pour le pH étant de  $\pm 0,05$  unité, on voit qu'un écart de 0,1 unité pH peut uniquement s'expliquer par une dérive inhérente à l'électrode elle-même, et qu'un écart légèrement plus important peut provenir d'un petit décalage de calibration entre les 2 électrodes<sup>8</sup>.
- Pour le *potentiel redox*, on ne s'attend pas à trouver un bon accord entre mesure fond de trou et mesure en surface, a fortiori en tenant compte de l'aération de l'eau. Même en surface sur un écoulement continu, certaines eaux ne permettent que difficilement la mesure d'un potentiel stable. Ici, les mesures ont été corrigées des effets de température et sont rapportées au potentiel de l'électrode de référence hydrogène, afin de les rendre comparables entre elles. Les mesures en fond de trou et les mesures sur prélèvement de fond sont, respectivement et par ordre chronologique, de +50/-35 mV le 01/03, +80/+10 mV le 02/03, +75/+50 mV le 03/03 au matin et +90/+85 mV le 03/03 après-midi. L'écart entre les 2 mesures tend à se résorber au fur et à mesure des investigations, et on peut même estimer que les mesures du 03/03 sont très comparables entre elles. Autre point rassurant, les 2 mesures augmentent également dans le temps, signe que l'on trace bien un phénomène commun que l'incertitude de mesure n'est pas en mesure de rendre indécélable.

### 2.3.2. Paramètres à 150 m

Les contrôles effectués à 150 m de profondeur sont reportés dans le Tableau 3. Cet horizon n'ayant pas été identifié comme présentant des spécificités lors de la 1<sup>ère</sup> diagraphie, il n'y a pas été réalisé de prélèvement. Seules les paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur 2 cycles – on n'a donc pas encore atteint la totale représentativité de l'horizon.

Les données de *température* et *oxygène dissous* ne sont pas représentative de l'aquifère, comme explicité au paragraphe 2.3.1.

---

<sup>8</sup> Pour être précis, l'électrode pH de la sonde Idronaut 316Plus ne se calibre qu'en 1 point (tampon pH 7) selon la procédure du fabricant. L'électrode des systèmes WTW utilisés pour les mesures de surface est calibrée en 2 points selon le protocole NIST (tampons 4,01 et 6,87). L'électrode de la sonde Idronaut est récente (moins de 6 mois), l'électrode WTW est plus vieille (2 ans). Ces différences peuvent facilement expliquer le léger écart de mesure entre les 2 dispositifs.

Les données de *pH*, *conductivité électrique* et *potentiel redox* sont quant à elles en bon accord avec les mesures faites en diagraphie ; les commentaires du paragraphe 2.3.1 peuvent donc également s'appliquer.

n° de cycle	date	heure	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> dissous (% sat.)	pH	Conductivité @25°C (μS/cm)	Pot. redox (corrigé, mV)
1	01/03/2016	10:23	11.2	12.8	7.99	454	49
2		10:37	12.9	12.6	7.83	439	65
1	02/03/2016	09:44	10.5	13.6	7.34	419	103
2		09:55	10.9	16.7	7.53	414	111
1	03/03/2016	10:11	9.1	8.3	7.6	422	83
2		10:28	9.6	11.3	7.56	414	97

Tableau 3 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de contrôle à 150 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 2,5 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière.

### 2.3.3. Prélèvements de fond à 163 m

Le second horizon ciblé pour faire des prélèvements de fond est celui situé à 163 m de profondeur. Les données de physico-chimie issue de ces prélèvements sont consignées dans le Tableau 4.

On ne reviendra pas sur les écarts entre prélèvement de fond et mesure in-situ par diagraphie pour les paramètres *température* et *oxygène dissous*, les conclusions précédemment établies s'appliquant.

n° de cycle	date	heure	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> dissous (% sat.)	pH	Conductivité @25°C (μS/cm)	Pot. redox (corrige, mV)
1	01/03/2016	10:50	14	14.6	7.72	433	54
2		11:03	14.4	18.6	7.66	429	62
3		11:17	13.9	17	7.59	430	61
4		11:33	13	19	7.17	429	76
5		11:51	13.5	20.7	6.99	432	70
6		12:05	13.3	13.3	7.04	430	65
7		12:21	12.8	17.5	7.13	429	70
1	02/03/2016	10:08	11	16.2	7.38	411	111
2		10:25	11.1	17.6	7.39	411	117
3		10:35	11.5	14.4	7.59	410	106
4		10:47	11.7	12.4	7.59	410	117
5		11:05	11.7	17.1	7.17	408	143
6		11:18	12	15.2	7.2	410	128
1	03/03/2016	10:42	9.9	8.5	7.64	414	91
2		10:54	10.2	10.3	7.56	415	97
3		11:06	10.8	13.5	7.6	416	106
4		11:19	11.3	9.6	7.56	416	105
5		11:30	11.8	9.7	7.58	415	113
1	03/03/2016	17:34	10.2	9.8	7	412	105
2		17:43	10.9	8.6	7.25	412	116
3		17:50	11	13.3	7.22	408	117

Tableau 4 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 163 m de profondeur. Chaque run permet de remonter environ 3 litres d'eau depuis l'horizon de prélèvement. Les données correspondant aux purges sont figurées en italique – piézomètre de Labruguière.

Pour la *conductivité électrique*, les écarts entre les investigations du 01/03 et du 03/03 sont faibles (passage de 430 à 410  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), comme cela était prévisible à la lecture des diagraphies, la conductivité à la base de la crépine ne variant qu'à la marge. Les écarts entre la mesure en fond de trou et la mesure sur le prélèvement en surface sont légèrement plus importants qu'à 130 m de profondeur, autour de 2,5%, mais restent largement en-dessous des critères de stabilité pour ce paramètre ( $\pm 5\%$ ). D'autre part, les 1ères mesures sont plus élevées que les dernières, ce qui est également compatible avec les informations fournies par les diagraphies. En conséquence, il y a très bon accord entre les 2 méthodes pour le paramètre conductivité.

Les mesures de *pH* sont plus variables pour cet horizon de -163 m :

- Le 01/03, la mesure sur prélèvement est de 7,13, pour un pH mesuré en diagraphie à 7,45 (7,47 corrigé de l'effet de température) ;
- Le 02/03, le prélèvement indique 7,2, la diagraphie 7,4 ;
- Le 03/03, les diagraphies convergent toujours vers 7,4, et les mesures en surface sont de 7,6 le matin et 7,2 en fin de journée.
- La variabilité, qui prend en compte l'incertitude de mesure et la variabilité intrinsèque des électrodes, est donc cohérente avec celle trouvée sur les mesures réalisées à -130 m (on retrouve l'écart d'environ 0,2 unité pH). Pour la mesure du 01/03, l'écart

pourrait être attribué à la présence proche d'horizons de fines en base d'ouvrage (celles-ci ont pu être remobilisées par le passage de la sonde de diagraphie la veille au soir dans l'ouvrage), ce qui pourrait localement amener à une légère modification du pH.

Enfin, les mesures du *potentiel redox* sont en relativement bon accord avec les mesures faites en diagraphies, les écarts initiaux tendant à progressivement se résorber entre les 2 méthodes (comme cela a été constaté à -130 m). On passe en effet de +70/+20 mV respectivement en prélèvement de fond et diagraphie le 01/03, à +130/+40 mV le 02/03, puis à +110/+65 mV le 03/03 au matin et enfin +115/+90 mV le 03/03 après-midi.

En conclusion, le suivi des paramètres physico-chimiques à l'exhaure du système de prélèvement de fond permet, pour les paramètres *conductivité électrique* et *pH*, d'avoir une évaluation très raisonnable des paramètres tels qu'ils sont à une profondeur donnée dans l'ouvrage. Ce constat s'étend également en partie pour le *potentiel redox* : ici, ce n'est pas tant la valeur en tant que telle qu'il faudra regarder, mais plutôt sa variabilité le long de la colonne d'eau (si plusieurs prélèvements de fond sont réalisés à plusieurs niveaux). Enfin, le suivi de l'*oxygène dissous* n'a pas été assez précautionneux lors de cette campagne de mesure pour arriver à correctement évaluer ce paramètre en sortie du système de prélèvement de fond – attention ce n'est pas le système qui introduit ce biais, c'est le traitement de l'échantillon en surface. Le suivi de la *température* souffre de biais géométriques (délai pour que le bitube se réchauffe dans le forage, présence de bitube soumis au forçage atmosphérique en surface), mais des solutions pour y remédier existent également.

#### **2.3.4. Prélèvements pour mesure des gaz rares**

Les investigations sur le forage de Labruguière ont été l'occasion de procéder à un autre test, consistant à évaluer la faisabilité d'un prélèvement de gaz dissous pour la mesure ultérieure des gaz rares en laboratoire, à partir du système de prélèvement de fond.

Dans l'optique de prélèvements ultérieurs dans des horizons profonds du Bassin aquitain, le Centre Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (B. Thomas) souhaitait évaluer la faisabilité technique d'une utilisation du préleveur de fond. Pour ces analyses de gaz rares, la condition impérative est de ne pas avoir de contact avec l'atmosphère, au risque de ne mesurer que la concentration des gaz dans l'atmosphère au lieu de mesurer celle dans l'eau de l'aquifère.

Le système de prélèvement de fond utilisant de l'azote en bouteille, qui peut potentiellement contenir des traces de gaz rares atmosphériques, il a donc fallu effectuer le prélèvement en milieu de séquence de remontée de fluide. L'eau arrivant en début de cycle chasse en effet l'azote présent dans le bitube, elle peut donc être contaminée. L'eau arrivant en fin de cycle est chargée en ce gaz vecteur, puisque le préleveur de fond ne remonte pas continuellement l'eau, mais uniquement par cycles de vidange/remplissage du tube dans lequel l'eau remonte. Le volume d'eau qui peut être remonté étant directement fonction de la profondeur de l'horizon de prélèvement, les tests ont été menés à la profondeur de 163 m, pour être dans la condition la moins défavorable. Sur les 3 litres d'eau remontés, il a donc été circulé environ 1,5 litre dans le tube cuivre servant au prélèvement, celui-ci étant ensuite isolé au moyen de vannes afin de permettre sa fermeture (par écrasement du tube cuivre entre des mâchoires serrées avec une clé dynamométrique). Les Figure 27 et Figure 28 illustrent ces opérations.



Figure 27 : vue d'ensemble du dispositif d'échantillonnage des gaz rares couplé au système de prélèvement de fond – piézomètre de Labruguière.



Figure 28 : vue de détail du dispositif d'échantillonnage des gaz rares couplé au système de prélèvement de fond – piézomètre de Labruguière.

## 2.4. POMPAGE ET PRELEVEMENTS EN POMPAGE

Les séquences de pompage ont été effectuées en descendant une pompe à débit réglable de type MP1 (Grundfos) jusqu'à environ 45 m de profondeur dans l'ouvrage (Figure 29). L'exhaure a été déportée afin de pouvoir évacuer l'eau en dehors de la zone d'investigation. Cette configuration a par ailleurs permis de faire un suivi en continu des paramètres physico-chimiques lors du pompage (Figure 30). Des prélèvements ont été réalisés au début et à la fin de chaque phase de pompage (un prélèvement pour analyse ultérieure des gaz rares a également été opéré le 01/03 à la fin de la séquence de pompage).

Pour rappel (Tableau 1), le pompage du 01/03 a permis d'extraire environ 1600 litres, celui du 02/03 environ 2400 litres supplémentaires, auxquels se sont ajoutés 3300 autres litres le 03/03. Au final, environ 1,6 fois le volume de la colonne d'eau a pu être extrait au cours d'une durée cumulée de 8h30.

Compte tenu du fort rabattement de l'aquifère lors des phases de pompage, il a été nécessaire d'ajuster le débit de pompage dans le temps (Figure 31) – celui-ci baissant en résultat de la hausse de la hauteur manométrique totale – afin d'arriver en fin de campagne à un volume pompé qui ne soit pas trop faible et représente au moins 1 fois le volume de la colonne d'eau. Le forage de Labruguière n'a pas pu être pompé en se référant aux critères classiquement utilisés pour la réalisation d'une purge d'ouvrage, à savoir le pompage (sans phase d'interruption) de 1 à 3 fois le volume de la colonne d'eau d'une part, et la réalisation de la purge à rabattement constant, d'autre part. En effet, le dernier cycle de pompage, qui s'est pourtant effectué à un débit assez éloigné du débit maximal atteignable avec une pompe MP1 (Figure 32 ; débit entre 1 et 1,2 m<sup>3</sup>/h), a amené à constater un fort rabattement (pratiquement en limite de dénoyage de la pompe ; Figure 31). Il était donc difficile, étant donné les contraintes de temps, d'espérer arriver à purger un volume nettement supérieur dans le forage, sauf à laisser tourner le pompage la nuit, ce qui n'était guère réalisable (nécessité d'utiliser un groupe électrogène d'autonomie d'environ 4 à 5 heures, ce qui aurait nécessité un présentiel humain la nuit – et nécessité d'un suivi du rabattement pour éviter de dénoyer la pompe).



Figure 29 : vue d'ensemble du site lors des phases de pompage – piézomètre de Labruguière.



Figure 30 : détail de l'exhaure du pompage et aperçu du monitoring physico-chimique à l'aide de la sonde Idronaut 316Plus – piézomètre de Labruguière.

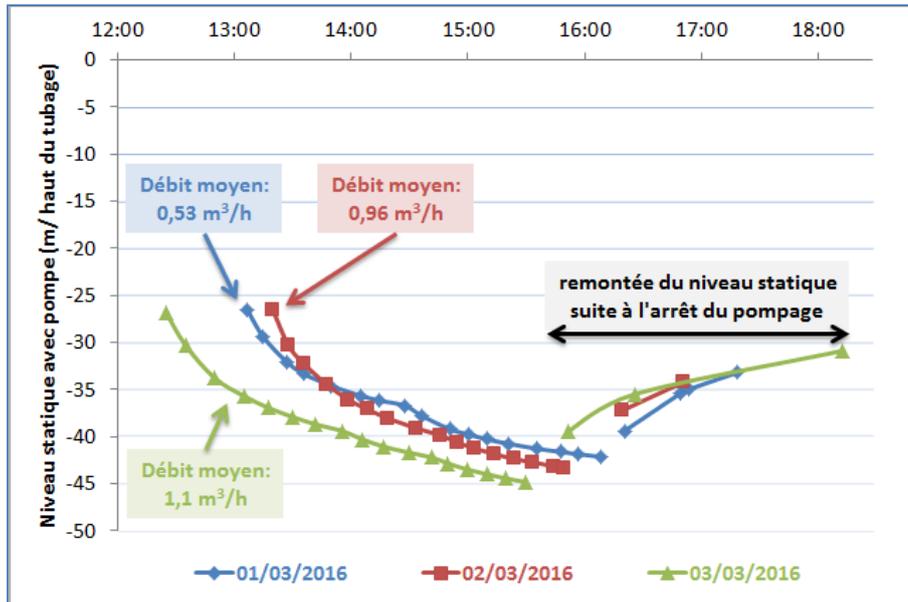


Figure 31 : suivi temporel du rabattement de la nappe – piézomètre de Labruguière.

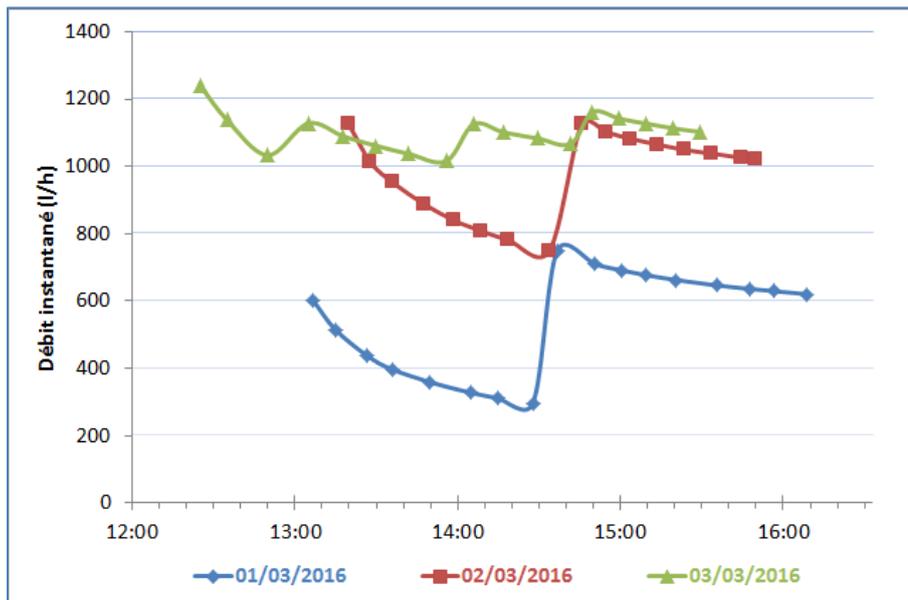


Figure 32 : suivi temporel des débits de pompage – piézomètre de Labruguière.

Les données du monitoring des paramètres physico-chimiques sont reportées dans les sections suivantes.

### 2.4.1. Pompage du 01/03/16

Le pompage a duré environ 3 heures (Figure 33). On constate les faits suivants :

- La *température* augmente continûment depuis 15°C jusqu'à un peu plus de 16°C, le changement de débit de purge n'ayant pas d'influence sur la hausse de température. La température atteinte en fin de pompage correspond à la température d'équilibre vers 80 m de profondeur<sup>9</sup>.
- La teneur en *oxygène dissous* ne varie pas, comme attendu.
- La *conductivité électrique* ne diminue pas linéairement, des hausses de faible amplitude (+10  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) pouvant exister. La diminution est attendue, car les eaux profondes (crépine) sont moins chargées que les eaux ayant interagi avec le tubage. La conductivité finale (520  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) correspond à celle mesurée vers 95 m de profondeur le 29/02, ce qui suggère une nouvelle fois que l'on a translaté vers le haut une colonne d'eau de 50 m d'épaisseur et que l'on n'a pas drainé d'eau plus profonde.
- Le *pH* atteint assez vite une valeur de 8,4 diminuant très lentement vers 8,35 en fin de pompage (ce qui permet par ailleurs de constater qu'il n'y a pas de dérive de l'électrode sur ces durées de temps). Là encore, cette valeur est tout à fait cohérente avec la purge de 50 m d'eau présente dans le tube plein.
- Le *potentiel redox* se stabilise rapidement, une nouvelle fois vers la valeur mesurée aux alentours de 95 m de profondeur le 29/02.

Le suivi de ce pompage est donc cohérent avec les données de la diagraphie initiale. Le volume d'eau présent dans le tube plein n'est pas purgé à l'issue de ce 1<sup>er</sup> pompage.

---

<sup>9</sup> Ce 1<sup>er</sup> pompage a permis de purger 35% du volume de la colonne d'eau, soit un linéaire d'environ 50 m de colonne d'eau. La pompe étant placée vers 45 m de profondeur, on peut donc théoriquement penser que l'on a sollicité la colonne d'eau jusqu'à une profondeur proche de 90 m, ce qui sous-entend que l'on n'a pas remonté d'eau fraîche avec cette 1<sup>ère</sup> opération de pompage.

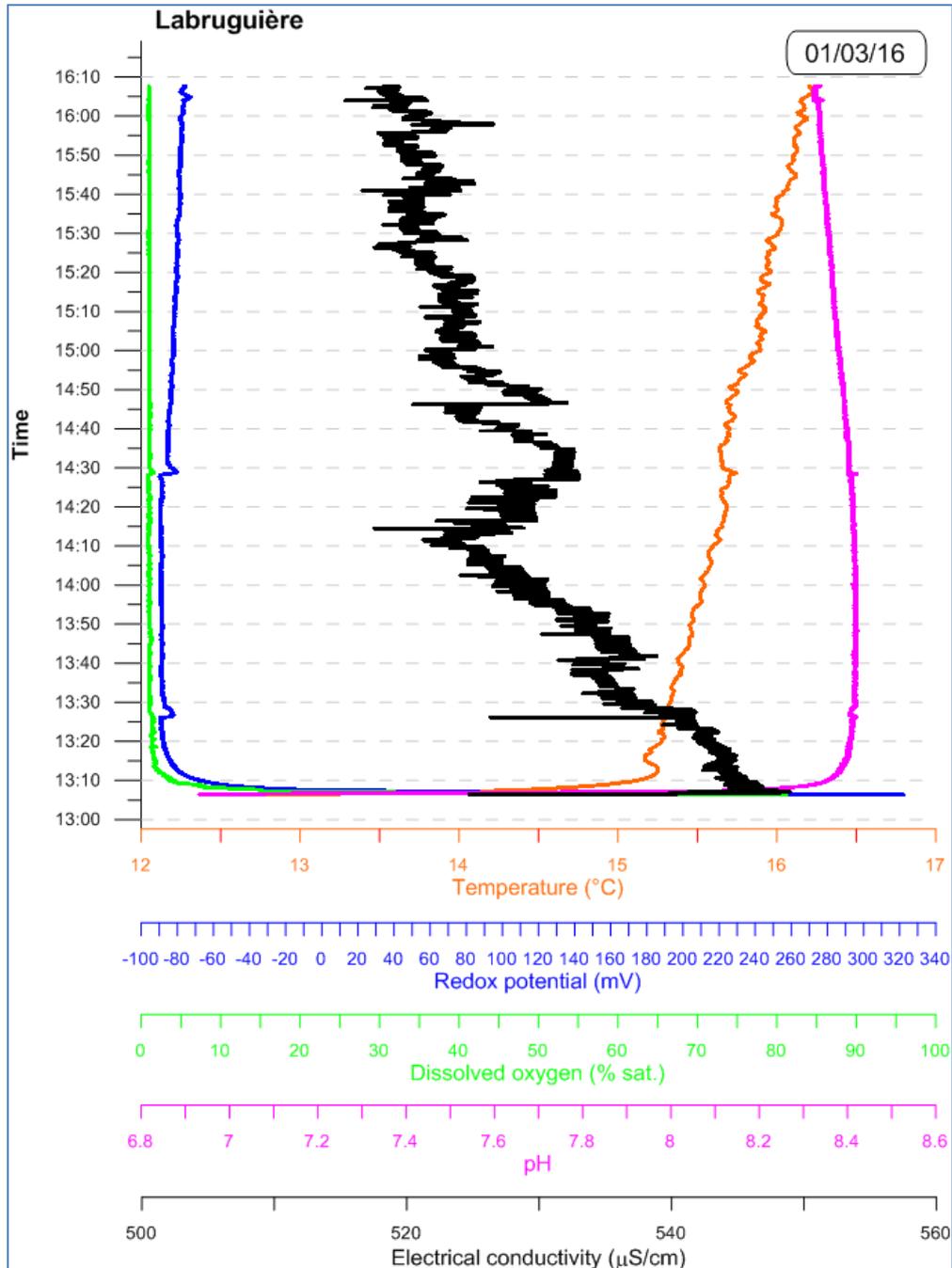


Figure 33 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 01/03/16 – piézomètre de Labruguière.

#### 2.4.2. Pompage du 02/03/16

La seconde session de pompage (Figure 34), réalisée à un débit supérieur, permet d'atteindre la purge de 87% du volume de la colonne d'eau en fin d'opération. Traduit en mètres linéaires, cela suggère que l'on doit mesurer des paramètres proches de ceux mesurés par diagraphie vers 120 m de profondeur. Toutefois, des modifications peuvent exister, car on peut commencer à solliciter la zone de la crépine, dont on ne connaît pas a priori l'intensité des venues d'eau.

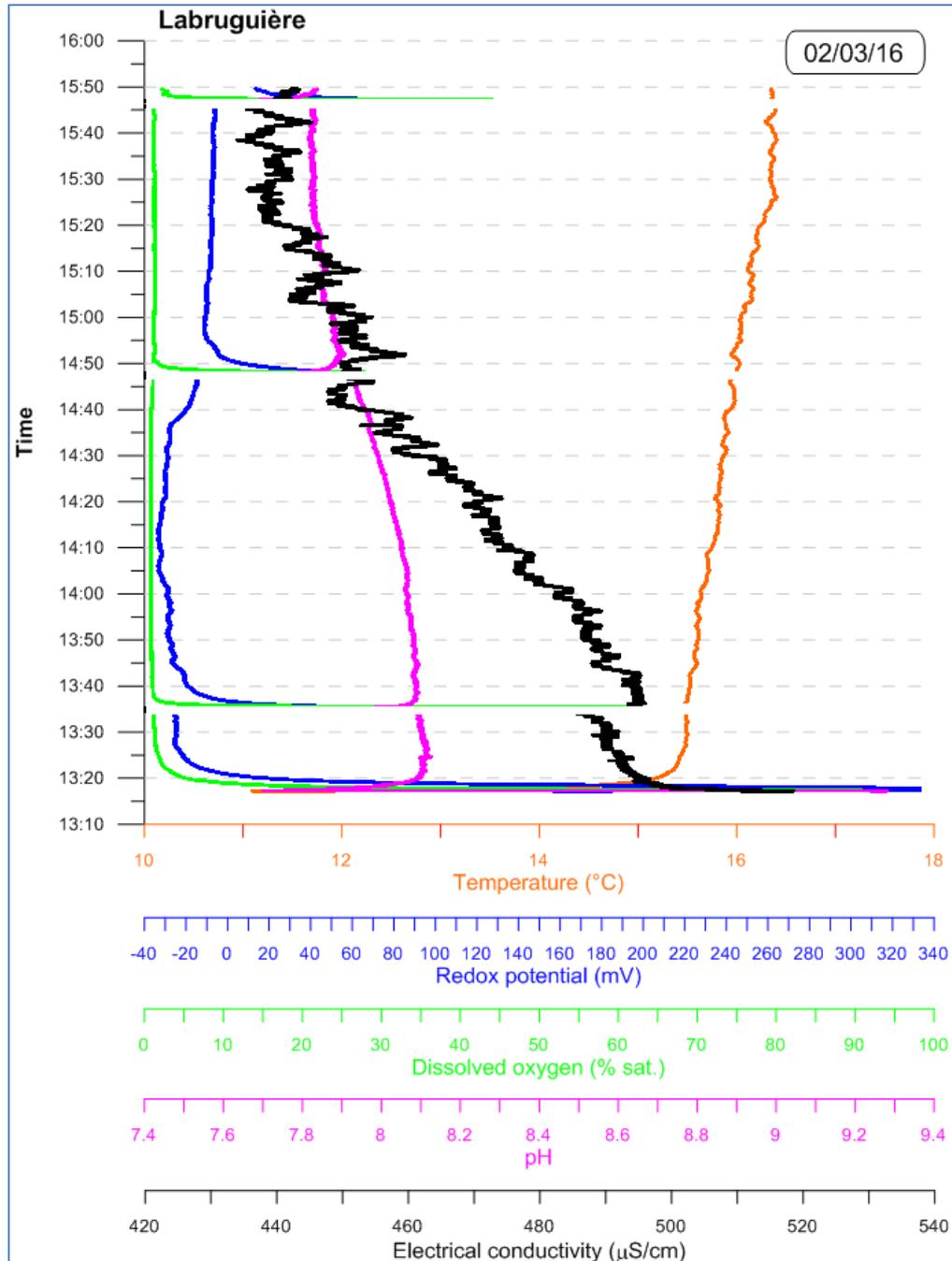


Figure 34 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 02/03/16. Les grandes variations durant l'enregistrement correspondent à des retraits de la sonde du bac d'exhaure – piézomètre de Labruguière.

La température mesurée en surface à l'exhaure du pompage devient asymptotique à partir de 15:30, autour de 16,5°C. Cette valeur ne correspond pas à celle mesurée à 120 m de profondeur, mais plutôt à 90-100 m. Pourtant, la colonne d'eau ne s'est pas totalement refroidie au cours de la nuit (cf. la donnée du 02/03 matin sur la Figure 20). Compte tenu des conditions climatiques, une hypothèse pourrait être un léger refroidissement de l'eau dans son trajet aérien entre la sortie du forage et l'exhaure où sont mesurés les paramètres physico-chimiques, mais

cela n'est pas conforme aux données de météorologie locale (cf. Annexe 1), la journée du 02/03 étant plus chaude que celle du 01/03. Une autre hypothèse pourrait être une participation plus sensible d'eaux froides de la partie supérieure de la colonne d'eau.

La teneur en *oxygène dissous* continue de ne pas varier.

La *conductivité électrique* prouve qu'il n'y a pas eu changements importants dans la colonne d'eau entre la fin du 1<sup>er</sup> pompage et le début du deuxième. En effet, ce dernier débute avec une valeur proche de  $520 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  pour rapidement continuer à décroître, nonobstant les sauts induits par des retraits temporaires de la sonde du bac de suivi. Au bout de 2h30 de pompage, la conductivité est descendue aux alentours de  $440 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Lors de la diagraphie initiale, cette valeur avait été atteinte vers 130 m de profondeur.

La valeur du *pH* en début de pompage est un peu inférieure à celle de la veille (8,2 comparé à 8,35), et elle diminue progressivement pour atteindre 7,9 en fin de pompage. C'est la valeur mesurée vers 125 m de profondeur le 29/02.

Enfin, le *potentiel redox* continue à lentement augmenter au cours du pompage, pour atteindre des valeurs très légèrement positives. Ces valeurs étaient mesurées autour de 150 m de profondeur lors de la 1<sup>ère</sup> diagraphie.

Il semble donc que la purge de l'ouvrage continue avec une translation assez régulière de l'eau vers le haut. Certains paramètres physico-chimiques indiquent qu'une contribution d'eau fraîche venue de la crépine peut être envisagée, d'autres suggèrent plutôt que l'on atteint à peine le sommet de la crépine.

### 2.4.3. Pompage du 03/03/16

En continuant avec ce modèle de remontée de l'eau de type piston, et compte tenu des volumes pompés ce 03/03, on peut essayer de pointer l'arrivée d'eau depuis la crépine (purge d'une fois le volume de la colonne d'eau) ; elle peut se produire à partir de 13:00 (Figure 35). Elle devrait correspondre à une eau de température proche de  $18^{\circ}\text{C}$ , de conductivité inférieure à  $420 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , de pH voisin de 7,4 à 7,5, voire de potentiel redox approchant les +100 mV :

- En termes de *température*, cette valeur n'est jamais atteinte, l'eau étant autour de  $17^{\circ}\text{C}$  à l'issue du pompage. Un léger refroidissement en surface pourrait cette fois-ci expliquer ces valeurs (cf. Annexe 1).
- En termes de *conductivité électrique*, une valeur proche de  $420 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  est mesurée vers 14:20, mais la conductivité remonte ensuite vers  $430\text{-}435 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .
- En termes de *pH*, il n'est jamais possible de mesurer une valeur inférieure à 7,7.
- En termes de *potentiel redox*, on ne dépasse pas non plus les +30 mV.

Exceptée la conductivité, le passage à une sollicitation directe de la crépine rend caduque le modèle simpliste de piston, et que les extrapolations précédemment utilisées ne sont plus valides. En d'autres termes, puisque les paramètres physico-chimiques mesurés en pompage ne sont pas encore stables (notamment la température), il convient de retenir que plus de 8 heures de pompage (1,6 fois le volume de la colonne d'eau) ne permettent pas d'espérer obtenir un échantillon réellement représentatif des conditions physico-chimiques existant au droit de la crépine.

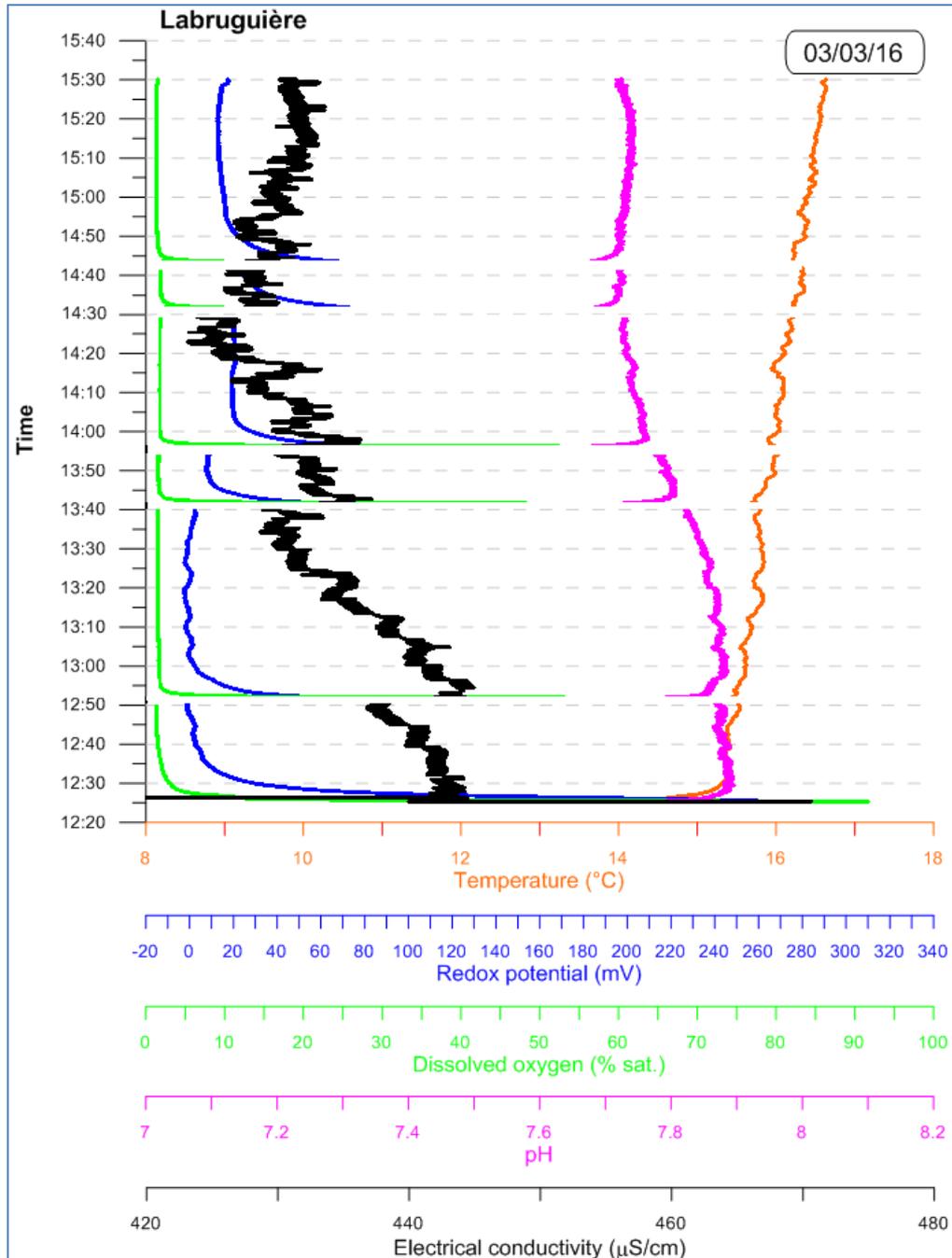


Figure 35 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 03/03/16. Les grandes variations durant l'enregistrement correspondent à des retraits de la sonde du bac d'exhaure – piézomètre de Labruguière.

Ce type d'ouvrage semble donc devoir être pompé sur une durée plus longue pour augmenter le degré de confiance sur les prélèvements (volume plus important prélevé de manière continue). Il n'est pas possible d'augmenter le débit de pompage, cela amènerait à dénoyer la pompe utilisée. A défaut, une pompe plus puissante pourrait être descendue plus en

profondeur, voire directement au sommet ou encore au droit de la crépine<sup>10</sup> (des pompes de 74 mm de diamètre – conçues pour les forages de 3 pouces – peuvent remplir ces spécifications). En respectant un débit de purge relativement bas, cela pourrait permettre de recueillir directement au droit de la crépine de l'eau de l'aquifère, sans avoir à se référer aux critères de purge classiques, puisque la pompe serait positionnée directement au droit des venues d'eau<sup>11</sup>. Par contre, cela impose de bien connaître la spatialisation des venues d'eau, et le chimisme de ces venues.

En ce sens, il semble donc intéressant de regarder si les prélèvements de fond réalisés directement dans l'ouvrage sans aucune sollicitation préalable permettent de bien évaluer le chimisme de l'eau, ou s'il est nécessaire d'avoir une sollicitation de l'ouvrage, même réduite, par un pompage, qui permet de renouveler de l'eau en base d'ouvrage, avant d'approfondir la position du préleveur de fond (cela peut permettre d'éviter de pomper des heures ou des jours durant en ayant à mobiliser toute la colonne d'eau présente dans le forage). Enfin, dans le cas d'ouvrages particuliers avec des niveaux statiques très bas, cela pourrait éviter de recourir à des mises en place coûteuses de pompes ayant des HMT (Hauteur Manométrique Totale) élevées, seules à même de remonter de l'eau en présence de plusieurs dizaines de mètres de colonne d'air dans un ouvrage.

## 2.5. ANALYSES CHIMIQUES

Les analyses chimiques réalisées concernent la détermination des concentrations en éléments majeurs (cations/anions) et en éléments traces métalliques. Signalons dès avant que l'eau du forage de Labruguière est très riche en fines (et sans doute en matière organique), ce qui se traduit par d'importants dépôts à la surface de la crépine de la pompe (Figure 36). Par ailleurs, il a été constaté, après retour de mission, que les flacons destinés aux analyses des anions (eau filtrée à 0,45 µm) montraient la présence résiduelle de fines pour les échantillons prélevés en pompage, alors que ce constat ne peut pas être établi pour les prélèvements de fond (Figure 37). En d'autres termes, le pompage draine des particules qui ne semblent pas présentes au droit des crépines, et ces particules ont un diamètre inférieur à 0,45 µm. Le prélèvement de fond présente l'avantage de s'affranchir de ce biais, qui peut éventuellement avoir une influence en termes de résultats des analyses chimiques.

---

<sup>10</sup> Sous réserve que la complétion le permette. Pomper à fort débit dans des crépines n'est pas recommandé car il y a toujours un risque de déstabiliser le massif filtrant voire de collapser les crépines.

<sup>11</sup> Le mode opératoire classique en hydrogéologie est de positionner, dans la mesure du possible, la pompe juste au-dessus du niveau de crépine, alors que les préconisations pour l'hydrochimie tendent plutôt à positionner la pompe au milieu de la crépine voire dans le tiers inférieur (cf. document AFNOR « Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'environnement – Partie 3 : Prélèvement d'eau souterraine » FD T 90-523-3 : « *La position de la pompe sera fonction des caractéristiques de l'ouvrage. Il est en général préconisé de se mettre au niveau de la crépine d'alimentation du forage. Le positionnement et le débit de la pompe dépendent des caractéristiques hydrauliques du milieu producteur (notamment de l'importance du rabattement), du forage, de la hauteur de la colonne d'eau, de la localisation du niveau producteur et des tamis, de la densité des éventuels polluants. Le débit dépend aussi des caractéristiques de la pompe. En vue d'un prélèvement, la position optimale de la pompe ou du préleveur de fond se situe au niveau de l'aquifère à prélever. Le débit de pompage sera alors ajusté, pour minimiser le rabattement, les perturbations et les apports d'autres niveaux du forage. Dans le cas de venues d'eau différentes, d'aquifère(s) stratifié(s) ou hétérogène(s), ou de présence de polluants plus ou moins denses que l'eau, le bon positionnement de la pompe et/ou du préleveur doivent être adaptés (voir FD X 31-615) ».*

On voit donc que toute information relative aux venues d'eau, à leurs débits respectifs et à la chimie de ces eaux est importante à déterminer en amont, afin de réaliser un prélèvement représentatif.



Figure 36 : état de la pompe MP1 à l'issue de la 1<sup>ère</sup> séquence de pompage le 01/03/2016 – piézomètre de Labruguière.



Figure 37 : état visuel des flaconnages anions (filtration 0,45  $\mu$ m) ; à gauche et à droite, suite à prélèvement de fond ; au centre, suite à pompage – piézomètre de Labruguière.

Les résultats pour les éléments majeurs sont reportés dans la Figure 38. Les balances ioniques associées sont comprises entre +2% et +3% et sont donc tout à fait correctes<sup>12</sup>. Le faciès de l'eau est bicarbonaté Ca-Mg, avec, en 1<sup>ère</sup> approche, une faible variation d'un prélèvement à l'autre et d'un mode de prélèvement à l'autre pour les concentrations en Ca, Mg et HCO<sub>3</sub>. A l'inverse, les abondances relatives de Na, K, Cl et SO<sub>4</sub> sont nettement plus variables.

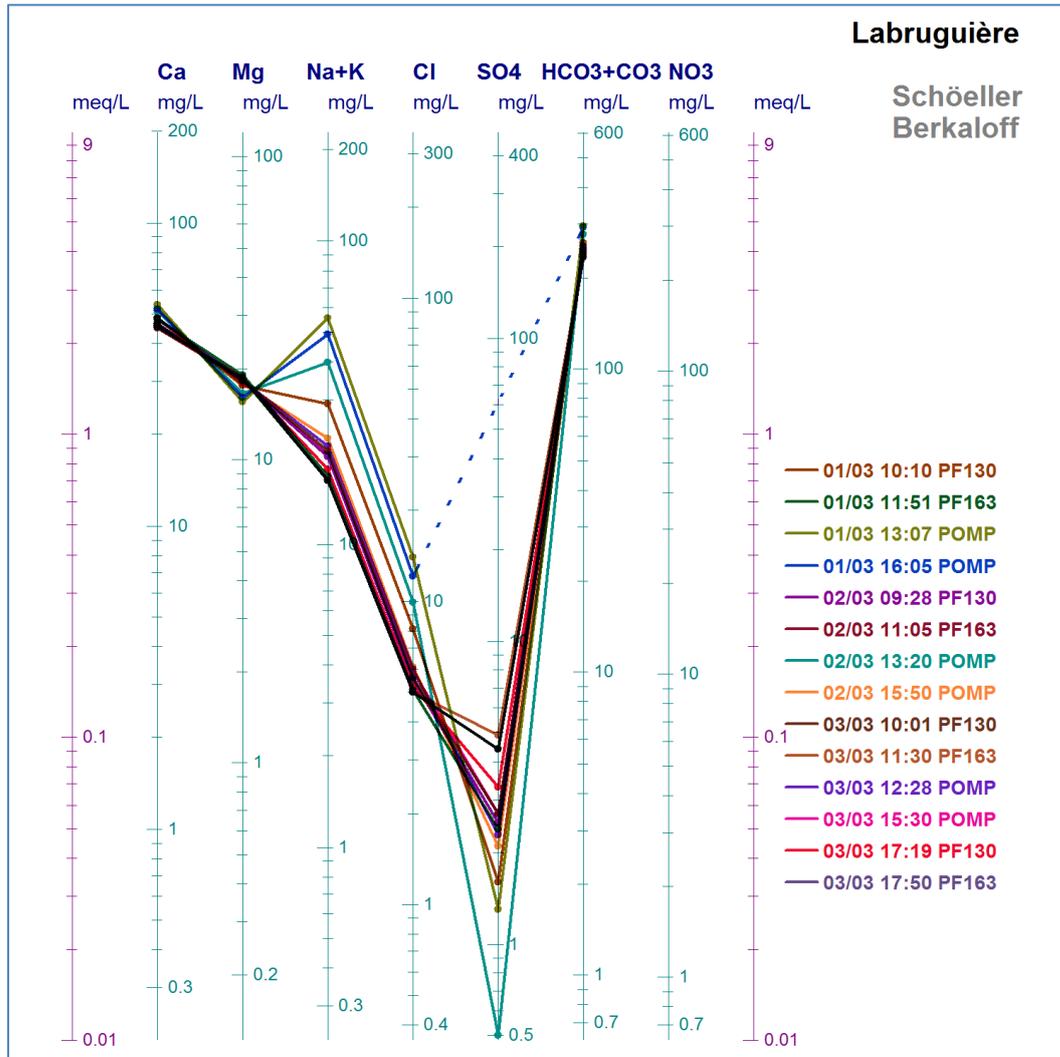


Figure 38 : diagramme de Schoeller, éléments majeurs, prélèvements de Labruguière (PF : prélèvement de fond ; POMP : prélèvement en pompage). Pour le prélèvement du 01/03/2016 en pompage, la teneur en SO<sub>4</sub> mesurée au laboratoire est inférieure au seuil de détection (<0,5 mg/l).

Les données utilisées pour les bicarbonates sont celles obtenues au laboratoire, les mesures sur site ayant renvoyé une trop grosse incertitude pour le dernier jeu de données (mesures

<sup>12</sup> Une balance est rejetée lorsqu'elle s'écarte de ±10% de l'équilibre entre anions et cations, et une valeur comprise entre ±5% et ±10% est le signe d'un problème dans les déterminations – ou la non-détermination d'une espèce rentrant dans la balance ionique.

acquises le 04/03 – Figure 39) – la balance ionique oscille alors entre -13% et -15% (alors qu'elle est entre -1% et +3% les jours précédents). Comme signalé précédemment, cet écart est vraisemblablement imputable à une électrode vieillissante sur le pH-mètre portable – la titration à l'acide nécessite la détermination du point d'équivalence des bicarbonates à l'aide d'une mesure du pH. L'alternance répétée du passage d'une eau légèrement basique à une eau acide (l'ajout d'acide lors du dosage se fait jusqu'à un pH proche de 3) sollicite trop fortement une électrode déjà beaucoup utilisée, qui n'arrive plus correctement à mesurer des valeurs d'équilibre lorsqu'elle est mise en contact avec un milieu de pH trop différent de celui auquel elle a été exposée antérieurement (effet mémoire important).

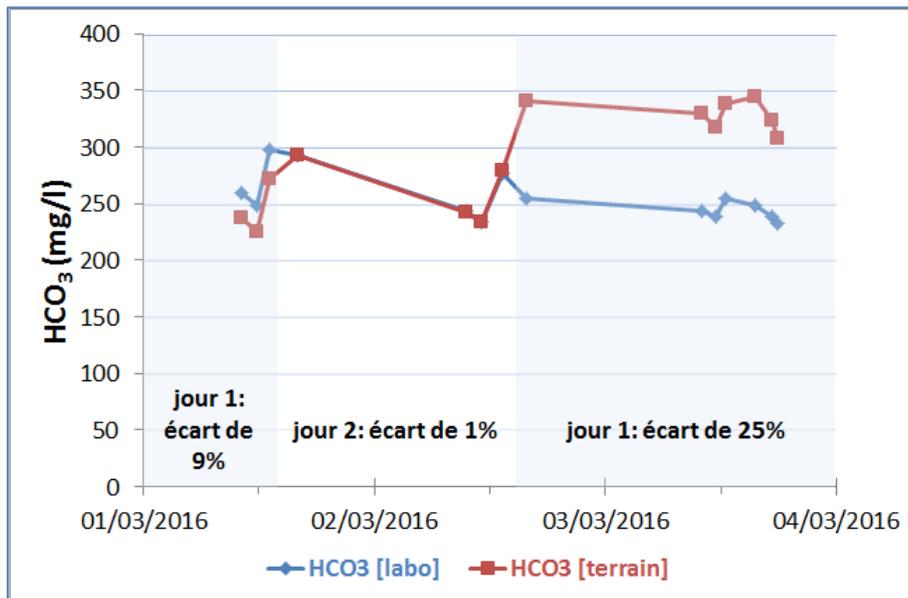


Figure 39 : écart de concentration en HCO<sub>3</sub> entre les déterminations sur site (par titration à la burette au HCl 0,1 mol/l) et au laboratoire – piézomètre de Labrugière.

Une vision plus détaillée des évolutions temporelles des concentrations en éléments dissous dans les échantillons prélevés est donnée en Figure 40 pour les éléments majeurs et en Figure 41 pour les éléments traces.

Les ions Ca, K, Na, Cl et HCO<sub>3</sub> montrent un comportement similaire (Figure 40) :

- Les concentrations mesurées à 163 m de profondeur via un prélèvement de fond sont relativement stables, les écarts relatifs étant au maximum de 6% pour Ca et de 8% pour HCO<sub>3</sub> (et quasi-nuls pour Cl ou K).
- Les concentrations mesurées en sommet de crépine (130 m), dans une zone peu productive, sont généralement initialement un peu plus élevées qu'à 163 m et ont tendance à diminuer au cours du temps (par ex. Cl ou K).
- Les concentrations mesurées lors des différents cycles de pompage montrent une diminution notable des concentrations au fur et à mesure des opérations. En fin de campagne, lorsque le volume pompé est le plus grand (1,6 fois le volume de la colonne d'eau), les concentrations en ces éléments majeurs ont tendance à fortement se rapprocher de celles mesurées à 163 m de profondeur (Ca, Cl, K). La tendance est assez nette également pour HCO<sub>3</sub>, alors que pour Na on constate au contraire une légère ré-augmentation (hausse max. de +7%) de concentration en pompage et à 130 m

alors que le niveau à 163 m paraît stable (existence d'un niveau autour de 130 m de profondeur légèrement plus riche en Na ?).

- De manière globale, il semble donc que, dans le cas d'un forage où l'horizon producteur est défini de manière assez précise, un prélèvement de fond permette d'obtenir sans cycle de purge préalable une eau dont le chimisme est assez comparable avec celui que l'on peut trouver après plusieurs heures de purge par pompage<sup>13</sup>.

D'autres éléments ont un comportement inverse (F, Mg, SiO<sub>2</sub> – Figure 40) :

- Les concentrations observées à 163 m sont également stables, mais plus élevées que celles mesurées dans les niveaux supérieurs.
- Les concentrations mesurées à 130 m sont initialement inférieures, puis, au fur et à mesure de la réalisation des cycles de pompage, tendent à se paralléliser avec celles mesurées initialement à 163 m.
- La tendance est encore plus forte pour les mesures pratiquées sur les échantillons prélevés au cours des pompages, l'augmentation de concentration étant par ex. très nette pour SiO<sub>2</sub>.
- Il semble donc encore que les premiers échantillons issus de l'horizon à 163 m de profondeur (niveau producteur) soient à même de correctement refléter le chimisme de l'eau tel qu'il peut être défini après la purge de 1,6 fois le volume de la colonne d'eau.

Enfin, deux éléments ont un comportement plus erratique (Figure 40) :

- Fe, qui donne des concentrations assez semblables à 130 et 163 m, mais beaucoup plus variables en pompage. Il faut sans doute y voir un phénomène d'interaction avec le tubage métallique. Il faut sans doute considérer que les prélèvements de fond sont plus représentatifs dans ce cas.
- Enfin, les concentrations en SO<sub>4</sub> n'atteignent pas de valeur plateau, même si on peut éventuellement imaginer une convergence vers des valeurs comprises entre 3 et 4 mg/l.

Pour ce qui concerne les éléments en traces, on peut noter (Figure 41) :

- Qu'un seul élément (Ni) est initialement plus concentré dans la partie haute de l'ouvrage et voit ses concentrations diminuer au cours du temps (en pompage et en prélèvement de fond à 130 m) pour atteindre la valeur mesurée initialement à 163 m de profondeur.
- Des éléments comme B, Ba, Li ou Sr sont présents dès le début des prélèvements de fond à 163 m en des concentrations assez fortes, lesquelles demeurent stables par la suite. Les prélèvements de fond à 130 m, et surtout les différents prélèvements en pompage, montrent que la colonne d'eau se renouvelle progressivement pour tendre vers des concentrations qui sont celles mesurées en fond de trou.
- Le cas des éléments réellement présents à l'état de traces (Al, Zn) est plus complexe à cerner, une forte variabilité pouvant exister sur les prélèvements issus des pompages – alors que les prélèvements de fond présentent une plus grande stabilité des concentrations. D'autres éléments comme As ou Co présentent une variabilité des concentrations quelle que soit la méthode employée. Ceci pourrait suggérer des interactions avec le tubage plein du forage (relargages intempestifs non reproductibles ?). La preuve la plus patente d'interaction avec le tubage est apportée par Mn : les concentrations en base de crépine sont les plus faibles, et relativement

---

<sup>13</sup> Rappelons également que la purge n'a pas atteint le cap des 3 fois le volume de l'ouvrage, mais qu'elle a cependant dépassé le seuil minimal d'une fois la purge de l'ouvrage. En conséquence, les petits écarts qui subsistent entre prélèvement de fond à 163 m et détermination sur un prélèvement en pompage à 45 m pourraient être encore plus faibles si le pompage avait été plus important.

constantes. Les concentrations en sommet de crépine sont en moyenne deux fois plus élevées, et celles mesurées en pompage encore deux fois plus élevées. Il ne fait guère de doute que le tubage plein apporte donc une contribution très importante en manganèse, dont le pompage ne permet pas de s'affranchir.

- La présence de fines (cf. Figure 37) a sans doute également une influence sur le chimisme des éléments en trace, qu'il n'est toutefois pas possible de quantifier en regard des caractérisations pratiquées.

La résultante de ces variations de chimisme observées selon les niveaux considérés a une traduction assez directe en terme de différences d'indices de saturation – ce qui peut donc donner lieu à des précipitations de certains éléments à certains niveaux et pas à d'autres. La Figure 42 montre ainsi que l'eau issue des pompages, ainsi que l'eau issue des premiers prélèvements de fond à 130 m, a tendance à être légèrement sursaturée en espèces carbonatées Ca et Ca-Mg, alors que l'eau présente en base d'ouvrage est légèrement sous-saturée en ces espèces.

Outre le fait que, dans le cas de Labruguière, la réalisation de prélèvements de fond puisse être envisagée avec un bon degré de confiance quant à la représentativité de l'eau extraite au niveau des horizons producteurs, cette opération de suivi progressif de la purge d'un ouvrage en pompage montre bien la nécessité de pomper des volumes conséquents avant de pouvoir prétendre collecter en surface une eau qui soit représentative de celle existant au droit des niveaux producteurs. Bien évidemment, le cas d'application considéré est particulier, et tous les ouvrages ne vont pas présenter autant de difficultés pour pouvoir opérer des caractérisations fiables en pompage. Mais cet exercice permet de constater que les critères de stabilité des paramètres physico-chimiques, parfois retenus pour considérer que l'ouvrage a été suffisamment pompé, peuvent être trompeurs quant à la représentativité de l'échantillonnage<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Cf. paragraphe 2.2.5.

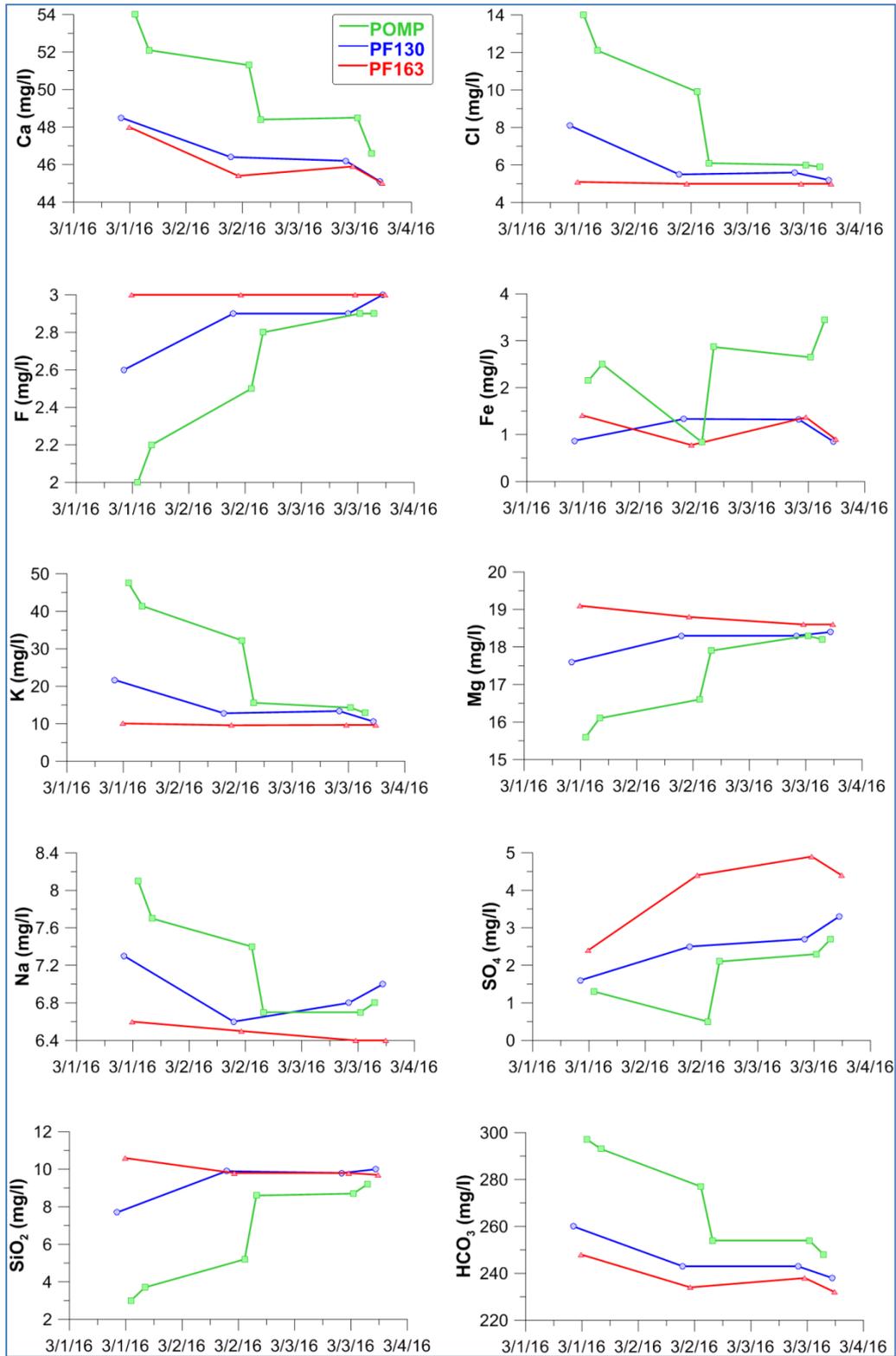


Figure 40 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.

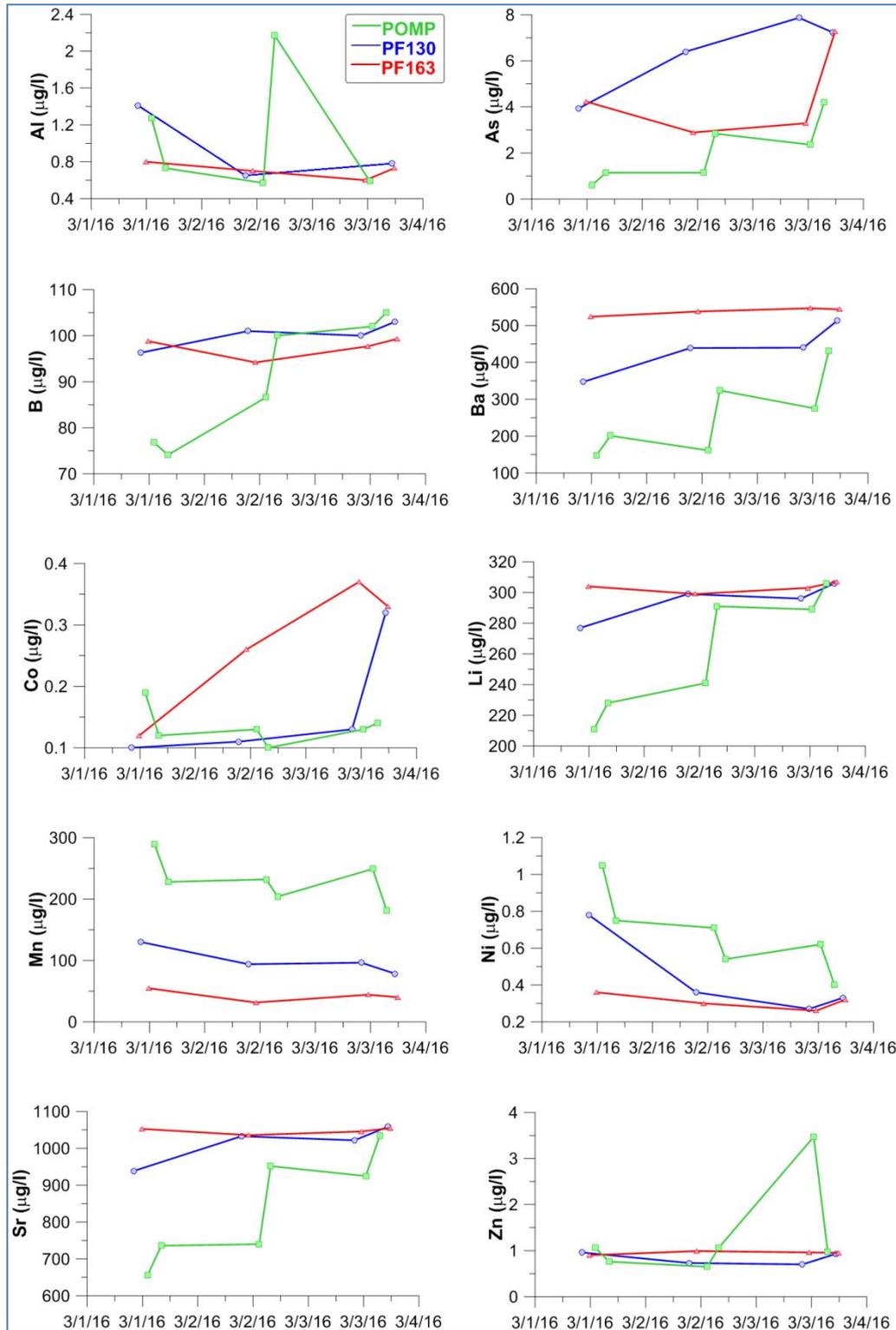


Figure 41 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces ( $\mu\text{g/l}$ ) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruquière.

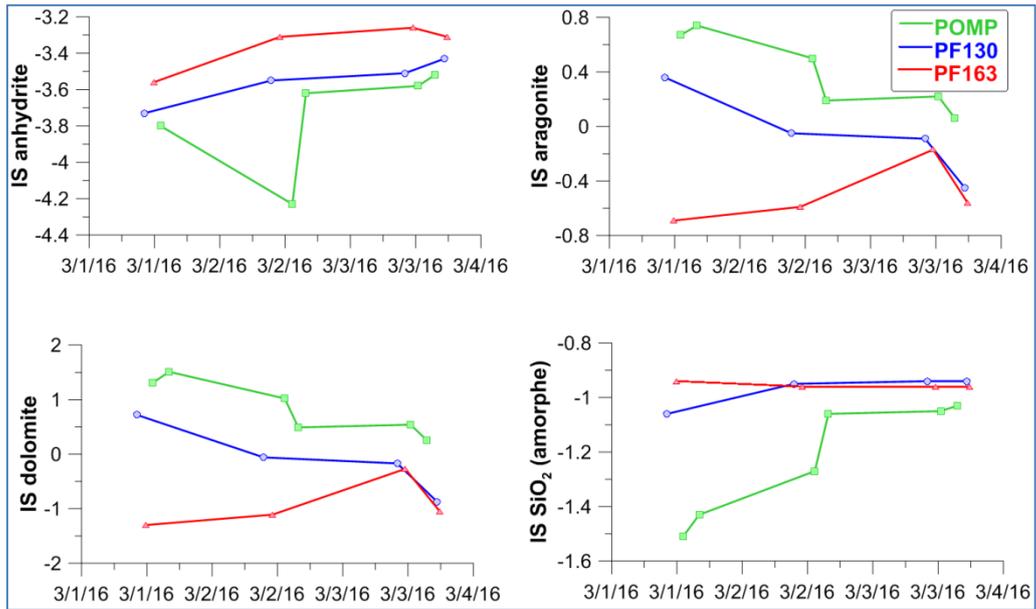


Figure 42 : évolution temporelle des indices de saturation pour quelques espèces minérales en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.

## 3. Valdurenque

### 3.1. MODALITES D'INTERVENTION SUR L'OUVRAGE

Le chronogramme d'intervention sur cet ouvrage est reporté ci-après (Tableau 5). Ce forage présente certaines différences par rapport au forage de Labruguière, même s'ils sont géographiquement assez proches :

- Présence d'un bouchon vaseux vers 85 m de profondeur, n'ayant pas permis le 1<sup>er</sup> jour de descendre la sonde Idronaut plus bas. En conséquence, les 1<sup>ers</sup> prélèvements de fond ont été effectués à 81 m de profondeur. Cet horizon est toutefois implanté dans la crépine, qui s'étend depuis 75 m jusqu'à 123 m de profondeur. Le 2<sup>ième</sup> jour il a été possible de pénétrer jusqu'au fond de l'ouvrage avec la sonde Idronaut, mais pas de réaliser de prélèvement de fond dans ces horizons profonds (colmatage presque immédiat du filtre protégeant le clapet anti-retour).
- Les opérations de pompage ont pu s'effectuer à un débit bien plus conséquent qu'à Labruguière : au minimum 1,3 m<sup>3</sup>/h (1<sup>er</sup> jour), puis 1,8 m<sup>3</sup>/h. Chaque opération de pompage a permis de purger environ 1 fois le volume de la colonne d'eau. Ceci a permis de mieux décolmater l'ouvrage, permettant d'échantillonner plus en profondeur les 02/03 et 03/03 (119 m).

Date	Début	Fin	Action	Prof. (m)	Nom de l'échantillon
29/02/16	16:20	16:30	Diagraphie		
01/03/16	08:20	08:40	Diagraphie		
	08:40	10:10	Prélèvement de fond	81	Valdurenque 01/03/16 10:10 -81m P1
	12:10	16:00	Pompage (env. 5000 l)	45	Valdurenque 01/03/16 13:04 pomp P1 Valdurenque 01/03/16 15:58 fin pomp P1
	16:40	16:50	Diagraphie		
	16:55	18:10	Prélèvement de fond	81	Valdurenque 01/03/16 17:10 -81m P2
02/03/16	08:30	11:40	Pompage (env. 5700 l)	45	Valdurenque 02/03/16 08:37 pomp P2 Valdurenque 02/03/16 11:40 fin pomp P2
	12:30	12:40	Diagraphie		
	13:45	14:10	Prélèvement de fond	81	Valdurenque 02/03/16 13:54 -81m P3
	14:20	15:05	Prélèvement de fond	119	Valdurenque 02/03/16 14:30 -119m P3
03/03/16	08:40	08 :50	Diagraphie		
	09:10	11:20	Pompage (env. 3900 l)	45	Valdurenque 03/03/16 09:30 pomp P3 Valdurenque 03/03/16 11:30 fin pomp P3
	11:40	12:00	Diagraphie		
	12:30	13:00	Prélèvement de fond	81	Valdurenque 03/03/16 13:00 pomp P3
	13:00	14:00	Prélèvement de fond	119	Valdurenque 03/03/16 14:00 pomp P3
	14:10	14:30	Diagraphie		

*Tableau 5 : chronologie des interventions sur le piézomètre de Valdurenque. Le volume total d'eau présent dans l'ouvrage le 29/02/16 est évalué à 4140 litres (niveau statique à -10 m environ) en prenant en compte la coupe technique du forage, dont 2950 litres situés au-dessus de la résistance rencontrée à -85 m de profondeur.*

Comme pour l'ouvrage de Labruguière, les sections suivantes traitent des investigations par type de méthode (diagraphie physico-chimique, prélèvement de fond et pompage).

### 3.2. DIAGRAPHIES

La coupe technique synthétique du forage est rappelée en Figure 43 alors qu'une coupe détaillée est fournie en Annexe 2. Comme pour l'ouvrage de Labruguière, le forage de Valdurenque est tubé en acier de diamètre 234 mm (0 à 74 m de profondeur), puis la crépine en inox de diamètre 152 mm prend place (75 à 123 m de profondeur). Le niveau statique au retrait de l'enregistreur automatique de niveau était de -10,06 m par rapport au haut du tubage le 29/02 à 16:00.

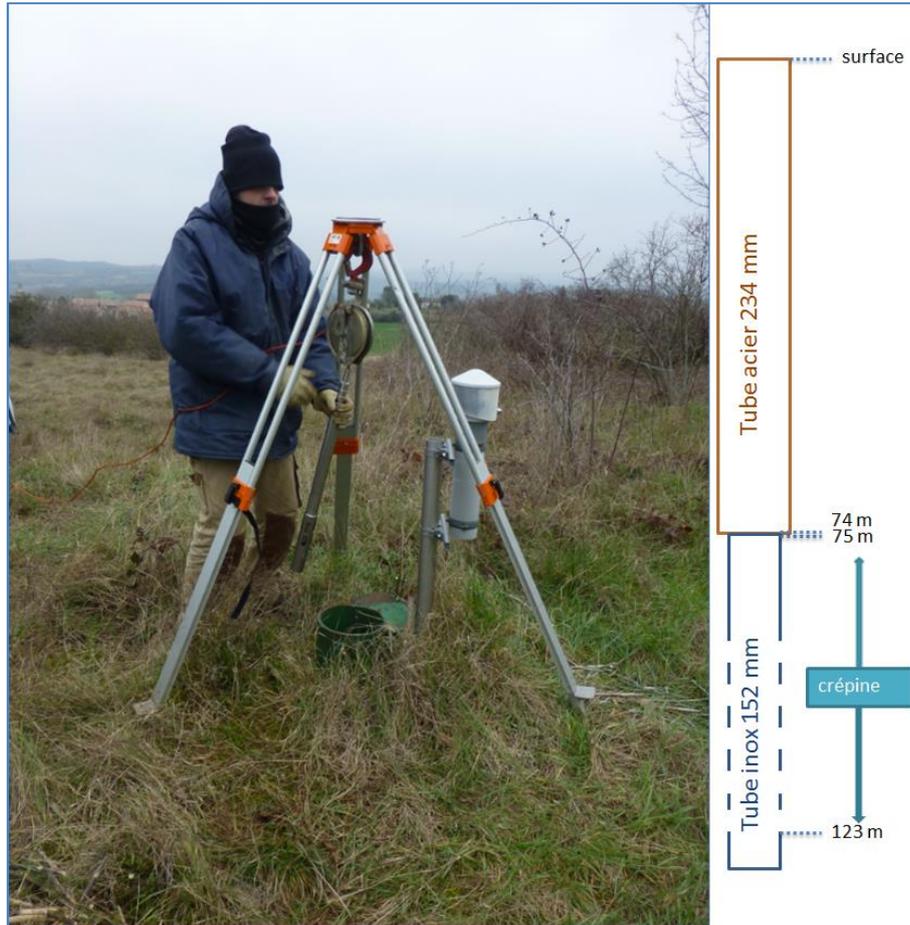


Figure 43 : piézomètre de Valdurenque – vue générale et rappel schématique de la coupe technique.

### 3.2.1. Diagraphie du 29/02/16

De manière totalement comparable aux investigations présentées dans le chapitre 2, le forage de Valdurenque a fait l'objet d'une 1<sup>ère</sup> caractérisation par diagraphie physico-chimique le 29/02/2016 (Figure 43). Cette diagraphie représente donc l'état de la colonne d'eau en équilibre avec son encaissant (parois du forage + horizons géologiques pour la partie crépine) et les éventuelles interactions de cette eau avec cet encaissant. Le niveau statique étant conséquemment plus haut que dans l'ouvrage de Labruguière, cette évolution a ici une traduction visuelle, par la présence d'irisation et de surnageant à la surface de l'eau (Figure 44).

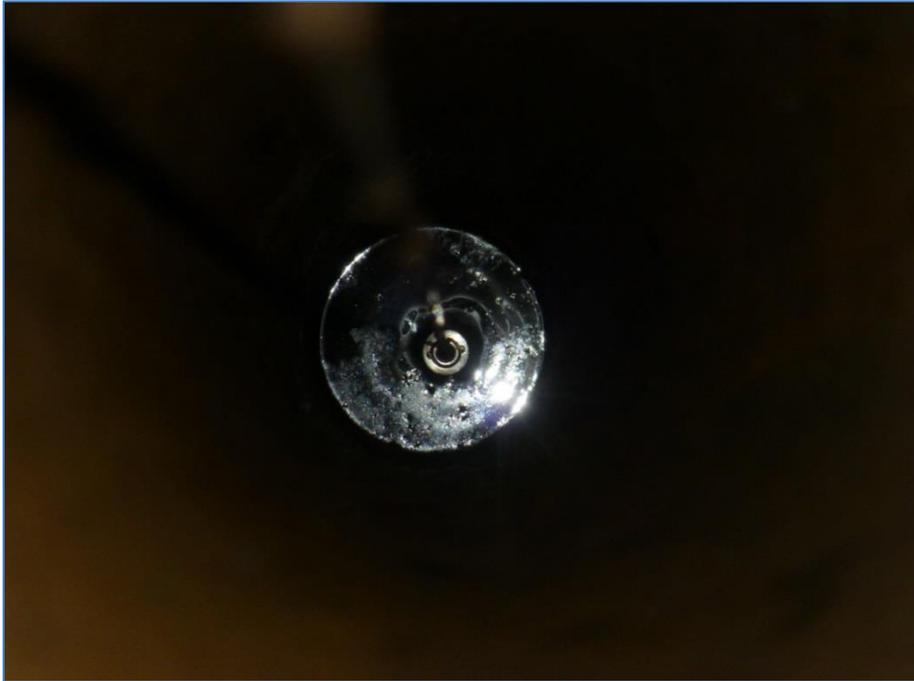


Figure 44 : irisations et surnageant à la surface de l'eau dans le piézomètre de Valdurenque lors de la 1<sup>ère</sup> descente de la sonde Idronaut 303 (visible au centre du tubage) le 29/02.

Le résultat de cette 1<sup>ère</sup> descente d'outil est présenté en Figure 45. Il est possible de constater que :

- L'outil ne descend pas plus bas que 85,3 m de profondeur, et ce malgré les essais répétés pour essayer de forcer la sonde à plonger (cette sonde est malheureusement moins lourde que celle utilisée à Labruguière : 2 kg pour la sonde 303 contre 8 kg pour le sonde 316Plus).
- Le profil de *température* est moins régulier que celui mis en évidence à Labruguière. Ici, les 20 premiers mètres présentent une très faible augmentation de la température (+0,1°C entre 11 m et 31 m de profondeur) – hormis un fort gradient dans les premières dizaines de centimètres de la colonne d'eau. Ensuite, on retrouve une augmentation linéaire de la température en fonction de la profondeur, mais selon un gradient thermique moyen de 24,4°C par km ( $T^\circ = -0,0244 \times \text{prof.} + 13,49$  ;  $r^2 = 0,9962$  ; 1430 données) qui est donc inférieur au gradient géothermique moyen. Il n'y a pas de changement de température au passage dans la crépine. Rappelons toutefois que l'ouvrage, lors de cette investigation, est apparu bouché vers 85 m de profondeur, ce qui peut donc laisser présager une mauvaise représentativité de la colonne d'eau, puisqu'une grande partie de la crépine ne peut faire l'objet de mesures.
- La teneur en *oxygène dissous* diminue rapidement vers 0% de saturation dans la partie tubée pleine du forage. Par contre, à l'opposé de ce qui avait été constaté sur l'ouvrage de Labruguière, le passage dans la crépine, donc dans une zone où l'eau est sans doute plus renouvelée – à défaut d'être totalement représentative de la zone productrice de l'aquifère dans son ensemble – se traduit par une hausse de la teneur en oxygène, pour atteindre 20% de saturation vers 85 m de profondeur. Ceci suggère donc un mécanisme d'infiltration de l'eau, ou une structuration de l'aquifère, fort différents de ceux supposés pour Labruguière (temps d'infiltration plus long permettant aux processus consommateurs d'oxygène de réduire à néant la présence de ce gaz dans l'eau). Ceci pourrait laisser supposer que de l'eau circule quand même dans la partie

haute de la crépine, bien qu'il y ait présence d'un bouchon vaseux ; une autre hypothèse est que l'oxygène diffuse depuis les parties plus profondes de l'aquifère (voir paragraphe 3.2.2).

- La *conductivité électrique* affiche une parfaite stabilité tout au long de la colonne d'eau, que l'on soit dans le tube plein ou dans la crépine (aux alentours de  $320\text{-}330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Contrairement au forage de Labruguière, il semble que le passage dans la crépine ne se marque pas par une évolution de la chimie (vers des valeurs plus représentatives de celles de l'aquifère), ce qui semble suggérer qu'il n'y a pas ou peu d'interactions dans le tubage plein (par ex. corrosion du tubage) – ou que la durée depuis le précédent prélèvement sur cet ouvrage n'a pas été suffisante pour amener à de tels changements.
- Le *pH* a un comportement plus variable : entre 8,3 et 8,4 dans le tube plein, puis avec des baisses rapides vers 8,1 en sommet de crépine et vers 81 m de profondeur, et enfin une nouvelle hausse rapide vers 83 m de profondeur. L'interprétation de ce signal semble difficile de prime abord, en considérant la présence d'un bouchon dans l'ouvrage, dont la nature peut influencer sur la valeur du pH. Il semble toutefois que la présence de la crépine se traduise par un léger changement du pH.
- Enfin, le *potentiel redox* évolue depuis des conditions très légèrement réductrices dans le tube plein, vers des conditions légèrement oxydantes dans la crépine. Cette évolution est compatible avec celle mise en évidence pour l'oxygène dissous (détecté dans la crépine).

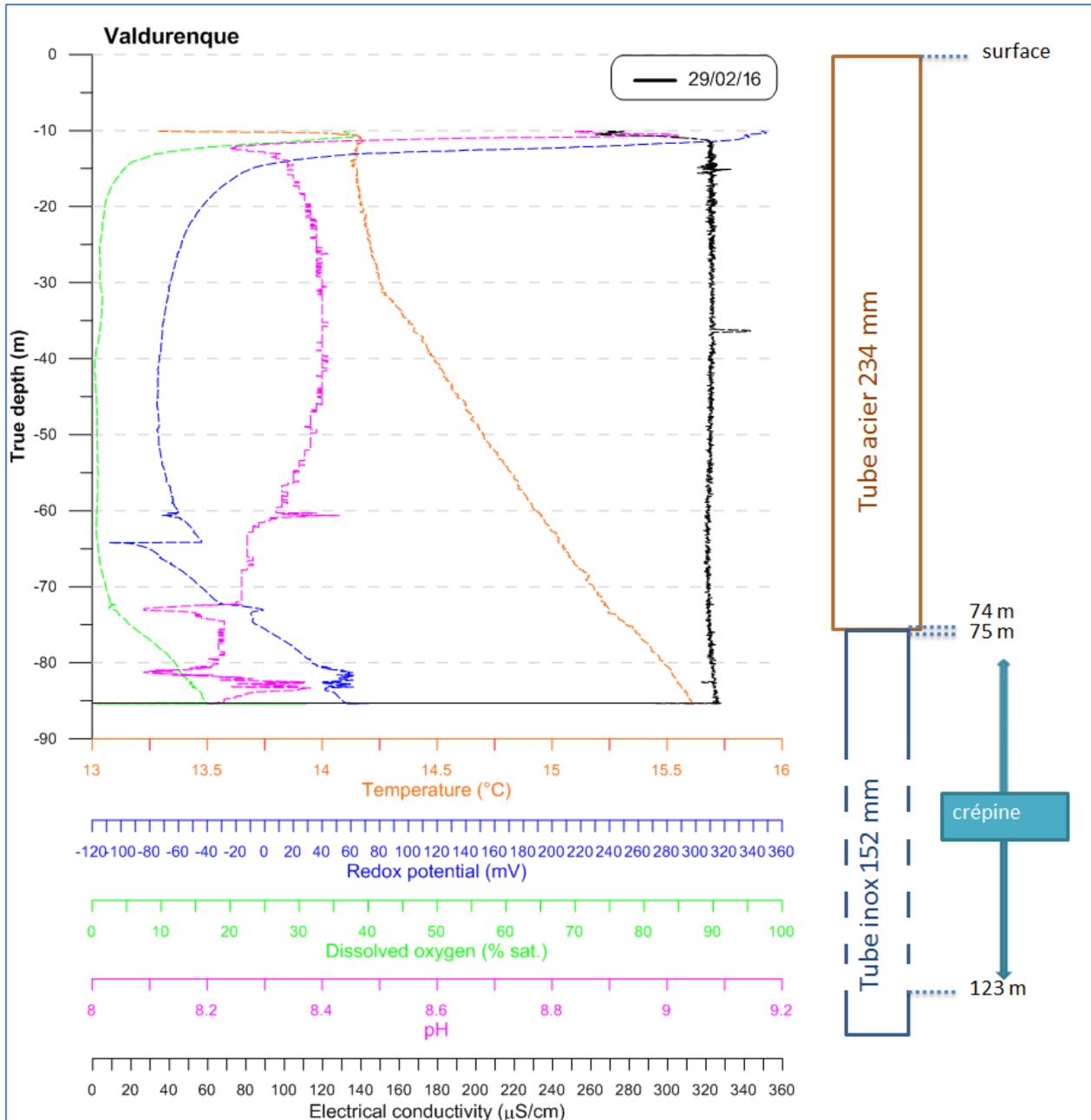


Figure 45 : diagraphie initiale réalisée le 29/02/16 dans le piézomètre de Valdurenque.

### 3.2.2. Diagraphies du 01/03/16

#### a) Diagraphie du 01/03/16 matin

Cette deuxième diagraphie est effectuée, comme la veille, avant toute autre opération sur le forage. Le résultat est présenté en Figure 46. La profondeur atteinte, en insistant au passage du bouchon vers 85 m de profondeur, est de 123 m, soit la profondeur réelle de l'ouvrage avant d'entrer dans le cône de décantation. Par comparaison avec la 1<sup>ère</sup> diagraphie, on peut mettre en évidence :

- Un profil de *température* rigoureusement identique dans les 85 premiers mètres, ce qui rassure quant à la représentativité de la mesure du capteur de température monté sur la sonde. De 85 à 123 m de profondeur, l'augmentation de température se fait pratiquement selon le même gradient que celui déterminé entre 31 et 85 m lors de la 1<sup>ère</sup> investigation (gradient entre 31 et 123 m :  $T^{\circ} = -0,0254 \times \text{prof.} + 13,44$  ;  $r^2 = 0,9975$  ; 6930 données).
- Le profil en *oxygène dissous* indique toujours la présence d'une eau dépourvue d'oxygène dans le tube plein, et la présence d'oxygène dans la crépine. A partir de 100 m de profondeur on tend vers une valeur d'équilibre proche de 40% de saturation, ce qui est élevé pour une eau souterraine.
- La *conductivité électrique* reste stable dans le tube plein ( $320 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), se stabilise autour de  $330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  entre 90 et 105 m, puis augmente jusqu'à  $350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  vers la base de l'ouvrage. Ici encore cette évolution est différente de celle constatée dans l'ouvrage de Labruguière.
- Le profil de *pH* est très similaire entre les 2 diagraphies dans le tube plein, à la réserve près de la précision de l'électrode (écart proche de 0,1 unité). Dans la crépine, la valeur diminue pour atteindre 7,9 à 8, avec une variabilité en fonction de la profondeur. En comparant à la conductivité électrique, ceci pourrait suggérer que les venues d'eau sont un peu plus hétérogènes le long de la verticale que celles captées à Labruguière (alimentation essentiellement par les horizons profonds).
- Enfin, le *potentiel redox* renforce les tendances mises en évidence le 29/02, à savoir la présence d'horizons plus oxydants en base d'ouvrage, une fois dans la crépine.
- Cette deuxième descente d'une sonde de diagraphie physico-chimique suggère que le passage de l'outil n'altère que très modérément l'allure des profils des paramètres en fonction de la profondeur, et qu'en particulier les zones de variation de ces paramètres ne sont pas déplacées par effet de brassage vertical de la colonne d'eau.

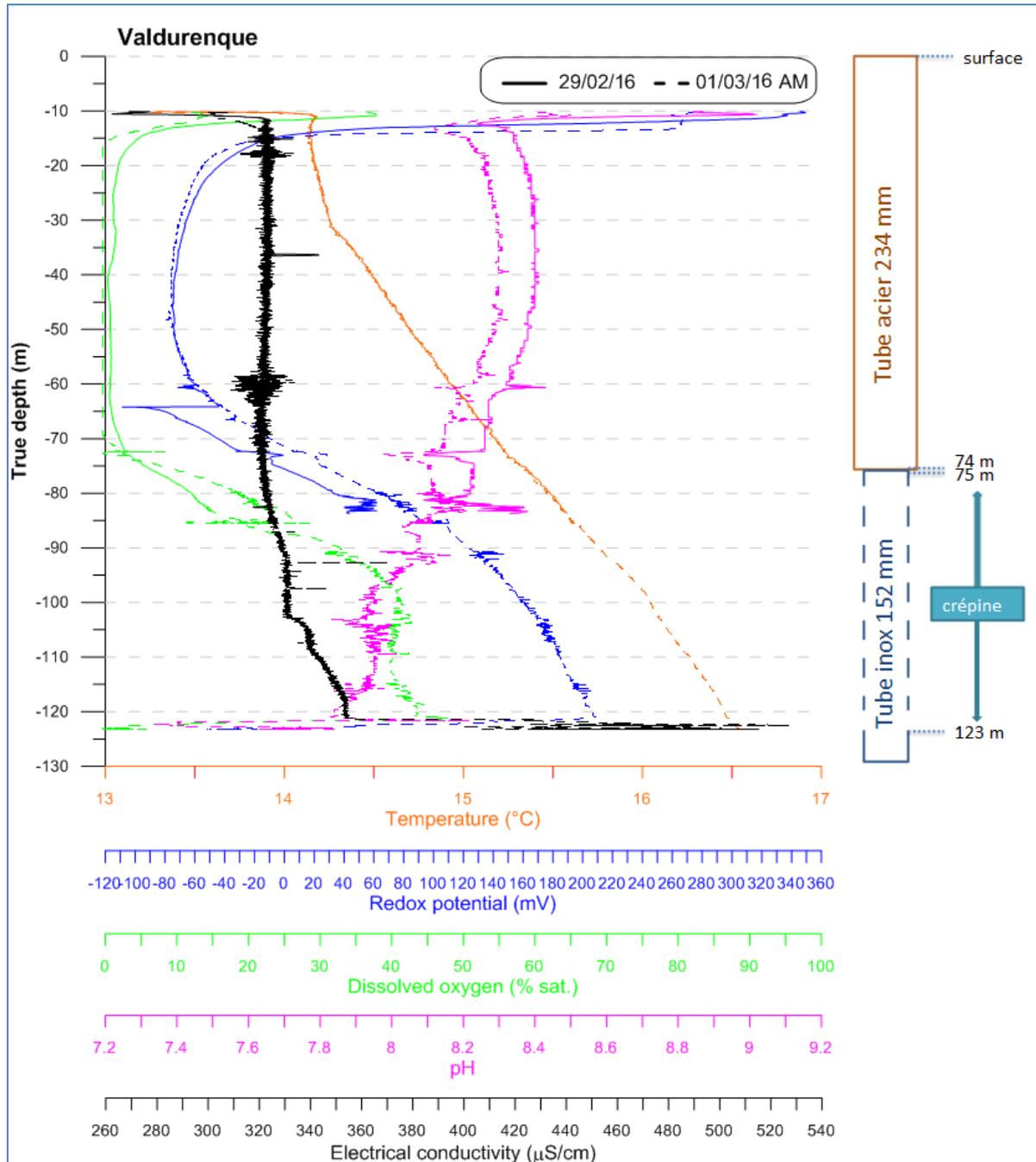


Figure 46 : diagraphie réalisée le 01/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque.

### b) Diagraphie du 01/03/16 après-midi

Cette diagraphie intervient après la réalisation de prélèvements de fond en matinée puis d'un 1<sup>er</sup> cycle de pompage en début d'après-midi (pompage d'environ 5000 litres, volume légèrement supérieur à celui de la totalité du forage sur ses 123 m de longueur). Elle est comparée à la diagraphie réalisée le matin, avant pompage (Figure 47). De cette comparaison ressortent les points suivants :

- Comme pour Labruguière, l'opération de pompage se traduit par une forte *perturbation thermique* de l'ouvrage. Si les horizons profonds, au droit de la crépine (à partir de 95 m de profondeur), restent avec une température globalement proche de celle du gradient moyen<sup>15</sup>, il est assez patent que l'opération de pompage a amené à renouveler l'eau dans la partie tubée pleine jusque vers 45 m de profondeur (emplacement de la pompe MP1). L'influence du pompage sur les 30 premiers mètres de colonne d'eau est beaucoup plus faible (eau peu ou pas renouvelée).
- La concentration en *oxygène dissous* est également totalement modifiée. D'environ 40% de saturation à la base de l'ouvrage, on passe à 90% de saturation après pompage d'une fois le volume de l'ouvrage, ce qui signifie que l'on draine des eaux qui ont été encore récemment en contact avec l'atmosphère. On peut également noter que les nettes diminutions vers 85 m de profondeur, relevées avant tout pompage, ne sont pas altérées par le pompage, ce qui peut suggérer la présence d'un horizon peu puissant d'une eau ayant un trajet souterrain différent ou subissant des processus réactionnels différents avec l'encaissant (appauvrissement important en oxygène).
- Le profil de *conductivité électrique* n'est que peu modifié par le pompage dans la partie crépinée (le gradient d'augmentation entre 100 et 120 m de profondeur est conservé). La colonne d'eau est ensuite homogénéisée jusqu'à la prise d'eau de la pompe, vers 45 m de profondeur.
- Les valeurs du *pH* tendent également à s'homogénéiser autour d'une valeur moyenne de 7,9, avec une variabilité de faible amplitude (toujours possibilité d'une alimentation multi-niveaux).
- De manière congruente, le *potentiel redox* varie sur une gamme moins large, avec toujours une tendance à la présence d'eaux plus oxydantes en base d'ouvrage, et un renouvellement assez efficace de la colonne d'eau jusqu'à la profondeur où la pompe est positionnée.

---

<sup>15</sup> Dans le détail, notamment vers 100 m de profondeur, il existe une déviation avec le gradient moyen, ce qui peut témoigner d'une alimentation hétérogène de la colonne d'eau, avec un horizon producteur vers 100 m de profondeur, sollicité par le pompage, mais qui n'a qu'une faible productivité lorsque le forage est en écoulement naturel.

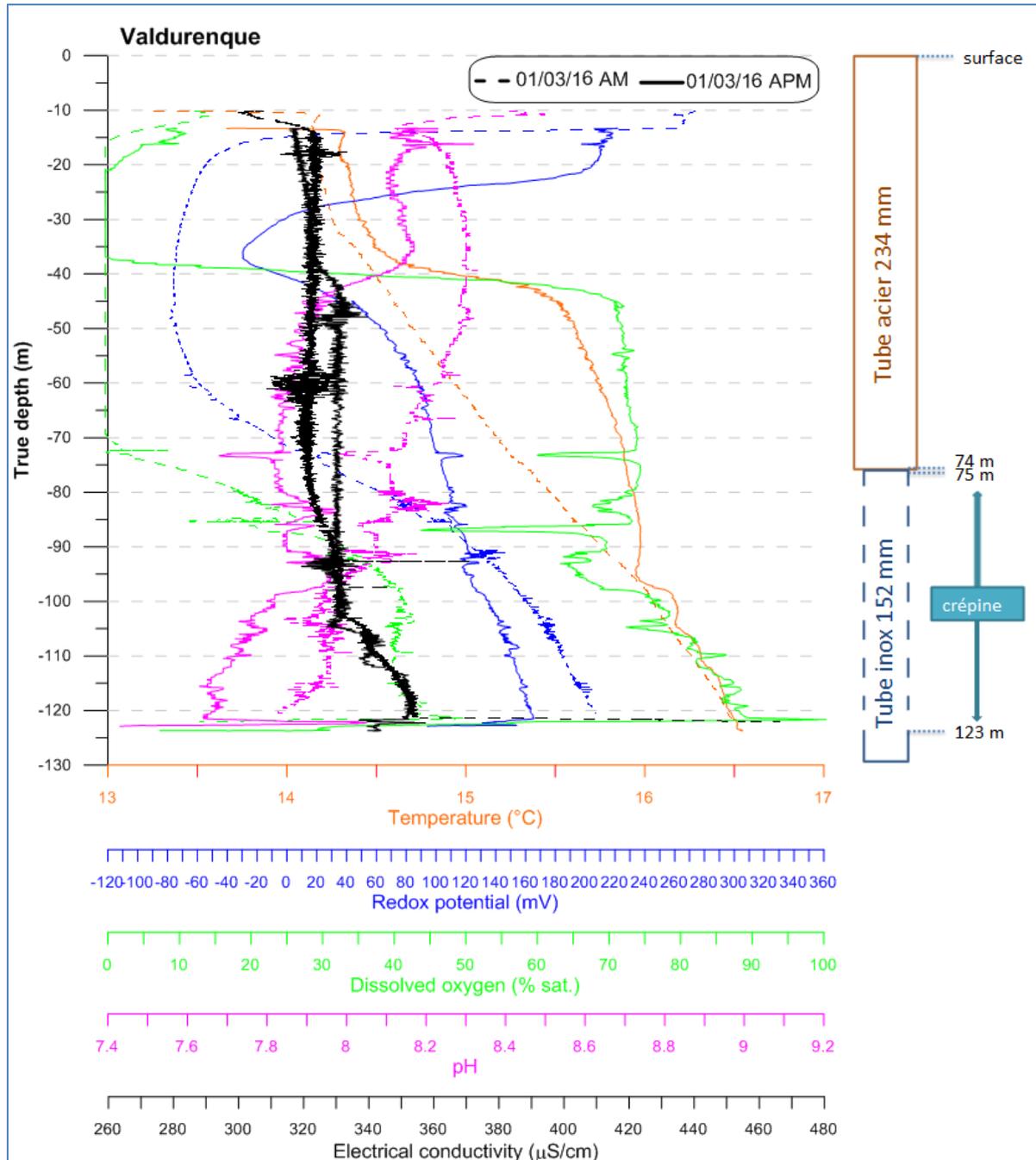


Figure 47 : diagraphie réalisée le 01/03/16 après-midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau, et comparaison à la diagraphie réalisée le matin, avant pompage.

### 3.2.3. Diagraphie du 02/03/16

La diagraphie réalisée le 02/03 l'a été suite à une seconde opération de pompage réalisée en matinée (extraction de 5700 litres supplémentaires). Le résultat est présenté en Figure 48 (comparaison à la diagraphie du 01/03 au matin) et en Figure 49 (comparaison à la diagraphie du 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres). Il ressort de ces comparaisons que :

- Le profil de *température* après pompage de 5000 ou de 5700 litres est très semblable – par contre on ne dispose pas de l'information sur le retour à l'équilibre thermique de l'eau dans le forage (les données du 03/03 permettront de lever cette incertitude).
- La concentration en *oxygène dissous* est également très semblable entre les mesures faites immédiatement après les phases de pompage : bonne purge de la colonne d'eau jusqu'à l'emplacement de la pompe, et existence de zones moins enrichies en oxygène au sein de la crépine.
- La *conductivité électrique* s'harmonise autour de  $330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  entre 40 et 110 m de profondeur, et affiche des valeurs un peu supérieures dans la partie basse de la crépine, l'augmentation se faisant avec un palier vers 110 m de profondeur. La structure est légèrement différente entre les 2 pompages, mais les écarts sont faibles, de l'ordre de 2 à 3% ( $340$  vs.  $350 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  vers 115 m) – rappelons que le critère de stabilité de la conductivité pour des eaux peu minéralisées est de  $\pm 5\%$ .
- Les valeurs de *pH* sont très semblables suite aux 2 phases de pompage.
- Par contre, les valeurs du *potentiel redox* s'homogénéisent de plus en plus dans la colonne d'eau, le renouvellement de l'eau dans le forage par une eau plus oxygénée ayant donc comme effet d'amener à la mesure de potentiels plus oxydants.

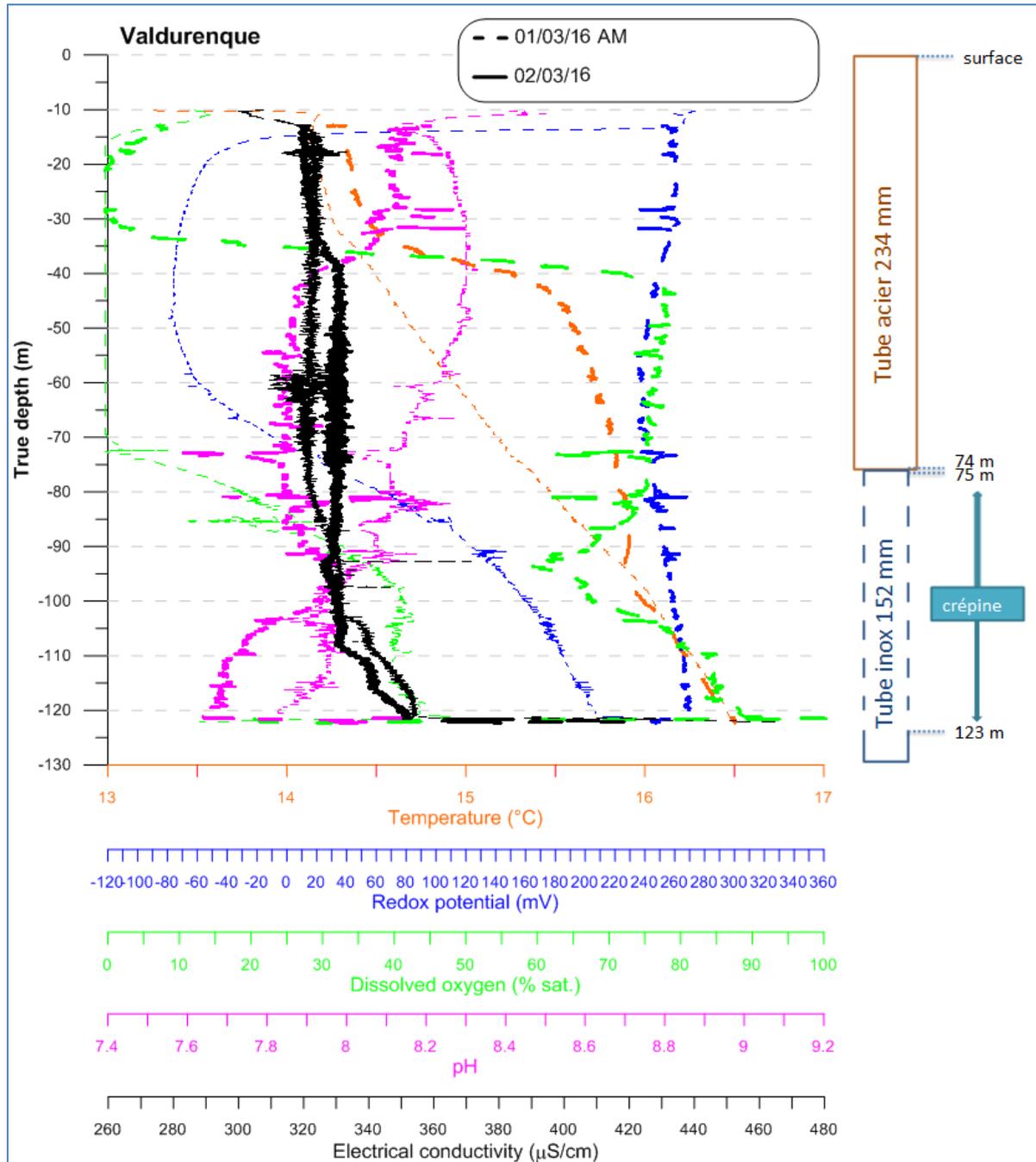


Figure 48 : diagraphie réalisée le 02/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 matin, avant pompage.

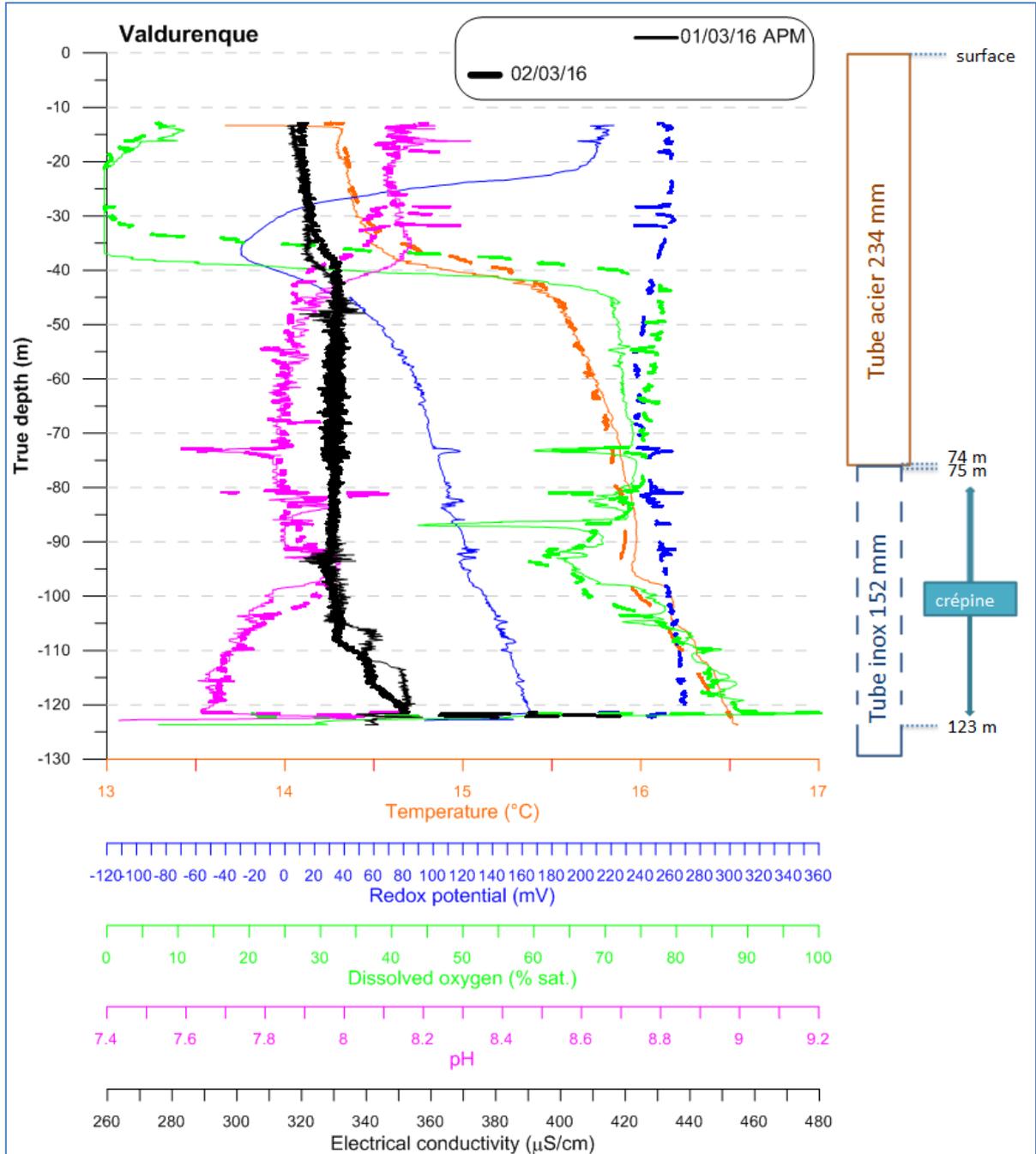


Figure 49 : diagraphie réalisée le 02/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres.

### 3.2.4. Diagraphies du 03/03/16

#### a) Diagraphie du 03/03/16 matin

Cette 1<sup>ère</sup> diagraphie du 03/03 permet donc d'évaluer l'évolution du forage après environ 24 heures de repos, suite à un pompage de 5700 litres. Les profils des paramètres physico-chimiques sont présentés en Figure 50 (comparaison à la diagraphie initiale avant toute opération de pompage), en Figure 51 (comparaison suite au 1<sup>er</sup> pompage), et en Figure 52 (comparaison suite au 2<sup>ème</sup> pompage). Il vient que :

- Le profil de *température* revient assez rapidement se paralléliser au gradient mis en évidence lors de la diagraphie initiale, seule une perturbation transitoire persistant dans la partie tubée pleine. Ce constat de retour assez rapide à l'équilibre thermique avec l'encaissant est identique à celui posé pour Labruguière.
- Le profil d'*oxygène dissous* ne marque pas encore un retour aux valeurs initiales, mais on peut noter un abaissement fort de la concentration en oxygène dissous dans la crépine (par rapport aux valeurs atteintes immédiatement après pompage), l'effet étant encore plus prégnant dans le tube plein (processus consommateurs d'oxygène plus efficaces – par ex. oxydation du tubage métallique acier et diminution consécutive de la concentration en oxygène dissous ?).
- Le profil de *conductivité électrique* est quant à lui plus conforme à ce qui est mesuré après pompage (relative homogénéité tout au long de la colonne d'eau). Néanmoins, on note une diminution de la conductivité en base de l'ouvrage, ce qui n'avait pas été noté jusqu'à présent.
- Le profil de *pH* se rapproche des valeurs d'équilibre dans la crépine (les valeurs en pompage sont inférieures), mais le renouvellement d'eau dans le tubage plein est encore visible (le couple pH/redox reste dans le domaine de stabilité du FeIII, la corrosion du tubage, si elle existe, n'est sans doute pas en mesure d'entraîner des baisses rapides du pH).
- Le profil du *potentiel redox* signale toujours la présence d'eau plutôt oxydante en base d'ouvrage, ce qui est conforme aux données avant pompage et aux mesures suite à pompage. Dans la partie tubée pleine, l'eau a tendance à être encore plus oxydante. Les teneurs en oxygène dissous suggèrent que le processus de consommation d'oxygène par altération du tubage est en cours, ce qui peut indiquer une libération en solution d'oxydes de fer, de nature à faire augmenter la valeur du potentiel redox.

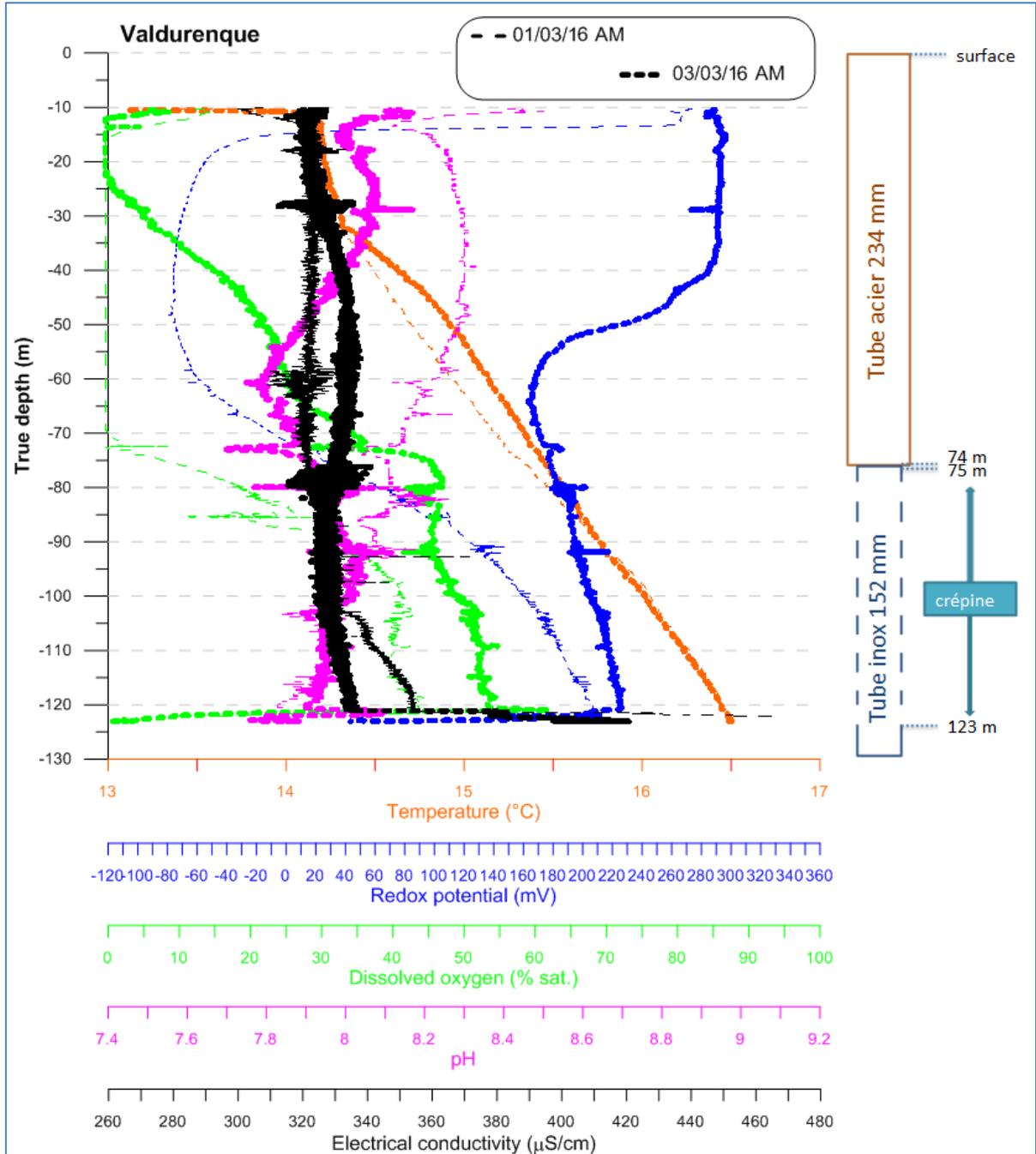


Figure 50 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 au matin, avant tout pompage.

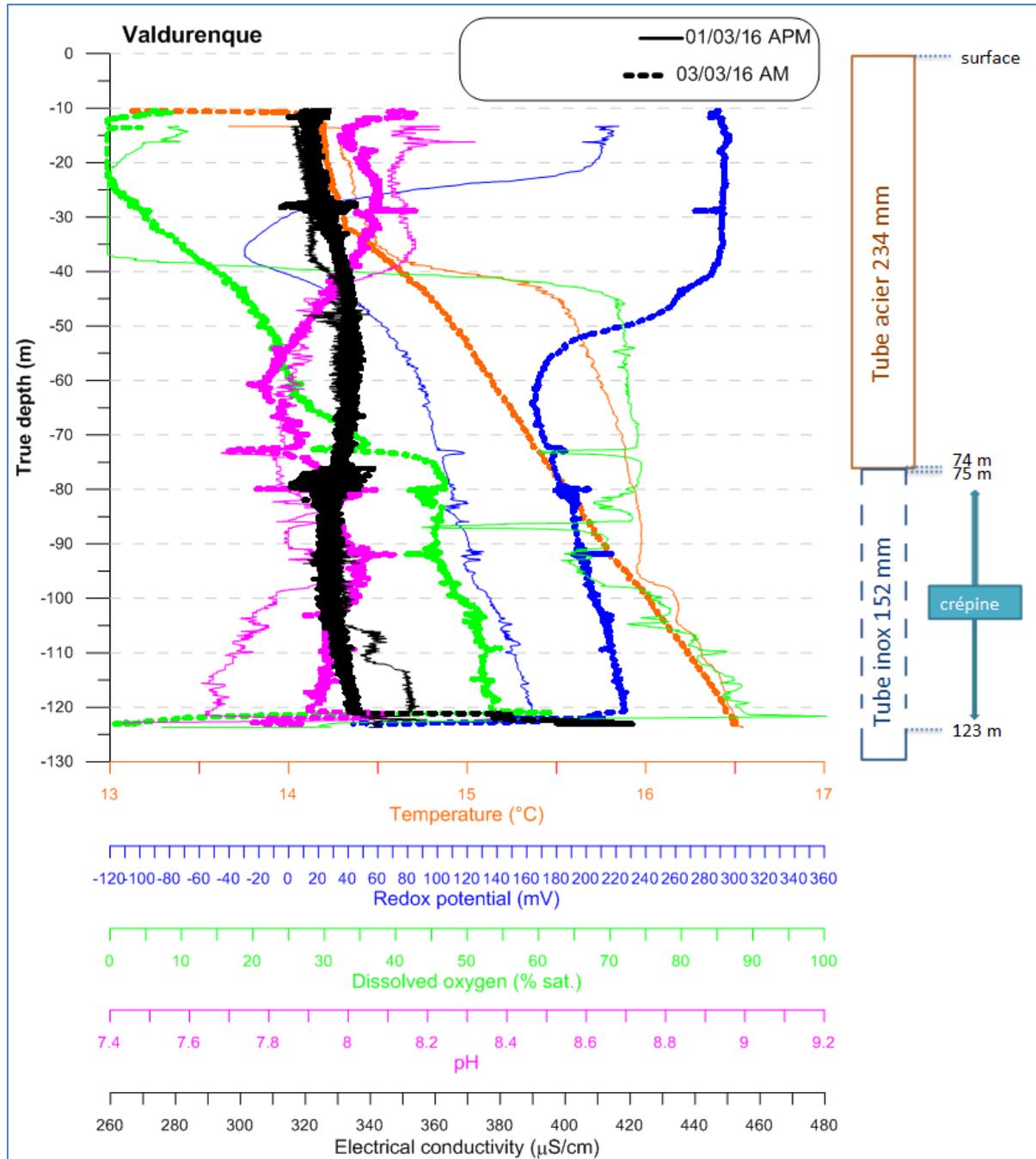


Figure 51 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres.

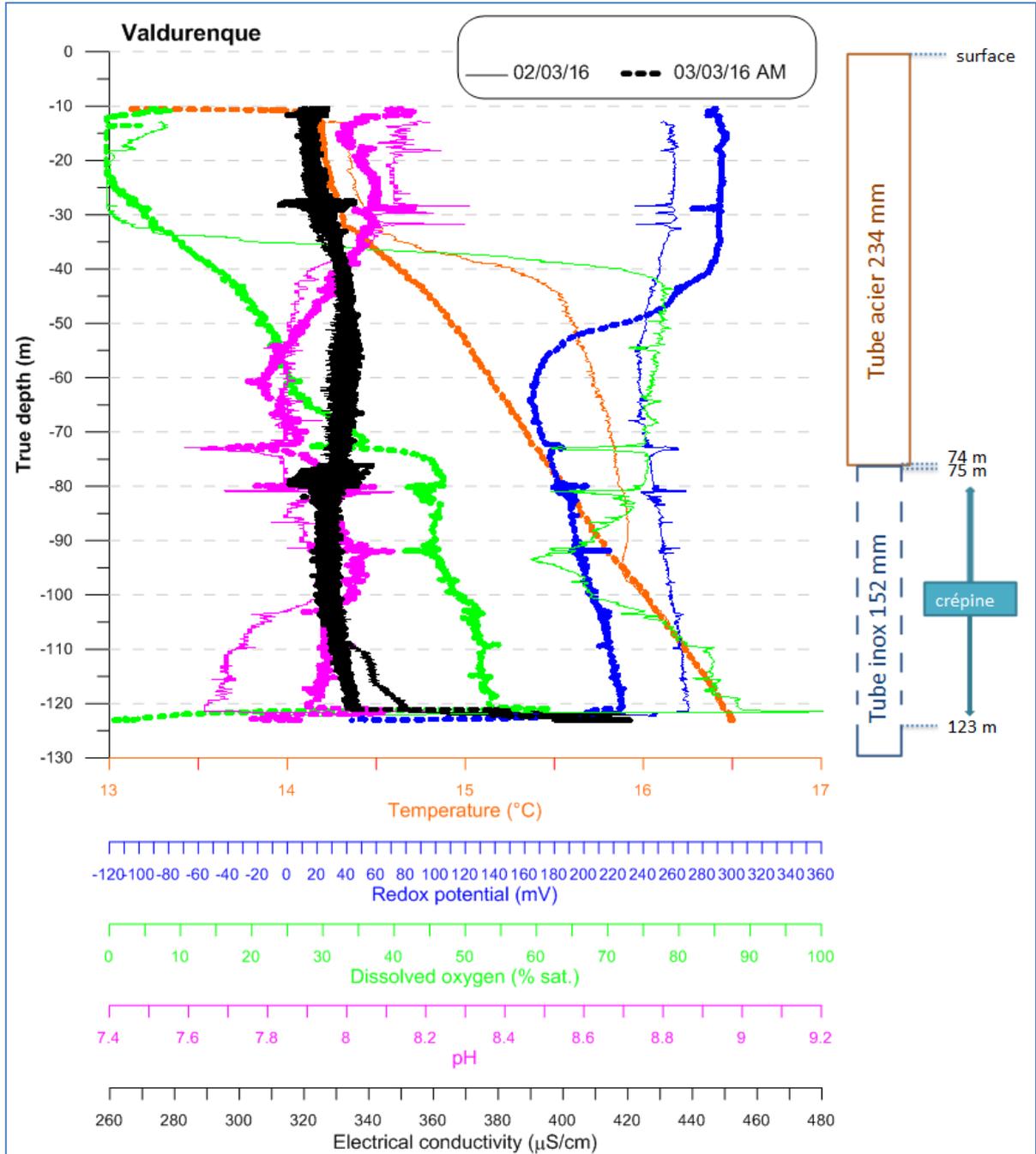


Figure 52 : diagraphie réalisée le 03/03/16 au matin dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03 puis 5700 litres le 02/03, et comparaison à la diagraphie réalisée le 02/03, après le second pompage.

### b) Diagraphie du 03/03/16 mi-journée

Cette diagraphie a été réalisée à l'issue du dernier pompage (purge globale proche de 14,5 m<sup>3</sup>). Les résultats sont présentés comparés à ceux de la 1<sup>ère</sup> diagraphie (Figure 53), à ceux de recueillis à l'issue du 1<sup>er</sup> pompage (Figure 54), puis du 2<sup>ème</sup> pompage (Figure 55), et enfin à

ceux obtenus le 03/03 au matin, avant le dernier pompage (Figure 56). Ces différentes figures permettent de suggérer que :

- Le pompage modifie la structure en *température* de la colonne d'eau, le volume d'eau pompée (et le débit de pompage) n'ayant qu'une influence faible sur la structure qui existe immédiatement après l'arrêt du pompage. Le pompage permet de mettre en évidence des sauts de température dans la crépine (autour de 100, 105 et 110 m de profondeur), qui sont vraisemblablement représentatifs d'hétérogénéités de température dans les différents horizons alimentant l'ouvrage (niveaux d'argiles à gravier). Ces discontinuités de température disparaissent rapidement à l'arrêt du pompage, pour se paralléliser au gradient thermique moyen (l'existence de ces discontinuités sera abordée plus avant dans le rapport ; cf. paragraphe 3.2.5).
- Les concentrations en *oxygène dissous* mesurées après pompage offrent le même profil vertical, mais l'amplitude de la saturation des niveaux profonds peut varier (d'environ 10% de saturation). En pompage, il existe de manière pérenne un niveau moins riche vers 95 m de profondeur, alors que l'intervalle 110 – 120 m est plus riche en oxygène. Le profil vertical en oxygène dissous suggère un appauvrissement assez rapide dès que l'ouvrage n'est plus sollicité.
- Le profil de *conductivité électrique* est globalement assez peu perturbé par les opérations de pompage, mais les pompages permettent de faire apparaître des sauts de conductivité (vers 105 et 115 m de profondeur) qui sont lissés lorsque le forage n'est pas sollicité (et ont donc tendance à se résorber assez rapidement). Ceci est sans doute à rapprocher des hypothèses de faible drainance latérale et/ou faible productivité évoquées avec les mesures de température.
- Les valeurs du *pH* sont également très semblables lorsqu'un pompage est effectué dans l'ouvrage, celui-ci ayant pour effet de « rafraîchir » l'eau en base de crépine (pH inférieur à celui mesuré hors pompage). Cette dissemblance tend à rapidement s'atténuer dès que la sollicitation cesse.
- Les pompages successifs tendent à rendre plus homogène le profil vertical du *potentiel redox* – vers des valeurs plus positives (tendance oxydante plus marquée). Dès que le pompage cesse, une déviation assez forte peut être notée dans la partie tubée pleine, d'abord vers des potentiels plus élevés (Figure 56), puis vers des potentiels plus faibles (Figure 53). Ceci pourrait être une conséquence d'une production d'oxydes de fer juste après le pompage (hausse du redox, baisse de l'oxygène dissous), qui, une fois l'eau dépourvue d'oxygène, cesse (baisse du redox et décantation des particules).

Le piézomètre de Valdurenque semble donc avoir un fonctionnement plus complexe que celui de Labruguière.

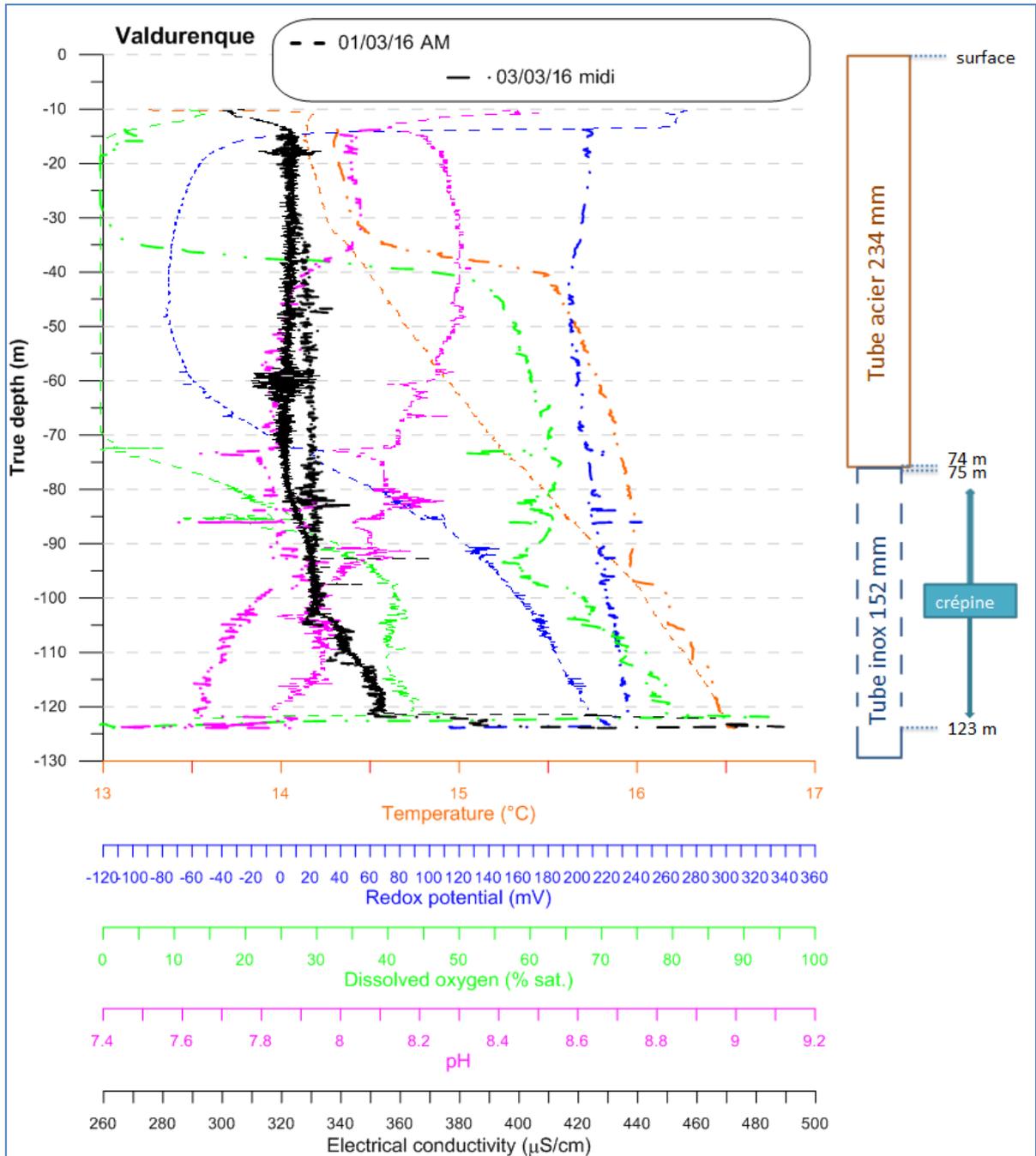


Figure 53 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3600 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 au matin, avant tout pompage.

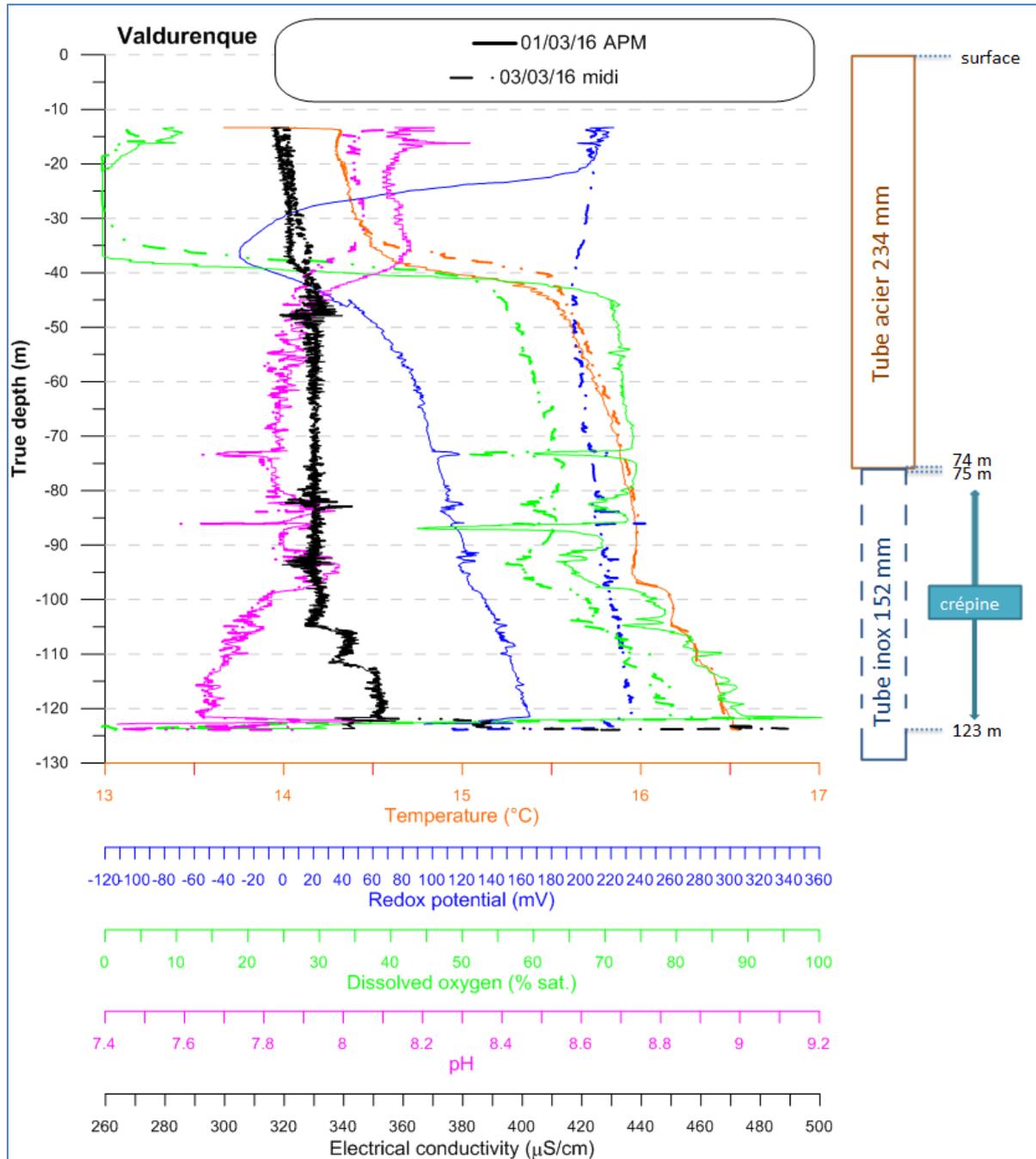


Figure 54 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 01/03 après-midi, après pompage de 5000 litres.

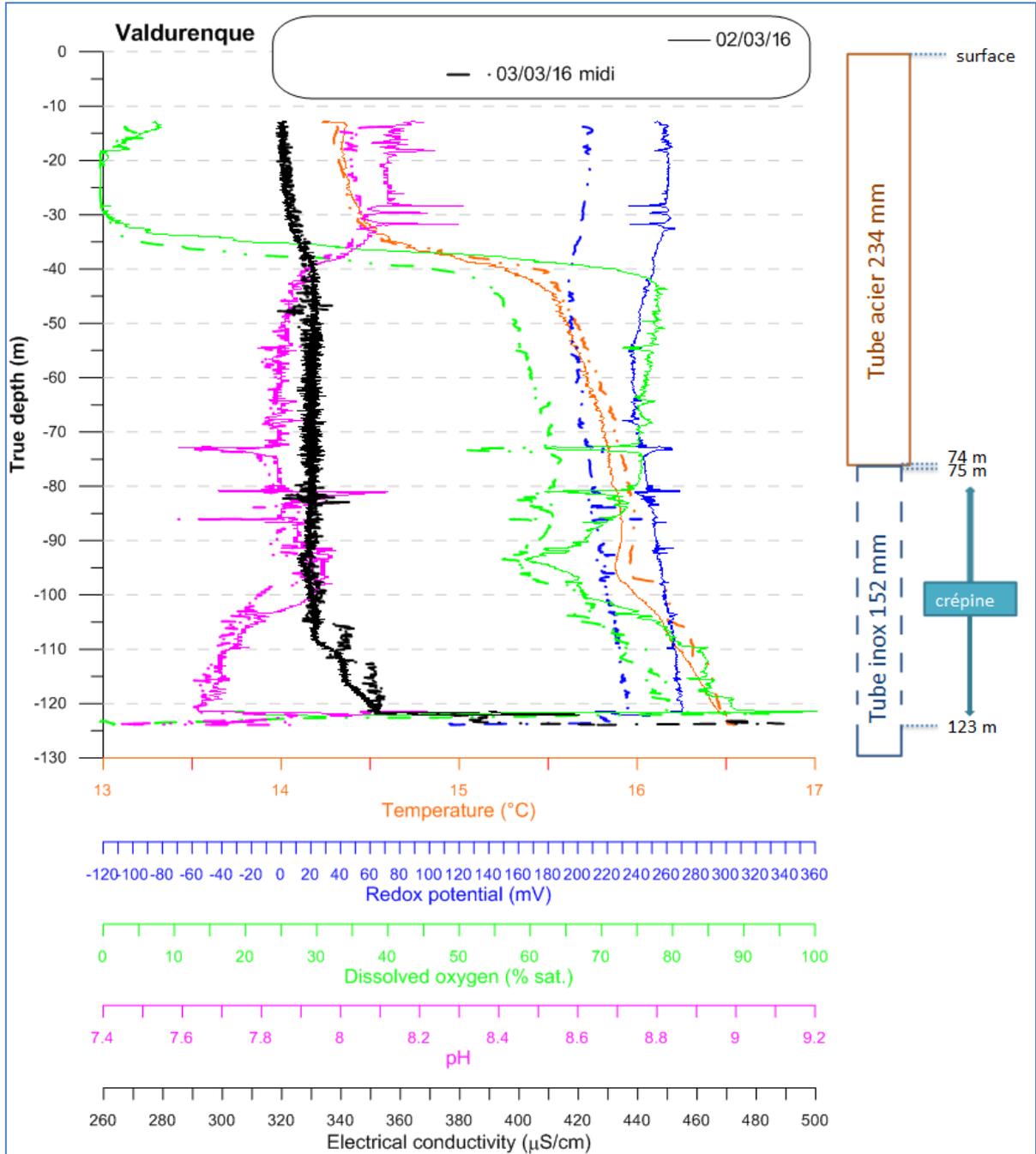


Figure 55 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 02/03, après le second pompage.

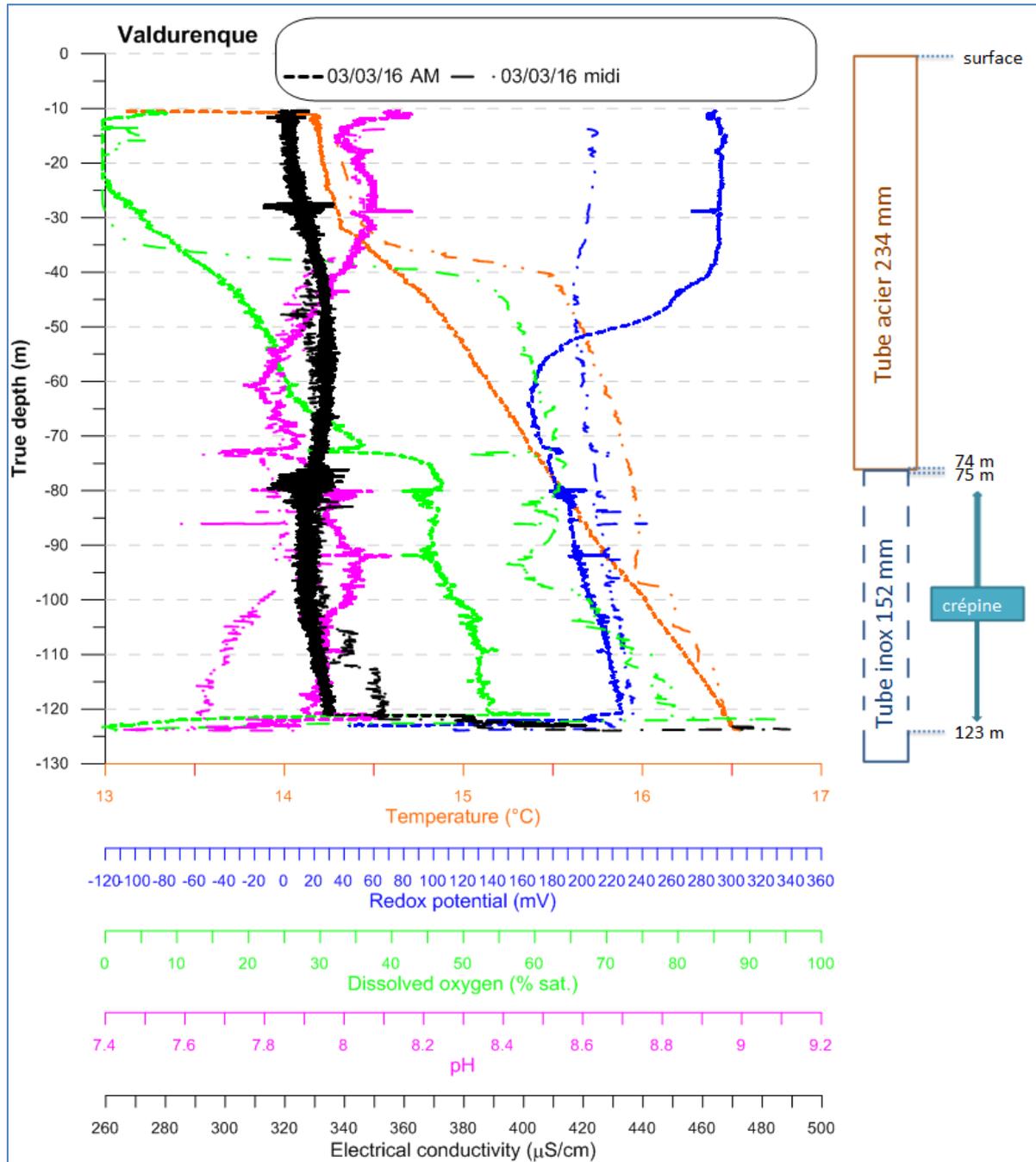


Figure 56 : diagraphie réalisée le 03/03/16 à midi dans le piézomètre de Valdurenque, après pompage de 5000 litres d'eau le 01/03, 5700 litres le 02/03 et 3900 litres le 03/03 au matin, et comparaison à la diagraphie réalisée le 03/03, avant le dernier pompage.

### c) Diagraphie du 03/03/16 après-midi

Une 3<sup>ème</sup> diagraphie a été réalisée le 03/03 en début d'après-midi. L'acquisition a été faite à la remontée de l'outil, qui est utilisé pour lester le préleveur de fond (et permettre de passer l'horizon vers 85 m de profondeur). Ce type d'enregistrement à la remontée est un peu moins efficace que l'enregistrement à la descente (les capteurs sont situés à la base de l'outil, afin de profiter d'une eau constamment rafraîchie lors de la descente de la sonde) mais il fournit des résultats qui sont interprétables avec un bon degré de confiance. La Figure 57 permet d'ailleurs de juger de la représentativité d'une telle mesure (seules les données pour l'oxygène dissous entre 10 et 35 m de profondeur ont été filtrées, le capteur ayant dérivé électroniquement<sup>16</sup>).

Cette 3<sup>ème</sup> diagraphie permet d'évaluer la vitesse de retour à « l'équilibre » après un épisode de pompage :

- Pour la *température*, l'effet de retour à l'équilibre thermique est très rapide dans la crépine (moins de 2 heures), mais plus lent dans le tube plein (refroidissement d'environ 50% en 2 heures).
- Pour l'*oxygène dissous*, le retour à des concentrations faibles est très rapide (durée inférieure à 2 heures) dans la crépine et dans le tube plein.
- Pour la *conductivité électrique*, les seuls changements visibles ont lieu dans la crépine, et se traduisent par une disparition de la stratification mise en évidence immédiatement après pompage (homogénéisation), et par une diminution de conductivité.
- Pour le *pH*, une légère tendance à l'augmentation est visible dans la crépine, mais le stade « d'équilibre » n'est pas atteint (processus plus lent que pour la conductivité).
- Enfin, pour le *potentiel redox*, il n'y a pas de réapparition rapide de la différence entre crépine et tube plein (processus de rééquilibration sans doute plus lent).

---

<sup>16</sup> Ce type d'aléa peut se produire aussi à la descente de l'outil – en d'autres termes, c'est un bug de la sonde.

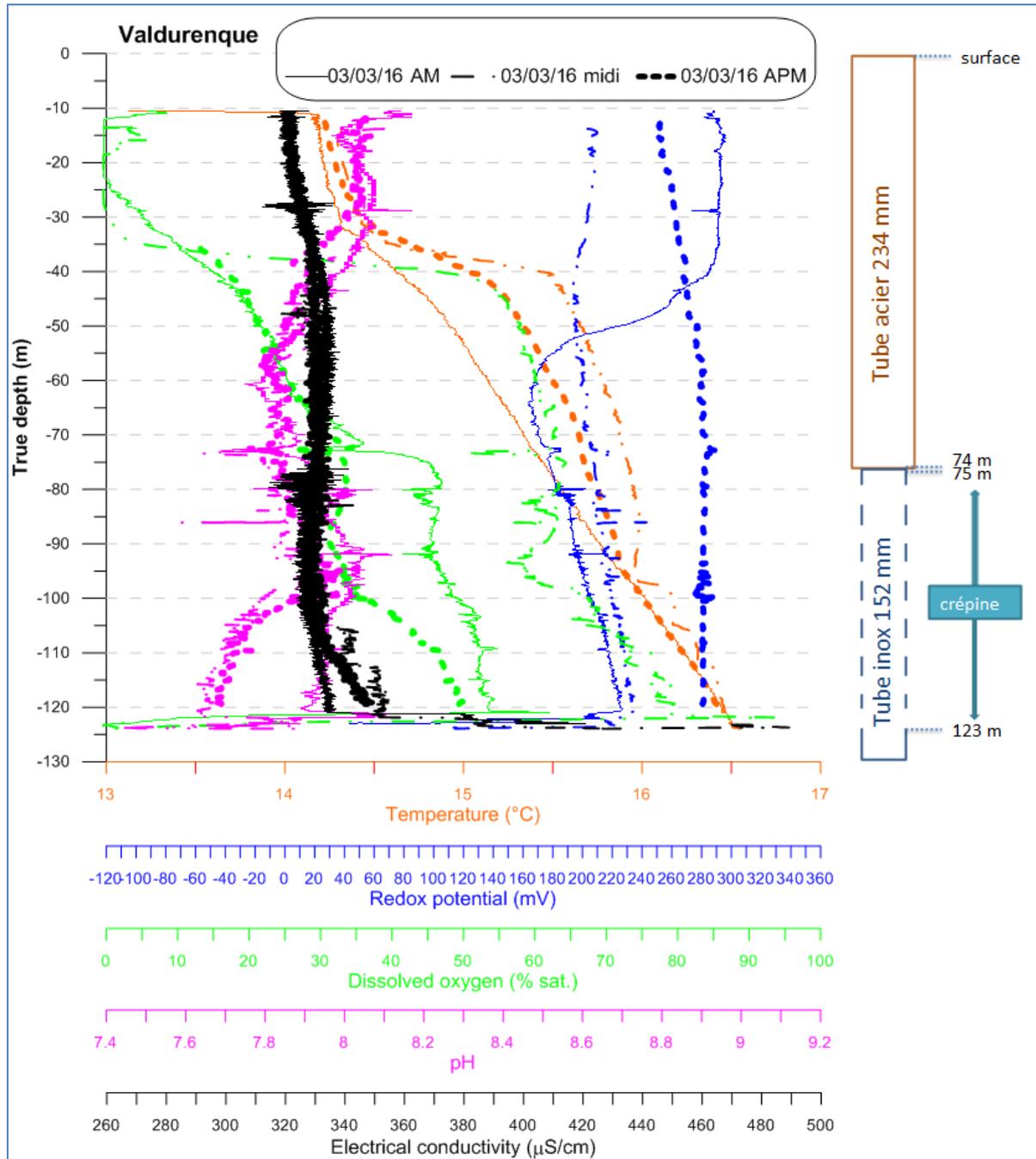


Figure 57 : récapitulatif des diagraphies réalisées le 03/03/16 dans le piézomètre de Valdurenque, au matin (après pompage cumulé de 10700 litres d'eau et une nuit de repos), à midi (après pompage de 3900 litres supplémentaires) et en début d'après-midi (remontée de la sonde de diagraphie).

### 3.2.5. Récapitulatif des diagraphies

De manière similaire à ce qui avait été constaté lors des acquisitions sur le forage de Labruguière, les profils successifs de *température* (Figure 58) ont une allure très contrastée qui permet de distinguer aisément :

- Les mesures opérées immédiatement après un épisode de pompage : présence en partie inférieure de la crépine de plusieurs paliers de température, correspondant vraisemblablement à la sollicitation durant le pompage d'horizons assez peu épais ayant des propriétés thermiques qui restituent par palier de perméabilité le gradient géothermique moyen.
- Plus en détail, la Figure 59 présente les paliers de température dans le cas de la mesure faite le 01/06 dans l'après-midi. On peut graphiquement distinguer 3 zones dans lesquelles le gradient thermique est très fort, et 3 zones dans lesquelles il est plus faible, et assez proche du gradient moyen calculé pour le forage de Valdurenque. Si l'on considère que les fortes hausses de gradient correspondent à des zones où la circulation des fluides ne permet pas une homogénéisation locale de la température, alors il est possible de distinguer des horizons peu producteurs (faible perméabilité et « anomalies » localisées de température) et des horizons producteurs (meilleure perméabilité et température assez proche de celle du gradient thermique moyen). Ainsi, les horizons entre 99 et 105 m, 108 et 112m, et 114 et 123 m paraissent être des venues d'eau contribuant à l'alimentation du forage. Les horizons étant répartis entre des passées argileuses et des passées plus sableuses ou à gravier, il est fort vraisemblable que la perméabilité soit plutôt bonne au droit des horizons de graviers et de sables qu'au droit des horizons plus argileux.
- Les mesures opérées après une phase de repos du forage : plus ce repos est long, plus la perturbation thermique engendrée par le pompage se résorbe. Il apparaît qu'environ 2 heures après un pompage les paliers de température entre 95 et 115 m de profondeur ont disparu. Le rééquilibrage thermique dans la partie tubée pleine de l'ouvrage est plus longue (supérieure à 24 heures).
- La température en fond de trou relevée à Valdurenque est nettement inférieure à celle déterminée à une profondeur équivalente à Labruguière (16,5°C et 17,3°C respectivement vers 120 m de profondeur), et ne peut être expliquée par une différence uniquement topographique<sup>17</sup> (altitudes respectives du sol au niveau des forages : 232 m et 217 m). Il semble donc exister à faible distance une hétérogénéité assez marquée du gradient géothermique.

---

<sup>17</sup> Pour rappel, le gradient calculé pour Labruguière est de 2,97°C par 100 m avec une température moyenne de surface de 13,53°C ; celui calculé pour Valdurenque est de 2,54°C par 100 m avec une température moyenne de surface de 13,44°C.

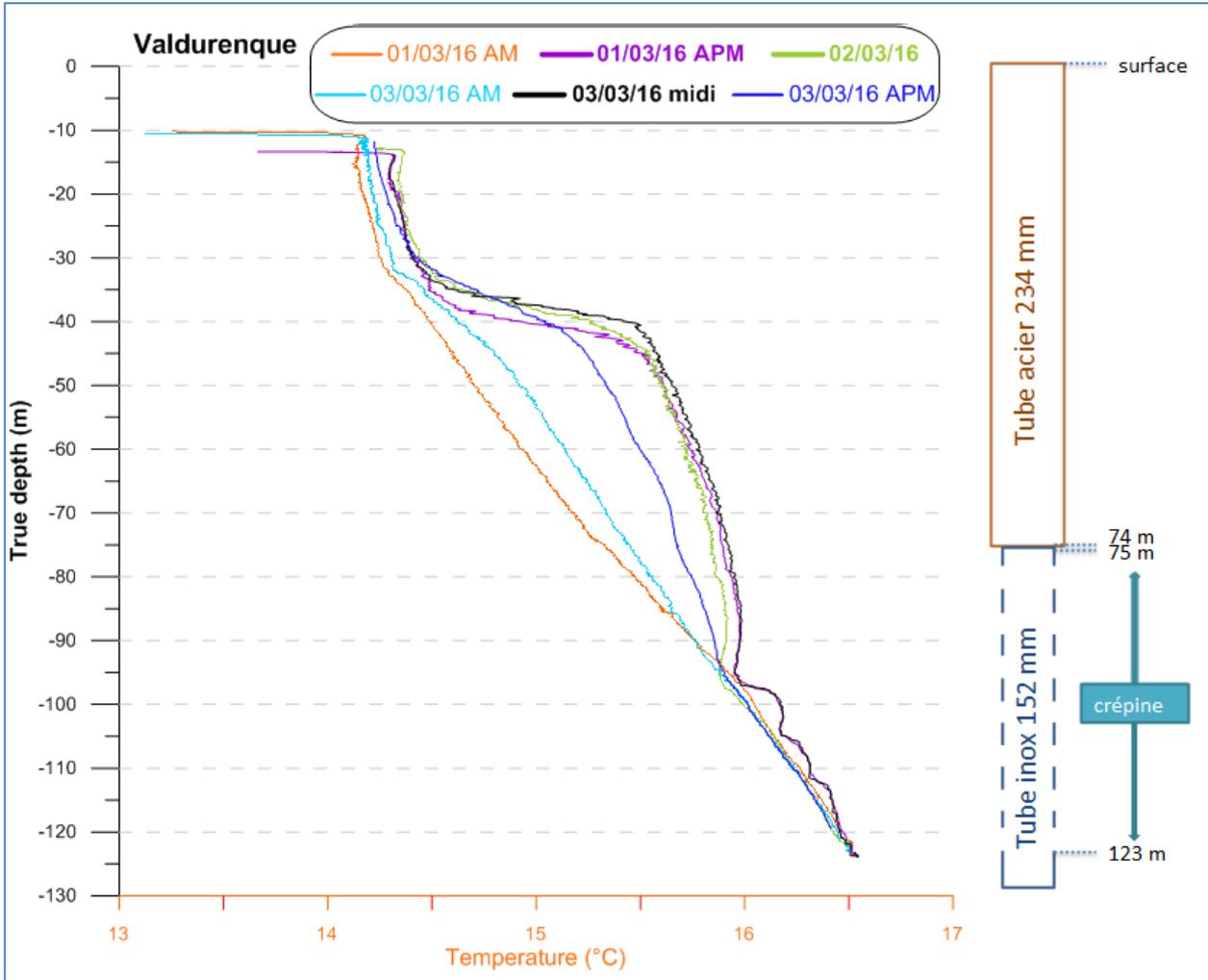
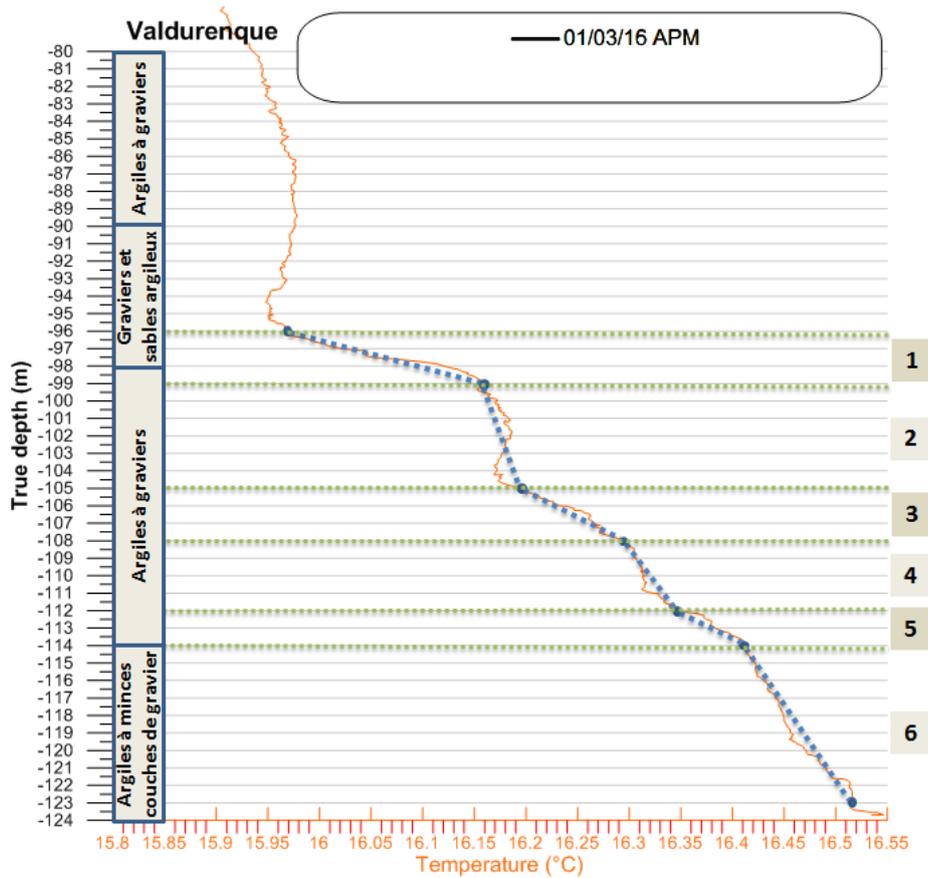


Figure 58 : récapitulatif des profils de température ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.



N° de passe	Gradient calculé sur l'intervalle de profondeur:	Écart de température entre haut et bas de la passe:		↑ de T° / au gradient moyen	Venue d'eau
		Théorique (à partir du gradient moyen calculé sur l'ouvrage)	Mesuré (T° à la profondeur)		
1 (96-99m)	$T^\circ = -0,0633 \times \text{prof.} + 9,89$	0,07	0,19	Supérieure	☹
2 (99-105m)	$T^\circ = -0,0317 \times \text{prof.} + 12,83$	0,16	0,035	Inférieure	☺
3 (105-108m)	$T^\circ = -0,0633 \times \text{prof.} + 19,32$	0,07	0,10	Supérieure	☹
4 (108-112m)	$T^\circ = -0,0475 \times \text{prof.} + 10,84$	0,10	0,045	Inférieure	☺
5 (112-114m)	$T^\circ = -0,095 \times \text{prof.} + 5,33$	0,05	0,07	Supérieure	☹
6 (114-123m)	$T^\circ = -0,0211 \times \text{prof.} + 13,56$	0,23	0,10	Inférieure	☺

Figure 59 : détail des variations de température dans la crépine (mesure après pompage du 01/03). Le tableau détaille 6 horizons, déterminés graphiquement par des variations de pente du gradient thermique, pour lesquels des gradients locaux sont calculés. Si ce gradient est plus fort que le gradient thermique moyen, alors la température n'est pas homogénéisée par une bonne circulation de fluide, ce qui suggère que l'horizon n'est pas producteur ou qu'il a une mauvaise perméabilité – piézomètre de Valdurenque.

Les concentrations en oxygène dissous étant beaucoup plus variables et plus contrastées qu'à Labruguière, il est possible de mettre en évidence les points suivants pour l'ouvrage de Valdurenque (Figure 60) :

- Présence d'un niveau riche en oxygène dissous, en base de crépine : la présence de ce niveau est pérenne même lorsque l'ouvrage n'est pas sollicité sur une longue durée (mesure du 01/03). Cela pourrait soit signaler la présence d'une eau dont l'infiltration est assez récente, les processus consommateurs d'oxygène n'ayant pas eu le temps d'être totalement efficaces, soit amener à s'interroger sur le vieillissement de la complétion du forage<sup>18</sup>. Un pompage permet de solliciter encore plus ces niveaux, pour atteindre des concentrations très élevées pour des eaux souterraines (en schéma d'infiltration classique), supérieures ou égales à 80% de saturation<sup>19</sup>.
- Dans le tube plein, les concentrations en oxygène dissous sont nulles lorsque l'ouvrage est au repos (oxygène consommé par ex. par les processus d'oxydation du tubage), et diminuent assez rapidement après le pompage. Comme déjà constaté à Labruguière, le pompage permet par contre de bien renouveler la colonne d'eau jusqu'au niveau où la pompe est déployée dans le forage (autour de 45 m de profondeur présentement).

---

<sup>18</sup> Le présent rapport n'a pas pour objet de statuer quant à l'origine de l'existence de ce niveau plus riche en oxygène. On se bornera à signaler que des enrichissements similaires en oxygène sont rapportés dans des forages profonds dans l'aquifère du Continental Intercalaire en Algérie – sans pour autant être expliqués.

<sup>19</sup> Ces valeurs ne sont pas des artefacts liés à l'utilisation d'une sonde électrochimique pour la mesure de l'oxygène dissous sur la sonde Idronaut. Outre le fait que ce capteur est vérifié avant chaque utilisation, les mesures par sonde optique, en surface, lors des pompages, ont également révélé des concentrations fortes en oxygène dissous, comme il sera vu plus tard.

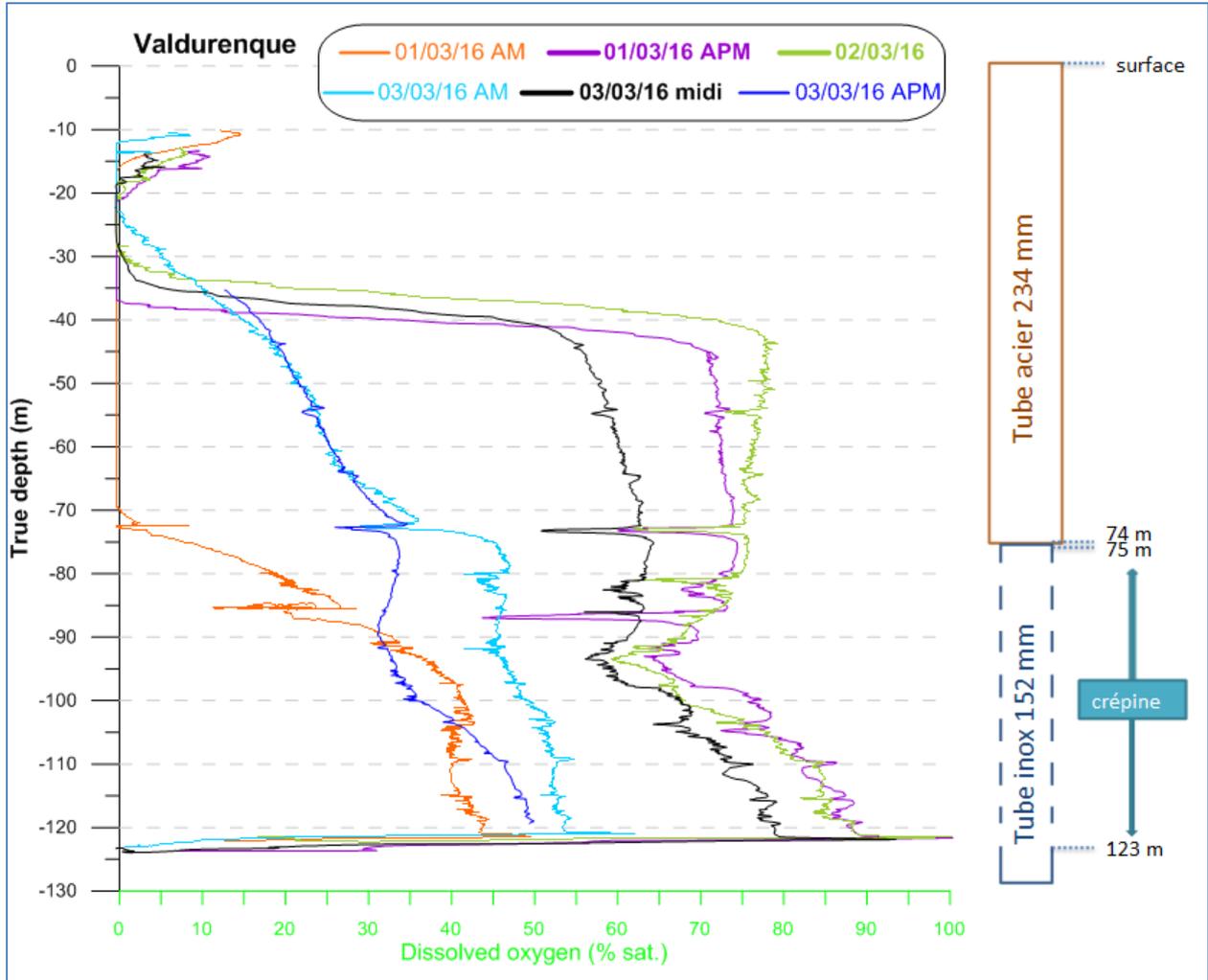


Figure 60 : récapitulatif des profils d'oxygène dissous ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.

Les valeurs de la *conductivité électrique* sont moins variables que celles mises en évidence à Labruguière (Figure 61). Les phases de pompage permettent de mieux homogénéiser la colonne sur sa verticale, mais les mesures au repos (01/03) sont assez peu différentes. Le pompage peut par contre révéler une – faible – hétérogénéité de conductivité dans la partie basse de la crépine. Enfin, les horizons captés par le forage de Valdurenque sont moins minéralisés que ceux captés par l'ouvrage de Labruguière (en moyenne  $330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et  $410 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  respectivement).

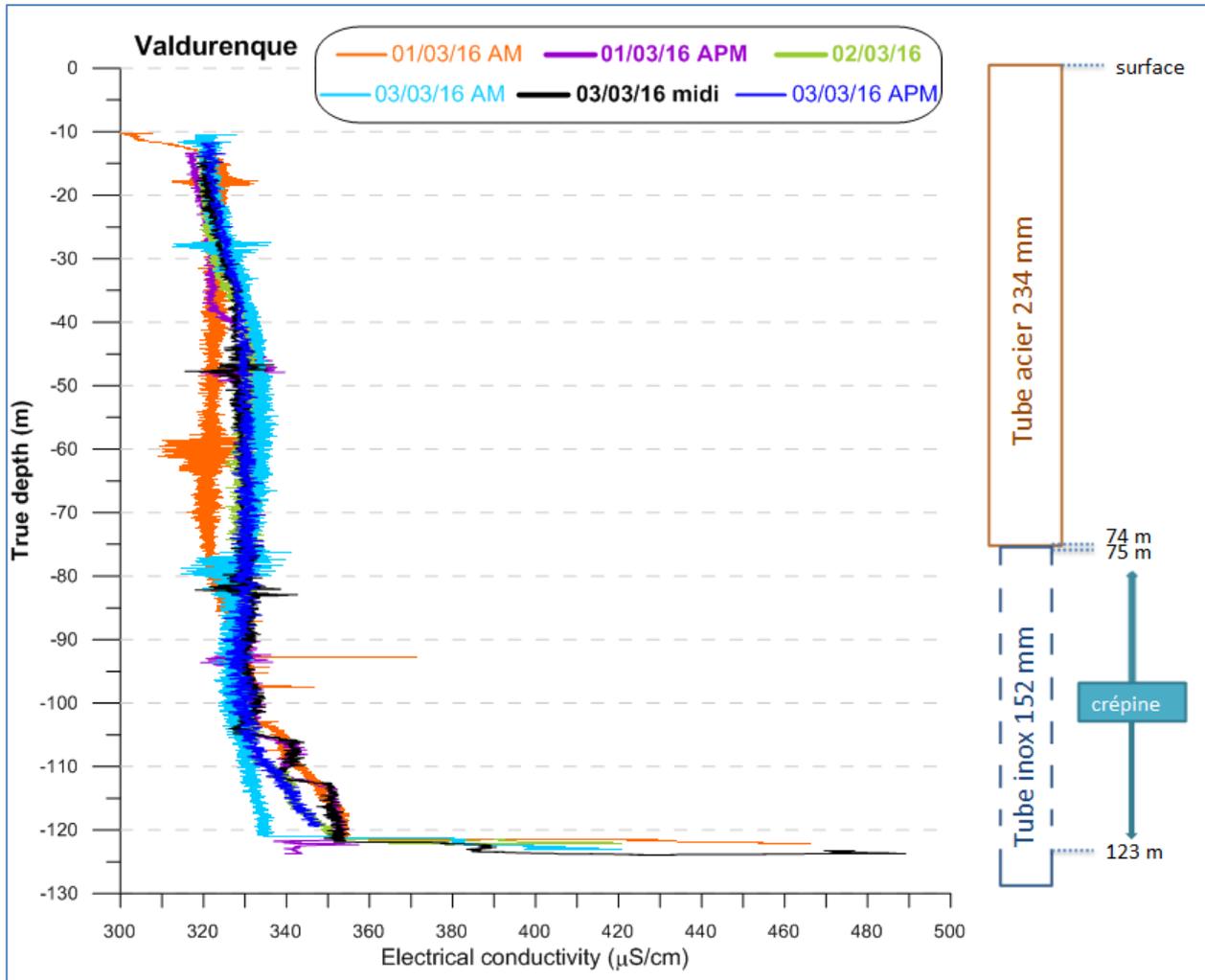


Figure 61 : récapitulatif des profils de conductivité électrique ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.

Les profils de *pH* montrent une différence entre période de non-sollicitation de l'ouvrage (profil du 01/03 ; Figure 62) et période de pompage, toutefois essentiellement dans la partie tubée pleine, ce qui représente donc des phénomènes d'évolution de l'eau sans doute différents de ceux pouvant exister dans la crépine. Les pompages permettent de drainer une eau dont le *pH* est compris entre 7,6 et 7,7 vers 120 m de profondeur et qui se rapproche de 7,9 entre 80 et 100 m de profondeur (aquifère non homogène). Cette caractéristique est rapidement gommée lorsque le pompage est interrompu (moins de 24 heures suffisent à retrouver des valeurs proches de 7,9 à la base de la crépine, valeurs qui sont celles mesurées hors pompage). Une nouvelle fois, cette structuration est différente de celle relevée à Labruguière (colonne d'eau plus homogène – valeur autour de 7,4 dans la crépine), et les valeurs du *pH* sont également différentes (les eaux de Valdurenque sont plus basiques).

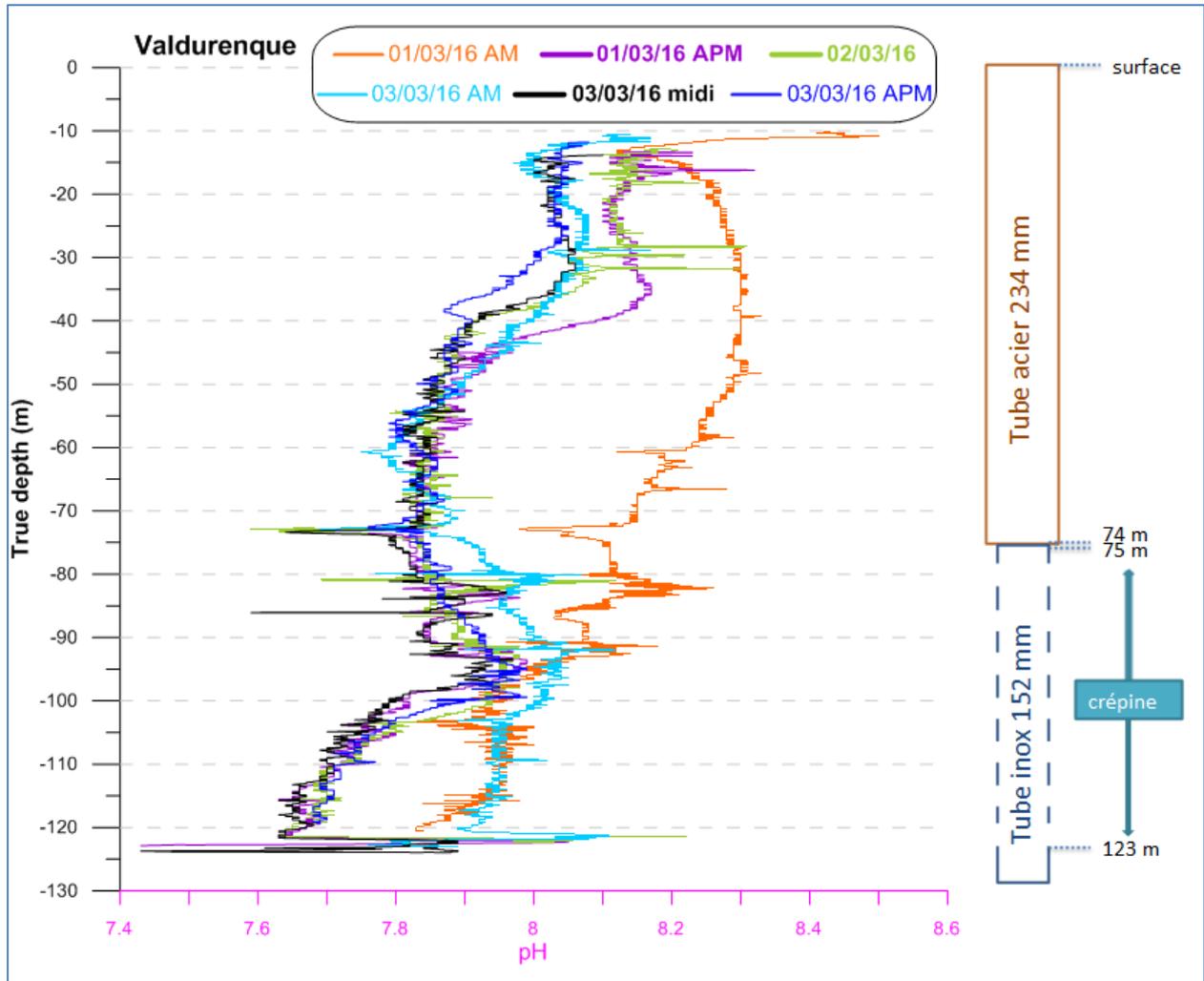


Figure 62 : récapitulatif des profils de pH ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.

Enfin, le *potentiel redox* présente également une réponse fonction des sollicitations faites – ou non – à l'ouvrage. L'état d'équilibre de long terme (profil du 01/03 ; Figure 63) présente une nette différence entre le tube plein (niveaux réduits) et la base de l'ouvrage, où un caractère plus oxydant de l'eau se fait sentir, pro parte lié à la présence d'oxygène dissous dans l'eau. Les pompages permettent de progressivement homogénéiser la colonne d'eau, amenant à la disparition progressive des niveaux à caractère réducteur dans la partie haute du forage. Conséquence de la présence d'eau riche en oxygène dans la crépine, les valeurs du potentiel redox mesurées à Valdurenque ne sont pas comparables à celles déterminées à Labruguière, où le caractère oxydant est nettement moins affirmé.

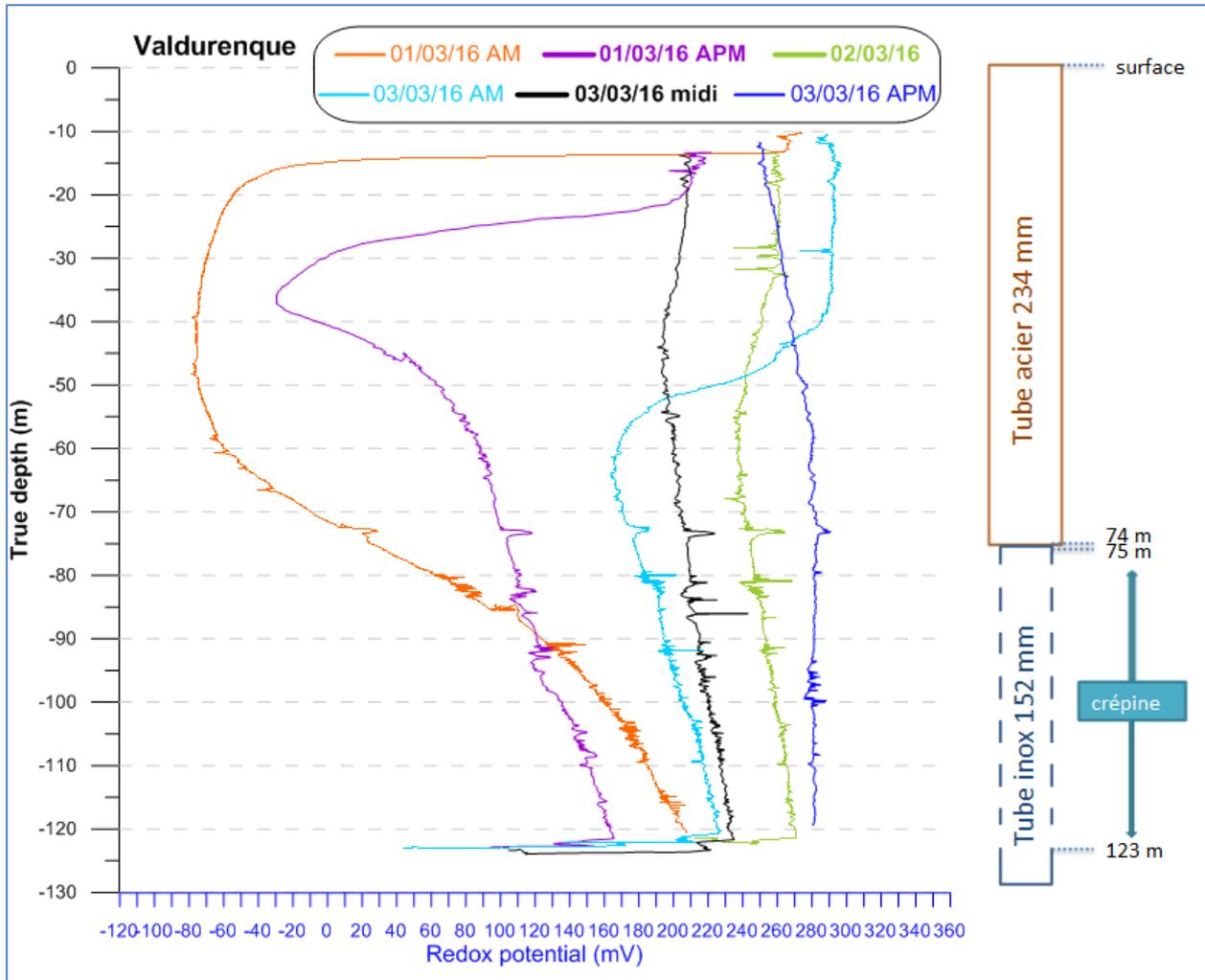


Figure 63 : récapitulatif des profils de potentiel redox ; les figurés légendés en gras représentent les diagraphies réalisées après les phases de pompage – piézomètre de Valdurenque.

### 3.3. PRELEVEMENTS DE FOND

Les périodes durant lesquelles les prélèvements de fond ont été réalisés sont mentionnées dans le Tableau 5. Comme pour l'ouvrage de Labruguière, le 1<sup>er</sup> prélèvement de fond a été réalisé suite à la diagraphie initiale et avant tout pompage. Le blocage de la sonde le 29/02 vers 85 m de profondeur (bouchon vaseux) a orienté vers la réalisation du prélèvement à 81 m de fond. Toutefois, il a été possible dès le 01/03 au matin de descendre la sonde Idronaut à 123 m de fond<sup>20</sup>, ce qui aurait pu permettre de faire un prélèvement en base de crépine, où la diagraphie a montré que l'eau avait des caractéristiques physico-chimiques différentes de celles

<sup>20</sup> Ce passage dès le 01/03 peut être expliqué par 2 hypothèses : soit les allers et venues pratiquées le 29/02 au-dessus du bouchon l'on amené à se fragmenter quelque peu, ce qui a permis le lendemain le passage de la sonde. Soit on a imprimé une vitesse de descente verticale plus grande à la sonde, ce qui a augmenté sa force de pénétration et permis de créer un passage dans le bouchon.

mesurées vers 80 m de profondeur (voir par ex. Figure 60 ou Figure 62). Il est en effet aisé de coupler le système de prélèvement de fond à la sonde Idronaut (Figure 64). Malheureusement, les tentatives de réaliser un prélèvement vers 119 m de profondeur le 01/03 se sont soldées par un colmatage très rapide du clapet et de son filtre de protection, ce qui a rendu inopérant le système de prélèvement de fond (et donc le prélèvement impossible). La 2<sup>ème</sup> opération de pompage le 02/03 a dû permettre de résorber en partie ce bouchon vaseux<sup>21</sup> ; dès lors, on a pu procéder à un prélèvement à 119 m de profondeur, et continuer à prélever à 81 m de profondeur. La charge en suspension visible au début du pompage le 01/03 (Figure 65) est en effet très abondante et pourtant la pompe est implantée environ 40 m au-dessus de la zone la plus bouchée. On imagine donc facilement l'état de l'eau encore plus en profondeur, et le fait que les fines puissent très rapidement rendre inopérant un système de prélèvement avec des clapets.



*Figure 64 : couplage du système de prélèvement de fond à la sonde Idronaut. Remarquer le colmatage du filtre (partie apparente du préleveur de fond, lui-même protégé par du scotch rouge) – piézomètre de Valdurenque.*

---

<sup>21</sup> Sans passage caméra dans l'ouvrage, il est difficile de donner une géométrie (épaisseur, longueur) précise au bouchon.



Figure 65 : eau pompée en début de purge à 45 m de profondeur le 01/03 – piézomètre de Valdurenque.

### 3.3.1. Prélèvements de fond à 81 m

La typologie de suivi des prélèvements de fond diffère de celle employée à Labruguière. Il n'y a pas de suivi de la purge du système de prélèvement de fond, on a déclenché le prélèvement à stabilisation des paramètres physico-chimiques mesurés en surface (2 cycles de purge, prélèvement au 3<sup>ème</sup> cycle de fonctionnement du préleveur de fond). Par contre, comme le préleveur de fond a été descendu en étant couplé à la sonde Idronaut, les paramètres mesurés in-situ par la sonde ont été relevés lors du prélèvement de fond, et peuvent donc être comparés aux mesures en surface. Les mesures sont consignées dans le Tableau 6.

Type de mesure	date	heure	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> dissous (% sat.)	pH	Conductivité @25°C (µS/cm)	Pot. redox (corrigé, mV)
Fond	01/03/2016	9:00	15,5	6,67	8,08	322	151
Surface			8,1	45,5	8,76	321	377
Fond	01/03/2016	17:00	15,8	47,7	7,88	331	201
Surface			9,5	35,4	8,78	328	372
Fond	02/03/2016	13:54	15,8	58,9	7,88	330	253
Surface			11,3	45,7	8,30	322	423
Fond	03/03/2016	13:00	15,8	47	7,88	331	275
Surface			9,4	23	8,6	368	356

Tableau 6 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 81 m de profondeur – piézomètre de Valdurenque.

Comme déjà précédemment abordé (cf. paragraphe 2.3.1), il n'est pas possible de comparer les mesures de *température* en forage aux mesures de température en surface à l'exhaure du système de prélèvement de fond (Tableau 6). La température mesurée à 81 m de profondeur par la sonde Idronaut est très stable (15,8°C) sauf lors du 1<sup>er</sup> prélèvement (15,5°C). Cette (légère) différence est uniquement due à un 1<sup>er</sup> prélèvement fait avant pompage et à d'autres prélèvements faits suite à pompage. La consultation de la Figure 58 indique que la température à 81 m de profondeur est de 15,5°C à l'équilibre avec l'encaissant (01/03) et au maximum de 16°C immédiatement après un pompage. En conséquence, la mesure d'une température de 15,8°C montre une nouvelle fois que l'eau se refroidit assez vite dès que l'on stoppe le renouvellement de la colonne d'eau.

La concentration en *oxygène dissous* mesurée dans le forage est faible le 01/03 au matin, le pourcentage de saturation étant inférieur à ce que les diagraphies du 29/02 et du 01/03 matin avaient indiqué (Figure 60). Il se stabilise ensuite autour de 50% de saturation après que des pompages aient été réalisés. Cette valeur est également un peu inférieure à celle mesurée en diagraphie après pompage, ce qui peut une nouvelle fois témoigner d'une évolution rapide de la colonne d'eau dès que le pompage cesse. Les mesures opérées en surface sur le système de prélèvement de fond sont assez cohérentes avec les mesures in-situ (Tableau 6). Il ne semble donc pas que l'on ait trop changé la concentration en oxygène dissous de l'eau lors de son exposition à l'atmosphère en sortie du système de prélèvement de fond, sauf peut-être pour le 1<sup>er</sup> prélèvement<sup>22</sup>.

Les variabilités verticale et temporelle de la *conductivité électrique* étant très faibles (Figure 61), il n'est guère étonnant d'avoir une bonne cohérence entre les mesures in-situ et les mesures en sortie du préleveur de fond (Tableau 6). Le plus gros écart (11%) est trouvé pour le prélèvement du 03/03, la mesure en surface étant de manière surprenante trop élevée en regard des précédentes mesures. Il s'agit soit d'une erreur de mesure (erreur dans le report de la donnée), soit le préleveur était mal positionné dans l'ouvrage (par ex. plaqué contre le tubage) et on a prélevé de l'eau dans une zone où des résidus de bouchon vaseux étaient toujours présents.

<sup>22</sup> Toutes les précautions pour éviter un contact avec l'atmosphère (par ex. mesure en cellule fermée) n'ont cependant pas été respectées pour ces mesures. Pour Labruguière, cela se traduisait donc par une oxygénation artificielle de l'eau en surface, l'eau présente dans l'ouvrage de Labruguière étant totalement dépourvue au droit de la crépine (cf. paragraphe 2.3.1).

Les valeurs du *pH* sont très contrastées entre les mesures in-situ et les mesures en surface. Les mesures in-situ sont tout à fait comparables à celles issues des profils verticaux (Figure 62). Par contre, les mesures en surface surévaluent systématiquement le pH (entre +0,4 et +0,9 unité pH), ce qui n'est pas satisfaisant. La prise en compte de la différence de température va au mieux amener une diminution de -0,04 unité pH sur les mesures en surface. L'essentiel de l'écart entre les 2 mesures reste donc présent. Cette déviation ne peut être imputable à une mauvaise calibration des électrodes (vérification journalière). En conséquence, il y a modification du pH, à la hausse, lors de la remontée de fluide<sup>23</sup>.

Le *potentiel redox* mesuré in-situ lors des prélèvements de fond est compatible avec les chroniques issues des diagraphies (Figure 63). Il est en effet plus faible lors du 1<sup>er</sup> prélèvement puis plus élevé ensuite, en conséquence des différents cycles de pompage. Les mesures sur l'eau collectée par le préleveur de fond sont une nouvelle fois systématiquement plus élevées que celles mesurées directement dans le forage. Même si on sait que cette mesure en conditions de terrain peut être entachée d'une incertitude assez grande, les écarts mesurés sont nettement plus importants que ceux trouvés à Labruguière (cf. paragraphe 2.3.1). On ne peut pas non plus incriminer une mise en contact du prélèvement avec l'atmosphère, puisqu'initialement l'eau contient déjà de l'oxygène (au contraire de ce qui existait à Labruguière). Force est donc de constater, comme pour le pH, que le prélèvement de fond faille à permettre, dans ce contexte d'ouvrage, la mesure de certains paramètres physico-chimiques avec un bon degré de confiance. Ceci peut aussi être une conséquence du choix d'un horizon de prélèvement dans un niveau peu ou pas productif, soumis à des évolutions potentielles dès que des conditions aux limites sont modifiées. Enfin, on peut aussi envisager, dans ce contexte, que la réalisation de 2 cycles de purge avant le cycle de prélèvement n'est pas suffisante pour obtenir une eau représentative – pourtant, la stabilisation des paramètres physico-chimiques est souvent notée à ce stade (cf. paragraphe 2.3.1).

### 3.3.2. Prélèvements de fond à 119 m

Comme signalé en introduction de cette partie (cf. paragraphe 3.3), seuls 2 prélèvements ont in-fine été réalisés à 119 m de profondeur (Tableau 7). Les données du 01/03 ne sont rapportées qu'à titre indicatif, car elles correspondent à un cycle de purge.

De manière identique à ce qui a été précédemment rapporté, les mesures de *température* en surface, à la sortie du système de prélèvement de fond, ne sont pas représentatives de celles de la masse d'eau en profondeur. Les mesures in-situ le sont pour leur part.

Les teneurs en *oxygène dissous* sont proches de 50% in-situ, ce qui est cohérent avec les mesures en diagraphie verticale. Les mesures en surface sont un peu inférieures (d'un facteur 0,8), mais sont reproductibles d'un prélèvement à l'autre. Cette légère sous-estimation est peut-être une conséquence d'une utilisation un peu trop vive du préleveur de fond (pression d'azote utilisée un peu élevée) ou plus vraisemblablement d'une mesure en fin de cycle de

---

<sup>23</sup> Cette eau pouvant connaître des évolutions rapides de certains paramètres (oxygène dissous, potentiel redox), qui en retour ont une influence sur certains mécanismes (interaction avec les matériaux du tubage, précipitation d'hydroxydes de fer), l'utilisation d'un système de prélèvement à poussée d'azote entraîne peut-être des modifications redox sur le fluide qui ont un impact en cascade sur le pH ?

On peut également évoquer la présence de fines particules en suspension (le filtre présent sur le système de prélèvement a une maille de 125 µm) qui pourraient jouer un rôle dans la modification du pH lors de sa remontée vers la surface.

prélèvement, lorsque l'azote se retrouve mêlé à l'eau (on baisse donc artificiellement la teneur en oxygène).

La *conductivité électrique* mesurée le 01/03 est inférieure aux valeurs mesurées in-situ, ce qui traduit bien le fait que le 1<sup>er</sup> cycle de purge du préleveur de fond n'est jamais capable de garantir la remontée d'un fluide représentatif (il n'est jamais possible de purger intégralement le système, il se produit donc un mélange avec le fluide résiduel dans cette configuration). Par contre, les mesures en surface faites les jours suivants sont totalement en accord avec les mesures in-situ. Le seul écart constaté est pour la mesure en fond de trou le 03/03, avec une forte hausse de la conductivité : il est plus que vraisemblable que cela soit imputable à un colmatage partiel de l'électrode de conductivité par la boue décantée en fond d'ouvrage (Figure 66).

Les données *pH* mesurées en surface sont un peu moins surévaluées que celles obtenues à 81 m de profondeur, l'écart étant ici de +0,3 à +0,4 unité pH, à minorer de -0,03 à -0,04 unité pH (prise en compte de l'effet de température). Cette zone autour de 120 m de profondeur semblant plus productive, il est possible que l'on arrive plus facilement à échantillonner une eau moins sujette à modification lors de sa remontée dans le système de prélèvement de fond.

Enfin, les données de *potentiel redox* souffrent toujours d'une surestimation systématique lorsqu'elles sont mesurées en surface sur les prélèvements de fond. Il ne faut donc pas attendre une représentativité correcte de ce paramètre via un prélèvement de fond<sup>24</sup>.

Type de mesure	date	heure	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> dissous (% sat.)	pH	Conductivité @25°C (µS/cm)	Pot. redox (corrigé, mV)
Fond	01/03/2016*	17:30	16,3	51,4	7,7	342	231
Surface			9,2	35,5	8,98	316	350
Fond	02/03/2016	14:30	16,4	50	7,69	343	279
Surface			12,3	39	8,01	335	457
Fond	03/03/2016	14:00	16,4	50,3	7,69	472	278
Surface			9,7	39,4	8,06	339	476

Tableau 7 : suivi des paramètres physico-chimiques lors des séquences de prélèvement de fond à 119 m de profondeur. \*Les données du 01/03 n'ont pas fait l'objet d'un prélèvement, les données présentées – à titre indicatif – correspondent au 1<sup>er</sup> cycle de purge, le clapet s'étant ensuite bouché (des tentatives ultérieures n'ont pas permis de s'affranchir de ce point) – piézomètre de Valdurenque.

Des remarques complémentaires quant aux écarts entre mesure en surface et mesure in-situ par diagraphie seront abordées au paragraphe 3.4.4.

<sup>24</sup> Le problème de la représentativité des mesures redox sur site n'est pas seulement inhérent à la méthode employée, il est parfaitement possible, sur certains types d'eau (fréquemment des eaux de surface), d'avoir des mesures en surface dans un flux d'eau qui ne parviennent jamais à se stabiliser, avec des dérives de plusieurs dizaines de mV sur quelques minutes.



*Figure 66 : aperçu des dépôts remontés par la sonde Idronaut (oxydes et/ou hydroxydes de fer notamment) – piézomètre de Valdurenque.*

### **3.4. POMPAGE ET PRELEVEMENTS EN POMPAGE**

Le pompage a été effectué en utilisant également une pompe MP1 descendue à environ 45 m de profondeur dans le forage. Tout comme à Labruguière, la sonde Idronaut a permis de suivre en continu l'évolution des paramètres physico-chimiques à l'exhaure du pompage (Figure 65). Un prélèvement en début et un prélèvement en fin de séquence de pompage ont également été recueillis (Tableau 5).

Pour rappel, il a été possible sur le forage de Valdurenque de purger un volume d'eau bien supérieur à celui pompé à Labruguière. Ainsi, 5000 litres ont été extraits le 01/03, 5700 litres le 02/03 et enfin 3900 litres le 03/03, amenant à la purge d'un volume équivalent à 3,5 fois le volume d'eau initialement présent dans l'ouvrage à son ouverture le 29/02, la durée cumulée de pompage approchant les 9h00. Par comparaison, sur une durée proche, il n'avait été possible de purger que 1,6 fois le volume de la colonne d'eau à Labruguière, toutefois plus profond. La différence est liée à la productivité bien meilleure de l'ouvrage de Labruguière, qui permet de pomper pratiquement au maximum de puissance de la pompe MP1 sans engendrer un rabattement du niveau statique trop fort. En effet (Figure 67), si le niveau diminue durant la 1<sup>ère</sup>

demi-heure de pompage d'environ 5 mètres, le rabattement ralentit fortement ensuite, 3 heures étant ensuite nécessaires pour que le niveau baisse de 3 m supplémentaires. A Labruguière, à régime de pompage nettement inférieur, cette même durée amenait à rabattre de près de 20 m la colonne d'eau.

A l'arrêt du pompage, le niveau statique remonte également bien plus rapidement dans le piézomètre de Valdurenque. En 1 heure, 2/3 de la baisse sont déjà rattrapés (à Labruguière, c'était à peine la moitié de la baisse de niveau).

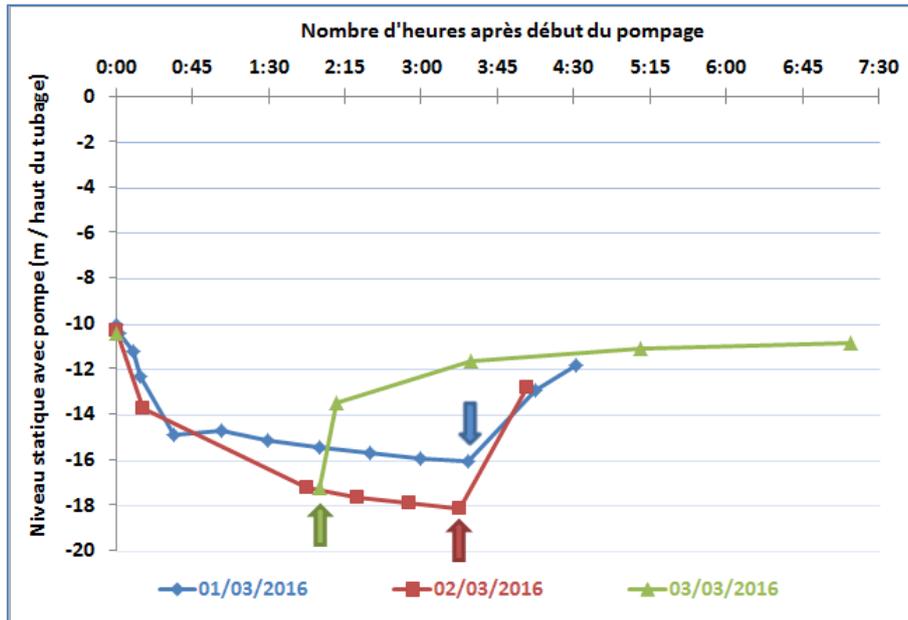


Figure 67 : suivi temporel du rabattement de la nappe ; les flèches indiquent le moment où le pompage est stoppé (suivi de la remontée du niveau statique) – piézomètre de Valdurenque.

### 3.4.1. Pompage du 01/03/16

Ce 1<sup>er</sup> pompage a duré environ 3h30 (Figure 68). Les faits suivants peuvent être soulignés :

- La *température* en tout début de pompage est celle de l'eau dans le tubage à 45 m de profondeur, puis elle augmente graduellement durant toute la durée du pompage jusqu'à atteindre environ 15,9°C, ce qui correspond à la température régnant entre 90 et 95 m de profondeur dans l'ouvrage (Figure 58). On a donc bien commencé à solliciter les venues d'eau existant au sein de la crépine, sans toutefois pouvoir présager des horizons réellement sollicités (horizons peu profonds mais un peu moins chauds, et/ou horizons plus profonds un peu plus chauds et à meilleure perméabilité mais qui sont refroidis par mélange avec les horizons sus-jacents lors de la remontée). Comme le volume d'eau pompé (5000 litres) est supérieur à celui du volume d'eau présent dans l'ouvrage, ce résultat n'est pas surprenant.
- La concentration en *oxygène dissous* permet même d'essayer de raffiner la chronologie de purge de l'ouvrage. Durant la 1<sup>ère</sup> heure de pompage, cette concentration reste nulle, ce qui correspond à une purge du tube plein (Figure 60). La concentration augmente ensuite progressivement jusqu'à atteindre 25% de saturation, ce qui correspond à une profondeur proche de 85 m. Cela est relativement cohérent avec les évolutions

constatées pour la température. Si l'on se réfère au volume d'eau présent dans la colonne d'eau, 2 approches peuvent être envisagées :

- Celle qui considère les volumes globaux : entre 10 et 75 m de profondeur, il y a environ 2800 litres. Dans le cas présent, on pompe à 1300 litres par heure. Ceci peut suggérer que l'on commence à solliciter les horizons producteurs dans la crépine avant d'avoir totalement renouvelé le volume d'eau présent dans le tube plein. En d'autres termes, pour ce forage, il ne faut pas voir l'action de pompage uniquement comme une remontée de type piston d'un volume d'eau par translation depuis une profondeur donnée jusqu'à la prise d'eau de la pompe. Le phénomène est plus complexe, et il peut donner lieu à des mélanges entre une eau qui stagne dans le tubage et une eau plus « fraîche » issue de la crépine.
  - Celle qui considère le volume de la colonne d'eau seulement en dessous de la prise d'eau de la pompe (soit vers 45 m de profondeur). Le volume d'eau est alors pratiquement 2 fois moindre, proche de 1400 litres. Ce volume correspond à celui qui est pompé en 1 heure. Dans ce cas, on a donc une configuration où l'eau remonte selon un schéma de type piston.
- La *conductivité électrique*<sup>25</sup> est proche de  $320 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  durant la 1<sup>ère</sup> heure, ce qui correspond bien à la conductivité qui existe dans le tube plein. Ensuite, comme pour l'oxygène dissous, on constate une hausse de la conductivité qui atteint  $330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , ce qui correspond également à la valeur de ce paramètre vers 85 m de profondeur.
  - Le *pH* en début de pompage correspond également à celui existant à la profondeur de déploiement de la pompe. Par suite, le pH diminue régulièrement jusqu'à tendre vers 7,8, valeur qui n'est mesurée dans l'ouvrage, en diagraphie, que vers 120 m de profondeur. Pour ce paramètre, on tendrait donc, à l'issue de la purge d'une fois le volume du forage, à être représentatif des conditions en base d'ouvrage.
  - Enfin, le *potentiel redox* est lui aussi négatif en début de purge (solicitation des niveaux présents dans le tube plein), puis augmente progressivement pour atteindre des valeurs proches de celles mesurées vers 100 m de profondeur.

On entrevoit donc que la purge de cet ouvrage a une cinétique assez complexe, que l'on va essayer de préciser à l'aune des pompages ultérieurs.

---

<sup>25</sup> Sur la Figure 68, on peut voir un bruit pour les mesures de conductivité (variation sur quelques  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  du paramètre à échelle de temps très courte) ; ce bruit est uniquement électronique, et il faut considérer la valeur moyenne du paramètre. La sonde Idronaut utilisée à Labruguière ne présente pas ce défaut, qui est inhérent à la sonde Idronaut 303 depuis qu'elle est entrée dans le parc d'instruments du BRGM – les contrôles réguliers par le fabricant et les calibrations du capteur rendent des résultats tout à fait corrects, ce qui ne remet donc pas du tout en cause les mesures en elles-mêmes. D'ailleurs, si l'on se réfère aux données présentées en section 3.3, on voit bien qu'il y a une très bonne cohérence entre les mesures de conductivité issues de la sonde Idronaut et celles issues des électrodes des boîtiers d'acquisition WTW utilisés en surface. D'autres comparaisons seront présentées dans le paragraphe 3.4.4.

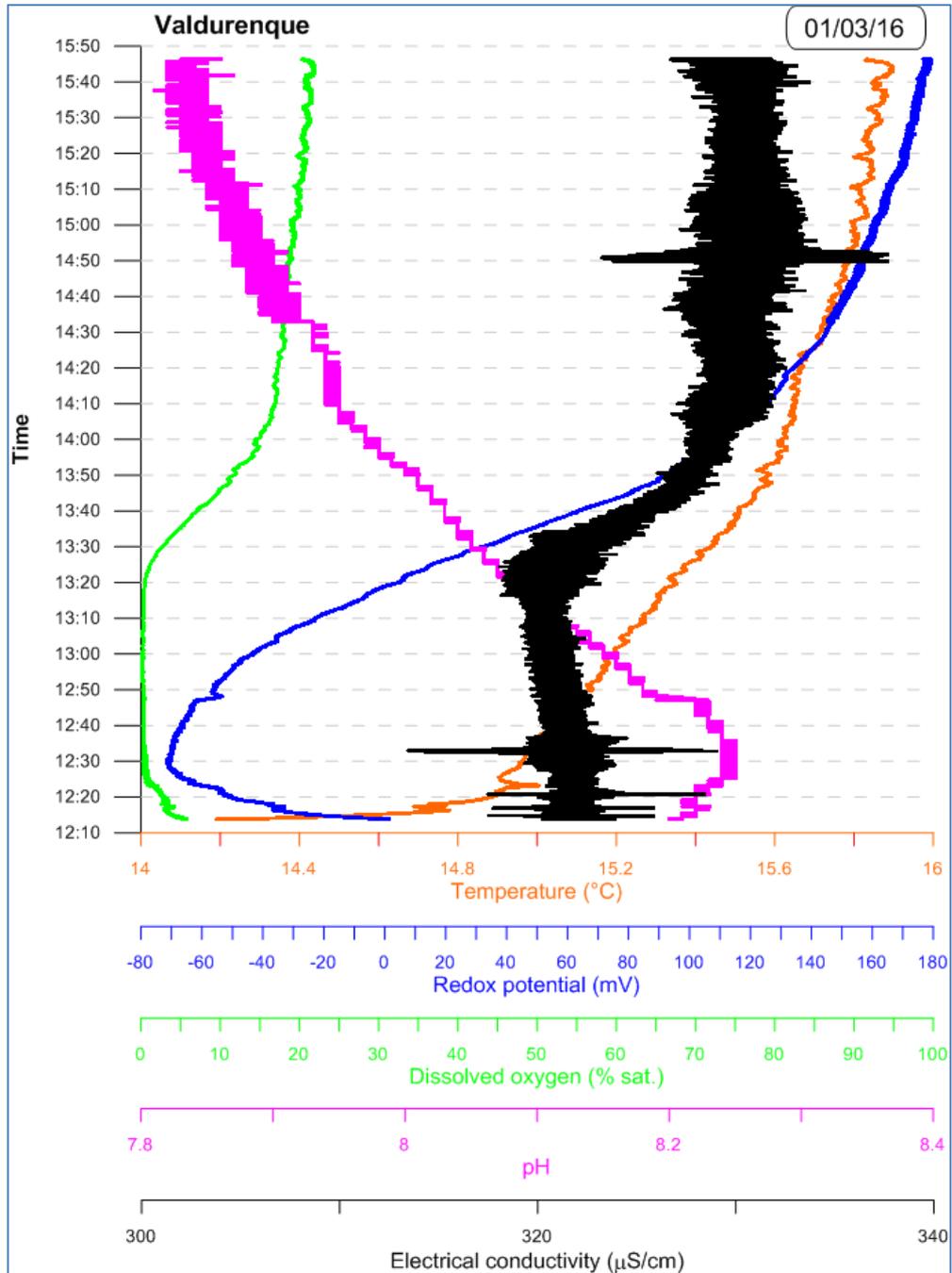


Figure 68 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 01/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque.

### 3.4.2. Pompage du 02/03/16

Ce 2<sup>ème</sup> pompage a permis de produire 5700 litres supplémentaires pour atteindre une purge d'environ 2,5 fois le volume initial d'eau présente dans l'ouvrage.

La *température* en début de pompage est, comme attendu, quasi retombée au niveau de l'équilibre thermique avec l'encaissant (Figure 69). Il faut pratiquement 1h30 pour atteindre les 15,9°C (maxima du 1<sup>er</sup> pompage), l'augmentation se faisant ensuite très lentement pour tendre de manière presque asymptotique vers 16,1°C. On n'arrive donc toujours pas à obtenir la température de 16,5°C : les niveaux producteurs doivent donc être répartis le long de la crépine, et il est vraisemblable que la zone autour de 100 m de profondeur soit plus productive que les horizons inférieurs, qui sont plus chauds (Figure 58).

Étonnamment, les concentrations en *oxygène dissous* plafonnent autour de 25% de saturation, pourtant les horizons situés à 100 m de profondeur et au-delà sont bien plus riches (Figure 60).

La *conductivité électrique* est quasiment stable, l'apparente variation ne se produisant que sur quelques  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (entre 326 et 334  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). La valeur moyenne est plus représentative de l'horizon situé à 110 m de profondeur que des horizons plus profonds.

Le *pH* tend vers une valeur de 7,8, comme la veille. Cette valeur est celle mesurée à 120 m de profondeur.

Les valeurs du *potentiel redox* sont plus élevées que la veille, même si elles admettent en début de pompage une baisse (modification du potentiel dans la partie tubée pleine qui est sollicitée en début de pompage). Le potentiel se stabilise ensuite aux alentours de +200 mV (courbe confondue avec celle de la conductivité électrique sur la Figure 69). Ces valeurs sont proches de celles mesurées dans la partie basse de la crépine.

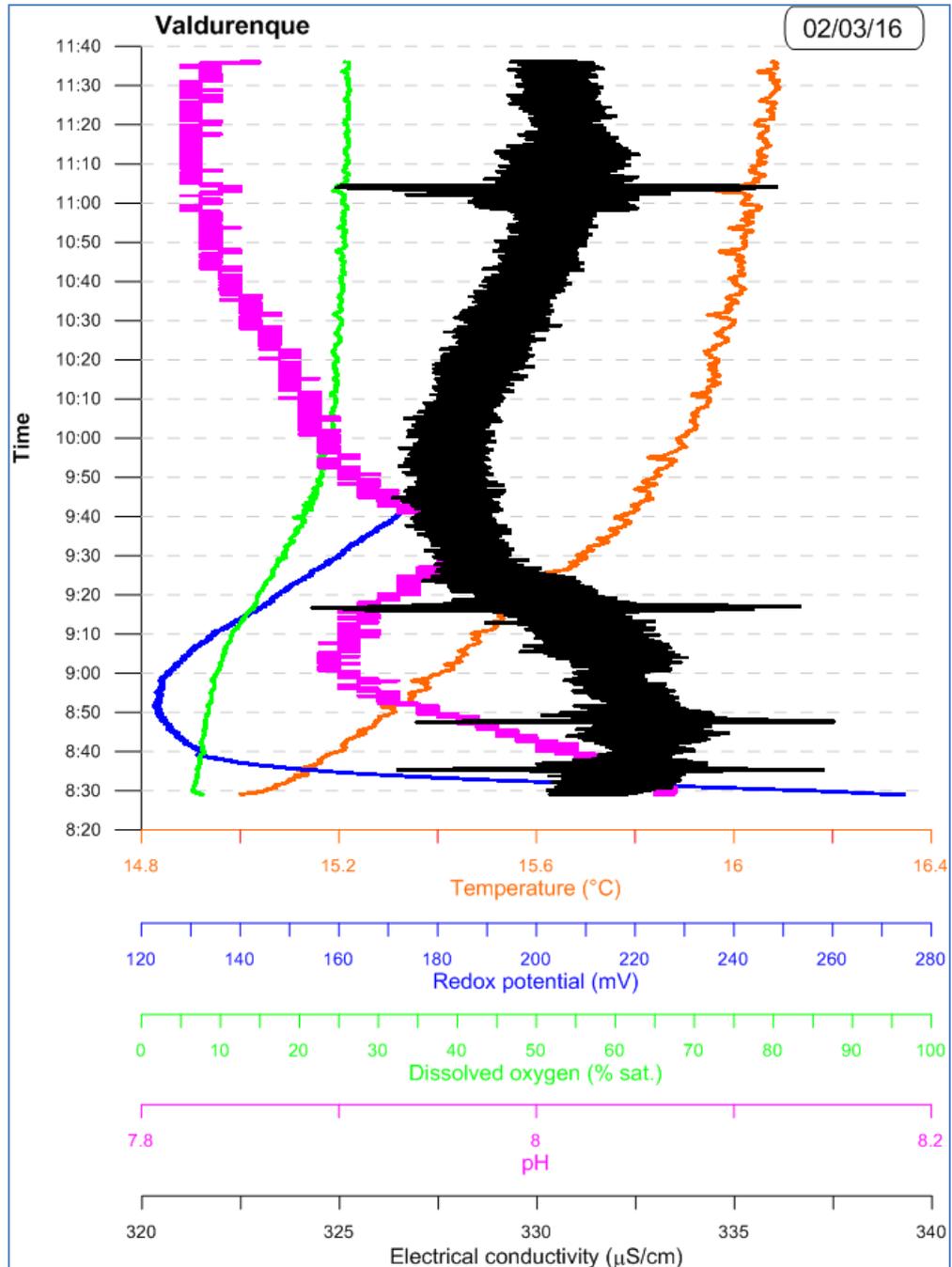


Figure 69 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 02/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque.

### 3.4.3. Pompage du 03/03/16

Cette dernière séquence de pompage a permis d'atteindre un volume total purgé représentant environ 3,5 fois le volume d'eau dans l'ouvrage. Les données sont reportées dans la Figure 70.

La variation de la *température* est similaire à celle déterminée pour le 1<sup>er</sup> pompage, car il n'est pas possible de dépasser une température de 15,9°C, au contraire de ce que le 2<sup>ème</sup> pompage avait permis. Ceci est très vraisemblablement uniquement lié à la durée de pompage, ici limitée à 2 heures. En référence à la Figure 69, on constate que, pour la même durée, on avait mesuré la même température dans l'exhaure du pompage. Il n'y a donc pas de changement de cinétique, mais uniquement une période de pompage plus courte.

Cet effet est moins sensible sur l'*oxygène dissous*, qui voyait ses valeurs se stabiliser après environ 2 heures de pompage (Figure 69). On a donc présentement (Figure 70) une atteinte d'une saturation d'environ 25% - qui rappelons-le n'est pas celle qui existe au sein de la crépine lorsque celle-ci est sollicitée par un pompage, ainsi que les diagraphies nous l'indiquent (Figure 60).

Les données de *conductivité électrique* montrent une très légère variabilité, entre 328 et 333  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), qui n'est guère significative, mais qui indique toujours que les horizons les plus profonds ne sont pas sollicités par le pompage.

Les mesures de *pH* montrent également une faible variabilité mais, en fin de pompage, la valeur moyenne est plus proche de 7,9 que de 7,8, ce qui est plus conforme à ce que l'on mesure à partir de 110 m de profondeur en diagraphie à l'issue des pompages (Figure 62).

Pour finir, le *potentiel redox* évolue toujours avec des valeurs moins oxydantes en début de pompage (sollicitation de l'eau présente dans le tube plein), devenant plus oxydantes ensuite (eau provenant de la crépine).

La purge de l'ouvrage de Valdurenque semble donc se faire selon un schéma plus complexe que celle de Labruguière, avec une sollicitation de certains niveaux de la crépine (sans doute les niveaux de la moitié supérieure) qui se constate sans que la partie tubée pleine ait été totalement purgée, ce qui pourrait conduire à des mélanges d'eau<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup> L'existence de ces mélanges pourrait donc produire une eau ayant des caractéristiques intermédiaires entre celle du tubage plein et celle de certaines parties de la crépine, ce qui peut conduire à interpréter de manière erronée le positionnement réel des venues d'eau productives – puisque l'on attribue la valeur d'un paramètre mesuré à l'exhaure du pompage à la valeur de ce paramètre connu par diagraphie verticale.

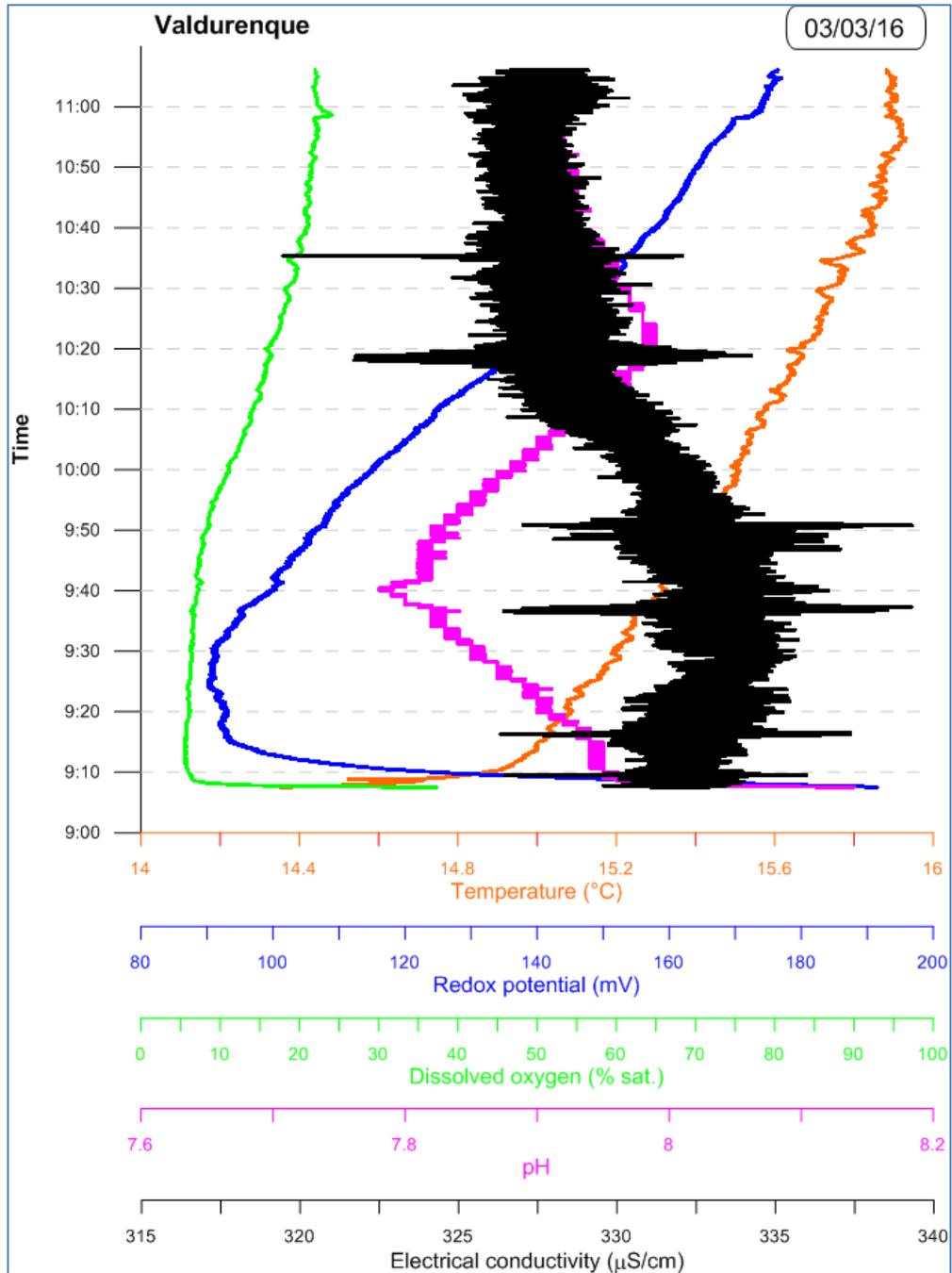


Figure 70 : paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage – 03/03/16. Pour la conductivité électrique, l'étalement apparent important est à considérer en regard de l'échelle, très resserrée – piézomètre de Valdurenque.

### 3.4.4. Comparaison des mesures en pompage acquises par la sonde Idronaut et via les boîtiers WTW

Une question sur la représentativité des mesures avec la sonde ou avec les boîtiers à électrodes séparées pouvait se poser à la lecture de la section 3.3. Des éléments de réponse quant à la bonne comparabilité de ces 2 systèmes d'acquisition sont fournis dans la figure suivante (Figure 71), qui illustre des mesures ponctuelles dans l'eau d'exhaure à l'aide de boîtiers et leur équivalent mesuré grâce à la sonde Idronaut, ainsi que la Figure 65 l'illustre.

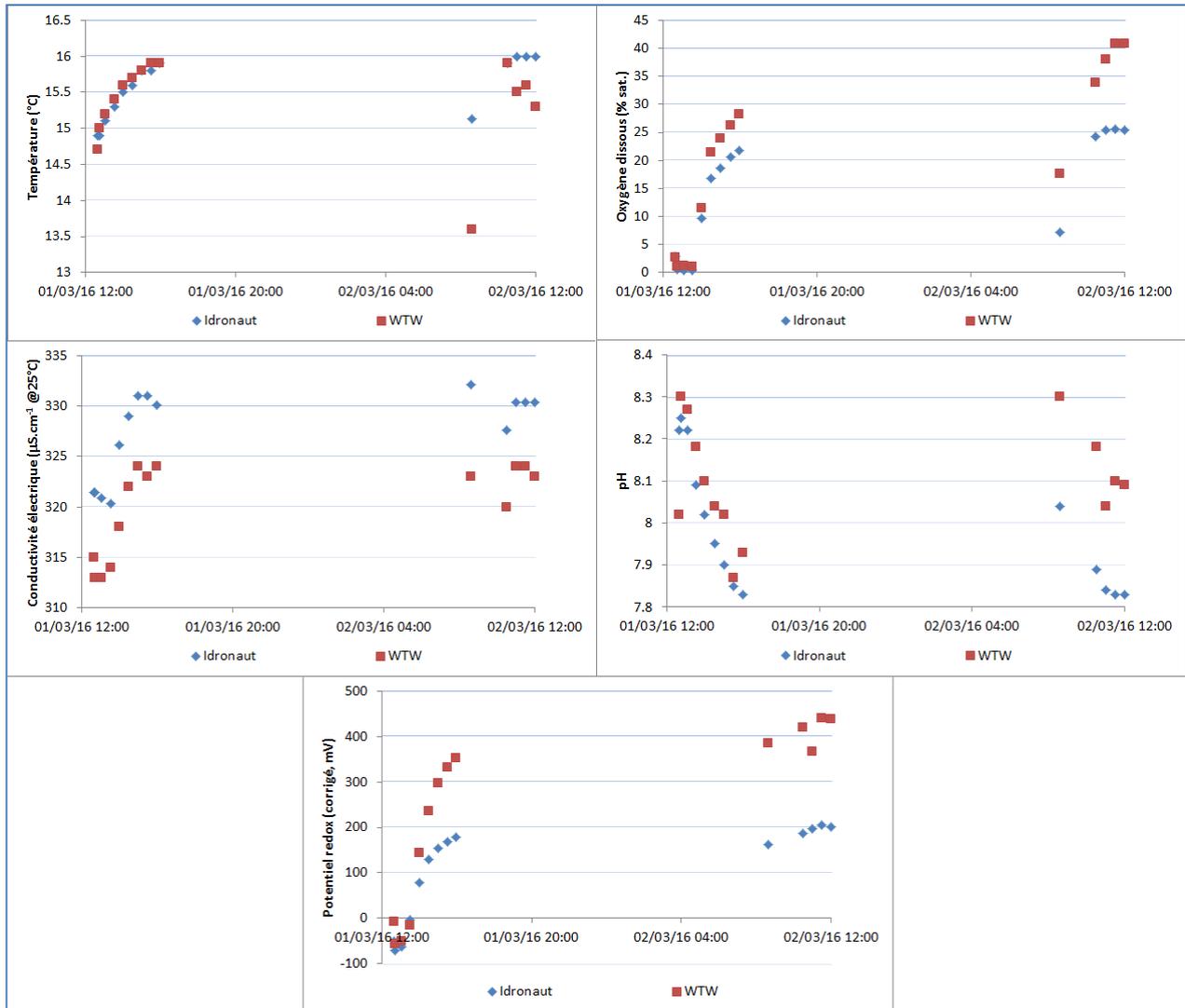


Figure 71 : comparaison des paramètres physico-chimiques mesurés à l'exhaure du pompage par la sonde Idronaut et par les boîtiers WTW – piézomètre de Valdurenque.

Les 5 paramètres physico-chimiques usuels ont donc été mesurés. Les comparaisons entre les 2 systèmes d'acquisition permettent de déterminer les points suivants :

- **Température** : les mesures effectuées le 01/03 sont tout à fait concordantes entre les 2 systèmes, ce qui est heureusement attendu. Par contre, les mesures du 02/03

présentent un décalage de plusieurs dixièmes de degrés, voire plus encore. Comme il n'y a aucune raison qu'un tel décalage se produise avec ce type d'électrode, il faut en conclure que c'est le protocole opératoire de mesure qui a changé (sonde Idronaut dans le bac d'exhaure, électrodes du boîtier WTW dans un prélèvement effectué dans ce bac).

- *Oxygène dissous* : de manière identique, les résultats diffèrent fortement entre le 01/03 et le 02/03. La même explication peut être avancée pour expliquer ce décalage. Un autre paramètre à prendre en compte est la différence de conception des électrodes : celle de la sonde Idronaut est de type électrochimique (temps de réponse plus long lié à la migration de l'oxygène dissous à travers une membrane dans l'électrolyte de mesure avant mesure de la différence de potentiel produite), alors que celle du boîtier WTW est optique (variation de la luminescence en fonction de la quantité d'oxygène dissous présent, qui se mesure plus rapidement). La diffusion à travers la membrane peut être freinée en présence d'une eau chargée<sup>27</sup>, ce qui pourrait expliquer que l'on a du mal à dépasser les 25% de saturation avec la sonde Idronaut, alors que l'on peut atteindre 40% avec le boîtier WTW. Autre conséquence, les interprétations des paragraphes précédents sont à nuancer, puisque 40% d'oxygène dissous est une valeur qui peut se mesurer vers 100 m de profondeur lorsque le forage est au repos. Toutefois, il n'est pas possible de mesurer en surface les valeurs bien supérieures détectées dans le fond de l'ouvrage lors des pompages, il y a donc bien une modification qui se produit lors de la remontée du fluide durant le pompage. Remarquons également que cela est cohérent avec la remarque faite avec les mesures issues des prélèvements de fond (sous-évaluation de la concentration en oxygène dissous ; cf. paragraphe 3.3.1) ; ce n'est donc pas le système de prélèvement de fond qui est responsable de ce biais, mais un autre phénomène se produisant lors de la remontée du fluide en surface.
- *Conductivité électrique* : il existe un léger décalage (environ  $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , soit un écart relatif de 1,5%), qui correspond à la variabilité du paramètre lors des suivis du pompage. Ce décalage étant constant, cela doit certainement provenir d'une calibration très légèrement différente entre les 2 sondes, mais qui n'est absolument pas rédhibitoire<sup>28</sup>.
- *pH* : les mesures du 01/03 sont également concordantes, avec un décalage d'environ 0,1 unité pH (c'est l'incertitude de la mesure toutes erreurs cumulées). Il peut en partie s'expliquer par une procédure de calibration imposée par le fabricant de la sonde Idronaut qui est moins précise (calibration en 1 point à pH 7) que la méthode utilisée pour calibrer les sondes pH WTW (calibration de type NIST sur au moins 2 pH à 4,01 et 6,87 et éventuellement prise en compte d'un 3<sup>ème</sup> tampon 9,18). Le décalage plus grand le 2<sup>ème</sup> jour peut provenir de la mesure faite sur un prélèvement et non dans le bac d'exhaure (cf. remarque faite pour la température). Cela est également cohérent avec la remarque faite sur la mesure des pH sur prélèvement de fond (cf. paragraphe 3.3.1).
- *Potentiel redox* : hormis pour les valeurs basses, il existe un décalage important (100 à 200 mV) entre mesure par sonde Idronaut et mesure par électrode sur boîtier WTW. Une nouvelle fois, cet écart avait déjà été mis en évidence lors des prélèvements de fond, ce qui est bien de nature à prouver que ces différences ne sont pas liées au mode de prélèvement (fond ou pompage) mais soit à une modification de la chimie de l'eau lors de sa remontée, soit à une mesure avec des électrodes présentant un décalage systématique entre elles. L'existence de ce décalage est toutefois compatible avec le décalage existant pour l'oxygène dissous, le potentiel redox étant pro-parte fonction de

<sup>27</sup> La sonde est plongée dans un bac, donc il n'y a pas le même renouvellement régulier d'eau à la surface de la membrane de l'électrode que celui qui peut exister lorsque l'on descend la sonde dans un forage.

<sup>28</sup> On peut avoir le même type de décalage avec 2 sondes identiques d'un même fabricant branchées sur des boîtiers similaires. Un tel décalage trouvé lors d'un essai inter-laboratoire ne serait absolument pas un facteur de rejet de l'une ou l'autre des mesures.

la concentration en oxygène dissous. Plus ce dernier paramètre va être élevé, plus on aura tendance à mesurer un potentiel redox fort. Les électrodes WTW donnant une valeur plus forte pour l'oxygène dissous que la sonde Idronaut, il n'est pas anormal que l'on mesure également un potentiel redox plus grand avec les électrodes redox WTW.

### 3.5. ANALYSES CHIMIQUES

Comme pour l'ouvrage de Labruguière, les analyses chimiques pratiquées concernent la détermination des concentrations en éléments majeurs (cations/anions) et en éléments traces métalliques. Il n'a pas été visuellement constaté sur les échantillons de Valdurenque le phénomène de présence résiduelle de fines après filtration dans les échantillons prélevés en pompage.

Les résultats pour les éléments majeurs sont reportés dans la Figure 72. Les balances ioniques associées sont comprises entre -3% et 0%. Le faciès de l'eau est bicarbonaté Ca±Mg. En première approche, la variation de concentration en éléments majeurs dissous est faible d'un prélèvement à l'autre et d'un mode de prélèvement à l'autre. Une légère variabilité existe pour Ca, Cl et SO<sub>4</sub>, mais d'ampleur bien inférieure à celle mise en évidence à Labruguière.

Les déterminations des concentrations en bicarbonates réalisées sur site renvoient un écart systématique avec les déterminations faites au laboratoire, la concentration mesurée sur le terrain étant inférieure (83 à 90% de la valeur mesurée au laboratoire ; Figure 73). L'effet d'utilisation d'une électrode vieillissante n'est ici plus à évoquer, le matériel utilisé étant plus récent. Les balances ioniques reflètent cette légère sous-estimation de la concentration en HCO<sub>3</sub> (balances entre +4% et +8%). La raison peut être l'utilisation d'un lot d'acide un peu ancien ou un biais dans la quantification du volume de la prise d'essai (usuellement un volume de 20 ml d'eau filtré est prélevé à la pipette de 5 ml pour procéder à la titration). Toutefois, ce biais étant systématique, et l'erreur sur la balance encore tolérable, cette sous-évaluation n'est pas de nature à remettre en question les conclusions quant aux éventuelles évolutions du chimisme des eaux prélevées.

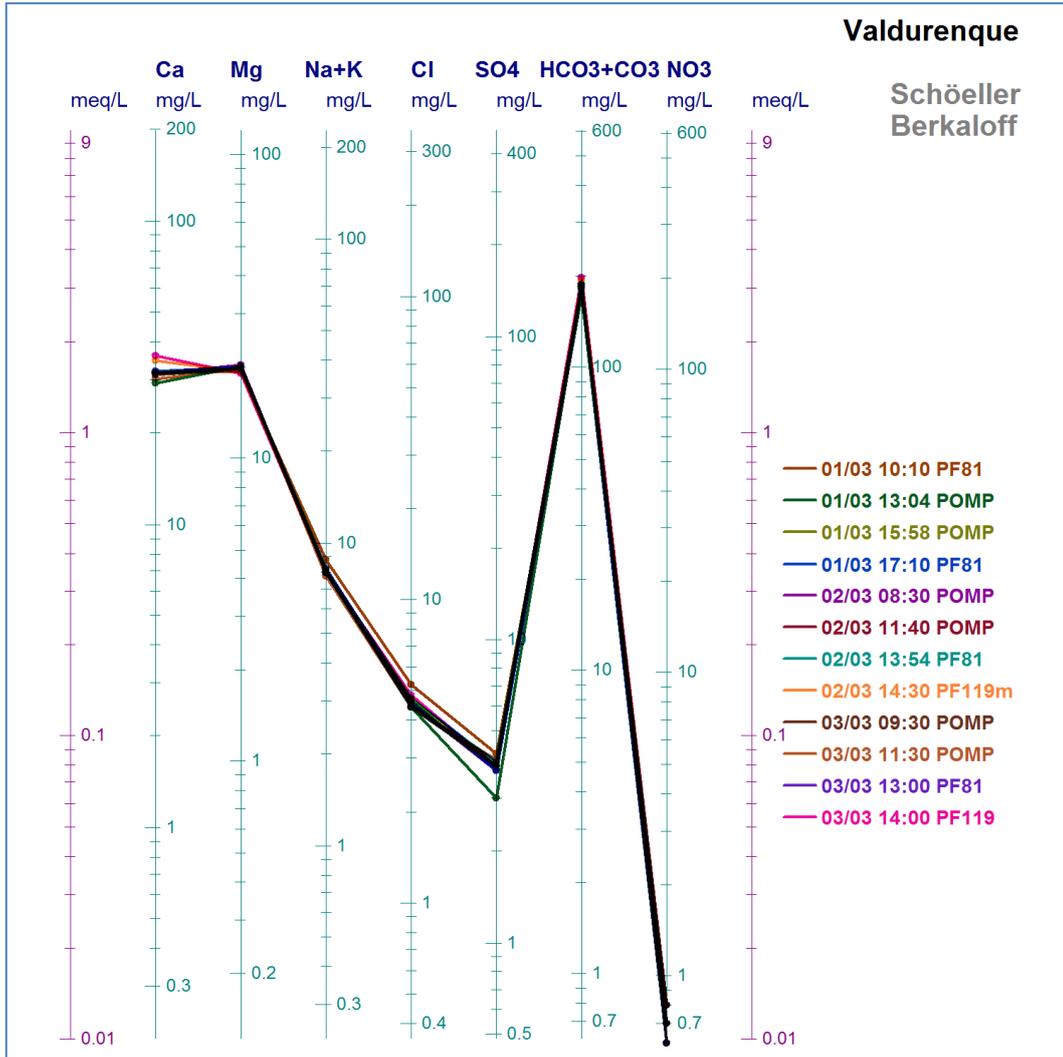


Figure 72 : diagramme de Schoeller, éléments majeurs, prélèvements de Valdurenque (PF : prélèvement de fond ; POMP : prélèvement en pompage).

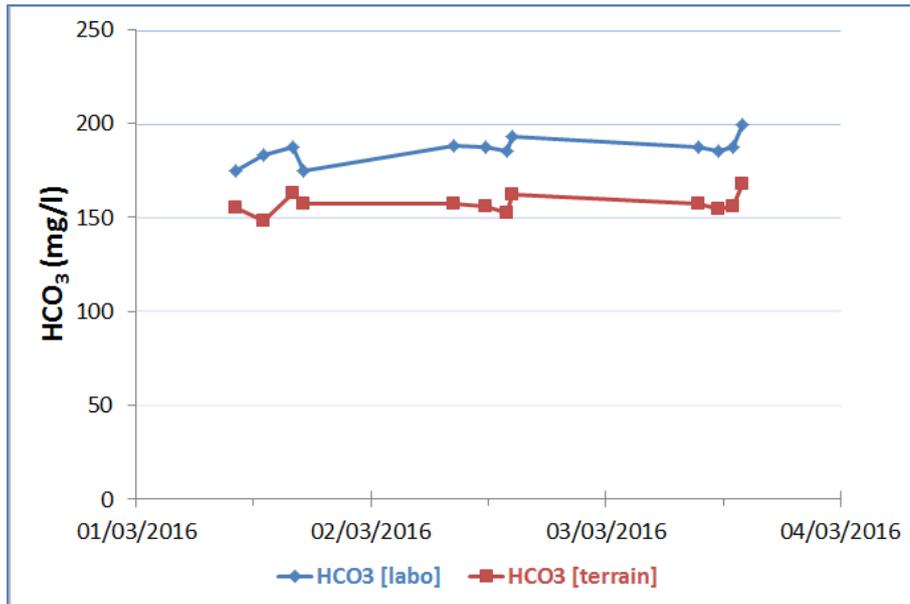


Figure 73 : écart de concentration en  $\text{HCO}_3$  entre les déterminations sur site (par titration à la burette au  $\text{HCl}$  0,1 mol/l) et au laboratoire – piézomètre de Valdurenque.

Une vision plus détaillée des évolutions temporelles des concentrations en éléments dissous dans les échantillons prélevés est donnée en Figure 74 pour les éléments majeurs et en Figure 75 pour les éléments traces. Les chroniques paraissent très bruitées pour certains éléments, mais il faut mettre en regard les amplitudes parfois très réduites entre les valeurs minimales et maximales portées sur les axes des ordonnées. A titre illustratif, les Figure 76 et Figure 77 reprennent, pour les axes des ordonnées, des plages de variation d'amplitude similaire à celles utilisées pour l'ouvrage de Labruguière, ce qui permet de relativiser ces variations erratiques. Enfin, les concentrations pour les nitrates par exemple sont très proches du seuil de quantification instrumental (0,5 mg/l).

Pour les éléments majeurs, les variations observées entre les prélèvements de fond et les prélèvements en pompage sont moins systématiques que celles observées à Labruguière. D'une part, cela est lié à des pompages bien plus importants (en termes de volumes purgés) puisque le 1<sup>er</sup> pompage permet déjà de purger un volume d'eau supérieur à celui initialement présent dans l'ouvrage. D'autre part, le piézomètre de Valdurenque présente plusieurs venues d'eau au sein de la crépine (Figure 59) alors que le piézomètre de Labruguière présente essentiellement une alimentation par le fond. En conséquence, il ne faut pas chercher à comparer directement les prélèvements de fond faits à 119 m de profondeur (au sein d'un horizon producteur entre 114 et 123 m de profondeur) et ceux faits à 81 m de profondeur (partie haute de la crépine, soumise à l'alimentation des 3 niveaux producteurs sous-jacents en fonction de la productivité propre de chaque niveau).

Ainsi, certaines espèces, notamment le couple dominant  $\text{Ca-HCO}_3$ , affichent rapidement des concentrations identiques entre pompage et prélèvement à 81 m de fond, alors que l'horizon plus profond est plus enrichi. D'autres éléments présents en concentrations inférieures ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{NO}_3$ ) ont une très faible variabilité de concentration quel que soit le niveau, le mode de prélèvement ou la période de prélèvement considérés. Une purge rapide par pompage permet donc d'avoir rapidement des prélèvements représentatifs.

D'autres espèces, comme Na, SO<sub>4</sub> et SiO<sub>2</sub>, atteignent des concentrations voisines après un laps de temps un peu plus long, selon le mode de prélèvement considéré. Toutefois, un pompage permet là aussi d'atteindre rapidement des valeurs voisines de celles issues des prélèvements de fond.

Pour ce qui concerne les éléments traces (Figure 75 et Figure 77), il existe également peu de différence entre les prélèvements en pompage et les prélèvements de fond (sauf pour Al). Le cas du manganèse peut être regardé plus en détail, car il permet de mettre en évidence un relargage de Mn par le tubage : au début des opérations de pompage, la concentration est systématiquement plus élevée qu'en fin de cycle de pompage. Cette contamination paraît également affecter le prélèvement de fond à 81 m, qui, rappelons-le, ne se fait pas au droit d'un horizon producteur.

La variabilité chimique étant beaucoup plus faible que celle mise en évidence à Labruguière, l'impact sur les indices de saturation est également très faible, comme montré avec quelques exemples en Figure 78.

L'ouvrage de Valdurenque étant plus producteur que celui de Labruguière, les prélèvements en pompage, lorsque le forage a été suffisamment purgé, et les prélèvements de fond, permettent donc d'obtenir des évaluations du chimisme de l'eau qui sont très comparables. Le chimisme des différents niveaux producteurs étant par ailleurs assez homogène, la réalisation de prélèvements de fond au droit des niveaux producteurs identifiés par diagraphie n'apporte pas d'information très spécifique.

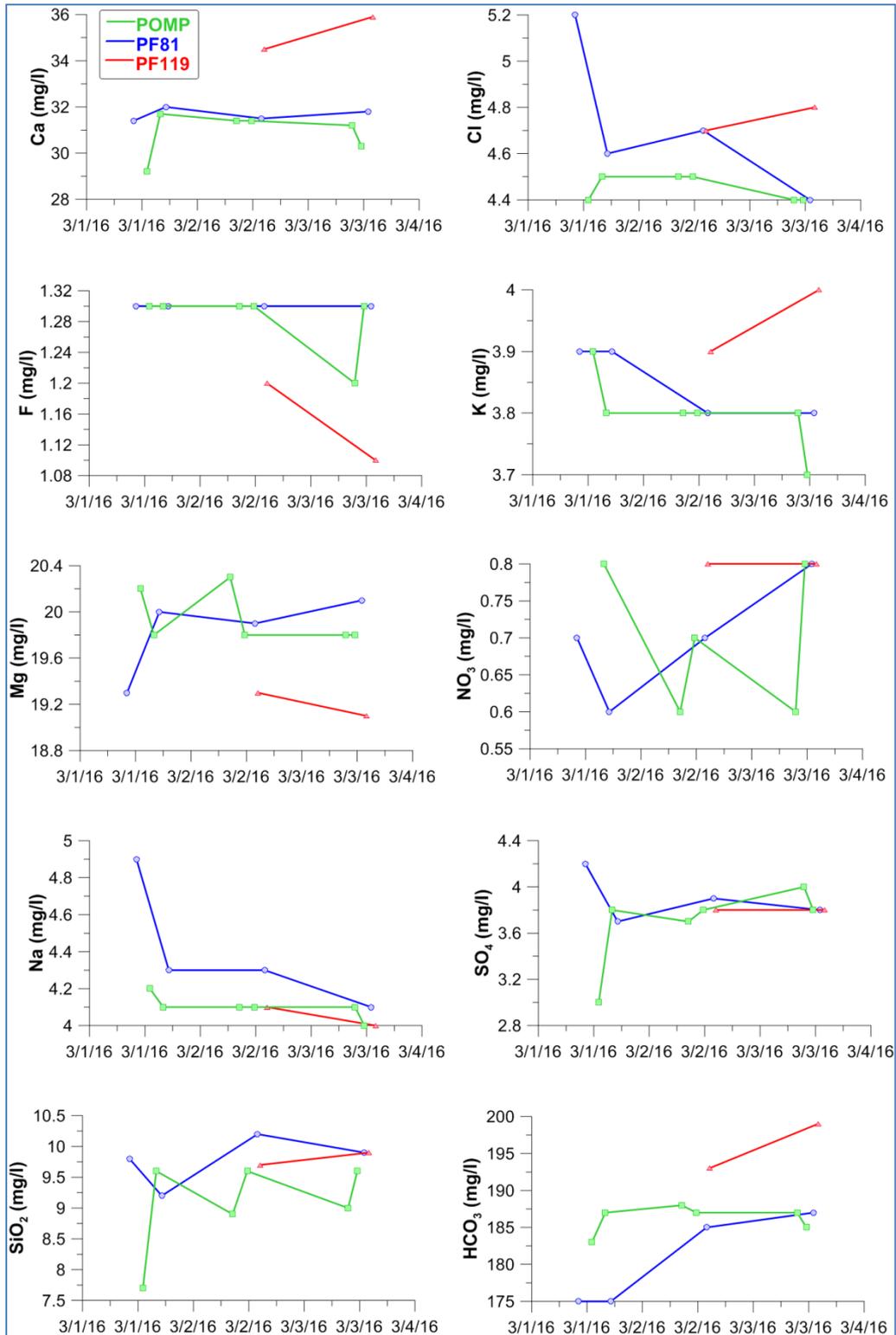


Figure 74 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque.

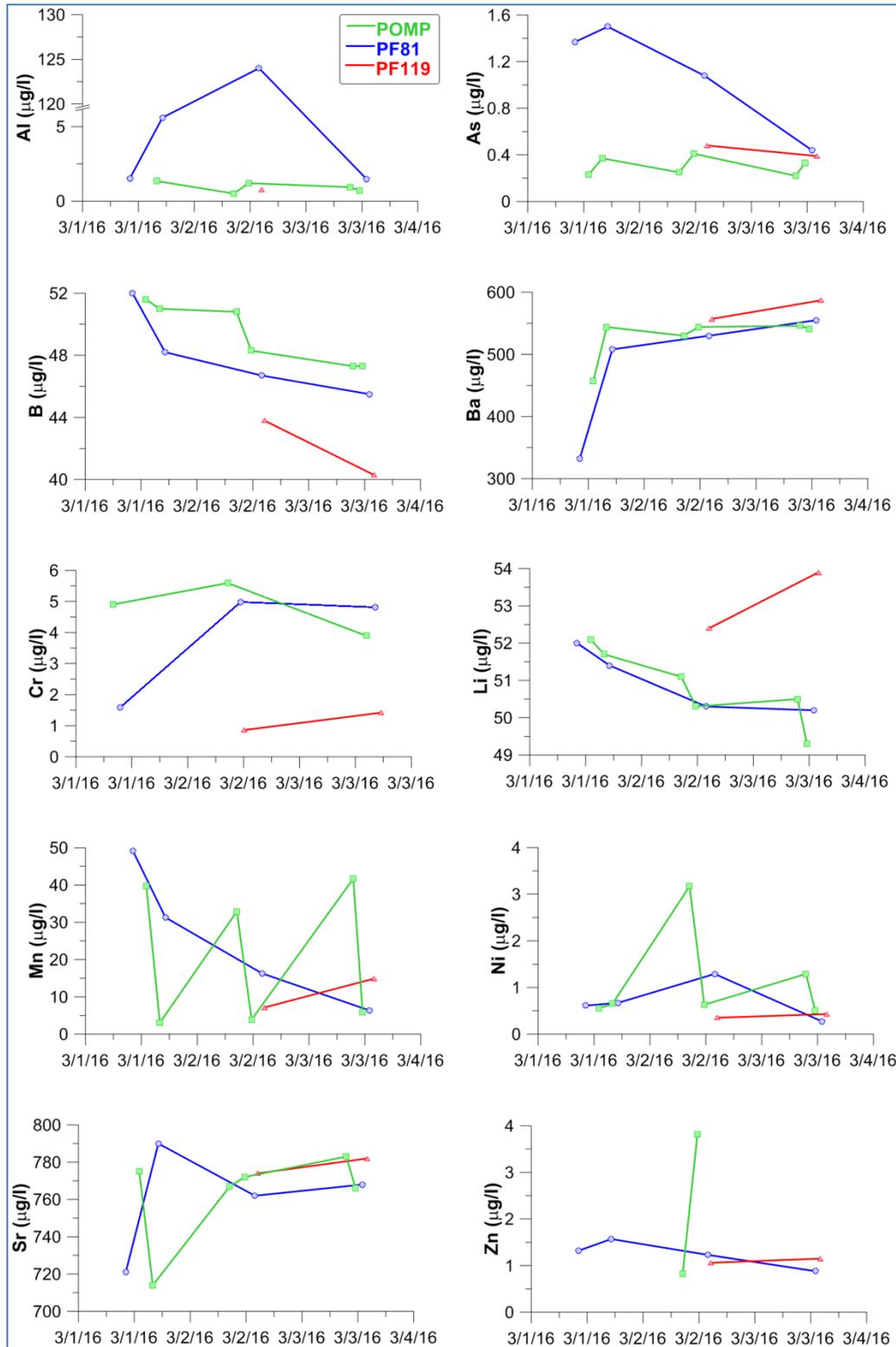


Figure 75 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces ( $\mu\text{g/l}$ ) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque.

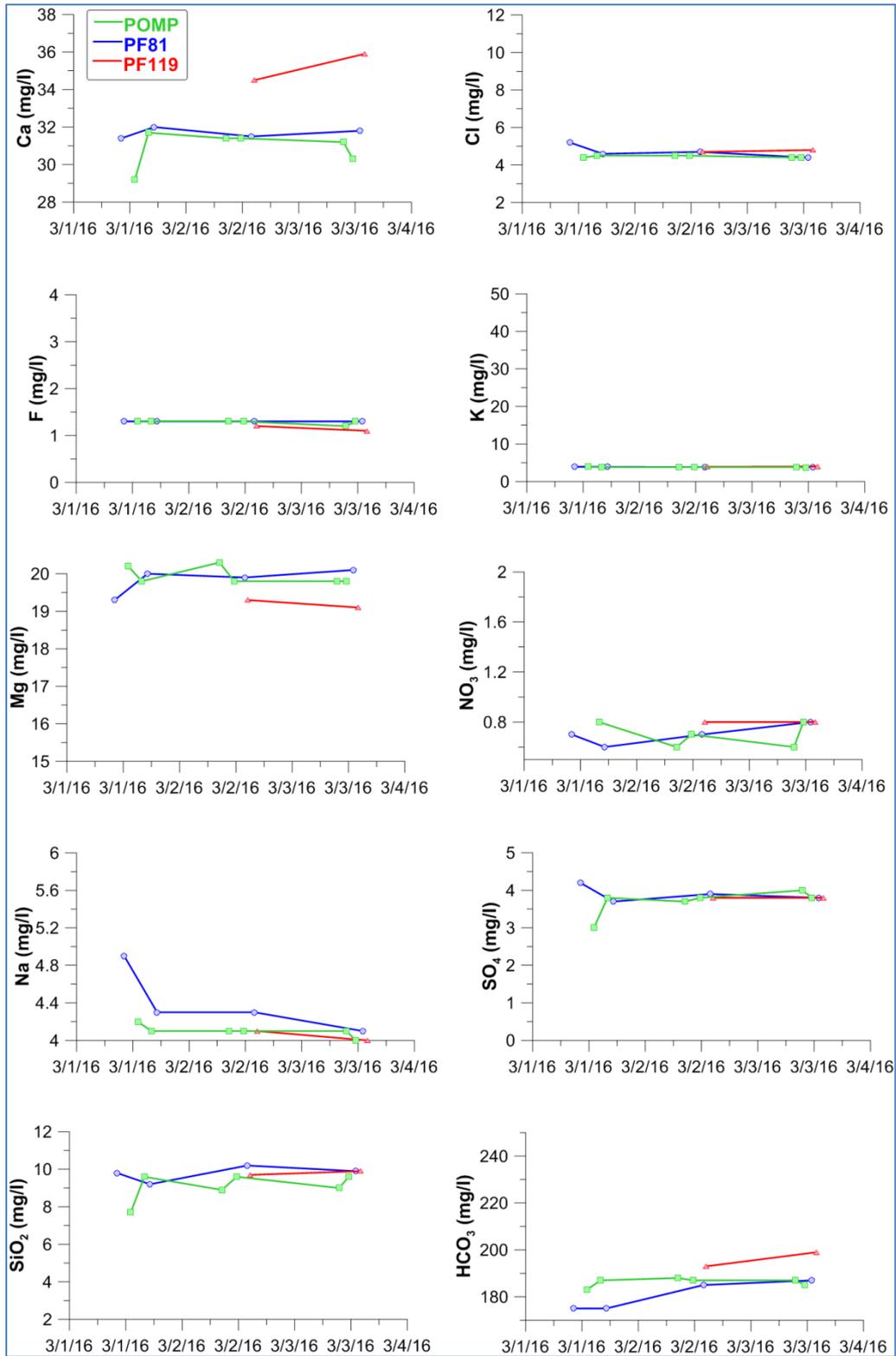


Figure 76 : évolution temporelle des concentrations en éléments majeurs (mg/l) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque – échelles des ordonnées adaptées des échelles utilisées pour les données de Labruguière.

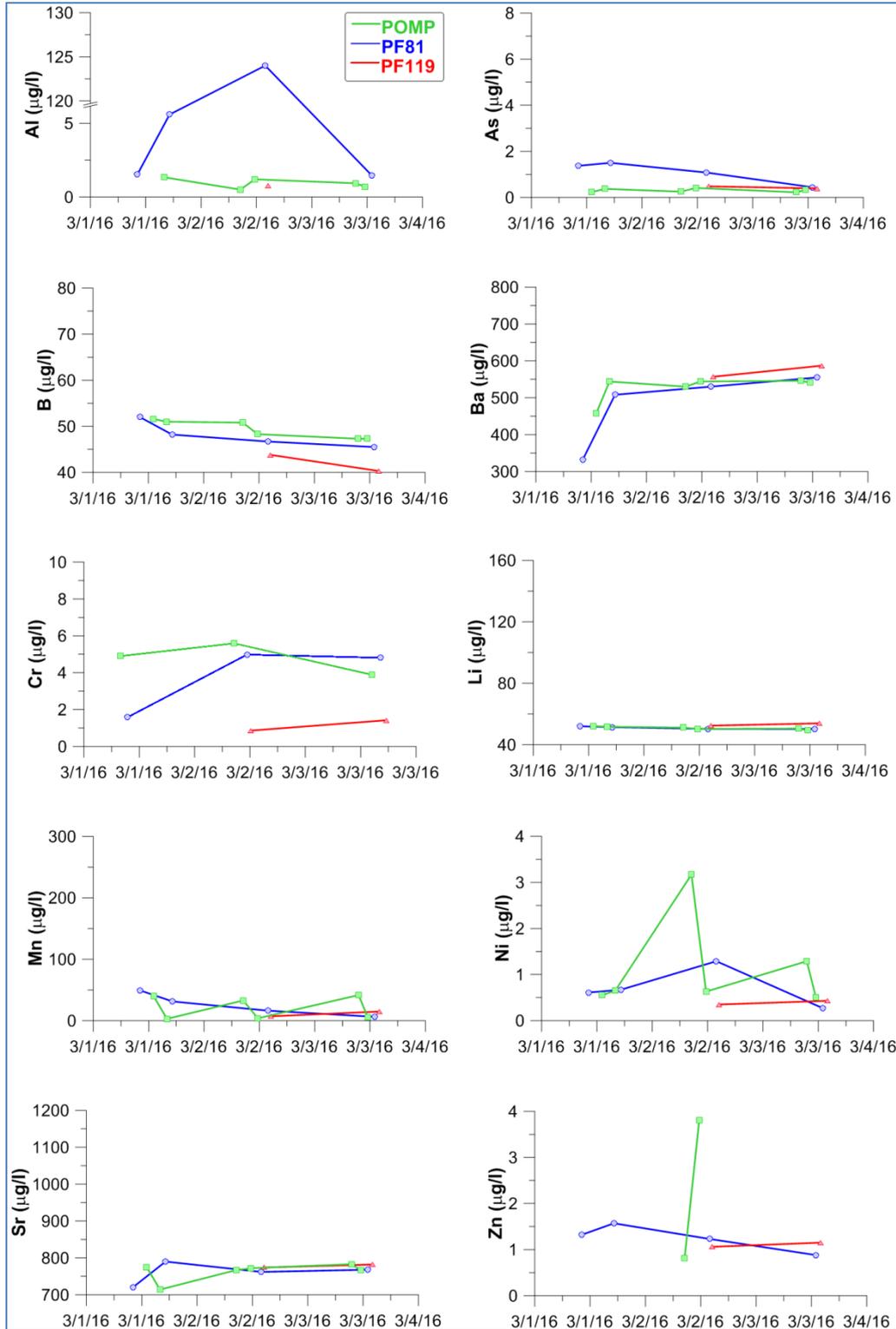


Figure 77 : évolution temporelle des concentrations en éléments traces ( $\mu\text{g/l}$ ) en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 81 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 119 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Valdurenque – échelles des ordonnées adaptées des échelles utilisées pour les données de Labrugière.

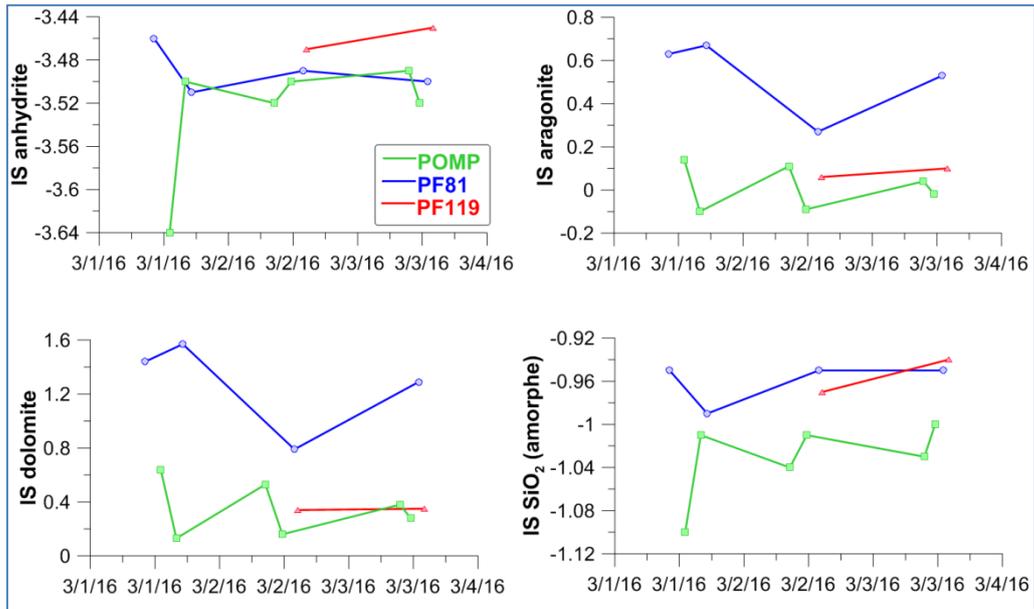


Figure 78 : évolution temporelle des indices de saturation pour quelques espèces minérales en fonction du mode de prélèvement : en vert, par pompage (pompe à 45 m de profondeur) ; en bleu, par prélèvement de fond à 130 m de profondeur (sommet de la crépine) ; en rouge, par prélèvement de fond à 163 m de profondeur (partie basse de la crépine) – piézomètre de Labruguière.

## 4. Conclusions

Les deux ouvrages de Labruguière (10122X0055/F) et Valdurenque (09866X0074/F), implantés dans des horizons sableux et argileux sous recouvrement calcaire et marno-calcaire, ont fait l'objet d'investigations destinées à comparer les données obtenues avec la méthode classique de prélèvement par pompage et avec la méthode de prélèvement de fond. Ces deux ouvrages captent des niveaux assez peu productifs et sont maintenant essentiellement utilisés à des fins de surveillance piézométrique.

**Des investigations** ont été menées en parallèle par 2 équipes du BRGM entre le 29/02 et le 03/03/2016. Elles sont présentées séparément pour chaque ouvrage, mais l'approche retenue est commune. Elle consiste en la pratique régulière de diagraphies physico-chimiques (température, conductivité électrique, teneur en oxygène dissous, pH et potentiel redox), puis de prélèvements de fond (profondeur déterminée en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques selon la verticale) et enfin de séquences de pompage (faisant elles aussi l'objet de prélèvements). Trois cycles diagraphie – prélèvement de fond – pompage ont été réalisés sur chaque ouvrage, les débits de pompage étant ajustés en fonction de la productivité de l'aquifère et les positionnements des prélèvements de fond choisis en fonction des résultats des diagraphies (sommet de la crépine + horizon producteur).

**Le forage de Labruguière** est tubé en acier de 0 à 128 m de profondeur, la crépine inox s'étend depuis 128 m jusqu'à 170 m de profondeur. A l'ouverture du piézomètre, le niveau statique à l'équilibre est proche de -26 m par rapport au sommet du tubage.

**Les diagraphies physico-chimiques** ont pu être réalisées sur toute la hauteur de l'ouvrage. Au repos, la diagraphie initiale montre une augmentation linéaire de la température selon un gradient moyen de 29,7°C par km. L'eau est dépourvue d'oxygène. La conductivité électrique est élevée dans le tube plein ( $> 500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) puis diminue au passage dans la crépine jusqu'à  $410 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à partir de 150 m de profondeur. Le pH dans le tube plein est également plus élevé (8,3 à 8,5) que dans la partie crépinée (7,4 à 7,5). Le potentiel redox suggère l'existence d'un milieu plus réducteur dans le tube plein qu'au droit de la crépine. Cette 1<sup>ère</sup> caractérisation suggère que l'alimentation en eau se fait surtout à la base de l'ouvrage et qu'une grande part de la variabilité mesurée au-dessus de l'horizon 150-165 m est une conséquence d'interactions avec le tubage, ces interactions étant maximales dans le tube plein, en acier. Les diagraphies suivantes ont été réalisées soit immédiatement après des phases de pompage (pompe à 45 m de profondeur), soit après une nuit, délai nécessaire pour que le niveau statique remonte suffisamment.

**Les phases de pompage** induisent des changements notables dans la colonne d'eau. Outre un fort rabattement, ces phases engendrent un renouvellement de l'eau qui n'est que partiel, seule l'eau présente dans la crépine étant correctement renouvelée et représentative des paramètres physico-chimiques de l'horizon producteur (localisé en base d'ouvrage). L'eau présente dans le tube plein est très mal renouvelée au-dessus de la pompe, et n'est que partiellement homogénéisée en-dessous de la pompe (le degré de renouvellement augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la crépine). Toutefois, plus le degré de purge augmente, plus l'homogénéisation de la colonne d'eau est correcte. A noter que dans le cas de cet ouvrage à faible productivité, où le pompage ne peut que difficilement être réalisé selon les

critères classiques (à rabattement constant et en purgeant entre 1 et 3 fois le volume de la colonne d'eau), il n'est pas possible d'obtenir, pour certains paramètres (par ex. pH) une valeur identique à celle mesurée en fond de trou au niveau de l'exhaure du pompage. Les suivis en surface des paramètres physico-chimiques laissent toutefois à penser que les phases de pompage sont suffisantes pour correctement purger l'ouvrage, puisque les variations constatées en fin de pompage sur les paramètres température, conductivité électrique et pH sont très faibles, et inférieures aux critères de stabilité auxquels l'on se réfère communément (sur une durée de 10 minutes, variations inférieures à 0,2°C pour la température, à 0,05 unité pour le pH et à 5% pour la conductivité électrique). Seules les diagraphies physico-chimiques permettent de déterminer que le pH au niveau de l'horizon producteur est différent.

**Les prélèvements de fond** ont été réalisés à 130 m de profondeur (partie haute de la crépine) et à 163 m de profondeur (afin d'éviter de prélever dans le bouchon vaseux initialement présent à partir de 165 m de profondeur – les pompages ont permis de le résorber). Les prélèvements de fond présentent deux inconvénients qu'il est nécessaire de mentionner. D'une part il est difficile de remonter en surface une eau qui conserve l'exacte température du milieu de prélèvement : effet de refroidissement des tuyaux exposés à l'atmosphère et nécessité pour le tuyau de s'équilibrer thermiquement avec la colonne d'eau. Cet inconvénient se réduit au fur et à mesure de la répétition des cycles de prélèvements. D'autre part, les mesures en oxygène dissous n'ont pas été réalisées dans une enceinte protégée du contact avec l'atmosphère, en conséquence les mesures sont artificiellement enrichies en oxygène. Les mesures de conductivité électrique sont très comparables entre mesures en diagraphie et mesure à l'exhaure du système de prélèvement de fond : l'écart maximum est de 2,5%. Les déterminations des valeurs de pH souffrent d'un écart légèrement plus grand (proche de 0,2 unité pH). Une partie de l'écart peut être attribuable à l'utilisation d'une électrode pH vieillissante pour les mesures en surface. Enfin, les mesures de potentiel redox faites à partir de l'eau prélevée par le préleveur de fond sont en bon accord avec les mesures opérées en diagraphie et présentent les mêmes évolutions temporelles.

**Des analyses chimiques** visant à déterminer les concentrations en éléments majeurs (cations/anions) et en éléments traces métalliques ont été réalisées tant sur les eaux prélevées durant les phases de pompage (début et fin de pompage) que sur les prélèvements de fond. Toutes les analyses renvoient des balances ioniques très correctes (+2% à +3%). Les concentrations en éléments majeurs mesurées à 163 m de profondeur via un prélèvement de fond sont relativement stables. Les concentrations mesurées en sommet de crépine (130 m), dans une zone peu productive, diffèrent au départ et ont tendance à se rapprocher de celles de 163 m au fur et à mesure que des pompages sont pratiqués. De manière globale, il semble donc que, dans le cas d'un forage où l'horizon producteur est défini de manière assez précise, un prélèvement de fond permette d'obtenir sans cycle de purge préalable une eau dont le chimisme est assez comparable avec celui que l'on peut retrouver après plusieurs heures de purge par pompage. Les concentrations en éléments traces suivent également cette évolution temporelle, sauf pour les éléments marqueurs d'interactions avec les tubages métalliques (Fe, Mn), que l'on retrouve en concentrations plus élevées à 130 m de profondeur ou en sortie de pompage, alors qu'ils sont moins abondants au niveau de l'horizon producteur.

**Le forage de Valdurenque** est tubé en acier de 0 à 74 m de profondeur, une crépine inox étant positionnée de 75 à 123 m de profondeur. A l'ouverture du piézomètre, le niveau statique à l'équilibre est proche de -10 m par rapport au sommet du tubage.

**Les diagraphies physico-chimiques** n'ont pu être réalisées sur toute la hauteur de l'ouvrage qu'à partir du 2<sup>ème</sup> jour, les premières investigations sur l'ouvrage n'ayant pas permis de pénétrer dans un bouchon vaseux vers 85 m de profondeur. Au repos, la diagraphie initiale montre une augmentation de la température en fonction de la profondeur moins régulière qu'à Labruguière avec une température quasi-uniforme entre 10 et 30 m de profondeur. Ensuite, le gradient d'augmentation est de seulement 24,4°C par km. L'eau est dépourvue d'oxygène dans le tube plein, par contre le passage dans la crépine se marque par une hausse de la teneur en oxygène (20% de saturation à 85 m), ce qui contraste une nouvelle fois avec les données acquises sur le forage de Labruguière. La conductivité électrique est constante tout au long de la colonne d'eau, sans variation au passage dans la crépine. Le pH dans le tube plein est plus élevé (8,3 à 8,4) qu'au sommet de la partie crépinée (8,1). Le potentiel redox suggère l'existence d'un milieu légèrement oxydant dans la crépine. La diagraphie suivante a permis d'explorer l'ouvrage jusqu'à 123 m de profondeur, permettant de confirmer le profil de température, la présence d'oxygène dissous dans la crépine, de mettre en évidence des paliers de conductivité électrique dans la crépine, une baisse limitée du pH, et de confirmer le caractère légèrement oxydant du redox en profondeur.

**Les phases de pompage** induisent des changements notables dans la colonne d'eau. Immédiatement après un pompage, la présence en partie inférieure de la crépine de plusieurs paliers de température est constatée. Cela correspond vraisemblablement à la sollicitation durant le pompage d'horizons assez peu épais ayant des propriétés thermiques qui restituent par palier de perméabilité le gradient géothermique moyen. Trois horizons sont ainsi proposés comme contribuant à l'alimentation en eau de l'ouvrage, dans des formations où alternent passées argileuses et passées sableuses ou à gravier. Ces variations thermiques s'estompent toutefois rapidement et disparaissent après une nuit de repos. Les pompages successifs permettent également de renforcer le caractère de richesse en oxygène dissous en base de crépine (saturation supérieure à 80%), les cycles de purge permettant de renouveler la colonne d'eau jusqu'au niveau de la pompe. Ce renouvellement permet également d'homogénéiser la conductivité électrique, s'il en était besoin, puisque ce paramètre était déjà très peu variable initialement. Enfin, le pompage ne permet pas d'homogénéiser totalement la valeur du pH sur toute la colonne d'eau, suggérant que les différents niveaux producteurs ne sont pas homogènes.

**Les prélèvements de fond** ont été réalisés à 81 m de profondeur (partie haute de la crépine) et à 119 m de profondeur une fois que cet horizon a pu être atteint. Les limitations quant aux mesures de température sur un prélèvement de fond demeurent valables. Les effets sur les concentrations en oxygène dissous sont nettement moins patents puisque l'eau prélevée au droit de la crépine n'est pas dépourvue d'oxygène. Les mesures de conductivité électrique sont cohérentes entre mesure dans le forage et mesure en sortie du préleveur de fond (à l'exception d'une donnée). Au contraire de ce qui a été constaté à Labruguière, les évaluations du pH et du potentiel redox en surface renvoient une surévaluation de la mesure lorsque celle-ci est faite en sortie du système de prélèvement de fond. L'eau captée par le forage de Valdurenque montrant des évolutions rapides de certains paramètres dans l'ouvrage, il est possible que la remontée du fluide dans le système de prélèvement de fond amène à modifier certains paramètres physico-chimiques.

Si ces conclusions paraissent moins bonnes, elles n'ont pas de traduction effective sur le chimisme de l'eau en lui-même. Les balances ioniques demeurent très correctes (-3% à 0%). Une complication supplémentaire pour la comparaison entre prélèvement de fond et pompage vient du fait que l'ouvrage présente plusieurs venues d'eau, dont la physico-chimie n'est pas identique. Ainsi, le chimisme des eaux issues des pompages et des eaux prélevées à 81 m de profondeur sont assez rapidement similaires, alors que les eaux présentes à 119 m de profondeur peuvent présenter des concentrations supérieures (Ca, HCO<sub>3</sub>). Les ions moins

abondants ne présentent généralement pas cette caractéristique. Globalement, la variabilité chimique de Valdurenque est cependant beaucoup plus faible que celle mise en évidence à Labruguière.

**La réalisation de prélèvements de fond** semble donc pouvoir s'envisager avec un bon degré de confiance dans le cadre d'ouvrages pour lesquels les horizons producteurs sont connus – et particulièrement si ceux-ci ont une faible productivité. Cette connaissance est idéalement issue d'investigations par diagraphie géochimique, mais toute information sur l'ouvrage en lui-même (données de foration, test de production, ...) est utile à considérer. Autrement, les prélèvements de fond sont réalisés en aveugle, et leur représentativité peut n'être que partielle si l'ouvrage n'est pas sollicité par pompage (exemple du prélèvement à 130 m à Labruguière). Si le préleveur de fond est correctement positionné, l'eau qui peut être extraite avant pompage ou après pompage ne présente qu'une faible variabilité chimique (prélèvement à 163 m à Labruguière). Dans le cas d'ouvrages à productivité plus forte (Valdurenque), un prélèvement de fond peut toujours être réalisé pour caractériser les différentes venues d'eau si celles-ci sont chimiquement contrastées, ce que ne permet pas un pompage classique. Si les venues d'eau sont homogènes, pompage et prélèvement de fond fourniront des informations très semblables dès lors que l'ouvrage aura été suffisamment purgé. Le cas d'étude présent permet en effet de bien mettre en relief l'importance de la maîtrise des paramètres de la purge, les données issues des pompages successifs dans le forage de Labruguière ayant montré que l'on peut attribuer de manière erronée un caractère représentatif à des paramètres physico-chimiques (mesures stables en pompage) alors que ceux-ci diffèrent des paramètres réellement mesurés dans l'ouvrage au niveau des zones productrices.

**Dans le cas d'ouvrages très profonds**, en cas d'absence ou d'impossibilité de connaître avec précision les zones productrices, une option pourrait être d'opérer une sollicitation modérée de l'ouvrage par pompage avant de procéder à des prélèvements de fond – pour autant que le niveau statique ou son rabattement permettent une telle sollicitation avec des pompes sises à moins de 100 m de profondeur. La présente étude montre que le renouvellement de l'eau dans la crépine est un processus suffisamment rapide (y compris à Labruguière) pour permettre de disposer d'une eau représentative de l'aquifère, et ceci y compris en l'absence de prélèvement. Positionner le système de prélèvement de fond dans la crépine (si possible au droit des venues d'eau) après une durée relativement courte de pompage permettrait alors d'obtenir une eau représentative des conditions fond de trou, sans devoir recourir à l'utilisation de pompes de forte puissance et/ou de fort débit sur de longues périodes de temps.

**Cette méthode mixte**, couplant sollicitation modérée par pompage et prélèvement de fond, pourrait peut-être également être envisagée pour des ouvrages très colmatés. Certains se signalent par des temps de retour à l'équilibre après pompage qui peuvent s'avérer extrêmement longs (plusieurs mois à plusieurs années pour recouvrer le niveau piézométrique mesuré avant une opération de pompage<sup>29</sup>). Même si le pompage induit un fort rabattement qui est très long à se résorber, il induit un renouvellement d'eau dans le(s) horizon(s) producteur(s). Si un pompage échouera dans tous les cas à faire remonter l'eau renouvelée, un prélèvement de fond pourra quand même être réalisé. Il sera néanmoins nécessaire de trouver un optimum

---

<sup>29</sup> Un pompage opéré sur le forage de Lembeye (10057X0001/LEE1) en 2009, au débit initial de 15 m<sup>3</sup>/h, a entraîné un rabattement de plus de 42 m du niveau piézométrique de l'aquifère des Sables Infra-Molassiques. Le niveau piézométrique a ensuite mis plusieurs années à retrouver son niveau initial avant pompage ; [http://fichebseau.brgm.fr/bss\\_eau/fiche.jsf?code=10057X0001/LEE1](http://fichebseau.brgm.fr/bss_eau/fiche.jsf?code=10057X0001/LEE1).

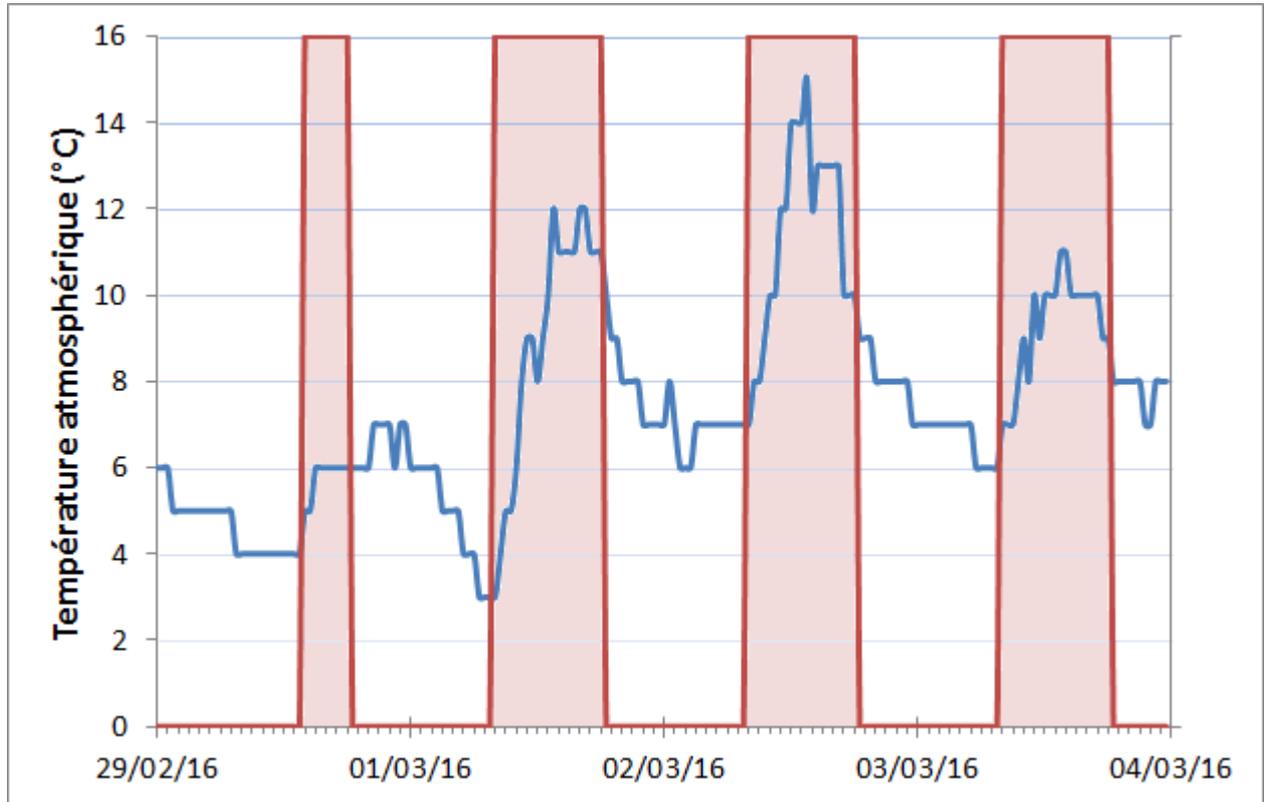
temporel entre délai nécessaire à l'alimentation en eau par l'horizon producteur et possible évolution de cette eau dans le forage (a fortiori si le tubage n'est pas en inox). Dans cette configuration, et afin de garder une représentativité correcte du chimisme de l'aquifère profond, il est probable que le pompage soit à réaliser quelques semaines avant le prélèvement de fond.



## **Annexe 1**

# **Température atmosphérique**





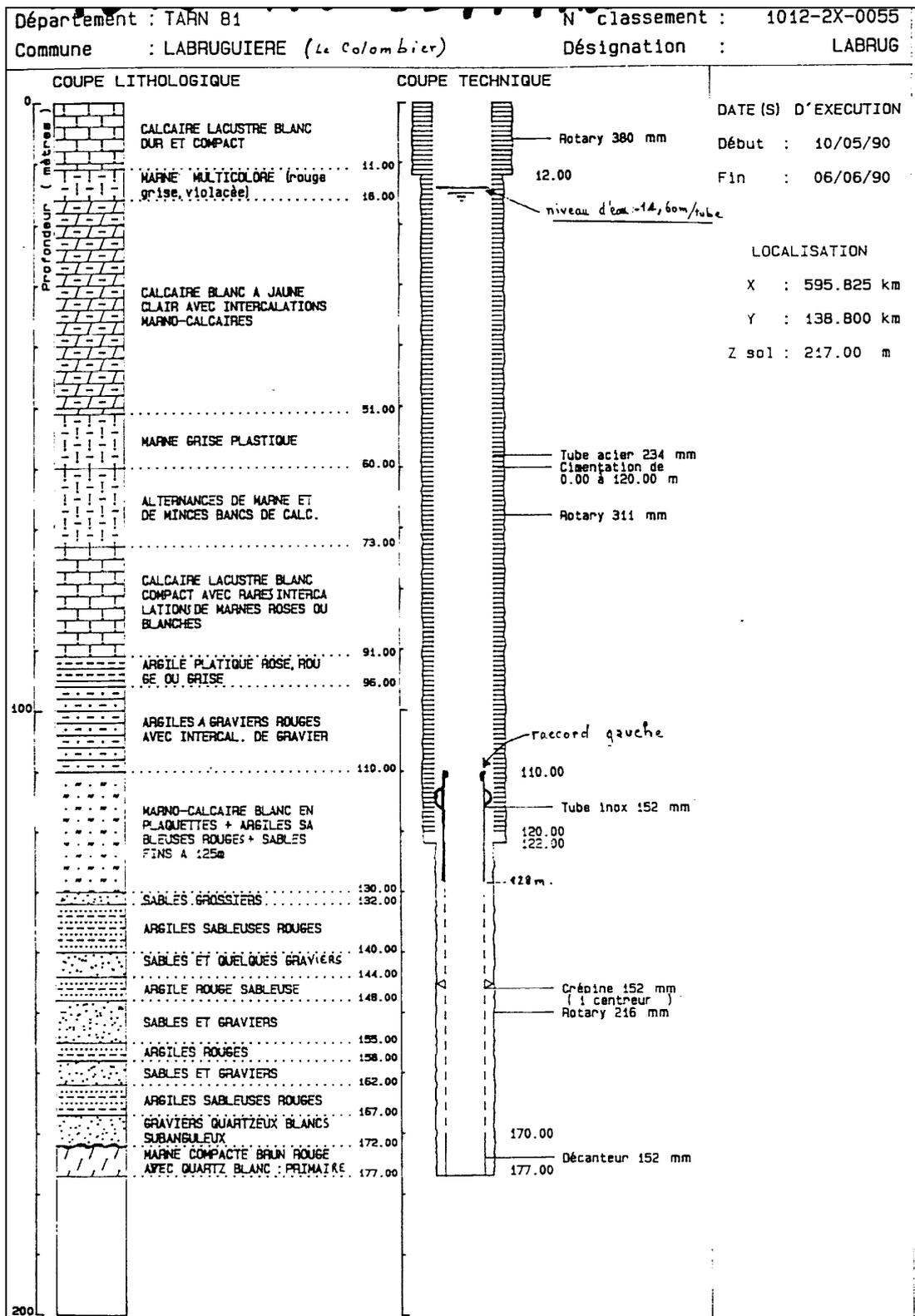
Température relevée dans l'atmosphère à l'aéroport de Castres (d'après <http://freemeteo.co.uk/>) ; les périodes de présence sur site sont indiquées en rose.



## **Annexe 2**

# **Coupes techniques des forages de Labruguière et Valdurenque**





Coupes technique et lithologique du forage de Labruguière (Document issu de 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](http://www.brgm.fr)