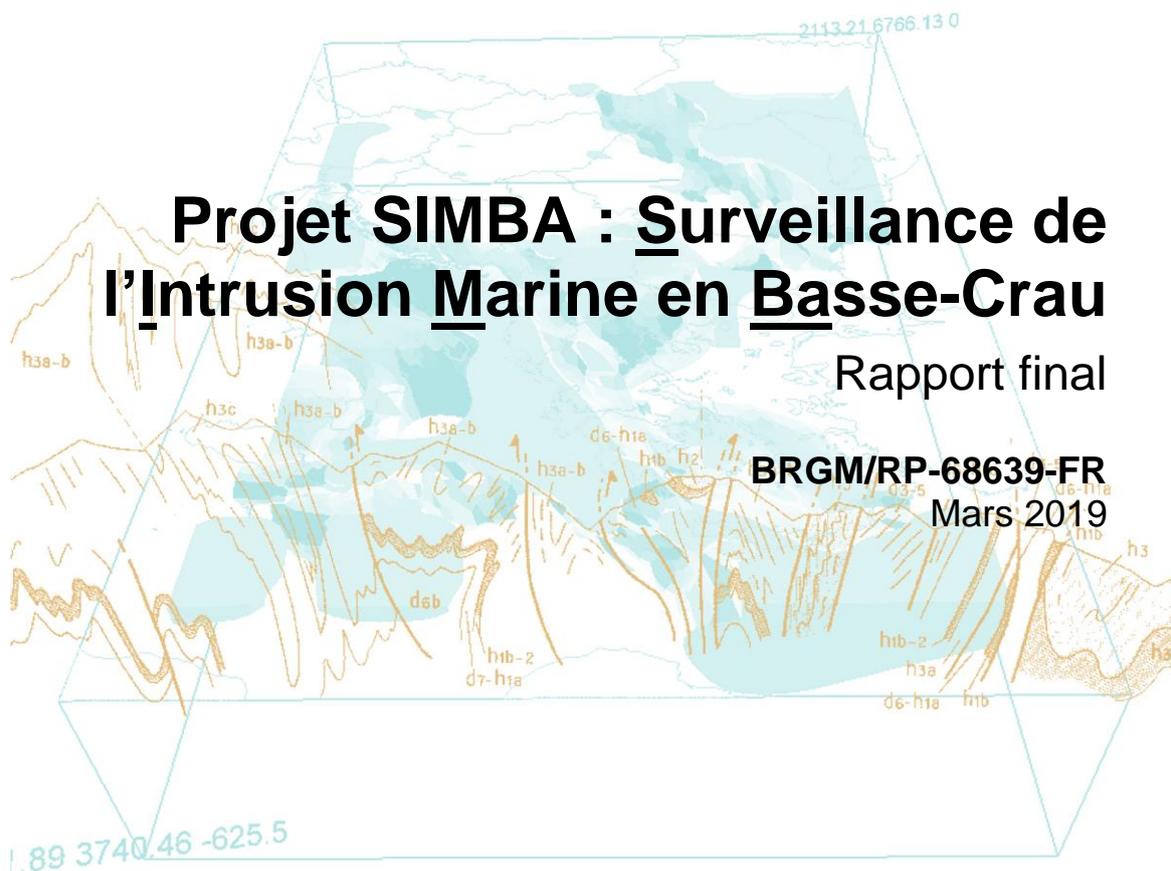


Document public



Avec le soutien financier de :



Projet SIMBA : Surveillance de l'Intrusion Marine en Basse-Crau

Rapport final

BRGM/RP-68639-FR

Mars 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM AP16PAC044

Bailly-Comte V., Rivet F.

Avec la collaboration de Dewandel. B. (BRGM) et Villesseche D. (SYMCRAU)

Vérificateur :

Nom : A. GUTIERREZ

Fonction : Hydrogéologue

Date : 17/01/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : J.-L. LAMBEAUX

Fonction : Directeur régional

Date : 11/02/2019

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Réseau, Biseau salé, Diagraphies, Nappe de la Crau, Bouches-du-Rhône.

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

Bailly-Comte V., Rivet F. avec la collaboration de Dewandel. B. (BRGM) et Villesseche D. (SYMCRAU) (2019) - Projet SIMBA : Surveillance de l'Intrusion Marine en Basse-Crau. Rapport final. BRGM/RP-68639-FR, 227 p., 54 ill., 6 ann.

Synthèse

Le projet SIMBA, pour Surveillance de l'Intrusion Marine en Basse-Crau, vise à mieux comprendre les mécanismes à l'origine de l'intrusion saline en Basse-Crau, identifier les facteurs qui contrôlent l'évolution spatiale et temporelle de la salinité et proposer un réseau de surveillance adapté pour mieux prévenir le phénomène. Un premier réseau de suivi a été mis en place dans le cadre du projet en tenant compte de l'ensemble des données disponibles et l'état des connaissances hydrogéologiques antérieures au projet, ce qui a fait l'objet du rapport intermédiaire BRGM/RP-67606-FR. Le présent rapport se focalise sur l'interprétation de l'ensemble de ces données dans le but de (i) définir l'extension spatiale du phénomène sur l'aquifère des cailloutis, (ii) caractériser la variabilité de la zone de transition à différentes échelles de temps et (iii) proposer une caractérisation des pôles géochimiques responsables des mélanges ainsi qu'une estimation relative du temps de résidence des eaux souterraines en complétant le jeu de données issus des réseaux de suivis par des campagnes de prélèvements.

Plusieurs développements méthodologiques sont proposés pour exploiter au maximum les données acquises au sein de l'observatoire, en croisant les évolutions spatiales et temporelles de la salinité aux évolutions spatiales et temporelles de la piézométrie dans l'aquifère, à différentes échelles de temps. Les résultats obtenus et leurs interprétations sont utilisés pour :

- préciser le modèle conceptuel d'évolution de la salinité de l'aquifère de Crau, en acquérant et interprétant de nouvelles données et en identifiant les différents forçages ;
- proposer des documents graphiques (cartes) simples à interpréter qui permettent de mettre en évidence la position du biseau salé à l'échelle de la Basse-Crau, en distinguant plusieurs situations selon les conditions hydrologiques.

La méthode mise en œuvre s'appuie sur le concept d'équilibre hydrostatique entre deux fluides de densité différente, l'eau douce et l'eau salée, tout en y ajoutant le concept de transport dispersif selon la verticale pour décrire l'interface par une zone de transition plus ou moins épaisse selon son déplacement. L'origine de l'eau salée observée dans l'aquifère est également discutée à partir d'analyses géochimiques et isotopiques, dans le but de mettre en évidence d'éventuels transferts rapides de sel facilités par le creusement des darses et du canal d'Arles à Fos ou des interactions avec les hydrosystèmes superficiels, et notamment les niveaux aquifères développés dans les formations peu perméables sablo-limoneuses qui recouvrent les cailloutis de Crau vers l'aval.

Les principaux résultats obtenus mettent en évidence que :

- la stabilité des niveaux d'eau définissant le niveau de base de l'aquifère (ligne d'émergence des Laurons et canaux de drainage) explique la faible épaisseur de la zone de transition vers l'aval ;
- la salinité observée au fond des différents piézomètres étudiés provient d'un mélange avec une eau de mer d'au moins plusieurs dizaines d'années sur les points étudiés ;
- la géométrie du substratum explique la variabilité spatiale observée sur la position de l'interface salée. L'intrusion saline sera d'autant plus marquée que la pente du substratum en direction de la mer est faible ;
- le déplacement du front salé est beaucoup plus sensible à une modification de la charge d'eau douce qu'à une modification de la charge d'eau salée ;
- la salinité observée sous les marais de Meyranne dans l'aquifère de Crau s'explique par l'équilibre hydrostatique avec la mer, et constitue donc le prolongement vers le nord de la même nappe salée qui s'étend vers l'aval sous la Camargue.

Au niveau local, les résultats mettent en évidence la forte vulnérabilité des captages AEP de Mas Thibert et de la Pissarotte. Une proposition d'adaptation du réseau de surveillance vise à améliorer les connaissances sur le déplacement de l'interface salée vers Mas-Thibert, ainsi que sur les secteurs des marais de Meyranne (au nord de la zone d'étude) et de Tenque (au centre de la zone d'étude) qui montrent également une forte vulnérabilité à l'intrusion saline.

Il reste à comprendre comment une modification de la gestion hydraulique des ouvrages de surface, tels que le barrage anti-sel ou l'ouvrage du Galéjon, peut-elle modifier cet équilibre en modifiant le niveau de base de l'aquifère. Cette question sera traitée dans le cadre du projet GAMBAS (projet GPMM/BRGM).

Enfin, ce secteur d'étude se prête bien à l'application de méthode géophysique aéroportée pour caractériser spatialement l'information sur la position de l'interface, ce qui constitue une perspective d'étude pertinente pour le projet SIMBA.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. PRÉAMBULE	11
1.2. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE	11
1.3. OBJECTIFS DU PROJET SIMBA	12
1.3.1. Mise en place d'un réseau de surveillance du biseau salé	12
1.3.2. Mise à jour du modèle conceptuel	12
1.3.3. Cartographie du biseau salé	13
1.4. SYNTHÈSE DU RAPPORT INTERMÉDIAIRE ET DES PERSPECTIVES	14
1.4.1. Évolution historique du biseau salé	14
1.4.2. Mise en place du réseau de suivi	14
1.4.3. Perspectives à l'issu de la première année du projet SIMBA	15
2. Présentation du réseau SIMBA.....	17
2.1. POINTS DE SUIVI HYDRODYNAMIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE	17
2.1.1. Points de suivi manuels	17
2.1.2. Points de suivi automatisés.....	18
2.2. POINTS DE SUIVI CHIMIE	19
2.3. TABLEAU ET CARTE DE SYNTHÈSE DU RÉSEAU SIMBA.....	21
3. Caractérisation de la structure et du fonctionnement de l'aquifère de Crau dans le secteur de la Basse-Crau	23
3.1. GÉOMÉTRIE DU SUBSTRATUM	23
3.2. HYDRODYNAMIQUE - ANALYSE TEMPORELLE	25
3.2.1. Présentation du jeu de données depuis mai 2017.....	25
3.2.2. Analyse à « long » terme (> 1 cycle hydrologique, pas journalier).....	27
3.2.3. Analyse à « court » terme (infra annuel, pas horaire) et conséquences de la marée sur la relation de Ghyben-Herzberg	32
3.2.4. Conclusion	42
3.3. HYDRODYNAMIQUE – CARTE PIÉZOMÉTRIQUE	43
3.3.1. Objectifs.....	43
3.3.2. Méthode.....	43
3.3.3. Résultats et interprétations	44
3.4. SIGNATURE GÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE	48
3.4.1. Objectifs.....	48
3.4.2. Méthode.....	48
3.4.3. Résultats et interprétations	48

3.5. ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA SALINITÉ.....	57
3.5.1. Définition de la zone de transition	57
3.5.2. Interprétation temporelle de l'évolution des diagraphies sur les points du réseau de suivi.....	58
3.5.3. Analyse à « court » terme (infra annuel, pas horaire).....	66
4. Cartographie du biseau salé.....	69
4.1. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES QUI CONTRÔLENT LA POSITION ET L'ÉTENDUE DE LA ZONE DE TRANSITION.....	69
4.2. CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ	72
4.2.1. Limite d'extension de l'interface de salinité 20	72
4.2.2. Limite d'extension des iso-salinités 1, 6.3 et 20	75
5. Modèle conceptuel d'évolution du front salé	79
5.1. GÉOMÉTRIE DU SUBSTRATUM ET BISEAU SALÉ DANS LE CONTINUUM TERRE-MER	79
5.2. CARTE DE SYNTHÈSE.....	82
6. Proposition d'un observatoire dédié au suivi opérationnel sur le long terme du biseau salé et autres perspectives	85
6.1. PROPOSITION DE MODIFICATION DU RÉSEAU DE SUIVI.....	85
6.2. AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE ET DE SUIVI DE L'INTRUSION SALINE EN BASSE-CRAU.....	88
6.2.1. Géométrie du substratum.....	88
6.2.2. Améliorer la connaissance sur l'état des ouvrages suivis.....	88
6.2.3. Prospection géophysique aéroportée.....	88
6.2.4. Perspectives dans le cadre du projet GAMBAS	88
7. Conclusion.....	89
8. Bibliographie	91

Liste des illustrations

Illustration 1 : Secteur d'étude et principaux canaux le traversant.....	11
Illustration 2 : Piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies menées dans le projet SIMBA (d'après SYMCRAU/GPMM, 2017).	17
Illustration 3 : Récapitulatif des points de suivi du réseau d'observation de l'intrusion saline mis en place dans le projet SIMBA (d'après, SYMCRAU/GPMM, 2017). Points équipés de capteurs de suivi en continu de la hauteur d'eau, température et conductivité.	18
Illustration 4 : Localisation des points de prélèvements sur le fond IGN au 1/100 000.	20
Illustration 5 : Carte de synthèse du réseau d'observation utilisé dans le projet SIMBA sur le fond IGN au 1/100 000.....	21
Illustration 6 : Carte de la position du toit du substratum et des secteurs de plus forte pente (> 1 %)..	24
Illustration 7 : Chroniques de données horaires - Les pointillés verticaux représentent les 2 campagnes piézométriques d'octobre 2017 et avril 2018.	26
Illustration 8 : Localisation des points de mesure piézométriques complémentaires gérés par le SYMCRAU et le BRGM, et position du marégraphe du GPMM.....	28
Illustration 9 : Comparaison de la piézométrie journalière mesurée sur le réseau SIMBA avec quelques points de mesure en Crau du réseau du Sycmrau (PZ5 - 11 - 18 - 19 - 21) et du BRGM (P23B - 29B).	29
Illustration 10 : Amplitudes des variations piézométriques observées sur les points du réseau de suivi SIMBA pour différentes échelles de temps, comparées aux amplitudes observées au point P23B.....	30
Illustration 11 : Résultats de l'analyse en composantes principales (cosinus carré) réalisées sur l'ensemble des données piézométriques (A), les données du réseau SIMBA seules (B), et les données du réseau SIMBA sans X12 (C).	31
Illustration 12 : Localisation des points dont les données ont été utilisées pour l'analyse à court terme.....	32
Illustration 13 : Hydrogrammes observées aux stations S1 et S5 comparés à la chronique piézométrique observée à L2.	33
Illustration 14 : Comparaison des niveaux d'eau mesurées dans le canal d'Arles à Fos et au niveau du piézomètre L2 pendant le cycle hydrologique 2014-2015.....	34
Illustration 15 : Corrélogrammes simples et croisés des chroniques de niveau d'eau du canal d'Arles à Fos et de la piézométrie mesurée à L2 - Période septembre 2014 - septembre 2015 au pas de 2 h.	35
Illustration 16 : Analyse de corrélation simple (gauche) et croisée (droite) des hydrogrammes des stations S1, S5 et L2 au pas horaire entre le 15 janvier 2011 et le 1 ^{er} juin 2011.....	35
Illustration 17 : Comparaison des chroniques mesurées aux stations S8 et X12 (A) et analyse de corrélation simple et croisée des chroniques des stations S8 et X12 au pas horaire (B) entre le 1 ^{er} novembre 2011 et le 31 octobre 2012.	36
Illustration 18 : Spectre d'amplitude du signal de marée calculé entre le 1 ^{er} juillet et le 1 ^{er} octobre 2018, $f_e=3.33 \cdot 10^{-2}$ cpd.	37
Illustration 19 : Synthèse des résultats de l'analyse spectrale sur les transferts d'onde de marée.....	37
Illustration 20 : Amplitudes cumulées du signal de marée observées sur les piézomètres du réseau SIMBA selon les composantes O1, K1, P1 M2 et S2 comparées à celle du niveau marin mesuré à la station de Fos.	38
Illustration 21 : Fonction de gain et de cohérence calculée pour la relation S8-X12 entre le 1 ^{er} novembre 2011 et le 31 octobre 2012, $F_e=1.66 \cdot 10^{-2}$ cpd.	39
Illustration 22 : Évolution comparée du niveau piézométrique et de la salinité au piézomètre L2.....	41

Illustration 23 : Évolution comparée du niveau piézométrique et de la salinité au piézomètre X17.	41
Illustration 24 : Cartes piézométriques obtenues en Mars 2017 par krigeage sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des conditions limites de charges imposées.	45
Illustration 25 : Cartes piézométriques obtenues en octobre 2017 (A) et avril 2018 (B) par krigeage avec prise en compte des conditions limites de charges imposées.	46
Illustration 26 : Différence de piézométrie calculée entre avril 2018 et octobre 2017 et report des points de prélèvements agricoles et AEP sur la zone d'étude (Source des données SYMCRAU).	47
Illustration 27 : Principaux résultats des analyses géochimiques et isotopiques comparés aux données obtenues pour des échantillons prélevés dans le Rhône (de Montety, 2008) et en Méditerranée (de Montety, 2008 et Pételet et al., 2016).	49
Illustration 28 : Résultats des analyses isotopiques des stables de l'eau comparés à la droite météorique locale définie par Celle (2000).	50
Illustration 29 : Relation entre la salinité mesurée et la contribution d'eau marine calculée à partir des Cl ⁻	51
Illustration 30 : Diagramme $87\text{Sr}/86\text{Sr}=f(1/\text{Sr})$. La droite horizontale positionne la signature attendue pour un équilibre avec l'encaissant carbonaté. Les symboles sur les droites identifient le pourcentage de mélange par pas de 10 %.	52
Illustration 31 : Relation $\text{SF}_6=f(\text{CFC}_{12})$ obtenue pour tous les échantillons (à gauche), et pour les échantillons non contaminés (à droite), complétée par les évolutions théoriques attendues pour un transfert de type piston (courbe bleue), exponentiel (courbe verte) ou un mélange binaire (droite noire).	54
Illustration 32 : Relation entre la concentration en SF ₆ et le % de mélange avec l'eau de mer issu de l'interprétation des concentrations en Cl ⁻	55
Illustration 33 : Relation entre le $\delta^{13}\text{C}$ et l'activité mesurée en ¹⁴ C exprimée en pcm.	56
Illustration 34 : Tableau de synthèse des résultats relatifs à l'âge de l'eau estimés par l'analyse des gaz dissous d'origine anthropique (CFCs et SF ₆) et l'analyse Tritium/Hélium.	57
Illustration 35 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X23.	60
Illustration 36 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X17.	61
Illustration 37 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X12.	62
Illustration 38 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre L2.	63
Illustration 39 : Zoom sur l'évolution calculée des faibles salinités selon la profondeur au piézomètre X17.	64
Illustration 40 : Zoom sur l'évolution calculée des faibles salinités selon la profondeur au piézomètre L2.	64
Illustration 41 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée à L2 et de la position de l'interface lors des phénomènes de marées au piézomètre L2.	66
Illustration 42 : Diagraphies réalisées sur le piézomètre L2.	67
Illustration 43 : Position moyenne de l'interface salée (z_{20}) et des iso-salinité 1 et 6.3 (z_1 et $z_{6.3}$) issue de l'interprétation des diagraphies et comparées à la piézométrie moyenne (h), au gradient piézométrique calculé à partir de la carte piézométrique de mars 2017 (i), à la mesure par slug-test de la perméabilité de l'aquifère (K) et à la position du toit du substratum ($z_{\text{substratum}}$) issue du modèle géologique (Roure et al., 2004).	69

Illustration 44 : Relation entre la différence de position des iso-salinité 20 et 1 avec la différence de position des iso-salinité 20 et 6 calculée pour chaque point à partir de l'ensemble des diagraphies disponibles.	70
Illustration 45 : Relation entre la position de l'iso-salinité 6.3 et la piézométrie pour les points sélectionnés et comparée à la relation $z=30xh$	71
Illustration 46 : Représentation de l'erreur entre la position de l'iso-salinité 20 déduite des observations et celle obtenue par calcul à partir de la carte piézométrique de Mars 2017.	73
Illustration 47 : Comparaison de la position de l'iso-salinité 20 calculée pour les différentes campagnes piézométriques.	74
Illustration 48 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en mars 2017.	76
Illustration 49 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en octobre 2017.	77
Illustration 50 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en avril 2018.	78
Illustration 51 : Modèles conceptuels d'intrusion saline pour 2 géométries du toit du substratum.	80
Illustration 52 : Représentation simplifiée des différents forçages qui contrôlent l'évolution de la position du biseau salée en Basse-Crau.	81
Illustration 53 : Carte de synthèse des résultats du projet SIMBA.	83
Illustration 54 : Localisation des secteurs identifiés pour la mise en place d'un suivi pour l'observatoire de l'intrusion saline.	87

Liste des annexes

Annexe 1 : Fiches des points de suivi du réseau d'observation de l'intrusion saline mis en place dans le projet SIMBA	93
Annexe 2 : Tableau de synthèse des points d'eau utilisés pour les suivis et les mesures piézométriques	141
Annexe 3 : Résultats des analyses effectuées dans SIMBA	147
Annexe 4 : Coupes géologique et technique des piézomètres étudiés	189
Annexe 5 : Diagraphies de salinité	213
Annexe 6 : Points définissant les conditions limites à charge imposée pour l'interpolation de la piézométrie.....	225

1. Introduction

1.1. PRÉAMBULE

Le projet SIMBA a fait l'objet d'un premier rapport intermédiaire en janvier 2018 présentant les travaux et résultats obtenus au bout d'une année (Bailly-Comte et Rivet, 2018, rapport BRGM/RP-67606-FR). La présentation du secteur d'étude, contexte et objectifs du projet, décrits ci-dessous est en partie issue du rapport intermédiaire.

1.2. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE

La nappe de la Crau, située à l'ouest du département des Bouches-du-Rhône, est une ressource en eau souterraine fortement sollicitée pour l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle. L'aquifère de Crau est un aquifère libre jusqu'à la zone de marais qui borde la Crau depuis le Mas Thibert jusqu'à la mer. L'aquifère, constitué de matériaux détritiques (cailloutis) est ensuite recouvert par des limons peu perméables, puis par les formations fluvio-marines quaternaires de Camargue. Ce contact avec les limons peu perméables définit la zone naturelle d'émergence de la nappe. Les émergences peuvent être diffuses ou localisées, comme les Laurons qui désignent localement les sources alimentées par la nappe de Crau. Le secteur d'étude est centré sur cette limite nord-ouest – sud-est définissant la limite de captivité de la nappe, et la bordure littorale au niveau du secteur industriel de Fos : secteur de la Basse-Crau. L'illustration 1 montre celui-ci ainsi que les principaux canaux qui le traversent : canal de Navigation d'Arles à Fos (ou Arles à Bouc), canal de navigation Rhône-Fos, canal du colmatage, canal du Vigueirat, canal de Vergière et canal Centre Crau.

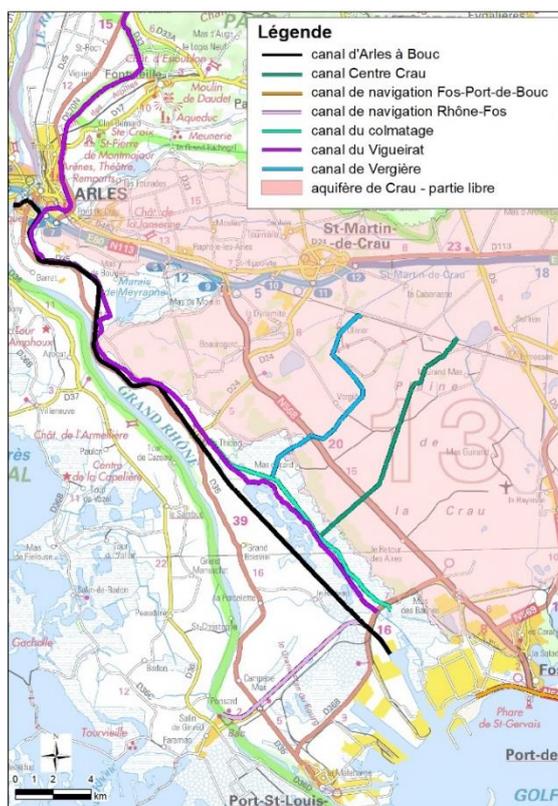


Illustration 1 : Secteur d'étude et principaux canaux le traversant.

1.3. OBJECTIFS DU PROJET SIMBA

1.3.1. Mise en place d'un réseau de surveillance du biseau salé

La nappe de la Crau s'écoule depuis le nord-est vers le sud-ouest en direction de la Camargue et la mer. Cette nappe donne naissance à une zone d'émergence d'eau douce au contact des dépôts limoneux du Rhône, mais elle continue également de s'écouler sous la Camargue où elle rencontre une nappe d'eau salée. La zone de transition entre ces deux masses d'eau constitue une interface plus ou moins franche entre eau douce et eau salée, et son extension dans l'aquifère constitue le biseau salé.

La position de cette zone de transition a fait l'objet d'études approfondies dès les années 60 afin de mieux anticiper l'impact environnemental des aménagements portuaires successifs sur la salinité générale de la nappe de la Crau, et plus particulièrement sur les ouvrages de captages. Les principales conclusions de ces études sont exposées dans le chapitre 2. Si la nappe captive en Camargue a toujours présenté en aval une salinité importante, la position de la zone de transition a évolué au cours du temps, ainsi que les concepts relatifs à sa définition et sa représentation cartographique. Dans les années 70, la mise en place de la zone industrielle de Fos a grandement modifié l'occupation des sols, et la zone de transition eau douce/eau salée a été déplacée vers l'intérieur des terres. Cependant, depuis cette date, d'autres processus (forçages) liés à l'intensification des prélèvements d'eau industrielle, potable ou agricole, à l'évolution des pratiques agricoles en Crau en lien avec la recharge de la nappe, ou encore à la gestion hydraulique des réseaux de canaux d'eau douce en lien avec la dynamique du Rhône, peuvent également avoir joué un rôle sur l'évolution de cette limite.

Le SYndicat Mixte de gestion de la nappe phréatique de la CRAU (SYMCRAU), soucieux de mieux connaître l'évolution de l'intrusion saline afin de mieux la prévenir sur son territoire, souhaite assurer un suivi en continu de la salinité en mettant en place un observatoire de l'intrusion saline en Basse-Crau. Le projet SIMBA pour Surveillance de l'Intrusion Marine en Basse-Crau, mené en partenariat entre le SYMCRAU et le BRGM, a pour objectif de répondre à cette problématique, en permettant tout d'abord de mieux comprendre les mécanismes d'intrusion saline et d'évolution du front salé à l'échelle de la Basse-Crau pour en proposer ensuite une surveillance adaptée sur le long terme, basée sur un réseau de mesures piézométrique et physico-chimique (salinité).

1.3.2. Mise à jour du modèle conceptuel

Le projet SIMBA a notamment pour objectif d'identifier l'origine de la salinité ainsi que les forçages qui contrôlent l'évolution du front salé en Basse-Crau. Pour cela, une synthèse des connaissances a tout d'abord été réalisée (cf. Bailly-Comte et Rivet, 2018, rapport BRGM/RP-67606-FR) pour mieux définir les besoins en termes d'acquisitions de nouvelles connaissances. Celles-ci sont ciblées pour valoriser au maximum les données acquises en continu au sein de l'observatoire à différentes échelles de temps. Une meilleure caractérisation hydrodynamique a été proposée à partir de slug-tests, tandis qu'une campagne spatiale géochimique (majeurs, traces et gaz dissous) et isotopique (Sr, stables de l'eau, Tritium/Hélium) a été menée dans le but de décrire les caractéristiques du pôle salé qui se mélange à l'eau douce de l'aquifère de Crau. Cette information est complétée par la réalisation de diagraphies de salinité dans les piézomètres du réseau (cf. partie 2) pour différentes conditions hydrogéologiques.

Les résultats obtenus et leurs interprétations sont utilisés pour préciser le modèle conceptuel d'évolution de la salinité de l'aquifère de Crau.

1.3.3. Cartographie du biseau salé

Le biseau salé a fait l'objet de nombreuses tentatives de représentations spatiales et temporelles au travers des études du BRGM, du bureau d'étude CERIC puis des études plus récentes de la SAFEGE citées en bibliographie. Les définitions utilisées pour caractériser la notion de biseau salé ont varié selon les auteurs : certains s'appuient sur le report en surface de la courbe d'iso-salinité à 15 g/l quelle que soit la profondeur de l'ouvrage (SAFEGE, 2006). Précédemment, les études menées par CERIC reproduisaient la limite d'extension de l'iso-salinité à 20 g/l en s'assurant que la profondeur maximale atteinte par le piézomètre et la profondeur du toit du substratum permettent d'atteindre le biseau salé dans l'aquifère de Crau. Les méthodes de spatialisation en surface de l'information sont également variables, certains réalisant une interpolation entre les observations issues des piézomètres à différentes profondeurs (SAFEGE, 2006), d'autres s'appuyant sur des concepts simples d'équilibre hydrostatique pour utiliser la piézométrie de la nappe d'eau douce.

Dans le cadre du projet SIMBA, l'objectif est de définir une méthode permettant de valoriser un réseau de mesures piézométrique et physico-chimique pour être capable de proposer une interprétation en temps réel de la position du biseau salé qui soit utile aux gestionnaires. Par exemple, pour un usage AEP, l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique précise qu'une eau doit présenter une conductivité spécifique à 25 °C inférieure à 1 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui correspond à une salinité (PSU) de 0.54. Ainsi, la méthode mise en œuvre doit permettre de définir avec précision le biseau salé en reproduisant les principales caractéristiques de son extension en 3 dimensions dans l'aquifère.

Pour y parvenir, une première solution consiste à mettre en place des observations multi-niveaux de la conductivité de l'eau avec une densité suffisante sur la verticale et en surface pour être capable, par simple interpolation spatiale, de reproduire la forme des iso-valeurs de salinité. Cette méthode serait parfaitement adaptée pour caractériser un phénomène d'intrusion saline localisée mais n'apparaît pas pertinente, au moins dans un premier temps, pour reproduire l'évolution de la salinité sur toute la nappe de Crau car elle nécessiterait un trop grand nombre de points d'observation. Une alternative à l'observation directe de la salinité consiste à suivre les paramètres qui contrôlent l'évolution spatiale de la salinité, à savoir la piézométrie de la nappe d'eau douce et les caractéristiques géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère. C'est cette démarche qui a été retenue dans le cadre du projet SIMBA. La méthode proposée s'appuie sur des concepts simples d'équilibre hydrostatique et de transport dispersif détaillés dans le présent rapport. Les calculs qui permettent de localiser le front de salinité sont réalisés selon l'hypothèse qu'un état d'équilibre hydrodynamique suffisamment long a été atteint.

1.4. SYNTHÈSE DU RAPPORT INTERMÉDIAIRE ET DES PERSPECTIVES

1.4.1. Évolution historique du biseau salé

Les aménagements industrialo-portuaires de Fos menés à partir des années 60, ont motivé la réalisation d'études approfondies relatives à la lithologie des formations, la géométrie des épandages de cailloutis qui constituent l'aquifère de Crau, leurs caractéristiques hydrodynamiques et la position et l'évolution du « coin salé ». Une recherche et analyse de ces études, a permis de dresser une synthèse des observations historiques et des principaux résultats obtenus sur l'évolution du biseau salé en Basse-Crau présentée dans le rapport intermédiaire. Des mesures réalisées entre 1965 et 1992 par le GPMM, le bureau d'étude CERIC (CERIC 1993), a proposé la synthèse suivante :

- évolution des niveaux de nappes marquée surtout depuis 1980 avec :
 - une baisse de 0,5 à 2 m de la nappe dans le secteur de la zone industrielle,
 - une diminution du gradient, la pente de la nappe est quasiment plate en période d'étiage à proximité du captage AEP de la Pissarotte ;
- évolution du biseau salé, deux limites identifiées : eau douce pour une salinité inférieure à 0,5 g/L et eau salée pour une salinité supérieure à 35 g/L. Entre ces deux limites, est définie la zone de transition où l'eau est saumâtre. Plusieurs périodes marquent l'évolution du front salé :
 - entre 1971 et 1977 : l'eau salée avance de 100 à 200 m en direction du captage de la Pissarotte,
 - entre 1980 et 1991 : avancée généralisée du front salé, entre 100 m à la Pissarotte jusqu'à 400 m à l'est au débouché de la tranchée drainante ; en 1984 : avancée et montée de 1 m du biseau salé après la mise en service du canal de liaison Rhône-Fos.

Ces deux dernières évolutions peuvent être corrélées à l'ouverture du canal de liaison en 1982-1983, la suppression de l'écluse anti-sel au débouché dans la darse n°1, et par une période déficitaire en précipitation. L'avancée reste très limitée près de la tranchée drainante et près de la Pissarotte, où le front salé « butte » contre une remontée du substratum (CERIC, 1977).

1.4.2. Mise en place du réseau de suivi

Le réseau de suivi mis en place dans SIMBA est basé sur de mesures piézométrique et physico-chimique :

- installation de sondes de suivi en continu du niveau d'eau, température, conductivité ;
- campagnes trimestrielles de diagraphies de mesure de la salinité sur une sélection de piézomètres ;
- réalisation d'une campagne de caractérisation géochimique pour caractériser l'origine de la salinité ;
- réalisation de plusieurs campagnes piézométriques en Basse-Crau pour décrire plusieurs situations de hautes eaux et de basses eaux ;
- réalisation d'essais de slug-test pour estimer la perméabilité de l'aquifère.

Les points de suivi et résultats des analyses sont présentés dans le chapitre 2. Les résultats de campagnes de slug-test ne sont pas repris dans ce rapport, mais détaillés dans le rapport intermédiaire.

1.4.3. Perspectives à l'issu de la première année du projet SIMBA

Les méthodes d'interprétation de données acquises dans SIMBA ont pour but de proposer une représentation cartographique du biseau salé simple et utilisable par les gestionnaires et acteurs locaux. Beaucoup d'études et d'investigations ont été menées sur le biseau salé en Basse-Crau depuis le début des travaux d'aménagement de la zone industrielle dans les années 60. Cependant, celles-ci ont été menées à des échelles temporelles et spatiales variées, et avec des objectifs différents. Elles ont permis de proposer une synthèse de l'historique des aménagements et de l'évolution du contexte hydrogéologique, mais pas de tracer un historique précis de l'avancée du biseau salé. La position de celui-ci étant en effet très sensible à la piézométrie, des données très précises doivent être acquises pour pouvoir le positionner. Sa position est aussi à relier à la géométrie, et aux caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. La dernière étude sur la géométrie de l'aquifère date de 2004 (Roure *et al.*, 2004).

À l'issue de la première année du projet SIMBA, le travail mené a permis d'aller jusqu'à l'identification de variations saisonnières, annuelles et pluri-annuelles dans la position du biseau salé. Mais d'autres développements sont apparus nécessaires pour que cette information sur la position de l'interface puisse permettre de proposer une évolution verticale de la salinité dans l'aquifère. L'objectif étant de proposer des tracés théoriques de courbe d'iso-salinité pour différentes conditions hydrologiques et pour des salinités compatibles avec les usages. Pour cela, il faut pouvoir disposer d'un paramètre contrôlant la largeur de l'interface qui puisse être spatialisé.

C'est dans cet objectif qu'a été poursuivi le travail sur la deuxième année du projet : préciser le modèle conceptuel d'évolution de la salinité en Basse-Crau et parvenir à déterminer s'il existe un paramètre hydrodynamique (transmissivité, gradient hydraulique, variabilité piézométrique) ou une combinaison de ces paramètres qui permette d'expliquer la largeur de la zone de transition sur une verticale, celle-ci pouvant être décrite par l'écart-type de la distribution de la salinité.

2. Présentation du réseau SIMBA

2.1. POINTS DE SUIVI HYDRODYNAMIQUE ET PHYSICO-CHEMIQUE

2.1.1. Points de suivi manuels

Des campagnes de mesures manuelles ont été réalisées dans le cadre du projet afin de réaliser :

- des cartes piézométriques pour différentes conditions hydrologiques avec une densité de points suffisante pour caractériser la zone d'émergence de l'aquifère. Cette zone correspond à une bande d'environ 5 km de large entre les marais des Chanoines et de Meyranne au nord et la zone industrialo-portuaire de Fos, et couvre ainsi la dépression du Vigueirat et l'ancien lit majeur du Rhône ;
- des diagraphies de salinité au niveau d'une sélection de points selon leur profondeur, leurs caractéristiques techniques et leur localisation (Illustration 3). Ces points ont été utilisés régulièrement (réseau « diagraphie » principal) lors de chaque campagne, ou ont fait l'objet d'une seule mesure en début de projet (réseau « diagraphie » secondaire).

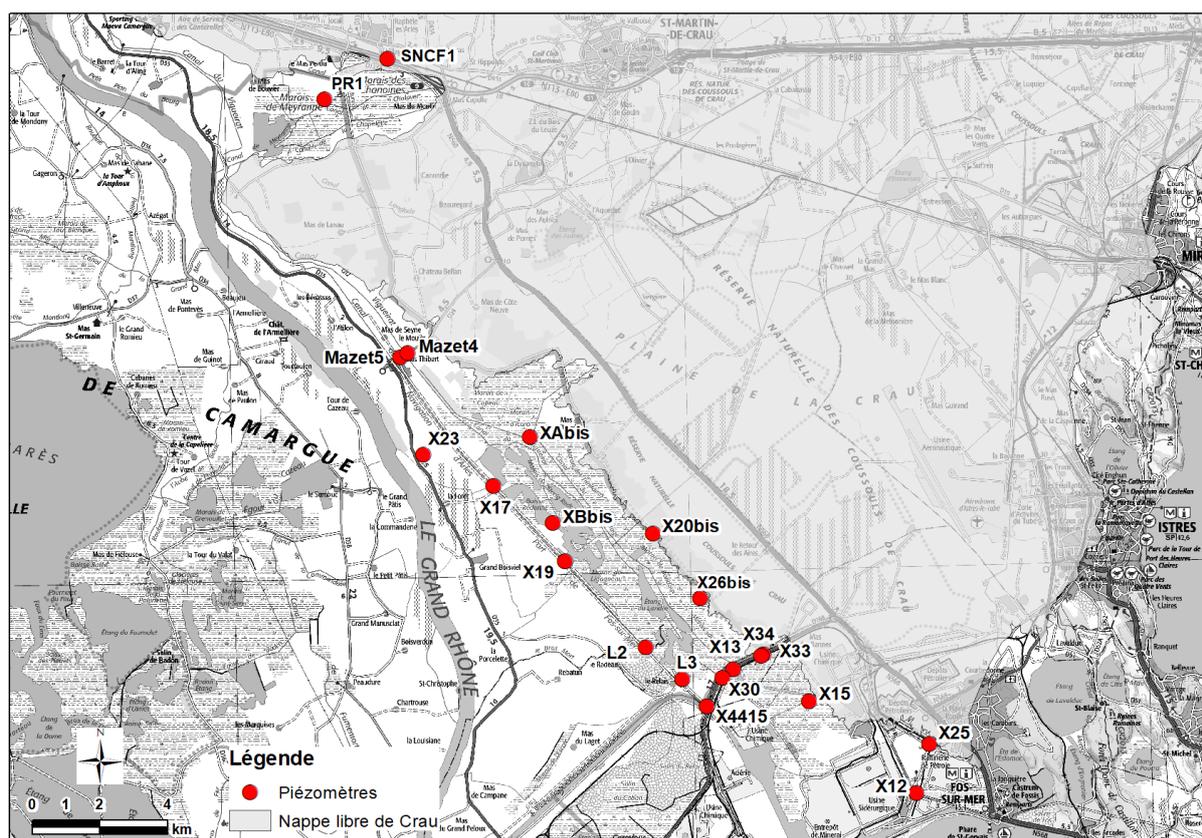


Illustration 2 : Piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies menées dans le projet SIMBA (d'après SYMCRAU/GPMM, 2017).

2.1.2. Points de suivi automatisés

Pour suivre la position de l'interface eau douce/eau salée tout au long de l'année, en continu, et ainsi mieux cerner les variations saisonnières de celle-ci, des sondes de mesure automatique de la pression, de la température, et selon les cas de la conductivité électrique, pour la conversion en salinité, ont été installées. Elles ont été mises en place à partir du mois de mai 2017. Le tableau de l'illustration 3 permet d'identifier ces points et le type de mesure mis en place ; les coupes techniques disponibles sont reportées dans l'annexe 4.

Secteur	Nom	Pos. Capteurs (mNGF)	N°BSS	Prof. de l'ouvrage/sol (m)	Nature aquifère	Intérêt pour le réseau SIMBA	Équipement	Télétransmission	Date de mise en service
1	X12	-21	BSS002JG VR	40	Sous couverture	Proximité de la tranchée drainante	Solinst LTC	non	31/05/2017
2	L2	-15.02	BSS002JF DR	23	Sous couverture	Proximité de l'étang du Landre	OTT Ecolog 800	oui	24/05/2017
3	X26 bis	-18	BSS002JF CK	19,5	Libre	Bordure de la nappe libre	Solinst LTC	non	30/05/2017
	XA bis	-11	BSS002JF DM	12	Sous couverture	Pompages agricoles	OTT Ecolog 800	oui	30/05/2017
	X20 bis	-8.72	BSS002JF DU	29.5	Libre	Bordure de la nappe libre	OTT Orphéus mini	non	15/03/2017
	X17	-11.2	BSS002JE YJ	12	Sous couverture	Proximité canal d'Arles à Fos	Solinst LTC	non	24/05/2017
4	X23	-18.5	BSS002JE YH	20,4	Sous couverture	Proximité du Rhône	Solinst LTC	non	23/06/2017
	Mazet5	-16	BSS002JEZ K	18,50	Sous couverture	Proximité du captage AEP Mas Thibert, du Rhône et de captages agricoles	OTT Ecolog 800	oui	08/06/2017
5	PR1	-21.9	BSS002GX FE	23	Sous couverture	Proximité captage AEP de Sint-Hyppolyte	OTT Ecolog 800	oui	20/06/2017
Tranchée drainante	TD		-			Suivi de la nappe de Crau	Diver	non	24/07/2017

Illustration 3 : Récapitulatif des points de suivi du réseau d'observation de l'intrusion saline mis en place dans le projet SIMBA (d'après, SYMCRAU/GPMM, 2017). Points équipés de capteurs de suivi en continu de la hauteur d'eau, température et conductivité.

Pour tous les points équipés d'un capteur de conductivité (c'est-à-dire tous les points instrumentés sauf X20bis), la sonde de mesure a été positionnée au plus près de l'iso-salinité 20, et la gestion des données a été réalisée selon le protocole défini dans le rapport intermédiaire (Bailly-Comte et Rivet, 2018). Lorsque la profondeur de l'ouvrage ne permettait pas d'atteindre cette valeur, la sonde a été placée au-dessus. Positionner la sonde au niveau de l'iso-salinité 20 présente deux avantages :

- elle permet de suivre la conductivité de l'eau au niveau du « saut » de conductivité selon la verticale, ce qui permet d'enregistrer de très faibles déplacements de l'interface salée à partir de la conductivité ;
- elle permet de s'affranchir de la correction de piézométrie liée à la densité de la colonne d'eau située au-dessus du capteur piézométrique. En effet, la mesure du niveau piézométrique réalisée par le capteur piézométrique consiste en une mesure de pression pour une colonne d'eau douce, soit pour une eau de densité égale à 1. Lorsque la colonne d'eau au-dessus du capteur est un mélange d'eau douce/eau salée, la densité de la colonne d'eau est supérieure à 1, et il est nécessaire d'appliquer une correction de la mesure piézométrique donnée par le capteur exprimée en mètre d'eau douce. Pour évaluer la sensibilité liée à l'influence de la salinité sur la mesure piézométrique, le jeu de données du capteur positionné sur L2 a été étudié. La variation de la densité avec la profondeur est obtenue à partir de la mesure de la salinité donnée par les diagraphies.

La relation utilisée pour obtenir la densité de l'eau à partir de la salinité est issue d'une interprétation de l'équation d'état de l'eau de mer (Millero et Poisson, 1981). L'interpolation temporelle au pas journalier a été réalisée (Illustration 38, §3.5.2) pour pouvoir calculer chaque jour le poids de la colonne d'eau de salinité variable qui surmonte la sonde et le comparer au poids de la même colonne d'eau douce. Finalement, l'écart entre le niveau piézométrique mesuré et calculé quantifié pour L2 reste toujours inférieur à 0,6 cm. Ceci est lié au fait que la colonne d'eau qui surmonte la sonde est essentiellement constituée d'eau douce, ce qui est valable également pour les autres points suivis. L'influence de la salinité peut alors être négligée sur la conversion en niveau piézométrique.

L'annexe 1 récapitule sous la forme de fiche l'ensemble des informations disponibles sur chaque point.

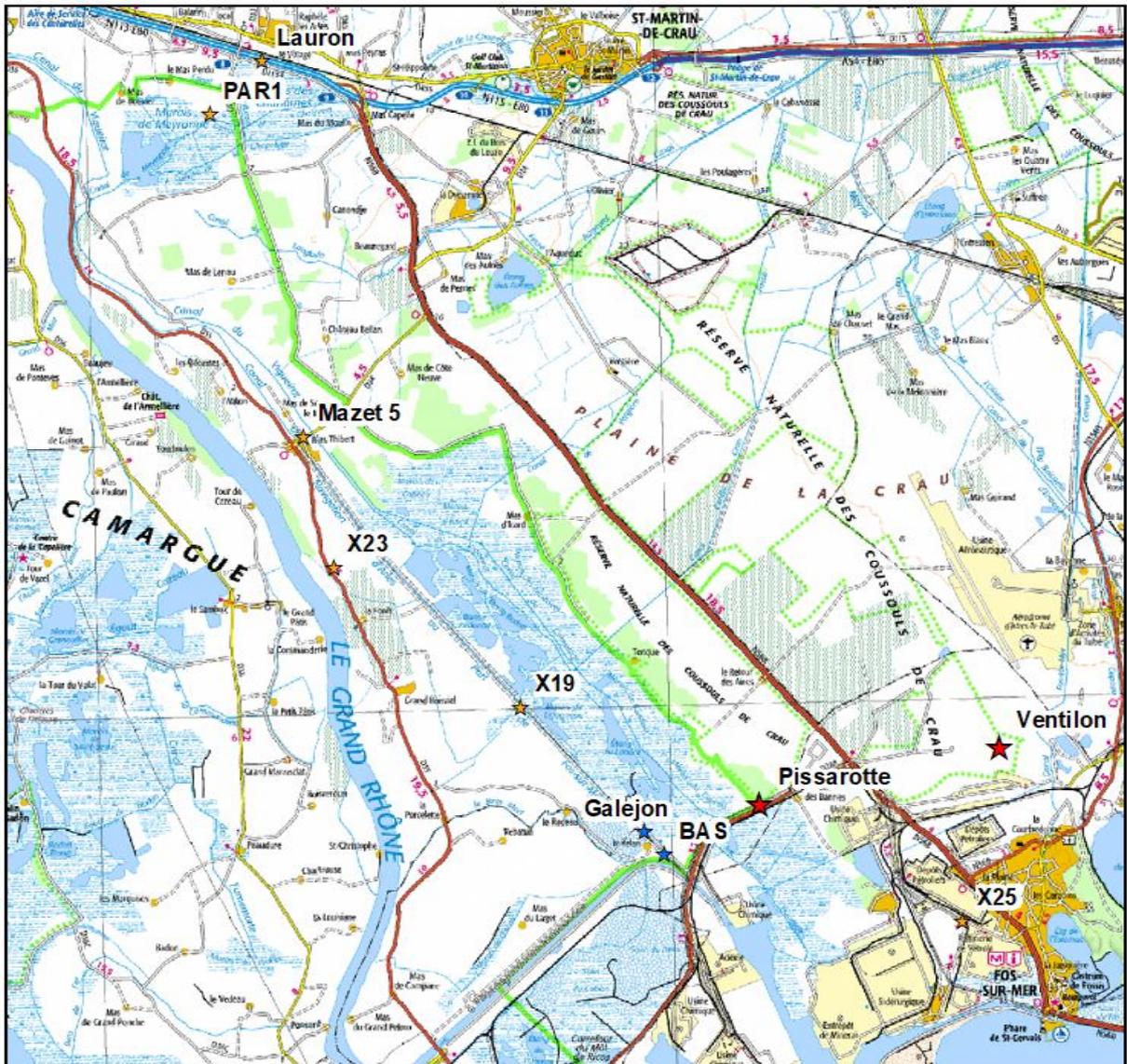
2.2. POINTS DE SUIVI CHIMIE

Des analyses géochimiques ont été réalisées sur plusieurs points d'eau souterraine et d'eau de surface du secteur d'étude, cela dans l'objectif de :

- définir l'origine de l'eau (pôles de mélanges, quantifier les proportions d'eau salée, distinguer différents pôles « salés » et « doux » selon leur âge, l'intensité des interactions avec l'encaissant et leur origine (mer, étang/marais, Rhône, Crau, alluvions) ;
- identifier l'origine des eaux salées observées en Basse-Crau connaissant les signatures des eaux salées de l'aquifère captif de Camargue, celles de la mer, des étangs, de l'aquifère superficiel, etc. ;
- dater les eaux salées pour décrire la dynamique d'intrusion saline et identifier des modèles de transferts et de mélange pour chaque point.

Au total, huit points d'eau souterraine et deux points d'eau de surface ont fait l'objet de prélèvements dans le cadre de deux campagnes en août 2017 et juin 2018. Ces campagnes ont permis de constituer une base de données hydrogéochimique et isotopique en complément des informations déjà disponibles dans ce secteur, notamment en aval dans la partie captive (de Montety, 2008).

La carte suivante (Illustration 4) présente la localisation des différents points de prélèvements centrée sur le domaine d'étude (approximativement 25 km*25 km).



Légende

- Prélèvements chimie**
- ★ Eau sout. (AEP)
 - ★ Eau sout.
 - ★ Eau surf.

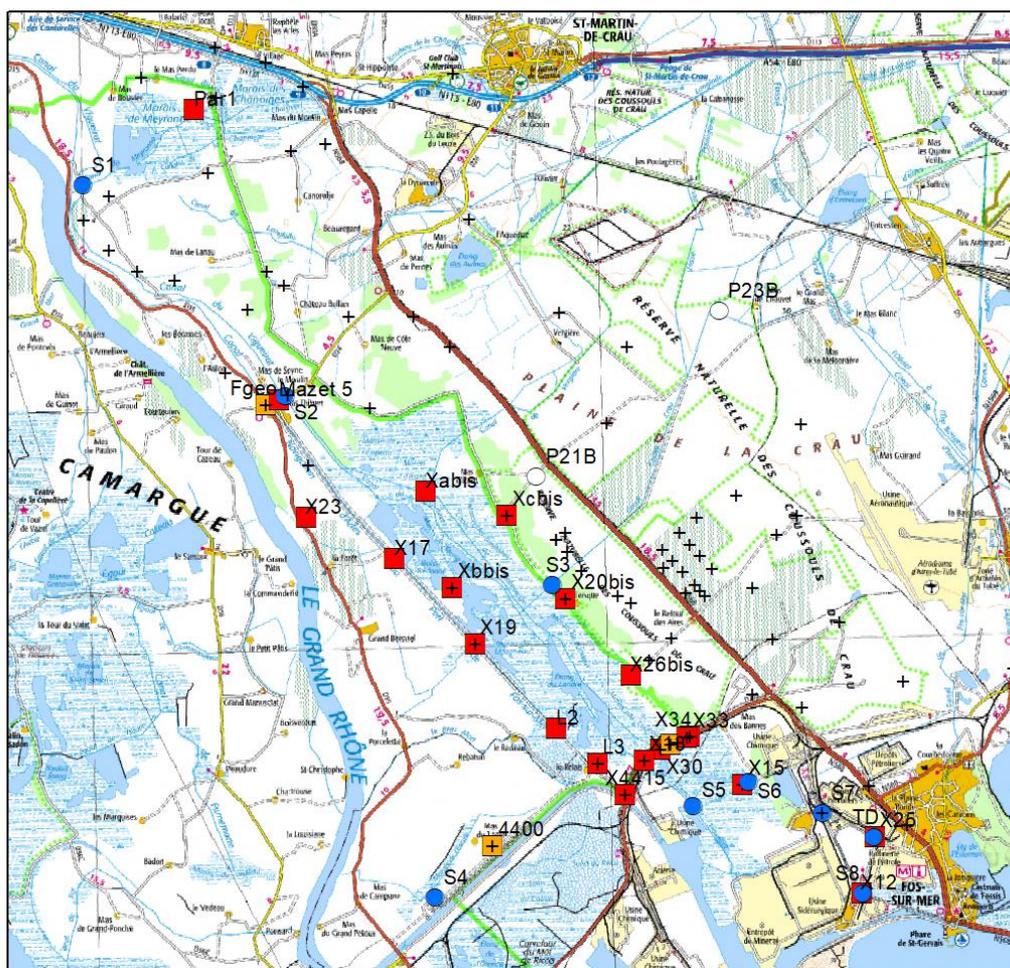


Illustration 4 : Localisation des points de prélèvements sur le fond IGN au 1/100 000.

2.3. TABLEAU ET CARTE DE SYNTHÈSE DU RÉSEAU SIMBA

Le tableau présenté en annexe 2 récapitule l'ensemble des points d'observation utilisés dans cette étude selon le type de réseau décrit précédemment : piézométrie manuelle, piézométrie continue, physico-chimie continue, diagraphie réseau principal ou secondaire (§2.1.1).

Ces informations sont également reportées sur la carte suivante (Illustration 5). Les points de suivis du niveau d'eau de surface du GPMM sont également reportés sur cette carte, car certaines données historiques ont été utilisées dans la suite de l'étude pour comprendre les relations hydrodynamiques entre les canaux et l'aquifère (cf. 0).



Légende

Niveau d'eau

- Suivi eau de surface
- Piézométrie continue
- + Piézométrie manuelle

Réseau SIMBA

- Diagraphies réseau principal
- réseau secondaire

0 1.25 2.5 5 Kilomètres



Illustration 5 : Carte de synthèse du réseau d'observation utilisé dans le projet SIMBA sur le fond IGN au 1/100 000.

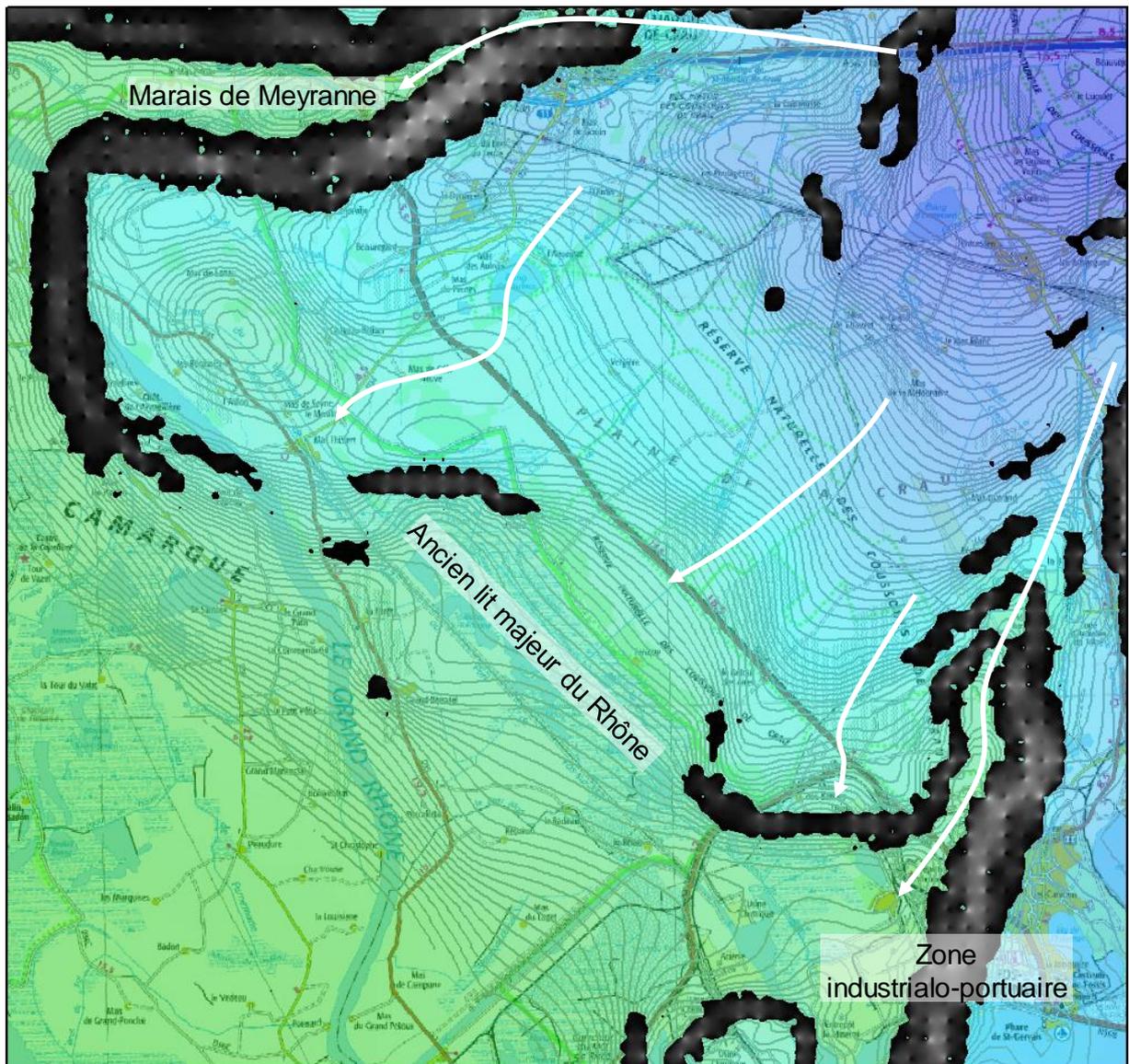
3. Caractérisation de la structure et du fonctionnement de l'aquifère de Crau dans le secteur de la Basse-Crau

3.1. GÉOMÉTRIE DU SUBSTRATUM

Le terme de substratum est ici utilisé pour décrire l'ensemble des formations peu ou non perméables situées à la base de la série des cailloutis plio-quadernaires constituant le réservoir aquifère étudié. Ce substratum est principalement constitué par des formations molassiques, argileuses ou gréseuses du Miocène ou du Pliocène, mais peut localement (secteur de la Roque) être constitué de calcaire Jurassique (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-67606-FR et références associées).

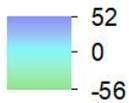
Une étude réalisée en 2004 par le BRGM a permis de reconstituer en trois dimensions la géométrie du toit du substratum (Roure, 2004). Cette donnée spatialisée reste la donnée la plus fiable utilisable dans le cadre du projet SIMBA. Des travaux de mise à jour sont actuellement réalisés par le SYMCRAU dans le but d'améliorer cette géométrie, ce qui pourra permettre d'améliorer les futurs modèles numériques, mais également certains résultats obtenus dans le cadre du projet SIMBA, car des informations disponibles en BSS montrent certaines incohérences avec ce modèle géologique, notamment à proximité de la darse Sud (cf. § 4).

La donnée de 2004 permet de mettre en évidence de fortes variations sur la pente du toit du substratum, dont le rôle sur la répartition de la salinité a déjà été mis en évidence (CERIC, 1977). La carte suivante (Illustration 6) présente la répartition spatiale de la pente du substratum, dont le modelé témoigne d'une forte érosion fluviale précédant la mise en place des dépôts plio-quadernaires. Ces paléo-chenaux organisent les principaux axes de drainage souterrain orientés nord-est/sud-ouest, tandis que les escarpements identifiés vers l'aval le long de l'ancien lit majeur du Rhône ou encadrant les marais de Meyranne au nord ou la zone industrialo-portuaire au sud vont contrôler la dynamique de progression du biseau salé vers les terres.



Légende

Pente du substratum (%) Toit du substratum (mNGF) d'après Roure, 2004



Paléo-chenal

Illustration 6 : Carte de la position du toit du substratum et des secteurs de plus forte pente (> 1 %).

3.2. HYDRODYNAMIQUE - ANALYSE TEMPORELLE

Une base de données regroupant les suivis historiques et les suivis actuels a été compilée dans le cadre du projet SIMBA. Ce paragraphe est dédié à l'étude des chroniques de données ; il s'appuie essentiellement sur les nouvelles données acquises dans le cadre du projet, complété si besoin par des données historiques issues de précédentes études.

3.2.1. Présentation du jeu de données depuis mai 2017

L'illustration 7 présente l'ensemble des données hydrodynamiques du réseau SIMBA au pas de temps horaire (sauf pour X20bis pour lequel le pas de temps est de 2h), complétées par les données du marégraphe de Fos-sur-Mer¹ (cf. Illustration 8) et par les suivis de hauteur du Rhône à la station hydrométrique de Beaucaire (données de la Compagnie Nationale du Rhône, station V7200015). Les dates des deux dernières campagnes piézométriques (Octobre 2017 et Avril 2018) sont également représentées par deux droites verticales.

¹ GPMM / station de Fos-sur-Mer, long. 4.892935, lat. 43.404935.

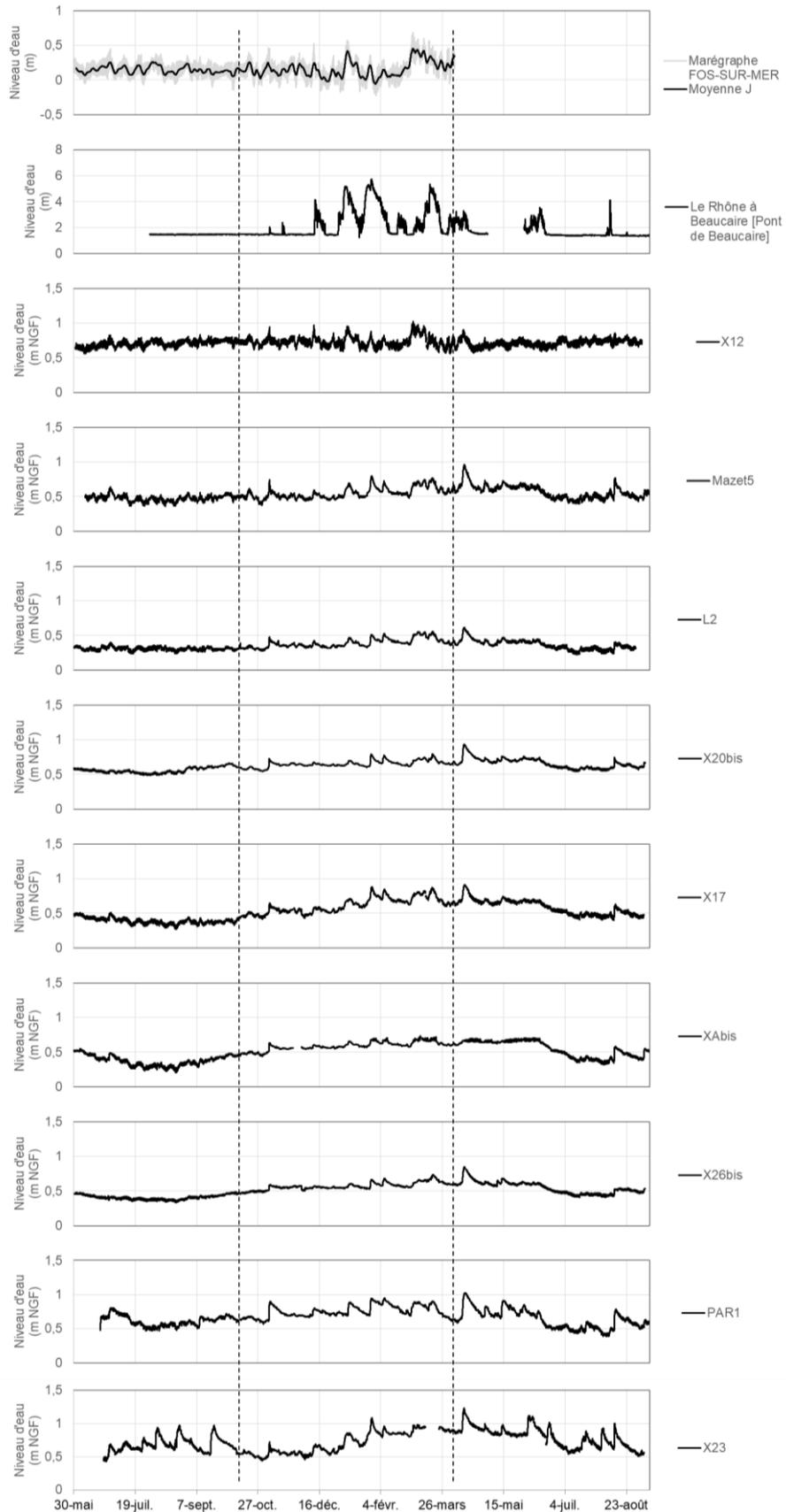


Illustration 7 : Chroniques de données horaires - Les pointillés verticaux représentent les 2 campagnes piézométriques d'octobre 2017 et avril 2018.

3.2.2. Analyse à « long » terme (> 1 cycle hydrologique, pas journalier)

a) *Typologie de comportement hydrodynamique au pas journalier*

L'objectif est de regrouper les piézomètres du réseau SIMBA qui présentent un comportement hydrodynamique similaire. Pour cela, il est proposé d'étudier les relations hydrodynamiques qui s'établissent entre les points du réseau SIMBA et :

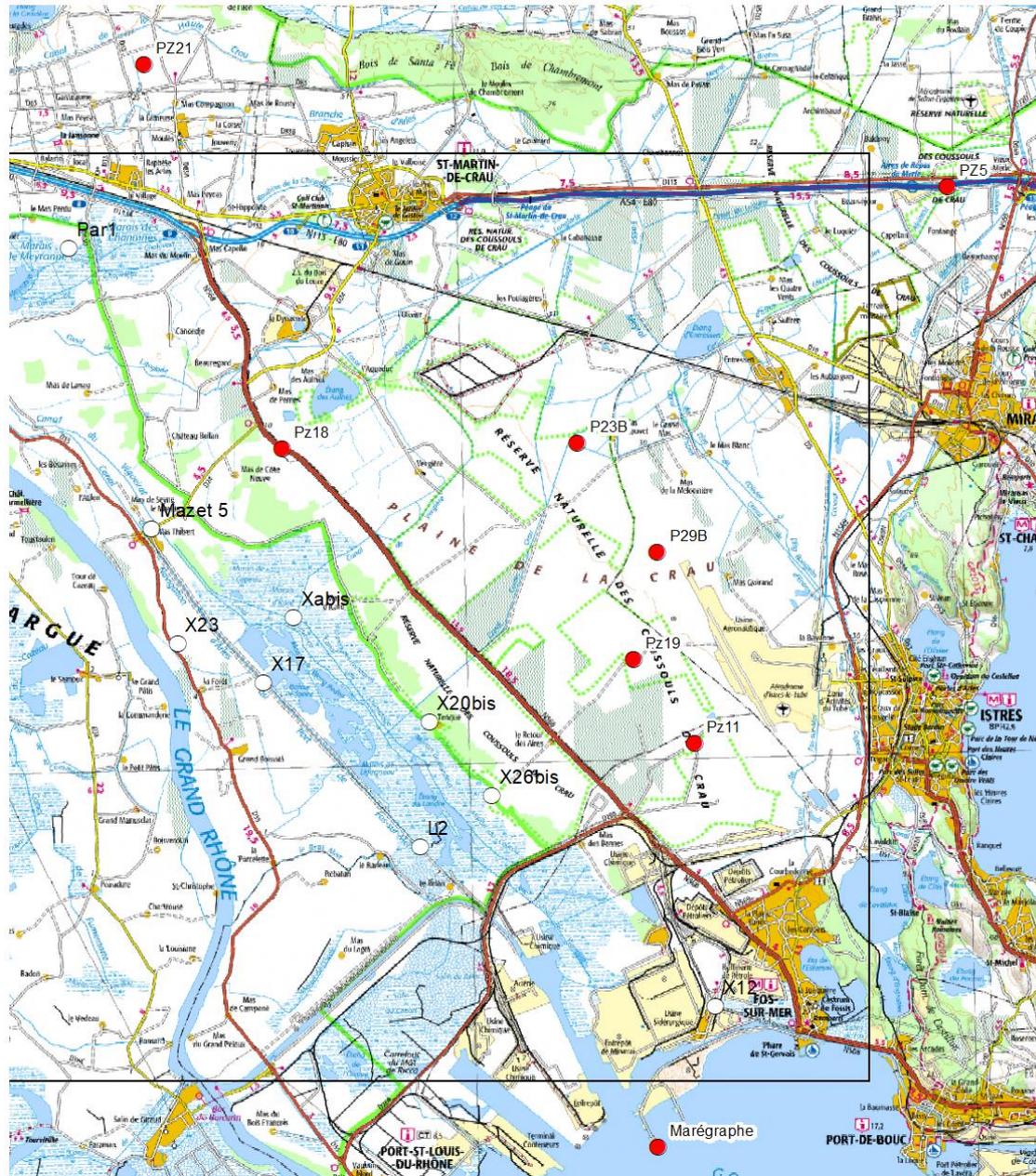
- l'amont hydraulique, soit la nappe de Crau quelques km en amont, suivie notamment par le SYMCRAU (5 points sélectionnés : PZ5, PZ11, PZ18, PZ19, PZ21) et le BRGM² (P29B, P23B), et le Rhône dans le secteur du seuil de Terrin, dont les variations de charges sont déduites des observations disponibles à la station hydrométrique en aval de Beaucaire (Illustration 8) ;
- l'aval hydraulique, soit les canaux de drainage et notamment le canal du Galéjon³, mais aussi la mer à partir des données du marégraphe de Fos (Illustration 8).

L'illustration 9 permet de comparer les évolutions piézométriques journalières mesurées sur le réseau SIMBA avec quelques points de suivis en Crau localisés en amont et présentés sur l'illustration 8. Les niveaux piézométriques, ainsi que les variations saisonnières contrôlées par l'irrigation à partir du printemps (PZ5, PZ21) sont beaucoup plus faibles en basse-Crau.

À cette échelle, il est difficile d'identifier d'éventuelles relations hydrodynamiques, mais il est clair que l'ensemble du réseau SIMBA est caractérisé par des points de suivis piézométriques dont le niveau est stabilisé par la condition limite aval du système à +/- 1mNGF, soit l'altitude de la ligne d'émergence de la nappe au niveau des Laurons et des canaux de drainage de la nappe (canal de colmatage et du Vigueirat à l'aval de Mas Thibert, canal d'Arles à Fos à proximité du barrage anti-sel, cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-67606-FR et références associées).

² Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, code SANDRE 0600000037 (<http://www.adeseaufrance.fr/>).

³ Aucune donnée concomitante exploitable, mais l'analyse à court terme s'appuyant sur le réseau des eaux de surface du GPMM (S1 à S8) permet de caractériser cette relation avec les piézomètres L2 et X12.



Légende

- Suivis SYMCRAU et BRGM complémentaires et marégraphe (GPM)

Réseau SIMBA

- Réseau SIMBA suivis HCT (HT pour X20bis)

Illustration 8 : Localisation des points de mesure piézométriques complémentaires gérés par le SYMCRAU et le BRGM, et position du marégraphe du GPM.

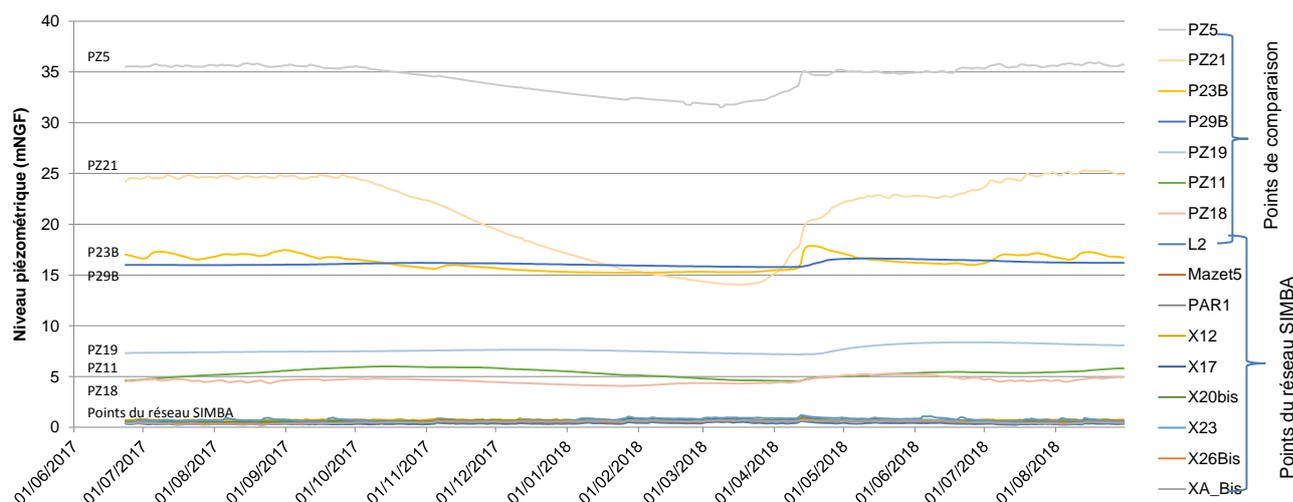


Illustration 9 : Comparaison de la piézométrie journalière mesurée sur le réseau SIMBA avec quelques points de mesure en Crau du réseau du Symcrau (PZ5 - 11 - 18 - 19 - 21) et du BRGM (P23B - 29B).

Deux méthodes d'interprétation des données piézométriques des points du réseau SIMBA ont été utilisées dans le but de regrouper les différents points d'eau selon leur comportement hydrodynamique :

- l'analyse spectrale, dans le but de caractériser les composantes du signal selon leurs fréquences, et ainsi de décrire la variabilité hydrodynamique à l'échelle annuelle, mensuelle ou décadaire ;
- l'Analyse en Composante Principale (ACP), afin de projeter dans un espace à deux dimensions l'ensemble des variables analysées, chaque point d'eau étant considéré comme une variable. La projection des points d'eau sur les deux axes principaux F1 et F2 permet alors de mettre en évidence les points d'eau qui présentent des comportements hydrodynamiques similaires.

L'analyse spectrale est menée en calculant le spectre de densité de variance par transformée de Fourier discrète selon la méthode de Jenkins et Watts (1968). Seuls les résultats relatifs aux composantes saisonnières, mensuelles et décadaires sont présentés sur l'illustration 10. Le point 23B a également été traité à titre de comparaison. D'une manière générale, l'ensemble des points du réseau SIMBA présente de très faibles variabilités et les points sont relativement homogènes entre eux. La composante saisonnière reste un peu plus élevée aux points XAbis, X23 et X17, mais celle-ci est liée à la variabilité naturelle de la recharge, et non à la dynamique de recharge par l'irrigation au printemps (cf. Illustration 9).

Le point X12 présente un comportement hydrodynamique différent, avec de très faibles amplitudes saisonnières, mais des amplitudes mensuelles et décadaires semblables aux autres points. Le point X23 se démarque également par sa plus grande variabilité à l'échelle décadaire qui traduit une dynamique de crue plus régulière. L'illustration 10 présente en effet des évolutions piézométriques au point X23 différentes des autres points en période de basses eaux, soit à partir du mois de mai et jusqu'au mois de septembre, en 2017 et en 2018. Les crues observées sont régulières et ne sont corrélées avec aucun autre suivi. En particulier, les données disponibles à la station hydrométrique du Rhône à Beaucaire montrent qu'il ne s'agit pas d'une recharge par le Rhône, celle-ci pouvant néanmoins intervenir lors des crues de janvier à mars 2018 (Illustration 10).

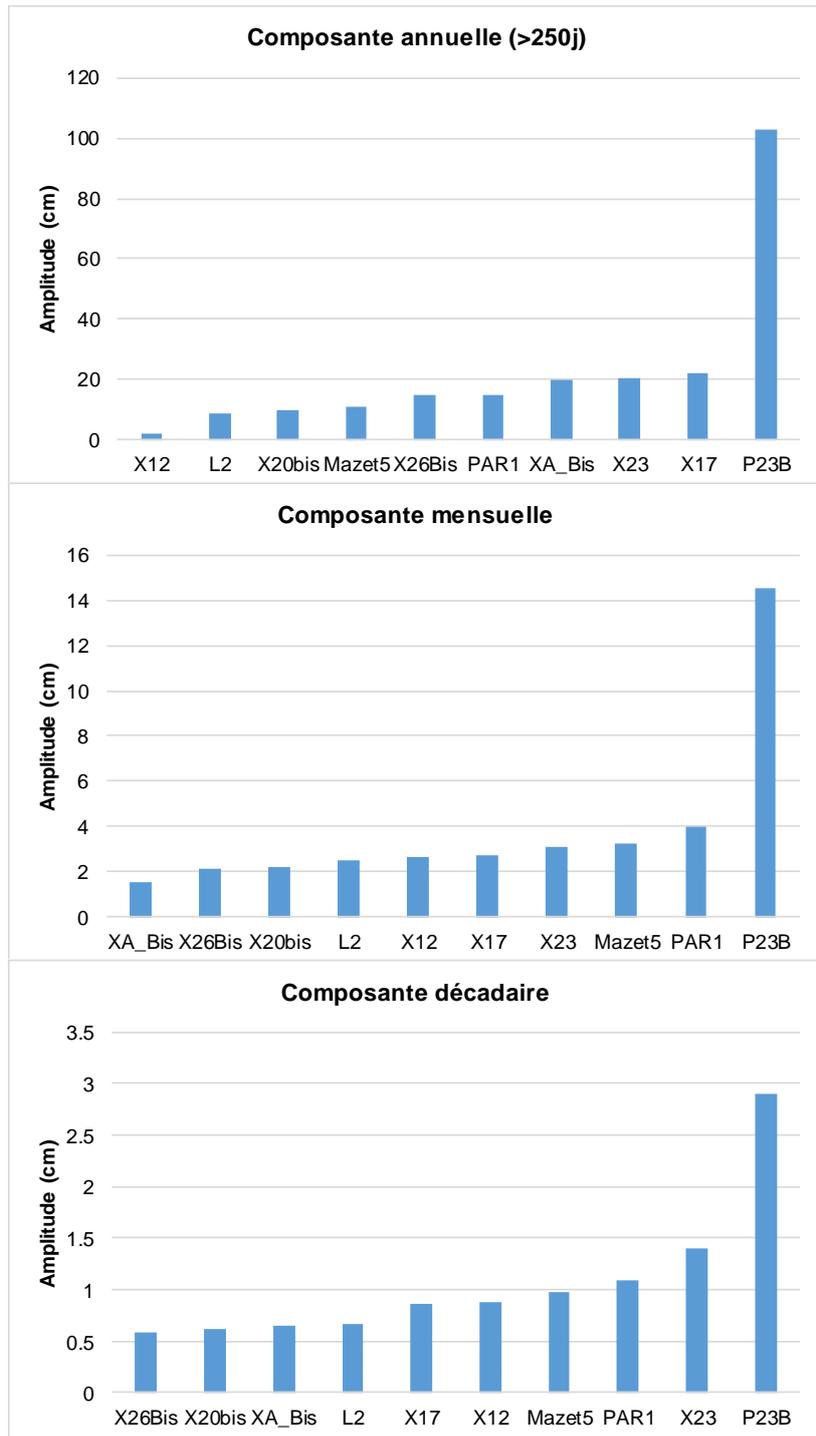


Illustration 10 : Amplitudes des variations piézométriques observées sur les points du réseau de suivi SIMBA pour différentes échelles de temps, comparées aux amplitudes observées au point P23B.

L'ACP présentée sur la figure suivante (Illustration 11) permet de préciser ces observations. La représentation du cosinus carré sur le cercle de corrélation permet d'identifier rapidement les points dont la variance est bien expliquée par les deux composantes F1 et F2 (cosinus carré proche de 1) et qui présentent une dynamique commune (alignement des vecteurs).

L'analyse sur l'ensemble des données piézométriques horaires (Illustration 11A) permet de bien caractériser trois types de comportements : deux types de dynamiques caractérisant l'évolution piézométrique de la nappe de Crau (PZ5, PZ21 et P23B d'une part, PZ18, PZ19 et P29B d'autre part), et l'ensemble des points du réseau SIMBA à l'exception du point X12. Les chroniques piézométriques des points X23 et PAR1 apparaissent également moins bien expliquées par l'ACP. Le focus sur l'ensemble des points du réseau SIMBA (Illustration 11B) permet de bien individualiser le point X12. Enfin, si l'on retire le point X12 de l'analyse, c'est le point X23 qui se démarque des autres points (Illustration 11C).

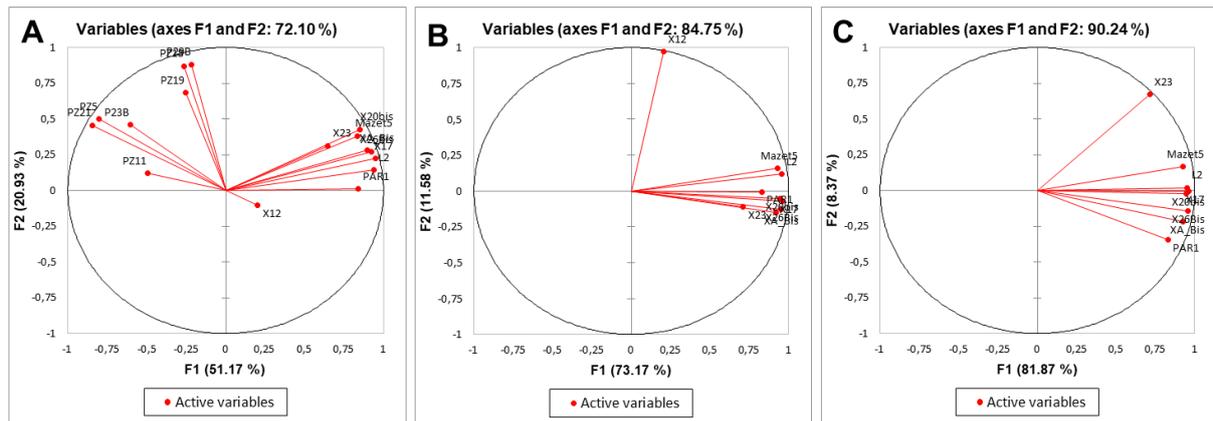


Illustration 11 : Résultats de l'analyse en composantes principales (cosinus carré) réalisées sur l'ensemble des données piézométriques (A), les données du réseau SIMBA seules (B), et les données du réseau SIMBA sans X12 (C).

L'ensemble de ces résultats permet de confirmer que le comportement hydrodynamique de la Basse-Crau observé par le réseau SIMBA est contrôlé par les conditions limites matérialisées par les canaux et les Laurons, ce qui explique la très faible variabilité de la piézométrie à différentes échelles de temps. La variabilité saisonnière observée en Crau en lien avec la dynamique de recharge par l'irrigation n'est plus observable, tandis qu'une faible variabilité saisonnière plus cohérente avec la dynamique de recharge par les précipitations apparaît sur l'ensemble des points, à l'exception du point X12.

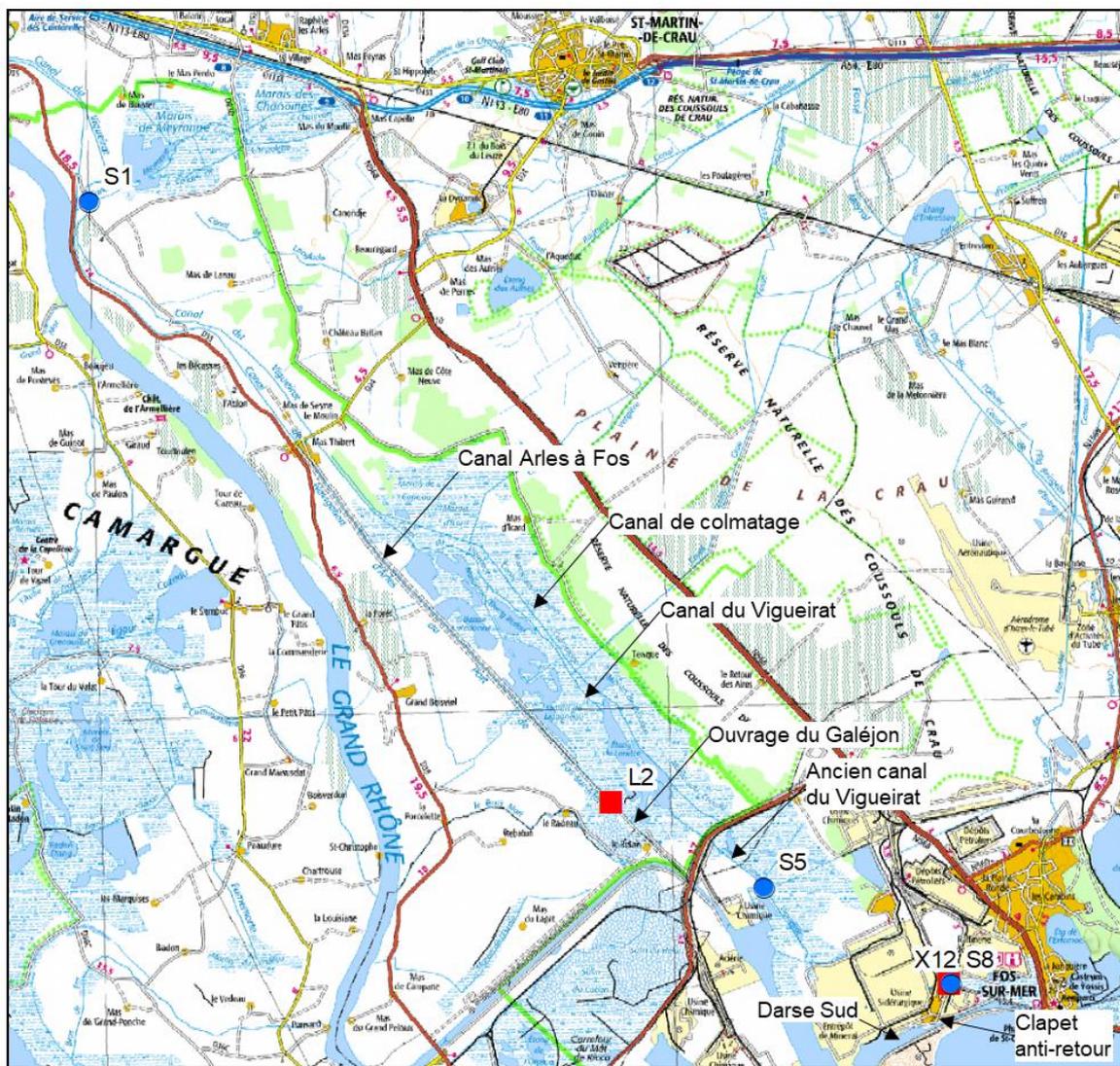
Ainsi, **l'ensemble des points du réseau SIMBA présente un comportement hydrodynamique similaire, à l'exception de deux points :**

- le point **X12** se distingue par un signal piézométrique encore plus amorti, mais selon une dynamique différente. Ce point est probablement contrôlé par une condition limite différente des autres, en lien avec le plan d'eau de la tranchée drainante en aval de la vanne AMYL ;
- le point **X23** présente une plus grande dynamique à l'échelle décadaire, en lien avec une dynamique de recharge différente qui reste inexpliquée, mais qui pourrait simplement traduire la dynamique d'irrigation de ce secteur en été.

3.2.3. Analyse à « court » terme (infra annuel, pas horaire) et conséquences de la marée sur la relation de Ghyben-Herzberg

Une analyse à court terme est menée selon deux objectifs : (i) mieux décrire les relations entre les signaux à l'échelle de la crue pour caractériser les liens entre l'aquifère et les eaux de surface et (ii) caractériser le transfert des ondes de marées au sein de l'aquifère à partir des observations réalisées sur le réseau SIMBA.

Les points dont les données ont été utilisées spécifiquement pour cette analyse sont repris sur l'illustration 12. Sur cette carte sont mentionnés les noms des principaux canaux, ainsi que l'emplacement des clapets anti-retour positionnés à l'exutoire de la tranchée drainante qui n'ont pas été observés sur le terrain mais dont l'existence a été mentionnée par le GPMM. Ces clapets empêchent l'eau de mer de remonter à travers l'aval de la tranchée drainante.



Légende

Origine des données pour l'analyse à court terme

- Piézomètre
- Eau de surface

Illustration 12 : Localisation des points dont les données ont été utilisées pour l'analyse à court terme.

a) Relations hydrodynamiques entre l'aquifère et les eaux de surface

- Relation S1, S5 et L2 et le canal d'Arles à Fos

Le réseau de suivi historique des eaux de surface du GPMM permet tout d'abord de comprendre la propagation d'une onde de crue dans le canal du Vigueirat en amont (stations S1, S2) et en aval de l'étang du Landres (S5, Illustration 12). L'illustration suivante (Illustration 13) présente les enregistrements disponibles au pas horaire à S1, S5 et L2 en 2011.

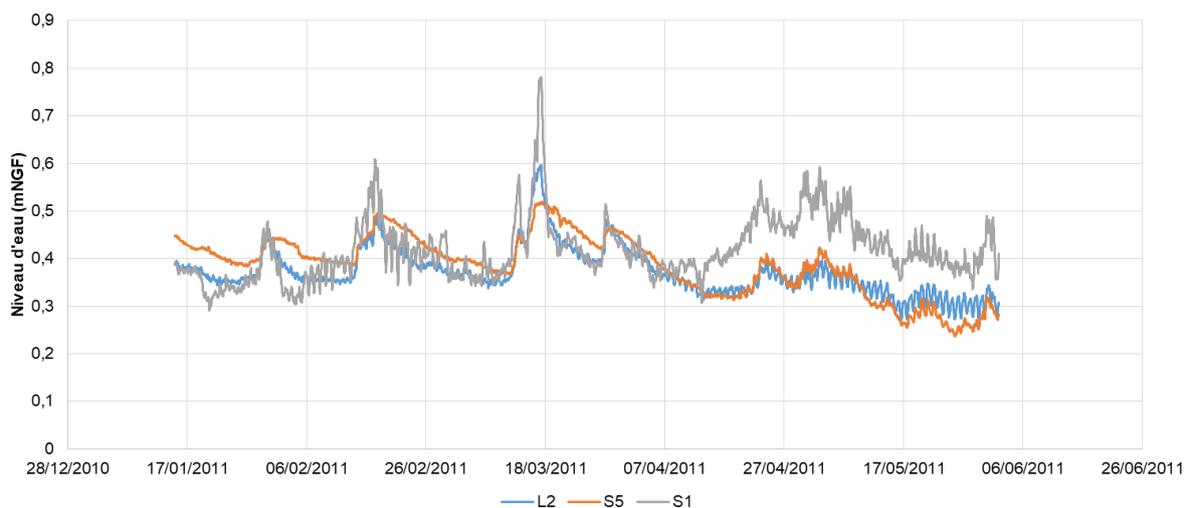


Illustration 13 : Hydrogrammes observées aux stations S1 et S5 comparés à la chronique piézométrique observée à L2.

L'illustration 13 montre que le niveau piézométrique enregistré à L2 correspond à la dynamique d'écoulement de base observé à S1 en période hivernale (hautes eaux). Lors des crues, le niveau des eaux de surface mesuré à S1 dépasse le niveau de la nappe, puis les deux niveaux se stabilisent en décrue. En basses eaux, à partir du mois d'avril sur l'illustration 13, on observe un comportement différent avec un maintien d'un niveau élevé à S1 et une chute du niveau piézométrique qui s'équilibre avec le niveau des eaux de surface en aval (S5). Le maintien d'une charge hydraulique élevée dans le canal au niveau de S1 est probablement lié à la stratégie de gestion des eaux de surface au niveau de l'ouvrage du Galéjon - le lien entre la gestion des eaux de surface par les ouvrages hydrauliques et la variation de charge de la nappe sera abordé dans le cadre d'un projet en cours mené par le GPMM et le BRGM (projet GAMBAS).

L'illustration 14 ci-dessous permet de comparer l'évolution des niveaux d'eau dans le canal d'Arles à Fos et au niveau du piézomètre L2 lors du cycle hydrologique 2014-2015. Ces données montrent également qu'il peut exister une inversion d'écoulement temporaire en crue, et plus durable en basses eaux entre les eaux de surface et la nappe. Ce résultat est cohérent avec le résultat de l'étude menée par Mayer *et al.* (2016) à partir de la signature élevée en ^{222}Rn des eaux du canal.

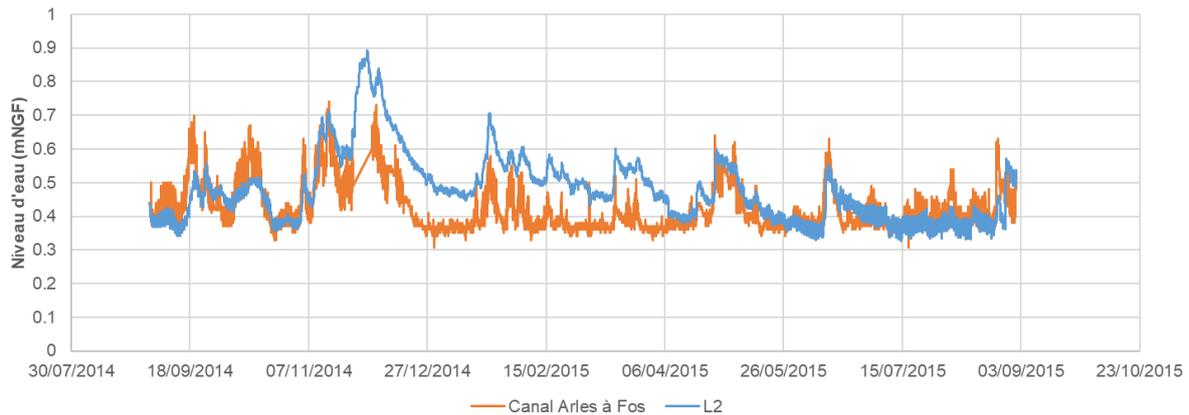


Illustration 14 : Comparaison des niveaux d'eau mesurés dans le canal d'Arles à Fos et au niveau du piézomètre L2 pendant le cycle hydrologique 2014-2015.

Une analyse de corrélation simple et croisée a été menée pour caractériser le transfert des ondes de pression entre le niveau d'eau du canal d'Arles à Fos et le niveau de la nappe mesurée à L2, à partir du jeu de données présentés sur l'illustration 5 au pas de temps de 2 h.

L'analyse de corrélation consiste à calculer le coefficient de corrélation d'un signal par rapport à lui-même (corrélogramme simple R_{XX} ou R_{YY}) ou par rapport à un autre signal (corrélogramme croisé R_{XY}) pour des décalages croissants positifs ou négatifs du pas de temps. Un corrélogramme simple donne une courbe symétrique et n'est représenté que pour les décalages positifs, tandis que le corrélogramme croisé permet d'étudier l'influence du signal d'entrée sur le signal de sortie pour des pas positifs, et inversement pour des pas négatifs.

L'illustration 15 présente les corrélogrammes simples et croisés obtenus. Le corrélogramme simple obtenu à L2 présente des valeurs plus élevées que celui obtenu à partir des données du canal, ce qui est dû au caractère plus inertiel de la chronique de niveau d'eau piézométrique par rapport au niveau d'eau de surface. La composante journalière des marées explique le caractère cyclique du corrélogramme simple de L2, tandis que la composante semi-journalière est également présente sur les niveaux d'eau du canal.

Le corrélogramme croisé présente une allure dissymétrique caractéristique d'une relation causale entre le niveau d'eau du canal et la nappe. Ainsi, les variations de charge du canal se propagent dans l'aquifère, confirmant ainsi le rôle de condition limite exercé par le canal sur l'aquifère. Cependant, on constate que la composante semi-journalière de la marée ne se propage pas dans l'aquifère.

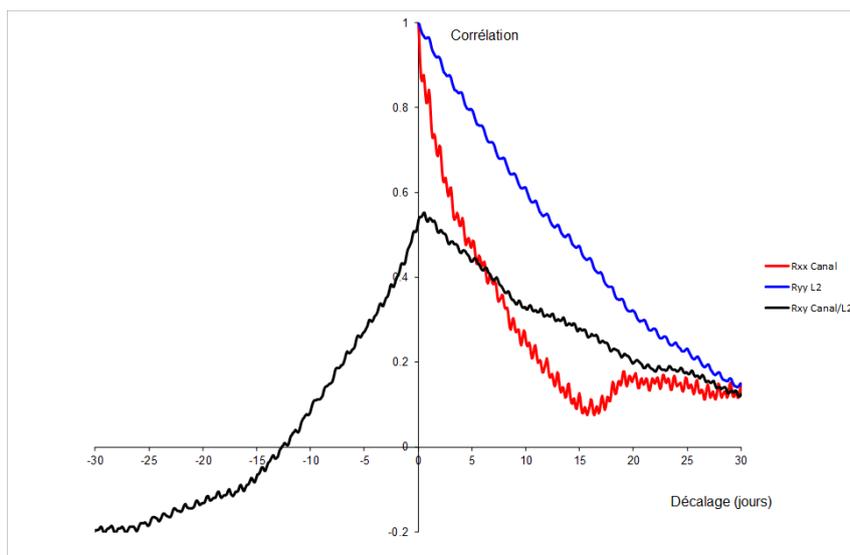


Illustration 15 : Corrélogrammes simples et croisés des chroniques de niveau d'eau du canal d'Arles à Fos et de la piézométrie mesurée à L2 - Période septembre 2014 - septembre 2015 au pas de 2 h.

Une analyse de corrélation simple et croisée a également été menée pour caractériser le transfert de pression et les relations hydrodynamiques entre les eaux de surface en amont et en aval du canal du Vigueirat et la piézométrie de la nappe mesurée à L2.

L'illustration 16 présente les corrélogrammes simples et croisés obtenus sur la période 15 janvier 2011 - 1^{er} juin 2011 au pas horaire.

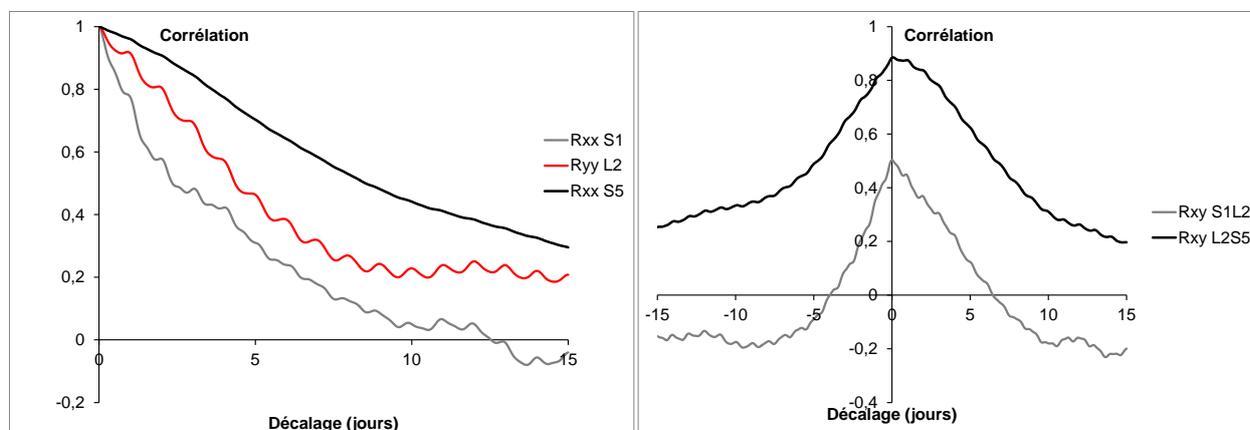


Illustration 16 : Analyse de corrélation simple (gauche) et croisée (droite) des hydrogrammes des stations S1, S5 et L2 au pas horaire entre le 15 janvier 2011 et le 1^{er} juin 2011.

Le corrélogramme simple est utilisé pour décrire la structure temporelle des chroniques et décrire le caractère aléatoire ou inertiel des signaux. Le corrélogramme simple calculé pour L2 présente à nouveau une oscillation périodique liée au signal de marée qui ne se retrouve pas aussi nettement sur les autres corrélogrammes. Ce résultat montre que le signal de marée observé dans le canal du Vigueirat n'influence pas ou peu la piézométrie enregistrée à L2 sur la période Janvier-Juin 2011. Le corrélogramme croisé calculé pour la relation S1-L2 montre une corrélation beaucoup plus faible que celui calculé pour la relation L2-S5, sachant que les formes associées traduisent dans chaque cas une relation causale : le niveau d'eau à S1 influence en partie celui de L2, ce dernier contrôlant fortement le niveau d'eau enregistré à la station S5.

La dynamique du niveau d'eau dans le bras mort du canal du Vigueirat à l'aval (S5) est donc contrôlée par l'aquifère, notamment en basses eaux (Illustration 13). Si la nappe est en équilibre avec le canal du Vigueirat en aval, il apparaît sur l'illustration 13 des périodes où la charge hydraulique mesurée dans le canal est plus élevée, ce qui suggère un transfert d'eau possible depuis le canal vers l'aquifère, à la fois dans la partie amont (S1) et aval (S5).

- **Relation S8-X12**

Une analyse de corrélation a également été menée pour décrire la relation entre le niveau d'eau enregistré dans le tronçon aval de la tranchée drainante dans un canal se déversant dans la mer (station S8) et le point X12 situé à proximité immédiate (Illustration 12).

L'inspection visuelle montre la grande similitude des données (Illustration 17A), confortée sur l'illustration 17B par des corrélogrammes simples très proches et essentiellement contrôlés par les variations tidales, et une corrélation élevée (0.86) et maximale sans décalage entre le signal d'entrée (S8) et le signal de sortie (X12). La piézométrie observée en X12 traduit donc essentiellement l'évolution hydrodynamique de la condition limite, matérialisé par le niveau d'eau à la station S8, celui-ci étant influencé par les flux provenant de la tranchée drainante et par le niveau de la mer. En effet, si les flux de sortie sont contrôlés par des clapets anti-retour au point de rejet dans la darse Sud, les transferts de pression permettent à l'onde de marée de remonter le long du canal.

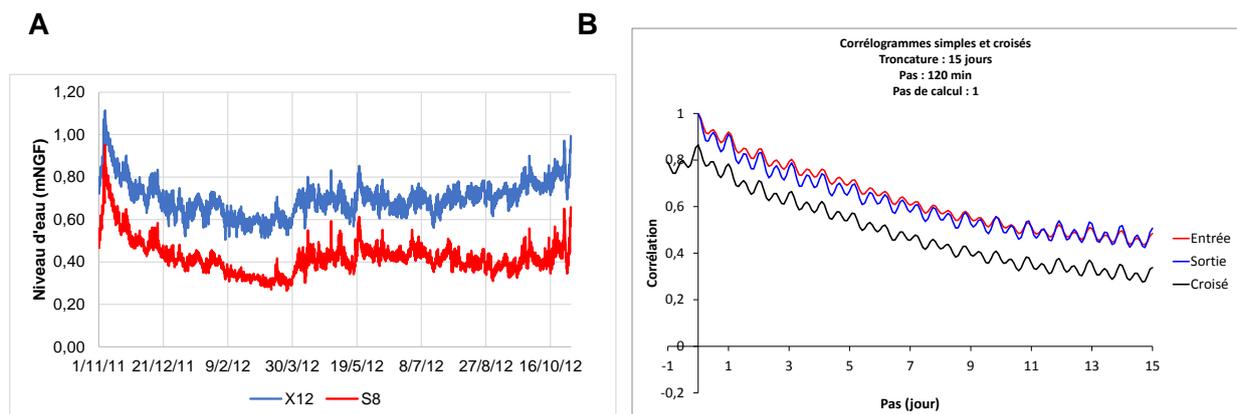


Illustration 17 : Comparaison des chroniques mesurées aux stations S8 et X12 (A) et analyse de corrélation simple et croisée des chroniques des stations S8 et X12 au pas horaire (B) entre le 1^{er} novembre 2011 et le 31 octobre 2012.

b) Propagation du signal de marée dans l'aquifère

L'objectif de cette analyse est d'identifier l'amplitude des différentes ondes de marées observées dans les piézomètres et de les comparer au signal observé en mer pour discuter de l'amortissement ou du déphasage du signal. Le signal de marée est principalement contrôlé par les variations du champ de pesanteur selon la position du soleil et de la lune par rapport à la terre. Les principales composantes journalières sont dénommées O1 (0.93 cpd pour *cycle per day*), P1 et K1 à 1 cpd. Deux principales composantes semi-journalières sont également présentes : M2 (1.93 cpd) et S2 (2 cpd).

Une analyse par transformée de Fourier permet de caractériser l'amplitude de ces composantes sur la chronique de marée enregistrée à la station de Fos-sur-Mer (Illustration 18).

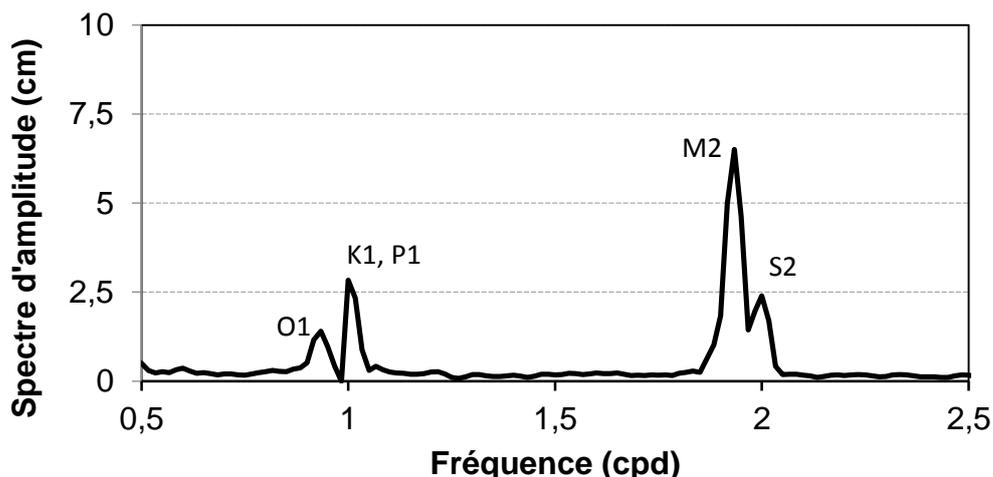


Illustration 18 : Spectre d'amplitude du signal de marée calculé entre le 1^{er} juillet et le 1^{er} octobre 2018, $f_e=3.33 \cdot 10^{-2}$ cpd.

Le tableau suivant (Illustration 19) synthétise les fonctions de gain, de cohérence et les déphasages observés pour chaque composante sur tous les piézomètres du réseau SIMBA. La fonction de gain permet de décrire l'amortissement de l'onde de marée selon chaque composante. La fonction de cohérence permet de savoir si la composante du signal de sortie résulte bien d'un transfert selon une relation linéaire de la composante observée sur le signal de marée. Cette fonction s'interprète comme un coefficient de corrélation pour chaque fréquence du signal et doit donc être proche de 1 pour que les interprétations des autres fonctions soient possibles. Le déphasage permet de déterminer le temps de propagation de la composante.

Nom du point	Composante	O1	P1, K1	M2	S2
PAR1	Gain	0,04	0,43	0,00	0,08
	Cohérence	0,30	0,92	0,08	0,87
	Déphasage (h)	-7,36	10,71	3,35	3,24
X12	Gain	0,43	0,49	0,37	0,35
	Cohérence	0,99	0,98	1,00	0,99
	Déphasage (h)	2,86	3,36	2,08	1,76
Mazet 5	Gain	0,25	0,56	0,16	0,16
	Cohérence	0,89	0,97	1,00	0,95
	Déphasage (h)	2,10	5,25	2,60	2,16
X23	Gain	0,26	0,46	0,06	0,11
	Cohérence	0,87	0,93	0,89	0,86
	Déphasage (h)	3,92	8,13	3,58	2,22
XA bis	Gain	0,02	0,66	0,01	0,15
	Cohérence	0,14	0,95	0,71	0,97
	Déphasage (h)	4,18	8,84	3,58	1,46
X17	Gain	0,10	0,66	0,06	0,17
	Cohérence	0,67	0,93	0,99	0,97
	Déphasage (h)	5,54	8,45	3,25	2,14
X20bis	Gain	0,04	0,32	0,01	0,09
	Cohérence	0,61	0,95	0,67	0,97
	Déphasage (h)	10,90	6,78	4,44	0,47
X26bis	Gain	0,01	0,41	0,01	0,10
	Cohérence	0,21	0,93	0,84	0,98
	Déphasage (h)	9,24	8,46	3,99	1,49
L2	Gain	0,09	0,59	0,05	0,19
	Cohérence	0,55	0,95	0,97	0,97
	Déphasage (h)	7,35	6,20	1,86	0,43

Illustration 19 : Synthèse des résultats de l'analyse spectrale sur les transferts d'onde de marée.

Tous les points montrent une influence tidale nette pour les composantes journalières P1 et K1, avec une atténuation du signal enregistré à la station de Fos variable, entre 0.32 pour X20bis et 0.66 pour XaBis et X17 (cf. Illustration 5). La fonction de cohérence reste toujours élevée (>0.92). Le déphasage est relativement élevé pour cette composante et ne semble pas lié à la proximité de la mer, sauf pour X12 qui présente la valeur la plus faible. Le déphasage le plus important est observé à PAR1, ce qui peut cette fois s'expliquer par son plus grand éloignement. La composante semi-journalière est nettement plus atténuée.

L'illustration 20 présente les amplitudes cumulées pour les principales composantes du signal de marée. Elle met en évidence un signal plus élevé au point X12, mais également à Mazet 5. On ne retrouve donc pas de lien direct entre l'atténuation du signal et la distance du point à la mer, ce qui suggère que le contact mer/aquifère n'est probablement pas le seul lieu de transfert de l'onde de marée. Il faudrait analyser le signal de marée dans les différents canaux, en amont et en aval du barrage anti-sel pour mieux comprendre l'origine et la propagation de ce signal. Des précisions seront apportées dans le cadre du projet GAMBAS sur les transferts de pression et de masse entre les canaux, la mer et l'aquifère à proximité du barrage anti-sel, ainsi que sur l'impact de la gestion hydraulique des ouvrages du GPMM (barrage anti-sel et Galéjon) sur la propagation des ondes (surcotes ou marées) depuis la mer.

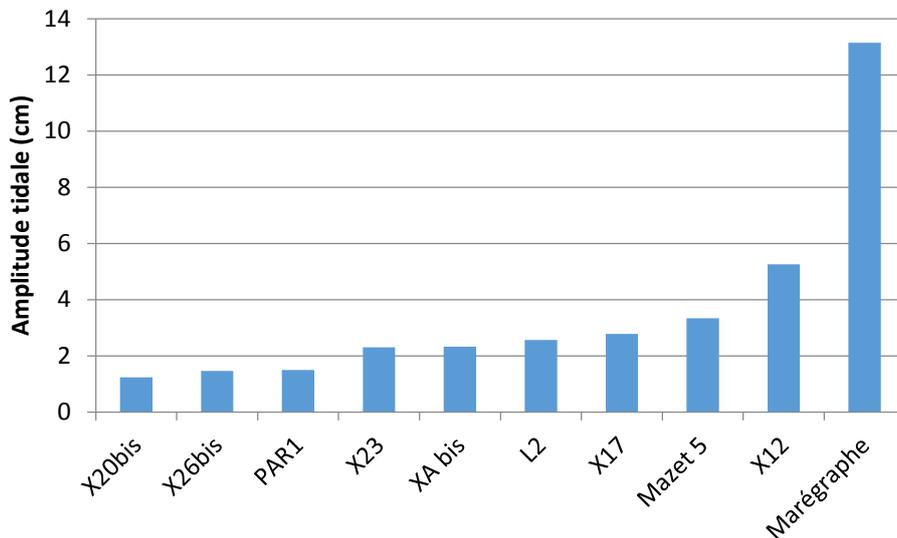


Illustration 20 : Amplitudes cumulées du signal de marée observées sur les piézomètres du réseau SIMBA selon les composantes O1, K1, P1 M2 et S2 comparées à celle du niveau marin mesuré à la station de Fos.

Le point X12 est le seul piézomètre où un transfert de toutes les composantes de marée est observé. La cohérence est très élevée pour chaque composante, ce qui traduit une relation hydraulique parfaite avec la mer. L'amplitude de la marée y est cependant plus faible, avec une atténuation d'un facteur 0.4, et le déphasage reste relativement élevé (+/- 2h). Cependant, si l'on considère que le signal de marée provient des variations tidales dans le canal, qui correspond au tronçon aval de la tranchée drainante non contrôlé par le seuil de la vanne AMYL, les données observées à la station S8 montrent que la fonction de gain est en réalité légèrement supérieure à 1 pour toutes les fréquences qui caractérisent la marée (Illustration 21). Le déphasage associé est dans ce cas nul (inférieur à 1h pour toutes les composantes de la marée).

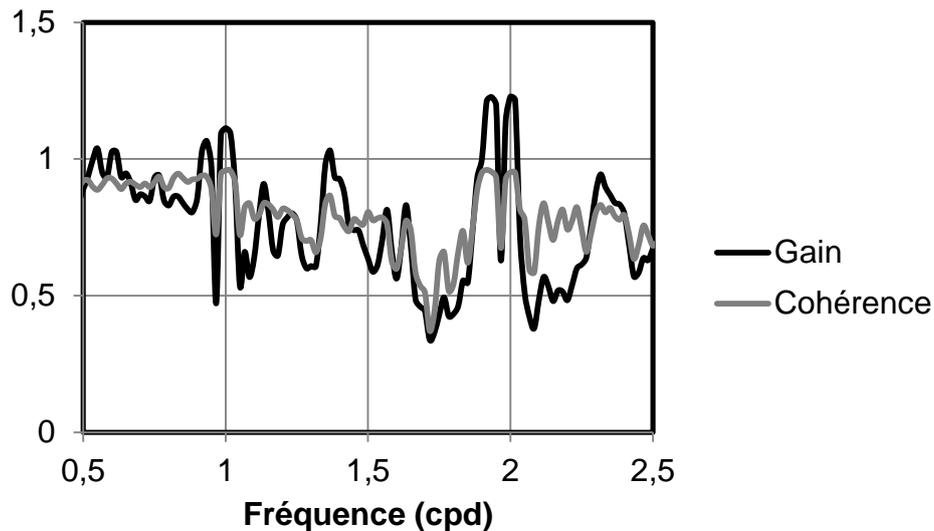


Illustration 21 : Fonction de gain et de cohérence calculée pour la relation S8-X12 entre le 1^{er} novembre 2011 et le 31 octobre 2012, $F_e=1.66.10^{-2}$ cpd.

Ainsi, le signal de marée observé à la station de Fos surestime la composante tidale qui influence l'aquifère. **Les mesures réalisées juste en aval du barrage anti-sel par le GPMM doivent être utilisées pour mieux identifier le transfert des ondes de marée qui influencent la piézométrie de tous les autres points du réseau SIMBA.** Ce travail sera précisé dans le cadre du projet GAMBAS.

c) Généralisation de la loi de Ghyben-Herzberg au cas d'un niveau d'eau salé variable

La loi de Ghyben Herzberg a été appliquée avec succès en Basse-Crau pour comprendre la position de l'interface salée (Dellery *et al.*, 1964, CERIC, 1977). Plus précisément, en adoptant le concept de diffusion selon la verticale (transport hydrodispersif 1D selon Cooper *et al.*, 1964), le concept de Ghyben-Herzberg permet de décrire la position du mélange constitué de 50 % d'eau douce et de 50 % d'eau de mer, soit une eau de salinité 20 dans le contexte de la Basse-Crau (cf. rapport BRGM/RP-67606-FR et Illustration 29, § 3.4.3).

La relation théorique qui lie la position de l'interface $S=20$ à la charge d'eau douce peut s'écrire de manière simplifiée sous la forme :

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \times h = \gamma \times h$$

Équation 1 : Relation de Ghyben-Herzberg.

Avec z la profondeur de l'interface par rapport au niveau marin, h la charge d'eau douce par rapport au niveau marin, et γ un coefficient qui dépend de la densité de l'eau douce ρ_f et de l'eau salée ρ_s . γ est égal à 39 dans le cas de l'intrusion saline de Basse-Crau (rapport BRGM/RP-67606-FR).

Cette relation reste très simple à manipuler tant que le niveau marin est stable et qu'il constitue le repère d'altitude pour exprimer la piézométrie. Ainsi, une variation dh de la piézométrie va engendrer une variation γdh de la profondeur de l'interface, soit une variation de $-\gamma dh$ de sa position par rapport au niveau marin considéré comme constant.

En posant $H=-z$, la variation de la position de l'interface H pour une variation de charge d'eau douce h est donnée par :

$$\frac{dH}{dh} = -\gamma$$

Équation 2 : Relation entre les position de l'interface (H) et de la surface piézométrique pour un niveau d'eau salé constant.

La généralisation de cette loi pour une référence d'altitude arbitraire s'écrit :

$$h_s - H = \gamma \times (h_f - h_s)$$

Équation 3 : Relation de Ghyben-Herzberg généralisée.

Avec h_f la charge d'eau douce, h_s la charge d'eau salée et H la position de l'interface. On retrouve bien la formulation classique de la relation de Ghyben-Herzberg pour $h_s=0$.

On pose $g=dh_f/dh_s$ le rapport entre la variation de charge d'eau douce induite par la variation de charge d'eau salée et la variation de charge d'eau salée. g correspond à l'amplitude de la fonction de gain qui décrit le transfert du signal du niveau marin vers le signal piézométrique.

Il vient alors :

$$dH = dh_s[1 - \gamma \times (g - 1)] = dh_s \times \frac{\rho_s - g\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

Équation 4 : Relation entre la variation de la position de l'interface (dH) et la variation de la charge du plan d'eau salé (dh_s).

- pour $g=0$, on se retrouve dans le cas d'une variation de charge d'eau salée sans modification de la piézométrie ;
- pour $0 < g < 1$, la relation entre dH et dh_s est linéaire et le rapport entre dH et dh_s va varier entre $1+\gamma=40$ ($g=0$) et 1 ($g=1$) ;
- pour $g=1$, la variation de la charge d'eau salée est égale à la variation d'altitude de l'interface qui évolue dans le même sens. La profondeur de l'interface par rapport au plan d'eau salé ne varie donc pas (cela correspond à un changement de repère) ;
- pour $g=\rho_s/\rho_f \approx 1.025$, la variation de charge d'eau salée est contrebalancée par l'augmentation de la charge d'eau douce, et l'interface salée reste stable ($dH=0$) ;
- pour $g > \rho_s/\rho_f$, la remontée du niveau marin entraîne une remontée suffisamment importante du niveau d'eau douce pour que l'interface salée s'approfondisse, et inversement lors de la baisse du niveau marin, ce cas correspond à une mise en charge de l'aquifère en réponse à la diminution du flux sortant à la limite (effet de barrage hydraulique).

Les observations réalisées sur les piézomètres L2, X26bis, et dans une moindre mesure PAR1 montrent que la salinité varie inversement avec la piézométrie en réponse aux marées (cf. Illustration 22), tandis que les observations réalisées à X17 montrent une relation synchrone (cf. Illustration 23). De telles relations systématiques n'apparaissent pas à X12, X23 ou XaBis. Pour le point X12, les variations périodiques de salinité ne sont pas corrélées aux variations périodiques de la charge, tandis que les observations réalisées dans les piézomètres X23 ou XaBis ne permettent pas d'identifier d'évolutions cycliques de la salinité.

Ainsi, la marée induit des variations de charge d'eau douce mesurées dans les piézomètres ; ces variations de charge d'eau douce traduisent :

- le transfert de pression depuis la mer (ou les canaux salés) jusqu'au piézomètre. Ce transfert dépend des propriétés hydrodynamiques du milieu (diffusivité, anisotropie verticale etc.) et de la distance entre le piézomètre et le point d'application de l'onde de marée dans l'aquifère ;
- la réponse hydrodynamique de l'aquifère liée à une répartition des flux différente, en lien avec la variation du niveau de base qui modifie les flux sortants et/ou les gradients hydrauliques.

La combinaison de ces deux phénomènes explique la variabilité de la charge d'eau douce observée dans le piézomètre. Ainsi, dans le cas de L2, une hausse de la piézométrie liée à la marée va entraîner un approfondissement de l'interface salée (Illustration 22) : Le rapport g (cf. Équation 4) égal au rapport entre la variation de charge d'eau douce et la variation de charge d'eau salée est supérieur à ρ_s/ρ_f

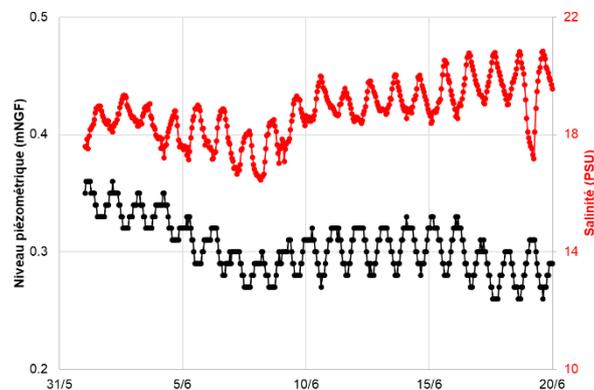


Illustration 22 : Évolution comparée du niveau piézométrique et de la salinité au piézomètre L2.

Au contraire, pour X17, la hausse de la charge d'eau douce reste faible par rapport à la hausse de charge d'eau salée (cette fois $g < \rho_s/\rho_f$, cf. Équation 4), et une hausse de la piézométrie liée à la marée va entraîner une remontée de l'interface salée, et donc une augmentation de la salinité mesurée par la sonde. Pour ce point, l'évolution de la salinité avec la profondeur n'est cependant pas très bien connue puisque l'ouvrage n'est pas assez profond pour atteindre l'iso salinité 20.

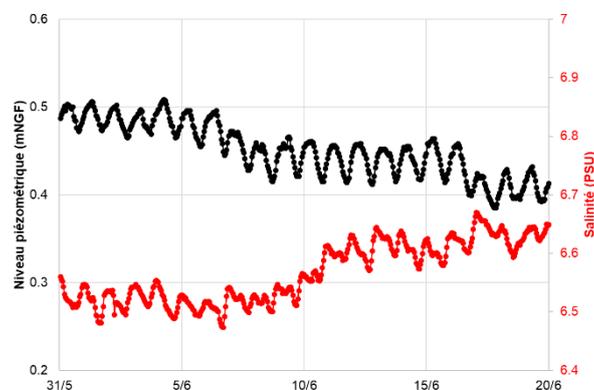


Illustration 23 : Évolution comparée du niveau piézométrique et de la salinité au piézomètre X17.

Une autre hypothèse serait que le signal de marée se propage dans les canaux en amont, et qu'il s'agisse finalement de la réponse de l'aquifère à une perturbation d'un plan d'eau douce en équilibre avec l'aquifère, éventuellement modifiée par la stratégie de gestion du barrage anti-sel. Dans ce cas, la relation simple de Ghyben-Herzberg doit s'appliquer (Équation 1).

L'approche théorique simplifiée présentée dans ce paragraphe permet de comprendre que le signal de marée induit des variations piézométriques qui ne pourront pas être facilement exploitées pour calculer la position de l'interface salée. Une mesure concomitante du signal de marée sur les nappes salée et douce est donc nécessaire pour bien comprendre le déplacement vertical de l'interface salée lors de la marée. Des dispositifs permettant de suivre la charge d'eau salée indépendamment de la charge d'eau douce dans un même piézomètre avait été imaginés lors des études « Coin Salé » des années 70. **L'idéal serait aujourd'hui de disposer d'un ouvrage multi-crépiné isolant par packer les deux niveaux, ou d'un doublet de piézomètres en flûte de pan pour caractériser de manière indépendante la variation cyclique du niveau salé en profondeur et celle du niveau d'eau douce en surface.**

3.2.4. Conclusion

L'analyse des chroniques piézométriques du réseau SIMBA montre que **l'ensemble des piézomètres présente un niveau d'eau contrôlé par une condition limite de charge définie par l'altitude des laurons et/ou de la ligne d'eau des canaux**, et notamment le canal du Vigueirat en aval de Mas Thibert. La **dynamique d'écoulement du canal du Vigueirat apparaît contrôlée par l'hydrodynamique souterraine** : la plupart du temps, **la nappe alimente le canal** qui constitue une limite à potentiel imposée, mais une recharge de l'aquifère par le canal est théoriquement possible sur la base des différences de charge observées entre la station S1, S5 et le piézomètre L2, notamment si l'écoulement des eaux de surface se retrouve limité au niveau de l'ouvrage du Galéjon et provoque une mise en charge de l'hydrosystème de surface. Un comportement identique est observé pour la relation entre l'aquifère et le canal d'Arles à Fos.

Les suivis réalisés au piézomètre X23 à proximité du Rhône montrent une évolution différente en basses eaux, qui indique probablement une influence anthropique (irrigation). Les suivis réalisés en aval de la tranchée drainante au X12 montrent une évolution de la piézométrie parfaitement contrôlée par le niveau d'eau du canal connecté à la mer. La **variabilité saisonnière hautes-eaux/basses-eaux reste faible mais visible sur la plupart des points, avec une alternance en cohérence avec le climat, et donc non influencée par l'irrigation en Crau, sauf pour le piézomètre X23.**

Le **signal de marée** se propage dans l'aquifère et induit des variations piézométriques journalières et semi-journalières observables sur tous les points du réseau. Ces variations traduisent la propagation de l'onde dans le milieu souterrain, probablement facilitée par le creusement de la darse n° 1 et le canal Rhône-Fos, mais traduisent également l'influence des variations de charge des canaux hydrauliquement connectés à l'aquifère, ainsi que la réorganisation des flux d'eau douce dans l'aquifère en réponse à la variation du niveau de base. **Ces variations de charge d'eau douce dans l'aquifère sont donc en partie induites par une variation de la charge d'eau salée, ce qui complique l'utilisation de la loi de Ghyben-Herzberg et peut induire un biais sur le calcul de la position théorique de l'interface à partir d'une donnée ponctuelle.**

Les nouvelles données hydrodynamiques acquises dans le projet, complétées par des données antérieures au projet mettent donc en évidence la **diversité des forçages** qui contrôlent l'évolution spatiale et temporelle de la piézométrie en Basse-Crau :

- influence des **irrigations** (X23 et recharge de la nappe de Crau) ;
- influence de la **recharge naturelle** qui modifie la charge au niveau des conditions aux limites matérialisées par les laurons, les canaux de drainage (notamment le canal de Colmatage et du Vigueirat en aval de Mas Thibert) et le canal d'Arles à Fos à proximité du barrage anti-sel ;
- influence de la **marée**, qui influence directement la nappe ou indirectement via le transfert par les canaux.

3.3. HYDRODYNAMIQUE – CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

3.3.1. Objectifs

La relation de Ghyben-Herzberg permet de proposer une profondeur d'interface salée au-delà de l'ordre de 40 m de profondeur pour un niveau piézométrique proche de 1 m NGF, sachant que le substratum est le plus souvent atteint vers 20 à 30 m de profondeur. Il est donc nécessaire de caractériser le plus précisément possible l'évolution spatiale de la piézométrie pour les faibles valeurs (< 4 m NGF). Cet objectif n'était pas celui visé par les campagnes piézométriques précédentes. Trois nouvelles campagnes piézométriques ont donc été réalisées par le SYMCRAU dans le cadre du projet SIMBA pour y répondre et tenter de décrire la variabilité saisonnière des niveaux d'eau.

3.3.2. Méthode

Le nombre de points d'observation varie légèrement d'une campagne à l'autre (74, 75 et 69 points mesurés) mais reste suffisant pour décrire selon un maillage de 250 m la piézométrie le long du secteur d'intérêt. Les relevés ont été réalisés sur 2 jours consécutifs, sans qu'une correction de dérive temporelle ne soit nécessaire ; l'effet de la marée sur la mesure n'a pas été pris en compte, car ceci aurait nécessité pour chaque campagne et pour chaque point de mesure de connaître l'heure exacte du relevé et l'amplitude et le déphasage du signal de marée. Le nivellement des points a été réalisé par le BRGM lorsqu'aucune donnée fiable de nivellement n'était disponible. Une précision de l'ordre du cm (< 5 cm) a été obtenue sur les nouveaux points nivelés.

La méthode d'interpolation retenue est la méthode du krigeage, qui permet de contrôler par le choix d'un modèle mathématique le type d'interpolation spatiale le plus adapté aux données tout en proposant une spatialisation de l'écart-type de la donnée interpolée. L'écart-type de krigeage est un indicateur de la précision de l'estimation qui quantifie la dispersion possible de la valeur vraie autour de la valeur estimée. Il ne dépend que du modèle de variogramme et des points d'observations. Une valeur seuil définie pour l'écart-type permet ainsi d'isoler facilement le domaine où l'interpolation sera considérée comme fiable. Cette valeur seuil dépend du choix du modèle mathématique permettant de reproduire le variogramme empirique spécifique à chaque campagne piézométrique, si bien qu'il n'a pas été possible de conserver une valeur seuil identique pour chaque carte. Il s'agit donc d'un choix arbitraire ajusté pour chaque carte.

Cette méthode d'interpolation a surtout l'avantage de permettre d'introduire des données relatives aux conditions limites de l'aquifère, et ainsi valoriser les connaissances sur les conditions limites de l'aquifère :

- la cote sol issue du MNT 5 m de l'IGN a été retenue comme condition limite au niveau :
 - de la zone de Laurons connues dans les marais de Meyranne au Nord ;
 - du Rhône à proximité du seuil de Terrin et en aval de celui-ci pour tenir compte de la proximité des cailloutis ;
 - dans le canal du Vigueirat, de colmatage et d'Arles à Fos à proximité de l'étang du Landres ;
 - à l'extrême aval du canal Centre Crau et du canal de Vergière.
- la cote théorique à 1.30 m NGF a été retenue pour la tranchée drainante.

La sélection de ces points résulte d'une interprétation géologique pour le contact supposé avec le Rhône au niveau du seuil de Terrin, et de la synthèse des observations réalisées sur la piézométrie de la nappe de Crau lors des aménagements portuaires. La baisse de la piézométrie observée lors de la réalisation du canal Rhône-Fos justifie de localiser des exutoires de la nappe à ce niveau (cf. rapport intermédiaire BRGM/RP-67606-FR). Dans sa partie aval, le canal du Vigueirat, comme le canal de colmatage est un canal de drainage de la nappe de Crau (Dellery *et al.*, 1964). Il présente un fond supposé colmaté mais qui assure le drainage des zones de marais où s'observent les principales émergences localisées de la nappe (Dellery *et al.*, 1964). La cote du plan d'eau de ce canal constitue dès lors la condition limite qui contrôle l'altitude du plan d'eau des marais, et donc le flux des Laurons alimentant ces marais. Par ailleurs, la géométrie de ce canal a été précisée pour évaluer l'impact du curage du canal sur la propagation des crues (EGIS, 2007). Cette étude montre que le canal du Vigueirat présente un fond vers -1.3 m NGF à proximité du point XaBis où le toit des cailloutis s'observe à -2.13 mNGF, recouvert par des formations limono-sableuses (BCEOM, 2007 et ERG, 2010). La faible épaisseur (<1m) de cet « écran » présentant un faciès hétérogène plus ou moins sableux peut également permettre le drainage de la nappe par le fond du canal. Les relations hydrauliques entre le canal du Vigueirat et l'aquifère de Crau seront étudiées plus en détails dans le cadre du projet GAMBAS.

On considère ainsi que la cote sol définie sur ces points (en dehors de la tranchée drainante) correspond à la charge hydraulique. La campagne de Mars 2017 a été utilisée pour tester la sensibilité de l'interpolation à l'introduction de ces conditions limites. La liste des points définissant les conditions limites est reportée en annexe 6.

3.3.3. Résultats et interprétations

La figure suivante (Illustration 24) compare la carte obtenue pour la campagne de Mars 2017 avec (A) et sans (B) l'utilisation des conditions limites, en n'affichant que les segments d'iso-lignes considérés comme fiables à partir de la valeur d'écart-type de krigeage. Les conditions limites sont représentées sur les cartes par des points, mais elles sont en réalité considérées comme continues pour une même condition limite : par exemple, l'ensemble des points matérialisant la tranchée drainante correspond à la succession des nœuds définissant la même condition aux limites continue à 1.30 m NGF. La prise en compte des conditions limites permet de reproduire une évolution plus cohérente à proximité du canal Rhône-Fos et augmente légèrement la piézométrie à proximité du Rhône, ce qui permet d'observer des niveaux piézométriques plus proches de ceux réellement observés en Camargue dans ce secteur (de Montety, 2008). Enfin, l'influence de la prise en compte par une charge imposée à 1.30 m NGF de la tranchée drainante au sud-est de la carte n'est pas perceptible.

Il semble donc que la prise en compte de ces conditions limites améliore l'interpolation, sans générer de résultats aberrants à cette échelle. Celles-ci seront donc conservées pour l'élaboration de toutes les cartes.

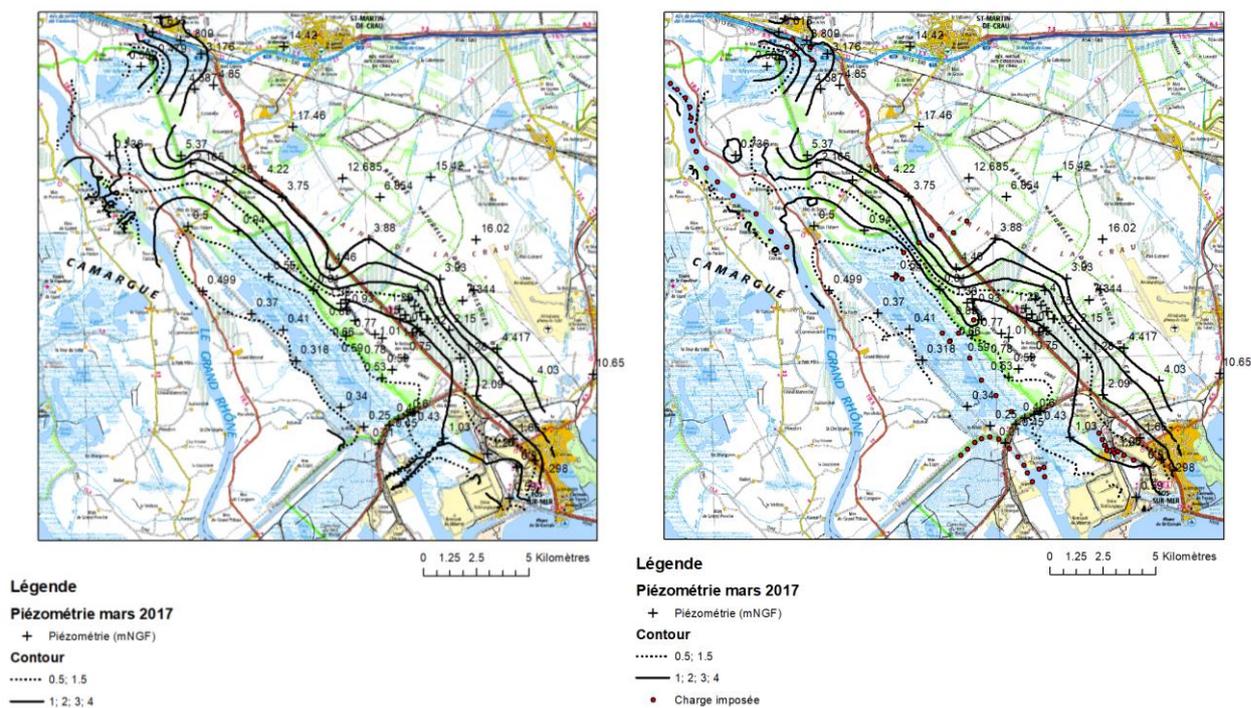


Illustration 24 : Cartes piézométriques obtenues en Mars 2017 par krigeage sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des conditions limites de charges imposées.

La figure suivante (Illustration 25) présente les cartes issues des deux autres campagnes d'octobre 2017 (à gauche) et avril 2018 (à droite), celles-ci étant également positionnées sur les chroniques de l'illustration 7. Ces 2 campagnes présentent des conditions hydrologiques contrastées, avec des niveaux piézométriques sensiblement plus bas en octobre 2017 par rapport à ceux observés en avril 2018, notamment dans le secteur de Mas-Thibert, mais qui restent comparables en amont de la tranchée drainante. Par ailleurs, l'ajout de point d'observation à proximité des marais de Meyranne au nord-ouest en avril 2018 permet de mieux contraindre l'interpolation de la piézométrie dans ce secteur.

La carte obtenue en avril 2018 permet de bien mettre en évidence l'existence d'une dépression piézométrique qui coïncide avec la dépression du Vigueirat, drainée par le canal d'Arles à Fos et par ses contributeurs jusqu'à la darse n°1. Cette dépression piézométrique permet ainsi de drainer les eaux en provenance de la Crau, mais aussi celles provenant de la partie amont de la Camargue, comme le suggérait l'esquisse piézométrique proposée par de Montety (2008) en tenant compte d'une correction de salinité sur le calcul des gradients hydrauliques pour cette partie salée de l'aquifère.

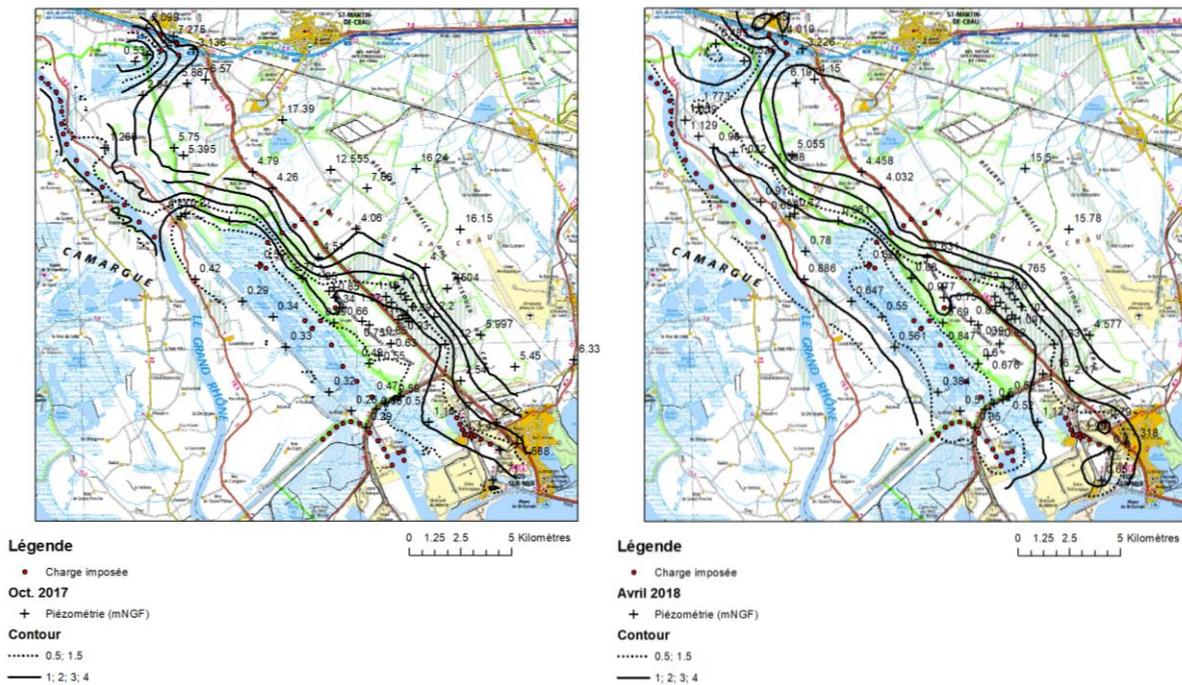
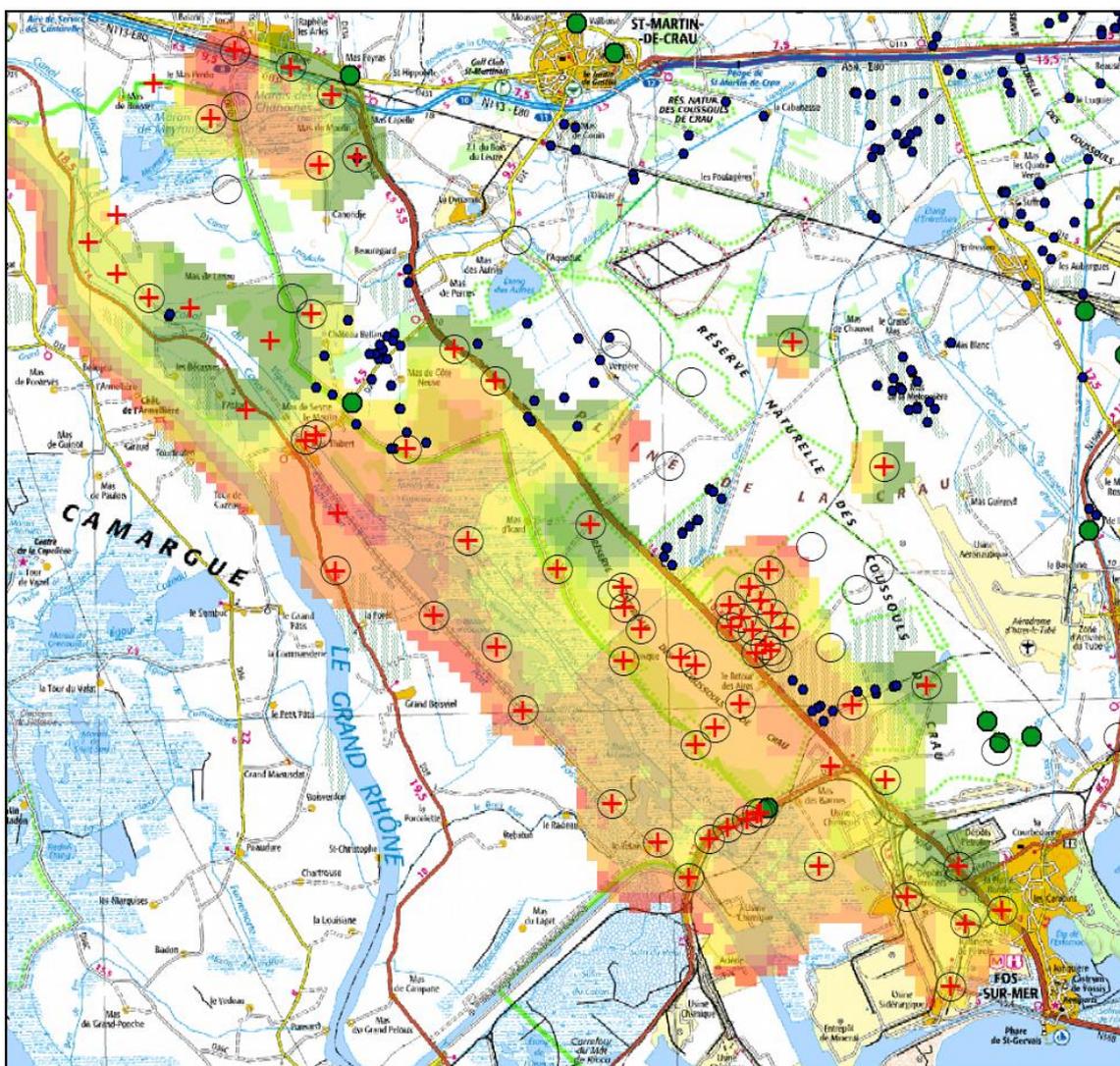


Illustration 25 : Cartes piézométriques obtenues en octobre 2017 (A) et avril 2018 (B) par krigeage avec prise en compte des conditions limites de charges imposées.

Ces cartes vont permettre dans le chapitre 4 de calculer la position théorique de l'interface salée en considérant la loi de Ghyben-Herzberg selon l'Équation 1. Toutes les mesures caractérisent le niveau statique de l'eau douce qui « flotte » sur la nappe salée, c'est donc ce niveau qui doit être utilisé pour le calcul de la position de l'interface par la méthode de Ghyben-Herzberg, sans qu'il soit nécessaire de réaliser une correction de salinité (celle-ci serait utile pour comparer les gradients hydrauliques).

La figure suivante (Illustration 26) montre l'évolution de la piézométrie entre avril 2018 et octobre 2017, une valeur positive représentant une baisse de la piézométrie entre ces deux dates. L'évolution n'est pas homogène spatialement, et on observe à quelques km d'écart des baisses ou des hausses de plusieurs mètres. Cependant, dans la partie basse, soit le long du canal Rhône-Fos et en direction de Mas Thibert, ou encore en amont des marais de Meyranne au nord de la zone d'étude, on observe une baisse généralisée de la piézométrie, qui reste faible (de l'ordre du m), mais qui pourra avoir une importance sur le déplacement du front salé dans ces secteurs.



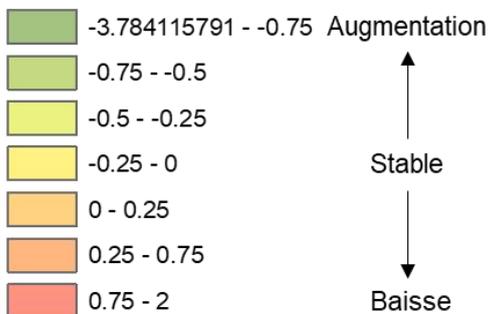
Légende

- Captages AEP Crau
- Prélèvements agricoles

Avril 2018

- +
- Piézométrie (mNGF)

Différence entre Avril 2018 et Octobre 2017 (m)



-
- Piézométrie (mNGF)

Illustration 26 : Différence de piézométrie calculée entre avril 2018 et octobre 2017 et report des points de prélèvements agricoles et AEP sur la zone d'étude (Source des données SYMCRAU).

3.4. SIGNATURE GÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE

3.4.1. Objectifs

L'objectif de la campagne géochimique est d'identifier et de quantifier les pôles de mélange qui expliquent la minéralisation des eaux observée dans l'aquifère en Basse-Crau, et d'identifier l'origine des différents types d'eau rencontrés, ainsi que leur dynamique de mobilisation.

3.4.2. Méthode

Des échantillons d'eau ont été prélevés afin de caractériser le pôle d'eau douce et son éventuelle contamination par le pôle salé au niveau des exutoires naturels ou artificiels de la nappe (Laurons des Chanoines, Pissarotte, Ventillon, Mazet 5) ainsi que dans l'aquifère à proximité de la tranchée drainante (X25). Ce prélèvement avait été initialement prévu pour mieux caractériser le mélange eau douce/eau salée au niveau du point X12, mais ce dernier point n'a pas pu faire l'objet d'un prélèvement en raison de l'impossibilité d'y faire descendre la pompe de prélèvement. Des prélèvements ont été effectués dans la zone de transition dans le secteur Nord au niveau des marais de Meyranne (PAR1) et dans la dépression du Vigueirat au niveau du piézomètre X19 à deux profondeurs différentes. Le prélèvement réalisé au niveau du piézomètre X23 a pour but de caractériser une éventuelle interaction avec le Rhône. Enfin des échantillons dans les hydrosystèmes de surface ont également été réalisés pour caractériser les échanges d'eau entre les eaux de surface et l'aquifère, en amont du Barrage Anti-Sel (BAS) et en amont de l'ouvrage du Galéjon (Illustration 4).

Les analyses ont porté sur les ions majeurs afin de caractériser les proportions de mélanges à partir des chlorures et de quantifier les échanges cationiques à partir du Ca, du K et du Na. Les isotopes du Sr ont été mesurés pour préciser les interactions eau-roche avec la matrice carbonatée des cailloutis plio-quadernaires. Ces données, complétées par les isotopes stables de l'eau permettent également de mieux caractériser les pôles de mélanges et leur contribution respective. Enfin, une campagne de datation des eaux couvrant les âges récents (CFC/SF6, $^3\text{H}/\text{He}$) ou ancien (^{14}C) a également été menée pour préciser la dynamique des transferts d'eau à l'origine des mélanges. Ces données de datation des eaux, complétées par l'analyse du ^{13}C permettent également de préciser les interactions eau-roche et l'influence de la matrice sur les échanges isotopiques. Dans le contexte de la Basse-Crau, le tritium est également utilisé comme traceur des eaux du Rhône (de Montety, 2008).

3.4.3. Résultats et interprétations

a) Tableau synthétique des principaux résultats

Le tableau suivant (Illustration 27) présente les résultats obtenus pour les principales analyses réalisées. Le détail de chaque analyse réalisée est fourni en annexe 3.

b) Confrontation des données géochimiques aux données isotopiques

La figure suivante (Illustration 28) présente les résultats pour les isotopes stables de l'eau. La droite météorique locale $\delta^2\text{H}=7.4 \delta^{18}\text{O}+8.1$ proposée par Celle (2000) y est également reportée. Les points se positionnent sous la droite météorique locale, ce qui s'explique très bien par un mélange entre un pôle salé très enrichi et un pôle d'eau douce plus appauvri, caractérisé par les eaux prélevées au Ventillon, X25 ou au Lauron des Chanoines. Ce résultat est parfaitement cohérent avec l'ensemble des prélèvements d'eau souterraine réalisés dans l'aquifère profond captif de Camargue (de Montety, 2008). Un processus de mélange binaire permet donc d'expliquer la signature isotopique des stables de l'eau pour les eaux souterraines. Les points prélevés au BAS et en amont de l'ouvrage du Galéjon montrent une évolution du pôle d'eau douce affectée par l'évaporation. Aucune influence des eaux de l'aquifère superficiel ou des hydrosystèmes de surface influencés par l'évaporation, et donc enrichies en $\delta^2\text{H}$ (de Montety, 2008) n'est identifiée.

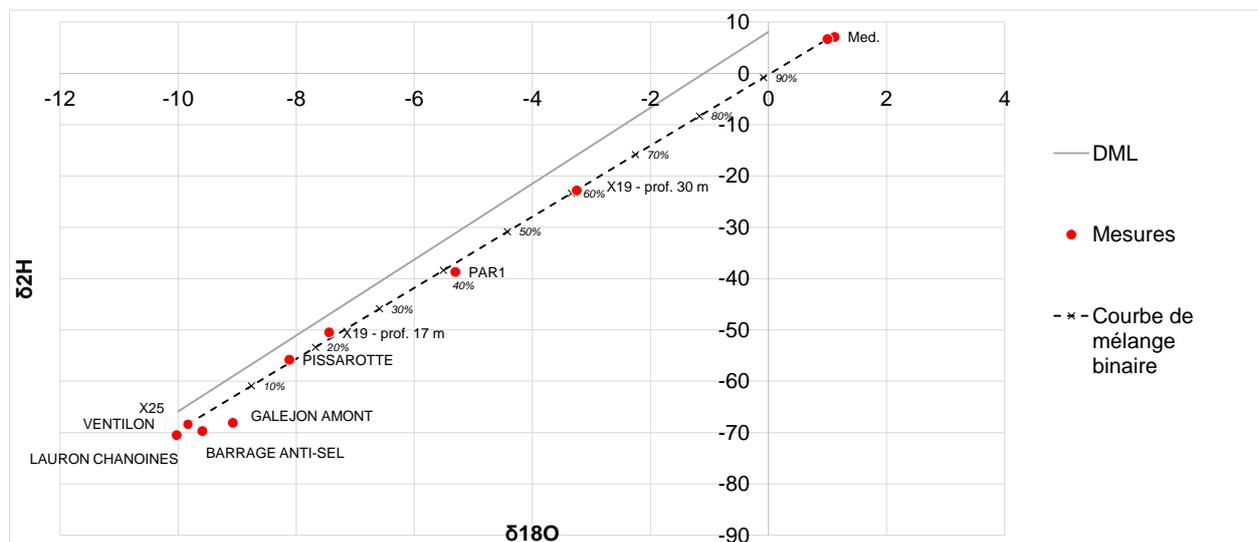


Illustration 28 : Résultats des analyses isotopiques des stables de l'eau comparés à la droite météorique locale définie par Celle (2000).

Les analyses isotopiques des stables de l'eau permettent de définir les eaux prélevées à la Pissarotte, X19_17m, PAR1 et X19_30m comme des eaux issues de mélange avec respectivement 15 %, 22 %, 40 % et 60 % d'eau de mer. Ces contributions peuvent être légèrement biaisées par une alimentation directe par les précipitations qui auraient tendance à enrichir relativement l'eau en $\delta^2\text{H}$, ce qui pourrait notamment être le cas pour l'eau prélevée à la Pissarotte et à X19_17m qui se situent légèrement au-dessus de la droite de mélange.

Ce diagramme justifie d'analyser les autres éléments chimiques comme résultant d'un mélange entre une eau douce de type « Ventillon » et la mer, et d'en déduire l'intensité des interactions eau-roche selon l'écart entre les teneurs calculées et observées. Les Cl⁻ sont classiquement utilisés comme traceurs conservatifs pour quantifier les mélanges binaire eau douce/eau salée : les concentrations mesurées à Ventillon et dans la mer ont été utilisées pour calculer le % de mélange théorique f_{mix} présenté dans l'illustration 27.

Le pourcentage de mélange calculé par les Cl⁻ montre des contributions relatives cohérentes mais néanmoins différentes de celles issues de l'analyse des stables de l'eau, notamment pour X19_30m qui serait cette fois constitué de plus de 90 % d'eau de mer, tandis que X19_17m ne serait constitué que de 4 % d'eau de mer. Le pourcentage calculé par les Cl⁻ est cependant plus cohérent avec les mesures de la salinité, comme le présente la figure suivante (Illustration 29).

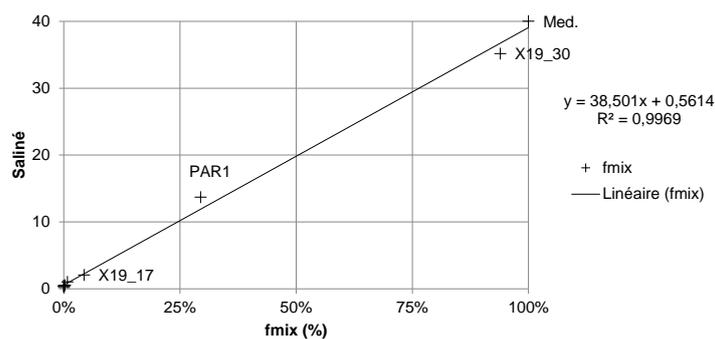


Illustration 29 : Relation entre la salinité mesurée et la contribution d'eau marine calculée à partir des Cl⁻.

La relation entre la salinité et la contribution d'eau marine montre également que le mélange théorique constitué de 50 % d'eau de mer et de 50 % d'eau douce se caractérise bien par une salinité de 20, ce qui est un résultat important pour l'interprétation des diagraphies (cf. 3.5.1).

Les contributions f_{mix} du pôle marin sont ensuite utilisées pour recalculer les teneurs en Na⁺ et K⁺ d'une part, puis Ca²⁺ d'autre part. L'écart avec les valeurs mesurées est présenté dans chaque cas dans l'illustration 27 avec la notation « mix », exprimé en meq/l. On observe un fort appauvrissement en Na⁺ (et dans une moindre mesure K⁺) contrebalancé par un enrichissement en Ca²⁺ pour les eaux de PAR1 et X19_30m. À l'inverse, les eaux de X19_17m montrent un enrichissement en Na⁺ et K⁺ pour un appauvrissement en Ca²⁺. Les autres types d'eau présentent des teneurs pour ces ions qui suivent assez bien le mélange idéal défini par les Cl⁻. Ces résultats témoignent des interactions eau-roche avec une matrice argileuse à l'origine des échanges cationiques observés. Cette évolution classique observée lors d'une intrusion saline s'observe bien à PAR1 et X19_30m, mais est inversée à X19_17m et traduit pour ce point le phénomène de « freshening » (Appelo et Postma, 2005, Pételet *et al.*, 2016), soit l'arrivée d'une eau douce dans un milieu préalablement en équilibre avec une eau salée. Le Sr suit la dynamique du Ca et se retrouve logiquement en concentration beaucoup plus faible pour ce point : un calcul basé sur la perte de Ca devrait donner une concentration en Sr de l'ordre de 2 080 µg/l, ce qui est nettement supérieur aux 252 µg/l mesurés pour ce point.

Ce résultat suggère qu'un faible déplacement de la zone de transition engendre des réactions chimiques intenses dans la zone de transition. Le calcul de l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite (IS calcite, Illustration 27) montre que seules les eaux de surface sont agressives. Le pôle d'eau douce (X25, Ventillon, Mazet 5, Pissarotte, Laurons des chanoines) présente une situation proche de l'équilibre ou légèrement sursaturée en calcite. Le caractère incrustant est surtout identifié sur les points X23 et Mazet 5 pour la seconde campagne de juillet 2018. Les eaux prélevées à PAR1, et dans une moindre mesure X19_30m sont également en équilibre, malgré un enrichissement en Ca important ; la teneur en bicarbonate est ici le facteur limitant.

Les isotopes du Sr permettent de préciser les relations de mélanges identifiées et les interactions eau-roche associées. Le pôle salé est caractérisé par la valeur issue de l'étude de Pételet *et al.*, 2016. L'étude de Vilomet *et al.* (2002) permet de définir la valeur de 0.708175 au pôle d'eau douce en équilibre avec les formations carbonatées des cailloutis de Crau. Toutes les valeurs mesurées dans le cadre du projet SIMBA se positionnent bien entre ces deux pôles. Plus précisément, la relation $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(1/\text{Sr})$ permet d'identifier les mélanges binaires : un mélange binaire se caractérise par une droite sur ce diagramme, et la contribution des deux pôles peut ainsi être quantifiée (Faure 1986). La figure suivante présente les résultats obtenus (Illustration 30).

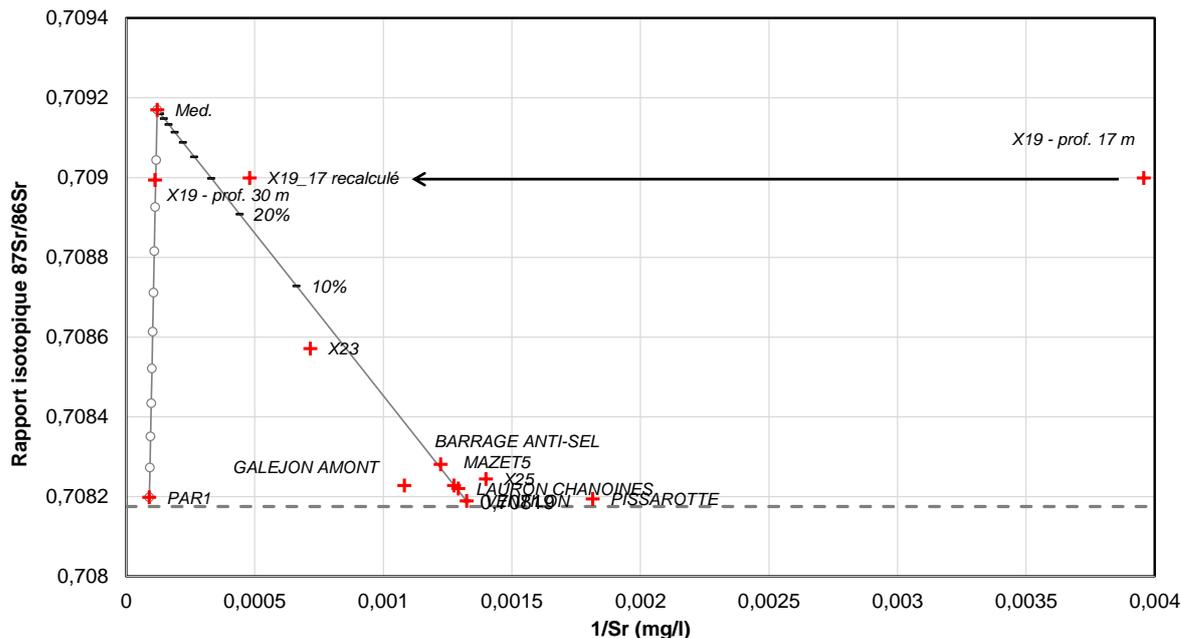


Illustration 30 : Diagramme $87\text{Sr}/86\text{Sr}=f(1/\text{Sr})$. La droite horizontale positionne la signature attendue pour un équilibre avec l'encaissant carbonaté. Les symboles sur les droites identifient le pourcentage de mélange par pas de 10 %.

Le point X23 se positionne bien sur la droite de mélange entre le pôle d'eau douce et le pôle salé, en cohérence avec les % de contribution calculé précédemment. La perte de Ca et de Sr identifiée au point X19_17m explique la position singulière de ce point dans ce diagramme. La correction proposée à partir de l'écart observé en Ca^{2+} par rapport au mélange idéal permet de repositionner ce point à proximité des autres. Les points X19_30m et surtout PAR1 présentent une évolution différente. Enfin, PAR1 montre une signature isotopique en parfait équilibre avec l'encaissant. La signature marine de ce point est complètement masquée par l'importance des interactions eau-roche, ce qui marque un temps de résidence de l'eau salé plus long. Le point X19_30m évolue selon le même schéma, mais avec une intensité d'interaction avec l'encaissant plus faible, traduisant un temps de séjour plus court.

Les données isotopiques du Sr permettent ainsi de proposer une évolution de la signature depuis un pôle eau douce du type « Ventillon » vers un pôle marin selon un simple mélange binaire. À court terme, cette évolution peut localement être affectée dans la zone de transition par des échanges cationiques qui modifient fortement la teneur en Sr sans modifier leur rapport isotopique (X19_17m). À plus long terme, des échanges isotopiques avec la matrice carbonatée font évoluer la teneur isotopique à nouveau vers celle du pôle d'eau douce, la signature du pôle marin pouvant être totalement perdue (PAR1).

c) Informations apportées par les traceurs du temps de séjour de l'eau

- Tritium/He

Dans le contexte du delta du Rhône, les teneurs en tritium atmosphérique n'expliquent pas à elles seules les valeurs mesurées dans les eaux souterraines dès lors qu'il existe des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet, compte tenu de l'activité industrielle dans le bassin rhodanien, le tritium est également un marqueur des eaux d'infiltration du Rhône (de Montety, 2008), et donc des eaux du canal d'Arles à Fos, comme en témoignent les valeurs mesurées sur l'échantillon du Barrage Anti-Sel (12.85 UT). Aucun autre point ne semble présenter d'anomalies en tritium.

La datation par le $^3\text{H}/\text{He}$ a été menée par le laboratoire HELIS. Les données brutes et leur interprétation fournies par le laboratoire HELIS sont présentées dans l'annexe 3. Un âge actuel est identifié pour les eaux du Ventillon, Pissarotte, et du Lauron des Chanoines (respectivement 0, 1 et 3 ans de Temps Moyen de Résidence, TMR), ce qui est parfaitement cohérent avec les connaissances hydrogéologiques et le fonctionnement de la nappe libre de Crau. PAR1 et X19_17m présentent des âges tritium/He d'environ 30 ans, avec une plus forte composante radiogénique pour le point PAR1. Cet âge est cohérent avec la baisse de tritium pour PAR1, tandis que l'importance du tritium radiogénique peut s'expliquer par les plus fortes interactions géochimiques avec l'encaissant. La valeur relativement élevée en tritium à X19_17m, proche de 4 UT, n'est pas cohérente avec un TMR calculé de 30 ans. Ceci pourrait s'expliquer par une faible contribution actuelle d'eau tritiée provenant du Rhône (via les canaux, donc de l'ordre de 12 UT) diluée par la composante ancienne salée, aboutissant à un TMR d'une trentaine d'année. Le prélèvement réalisé à X19_30m n'a malheureusement pas pu être analysé, ce qui ne permet pas d'identifier à ce niveau une composante plus ancienne pour confirmer cette hypothèse.

- **CFC/SF6**

Les concentrations en gaz dissous d'origine anthropique (CFC/SF6) sont présentées dans l'illustration 27. Ces concentrations mesurées dans l'eau ont été converties en concentrations atmosphériques (exprimées en pptv) en considérant une température de recharge de 13.2 °C. L'excès d'air est estimé à partir de de l'excès de Ne mesuré par le laboratoire HELIS pour les analyses $^3\text{H}/\text{He}$ (cf. annexe 3), ou négligé lorsqu'aucune donnée n'est disponible. L'erreur commise sur la conversion en pptv des concentrations en gaz dissous reste faible et ne concerne que le SF6 compte tenu de sa plus faible solubilité.

Les résultats obtenus montrent que les eaux échantillonnées au Ventillon et X25 présentent des valeurs anormalement élevées, c'est-à-dire largement supérieures à ce que l'on doit attendre d'un équilibre avec l'atmosphère, quel que soit le type de gaz analysés. Des valeurs également anormales de concentrations en CFC11 sont observées au captage de la Pissarotte. Cette contamination des eaux souterraines par les gaz dissous provient du drainage d'un secteur industriel utilisant ou produisant ce type de composé. L'évolution des concentrations traduit le déplacement d'un panache depuis l'amont du Ventillon vers la tranchée drainante et atteignant partiellement le secteur de la Pissarotte. Cette signature pourrait provenir du drainage des eaux s'infiltrant depuis l'usine aéronautique et l'aérodrome d'Istres-Le Tubé, mais des investigations complémentaires sont nécessaires pour identifier l'origine de cette signature en gaz dissous. Ce résultat montre que ces eaux présentent une forte composante d'infiltration rapide, sans qu'il soit possible de préciser l'âge moyen, celui restant probablement faible (quelques années tout au plus).

La relation CFC12/SF6 montre que les eaux prélevées à la Pissarotte, à Mazet 5 et au Lauron des Chanoines sont proches de l'actuel, ce qui est cohérent avec les résultats apportés par le $^3\text{H}/\text{He}$. Les valeurs obtenues pour les CFC11 et 113 à X19_30m, X19_17m et PAR1 traduisent une importante dégradation, phénomène attendu en milieu anoxique, mais qui n'influencent pas les teneurs mesurées en SF6.

Ainsi la relation SF6/CFC12 présentée sur l'illustration 31 constitue la relation la plus pertinente pour qualifier les dynamiques de transfert de l'eau à partir des gaz dissous :

- la figure de gauche permet de bien identifier la contamination sur les échantillons X25 et Ventillon pour ces deux traceurs, sachant que l'échantillon de la Pissarotte est également contaminé en CFC11 ;
- la figure de droite présente les gammes de valeurs attendues en l'absence de contamination selon un transfert piston (courbe bleue, les étiquettes définissent la date d'équilibre avec l'atmosphère), un transfert avec une évolution du temps de séjour selon le modèle de mélange exponentiel (courbe verte, les étiquettes définissent le TMR) ou selon un mélange binaire entre une eau actuelle et une eau « ancienne » (courbe noire, les étiquettes définissent le % de mélange).
- les eaux échantillonnées au Lauron des Chanoines, à la Pissarotte et à Mazet 5 apparaissent représentatives d'eau actuelle (quelques années), avec une légère dégradation des CFC12 pour Mazet 5, ou bien une influence d'un pôle ancien,
- les eaux échantillonnées à X19 sont bien expliquées par la distribution exponentielle des temps de séjour, avec un TMR de 30 à 50 ans aux profondeurs 17 et 30 m respectivement,
- l'eau échantillonnée à PAR1 se démarque, et présente une teneur en SF6 comparable à celle de X19_17m pour une teneur en CFC12 très faible. Il s'agit probablement de la conséquence de la dégradation des CFC12 pour ce point, la teneur en SF6 permettant de supposer un temps de transfert comparable à celui observé à X19_17m.

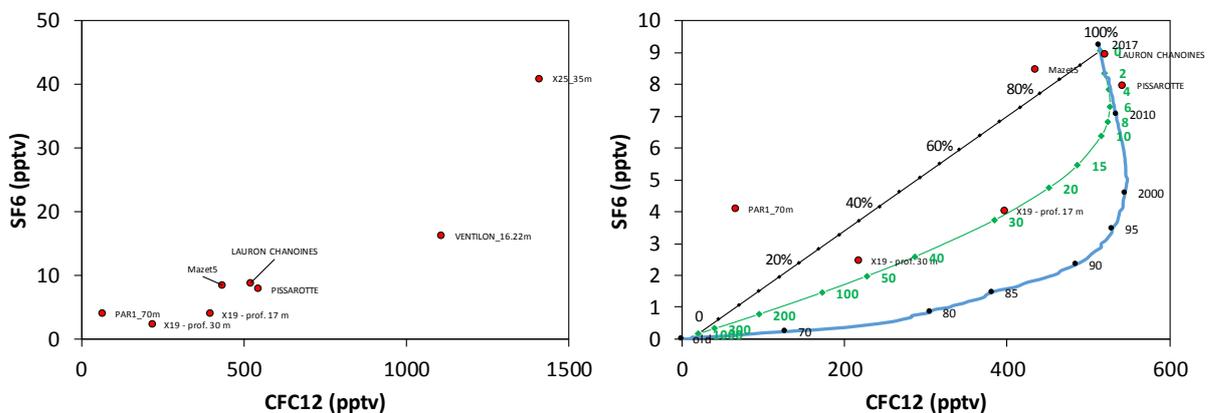


Illustration 31 : Relation SF6=f(CFC12) obtenue pour tous les échantillons (à gauche), et pour les échantillons non contaminés (à droite), complétée par les évolutions théoriques attendues pour un transfert de type piston (courbe bleue), exponentiel (courbe verte) ou un mélange binaire (droite noire).

On retrouve ainsi des résultats cohérents avec ceux obtenus par le ³H/He pour le pôle récent. On retrouve également un temps moyen de séjour proche de la trentaine d'année pour PAR1 (en s'appuyant sur la donnée SF6) et X19_17m en supposant un modèle de type exponentiel. Le résultat obtenu à X19_30m permet de préciser l'âge de l'eau salée, soit proche de 50 ans de TRM.

Le SF6 apparaît donc comme le traceur gazeux fluoré le plus adapté pour décrire l'âge de l'eau dans le contexte de la Basse-Crau. De plus, l'évolution atmosphérique du SF6 présente une augmentation croissante depuis les années 50 ; ce traceur peut donc être utilisé directement pour qualifier l'âge apparent de l'eau. La relation entre le % de contribution d'eau marine et la teneur en SF6 (Illustration 32) montre que les eaux récentes présentant des valeurs proches de l'équilibre atmosphérique correspondent aux eaux douces, tandis que la salinisation de l'eau s'accompagne d'un « vieillissement » de l'eau.

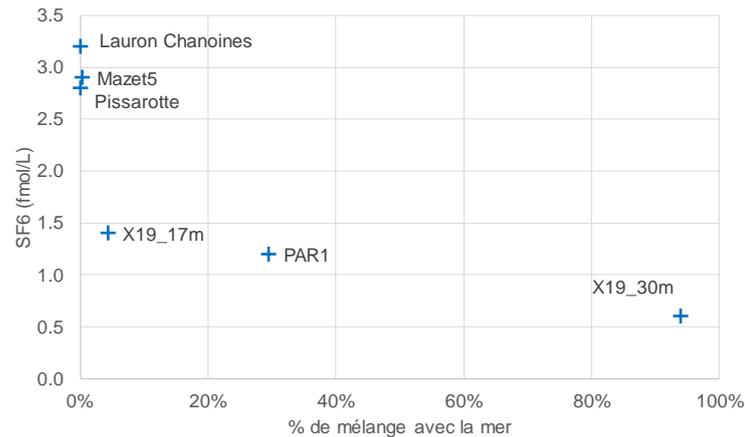


Illustration 32 : Relation entre la concentration en SF6 et le % de mélange avec l'eau de mer issu de l'interprétation des concentrations en Cl⁻.

• Isotopes du Carbone

La datation des eaux par le radiocarbone nécessite d'étudier la spéciation du C selon l'équilibre calco-carbonique pour recalculer la teneur théorique en $\delta^{13}\text{C}$ en supposant un milieu ouvert ou fermé vis-à-vis de différentes sources de C. La comparaison avec le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré permet ainsi de choisir quel type de modèle de correction doit être utilisé pour recalculer l'activité initiale $^{14}\text{a}_0$ du C à partir de la valeur mesurée de l'activité.

On constate avant toute opération de correction que le $\delta^{13}\text{C}$ mesuré est souvent très enrichi, et ce d'autant plus que l'activité ^{14}a est faible (Illustration 33). Cet enrichissement peut s'expliquer selon deux processus :

- la méthanisation, qui conduit à un fort enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$ du carbone dissous ;
- un échange isotopique avec la matrice carbonatée qui présente un carbone « mort », et donc une activité nulle.

Ces deux hypothèses ont été discutées par de Montety (2008) sur la base des résultats observés en Camargue, et notamment au piézomètre S7. La méthanisation suppose l'absence d'oxygène, qu'il soit dissous ou sous forme de nitrates ou de sulfates. Or, les échantillons prélevés en Basse-Crau montrent toujours des teneurs en sulfates non négligeables. L'évolution $\delta^{13}\text{C}=f(^{14}\text{a})$ traduit donc ici l'intensité des interactions eau/roche, conduisant à un échange isotopique avec la matrice qui présente un $\delta^{13}\text{C}$ et une activité ^{14}a proche de zéro. **Cette interprétation confirme l'importance des interactions eaux roche observée à PAR1 et à X19 à partir des isotopes du Sr.**

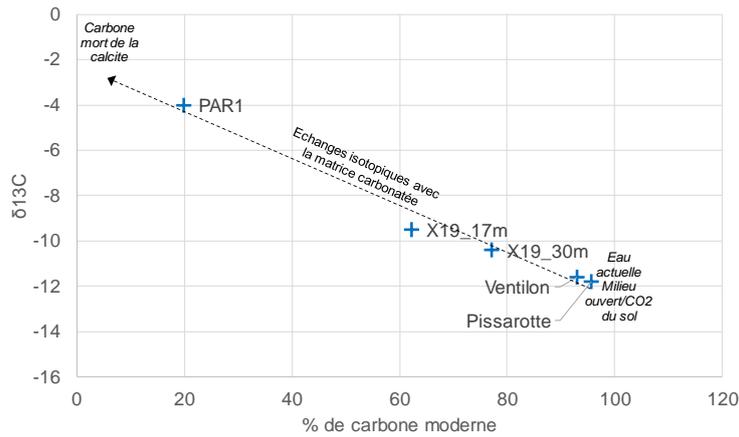


Illustration 33 : Relation entre le $\delta^{13}\text{C}$ et l'activité mesurée en ^{14}C exprimée en pcm.

Les isotopes du C mesurés dans l'eau sont donc essentiellement contrôlés par l'intensité des interactions eau roche. Il est donc impossible de proposer de dater les eaux par cette méthode. Ces analyses permettent de préciser le degré d'interaction avec la matrice carbonatée : les échantillons X19_30m, X19_17m et PAR1 montrent des degrés d'évolution croissant des carbonates ; la signature isotopique se rapproche de plus en plus de celle de la matrice. Les autres points sont caractéristiques d'une évolution du C en système ouvert vis-à-vis du CO_2 du sol, et doivent donc être considérés comme des eaux actuelles.

- **Conclusion**

Il n'est pas mis en évidence d'intrusion saline par une eau marine actuelle. La notion d'eau actuelle est utilisée dans cette étude pour caractériser une eau dont la composition est profondément modifiée à l'échelle saisonnière par la recharge. Selon cette définition, les exutoires de la nappe de la Crau mobilisent une eau actuelle ($\text{TMR} \ll 10$ ans), contrairement aux eaux salées en profondeur dans l'aquifère qui présentent des temps de séjour moyen de l'ordre de plusieurs dizaines d'année. Ces temps de séjour restent relativement courts comparé à l'intensité des interactions géochimiques avec l'encaissant révélées par l'analyse des isotopes du C et du Sr, notamment pour PAR1. La teneur en tritium élevée mesurée à X19_17m relativement à son TRM également élevé (± 30 ans) suggère une faible alimentation par des eaux tritiées du Rhône, probablement de manière indirecte via le canal d'Arles à Fos. **Aucune influence des eaux de l'aquifère superficiel et des hydrosystèmes de surface marqués par les processus évaporatoires n'est mis en évidence avec les isotopes stables.**

Par ailleurs l'utilisation combinée de deux techniques de datation des eaux pour les TMR relativement récents (< 60 ans) permet d'affiner les résultats en proposant un modèle de transfert ou en mettant en évidence des phénomènes de dégradation liée au contexte réducteur, ou encore une contamination de certains échantillons. Le tableau suivant (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présente de manière synthétique les résultats obtenus par chaque méthode pour chaque point d'eau analysé :

Points d'eau	TMR Tritium/Helium	Observations	TMR CFCs/SF6 et modèle de transfert associé	Observations
PAR1	30 ans		30 ans selon un modèle exponentiel	Forte dégradation des CFCs, y compris CFC 12
Lauron Chanoines	2 à 3 ans		Actuel	Actuel
X25	Non analysé		Datation impossible	Contamination pour tous les gaz dissous analysés
Ventillon	Actuel		Datation impossible	Contamination pour tous les gaz dissous analysés
Pissarotte	Actuel		Actuel	Contamination en CFC11
Barrage anti-sel		Forte teneur en tritium influencée par le Rhône (12 UT)	Non analysé	
X19_17m	30 ans		20 à 30 ans selon un modèle exponentiel	CFCs 11 et 113 dégradés
X19_30m	Datation impossible	Eau ancienne caractérisée par une teneur très faible en tritium (0.21 UT).	40 à 50 ans selon un modèle exponentiel	CFCs 11 et 113 dégradés

Illustration 34 : Tableau de synthèse des résultats relatifs à l'âge de l'eau estimés par l'analyse des gaz dissous d'origine anthropique (CFCs et SF6) et l'analyse Tritium/Hélium.

3.5. ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA SALINITÉ

3.5.1. Définition de la zone de transition

Il n'existe pas de définition précise de l'extension de la zone de transition entre l'eau douce de salinité nulle et l'eau salée, qui présente une salinité de l'ordre de 39. Le terme d'eau saumâtre est communément utilisé pour une eau qui présente une salinité supérieure à 1. Les approches théoriques d'interprétation des profils de salinité définissent la zone de transition non influencée par un pompage comme le domaine aquifère d'épaisseur verticale 2σ de part et d'autre de l'interface théorique obtenue sans effet de dispersion, avec σ l'écart type de la distribution verticale de la salinité selon le concept d'advection/dispersion en 1 dimension (Schmorak et Mercado, 1969). Ce concept permet de décrire la distribution de la salinité selon la verticale par une loi normale cumulée. Cette définition de la zone de transition reste arbitraire, et est par exemple modifiée en une épaisseur de 5σ par Wagner et Kent (1985).

Dans le cas de la salinisation de l'aquifère de Crau, la position de l'interface théorique est donnée par la profondeur de l'iso-salinité 20, correspondant à un mélange idéal entre une eau douce de salinité nulle et une eau salée de salinité 40 (50 % de 40). Le fait de supposer une distribution normale de la salinité selon la verticale amène à considérer une salinité 6.3 pour la limite supérieure de la zone de transition définie par un écart-type (15.86% de 40). Enfin, la salinité de 1 correspond à la salinité observée à une distance de 1.96σ . Ainsi, l'écart entre l'iso-salinité 20 et l'iso-salinité 1 est théoriquement le double (facteur 1.96) de celui entre l'iso-salinité 20 et l'iso-salinité 6.3, quelle que soit la valeur de la dispersion.

3.5.2. Interprétation temporelle de l'évolution des diagraphies sur les points du réseau de suivi

a) Méthode

Une méthode d'interpolation temporelle des diagraphies a été développée dans le cadre du projet SIMBA pour croiser les informations issues des suivis en continu (piézométrie et salinité) aux données obtenues manuellement lors des campagnes de diagraphies.

Les diagraphies ont été réalisées en suivant le protocole défini dans le rapport intermédiaire BRGM/RP-67606-FR. La liste des diagraphies réalisées dans le cadre du projet est présentée dans l'annexe 5. Le matériel utilisé est une sonde CTD-Diver, descendue manuellement, avec un pas d'acquisition de la pression, de la température et de la conductivité électrique de 1 seconde. La conductivité électrique de l'eau est corrigée de l'effet de température et convertie en salinité selon la relation définie par Wagner *et al.* (2006). La pression est convertie en mètre d'eau douce, afin de connaître à chaque instant la position de la sonde. La réalisation de diagraphie a pour but de décrire la position de la zone de transition jusqu'à l'interface de salinité 20, si bien que l'erreur commise en supposant une densité de 1 reste négligeable.

L'objectif est de reproduire l'évolution temporelle des profils de salinité pour comparer l'évolution de la profondeur atteinte par différents seuils de salinité en fonction de la piézométrie, et ainsi mieux comprendre la dynamique temporelle de la zone de transition.

L'analyse est conduite au pas de temps journalier sur l'ensemble de la période couverte par les données en continu de salinité. Le pas de temps journalier permet de ne pas tenir compte des évolutions à court terme liées aux marées. Une résolution spatiale de 10 cm est utilisée pour les diagraphies. Cette valeur permet de bien décrire la zone de transition des ouvrages étudiés.

La moyenne journalière de la salinité mesurée par la sonde est comparée aux valeurs instantanées de salinité observées lors des diagraphies : la diagraphie qui permet de reproduire la salinité mesurée par la sonde (moyenne journalière) avec le plus petit déplacement vertical est retenue. Le profil de salinité correspondant, éventuellement décalé selon la verticale, est ainsi utilisé pour décrire l'évolution de la salinité avec la profondeur. Cette méthode revient donc à considérer qu'il existe au moins une diagraphie capable de reproduire le profil de salinité du jour considéré. L'algorithme utilisé permet également de vérifier que les décalages verticaux restent faibles (quelques dizaines de cm) et que la diagraphie retenue le jour de la réalisation d'une diagraphie est bien la bonne, ou à défaut reste très proche. Si la diagraphie sélectionnée est sensiblement différente de celle mesurée ce jour-là, il convient de s'interroger sur les incertitudes liées notamment à la position de la sonde, à la mesure piézométrique, mais aussi à l'influence des marées sur la mesure instantanée lors de la diagraphie (cf. 0).

Cette méthode permet donc par un faible décalage vertical de tenir compte d'un déplacement vertical de la colonne d'eau selon un transfert de type « piston ». Sa mise en œuvre nécessite un nombre suffisant de diagraphies pour chaque piézomètre afin de couvrir toutes les distributions possibles de la salinité selon la profondeur à partir d'une translation des données selon la verticale (effet piston).

b) Sélection des points analysés

La méthode est appliquée dans le but de mieux comprendre les facteurs de contrôle de la position de l'iso-salinité 20. Elle nécessite donc des points suivis en continu qui présentent de forte salinité en profondeur. Ainsi, seuls les points L2, X12, X17 et X23 ont donc été traités.

c) Résultats

Les figures suivantes présentent la comparaison des suivis en continus au pas horaire avec l'interpolation en fonction de la profondeur (résolution de 10 cm) et du temps (pas journalier) de la salinité selon la méthode présentée précédemment. Sur la matrice de salinité obtenue $S=f(t, z)$ est également reportée l'évolution de la position de l'iso-salinité 20, 6.4 et 1. Ces valeurs sont utilisées pour décrire la position de l'interface salée et des limites de la zone de transition et de l'eau saumâtre respectivement. Ainsi, sur chaque figure, les deux courbes supérieures correspondent aux mesures réalisées par la sonde, tandis que la matrice et les courbes qui y sont superposées correspondent au résultat de l'interpolation temporelle des diagraphies.

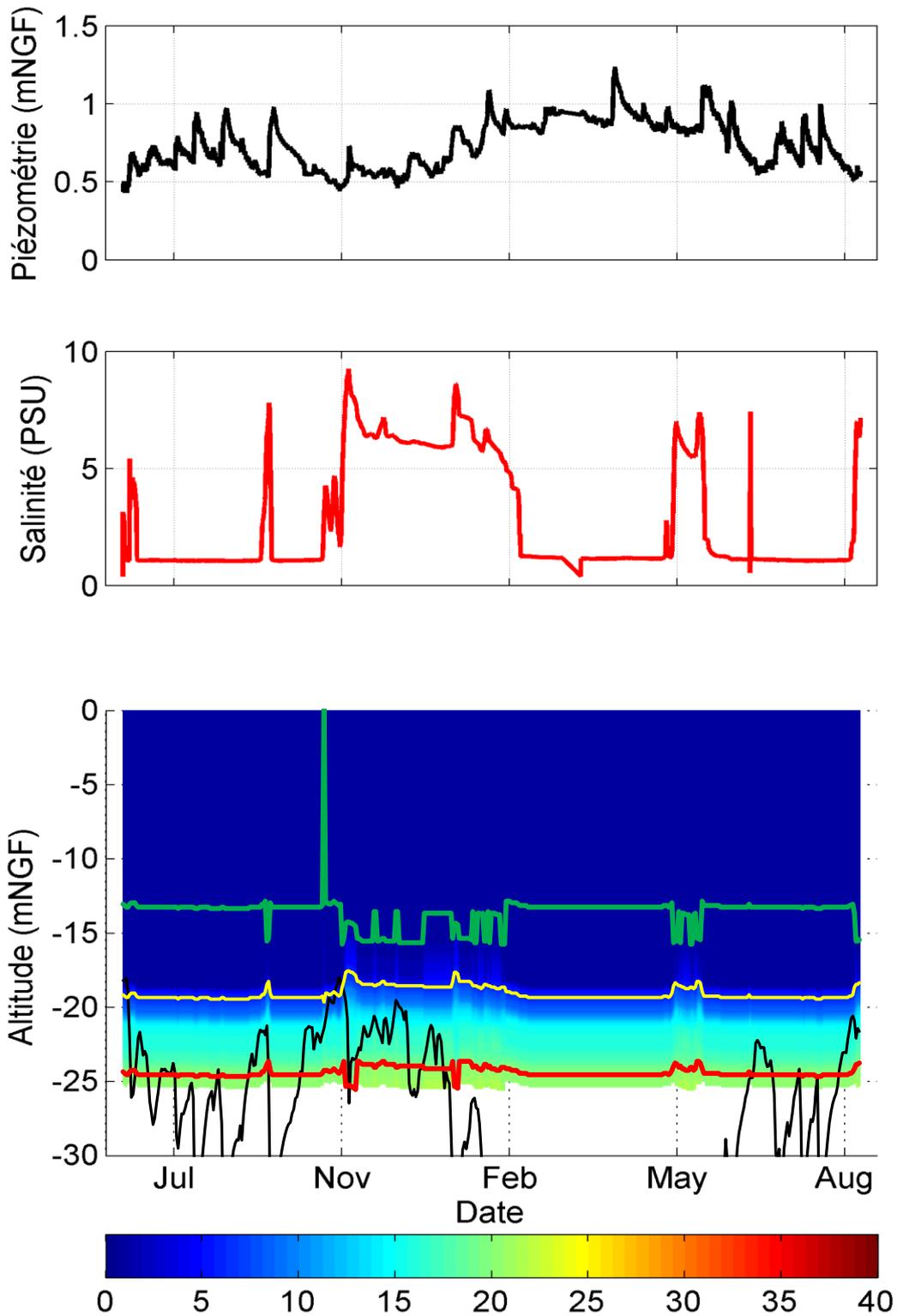


Illustration 35 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X23.

Sur la figure du bas, la courbe rouge identifie la salinité 20, la jaune la salinité 6.4 et la verte la salinité 1. La courbe noire représente la position calculée de l'interface selon l'équation 1.

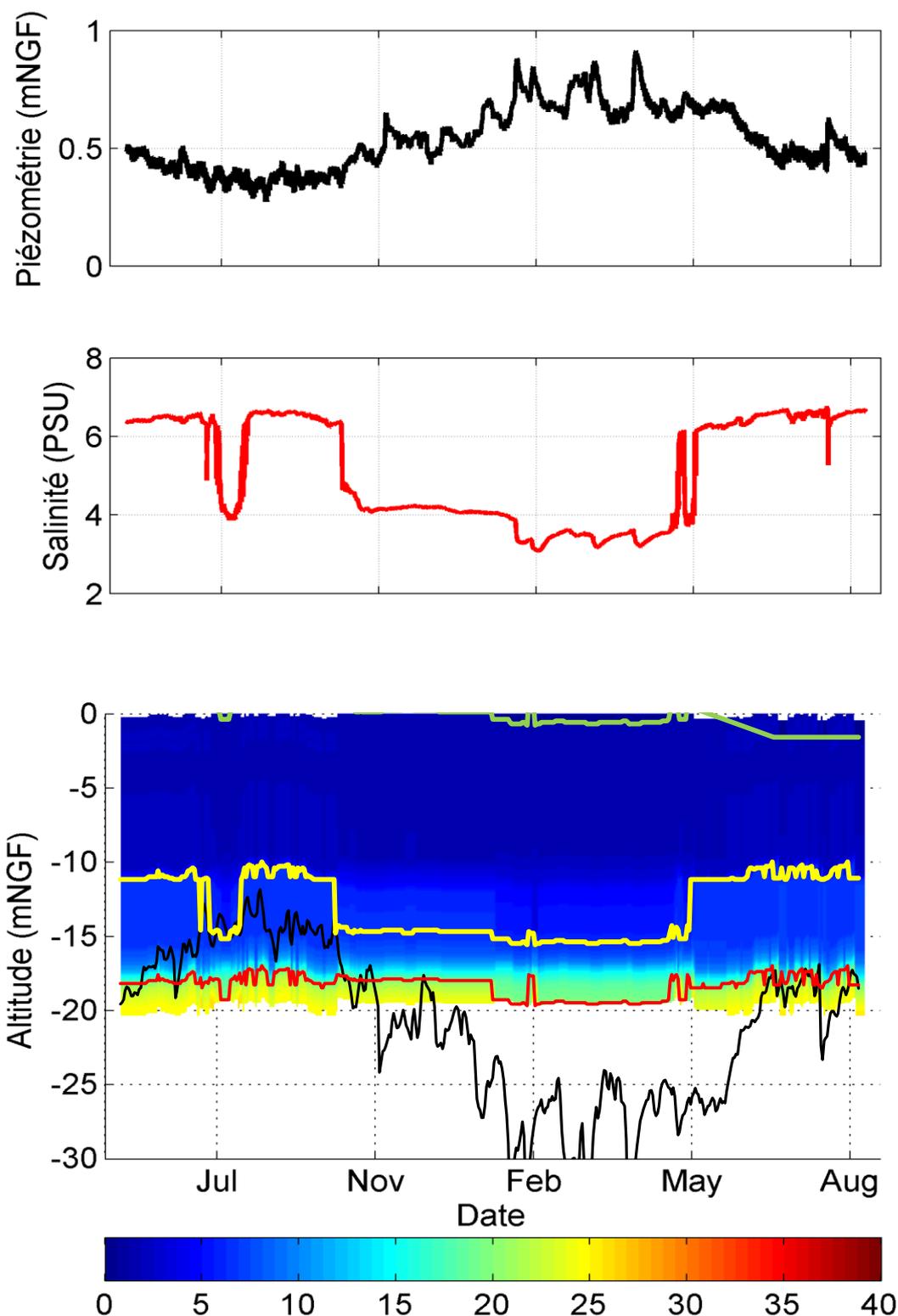


Illustration 36 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X17.

Sur la figure du bas, la courbe rouge identifie la salinité 20, la jaune la salinité 6.4 et la verte la salinité 1. La courbe noire représente la position calculée de l'interface selon l'équation 1.

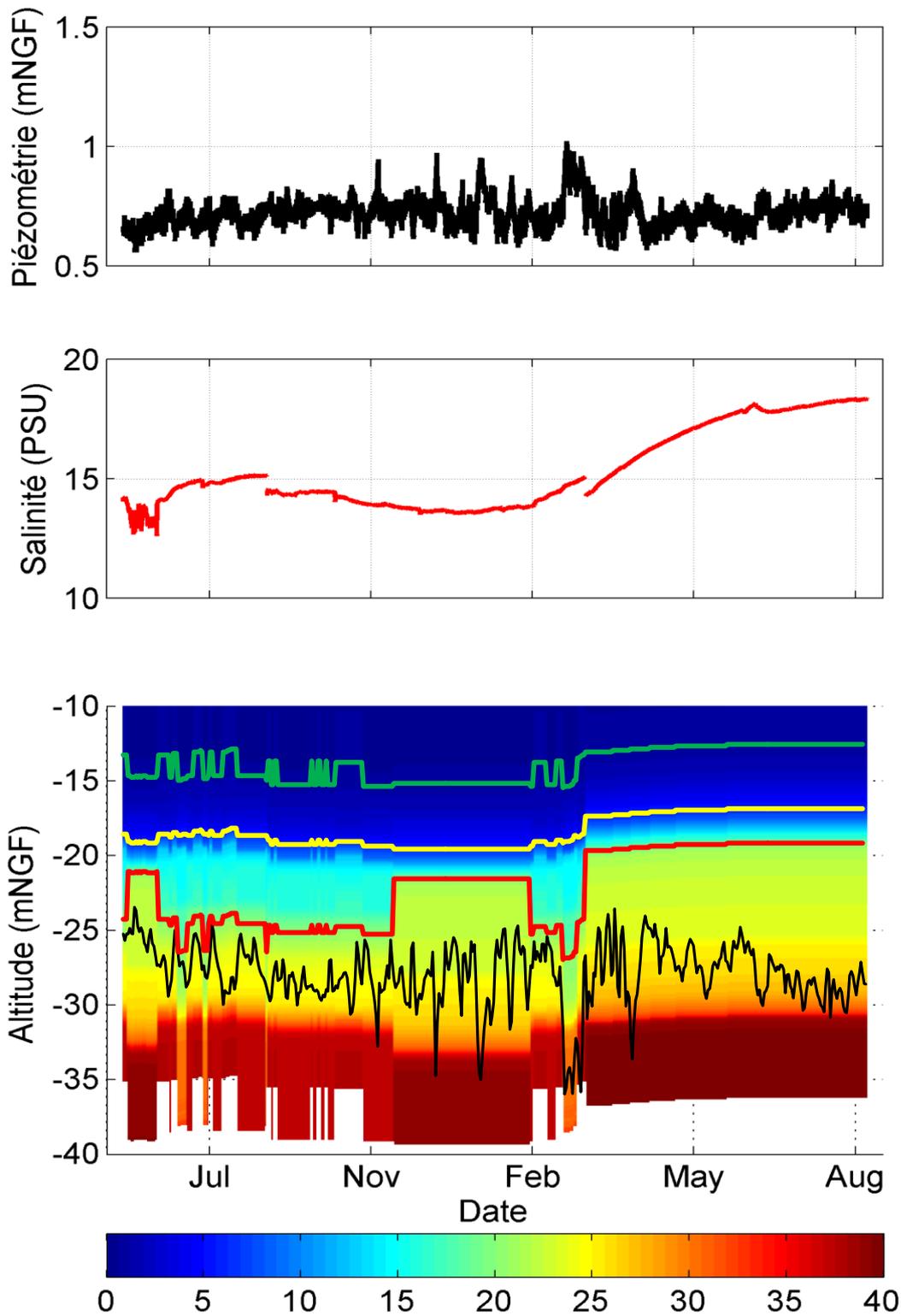


Illustration 37 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre X12.

Sur la figure du bas, la courbe rouge identifie la salinité 20, la jaune la salinité 6.4 et la verte la salinité 1. La courbe noire représente la position calculée de l'interface selon l'équation 1.

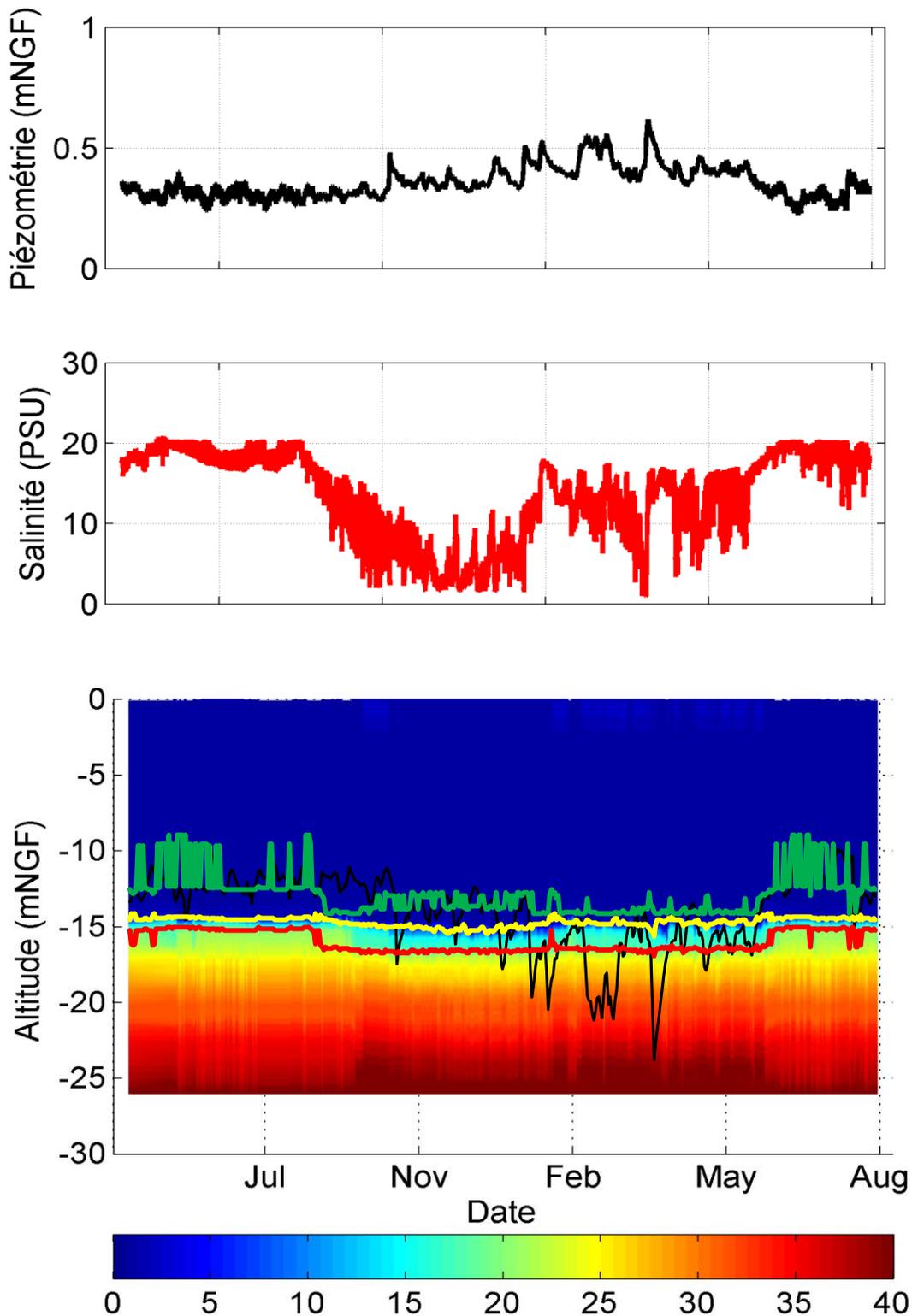


Illustration 38 : Mesures de la salinité et de la piézométrie au pas horaire comparées aux évolutions calculées de la salinité selon la verticale au piézomètre L2.

Sur la figure du bas, la courbe rouge identifie la salinité 20, la jaune la salinité 6.4 et la verte la salinité 1. La courbe noire représente la position calculée de l'interface selon l'équation 1.

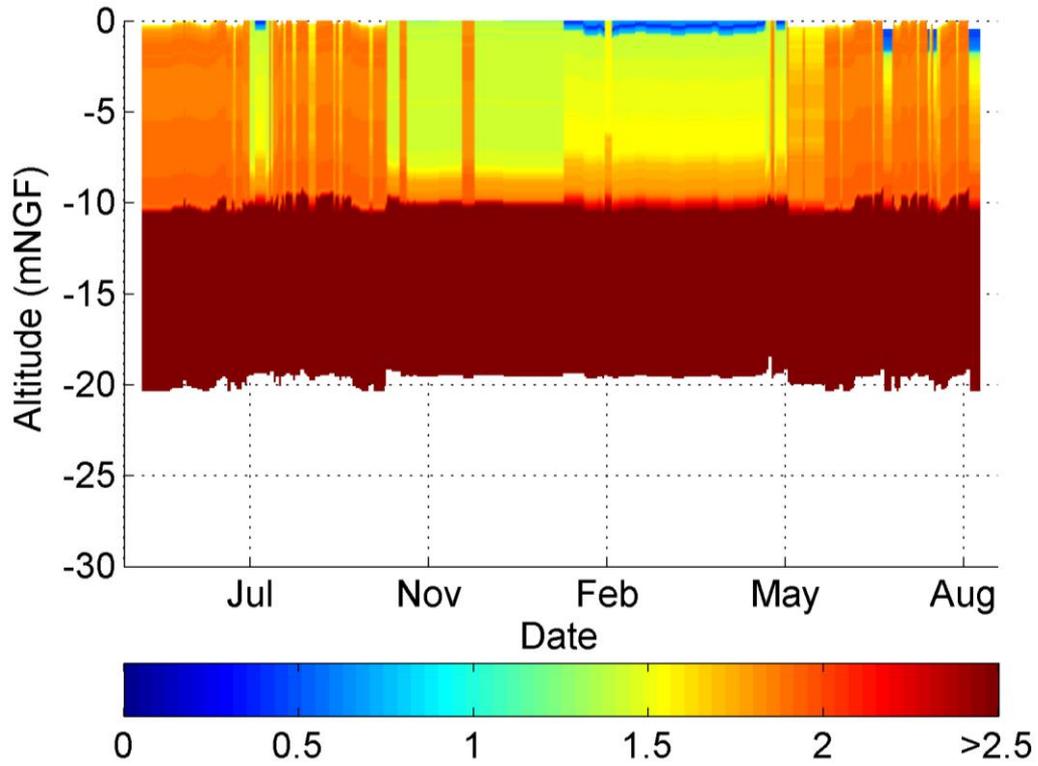


Illustration 39 : Zoom sur l'évolution calculée des faibles salinités selon la profondeur au piézomètre X17.

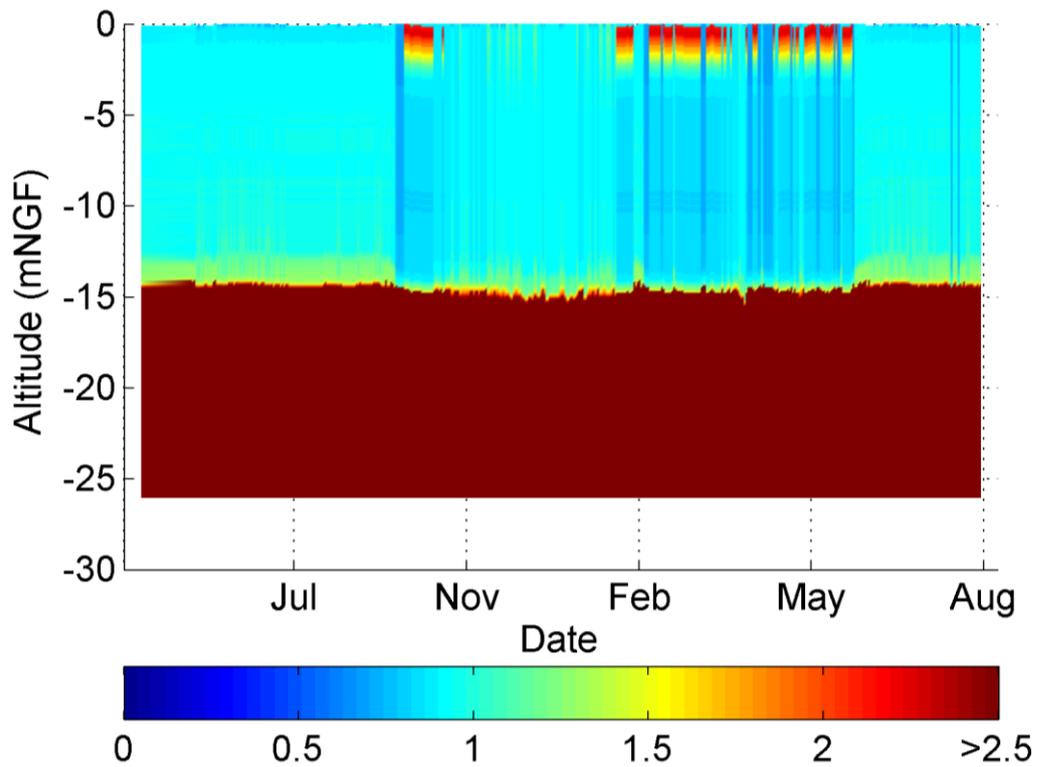


Illustration 40 : Zoom sur l'évolution calculée des faibles salinités selon la profondeur au piézomètre L2.

d) Interprétations

Les résultats obtenus au piézomètre X23 (Illustration 35) montrent deux modes de fonctionnement contrôlés par le niveau piézométrique.

- les basses eaux observées entre novembre et février entraînent une remontée de l'interface salée, qui présente alors des variations en partie expliquées par les variations de la piézométrie. La position théorique de l'interface (courbe noire) surestime de plusieurs mètres l'altitude de l'interface pour ces périodes. La composante verticale de l'écoulement des eaux souterraines ne peut plus être négligée, ce qui peut expliquer l'écart observé entre le résultat théorique et les observations ;
- en hautes eaux (y compris en été pour ce point), la salinité reste très stable et est indépendante de la piézométrie. Le calcul théorique de l'interface salée propose cette fois une position nettement inférieure. On en déduit qu'en dehors des périodes de hautes eaux, la salinité mesurée par ce piézomètre caractérise la salinité de l'eau piégée dans l'ouvrage, avec un gradient de salinité contrôlé par la présence probable de boues salées au fond.

Le piézomètre X17 (Illustration 36) présente également deux modes de fonctionnement selon les conditions hydrologiques, avec cette fois des basses eaux qui se produisent également l'été. On retrouve des résultats similaires, avec une meilleure adéquation entre le calcul théorique et les observations en basses eaux, tandis que les résultats obtenus en hautes eaux témoignent là encore de la présence de boues salées qui perturbent les observations. L'évolution observée en juillet 2017 (forte baisse puis retour à la valeur initiale) ne peut pas s'expliquer à partir de la piézométrie. Un zoom sur les faibles salinités montre que ce point présente des variations importantes de la salinité sur la partie supérieure de la colonne d'eau (Illustration 39). Ainsi, en basses-eaux, ce point ne permet plus de décrire l'évolution de la nappe d'eau douce qui flotte sur la nappe salée. Cette remontée de l'interface salée apparaît brutale sur la figure, mais il manque des diagraphies pour bien décrire cette évolution temporelle. Il est possible que cette dynamique de salinisation traduise une faible drainance depuis l'aquifère salé contenu dans les limons.

Le piézomètre X12 (Illustration 37) présente une dynamique d'évolution de la salinité avec des sauts, qui témoignent d'un déplacement involontaire de la sonde lors des différents relevés des données. Cet effet a été corrigé en identifiant quel décalage de la sonde selon la verticale permet de reproduire ce saut de salinité. On obtient alors une matrice de salinité relativement stable. La position théorique de l'interface est conforme aux observations, et reproduit bien l'approfondissement observé au mois de mars 2018. À partir de cette date, une tendance à l'augmentation de la salinité est observée. Celle-ci s'explique par une faible remontée de l'interface, ce qui n'est pas cohérent avec l'évolution de la piézométrie. En effet, le calcul théorique de l'interface propose plutôt une tendance à la baisse. Il faudrait connaître l'évolution du niveau d'eau dans le canal (au niveau de la station S8) pour comprendre l'origine de cet écart. La position calculée par la relation simple de Ghyben-Herzberg reste globalement assez cohérente avec les observations pour ce point.

Enfin, le piézomètre L2 (Illustration 38) montre une faible variabilité saisonnière de la position de l'interface. La position observée reste cohérente avec le calcul théorique en hautes eaux, mais les observations montrent une plus grande stabilité. En basses eaux, le calcul surestime l'importance de l'intrusion saline, la nappe salée étant maintenue plus en profondeur. Ceci peut s'expliquer par une composante verticale non négligeable issue d'une alimentation de l'aquifère par les canaux (cf. 0). L'illustration 40 montre qu'il existe des périodes où des eaux saumâtres apparaissent en haut de la colonne d'eau. Ceci traduit probablement une drainance depuis les formations limoneuses sus-jacentes, sachant que le piézomètre L2 est crépiné sur plusieurs mètres face à ces formations (cf. annexe 4).

Enfin, cette méthode d'analyse montre que l'écart entre les salinités 20, 6.3 et 1 n'est pas constant selon les piézomètres. Les facteurs qui contrôlent l'épaisseur de la zone de transition seront abordés dans le paragraphe 4.1.

3.5.3. Analyse à « court » terme (infra annuel, pas horaire)

À court terme, il s'agit d'identifier l'influence de la marée sur l'évolution de la position de l'interface salée. L'exemple de la chronique de L2 en basses eaux (du 1^{er} juin 2017 au 20 juin 2017) a été choisi pour calculer la position de l'eau présentant une salinité de 20 au pas horaire.

La salinité évolue entre les valeurs 16 et 21 de manière cyclique (Illustration 22). La correspondance en terme de déplacement le long de la colonne d'eau est calculée au pas horaire à partir de la diagraphie réalisée le 6 juillet 2016. Une relation polynomiale est proposée pour associer la position de l'interface à la valeur de salinité mesurée par la sonde.

La figure suivante (Illustration 41) présente le résultat obtenu comparé à la chronique piézométrique. Les deux signaux sont en opposition de phase. Une hausse de la piézométrie engendrée par la hausse de la charge d'eau salée entraîne une baisse de l'interface, ce qui s'explique par l'Équation 4 pour $g > 1.025$. L'interface se déplace environ trois fois plus que l'évolution de la ligne d'eau piézométrique, ce qui permet d'estimer le paramètre g à environs 1.1 selon l'Équation 4, soit du même ordre de grandeur que pour X12 (cf. 0). La relation entre le niveau piézométrique et la position de l'interface est donc beaucoup plus complexe que ne le prévoit l'Équation 1 : les deux évolutions sont en opposition de phase avec un rapport de 39 pour les variations piézométriques associées aux variations de charge d'eau douce, mais ce rapport n'est plus que de 3 pour une variation piézométrique associée à une variation de la charge d'eau salée compte tenu de la réaction de l'aquifère.

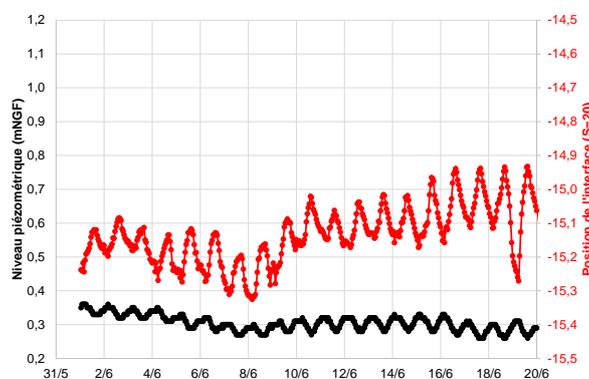


Illustration 41 : Évolution comparée de la piézométrie mesurée à L2 et de la position de l'interface lors des phénomènes de marées au piézomètre L2.

Ce résultat montre que les variations à court terme du niveau marin ne vont pas jouer un rôle très important en Basse-Crau car la relation de Ghyben-Herzberg ne s'applique pas. La réaction de l'aquifère est immédiate et permet même d'inverser le déplacement de l'interface pour le piézomètre L2. Ceci explique que toutes les diagraphies réalisées sur les piézomètres présentent de faibles variations d'amplitude saisonnières de la position de l'interface, quelle que soit l'heure de la réalisation de la diagraphie par rapport à la marée. La figure suivante illustre cette observation pour les diagraphies à L2 (Illustration 42).

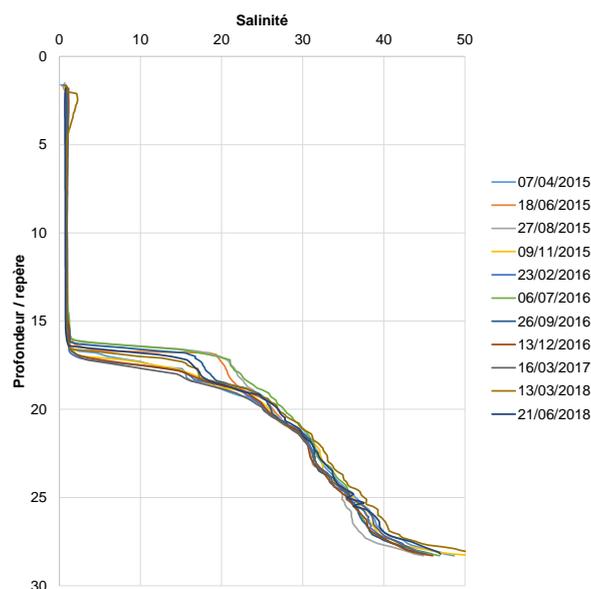


Illustration 42 : Diagraphies réalisées sur le piézomètre L2.

Ainsi, les fluctuations piézométriques liées à la marée influencent peu la position du biseau salé par rapport à ce que l'on devrait observer selon la relation de Ghyben-Herzberg.

Or, la réalisation des cartes piézométriques dans le but d'appliquer la relation de Ghyben-Herzberg ne tient pas compte de la marée (cf. 3.3). Par exemple, selon l'heure à laquelle est réalisée la mesure piézométrique, la variabilité de la mesure piézométrique pourra atteindre +/- 3 cm à L2 (Illustration 20), ce qui induit une incertitude de plus de 2 m sur la position de l'interface. Le même calcul conduit par exemple à une incertitude de près de 4 m à X12. Cette erreur n'est pas liée à la méthode d'interprétation, mais à la mesure piézométrique sous influence tidale. Il est donc illusoire de chercher à positionner plus précisément l'interface salée à partir de la piézométrie non corrigée de l'effet de marée.

4. Cartographie du biseau salé

4.1. IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES QUI CONTRÔLENT LA POSITION ET L'ÉTENDUE DE LA ZONE DE TRANSITION

L'ensemble des diagraphies réalisées par le SYMCRAU a été traité pour identifier pour chaque point analysé la position de l'eau ayant une salinité de 1, 6.3 et 20. Ces positions sont reportées dans l'illustration 43. D'autres paramètres sont également reportés afin de comprendre quelles variables contrôlent l'épaisseur de la zone de transition. Lorsque plusieurs valeurs sont disponibles, et notamment dans le cas des points suivis en continu, la valeur reportée dans le tableau correspond à la valeur moyenne.

Nom du point	n	Date ou type de suivi	m	-	m/s	m NGF	m NGF	m NGF	m NGF	Sélection	
			NGF	h	$i=dh/dl$	K-slug test	z_1	$z_{6.3}$	z_{20}		$z_{Substratum}$
X12	462	suivi continu	0.72	3.7E-02			-14.0	-18.4	-22.1	-11.7	OK
X23	431	suivi continu	0.67	4.6E-02	5.20E-03		-13.4	-18.9	-24.2	-29.4	OK
X19	10	réseau principal	0.54	4.4E-02	1.60E-03		#N/A	-16.2	-17.6	-30.8	OK
X30	10	réseau principal	0.43	3.4E-02			-5.2	-14.5	-16.5	-31.4	OK
X13	7	réseau principal	0.39	2.6E-02	7.50E-04		-10.9	-12.8	-14.1	-34.2	OK
L2	460	suivi continu	0.36	1.5E-02	9.40E-04		-13.0	-14.8	-16.1	-33.7	OK
Fgeo	1	19/06/2015	0.35	1.7E-02			-4.8	-10.7	<-13	-10.0	OK
X4415	9	réseau principal	0.33	5.3E-02			#N/A	-8.9	-9.6	-37.1	OK
X31	1	10/11/2015	0.54	2.6E-02			-15.0	<-15	<-15	-26.2	salinisation piégée au niveau des grès à -20m
Xcbis	6	réseau principal	0.94	2.1E-01	4.00E-03		<-12.74	<-12.74	<-12.74	-19.9	pas assez profond, aucune salinité
Xabis	8	réseau principal	0.59	4.4E-02			-10.9	-11.7	<-15	-24.8	pas assez profond et niveaux plus argileux à la base
Xbbis	11	réseau principal	0.46	1.8E-02	1.00E-03		0.5	-16.2	-18.1	-27.0	pas assez profond et niveaux consolidés à la base
L3	6	réseau principal	0.28	1.3E-02	1.50E-03		0.3	-11.5	-15.1	-35.5	pas assez profond et niveaux consolidés à la base
X26bis	12	réseau principal	0.59	1.7E-02	1.30E-03		-16.6	-17.8	<-18	-21.6	pas assez profond et atteint un niveau plus argileux à partir de -18 mNGF
X20bis	12	réseau principal	0.69	7.2E-02			+/- -20	+/- 21	<-24	-21.3	pas assez profond et atteint un niveau duré
X15	10	réseau principal	1.12	3.8E-02	1.60E-03		-15.6	-17.1	<-19	-35.3	pas assez profond, substratum atteint
Mazet 5	7	réseau principal	0.59	3.2E-02			-15.4	-16.2	<-17	-9.7	pas assez profond
X34	9	réseau principal	0.52	1.0E-02			-15.8	-15.9	<-16	-20.5	pas assez profond
X33	10	réseau principal	0.47	2.1E-02			-15.8	-16.4	<-17	-22.1	pas assez profond
X17	11	réseau principal	0.54	3.3E-02	1.20E-03		-0.5	-10.8	<-18.4	-28.2	hétérogène, et lien possible avec l'aquifère sup.
Par1	5	réseau principal	0.69	6.0E-02			-19.8	-24.5	<-63	-34.0	doute sur équipement et état forage
X25	8	réseau principal	1.15	5.1E-02	3.80E-03		non atteint	non atteint	<-30	-13.9	Influence de la TD
4400	1	12/11/2015	0.22	ND			non atteint	non atteint	-0.2	-44.8	hors zone de calcul

Illustration 43 : Position moyenne de l'interface salée (z_{20}) et des iso-salinité 1 et 6.3 (z_1 et $z_{6.3}$) issue de l'interprétation des diagraphies et comparées à la piézométrie moyenne (h), au gradient piézométrique calculé à partir de la carte piézométrique de mars 2017 (i), à la mesure par slug-test de la perméabilité de l'aquifère (K) et à la position du toit du substratum ($z_{Substratum}$) issue du modèle géologique (Roure et al., 2004).

Une première analyse de ces résultats consiste à vérifier si l'épaisseur de la zone de transition définie entre z_{20} et z_1 correspond au double de l'épaisseur définie entre z_{20} et z_6 , comme le prévoit la distribution normale de la salinité (cf. 3.5.1). Ces épaisseurs sont notées dz_{20-1} et dz_{20-6} respectivement. La figure suivante (Illustration 44) présente les résultats obtenus, avec le rapport de la relation théorique en pointillés.

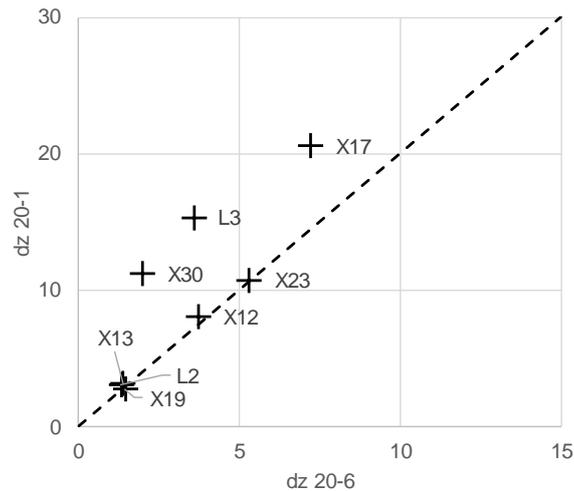


Illustration 44 : Relation entre la différence de position des iso-salinité 20 et 1 avec la différence de position des iso-salinité 20 et 6 calculée pour chaque point à partir de l'ensemble des diagraphies disponibles.

On s'aperçoit que la relation théorique est respectée pour les points X12, X13, X19, X23 et L2. Cela signifie que la distribution de la salinité dans l'ouvrage est suffisamment proche d'une distribution normale pour vérifier cette relation, mais la salinité observée dans l'ouvrage peut être différente de celle qui existe dans l'aquifère.

Les points X30, L3 et X17 présentent un écart relatif plus important pour l'iso-salinité 1. Ceci peut notamment s'expliquer par :

- les caractéristiques physiques du milieu aquifère :
 - les hétérogénéités verticales du milieu selon les faciès géologiques qui ne permettent pas d'obtenir une distribution normale de la salinité selon la verticale,
 - des flux verticaux dans le cas d'un aquifère multicouche, plus ou moins facilité par l'ouvrage qui court-circuite les écoulements,
- les caractéristiques techniques de l'ouvrage :
 - un équipement du forage non uniforme, avec des parties crépinées plus ou moins fonctionnelles, voire des passages en tube plein,
 - l'existence d'un bouchon de fond de forage où s'accumule les fluides plus denses, ce qui modifie la distribution de la salinité.

En particulier, l'analyse des diagraphies sur le piézomètre X17 montre que le minimum de salinité n'est pas toujours observé à la surface, ce qui traduit probablement un flux d'eau saumâtre depuis les hydrosystèmes plus superficiels. Ceci peut expliquer pour ce point la forme beaucoup plus étalée de la distribution de la salinité pour les faibles valeurs.

La dernière colonne du tableau de l'illustration 43 permet de mettre en évidence les points où la distribution verticale de la salinité mesurée par les diagraphies semble perturbée par les hétérogénéités locales de l'aquifère ou l'équipement de l'ouvrage, et permet également d'exclure les points non pertinents qui n'atteignent pas les salinités recherchées, soit parce que l'aquifère est peu épais (substratum atteint), soit parce qu'ils ne sont pas assez profonds. Le cas du piézomètre X25 est particulier car il est influencé par la tranchée drainante. À la foration, en 1971, ce piézomètre montrait une piézométrie qui diminuait avec la profondeur de l'ouvrage, ce qui témoigne d'une composante verticale de l'écoulement associée à la réalimentation par la tranchée drainante. Ceci expliquerait pourquoi le biseau salé se retrouve repoussé au-delà de ce que propose la relation de Ghyben-Herzberg pour ce point.

L'interprétation suivante s'appuie donc seulement sur les huit points sélectionnés. Elle suppose que la charge hydraulique reste constante selon la profondeur (hypothèse de Dupuits), que les masses d'eau douce et salée sont en équilibre hydrostatique (régime permanent) et que le mélange entre les deux fluides peut être décrit par le concept d'advection/dispersion selon la verticale. Dans ces conditions, le principal moteur de la dispersion de la salinité selon la verticale est le déplacement de l'interface salée. Ce déplacement est contrôlé par l'évolution des charges hydrauliques d'eau salée et d'eau douce, qui dépend elle-même des propriétés hydrodynamiques du milieu.

Ainsi, une relation a tout d'abord été recherchée entre l'épaisseur de la zone de transition définie par la variable $dz_{20-6}=z_{20}-z_6$ ou directement la position de l'iso-salinité 6.3 et les paramètres hydrodynamiques estimés à partir de slug tests. Aucune relation n'a pu être mise en évidence à partir de cette donnée, qu'elle soit exprimée en perméabilité ou en transmissivité. Dans un second temps, les cartes piézométriques ont été utilisées pour calculer le gradient hydraulique. Ce paramètre n'a pas non plus permis d'expliquer l'évolution spatiale de l'extension de la zone de transition. Enfin, une relation a été recherchée avec la piézométrie, en se basant sur une valeur piézométrique moyenne lorsque plusieurs données sont disponibles (h dans l'illustration 43). Il se dégage une relation qui permet d'estimer la position de la limite supérieure de la zone de transition, soit la position de l'iso-salinité 6.3 (Illustration 45).

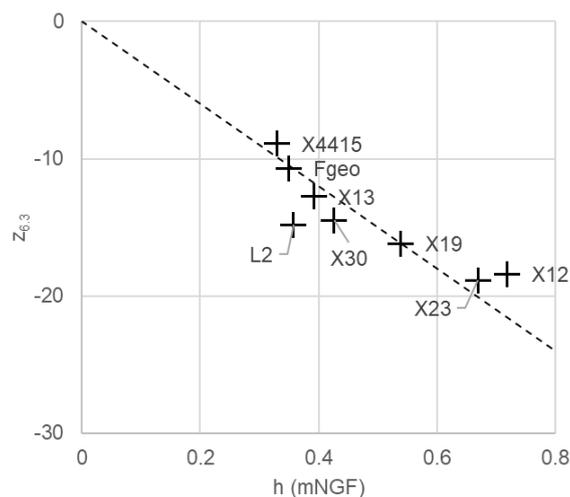


Illustration 45 : Relation entre la position de l'iso-salinité 6.3 et la piézométrie pour les points sélectionnés et comparée à la relation $z=30xh$.

Une relation linéaire avec un facteur 30 est proposée. Par comparaison avec le facteur 39 proposé par la relation de Ghyben-Herzberg dans le contexte de la Basse-Crau, cette relation suppose que l'écart type de la distribution de la salinité est proportionnel à la piézométrie, selon un facteur 9 (39-30).

Cette relation suppose que l'épaisseur de la zone de transition est d'autant plus faible que la piézométrie est faible. Or, les secteurs présentant de faibles charges hydrauliques sont stables du point de vue hydrodynamique, en lien avec la stabilité de la condition limite définie par les canaux (cf. 3.2.2). Ceci induit un faible déplacement du front salé à l'échelle saisonnière, et donc une plus faible épaisseur de la zone de transition. Ainsi, c'est essentiellement la stabilité de la piézométrie qui va contrôler l'épaisseur de la zone de transition, l'épaisseur devenant plus faible à proximité des conditions limites à potentiel imposé (laurons, canaux ou mer selon les secteurs).

La relation théorique qui lie dz_{20-6} à dz_{20-1} permet de proposer la relation $z_1=21*h$ (facteur $39-2*9$) pour calculer la position de l'iso-salinité 1, en supposant que cette salinité ne soit pas influencée en surface par des apports depuis d'autres hydrosystèmes salés ou saumâtres.

En conclusion, l'analyse de l'ensemble des diagraphies disponibles permet de supposer qu'il existe une relation simple de proportionnalité entre la piézométrie exprimée en m NGF et la profondeur de l'iso-salinité, avec un facteur 39, 30 et 21 pour les salinités de 20, 6.3 et 1 respectivement. Cette profondeur calculée doit ensuite être confrontée à la géométrie de l'aquifère, et notamment le toit du substratum, pour que ce calcul ait un sens.

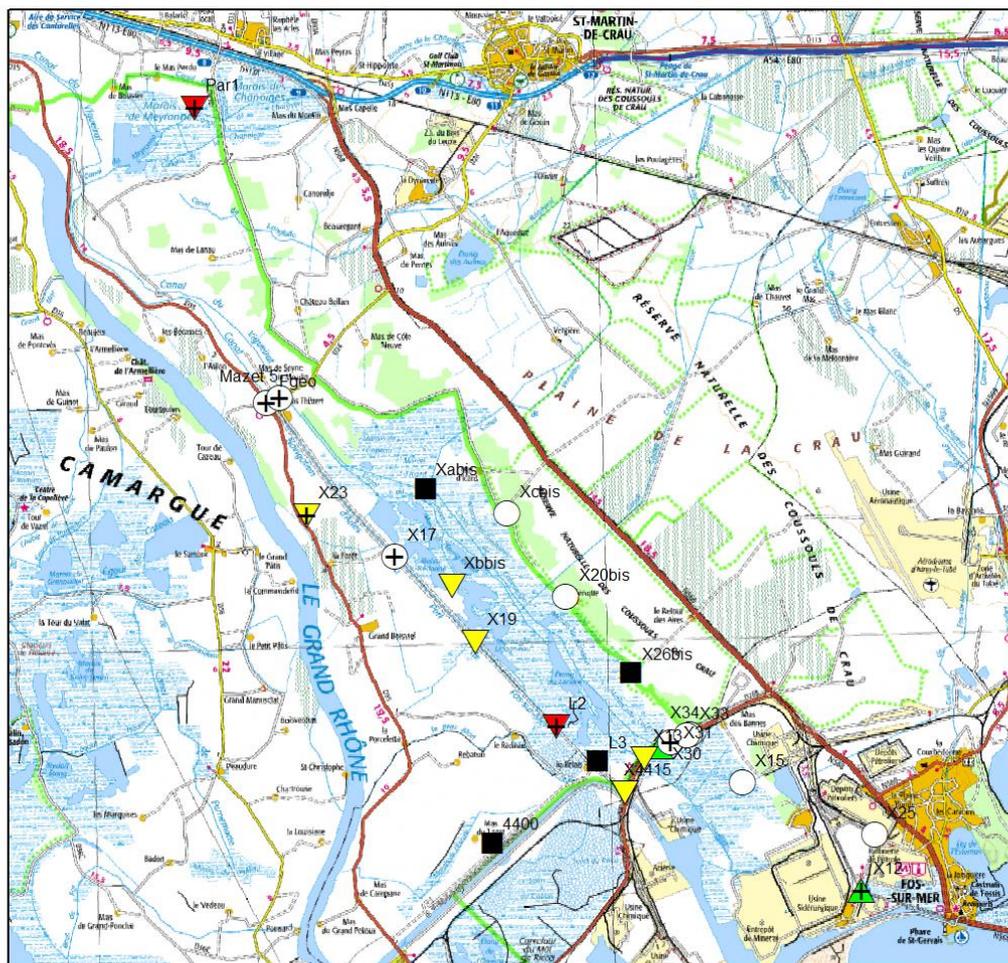
4.2. CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ

4.2.1. Limite d'extension de l'interface de salinité 20

Un calcul automatique sous SIG a été réalisé pour rechercher le point d'intersection entre la surface d'iso-salinité calculée à partir de la piézométrie et le toit du substratum.

Le calcul a été mené pour chaque campagne piézométrique, en calculant dans chaque cas la limite d'extension de l'iso-salinité 1, 6.3 et 20. Pour l'iso-valeur de salinité 20 calculée en Mars et Octobre 2017, les cartes présentées ci-dessous (Illustration 47, Illustration 48 et Illustration 49) présentent des résultats différents de ceux présentés dans le rapport intermédiaire, la méthode d'interpolation spatiale de la piézométrie étant différente et plus fidèle à la réalité dans cette nouvelle version.

Le résultat obtenu en mars 2017 est comparé aux valeurs réellement observées dans les différents points de mesure sur l'illustration 46. Les erreurs obtenues sont de l'ordre de 2 à 4 m sur la position de l'interface de salinité 20, ce qui reste dans une gamme de valeur acceptable compte tenu des simplifications et des hypothèses inhérentes à la méthode. Une erreur plus importante est commise à L2 et à PAR1.



Légende



Réseau SIMBA

+ Point de mesure (diagraphie)

Comparaison calcul/observation

Salinité 20

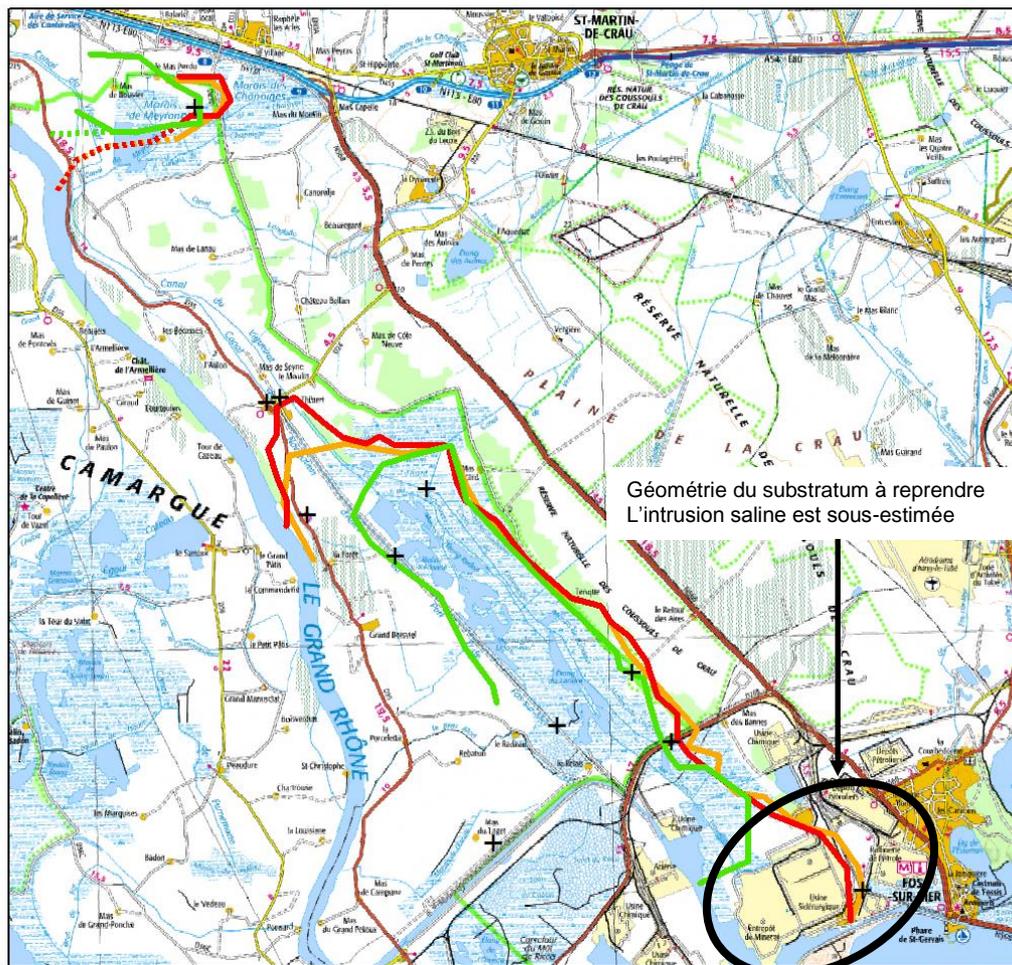
■ Ouvrage inadapté pour cette observation

○ La prof. calculée n'est pas atteinte par l'ouvrage

- ▼ erreur <2m, l'intrusion saline observée est sur-estimée
- ▲ erreur <2m, l'intrusion saline observée est sous-estimée
- ▼ erreur <4m, l'intrusion saline observée est sur-estimée
- ▲ erreur <4m, l'intrusion saline observée est sous-estimée
- ▼ erreur >4m, l'intrusion saline observée est sur-estimée
- ▲ erreur >4m, l'intrusion saline observée est sous-estimée

Illustration 46 : Représentation de l'erreur entre la position de l'iso-salinité 20 déduite des observations et celle obtenue par calcul à partir de la carte piézométrique de Mars 2017.

L'illustration 47 présente les résultats obtenus pour le tracé de l'isovaleur 20 pour les 3 campagnes piézométriques.



Légende

- | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------------------|
| Réseau SIMBA | ..... | 12/10/2017, 20, extrapolation |
| + | | Point de mesure (diagraphie) |
| Iso salinité 20 | ..... | 15/03/2017, 20, calcul |
| Campagne, salinite, origine | ..... | 15/03/2017, 20, extrapolation |
|  | ..... | 04/04/2018, 20, calcul |
|  | ..... | 04/04/2018, 20, extrapolation |

Illustration 47 : Comparaison de la position de l'iso-salinité 20 calculée pour les différentes campagnes piézométriques.

Les trois campagnes piézométriques permettent de calculer trois courbes qui apparaissent relativement différentes au niveau de Mas Thibert et au niveau de la zone industrielle de Fos. Certaines courbes sont proposées en pointillés lorsqu'une extrapolation est apportée. Cette extrapolation vise à considérer une évolution piézométrique légèrement différente au niveau des marais de Meyranne, sachant qu'il manque des observations à ce niveau.

Entre X12 et la darse Sud, le modèle géologique utilisé pour connaître la position du toit du substratum sous-estime parfois de plusieurs dizaines de mètres l'approfondissement des cailloutis de Crau. Par exemple, au point X12, la position du toit du substratum est donnée à -1.7 m NGF, alors que la coupe géologique proposée lors de la réalisation du forage positionne le mur de l'aquifère au niveau de marne ocre à -48.30 m NGF. D'autres forages de reconnaissance disponibles en BSS et réalisés le long de la darse Sud proposent des coupes géologiques qui montrent des écarts importants avec le modèle géologique.

Ce secteur ne peut donc pas faire l'objet d'un calcul précis pour l'extension latérale de l'interface salée. Il est donc proposé de ne pas tenir compte des courbes calculées dans ce secteur (cf. cercle noir sur la figure et les figures suivantes).

Le déplacement des courbes obtenues dans le secteur de Mas-Thibert, et notamment en avril 2018 montre à quel point la variabilité piézométrique peut contrôler le déplacement du front salé à l'échelle saisonnière. Le secteur de Mas-Thibert est donc particulièrement vulnérable à une baisse de la piézométrie en Basse-Crau, sachant que celle-ci est fortement conditionnée par le niveau d'eau des canaux.

La plupart des secteurs qui ne montrent pas ou peu de déplacement du front salé entre ces trois campagnes sont contrôlés par la géométrie du substratum, qui présente de fortes pentes à ce niveau (cf. Illustration 6). Une exception apparaît dans le secteur de Tenque au nord de l'étang du Landre. La stabilité de l'interface est ici liée à la stabilité de la piézométrie entre les trois campagnes. Une baisse de la piézométrie dans ce secteur devrait théoriquement engendrer une progression vers les terres de l'interface salée. Il s'agit donc d'un secteur à surveiller plus particulièrement.

Dans le secteur de la Pissarotte, l'interface salée se positionne en mars 2017 en amont de la « falaise » du substratum. La zone de forte pente du substratum qui limitait le déplacement de l'interface salée est donc dépassée. La situation observée en mars 2017 est donc relativement critique pour ce captage.

Ce résultat met aussi en avant l'existence d'une intrusion saline au niveau des marais de Meyranne, ce qui avait été mis en évidence par les diagraphies réalisées à PAR1. La piézométrie est cependant assez mal connue dans ce secteur et plus au sud, ce qui ne permet pas de proposer une continuité de la masse d'eau salée qui doit se prolonger sous la Camargue.

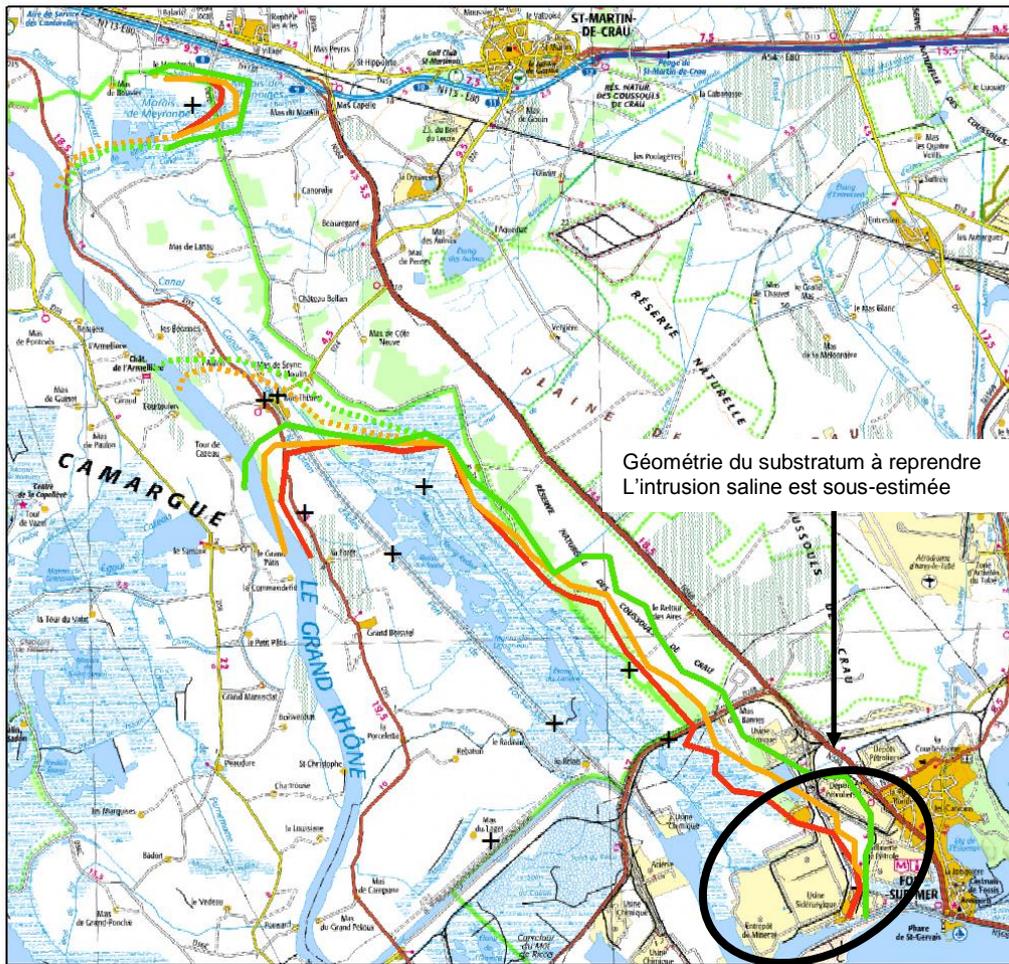
Ce calcul spatialisé montre à quel point les captages de Mas-Thibert et de la Pissarotte restent vulnérables à une salinisation en basses eaux. Le comportement hydrodynamique de la nappe traduit un équilibre complexe entre la recharge en Crau et le niveau des canaux, ce qui fait que la période la plus critique n'est pas forcément la même à Mas Thibert (octobre 2017) et à la Pissarotte (mars 2017).

4.2.2. Limite d'extension des iso-salinités 1, 6.3 et 20

Les cartes suivantes présentent les résultats obtenus pour chaque campagne en distinguant les courbes enveloppes de salinité 1, 6.3 et 20.

Des courbes extrapolées sont proposées dans le secteur de Mas-Thibert pour illustrer la sensibilité à l'introduction des conditions limites à potentiels lors de l'interpolation de la piézométrie. En effet, des charges imposées sont positionnées dans le Rhône, ce qui a tendance à maintenir une piézométrie plus élevée, et ainsi repousser la progression de la salinité vers le nord. Il serait intéressant de mieux connaître la piézométrie lors des prochaines campagnes. Par ailleurs, comme pour la carte précédente, **les tracés proposés vers la zone industrielle sous estiment toujours l'intrusion saline à cause d'une sous-estimation de la profondeur du substratum.**

Les tracés proposés relatifs à l'extension de la zone de transition restent très proches de ceux proposés pour l'iso-salinité 20, ce qui est lié à la faible épaisseur de la zone de transition (cf. Illustration 42), sauf dans les **secteurs de Tenque et de Mas-Thibert, ce qui confirme l'intérêt de mettre en place un suivi dans ces secteurs.**



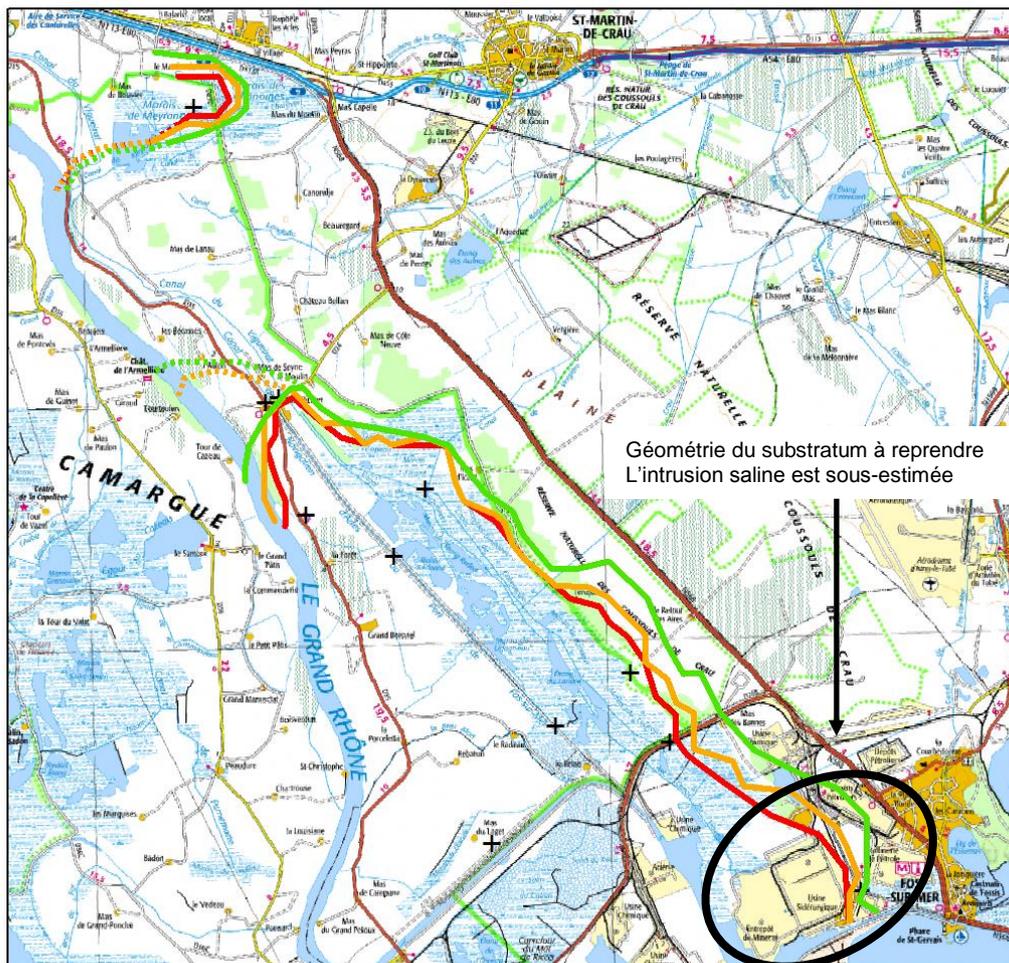
Légende

- | | | |
|------------------------------------|---|-------------------------------|
| Mars 2017 | — | 15/03/2017, 6, calcul |
| Campagne, salinite, origine | ⋯ | 15/03/2017, 6, extrapolation |
| | — | 15/03/2017, 20, calcul |
| | — | 15/03/2017, 1, calcul |
| | ⋯ | 15/03/2017, 20, extrapolation |
| | ⋯ | 15/03/2017, 1, extrapolation |

Réseau SIMBA

- + Point de mesure (diagraphie)

Illustration 48 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en mars 2017.



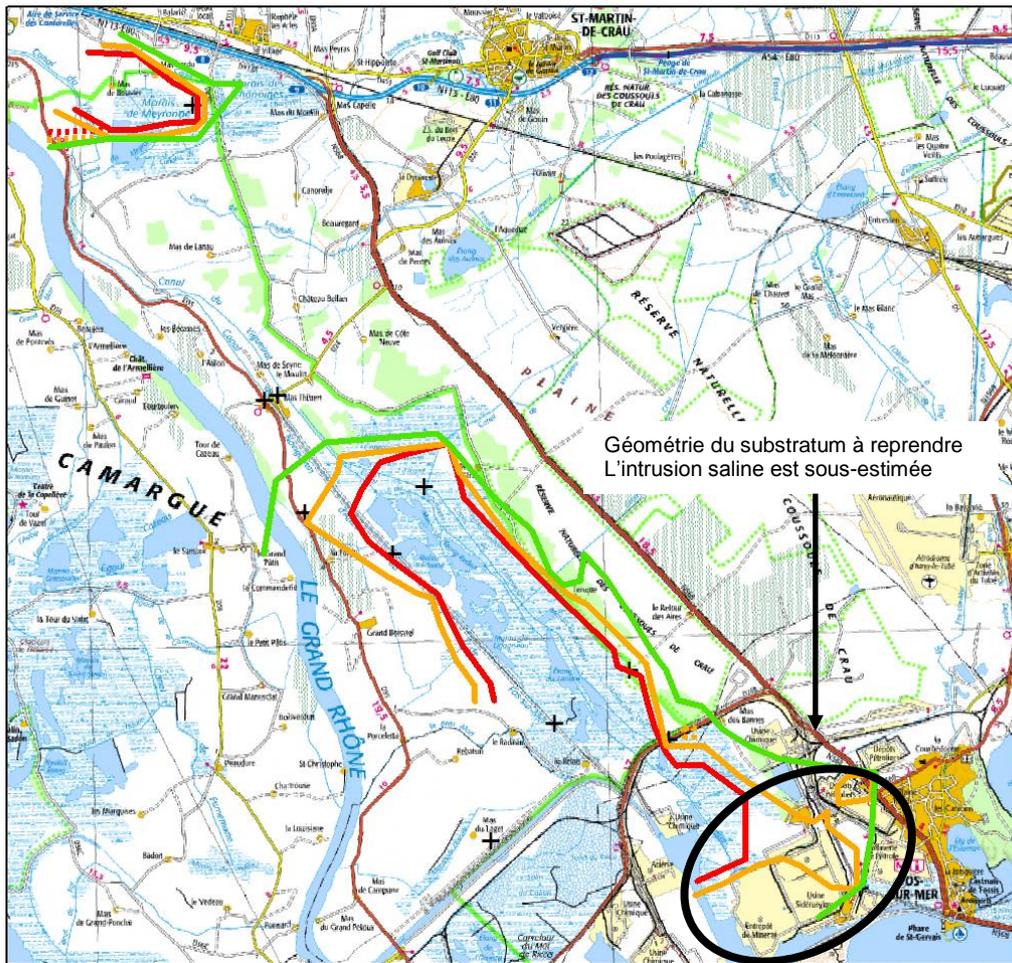
Légende

- | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------------------|
| Oct 17 | ..... | 12/10/2017, 6, extrapolation |
| Campagne, salinite, origine | — | 12/10/2017, 6, calcul |
| ..... | ..... | 12/10/2017, 1, extrapolation |
| ..... | ..... | 12/10/2017, 20, extrapolation |
| — | — | 12/10/2017, 1, calcul |
| — | — | 12/10/2017, 20, calcul |

Réseau SIMBA

- + Point de mesure (diagraphie)

Illustration 49 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en octobre 2017.



Légende

- Avril 18** 04/04/2018, 20, extrapolation
 - Campagne, salinite, origine** ——— 04/04/2018, 6, calcul
 - 04/04/2018, 1, calcul 04/04/2018, 6, extrapolation
 - 04/04/2018, 20, calcul
- Réseau SIMBA**
- + Point de mesure (diagraphie)

Illustration 50 : Résultats du calcul de l'extension du front salé en avril 2018.

5. Modèle conceptuel d'évolution du front salé

5.1. GÉOMÉTRIE DU SUBSTRATUM ET BISEAU SALÉ DANS LE CONTINUUM TERRE-MER

L'approche suivie pour la cartographie de l'intrusion saline et son évolution à l'échelle saisonnière à partir de l'évolution de la piézométrie de la Basse-Crau croise des informations relatives à la structure de l'aquifère (toit du substratum) et des informations hydrodynamiques (le niveau piézométrique mesuré sur des ouvrages non salés en surface) pour positionner l'interface et caractériser l'épaisseur de la zone de transition. Il est ainsi possible de proposer des vues 2D sur cartes qui permettent de discuter de la position relative des courbes calculées d'iso-salinité.

Cette méthode suppose que l'origine de la salinité observée dans l'aquifère provient d'un équilibre de densité entre une masse d'eau douce issue de la recharge en Crau et une masse d'eau salée en continuité hydraulique avec la mer. Les apports d'eau salée provenant d'autres hydrosystèmes de surface (canaux, marais) à l'origine d'écoulements verticaux (drainance) ne pourront pas être représentés par cette méthode cartographique, mais ceux-ci peuvent être mis en évidence à partir de l'analyse des diagraphies, ce qui sera précisé dans le cadre du projet GAMBAS. Ainsi, les observations réalisées à partir du réseau de suivi SIMBA montrent que ces apports sont parfois identifiés, mais restent négligeables par rapport à l'équilibre hydrostatique avec la mer.

Dans ce cas, la figure suivante (Illustration 51) permet de souligner la nécessité de prendre en compte la géométrie du substratum pour caractériser la dynamique de progression ou de retrait du biseau salé. Le passage du cas A1 à A2 caractérise une intrusion saline dans le cas d'une topographie du toit du substratum ayant une pente uniforme, à la fois latéralement et longitudinalement, en réponse à une baisse de charge d'eau douce. Dans ce cas, le déplacement de l'iso-salinité 20 vers les terres sera également uniforme vue du dessus (A2). Dans le cas B, le front salé vient buter localement sur une remontée du substratum, cette irrégularité n'étant pas observée ailleurs. On obtient alors un déplacement plus complexe de l'iso-salinité 20 pour la même baisse de charge d'eau douce, jusqu'à ce que cette rupture de pente soit dépassée ; on se retrouve alors dans le cas A. Ce cas permet d'expliquer la relative protection du captage de la Pissarotte vis-à-vis de l'intrusion saline.

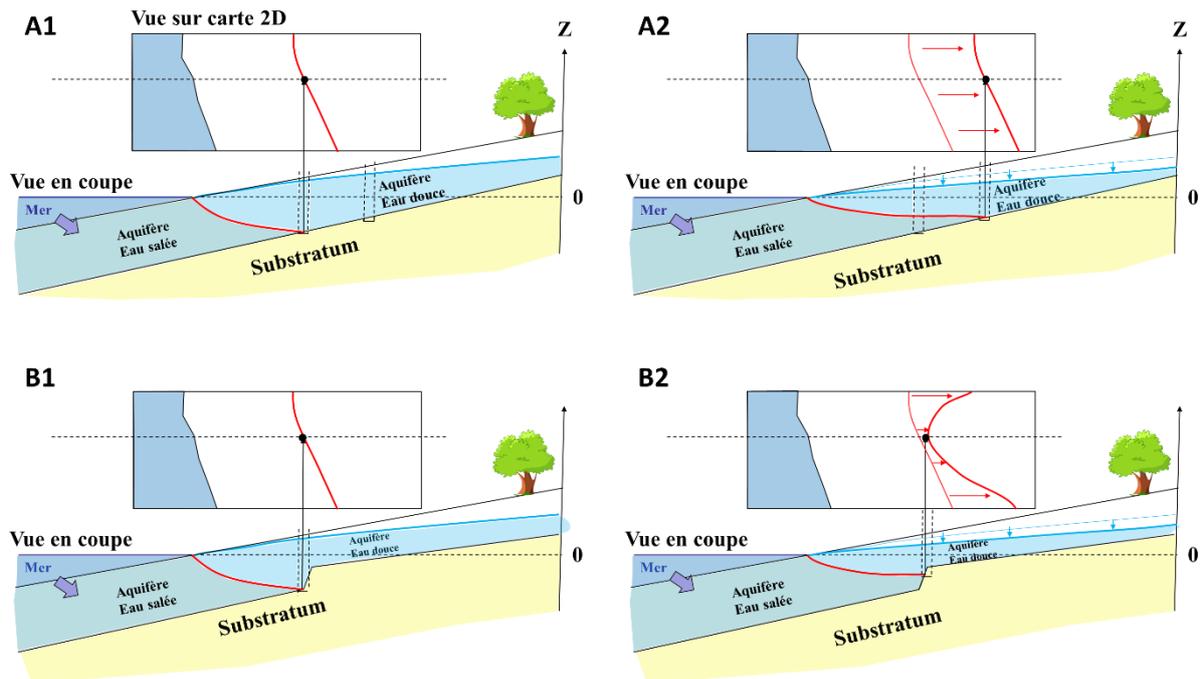


Illustration 51 : Modèles conceptuels d'intrusion saline pour 2 géométries du toit du substratum.

Dans le cas de la Basse-Crau, il est donc mis en évidence que :

- la stabilité de la condition limite aval de l'aquifère de Crau explique la faible épaisseur de la zone de transition vers l'aval du fait de l'absence de mouvements verticaux. Il reste à comprendre comment une modification de la gestion hydraulique des ouvrages de surface, tels que le barrage anti-sel ou l'ouvrage du Galéjon, peuvent modifier cet équilibre (objectif du projet GAMBAS) ;
- la salinité observée au fond des différents piézomètres étudiés provient d'un mélange de l'eau de la nappe de Crau avec une eau de mer relativement ancienne (au moins plusieurs dizaines d'années sur les points étudiés). Aucune salinisation récente n'est mise en évidence, ce qui reste conforme aux études menées dans les années 70 (Merlivat et Vuillaume, 1970 ; Vuillaume, 1970) et aux observations menées sur la partie captive en Camargue (de Montety, 2008) ;
- **la géométrie du substratum explique la variabilité spatiale observée sur la position de l'interface salée.** L'intrusion saline sera d'autant plus marquée que la pente est faible, ce qui justifie de se focaliser dans les secteurs de Mas Thibert, de Tenque et de la zone industrialo-portuaire de Fos. Il convient donc d'améliorer les connaissances sur cette géométrie, et notamment dans le secteur de la zone industrialo-portuaire (à proximité de X12) ;
- la variation du niveau marin à l'échelle journalière ou événementielle (surcotes liées aux tempêtes) entraîne une réaction de l'aquifère qui limite le déplacement vertical du front salé, et qui peut même l'inverser (exemple de L2). Il conviendra d'analyser dans le projet GAMBAS en quoi la gestion hydraulique du barrage anti-sel peut avoir une influence sur la réponse de l'aquifère. Dans les conditions de gestion actuelle, le déplacement du front salé est donc beaucoup plus sensible à une modification de la charge d'eau douce (baisse de la recharge par exemple) qu'à une modification de la charge d'eau salée ;

- **les niveaux limoneux localement aquifères peuvent influencer les profils de salinité de certains ouvrages.** Ce résultat identifié sur L2 ou X17 est probablement un artéfact lié au défaut d'isolation des deux niveaux aquifères dans le piézomètre. Par ailleurs, **des échanges avec les eaux douces des canaux sont temporairement possibles** du point de vue hydrodynamique, en crue ou en basses eaux. Ces équilibres entre masses d'eau engendrent des flux verticaux qui perturbent localement la distribution du sel selon la verticale.

La figure suivante (Illustration 52) synthétise les informations relatives à l'équilibre hydrodynamique entre les masses d'eau douce et salées, en lien avec l'évolution du climat et des usages en Crau. Cette figure met également en évidence l'amincissement de la couverture limoneuse vers la mer et le passage progressif vers un faciès plus perméable dans le golfe de Fos, et notamment au large de la pointe St Gervais, permettant ainsi des échanges directs entre la mer et l'aquifère. Ces échanges conditionnent l'équilibre entre les masses d'eau douces et salées qui se déplacent lentement vers les terres ou vers la mer selon les conditions hydrodynamiques. Ce schéma rappelle aussi qu'il n'est pas mis en évidence de contribution d'eau de mer actuelle au niveau des points d'eau échantillonnés dans l'aquifère de Crau. L'intrusion saline est actuelle et son déplacement peut être décrit à l'échelle saisonnière, mais elle mobilise au niveau de l'interface eau douce/eau salée une eau salée ayant un temps de séjour de plusieurs dizaines d'années dans l'aquifère. Le déplacement de l'interface tel qu'il est observé en Basse-Crau répond à un transfert de pression depuis les zones de contact mer/aquifère. Des prélèvements réalisés dans l'eau souterraine à proximité immédiate des darses pourraient donc présenter un temps moyen de séjour du pôle salé plus récent.

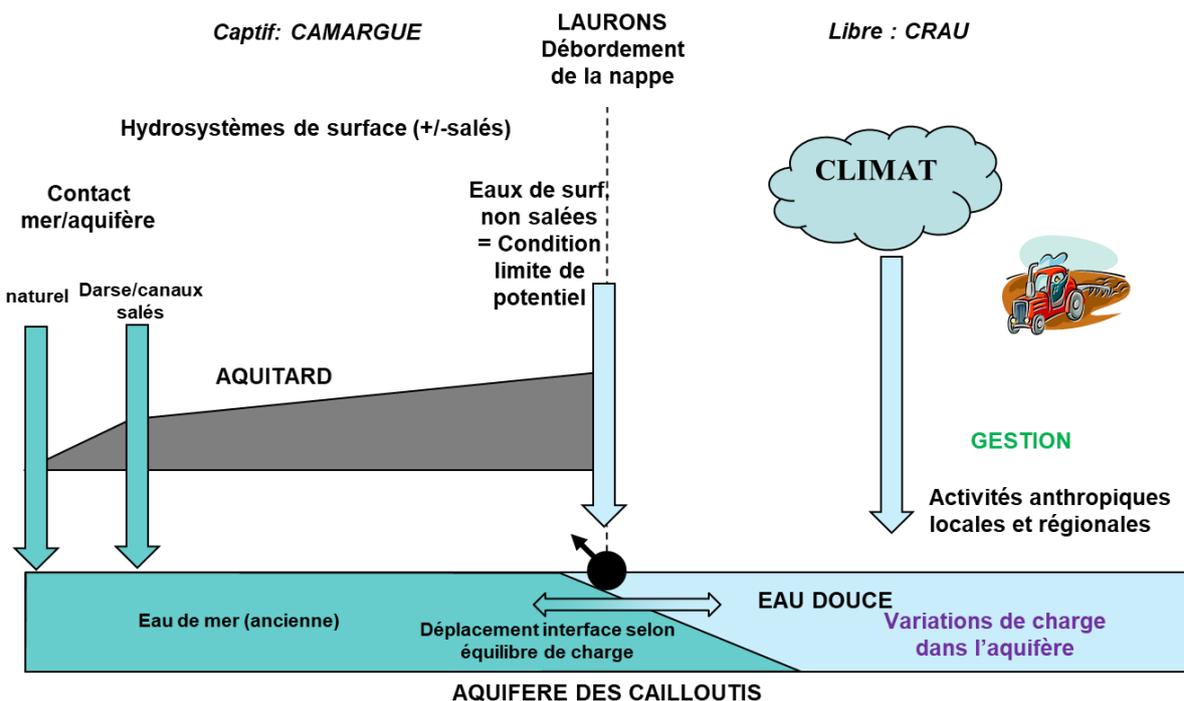
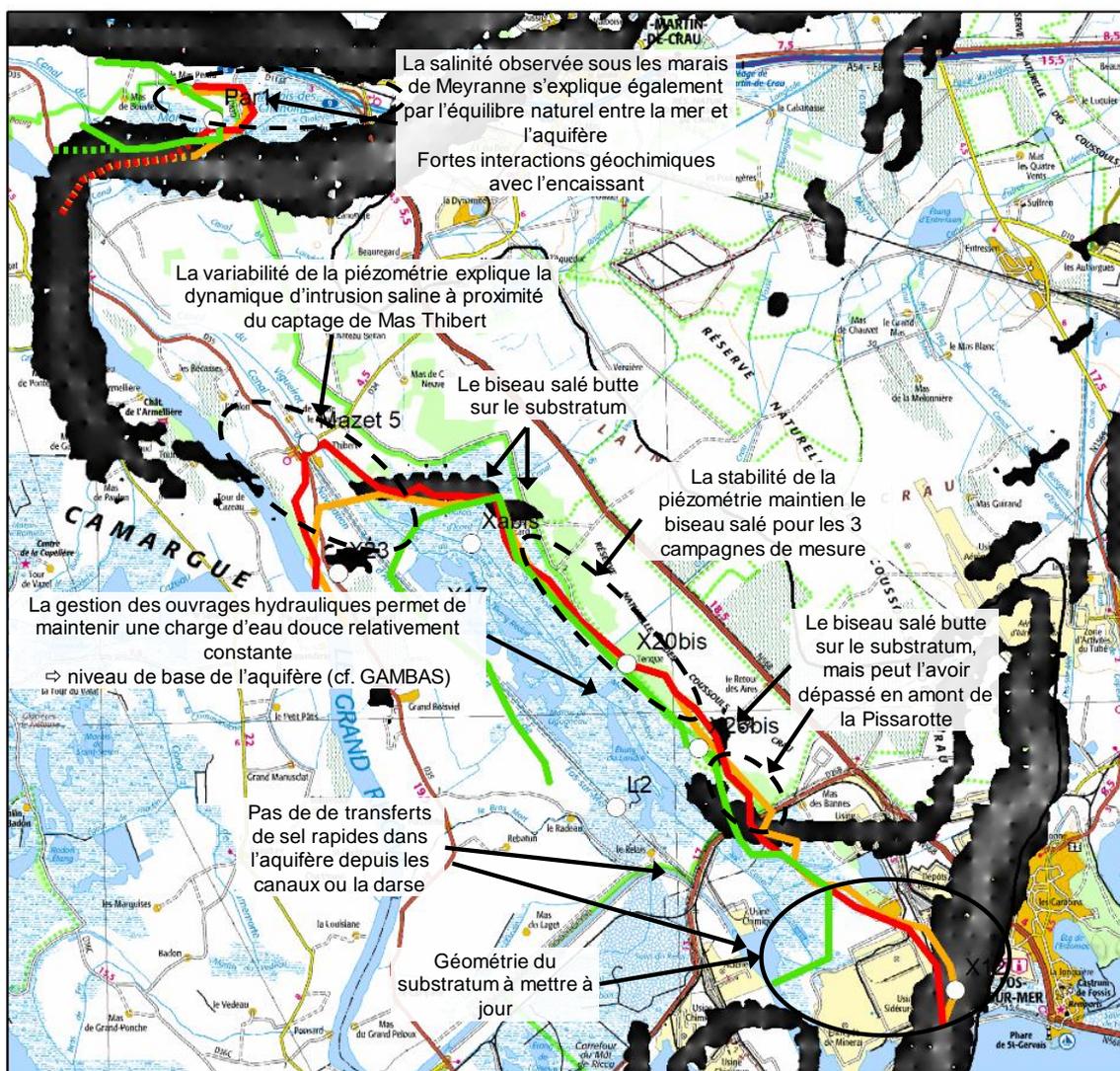


Illustration 52 : Représentation simplifiée des différents forçages qui contrôlent l'évolution de la position du biseau salée en Basse-Crau.

5.2. CARTE DE SYNTHÈSE

La carte suivante (Illustration 53) permet de positionner les principaux résultats obtenus relatifs à l'évolution saisonnière du biseau salé, et met en évidence les secteurs les plus vulnérables à l'intrusion saline. Cette carte représente l'iso-salinité 20 pour décrire la position de l'interface salée. Les reports en surface des courbes de salinité inférieures sont relativement proche à cette échelle (cf. Illustration 48 à Illustration 50) compte tenu de la faible épaisseur de la zone de transition et la pente du substratum.



Légende

Réseau SIMBA

- Réseau SIMBA suivis HCT (HT pour X20bis)

Iso salinité 20

Campagne, salinite, origine

- 12/10/2017, 20, calcul
- ⋯ 12/10/2017, 20, extrapolation
- 15/03/2017, 20, calcul
- ⋯ 15/03/2017, 20, extrapolation
- 04/04/2018, 20, calcul
- ⋯ 04/04/2018, 20, extrapolation

Pente du substratum (%)



- Contour 0 mNGF du substratum

- ⋯ Secteur vulnérable à l'intrusion saline

Illustration 53 : Carte de synthèse des résultats du projet SIMBA.

6. Proposition d'un observatoire dédié au suivi opérationnel sur le long terme du biseau salé et autres perspectives

6.1. PROPOSITION DE MODIFICATION DU RÉSEAU DE SUIVI

Les propositions d'évolution de l'observatoire pour un suivi opérationnel sur le long terme du biseau salé s'appuient essentiellement sur la notion de vulnérabilité à l'intrusion saline, en considérant qu'un secteur sera plus vulnérable s'il permet au biseau salé de pénétrer plus vers les terres pour une même baisse de charge de l'aquifère. Toute chose égale par ailleurs, c'est donc la géométrie du substratum, et notamment la présence de fortes pentes (Illustration 51) qui va guider cette interprétation.

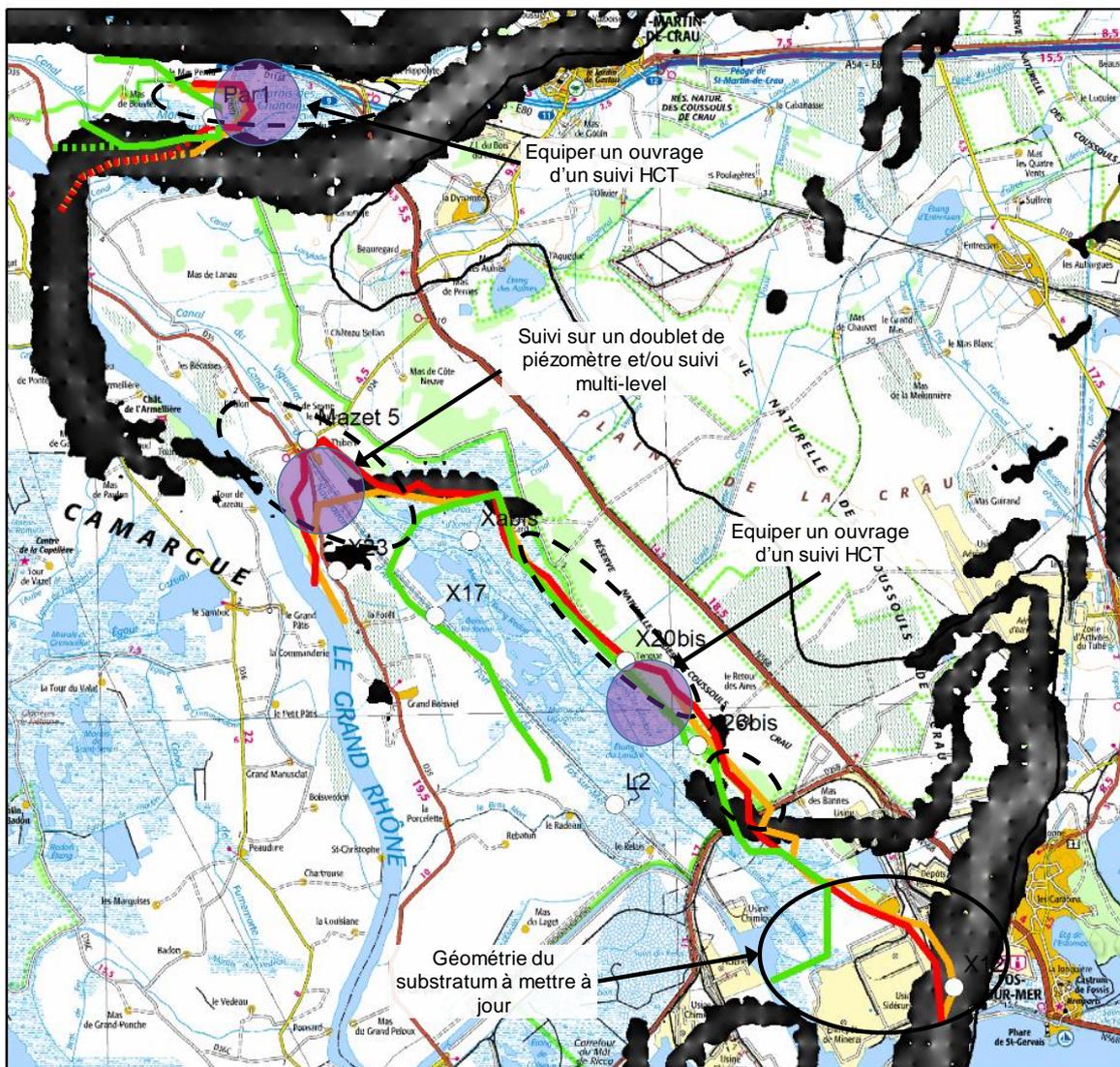
Les secteurs les plus vulnérables à l'intrusion saline et la pertinence des suivis déjà réalisés sur certains points permettent de lister ci-dessous les propositions d'adaptation du réseau de suivi (du nord au sud) :

- **Marais de Meyranne** : la géométrie du substratum permet à l'intrusion saline de progresser vers l'est en cas de baisse de charge piézométrique en Crau. Il conviendrait d'ajouter un point de suivi dans ce secteur, si possible en amont de PAR1, dans un ouvrage qui atteint le substratum et qui est crépiné sur toute l'épaisseur des cailloutis ;
- **Mazet 5** : il existe déjà un réseau de suivi de la piézométrie en amont du captage de Mas Thibert. Cependant, les ouvrages disponibles ne recoupent pas toute l'épaisseur de l'aquifère jusqu'au substratum, ce qui ne permet pas de bien identifier l'évolution du biseau salé à ce niveau. Il conviendrait comme pour PAR1 d'équiper un autre piézomètre dans le secteur de Mas Thibert. Idéalement, des observations réalisées à Mazet 5 pourraient être conservées, et complétées plus au sud (cf. Illustration 54) par deux piézomètres plus profonds atteignant le substratum, l'un crépiné sur toute la hauteur (pour étudier la distribution verticale de la salinité), et l'autre seulement à la base de l'aquifère (pour mesurer la charge d'eau salée et la comparer à celle d'eau douce). Un dispositif multi-crépiné ou multi-level de mesure de salinité (mesure indirecte par hydrogéophysique) pourrait également être proposé à ce niveau. Des suivis du niveau d'eau (douce) dans les canaux à proximité de Mazet 5 seraient également utiles. Le suivi de la salinité à Mazet 5 n'est pas forcément nécessaire, ce point n'étant pas assez profond. Le maintien d'un suivi de la charge hydraulique reste cependant intéressant pour le comparer aux suivis proposés plus au sud (cf. Illustration 54) ;
- **Tenque** : au moins un point complémentaire atteignant le substratum avec une coupe technique connue serait utile en aval du point X20bis. C'est un secteur qui semble contrôlé par la piézométrie, ce qui signifie qu'il est particulièrement vulnérable à une baisse de la piézométrie en Crau. Le point X20 (n° BSS BSS002JFCJ) pourrait être utilisé comme point de suivi complémentaire, ou, à défaut, le point X20bis ;
- **Landres et barrage anti-sel** : le point L2 est à maintenir, car il permettra également de valoriser les suivis et les interprétations des résultats obtenus dans le cadre du projet GAMBAS avec le GPMM. En complément, et dans le cadre du projet de mutualisation des réseaux (SYMCRAU/GPMM, 2017), il conviendra de valoriser les suivis réalisés par le GPMM sur les eaux de surface, en amont et aval des ouvrages du Galéjon et du barrage anti-sel, ainsi qu'au niveau du canal de Colmatage (cf. Projet GAMBAS). Il est proposé de maintenir le suivi au point X26bis ;
- **Pissarotte** : il convient de maintenir le réseau de suivi actuel dans ce secteur.

Ces suivis complémentaires proposés correspondent à des suivis HCT avec la sonde positionnée au plus près de l'interface salée définie par l'iso-salinité 20. Par ailleurs, les suivis réalisés sur les ouvrages X17, X23 et XAbis pourraient être arrêtés pour redéployer le matériel ailleurs, notamment sur les nouveaux points de suivis proposés. Il conviendra de réaliser une fois par an un contrôle de la dérive de la mesure de salinité, notamment sur le matériel déployé depuis 2017.

De plus, la poursuite des campagnes de diagraphies à une fréquence trimestrielle reste recommandée pour caractériser l'évolution de salinité selon la profondeur, en incluant a minima l'ensemble des points équipés de suivis en continu de la salinité. Cette fréquence pourra s'adapter au contexte hydrogéologique afin d'obtenir des mesures dans des conditions hydrogéologiques les plus contrastées possibles, en ciblant les crues et les étiages prononcés, afin de garantir la meilleure interprétation temporelle de l'évolution des diagraphies selon la méthode décrite au paragraphe 3.5.2.

Ces propositions d'adaptation du réseau sont reportées sur la carte ci-dessous (Illustration 54).



Légende

Réseau SIMBA

- Réseau SIMBA suivis HCT (HT pour X20bis)

Iso salinité 20

Campagne, salinite, origine

- 12/10/2017, 20, calcul
- ⋯ 12/10/2017, 20, extrapolation
- 15/03/2017, 20, calcul
- ⋯ 15/03/2017, 20, extrapolation
- 04/04/2018, 20, calcul
- ⋯ 04/04/2018, 20, extrapolation

Pente du substratum (%)

Valeur



- Contour 0 mNGF du substratum

- ⋯ Secteur vulnérable à l'intrusion saline

- Secteur identifié pour la mise en place d'un nouveau dispositif de suivi

Illustration 54 : Localisation des secteurs identifiés pour la mise en place d'un suivi pour l'observatoire de l'intrusion saline.

6.2. AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE ET DE SUIVI DE L'INTRUSION SALINE EN BASSE-CRAU

6.2.1. Géométrie du substratum

L'étude menée dans le cadre du projet SIMBA, permet de valoriser l'information disponible sur la géométrie du substratum à partir des travaux de Roure *et al.* (2004). Le modèle géologique utilisé montre cependant certaines incohérences à proximité du secteur industrialo-portuaire, et notamment au niveau du point X12. Il conviendrait donc d'intégrer les informations relatives à la position du substratum pour proposer une amélioration du modèle géologique. Ce travail sera réalisé localement dans le cadre du projet GAMBAS en partenariat avec le GPMM, mais une révision de l'ensemble du modèle serait utile à l'échelle de la Basse-Crau pour améliorer les résultats obtenus par la méthode de calcul de l'extension du biseau salé développée dans le cadre du projet SIMBA.

6.2.2. Améliorer la connaissance sur l'état des ouvrages suivis

Certains ouvrages existants sont anciens (plus de 40 ans) et peuvent nécessiter un entretien ou une remise en état. La dernière inspection réalisée par le bureau d'étude SAFEGE date de 2006 et demande donc à être renouvelée au niveau des ouvrages suivis. Une inspection vidéo réalisée dans le cadre du projet sur l'ouvrage X4415 a par exemple permis de confirmer le bon état général des crépines et de préciser la coupe technique de ce point.

Certains piézomètres se terminent par un tube plein, ou crépiné dans une partie non-aquifère au niveau du substratum. Les diagraphies montrent dans ce cas une augmentation de la salinité en profondeur qui peut s'expliquer par la présence d'eau plus dense piégée. Il serait intéressant de réaliser un pompage des eaux saumâtres identifiées en fond d'ouvrage lors de diagraphies pour comprendre si cette salinité est propre à l'ouvrage et disparaît suite au pompage, ou si cette salinité correspond à celle de l'aquifère environnant. Cette information est essentielle pour permettre de bien interpréter les résultats des diagraphies.

6.2.3. Prospection géophysique aéroportée

En complément de ce réseau, ce site d'étude se prête bien à l'application de méthode géophysique aéroportée pour caractériser spatialement l'information sur la position de l'interface. Cette opération pourrait être menée une fois que le réseau de surveillance sera opérationnel, et si possible lors d'au moins deux campagnes réalisées pour des conditions hydrologiques contrastées. Les méthodes électromagnétiques haute résolution permettraient de positionner l'interface salée, de mieux décrire l'évolution spatiale de la zone de transition, et aussi de mieux comprendre la structure des niveaux aquifères en distinguant les niveaux limoneux superficiels des cailloutis en profondeur. Cette méthode permet en effet de recevoir un signal influencé par la porosité des roches et leur contenu en fluides (mais aussi par la salinité de ces fluides), ainsi que par la présence d'argile, sur des profondeurs du sous-sol de plusieurs dizaines de mètres, ce qui est parfaitement adapté au contexte de la Basse-Crau.

6.2.4. Perspectives dans le cadre du projet GAMBAS

Le projet GAMBAS va permettre de mieux comprendre le lien entre la gestion hydraulique du réseau de canaux et le déplacement du front salé à proximité du barrage anti-sel, dans le but de faire évoluer les règles de gestion pour répondre aux différents usages. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet viendront compléter la compréhension des phénomènes qui contrôlent la progression du sel dans l'aquifère.

7. Conclusion

Le projet SIMBA a permis de mettre en place un premier réseau de suivi de la salinisation de la nappe de Crau, en dressant un état des lieux des connaissances qui retrace l'historique des investigations et des études menées par divers organismes avant et après le développement de la zone industrialo-portuaire. Les observations issues de ce réseau, complétées par des analyses géochimiques et isotopiques permettent aujourd'hui de disposer d'un modèle conceptuel décrivant le déplacement de l'interface salée à différentes échelles de temps, en identifiant les différents forçages.

Des développements méthodologiques innovants ont été proposés dans le cadre de ce projet pour :

- associer pour un même piézomètre les suivis continus de salinité en un point de l'aquifère aux données issues des campagnes de diagraphies de salinité pour définir une matrice d'évolution de la salinité selon le temps et la profondeur ;
- recalculer l'évolution horaire ou journalière de la position de l'interface salée dans un piézomètre à partir des suivis de salinité ;
- cartographier l'extension des courbes de salinité 20, 6.3 et 1 dans l'aquifère à partir de la piézométrie et de la géométrie du substratum en s'appuyant sur les concepts d'équilibre densitaire et de transport dispersif 1D selon la verticale.

Les principaux résultats obtenus mettent en évidence que :

- la stabilité des niveaux d'eau définissant le niveau de base de l'aquifère (ligne d'émergence des Laurons et canaux de drainage) explique la faible épaisseur de la zone de transition vers l'aval ;
- la salinité observée au fond des différents piézomètres étudiés provient d'un mélange avec une eau de mer d'au moins plusieurs dizaines d'années sur les points étudiés ;
- la géométrie du substratum explique la variabilité spatiale observée sur la position de l'interface salée. L'intrusion saline sera d'autant plus marquée que la pente est faible ;
- le déplacement du front salé est beaucoup plus sensible à une modification de la charge d'eau douce qu'à une modification de la charge d'eau salée ;
- la salinité observée sous les marais de Meyranne dans l'aquifère de Crau s'explique par l'équilibre hydrostatique avec la mer, et constitue donc le prolongement vers le nord de la même nappe salée qui s'étend vers l'aval sous la Camargue.

L'analyse des différents forçages pouvant contrôler l'évolution de l'intrusion saline montre que c'est avant tout la variabilité piézométrique à l'échelle saisonnière, en partie contrôlée par la recharge de la nappe de Crau mais également par l'évolution des conditions limites de potentiels (niveau d'eau des canaux) qui est l'élément déterminant. Les variations à court terme liées à la marée devraient, par application directe de la relation de Ghyben Herzberg, engendrer des variations importantes qui ne s'observent pas, car la marée entraîne une modification plus complexe de l'équilibre en modifiant à la fois les charges d'eau douce et d'eau salée, contrairement à la recharge de l'aquifère ou la variation de niveau d'eau des canaux qui ne modifie que la charge d'eau douce.

Au niveau local, les résultats mettent en évidence la forte vulnérabilité des captages AEP de Mas Thibert et de la Pissarotte. Une proposition d'adaptation du réseau de surveillance vise à améliorer les connaissances sur le déplacement de l'interface salée vers Mas-Thibert, ainsi que sur les secteurs des marais de Meyranne (au nord de la zone d'étude) et de Tenque (au centre de la zone d'étude) qui montrent également une forte vulnérabilité à l'intrusion saline.

Cette méthodologie permet in-fine de proposer des cartes d'évolutions de la position de l'interface salée, en reproduisant également les courbes de salinité 6.3 et 1 pour imager l'extension latérale de la zone de transition. Les cartes produites mettent en avant les secteurs les plus vulnérables vis-à-vis de l'intrusion saline, ce qui permet de proposer une adaptation du réseau de suivi actuel en vue de la définition d'un réseau de surveillance de l'intrusion saline opérationnel. Cette approche ne nécessite que des données relativement simples à acquérir (niveau d'eau, salinité) dès lors qu'un site dispose d'un réseau piézométrique suffisamment dense pour construire une carte piézométrique.

L'ensemble des données acquises dans le cadre de ce projet et leur interprétation permettent de préciser le modèle conceptuel d'évolution de l'interface salée en Basse-Crau, données et connaissances essentielles pour alimenter l'étude SINERGI relative à la « Sensibilité de la nappe de Crau aux conditions de prélèvements de recharge et de gestion de crise » portée par le SYMCRAU.

En perspectives, au-delà de l'adaptation du réseau de suivi, des investigations complémentaires par géophysique aéroportée sont proposées pour améliorer les connaissances sur la géométrie de l'intrusion saline en trois dimensions. Le projet GAMBAS (partenariat GPMM/BRGM) va également permettre de préciser les relations entre la gestion des ouvrages hydrauliques à proximité du barrage anti-sel et la réponse hydrogéologique, à la fois en termes de drainage de la nappe et de maintien du biseau salé.

8. Bibliographie

Appelo, C.A.J., Postma, D. (2005) - *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, second ed. Balkema, Rotterdam.

Bailly-Comte V., Rivet F. avec la contribution du SYMCRAU Villesseche D. (2018) - *Projet SIMBA. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-67606-FR*, 62 p., 34 ill.

BCEOM (2007) - Étude hydro-environnementale sur secteurs naturels et agricoles du Port Autonome de Marseille Zone de Fos - Phase 2 Analyse des problématiques, rapport ENS 40228V.

Celle, H. (2000) - *Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée Occidentale. Approche isotopique et chimique*, Thèse. Univ. Avignon.

CERIC (1977) - Étude du coin salé - État 1977. Note. Etude n°3708/5102.K, 21 p.

Cooper, H.H., Kohout, F.A., Henry, H.R. et Glover, R.E. (1964). - *Sea water in coastal aquifers*, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1613-C, 84 pp.

Dellery et al. (1964). - Étude hydrogéologique de la Crau. Rapport BRGM/64-DSGR-A-049, 375 p., 46 Fig.

EGIS Eau (2007). - Étude hydraulique et environnementale : Diagnostic et définition de scénarios d'aménagements pour une gestion intégrée du canal du Vigueirat - Secteur allant de Mas-Thibert à l'étang du Landre, rapport GRI 75166J.

ERG (2010). - *Projet de réfection et de réalisation de piézomètres, Fos sur Mer – Arles (13)*, rapport d'intervention, Grand Port Maritime de Marseille.

Faure, G. (1986) - *Principles of isotope geology : 2nd edition*, 589 pp., John Wiley & Sons, Inc.

Jenkins, G. M. and Watts, D. G. (1968) - *Spectral Analysis and Its Applications* Holden-Day. San Francisco, 243-238.

Mayer A., Bach Tao N., Banton O. (2016). - Using radon-222 to study coastal groundwater/surface-water interaction in the Crau coastal aquifer (southeastern France). *Hydrogeology Journal*, Official Journal of the International Association of Hydrogeologists. ISSN1431-2174, 17 p.

De Montety (2008). - *Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque - Cas de la Camargue (delta du Rhône, France)*. Thèse, Université d'Avignon des Pays de Vaucluse, 280 p., 92 fig., 23 tab., 5 ann.

Merlivat L. et Vuillaume Y. (1970). - *Caractérisation de l'intrusion marine dans la nappe de la Crau à l'aide du Deuterium*. Rapport BRGM/70-SGN-142-HYD, 5 p.

Millero, F.J. et Poisson, A. (1981). - International one-atmosphere equation of state of seawater, *Deep-Sea Res.*, 28, 625.

Petelet-Giraud, E., Negrel, P., Aunay, B., Ladouche, B., et al. (2016) - Coastal groundwater salinization: Focus on the vertical variability in a multi-layered aquifer through a multi-isotope fingerprinting (Roussillon Basin, France). *Science of The Total Environment* 566, 398-415.

Roure S., Duvail C., Aunay B., Le Strat P. (2004). - Géodynamique des systèmes Plio-quadernaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau. Rapport BRGM/RP-53088-FR, 69 p., 29 ill.

SAFEGE (2006). - Synthèse de la surveillance du biseau salé sur la nappe de la Basse-Crau et sur le captage de la Pissarotte. SAFEGE ENVIRONNEMENT/MD00289, 44 p., 10 Fig., 4 ann.

Schmorak, S., Mercado, A. (1969). - Upcoming of fresh water-sea water interface below pumping wells, field study. *Water Resources Research* 5, no. 6 : 1290-1311.

SYMCRAU/GPMM (2017) - Mutualisation d'un réseau d'observation des intrusion marines en Basse-Crau. 39 p., 3 ann.

Vilomet et al. (2002) - Application of Strontium Isotopes for Tracing Landfill Leachate Plumes in Groundwater. *Environmental science & technology*. 35. 4675-9. 10.1021/es000169c.

Vuillaume Y. (1970). - Caractérisation géochimique de l'intrusion marine dans la nappe de la Crau. Rapport BRGM/70-SGN-133 HYD. 46 p., 5 ann.

Wagner, R.J., Boulger, R.W., Jr., Oblinger, C.J., and Smith, B.A. (2006) Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors-Station operation, record computation, and data reporting: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 1–D3, 51 p. + 8 attachments; accessed April 10, 2006, at <http://pubs.water.usgs.gov/tm1d3>.

Wagner et Kent (1985). - Upcoming of a salt-water-fresh-water interface below a pumping well, Oklahoma State Univ., EPA/600/2-85/066, 33p.

Annexe 1

Fiches des points de suivi du réseau d'observation de l'intrusion saline mis en place dans le projet SIMBA

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10192X0102/L2 Nom : **L2**

Nature de l'ouvrage :piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :2009..... Entreprise de forage :...ERG....

Propriétaire actuel :GPMM.....

Coordonnées : **XL93** : 846 443.05 **YL93** : 6 266 773.22

Altitude du sol : 1.61 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 1.98mNGF

Date du nivellement : septembre 2009 (ERG)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Commune :Arles.....
Arles à Fos)...

Lieu-Dit : le grand clos (rive gauche canal

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :

15 min à pied à parcourir le long du canal, à partir de l'ouvrage du Galéjon

Aménagements de la tête de puits :

Tubage acier fermé avec cadenas artillerie

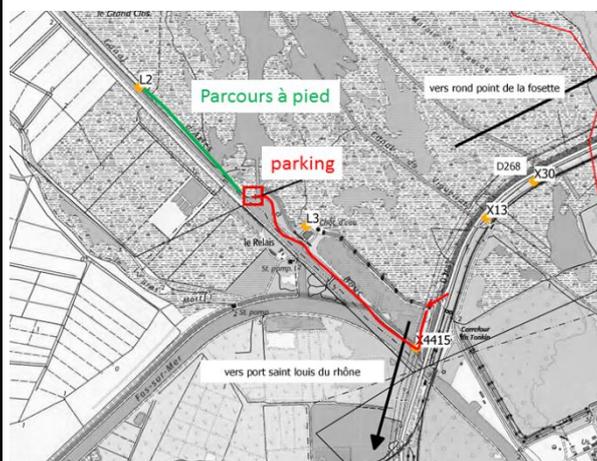
Conditions d'accès à l'ouvrage :

Facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :

Facile

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Photos



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :

Zone de marais, rive gauche canal Arles à Fos (sur la digue)

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

Usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 60 mm
52 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage

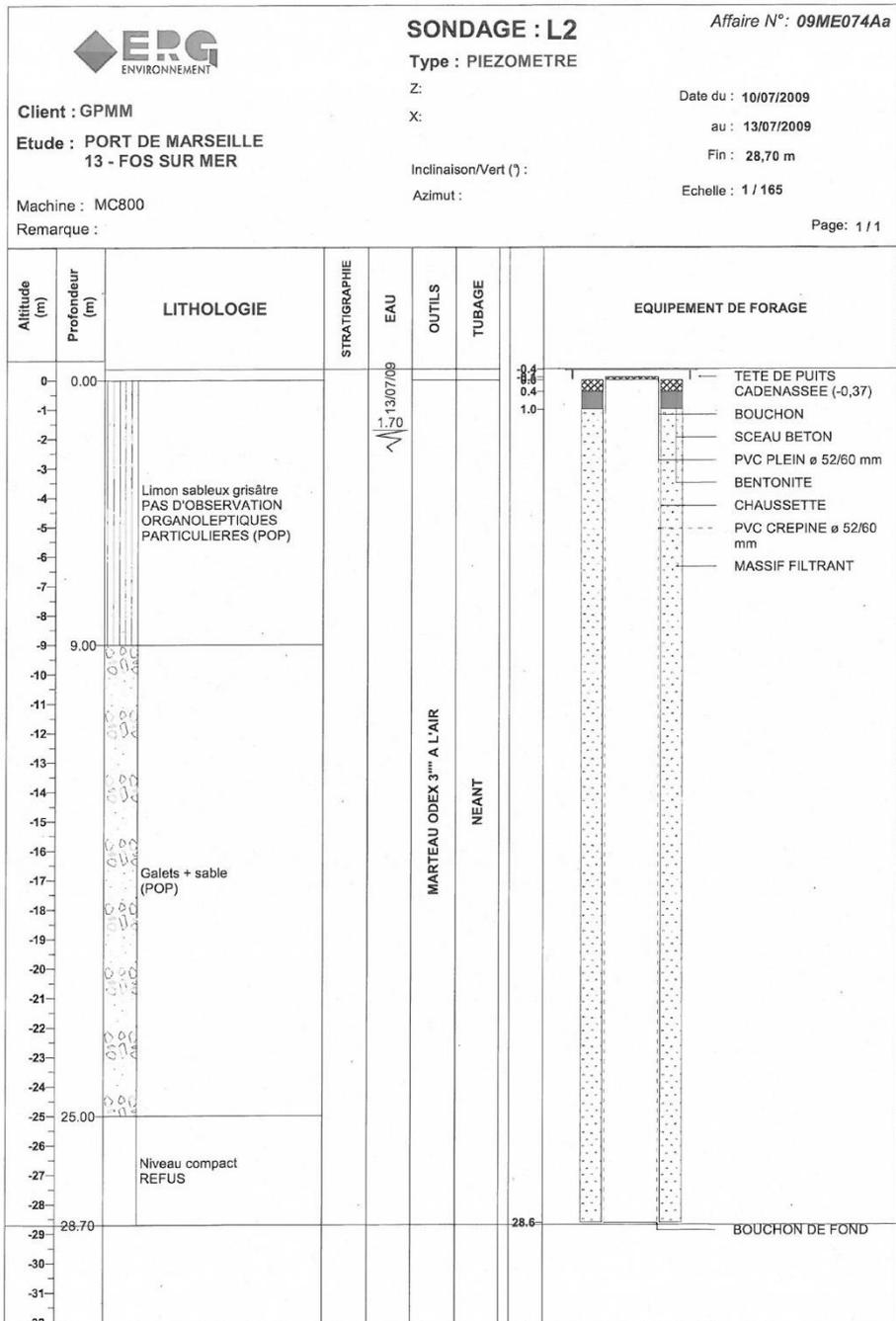
Profondeur maximale de l'ouvrage : 28 mètres

Crépine de l'ouvrage : coupe technique Niveau statique (m/sol) : 1.27 Date de la mesure
21/06/2017

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre : Accès libre – prévenir GPMM

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de d'appareil : OTT Ecolog 800

Numéro de série : 420199

Position du capteur (mNGF) : -15,02

Alimentation : batterie

Télétransmission : O

Numéro d'appel 07 64 68 63 03 N° carte SIM 9517035383476

Date de mise en service 24/05/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

RAS

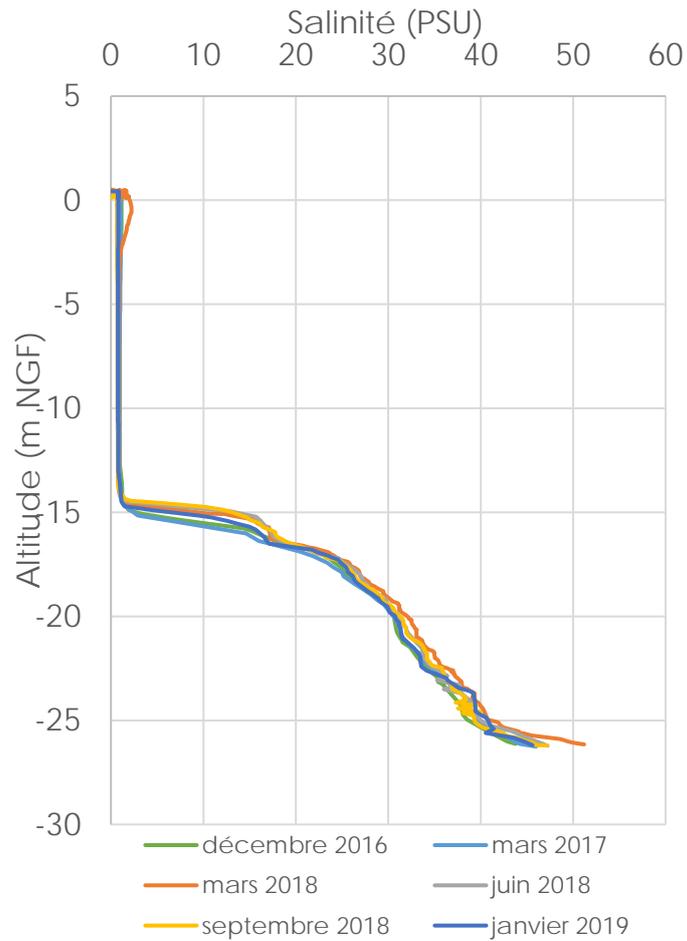
Analyses chimiques

Analyse chimique réalisée par le SYMCRAU en mars 2016 :

Nom des échantillons	HCO3-	SO4--	K+	Mg++	Ca++	Na+	% eau mer	Ca/Na	[Ca+Mg]/Na
L2	-2,88	-12,62	-1,87	7,79	43,49	-55,74	80%	-0,78	-0,92

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



SLUG-TEST

Date : 24/05/2017

Point	Date	Pas de temps (s)	Niveau statique (m NGF)	K moyen (m/s)	Ecart type K (m/s)	Nombre de mesures
L2	24/05/2017	0.5	1.6	9.36E-04	7.79E-04	5

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10191X0060/MAZET5 Nom : **Mazet5**....

Nature de l'ouvrage : ...piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :inconnue..... Entreprise de forage :inconnue.....

Propriétaire actuel : ...ACCM.....

Coordonnées : **XL93** : 839 719.099 **YL93** : 6 274 879.795

Altitude du sol : 1.018 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 1.918mNGF

Date du nivellement :03/07/17 (BRGM)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Commune :Arles

Lieu-Dit : ...Mas Thibert

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :
bord de RD, piézomètre sous le château d'eau

Aménagements de la tête de puits :

Buse avec plaque métallique, tête de piezo avec cadenas

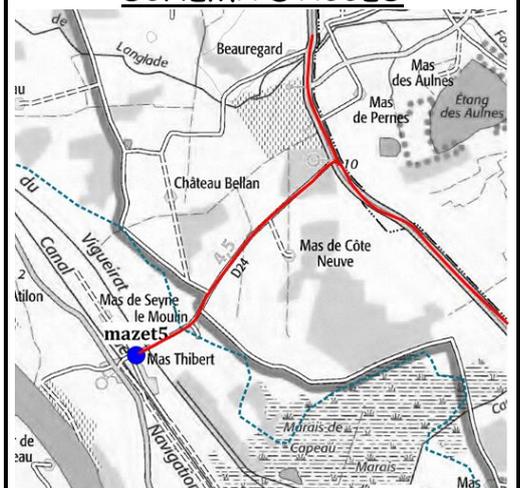
Conditions d'accès à l'ouvrage :

Très facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :

Ouverture plaque métallique avec pied de biche

SCHEMA D'ACCES



PHOTOS :



Projet SIMBA



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :

En bord de route, bordure du village, sous le château d'eau, environ 1,5 km en aval du captage AEP du mazet

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

Usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 22cm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage : 7,6 cm

Profondeur maximale de l'ouvrage : 19,1 m/repère piezo

Crépine de l'ouvrage : 11.6m profondeur/repère **Niveau statique (m/sol) :** 0,84 date de la mesure 23/06/2017

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre : ACCM

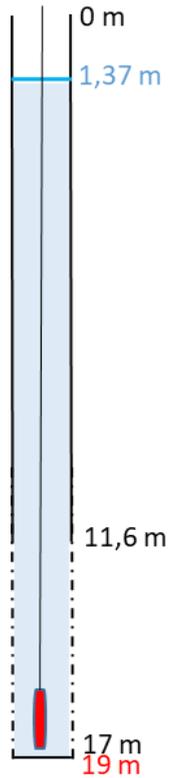
Pour l'ouvrage non équipé, matériels à mettre en œuvre pour l'échantillonnage :

Pompe, groupe électrogène, eaux exhaure

Projet SIMBA

Coupe technique :

D'après investigation camera réalisée le 19/06/2018



EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur OTT ECOLOG 800

Numéro de série SN 420197

Position du capteur (mNGF) : - 16

Alimentation : batterie

Télétransmission : O

Numéro d'appel 07 64 68 63 01 Carte SIM 9517035383468

Date de mise en service 08/06/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

RAS

Projet SIMBA

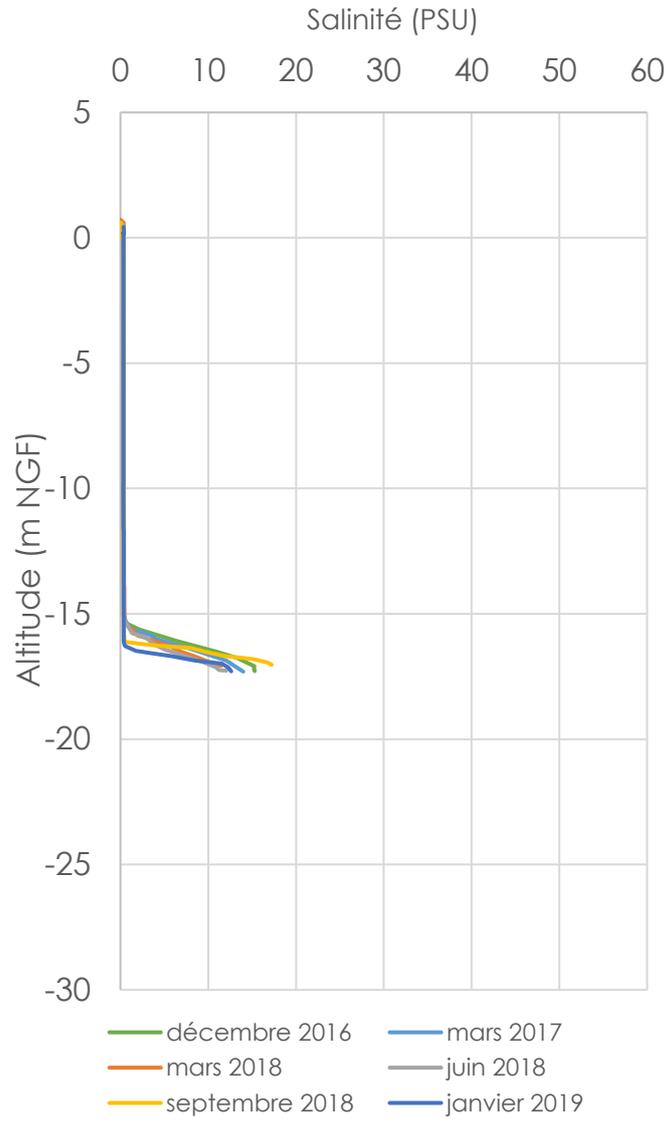
Analyses chimiques

Prélèvements effectués le 02/07/18

		Campagne	juil-18
		Id	Mazet5
Terrain	Date	02/07/2018	
	SPC@25°C	909	
	T	17.2	
	Eh	-56.4	
	O2 (mg/l)	3.7	
	Salinité	0.5	
	pH	7.7	
	3H		
	+/-		
Datation et transfert	CFC-12	2	
	+/-	0.1	
	CFC-11	3.9	
	+/-	0.4	
	CFC-113	0.23	
	+/-	0.05	
	SF6	2.9	
	+/-	0.3	
	δ13C CITD	-13	
	+/-	0.1	
	14a	97.4	
	+/-	0.4	
	Interactions eau/roche et mélanges	87Sr/86Sr	0.708228
2σ		6E-06	
Sr		784.6	
B		43.2	
Cl		79.4	
Ca		145.9	
Na		44.6	
K		2.4	
Sulfates		138.5	
δ2H		-52	
+/-			
δ18O			
+/-			

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



Projet SIMBA

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : **09935X0156/PR1** Nom :PR1.....

Nature de l'ouvrage :Forage domestique non exploité.....

Année de réalisation de l'ouvrage :90's..... Entreprise de forage :inconnue.....

Propriétaire actuel :Mr Bernard PARA.....

Coordonnées : **XL93** : 837 493.527 **YL93** : 6 282 538.508

Altitude du sol : 1.557 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 1.557 mNGF

Date du nivellement : 17/05/2018 (BRGM)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Commune ...Raphèle-les-Arles.....

Lieu-Dit : ...Mas du Chalavert...

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :

En bordure de chemin privé

Aménagements de la tête de puits :

Tête de puit obturée par une dalle en pierre

Conditions d'accès à l'ouvrage :

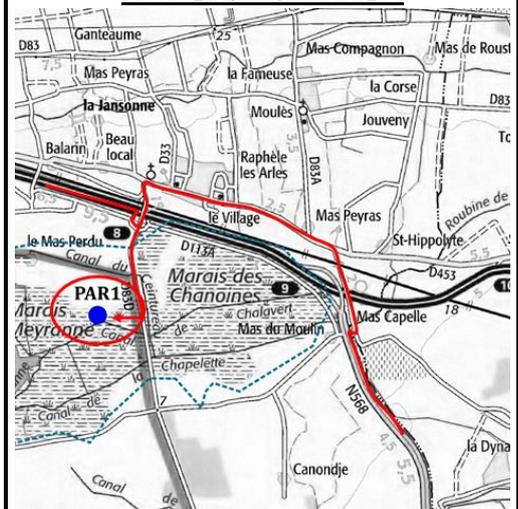
Propriété privée, autorisation nécessaire

Conditions d'accès sur l'ouvrage :

Très facile

D. Villesseche (SYMCRAU) prend le rv

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Photos :



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'urgence :

Au cœur des marais de Meyranne, formée en partie par l'apport des résurgences de la nappe phréatique. A une vingtaine de mètres du forage se trouve un étang de 1 à 2 mètres de profondeur + 1 forage exploité pour les besoins domestiques à environ 10m

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Forage

Usage : non exploité

Diamètre int. tête de puits : Ø 300 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage : Ø 250 mm

Durée d'exploitation (en h/jour, mois/an) ou période d'utilisation (saisonnier, etc..) : -

Le forage PAR1, non exploité, est situé à 15-20 mètres d'un forage exploité pour usage domestique.

Profondeur maximale de l'ouvrage : + 50 mètres

Crépine de l'ouvrage : non tubé, non crépine Niveau statique (m/sol) : 1,03 date de la mesure 20/06/2017

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre :

Mr PARA

Contraintes liées à la prise d'échantillons :

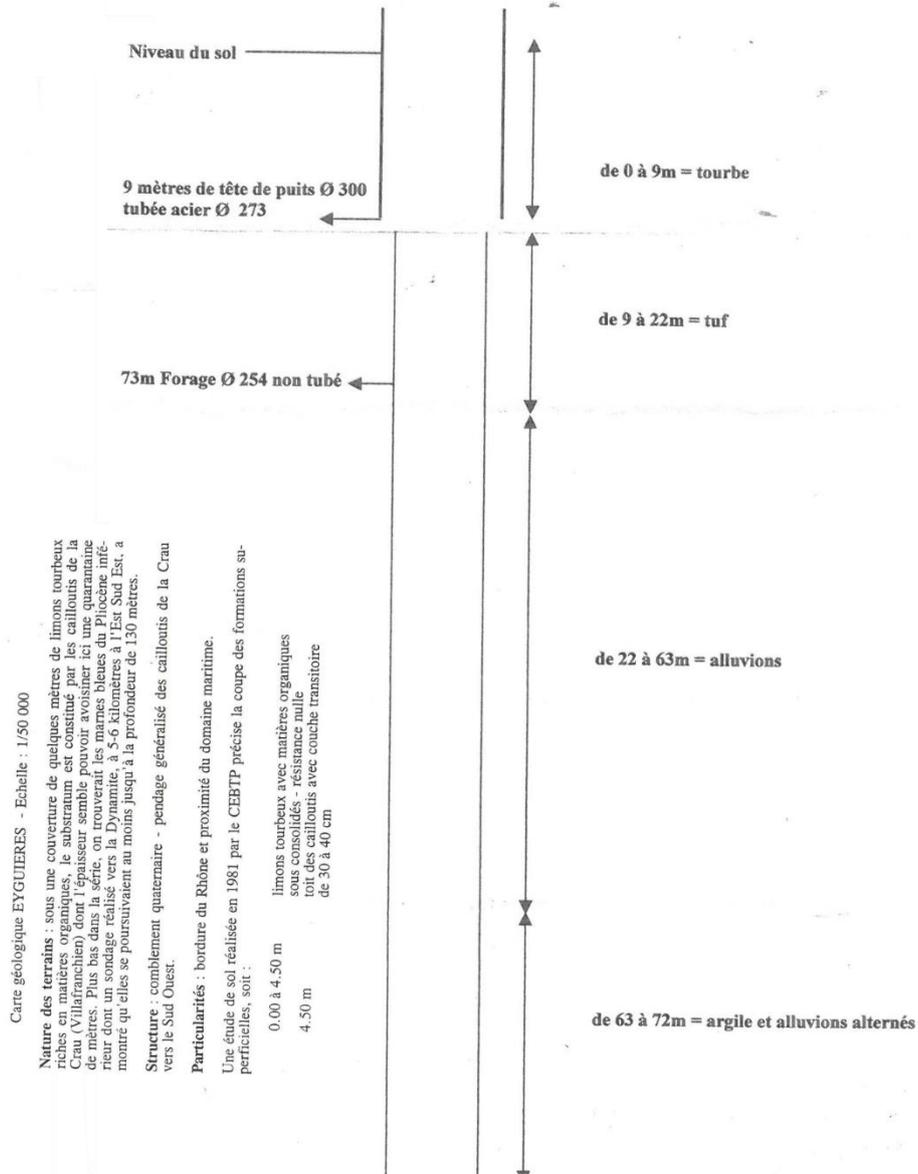
Accord + présence du propriétaire

Pour l'ouvrage non équipé, matériels à mettre en œuvre pour l'échantillonnage :

Groupe électrogène, pompe

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique :



EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur OTT Ecolog 800

Numéro de série SN 420196

Position du capteur (mNGF) : - 21.9

Alimentation : batterie

Télétransmission : 0

Numéro d'appel 07 64 68 63 02 Numéro carte SIM 9517035383443

Date de mise en service 20/06/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site : le 28/8 dérive observée de 10 cm. Corrigée.

Projet SIMBA

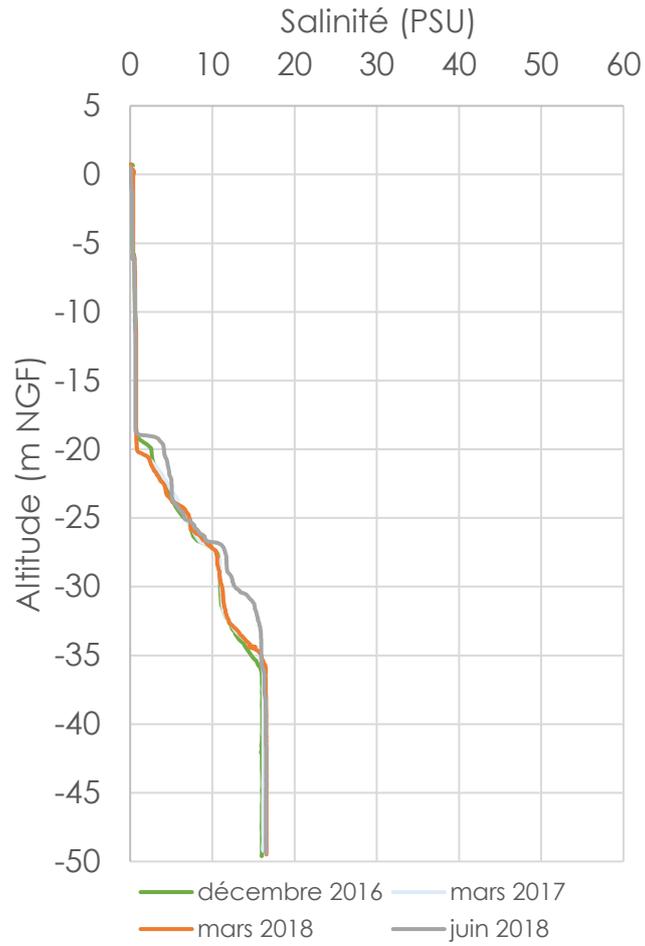
Analyses chimiques

Prélèvements effectués le 28/08/17

	Campagne	août-17
Terrain	Id	PAR1_70m
	Date	28/08/2017
	SPC@25°C	18770
	T	16.1
	Eh	143.5
	O2 (mg/l)	1.8
	Salinité	13.7
	pH	6.6
Datation et transfert	3H	2.68
	+/-	0.13
	CFC-12	0.27
	+/-	
	CFC-11	0.5
	+/-	
	CFC-113	0.05
	+/-	
	SF6	1.2
	+/-	
	δ13C CITD	-4
	+/-	0.1
	14a	19.8
	+/-	0.1
Interactions eau/roche et mélanges	87Sr/86Sr	0.708198
	2σ	0.000006
	Sr	11114.5
	B	75.3
	Cl	6382.9
	Ca	887.5
	Na	2605.8
	K	13.2
	Sulfates	568.3
	δ2H	-38.7
	+/-	0.8
	δ18O	-5.304200836
	+/-	0.1

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : sans objet Nom :Tranchée drainante...

Nature de l'ouvrage :point de surface.....

Propriétaire actuel :GPMM

Coordonnées : **XL93** : 855 300.55 **YL93** : 6 263 369.79 (Géoportail)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Commune ...Fos-sur-Mer.....

Lieu-Dit : ...Vanne AMYL...

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :
En bordure de route

Conditions d'accès à l'ouvrage :
Accès libre

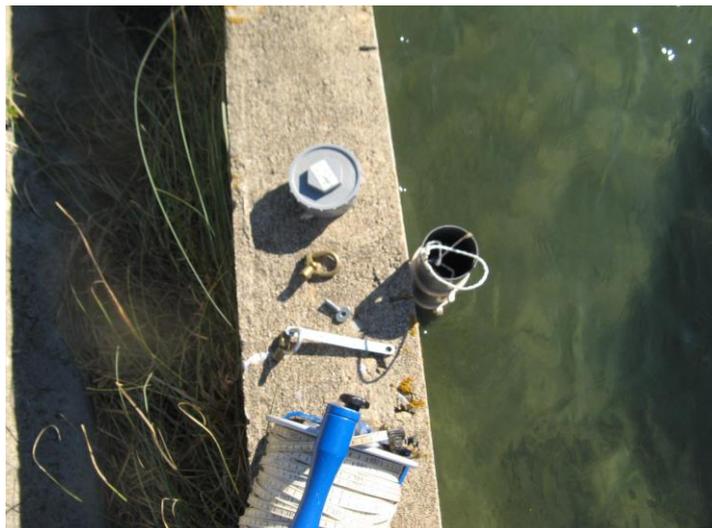
Conditions d'accès sur l'ouvrage :
Très facile

PLAN / VUE AERIENNE



Projet SIMBA

Photos :



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :

Sonde placée sur la paroi rive gauche de la tranchée drainante en amont immédiat de la vanne AMYL

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Tranchée drainante

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre :

Accès libre

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur Sonde Diver

Numéro de série

Position du capteur (mNGF) : - 21.9

Alimentation : batterie

Télétransmission : N

Numéro d'appel 07 64 68 63 02 *Numéro carte SIM* 9517035383443

Date de mise en service 24/07/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site : ras

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10192X0098/XABIS Nom :XAbis.....

Nature de l'ouvrage :piezomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :2009..... Entreprise de forage : ERG.....

Propriétaire actuel : ...GPM... ..

Coordonnées : **XL93** : 843 557.59 **YL93** : 6 272 486.04
Altitude du sol : 085 mNGF
Altitude du repère de la mesure piezo : 1.19 mNGF
Date du nivellement : septembre 2009 (ERG)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Région : PACA

Département : (n°) 13

Commune :Arles (Mas Thibert).....

Lieu-Dit : la Cour des bœufs

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :

Bord de chemin (privé)

Aménagements de la tête de puits :

Tête acier

Conditions d'accès à l'ouvrage :

facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :

facile

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Photos



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :
Zone de marais, près du canal du colmatage

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 60 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage : ...50mm....

Ouvrage en exploitation : non

Profondeur maximale de l'ouvrage : 29 m/ht tube

Crépine de l'ouvrage : coupe technique **Niveau statique (m/sol) :** 0,45 date de la mesure 27/06/2017...

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre : oui, contact propriétaire

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique



SONDAGE : XA Bis

Affaire N°: 09ME074Aa

Type : PIEZOMETRE

Client : GPMM

Date du : 19/08/2009

Etude : PORT DE MARSEILLE
13 - FOS SUR MER

Z:

au : 21/08/2009

X:

Fin : 30,10 m

Inclinaison/Vert (°) :

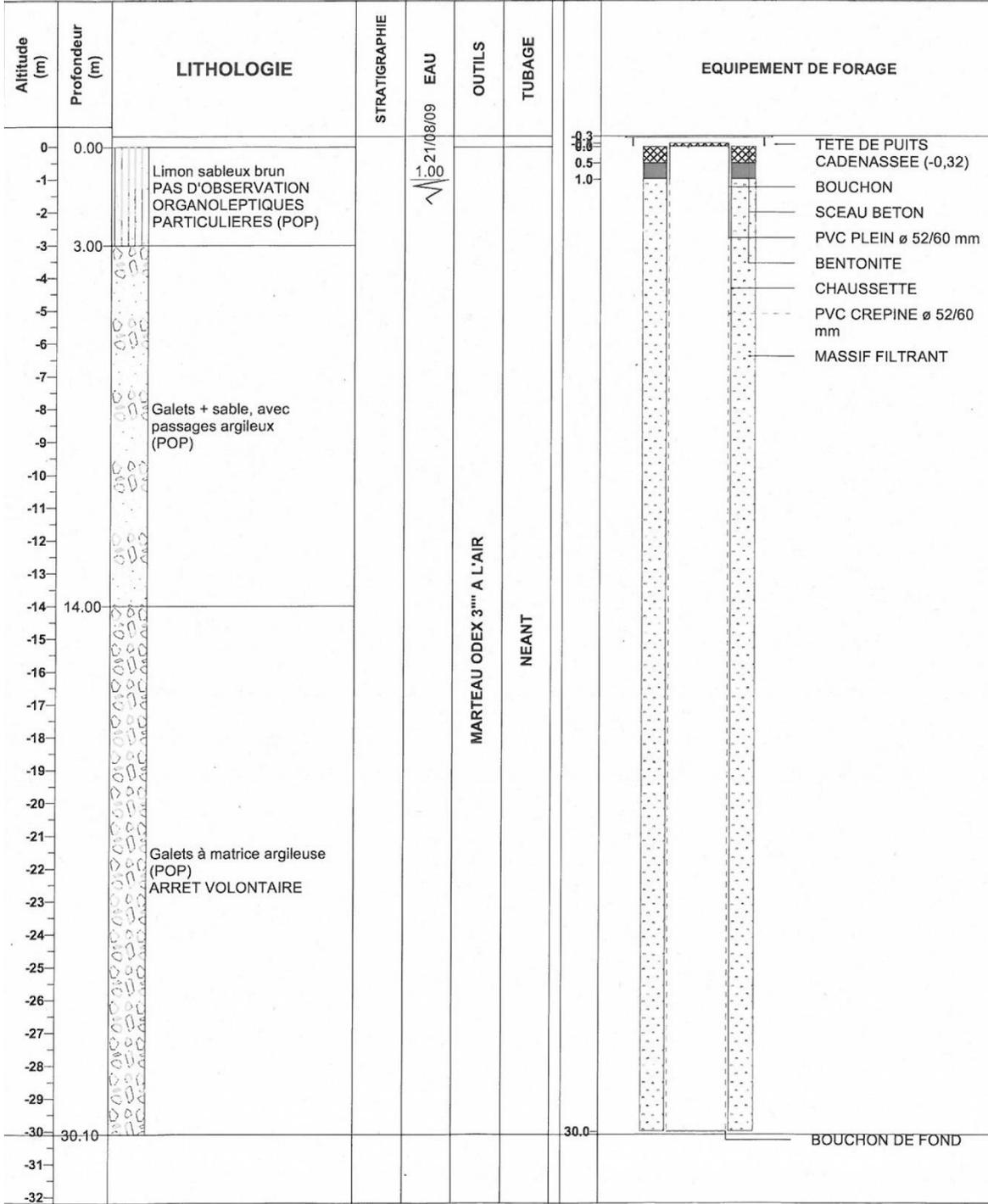
Azimut :

Echelle : 1 / 165

Machine : MC800

Remarque :

Page: 1 / 1



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur OTT Ecolog 800

Numéro de série 420198

Profondeur du capteur : 12 m/réf

Alimentation : batterie

Télétransmission : \emptyset /N

Numéro d'appel 07 64 68 63 04 Carte SIM 9517035383450

Date de mise en service 30/05/2017

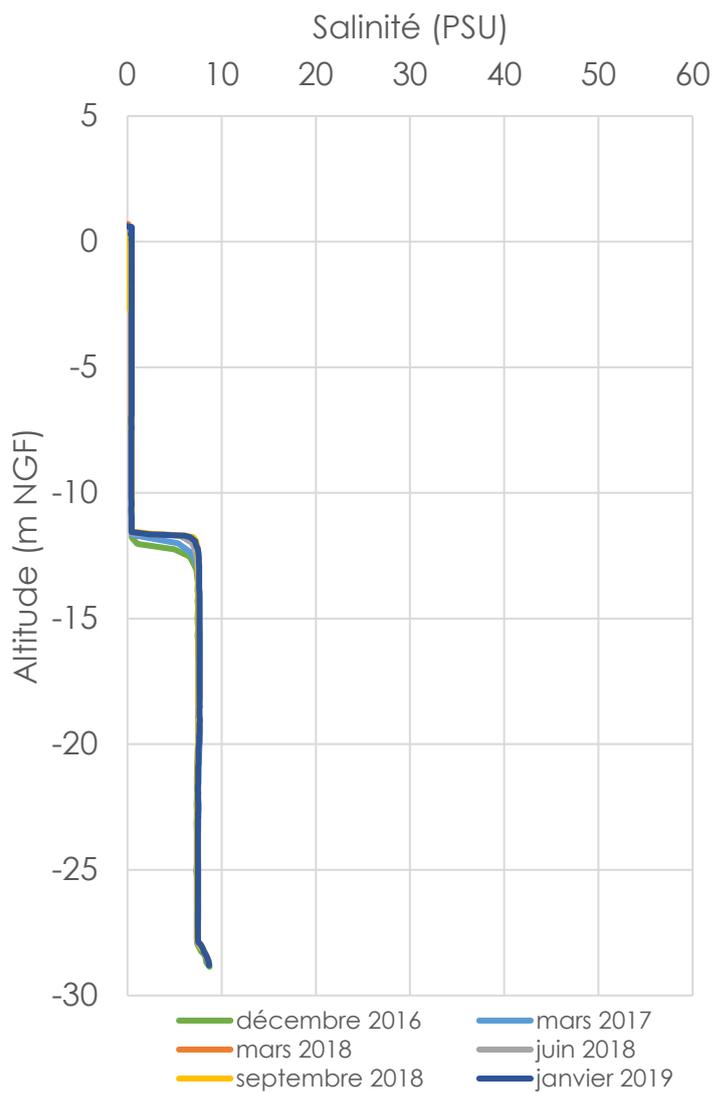
Analyses chimiques

Analyse chimique réalisée par le SYMCRAU en mars 2016 :

Nom des échantillons	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺	% eau mer	Ca/Na	[Ca+Mg]/Na
XAbis	1,30	-2,74	1,35	7,03	7,20	24,98	19%	0,29	0,57

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10197X0163/SX12

Nom : X12.....

Nature de l'ouvrage :piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :60's... Entreprise de forage : inconnue.....

Propriétaire actuel : ...GPM.....

Coordonnées : XL93 : 854 968.219 YL93 : 6 261 880.41

Altitude du sol : 1.90 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 2.08mNGF

Date du nivellement : septembre 2009 (ERG)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Région : PACA

Département : (n°) ...13

Commune :Fos/mer.....

Lieu-Dit : Carrefour du flamant...

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :

Bord de route

Aménagements de la tête de puits :

Capot acier, pas de clef

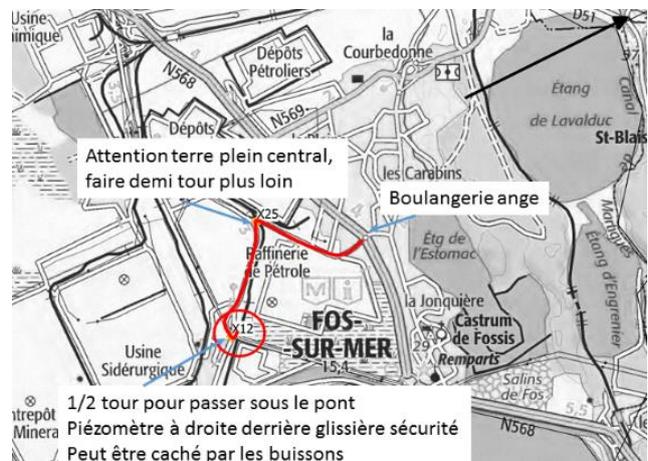
Conditions d'accès à l'ouvrage :

Très facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :

Très facile

SCHEMA D'ACCES



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :

Proximité de la tranchée drainante, dépôts pétroliers, usine Arcelor

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : piézo

Usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 310 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage ...46mm

Equipement de pompage : aucun

Ouvrage en exploitation : non

Profondeur maximale de l'ouvrage : 40 mètres/sol

Crépine de l'ouvrage: coupe technique **Niveau statique (m/sol)** : 1.24 m/sol date de la mesure : 21/06/17

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre :

Accès libre – prévenir GPMM

Contraintes liées à la prise d'échantillons :

Tubage int. « tordu » (?) vers – 13m/sol → La sonde CTD ne peut pas aller plus loin que 13 m/sol (cela peut poser des problèmes lors des prélèvements).

Pour l'ouvrage non équipé, matériels à mettre en œuvre pour l'échantillonnage :

Pompe, groupe électrogène, eaux d'exhaure

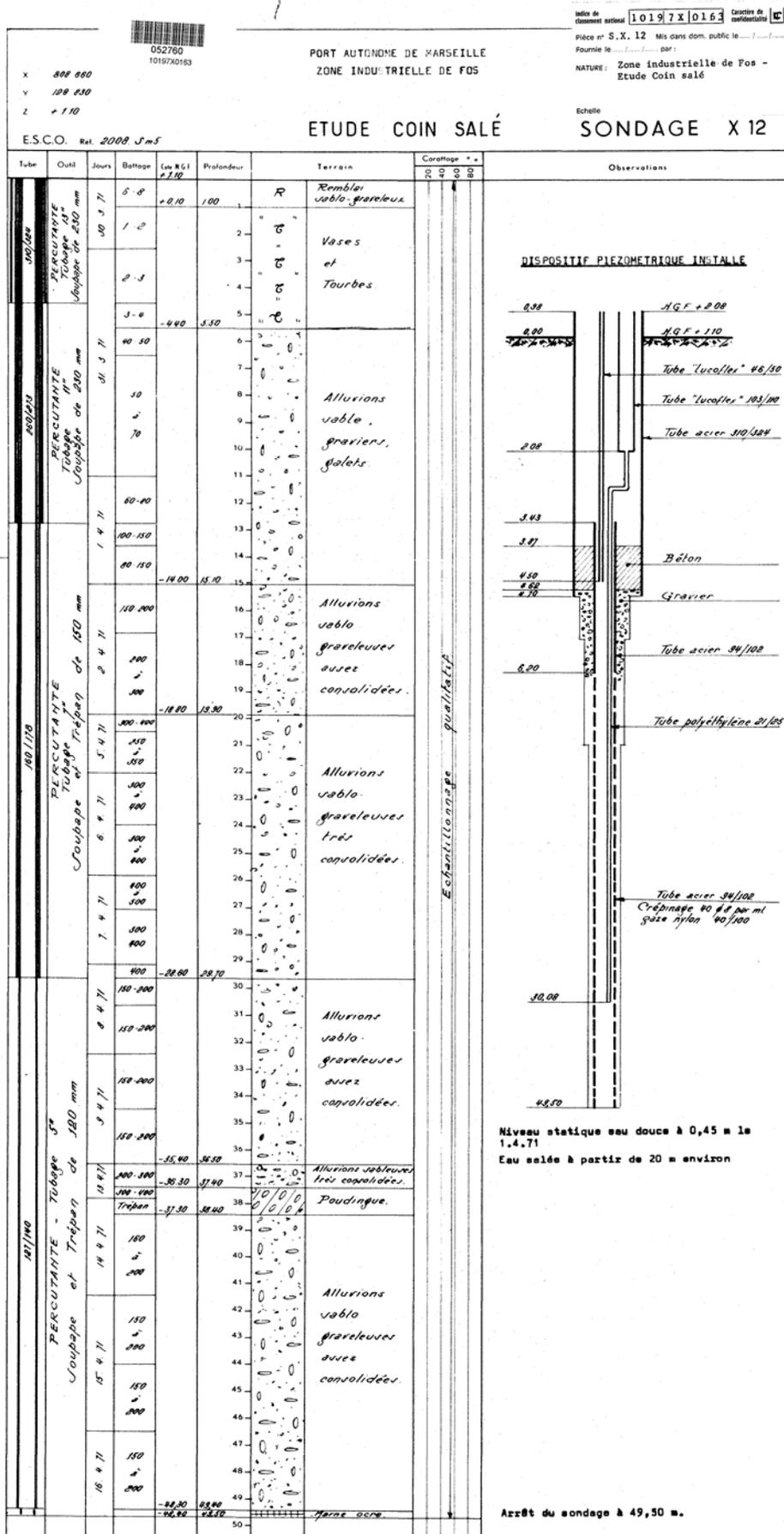
Impossible de réaliser le prélèvement du niveau salé le 28/8/17, le diamètre intérieur n'a pas permis le passage de la pompe.

Photos



Croquis de l'ouvrage :

Coupe géologique/technique



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur Solinst LTC (pression absolue)

Numéro de série 020-1073840

Profondeur du capteur : - 21 mNGF

Alimentation : batterie

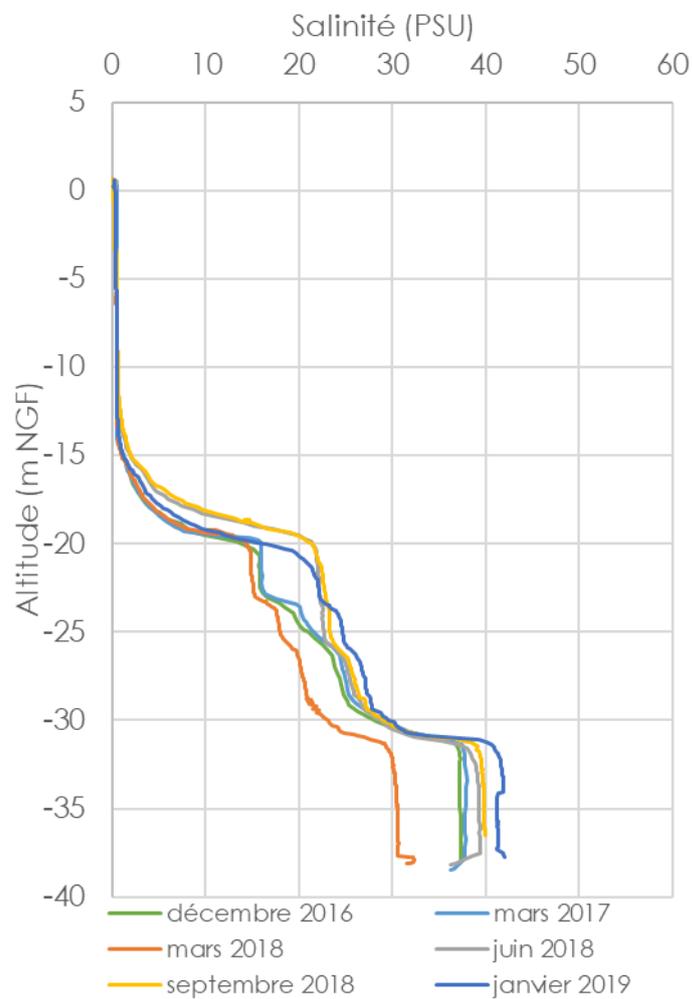
Télétransmission : N

Date de mise en service 31/05/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

Test pompage le 28/08 : non prélevé car pas possible de capter le niveau salé

Campagnes diagraphies



Projet SIMBA

PHOTOS



Projet SIMBA

ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'urgence :

Situé sur la digue (rive gauche) du canal d'Arles à Fos, au sein de la réserve naturelle des marais du vigueirat

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 83mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage :68mm.....

Profondeur maximale de l'ouvrage : 27 m/ht tube

Crépine de l'ouvrage: coupe technique **niveau statique (m/sol)** : 1.01 date de la mesure 23/06/17

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre :
Amis des marais du Vigueirat (+ GPMM)

Contraintes liées à la prise d'échantillons :
Prévoir groupe électrogène et pompe

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique

Indice de classement national **10191X0035** Caractère de confidentialité

Pièce n° S.X. 17 Mis dans dom. public le
Fournie le par :

NATURE : Zone industrielle de Fos -
Etude Coin salé

X 796 000
Y 139 000
Z +1.34



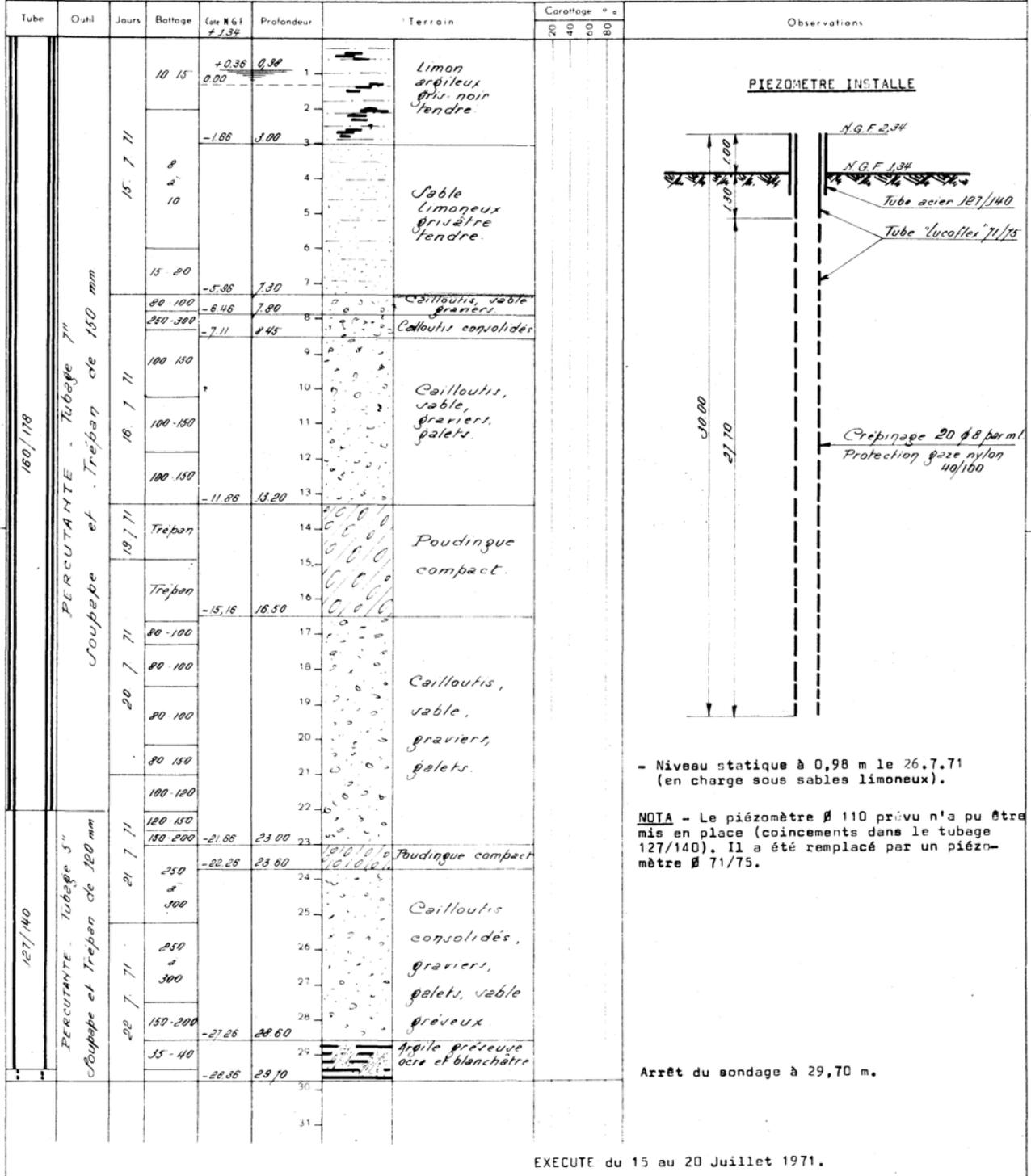
PORT AUTONOME DE MARSEILLE
Zone Industrielle de FOS

Echelle

ETUDE COIN SALE

SONDAGE X 17

E.S.C.O. Ref. 2008 Sm12



EXECUTE du 15 au 20 Juillet 1971.

Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur Solinst LTC

Numéro de série 020-1073820

Profondeur du capteur : -11.2 mNGF

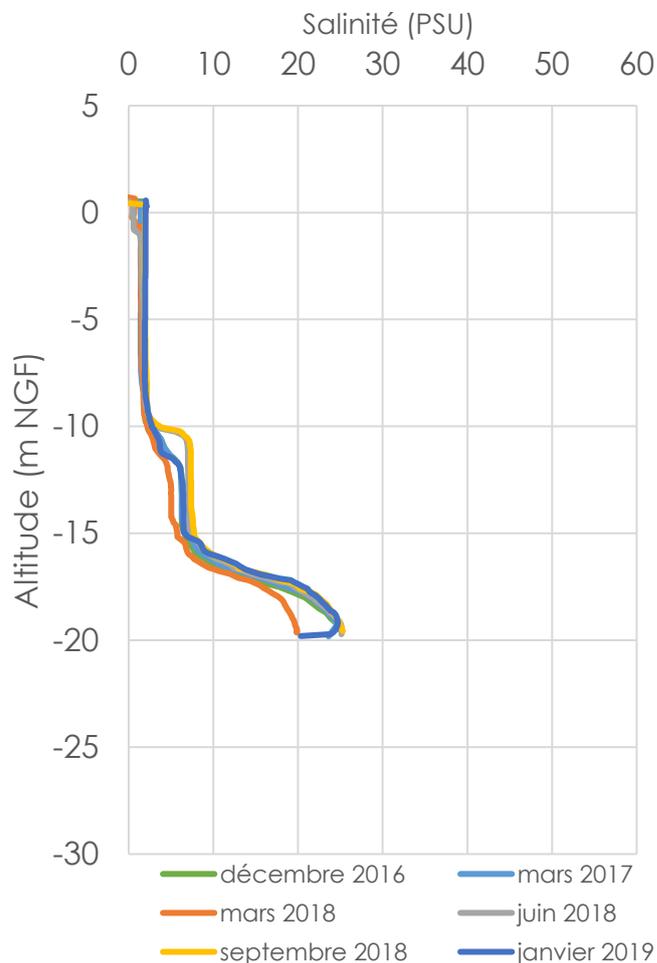
Alimentation : batterie

Télétransmission : N

Numéro d'appel -

Date de mise en service 24/05/2017

Campagnes diagraphies



SLUG-TEST

Point	Date	Pas de temps (s)	Niveau statique (m NGF)	K moyen (m/s)	Ecart type K (m/s)	Nombre de mesures
X17	20/04/2017	1	2	1.22E-03	4.32E-04	7
X17	24/05/2017	0.5	1.97	1.18E-03	4.37E-04	6

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10192X0105/X20BIS

Nom : **X20bis**

Nature de l'ouvrage :piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :2009..... Entreprise de forage :ERG.....

Propriétaire actuel :GPMM.....

Coordonnées : **XL93** : 847 224.19 **YL93** : 6 269 630.24

Altitude du sol : 1.13 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 1.39 mNGF

Date du nivellement : aout 2009 (ERG)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Commune :Arles.....

Lieu-Dit : Tenque (entrée du marais de Bondoux)

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

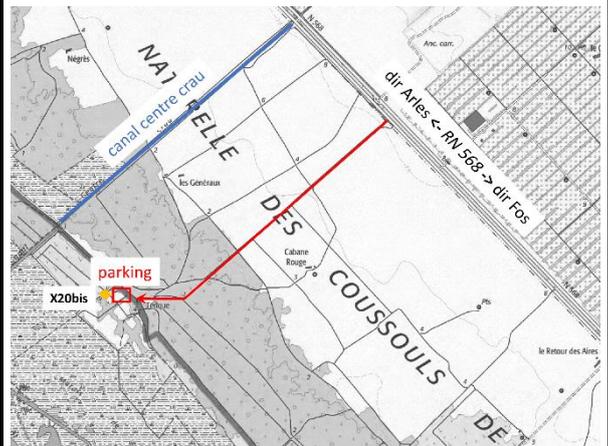
Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :
En bordure du terre-plein utilisé comme parking.

Aménagements de la tête de puits :
Tubage acier fermé avec cadenas artillerie

Conditions d'accès à l'ouvrage :
Facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :
Facile

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Photos



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :

Zone de marais, élevage de la manage Gallon

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

usage : surveillance

Diamètre int. tête de puits : 60 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage : 52 mm

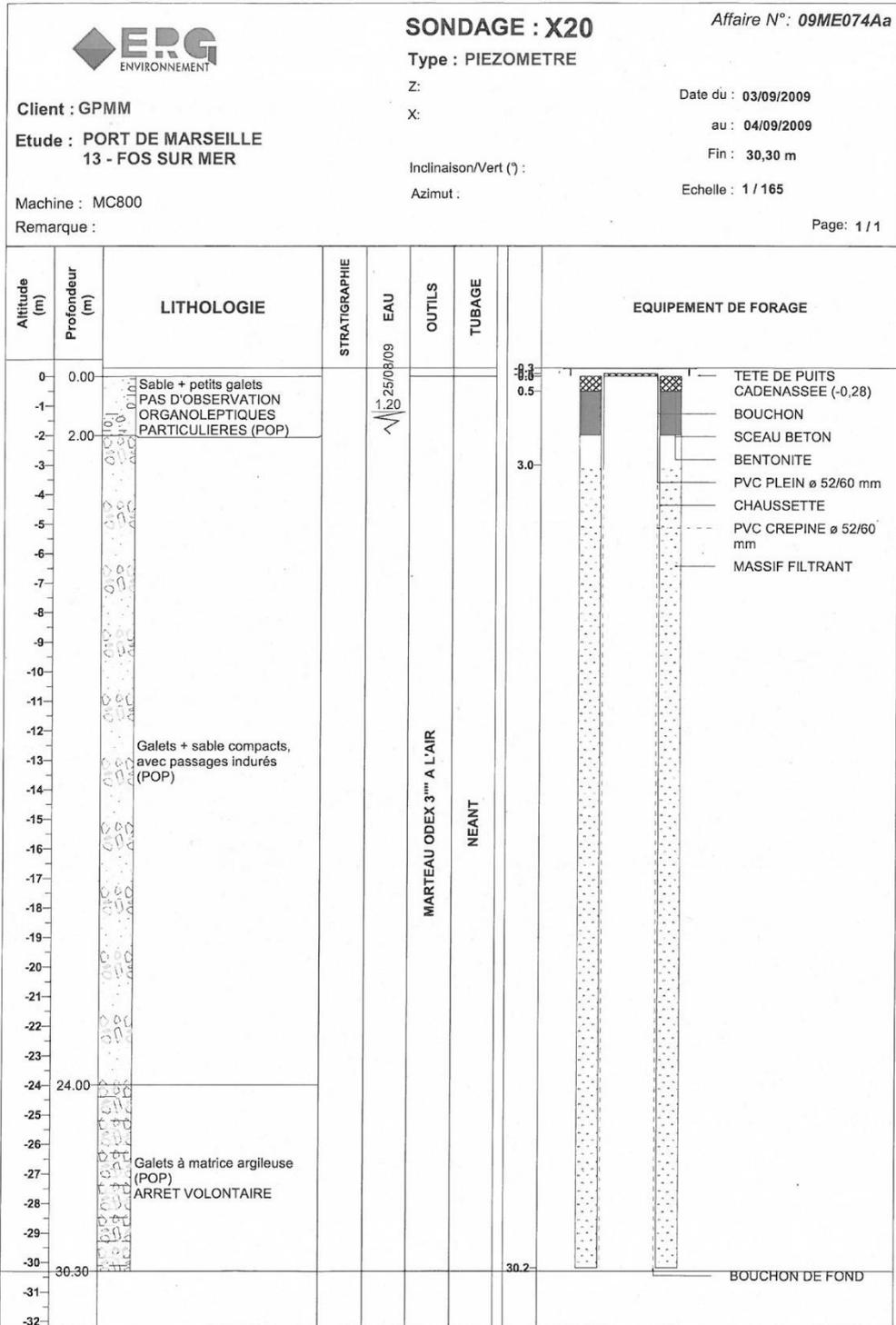
Profondeur maximale de l'ouvrage : 29,5 mètres

Crépine de l'ouvrage : coupe technique Niveau statique (m/sol) : 0.46 Date de la mesure : 12/12/2016

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre : Accès libre – prévenir GPMM

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de d'appareil : OTT Orphéus mini

Numéro de série : 330734

Profondeur du capteur : -8.72 mNGF

Alimentation : batterie

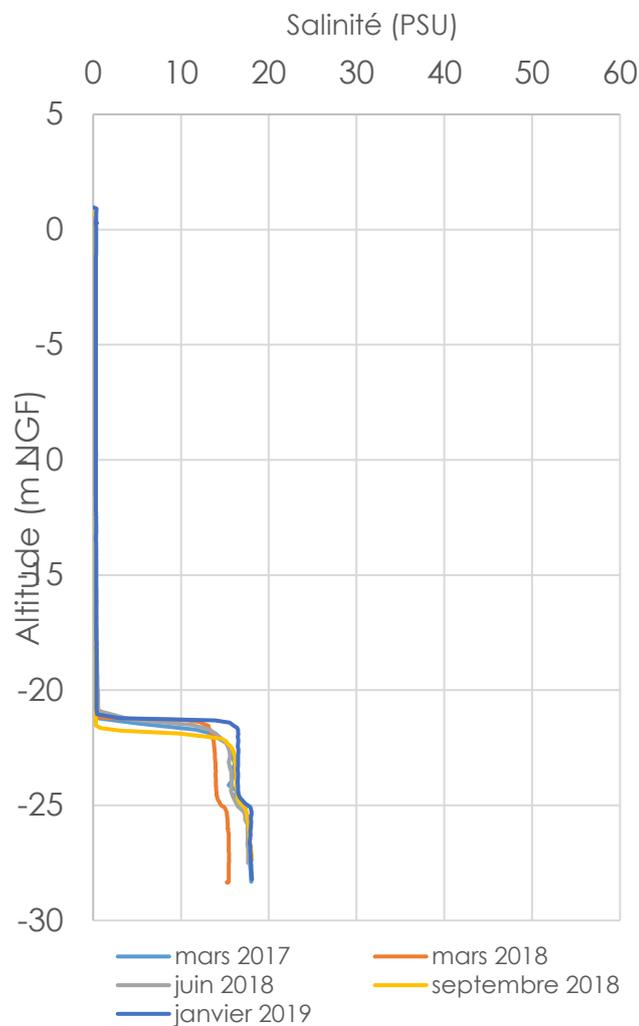
Télétransmission : N

Date de mise en service 15/03/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

Ouvrage obstrué en tête. Une sonde de pression peut être introduite, mais pas de matériel plus large.

Campagnes diagraphie



SLUG-TEST

L'ouvrage est légèrement obturé en tête ce qui ne permet pas au cylindres de descendre dans l'ouvrage. En conséquence, il n'a pas été possible de procéder à ce test sur X20bis.

FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10191X0034/SX23 Nom :X23.....

Nature de l'ouvrage :Piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :1971..... Entreprise de forage :ESCO.....

Propriétaire actuel : GPMM

Coordonnées : **XL93** : 840 419.435 **YL93** : 6 271 782.417

Altitude du sol : 2.501 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 3.496 mNGF

Date du nivellement : 17/05/2018 (BRGM)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Région : PACA

Département : (n°) 13

Commune :Arles (Mas Thibert).....

Lieu-Dit : ...Cassaie...

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :
Bord de chemin (privé)

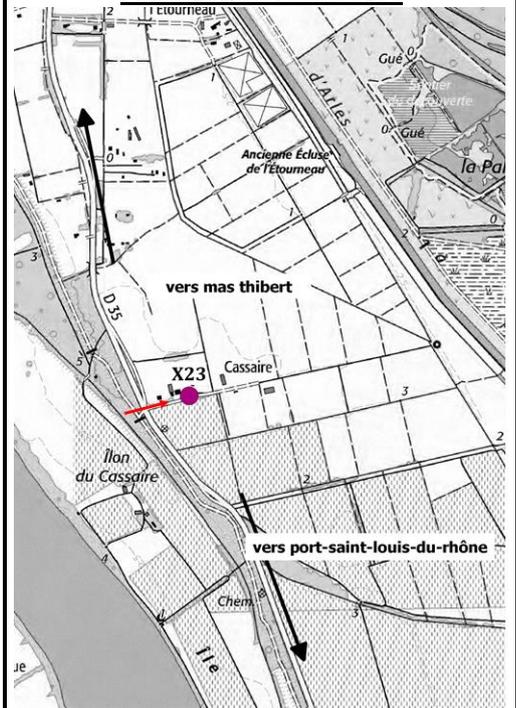
Aménagements de la tête de puits :

Fermé avec cadenas

Conditions d'accès à l'ouvrage :
Très facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :
Très facile

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Nombre de photos effectuées :



Photos 12/12/16



Photos 09/10/17

ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'urgence :

Rive gauche du Rhône (à 600 mètres). Zone de marais, culture de céréales, vignes
Piezo ds le jardin d'un privé. Accès libre.
Poules, chiens.

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Piézo

usage : Surveillance

Diamètre int. tête de puits : 125 mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage : 112 mm

Équipement de pompage : Non

Type d'équipement en place : -

Ouvrage en exploitation : Non

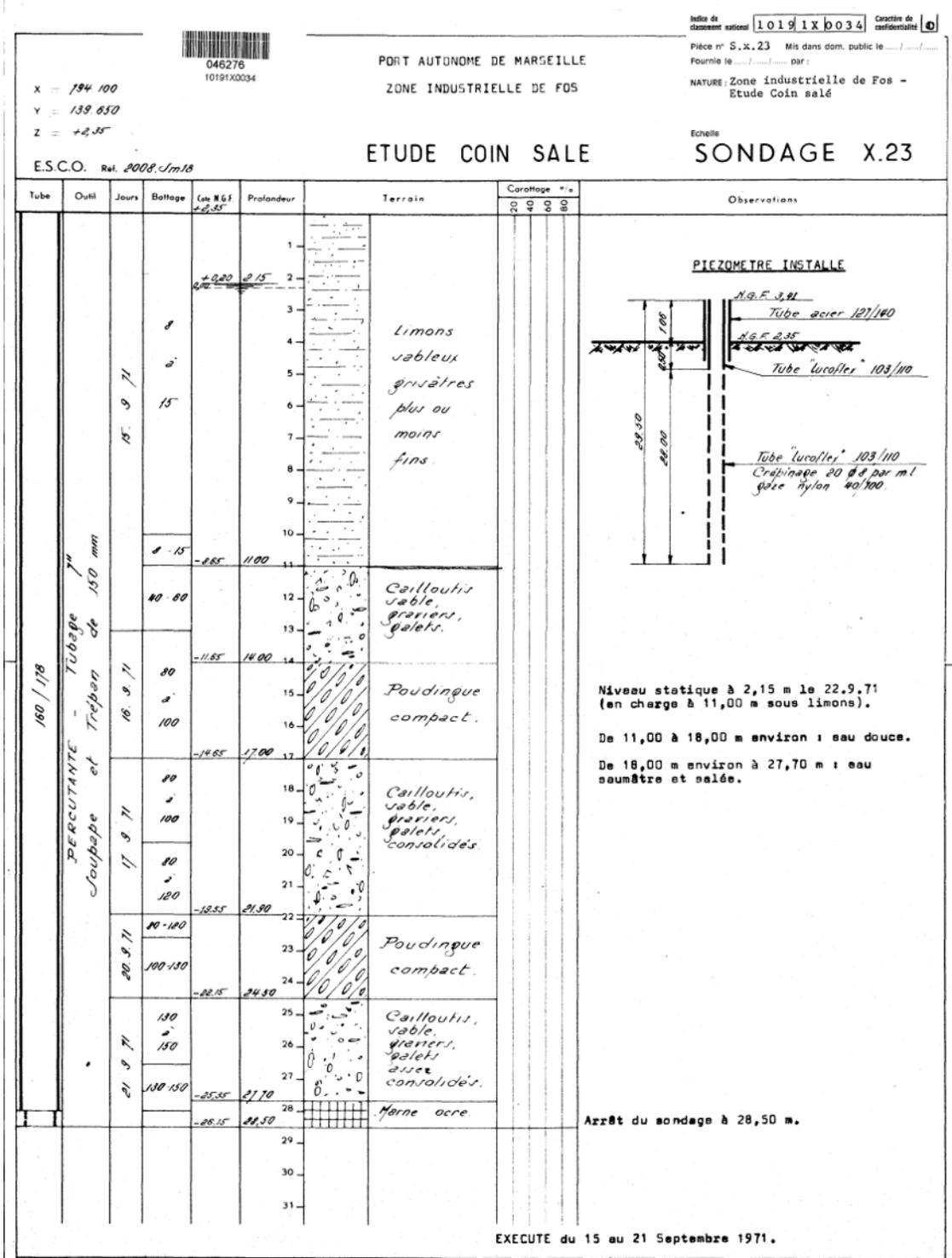
Profondeur maximale de l'ouvrage : 29,04 m/ ht tubage (mesuré 09/10/17)

Crépine de l'ouvrage : **Niveau statique (m/sol) :** 2.39 date de la mesure : 23/06/2017

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre : accès libre

Projet SIMBA

Coupe de l'ouvrage :



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur Solinst LTC (pression absolue, température, conductivité) + crépine de protection

Numéro de série 020 - 2073829

Profondeur du capteur : 22 m/réf

Alimentation : batterie

Télétransmission : N

Date de mise en service – 23/06/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

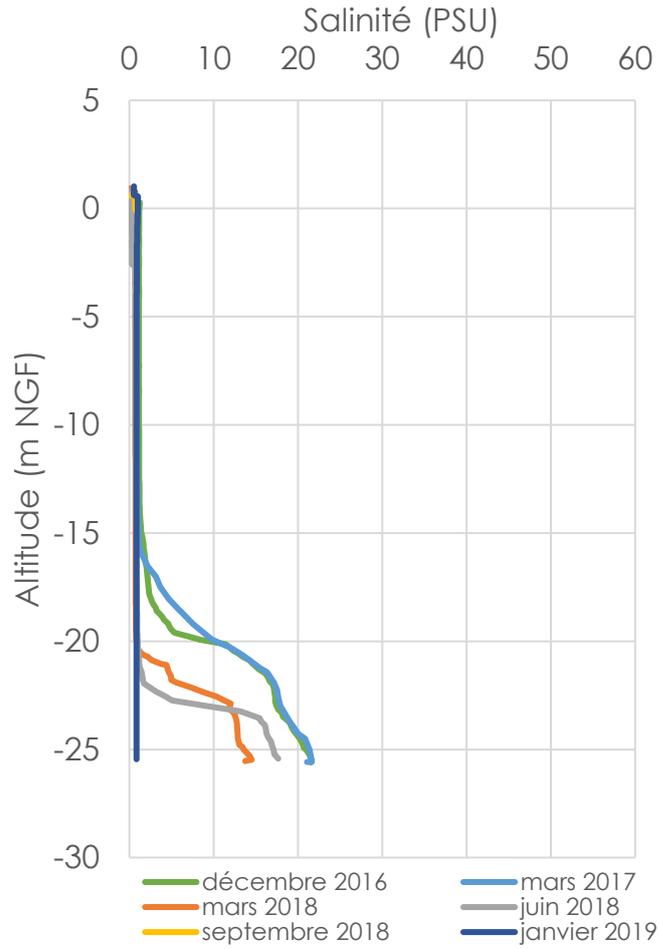
RAS

Analyses chimiques

Nom	X23
Date	02/07/2018
SPC@25°C	1651
T (°C)	16.5
Eh	-61.0
O2 (mg/l)	0
Salinité	1.0
pH	7.3
δ13C CITD	-13.2
+/-	0.1
14a	99.4
+/-	0.4

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



FICHE DE RENSEIGNEMENTS DES POINTS DE SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

N° BSS : 10192X0104/X26BIS ... Nom : ...**X26bis**.....

Nature de l'ouvrage :piézomètre.....

Année de réalisation de l'ouvrage :2009..... Entreprise de forage : ...ERG.....

Propriétaire actuel :GPMM.....

Coordonnées : **XL93** : 848 921.56 **YL93** : 6 267 628.19

Altitude du sol : 0.96 mNGF

Altitude du repère de la mesure piezo : 1.23 mNGF

Date du nivellement : septembre 2009 (ERG)

LOCALISATION DE L'OUVRAGE

Région : PACA

Département : (n°) 13

Commune :Arles.....

Lieu-Dit : Marais du retour

CONDITIONS D'ACCES A L'OUVRAGE

Temps d'accès à l'ouvrage à partir d'un accès carrossable :

Bord de chemin carrossable

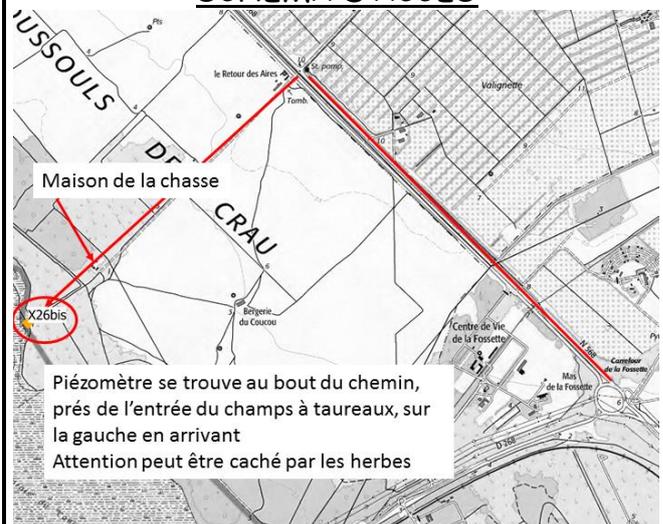
Aménagements de la tête de puits :

Tubage acier fermé avec cadenas artillerie

Conditions d'accès à l'ouvrage :
facile

Conditions d'accès sur l'ouvrage :
facile

SCHEMA D'ACCES



Projet SIMBA

Photos



ENVIRONNEMENT DE L'OUVRAGE

Description de l'environnement immédiat du captage ou conditions d'émergence :
Zone de marais

Projet SIMBA

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Structure de l'ouvrage : Puits / Forage/Piézo
surveillance

usage :

Diamètre int. tête de puits : 60mm

Diamètre intérieur utile de l'ouvrage52mm

Équipement de pompage : - Type d'équipement en place : -

Ouvrage en exploitation : non

Profondeur maximale de l'ouvrage : 30m/ht tube

Crépine de l'ouvrage: coupe technique **Niveau statique (m/sol)** : 0.55 date de la mesure 21/06/17

Personne à contacter pour accéder à l'ouvrage ou accès libre :

Accès libre, prévenir fédération des chasseurs de Port-Saint-Louis-du-Rhône + GPMM

Contraintes liées à la prise d'échantillons :

RAS

Projet SIMBA

Coupe technique/géologique



SONDAGE : X26Bis

Affaire N°: 09ME074Aa

Type : PIEZOMETRE

Client : GPMM

Date du : 16/08/2009

Etude : PORT DE MARSEILLE
13 - FOS SUR MER

Z:

au : 17/08/2009

X:

Fin : 30,40 m

Inclinaison/Vert (°) :

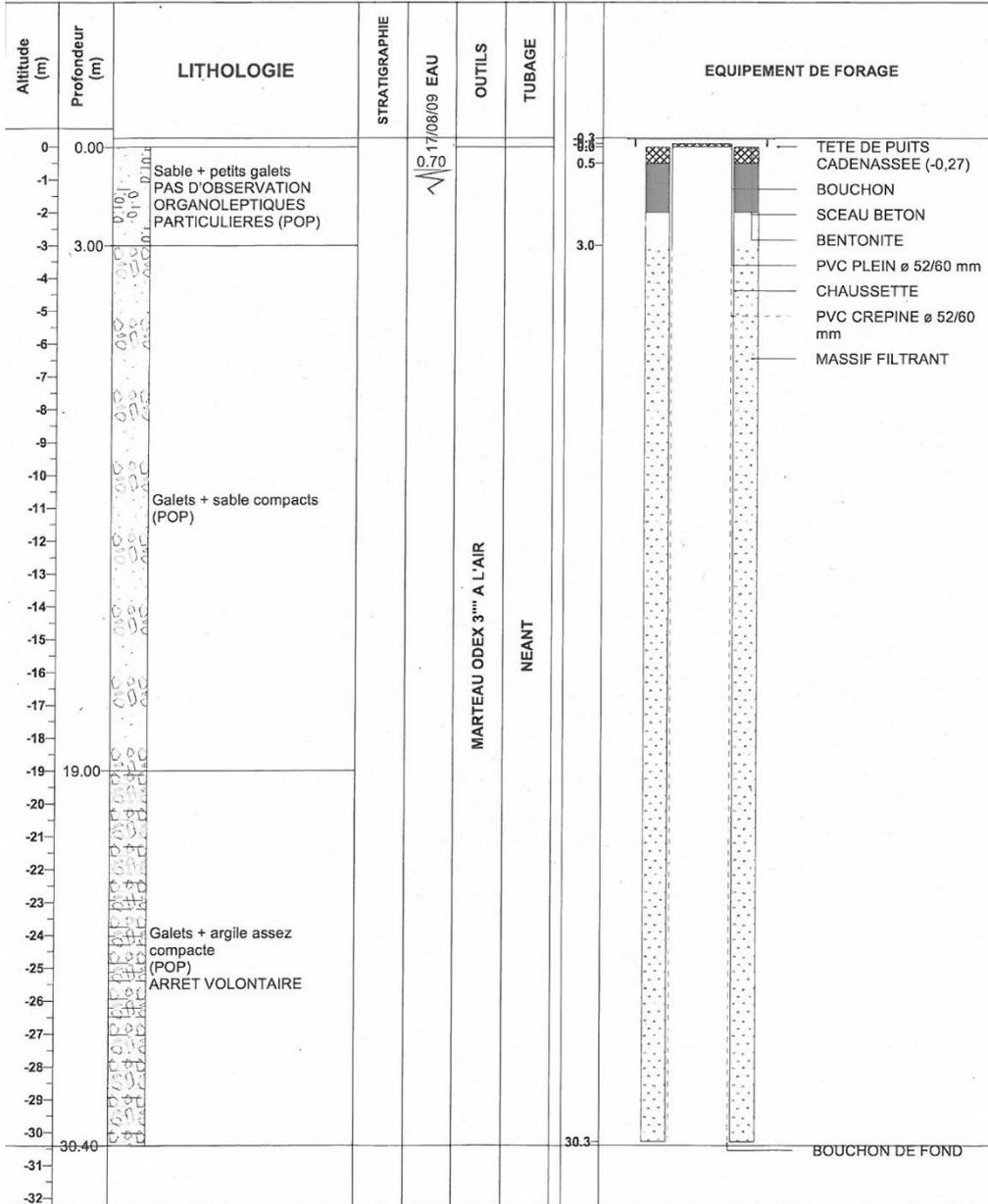
Echelle : 1 / 165

Azimut :

Machine : MC800

Remarque :

Page: 1 / 1



Projet SIMBA

EQUIPEMENT SIMBA

Type de capteur Solinst LTC

Numéro de série 020-1073826

Profondeur du capteur : 19,5 m/ht tubage

Alimentation : batterie

Télétransmission : N

Numéro d'appel -

Date de mise en service : 30/05/2017

Problèmes rencontrés lors de la visite du site :

RAS

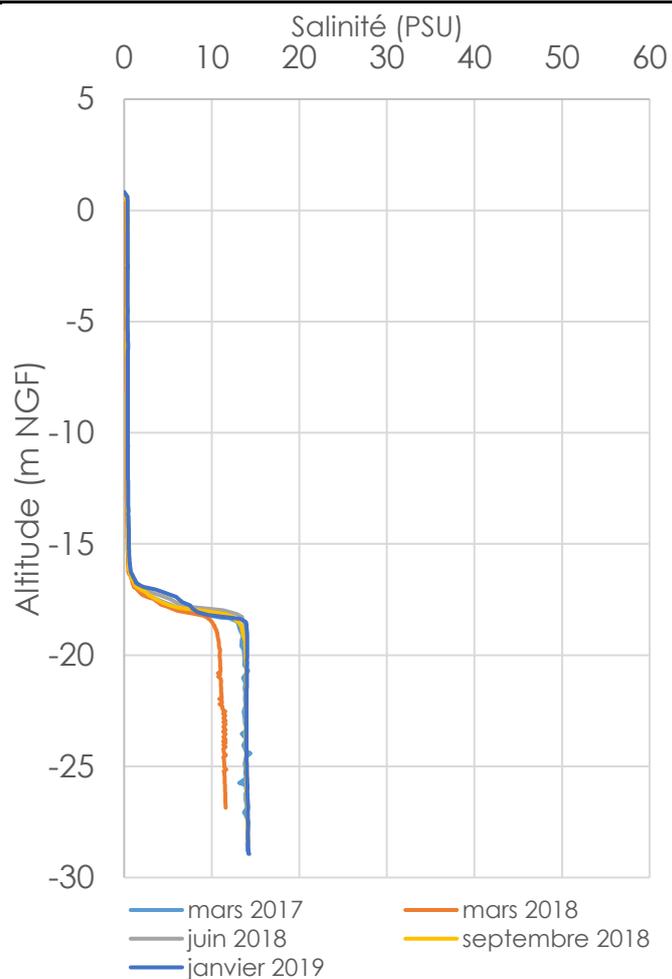
Analyses chimiques

Analyse chimique réalisée par le SYMCRAU en mars 2016 :

Nom des échantillons	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺	% eau mer	Ca/Na	[Ca+Mg]/Na
X26bis_8m	-1,58	-1,77	-0,16	-0,71	-0,38	-2,40	0%	0,16	0,45
X26bis_21m	-1,60	-12,09	-1,28	0,28	19,87	-19,59	22%	-1,01	-1,03

Projet SIMBA

Campagnes diagraphies



Annexe 2

Tableau de synthèse des points d'eau utilisés pour les suivis et les mesures piézométriques

Nom	X_L93	Y_L93	Réseau diagraphie	Suivi Eaux Sout.	Suivi Eaux Sup.	Mars_17 mNGF	Oct_17 mNGF	Avr_18 mNGF
X12	854968	6261880	principal	HCT		0.59	0.71	0.65
X23	840422	6271779	principal	HCT		0.50	0.42	0.89
X19	844853	6268453	principal	m		0.32	0.33	0.56
X30	849700	6265656	principal	m		0.40	0.45	0.50
X13	849272	6265391	principal	m		0.33	0.36	0.44
L2	846973	6266219	principal	HCT		0.34	0.32	0.38
Fgeo	839386	6274745	secondaire	m				
X4415	848779	6264477	principal	m		0.21	0.29	0.35
X31	849974	6265791	secondaire	m				
Xcbis	845663	6271828	principal	m		0.81	0.77	0.88
Xabis	843558	6272486	principal	HCT		0.55	0.59	0.63
Xbbis	844234	6269943	principal	m		0.41	0.34	0.55
L3	848057	6265296	principal	m		0.25	0.26	0.51
X26bis	848922	6267628	principal	HCT		0.53	0.49	0.60
X20bis	847222	6269633	principal	m		0.59	0.59	0.69
X15	851855	6264741	principal	m		1.03	1.16	1.12
Mazet 5	839719	6274881	principal	HCT		0.50	0.51	0.70
X34	850470	6266015	principal	m		0.45	0.51	0.56
X33	850402	6265989	principal	m		0.43	0.47	0.52
X17	842739	6270703	principal	HCT		0.37	0.29	0.65
Par1	837488	6282545	principal	HCT		0.58	0.53	0.53
X25	855301	6263369	principal	m		0.91	1.11	0.90
4400	845312	6263131	secondaire	m				
TD	855296	6263377			H			
S1	834578	6280542			H			
S2	839889	6274978			H			
S3	846862	6270018			H			
S4	843799	6261765			H			
S5	850554	6264193			H			
S6	852008	6264834			H			
S7	853934	6263999			H			
S8	854992	6261886			H			
39b	840937	6281622		m		4.85	6.57	4.15
94F	850143	6265854		m		0.60	0.59	1.12
bastidette	841554	6277076		m		2.16		
CHA1	838326	6275600		m				0.91
cous1	848929	6269534		m		0.78	0.71	0.85
de causans	837859	6280874		m			2.94	
etang des aulnes	844691	6279647		m		17.46	17.39	
ETO1	840483	6273149		m				0.78
GAL1	835267	6278836		m				1.13
GAL2	837004	6278036		m				1.02
ICA1	834596	6279615		m				1.06
J gpmm	855161	6264729		m		1.66	2.12	0.79
mazet4	839962	6275024		m			0.27	0.72
MC1	849404	6268029		m		0.59	0.55	0.68
MC2	849999	6268612		m		0.75	0.63	0.82

Nom	X_L93	Y_L93	Réseau diagraphie	Suivi Eaux Sout.	Suivi Eaux Sup.	Mars_17 mNGF	Oct_17 mNGF	Avr_18 mNGF
Meyr1	836126	6283386		m				0.49
michel gallon	842097	6274675		m		0.94	1.00	0.96
nx piezo ventillon	856051	6267480		m		4.03	5.45	
P13	853420	6266788		m		2.09	2.54	2.17
P16b	847627	6270385		m		0.66	0.66	0.75
p20 gpmm	848594	6269710		m		0.77	0.75	0.87
P2171	846970	6271207		m			1.34	
p2171 b	847207	6271377		m		0.89	1.05	1.18
p2171 gpmm	846970	6271211		m		1.36		
p2171c	847262	6270897		m		0.93	0.85	0.98
P21B	846446	6272883		H		4.46	4.51	1.63
P23B	851234	6277235		H		15.42	16.24	15.50
p26t	848310	6274269		m		3.88	4.06	
P29B	853390	6274254		m		16.02	16.15	15.78
p33	851675	6272355		m		3.93	4.10	
p34	853263	6271828		m		10.87	11.06	
P4	852120	6267115		m				1.16
P7 (g2c)	848818	6276273		m		6.85	7.66	
p70	852119	6269945		m		2.15	2.20	
p72 gpmm	852645	6268569		m		1.28	1.12	1.33
puit onde	840356	6283130		m		3.18	3.14	3.23
pz1 cerema	838085	6282847		m		0.48	0.55	
Pz10	856162	6263683		m		1.30	1.59	1.32
Pz11	854393	6269044		m		4.42	6.00	4.58
Pz13	847052	6277199		m		12.69	12.56	
Pz15	844274	6283497		m		14.42		
PZ17	839861	6277897		m		2.17	5.40	5.06
Pz18	843235	6277069		m		4.22	4.79	4.46
Pz19	852739	6271324		m		7.34	7.50	
pz2 cerema	840048	6281448		m		4.59	5.87	6.20
Pz24	836014	6278268		m		0.74	1.27	0.98
Pz9	858935	6267813		m		10.65	6.33	
RM Mr ROUX	839394	6278272		m		5.37	5.75	
RN1	844199	6276295		m		3.75	4.26	4.03
SA1	851053	6270425		m		1.29	1.25	1.36
SA10	850739	6270776		m		1.29	1.26	1.36
SA11	850203	6271378		m		1.40	1.40	1.47
SA12	850472	6271074		m		1.38	1.37	1.45
SA2	850659	6271786		m		1.75	1.77	1.77
SA3	849782	6270452		m		1.01	1.02	1.14
SA4	850359	6269805		m		0.85	0.85	1.04
SA5	850591	6270011		m		1.01	0.93	1.10
SA6	850014	6270659		m		1.15	1.14	1.25
SA7	850276	6270363		m		1.05	1.00	1.14
SA8	849759	6270940		m		1.22	1.19	1.29
SA9	850722	6269863		m		1.02	0.89	1.10
SA9 bis	850854	6269715		m			0.88	

Nom	X_L93	Y_L93	Réseau diagraphie	Suivi Eaux Sout.	Suivi Eaux Sup.	Mars_17 mNGF	Oct_17 mNGF	Avr_18 mNGF
sncf1	839370	6283778		m		3.81	7.28	4.02
sncf2	838061	6284176		m		3.62	2.10	4.51
TAP1	835263	6280262		m				1.77
Volpelière	838896	6277258		m				1.40
x11	853936	6264009		m		1.26	1.43	1.29

m : suivi manuel

H : suivi automatique de la hauteur d'eau

HCT : suivi automatique de la hauteur d'eau et de la physico-chimie (conductivité et température)

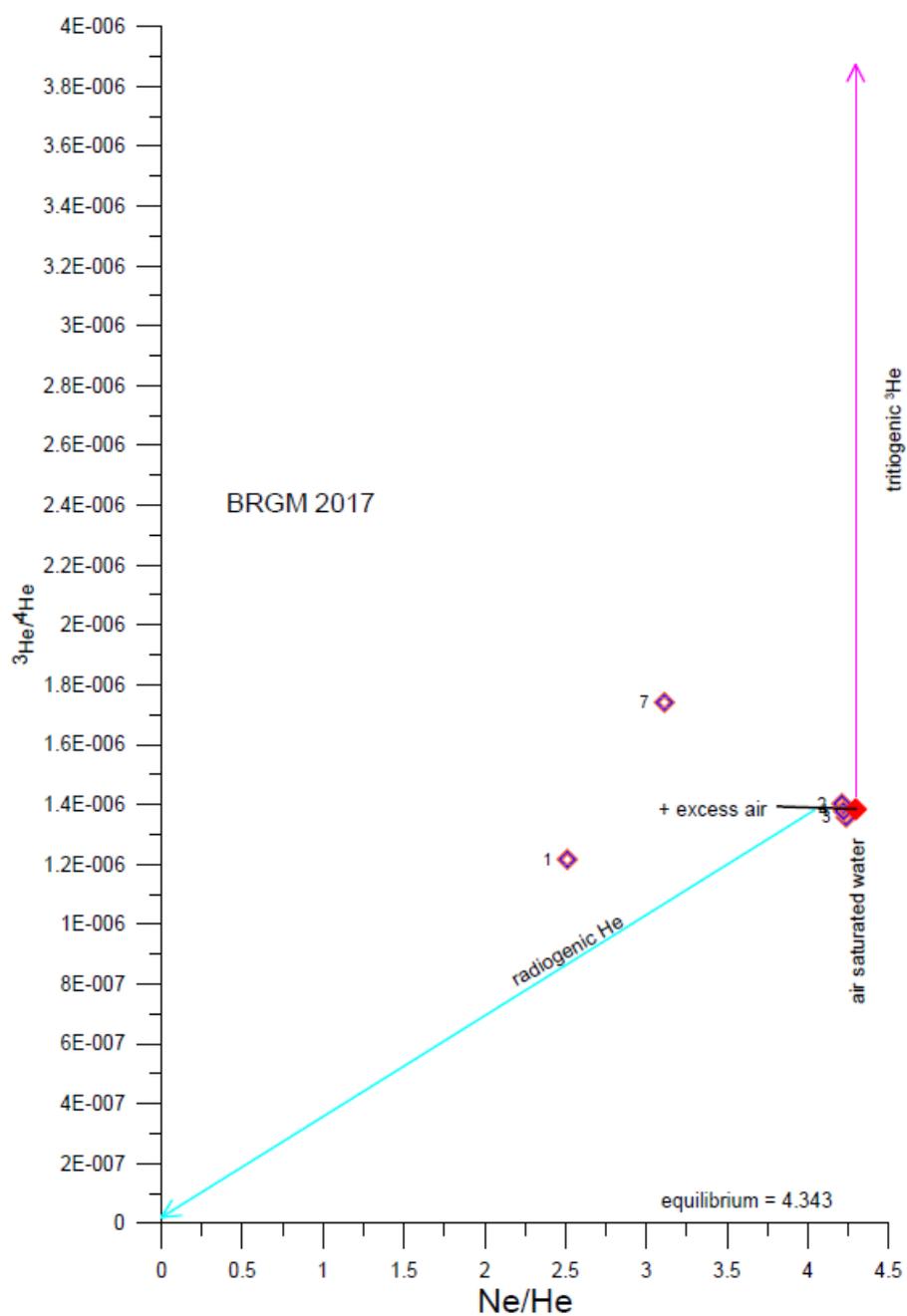
Annexe 3

Résultats des analyses effectuées dans SIMBA

Campagne de prélèvement Août 2017

1. Analyses Tritium/Hélium - Laboratoire Helis (Université de Bremen)

sample-name	sampling-date	1 samp- le_ID	3 alt- itude [m]	4 T- ExNr	5 tritium [TU]	6 err- tr [TU]	8 te- 9 He- 10 He3 [ccs] ExNr [TP/kg]	11 He4 [SMS] [ccSTP/kg]	12 He4 [SMS] [ccSTP/kg]	13 NeQMS [S] [ccSTP/kg]	14 NeSMS [S] [ccSTP/kg]	15 NeQue [S] [ccSTP/kg]	16 He3 [He] 4	17 NeHe [He] 3	18 del- ta- 3He- % [‰]	20 De- lta- He- % [‰]	31 He4rad- lo [ccSTP/kg]	36 tritium- 3He [TU]	37 stable- tritium [TU]	38 age- recharge [yrs]	recharge	high rad. 4He-2- component mixing, tritium = 50% of precipitation concentration
BRGM PACA/2/PAR1, 40 m/1	8/28/2017	1	50	4670	2.86	0.53	12 136	7.06E-05	7.06E-05	1.81E-04	1.74E-04	1.77E-04	1.22E-06		-12.1	54.3	3.3E-05	13.0	15.6	31.4	1986.2	
BRGM PACA/3/Lauren Chanoines, 0m/1	8/28/2017	2	50	4157	4.58	0.36	12 137	5.64E-05	5.74E-05	2.42E-04	2.27E-04	2.37E-04	1.40E-06		-12.1	54.3	3.3E-05	13.0	15.6	31.3	1986.3	
BRGM PACA/4/Ventillon, 16 m/1	8/29/2017	3	50	4152	4.07	0.32	12 134	4.88E-05	5.07E-05	2.15E-04	2.01E-04	2.11E-04	1.36E-06		-2.0	8.9	0.0E+00	-0.1	3.9	-0.5	2018.2	age = 0; water shows recent contact to the atmosphere; also small excess air
BRGM PACA/5/Plissarotte, 6-16 m/1	8/29/2017	4	50	4153	4.04	0.32	12 135	5.24E-05	5.32E-05	2.25E-04	2.18E-04	2.21E-04	1.38E-06		-0.5	14.4	0.0E+00	0.3	4.3	1.3	2016.4	
BRGM PACA/7/Barrage anti-sei, 0 m/1	8/29/2017	5	50	4669	12.85	0.48		5.24E-05	5.32E-05	2.25E-04	2.18E-04	2.21E-04	1.38E-06		-0.5	14.4	0.0E+00	0.3	4.5	1.2	2016.5	high tritium; other anthropogenic source except precipitation
BRGM PACA/8/X19, 30 m/1	8/29/2017	6	50	4161	0.21																	low tritium; old water / young water < 2%
BRGM PACA/8/X19, 17 m/2	8/29/2017	7	50	4162	4.09	0.33	12 133	7.12E-05	7.23E-05	2.25E-04	2.20E-04	2.22E-04	1.74E-06		25.8	55.6	1.8E-05	20.7	24.8	32.0	1985.7	high radiogenic 4He; few % older water
																						young; age < 60yrs



2. Analyses isotopiques du Strontium - Direction des laboratoires du BRGM



RAPPORT D'ESSAIS 17-6-033-D

V/Réf. : Informations sur le(s) échantillon(s) : - Date début d'analyse : 04/09/17 - Date de réception : 01/09/2017 - Nombre: 9 - Nature : EAU - Auteur prélèvement:	A l'attention de : RIVET Florence DAT/GIR ME/BRGM PAC 117 AVENUE DE LUMINY 13276 MARSEILLE CEDEX 09 France Télécopie n°
--	--

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 13-SEP-2017 par Catherine GUERROT

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laboratoires

Nbr pages : 2

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
 Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France
 Direction des Laboratoires - Unité Isotopes
 Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11

DIRECTION DES LABORATOIRES
 UNITE ISOTOPES
 Id soumission : 100040628
 N° Etude : 17-6-033-D

Plateau ISOTOPIE SPECTROMETRES DE MASSE
 Labo TIMS

Orléans le 13/09/2017

RESULTATS D'ANALYSES

Objet : Analyse isotopique du Sr sur 9 échantillons d'eau.
 Demandeur : F. RIVET BRGM/DAT/PACA

Demande du : 01/09/2017
 Fait le : 13/09/2017

Détermination des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en triple multidyynamique
 Analyse sur mono filament W

n°Labo	n° Echantillon	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma(m)$
Sr868	X25 - 28/08/2017	0.708244	0.000007
Sr869	PAR1 - 28/08/2017	0.708198	0.000006
Sr870	LAURON-CHANOINES - 28/08/2017	0.708223	0.000007
Sr870D	LAURON-CHANOINES - 28/08/2017 (DOUBLON)	0.708217	0.000008
Sr871	CAPTAGE VENTILLON - 29/08/2017	0.708189	0.000008
Sr872	PISSAROTTE - 29/08/2017	0.708194	0.000009
Sr873	GALEJON AMONT - 29/08/2017	0.708228	0.000008
Sr874	BARRAGE ANTI-SEL - 29/08/2017	0.708281	0.000008
Sr875	X19- PROFONDEUR DE PRELEVEMENT 30m - 29/08/2017	0.708994	0.000007
Sr876	X19- PROFONDEUR DE PRELEVEMENT 17m - 28/08/2017	0.708999	0.000009

La valeur obtenue sur 28 déterminations du standard NBS987 analysé durant cette période est de $0.710240 \pm 10 (2\sigma)$
 La valeur certifiée du standard est de 0.710240. Les rapports mesurés sont normalisés à cette valeur.



C. GUERROT

3. Analyse rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et activité ^{14}C - Direction des laboratoires du BRGM



RAPPORT D'ESSAIS 17-6-033-C

V/Réf. :	A l'attention de : RIVET Florence
Informations sur le(s) échantillon(s) :	BRGM DAT/SDE/PAC/MSL
- Date début d'analyse : 11-SEP-17	117 AVENUE DE LUMINY
- Date de réception : 01/09/2017	13276 MARSEILLE CEDEX 09 France
- Nombre: 5	
- Nature : EAU	
- Auteur prélèvement: demandeur	Télécopie n°

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 26-OCT-2017 par Christine FLEHOC

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laboratoires

Hervé GABORIAU
Directeur
Direction des Laboratoires

Nbr pages : 4

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France
Direction des Laboratoires - Unité Isotopes
Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 26/10/2017

DIRECTION DES LABORATOIRES
Unité ISOTOPES

Rapport d'essais 17-6-033-C

Demandeur : F. RIVET
Projet : AP16PAC044
tâche : 1
Réf. labo : 17E 230 à 238

RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES

Eaux

Destinataire(s) : F. RIVET DAT/ SDE/ PAC/ MSL

Archivage : LAB/ISO (17E230-238C14.doc)

BRGM
LAB / ISO
B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France

2

Rapport d'essais 17-6-033-C

FOS-sur-MER / ARLES RADIOCARBONE

Echantillons

Nature : eaux souterraines

Date de réception : 01/09/2017

Analyses

Opérateur(s): C. FLEHOC, BETA ANALYTIC

Date de réalisation : sept.-oct. 2017

Méthode d'analyse :

La préparation et les mesures du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C sont réalisées par Beta Analytic Inc. Le carbone inorganique dissous dans l'eau est extrait par acidification (attaque avec H_3PO_4). Le gaz est extrait sous vide et purifié cryogéniquement. Un aliquote est utilisé pour la mesure du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ par spectrométrie de masse en phase gazeuse. Le CO_2 est réduit en graphite pour être analysé. L'activité de ^{14}C est mesurée par spectrométrie de masse par accélération (AMS).

Résultats

L'activité de ^{14}C mesurée est reportée par rapport à celle du carbone moderne référence; elle est exprimée en % de carbone moderne et normalisée en tenant compte de la valeur $\delta^{13}\text{C}$ (pCM).

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	$\delta^{13}\text{C}$ vs PDB ‰ (± 0.1)	Activité ^{14}C pCM
2	17E 231	PAR1	-4.0	19.8 \pm 0.1
3	17E 232	LAURON CHANOINES		
4	17E 233	VENTILON	-11.6	93.0 \pm 0.3
5	17E 234	PISSAROTTE	-11.8	95.6 \pm 0.3
6	17E 235	GALEJON AMONT		
7	17E 236	BARRAGE ANTI-SEL		
8	17E 237	X19 - prof. 30 m	-10.4	77.2 \pm 0.3
9	17E 238	X19 - prof. 17 m	-9.5	62.2 \pm 0.2

Rapport d'essais 17-6-033-C

Un âge est estimé à partir de cette activité en utilisant la valeur de Libby de 5568 ans comme période (demi-vie) du radiocarbone. Cet âge dit « conventionnel » est reporté en ans BP (Before Present) avec 1950 comme année de référence pour le présent.

Réf. Labo	ECHANTILLON	Activité ¹⁴ C pCM	Age ¹⁴ C conventionnel ans BP (± 1σ)
17E 231	PAR1	19.8 ± 0.1	13000 ± 40
17E 233	VENTILON	93.0 ± 0.3	580 ± 30
17E 234	PISSAROTTE	95.6 ± 0.3	360 ± 30
17E 237	X19 - prof. 30 m	77.2 ± 0.3	2080 ± 30
17E 238	X19 - prof. 17 m	62.2 ± 0.2	3820 ± 30

Attention :

L'âge conventionnel ne représente en aucun cas le temps de résidence de l'eau. Pour estimer ce temps, il faut tenir compte du contexte, des équilibres et échanges avec les différentes sources de carbone dans les milieux traversés. Ces données physico-chimiques peuvent être intégrées à plusieurs modèles permettant d'évaluer un domaine de valeurs possibles pour le temps de résidence.



C. FLEHOC

4. Analyse rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène – Direction des laboratoires du BRGM



RAPPORT D'ESSAIS 17-6-033-B

V/Réf. : Informations sur le(s) échantillon(s) : - Date début d'analyse : 07-SEP-17 - Date de réception : 01/09/2017 - Nombre: 9 - Nature : EAU - Auteur prélèvement: demandeur	A l'attention de : RIVET Florence BRGM DAT/ SDE/PAC/MSL 117 AVENUE DE LUMINY 13276 MARSEILLE CEDEX 09 France Télécopie n°
---	--

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 19-DEC-2017 par Christine FLEHOC

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laboratoires

Nbr pages : 3

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
 Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France
 Direction des Laboratoires - Unité Isotopes
 Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 19/12/2017

DIRECTION DES LABORATOIRES
Unité ISOTOPES

Rapport d'essais 17-6-033-B

Demandeur : F. RIVET

Projet : AP16PAC044

tache : 1

Réf. labo : 17E 230 à 238

RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES

Eau

Destinataire(s) : F. RIVET DAT/ SDE/ PAC/ MSL

Archivage : LAB / ISO (17E230-238DO.doc)

BRGM
LAB / ISO
B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France

2

Rapport d'essais 17-6-033-B

Isotopes stables de l'eau

Echantillons

Nature : eaux, échantillons reçus le 01/09/2017

Analyses

Opérateur(s): C. FLEHOC

Date de réalisation : sept.-dec. 2017

Méthodes d'analyse

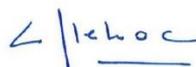
Mesure des rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène par spectrométrie de masse en phase gazeuse, par la méthode d'équilibration avec un gaz (H₂ pour l'hydrogène, CO₂ pour l'oxygène).

Résultats

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	DATE de Prélèvement	δD ‰ vs SMOW (± 0.8‰)	δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW (± 0.1‰)
1	17E 230	X25	28/08/2017	-68.4	-9.8
2	17E 231	PAR1	28/08/2017	-38.7	-5.3
3	17E 232	LAURON CHANOINES	28/08/2017	-70.5	-10.0
4	17E 233	VENTILON	29/08/2017	-68.4	-9.8
5	17E 234	PISSAROTTE	29/08/2017	-55.8	-8.1
6	17E 235	GALEJON AMONT	29/08/2017	-68.1	-9.1
7	17E 236	BARRAGE ANTI-SEL	29/08/2017	-69.7	-9.6
8	17E 237	X19 - prof. 30 m	29/08/2017	-22.8	-3.2
9	17E 238	X19 - prof. 17 m	29/08/2017	-50.5	-7.4

Devenir des échantillons

Les volumes restants d'échantillons sont conservés 6 mois après l'envoi du rapport d'essai, puis - sauf avis contraire du demandeur- éliminés systématiquement.



C. FLEHOC

5. Analyse inorganique des eaux et des solides - Direction des laboratoires du BRGM



RAPPORT D'ESSAIS 17-6-033-A

Accréditation n° 1-0251
Portée disponible
sur www.cofrac.fr

Provenance : Fos sur Mer/Arles Nature échantillon : EAU Echantillons réceptionnés le : 31/08/2017 Analyses commencées le : 01-SEP-17 Référence commande : AP16PAC044|1	Nombre: 9 Demandeur : RIVET Florence Adresse: DAT/GIR ME/BRGM PAC 117 AVENUE DE LUMINY 13276 MARSEILLE CEDEX 09 France
---	---

Secteur analytique	Ingénieur technique
Analyse inorganique des eaux et des solides	T.CONTE

Résultats validés par le(s) ingénieur(s) technique(s)

Visa: 
 Véronique JEAN-PROST
 Coordonnatrice des Analyses
 Direction des Laboratoires
 Coordonnatrice des analyses
 Téléphone: 02.38.64.30.17 Télécopie: 02.38.64.39.25
 le : 19-DEC-2017


 Hervé GABORIAU
 Directeur
 Direction des Laboratoires
 Signature électronique certifiée SE001R240002

Nombre de pages: 9

>>> ATTENTION AUX COMMENTAIRES DU LABORATOIRE

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.
 La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

L'accréditation du COFRAC atteste de la compétence des laboratoires pour les seuls essais couverts par l'accréditation qui sont identifiés par le symbole *. Laboratoire agréé par le ministère chargé de l'environnement - se reporter à la liste des laboratoires sur le site du ministère.

Siège
 Tour Mirabeau - 39-43, quai André-Citroën, 75739 Paris Cedex 15- France
 Tél. 01 40 58 89 00 - Fax 01 40 58 89 33

Centre scientifique
 3, avenue Claude-Guillemain, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 - France
 Tél. 02 38 64 34 34 - Fax 02.38.64.35.18

brgm Etablissement public à caractère industriel et commercial - RCS 58 b 5614 Paris - SIRET 58205614900419
www.brgm.fr

brgm
LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Les analyses suivantes ont été réalisées dans le secteur analytique : Analyse inorganique des eaux et des solides

Le mode opératoire	MO108	Analyse d'éléments traces par ICP-MS suivant NF EN ISO 17294-2 d'avril 2005
est utilisé pour doser :		
*Ag (Argent)		*Al (Aluminium)
*As (Arsenic)		*B (Bore)
*Ba (Baryum)		*Be (Béryllium)
*Cd (Cadmium)		*Co (Cobalt)
*Cr (Chrome)		*Cu (Cuivre)
*Li (Lithium)		*Mn (Manganèse)
*Ni (Nickel)		*Pb (Plomb)
*Sr (Strontium)		*Zn (Zinc)
Le mode opératoire	MO332 SEP-14	Analyse colorimétrique sur un système d'analyse discrète suivant la norme NF ISO 15923-1.
est utilisé pour doser :		
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)		*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)
*PO4 (OrthoPhosphates en PO4)		
Le mode opératoire	NF EN ISO 10304	Méthode par chromatographie ionique (Dionex) selon NF EN ISO 10304-1 (juillet 2009). Evaluation des aires des pics. Analyse sur échantillon filtré à 0.45µm.
Code Sandre :	266	
est utilisé pour doser :		
*Cl (Chlorures)		*F (Fluorures)
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)		*SO4 (Sulfates)
Le mode opératoire	NF EN ISO 11885 NOV-09	Analyse par ICP - spectrométrie d'émission.
Code Sandre :	306	
est utilisé pour doser :		
*Ca (Calcium)		*Fe (Fer)
*K (Potassium)		*Mg (Magnésium)
*Na (Sodium)		*SiO2 (Silice)
Le mode opératoire	NF EN ISO 9963-1 FEB-96	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie selon NF EN ISO 9963-1, CO3/HCO3 calculés à partir des valeurs de l'alcalinité (hypothèse alcalinité uniquement due à CO3, HCO3)
Code Sandre :	234	
est utilisé pour doser :		
CO3 (Carbonates)		HCO3 (Bicarbonates)

le : 19-DEC-2017

Page 2

brgm
LISTE DES MODES OPERATOIRES

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

* : éléments analysés dans le cadre de l'accréditation COFRAC

Commentaire du laboratoire :

Pour tous les échantillons, à la demande du client, les analyses ont été réalisées conformément à notre système de management de la qualité, bien que le délai et la température des échantillons à réception au laboratoire ne soient pas conformes aux normes de conservation des échantillons en vigueur pour les paramètres suivants : NH₄, NO₂ et NO₃.

Le laboratoire attire l'attention du client sur le fait que les résultats peuvent ne pas refléter la concentration réelle de l'échantillon initialement prélevé.

Commentaire général :

Les échantillons reçus non conditionnés selon les recommandations en vigueur (normes d'analyses ou norme NF EN ISO 5667-3) font l'objet d'un commentaire du laboratoire. Le mode et la durée de conservation avant réception au laboratoire sont de la responsabilité de l'organisme préleveur.

Tout échantillon concernant des études d'environnement est détruit un mois après la remise des résultats sauf demande du client.

Pour les solides : résultats exprimés sur matière sèche.

RESULTATS: Les limites de quantification sont estimées sur des matrices naturelles ou représentatives de l'échantillon. Elles peuvent être modifiées en fonction de la nature des échantillons.

Les incertitudes des paramètres accrédités peuvent être fournis sur demande.

UNITES : elles peuvent être différentes selon les éléments

g/l, mg/l, µg/l (1 µg/l=0.001mg/l), ng/l (1ng/l=0.001µg/l)

% (pourcentage massique)

mg/kg (1mg/kg=0.0001%), µg/kg (1µg/kg=0.001mg/kg)

µg=microgramme, ng=nanogramme

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Elément	Unité	LQ**	Lims Labo Client CS ***	200264832	200264833	200264834	200264835
				1 X25 - 28/08/17	2 PAR1 - 28/08/17	3 Lauron Chanoines - 28/08/17	4 Ventillon - 29/08/17
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374	118.9	887.5	135.4	116.5
*Mg (Magnésium)	mg/l	0.5	1372	11.7	368.5	11.3	12.1
*Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375	16.6	2605.8	15.7	13.9
*K (Potassium)	mg/l	0.5	1367	0.9	13.2	1.2	0.9
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	mg/l	0.05	1335	< 0.05	0.57	< 0.05	< 0.05
CO3 (Carbonates)	mg/l	10	1328	< 10	< 10	< 10	< 10
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	10	1327	287	320	322	285
*Cl (Chlorures)	mg/l	0.5	1337	21.4	6382.9	22.1	18.2
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	0.5	1340	9.7		8.5	8.2
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	5	1340		< 5		
*SO4 (Sulfates)	mg/l	0.5	1338	105.1	568.3	118.4	102.2
*PO4 (OrthoPhosphates en PO4)	mg/l	0.05	1433	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	mg/l	0.01	1339	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*F (Fluorures)	mg/l	0.1	1391		< 0.1	< 0.1	< 0.1
*F (Fluorures)	mg/l	1	1391	< 1			
*Ag (Argent)	µg/l	0.01	1368	0.02	0.07	0.03	0.03
*Al (Aluminium)	µg/l	0.5	1370	0.59	1.91	0.51	0.80
*As (Arsenic)	µg/l	0.05	1369	0.08	0.23	0.15	0.09

le : 19-DEC-2017

Page 4

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Elément	Unité	LQ**	CS ***	Lims	200264836	200264837	200264838	200264839
				Labo	5	6	7	8
				Client	Pissarotte - 29/08/17	Galéjon amont - 29/08/17	Barrage anti-sel - 29/08/17	X19 profondeur 30m - 29/08/17
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374		115.3	66.6	97.1	582.2
*Mg (Magnésium)	mg/l	0.5	1372		8.3	16.3	15.4	1191.6
*Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375		30.6	18.7	31.2	10486.9
*K (Potassium)	mg/l	0.5	1367		0.7	3.9	2.8	350.0
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	mg/l	0.05	1335		< 0.05	< 0.05	< 0.05	1.21
CO3 (Carbonates)	mg/l	10	1328		< 10	< 10	< 10	< 10
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	10	1327		259	153	228	296
*Cl (Chlorures)	mg/l	0.5	1337		42.6	26.8	49.3	20313.0
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	0.5	1340		15.4	< 0.5	1.3	
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	5	1340					< 5
*SO4 (Sulfates)	mg/l	0.5	1338		95.3	113.4	110.9	2793.4
*PO4 (OrthoPhosphates en PO4)	mg/l	0.05	1433		< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	mg/l	0.01	1339		< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*F (Fluorures)	mg/l	0.1	1391		< 0.1	0.1	0.1	
*F (Fluorures)	mg/l	1	1391					< 1
*Ag (Argent)	µg/l	0.01	1368		0.03	0.02	0.02	0.09
*Al (Aluminium)	µg/l	0.5	1370		0.58	0.71	0.77	1.58
*As (Arsenic)	µg/l	0.05	1369		0.08	1.09	1.64	0.65

le : 19-DEC-2017

Page 5

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Elément	Unité	LQ**	CS ***	Lims
				Labo
				Client
				200264840 9 X19 profondeur 17m - 28/08/17
*Ca (Calcium)	mg/l	0.5	1374	16.0
*Mg (Magnésium)	mg/l	0.5	1372	25.7
*Na (Sodium)	mg/l	0.5	1375	731.4
*K (Potassium)	mg/l	0.5	1367	35.5
*NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	mg/l	0.05	1335	< 0.05
CO3 (Carbonates)	mg/l	10	1328	< 10
HCO3 (Bicarbonates)	mg/l	10	1327	308
*Cl (Chlorures)	mg/l	0.5	1337	958.5
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	0.5	1340	9.8
*NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	mg/l	5	1340	
*SO4 (Sulfates)	mg/l	0.5	1338	217.3
*PO4 (OrthoPhosphates en PO4)	mg/l	0.05	1433	< 0.05
*NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	mg/l	0.01	1339	0.30
*F (Fluorures)	mg/l	0.1	1391	1.5
*F (Fluorures)	mg/l	1	1391	
*Ag (Argent)	µg/l	0.01	1368	0.03
*Al (Aluminium)	µg/l	0.5	1370	8.75
*As (Arsenic)	µg/l	0.05	1369	0.38

le : 19-DEC-2017

Page 6

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Elément	Unité	LQ**	Lims Labo Client CS ***	200264832	200264833	200264834	200264835
				1 X25 - 28/08/17	2 PAR1 - 28/08/17	3 Lauron Chanoines - 28/08/17	4 Ventillon - 29/08/17
*B (Bore)	µg/l	0.5	1362	31.2	75.3	20.7	21.8
*Ba (Baryum)	µg/l	0.05	1396	61.30	79.99	49.66	72.89
*Be (Béryllium)	µg/l	0.01	1377	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*Cd (Cadmium)	µg/l	0.01	1388	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.01
*Co (Cobalt)	µg/l	0.05	1379	< 0.05	0.14	< 0.05	< 0.05
*Cr (Chrome)	µg/l	0.1	1389	0.52	0.19	< 0.1	0.38
*Cu (Cuivre)	µg/l	0.1	1392	0.13	0.15	0.18	0.48
*Fe (Fer)	mg/l	0.02	1393	< 0.02	0.030	< 0.02	< 0.02
*Li (Lithium)	µg/l	0.1	1364	1.59	30.53	2.31	1.36
*Mn (Manganèse)	µg/l	0.1	1394	< 0.1	34.71	0.65	< 0.1
*Ni (Nickel)	µg/l	0.1	1386	0.13	0.80	0.12	0.40
*Pb (Plomb)	µg/l	0.05	1382	< 0.05	0.16	< 0.05	0.05
*SiO ₂ (Silice)	mg/l	0.5	1348	13.1	11.7	10.3	12.2
*Sr (Strontium)	µg/l	0.1	1363	714.7	11114.5	774.3	755.2
*Zn (Zinc)	µg/l	0.5	1383	< 0.5	< 0.5	2.74	2.87

le : 19-DEC-2017

Page 7

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Elément	Unité	LQ**	CS ***	200264836	200264837	200264838	200264839
				5	6	7	8
				Pissarotte - 29/08/17	Galéjon amont - 29/08/17	Barrage anti-sel - 29/08/17	X19 profondeur 30m - 29/08/17
*B (Bore)	µg/l	0.5	1362	28.7	26.1	28.8	3564.5
*Ba (Baryum)	µg/l	0.05	1396	58.10	46.23	51.12	52.61
*Be (Béryllium)	µg/l	0.01	1377	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
*Cd (Cadmium)	µg/l	0.01	1388	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01
*Co (Cobalt)	µg/l	0.05	1379	< 0.05	< 0.05	0.06	4.51
*Cr (Chrome)	µg/l	0.1	1389	0.27	< 0.1	< 0.1	0.85
*Cu (Cuivre)	µg/l	0.1	1392	0.94	0.43	0.57	0.89
*Fe (Fer)	mg/l	0.02	1393	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.360
*Li (Lithium)	µg/l	0.1	1364	0.70	5.07	3.37	144.71
*Mn (Manganèse)	µg/l	0.1	1394	0.65	11.17	13.70	8633.45
*Ni (Nickel)	µg/l	0.1	1386	0.14	0.47	0.44	7.75
*Pb (Plomb)	µg/l	0.05	1382	0.11	0.18	0.22	< 0.05
*SiO2 (Silice)	mg/l	0.5	1348	12.5	1.4	6.1	9.1
*Sr (Strontium)	µg/l	0.1	1363	551.1	924.5	817.8	8907.0
*Zn (Zinc)	µg/l	0.5	1383	35.39	0.92	0.72	0.76

brgm TABLEAU DE RESULTATS

Id soumission : 100040621

Rapport d'essais : 17-6-033-A

Élément	Unité	LQ**	CS ***	Lims Labo Client
				200264840 9 X19 profondeur 17m - 28/08/17
*B (Bore)	µg/l	0.5	1362	851.5
*Ba (Baryum)	µg/l	0.05	1396	30.70
*Be (Béryllium)	µg/l	0.01	1377	< 0.01
*Cd (Cadmium)	µg/l	0.01	1388	< 0.01
*Co (Cobalt)	µg/l	0.05	1379	0.12
*Cr (Chrome)	µg/l	0.1	1389	0.35
*Cu (Cuivre)	µg/l	0.1	1392	2.00
*Fe (Fer)	mg/l	0.02	1393	< 0.02
*Li (Lithium)	µg/l	0.1	1364	10.93
*Mn (Manganèse)	µg/l	0.1	1394	85.17
*Ni (Nickel)	µg/l	0.1	1386	0.32
*Pb (Plomb)	µg/l	0.05	1382	0.15
*SiO2 (Silice)	mg/l	0.5	1348	7.6
*Sr (Strontium)	µg/l	0.1	1363	252.7
*Zn (Zinc)	µg/l	0.5	1383	1.85

** LQ Limite de quantification

*** CS : Code Sandre

FIN DU RAPPORT D'ESSAIS

le : 19-DEC-2017

Page 9

6. Analyse CFC/SF6 - Laboratoire SPURENSTOFFLABOR (Wachenheim - Allemagne)

BRGM PACA
c/o Mme Florence Rivet
117, av. de Luminy, BP168
13276 Marseille Cedex09
France

SPURENSTOFFLABOR

Dr. Harald Oster
Bornweg 10
67157 Wachenheim
Telefon 0 63 22/94 38 0
eMail:
harald.oster@t-online.de

10.10.2017

CFC/SF₆ analysis / project Simba AP16PAC044

sample	CFC conc. [pmol/l]			SF ₆ conc. [fmol/l]
	CFC-12	CFC-11	CFC-113	
X25	6,5 ±0,4	about 110	3,1 ±0,4	14 ±3
PAR1	0,27 ±0,05	0,5 ±0,1	0,05 ±0,05	1,2 ±0,2
Lauron Chanoines	2,4 ±0,2	3,7 ±0,4	0,34 ±0,05	3,2 ±0,4
Ventillon	5,1 ±0,3	about 100	2,0 ±0,2	5,7 ±0,6
Pissarotte	2,5 ±0,2	about 100	0,47 ±0,05	2,8 ±0,3
X19 17m	1,8 ±0,1	0,7 ±0,1	<0,01	1,4 ±0,2
X19 30m	0,73 ±0,05	0,3 ±0,1	0,04 ±0,05	0,6 ±0,1


Dr. H. Oster

Campagne de prélèvement Juillet 2018

1. Analyse du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité ^{14}C - Direction des laboratoires du BRGM



BRGM PACA
REÇU
Le 27 AOUT 2018
Diffusion

RAPPORT D'ESSAIS 18-6-036-B

<p>V/Réf. :</p> <p>Informations sur le(s) échantillon(s) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Date début d'analyse : 04-JUL-18 - Date de réception : 04/07/2018 - Nombre: 2 - Nature : EAU - Auteur prélèvement: demandeur 	<p>A l'attention de : RIVET Florence</p> <p>DAT/ SDE/PAC/ MSL 117 AVENUE DE LUMINY 13276 MARSEILLE CEDEX 09 France</p> <p>Télécopie n° .</p>
---	---

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 07-AUG-2018 par Christine FLEHOC

Approuvé par Hervé GABORIAU, Directeur des laboratoires

Nbr pages : 3

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France
Direction des Laboratoires - Unité Isotopes
Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11



Orléans, le 07/08/2018

DIRECTION DES LABORATOIRES
Unité ISOTOPES

Rapport d'essais 18-6-036-B

Demandeur : F. RIVET

Projet : AP16PAC044

Tâche : 1

Réf. labo : 18E 229 à 230

RESULTATS D'ANALYSES ISOTOPIQUES

Eaux

Destinataire(s) : F. RIVET DAT/ SDE/PAC/ MSL

Archivage : LAB/ISO (18E229-230C14.doc)

BRGM
LAB / ISO
B.P. 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France

2

Rapport d'essais 18-6-036-B

**Projet SIMBA
RADIOCARBONE**

Echantillons

Nature : eaux souterraines, Fos-sur-Mer
Date de réception : 04/07/2018

Analyses

Opérateur(s) : BETA ANALYTIC
Date de réalisation : juillet-août 2018

Méthode d'analyse : **La préparation et les mesures du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C sont réalisées par Beta Analytic Inc.** Le carbone inorganique dissous dans l'eau est extrait par acidification (attaque avec H_3PO_4). Le gaz est extrait sous vide et purifié par cryogénie. Un aliquote est utilisé pour la mesure du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ par spectrométrie de masse en phase gazeuse. Le CO_2 est réduit en graphite pour être analysé. L'activité de ^{14}C est mesurée par spectrométrie de masse par accélération (AMS).

Résultats

L'activité de ^{14}C mesurée est reportée par rapport à celle du carbone moderne référence; elle est exprimée en % de carbone moderne et normalisée en tenant compte de la valeur $\delta^{13}\text{C}$ (pCM).

Nb	Réf. Labo	ECHANTILLON	$\delta^{13}\text{C}$ vs PDB ‰ (± 0.1)	Activité ^{14}C pCM	Age ^{14}C conventionnel ans BP ($\pm 1\sigma$)
1	18E 229	X 23 (SIMBA)	-13.2	99.4 \pm 0.4	50 \pm 30
2	18E 230	MAZET 5	-13.0	97.4 \pm 0.4	210 \pm 30

Un équivalent en âge conventionnel ou apparent peut être estimé à partir de l'activité du ^{14}C en utilisant la valeur de Libby de 5568 ans comme période (demi-vie) du radiocarbone. Cet âge dit « conventionnel » est reporté en ans BP (Before Present) avec 1950 comme année de référence pour le présent.

Attention : L'âge conventionnel ne représente en aucun cas le temps de résidence de l'eau. Pour estimer ce temps, il faut tenir compte du contexte, des équilibres et échanges avec les différentes sources de carbone dans les milieux traversés. Ces données physico-chimiques peuvent être intégrées à plusieurs modèles permettant d'évaluer un domaine de valeurs possibles pour le temps de résidence.

C. Flehoc

C. FLEHOC

3

2. Analyse CFC/SF₆ - Laboratoire SPURENSTOFFLABOR (Wachenheim - Allemagne)

BRGM PACA
 c/o Florence RIVET
 117 av. de Luminy
 13276 Marseille Cedex 09
 France

SPURENSTOFFLABOR



Dr. Harald Oster
 Bornweg 10
 67157 Wachenheim
 Telefon 0 63 22/94 38 0
 eMail: harald.oster@t-online.de

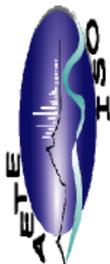
02.08.2018

CFC/SF₆ analysis / project Mazet

sample	date	CFC conc. [pmol/l]			SF ₆ conc. in fmol/l
		CFC-12	CFC-11	CFC-113	
Mazet5	02.07.2018	2,0 ±0,1	3,9 ±0,4	0,23 ±0,05	2,9 ±0,3

Dr. H. Oster

3. Analyse Éléments traces, Majeurs et TOC - Université de Montpellier



GPTR AETE-ISO
 OSU OREME, Université de Montpellier
 Bât 22 - CC 22002, Place Eugène Bataillon
 34095 MONTPELLIER CEDEX 5
ism-aete-iso@umontpellier.fr
www.aete.univ-montp2.fr

En cas d'utilisation des données dans des articles scientifiques merci de citer la
 plateforme AETE-ISO sous la forme:

"Plateforme AETE-ISO, OSU-OREME/Université de Montpellier"
 "AETE-ISO platform, OSU-OREME/Université de Montpellier"

Rapport d'analyse Éléments Traces

Analysé avec ICAP Q THERMO SCIENTIFIC le : 04/07/2018
 Opérateur : L. Causee
 Remarques :

	B	Sr	B	Sr
Limite de détection (ppb)	0.1515	0.0218		
Blanc Equivalent Concentration (ppb)	0.2460	0.0043		
Echantillon certifié SLRS-6				
Concentration average (ppb)	6.91	41.09	7.39 ± 1.28	40.66 ± 0.32
Concentration RSD (%)	5.1	2.0		
Concentration average (ppb)	371.73	1395.60		
Concentration average (ppb)	43.18	784.61		
Concentration RSD (%)	3.0	0.6		
Concentration RSD (%)	1.0	1.4		



Hydrosciences Montpellier
 CC 057 - 183 rue Auguste Broussonnet
 34090 Montpellier
hm-simba@univ-montpellier.fr

Rapport d'Analyse majeurs et carbone organique

Éléments majeurs analysés par chromatographie ionique DIONEX ICS-1000 le : **13/07/2018**
 Alcalinité analysée par titrateur METTLER TOLEDO Rondino G20 le : **04/07/2018**

TOC/DOC analysé par analyseur de carbone SHIMADZU TOC-VCH le :

Numéro	nom	date de prélèvement	Remarques	conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesures laboratoire										SEUIL														
						pH	temp. °C	Oxygène dissous mg/L	Oxygène dissous %	pH	CO ₂	HCO ₃	F	Cl	Br	NO ₃	SO ₄	Na	K	Mg	Ca	Mg	Ca	Balance ionique	SA	SC	7% A REFAIRE	TOC mg/L	DOC mg/L	Califorme T	Califorme F
1	XZ3	02/07/2018		1651	732	7.32	16.5	0.0	0.0	603.0	193.1	21.3	121.1	112.1	101.9	51.6	146.5	9.88	5.45	0.34	2.52	4.88	2.61	4.24	7.41	3%	18.19	19.14		
2	Mazet5	02/07/2018		909	765	7.65	17.2	3.68	38.4	322.9	79.4	7.1	138.5	44.6	2.4	17.9	145.9	5.29	2.24	0.12	2.88	1.94	0.06	1.48	7.28	1%	10.53	10.76		
																											0.00	0.00		

4. Analyse isotopique du Sr - Direction des laboratoires du BRGM



**BRGM PACA
REÇU**

Le 30 JUL. 2018

Diffusion FR

RAPPORT D'ESSAIS 18-6-036-A

<p>V/Réf. :</p> <p>Informations sur le(s) échantillon(s) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Date début d'analyse : 04-JUL-18 - Date de réception : 04/07/2018 - Nombre: 2 - Nature : EAU - Auteur prélèvement: 	<p>A l'attention de : RIVET Florence</p> <p>DAT/GIR ME/BRGM PAC 117 AVENUE DE LUMINY 13276 MARSEILLE CEDEX 09 France</p> <p>Télécopie n° .</p>
--	--

Secteur analytique	Coordinateur
Spectromètres de masse	C.GUERROT

Validé le 27-JUL-2018 par Catherine GUERROT

Approuvé par Philippe NEGREL, Directeur adjoint des laboratoires

Nbr pages : 2

Note importante :

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais.

La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont détruits 1 an après la date d'envoi de ce rapport.

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans, cedex 2, France
 Direction des Laboratoires - Unité Isotopes
 Téléphone : (33) 02.38.64.35.57 - Télécopie : (33) 02.38.64.37.11

DIRECTION DES LABORATOIRES
 UNITE ISOTOPES
 Id soumission : 100042141
 N° Etude : 18-6-036-A

Plateau ISOTOPIE SPECTROMETRES DE MASSE
 Labo TIMS

Orléans le 27/07/2018

Objet : Analyse isotopique du Sr sur 2 échantillons d'eau.
 Demandeur : F. RIVET DAT/PACA

Demande du : 04/07/2018
 Fait le : 27/07/2018

*Détermination des rapports isotopiques 87Sr/86Sr en triple multidynamique
 Analyse sur mono filament W*

n°Labo	n° Echantillon	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ(m)
SR230	X23 - 02/07/2018	0.708571	0.000006
SR231	MAZET 5 - 02/07/2018	0.708228	0.000006

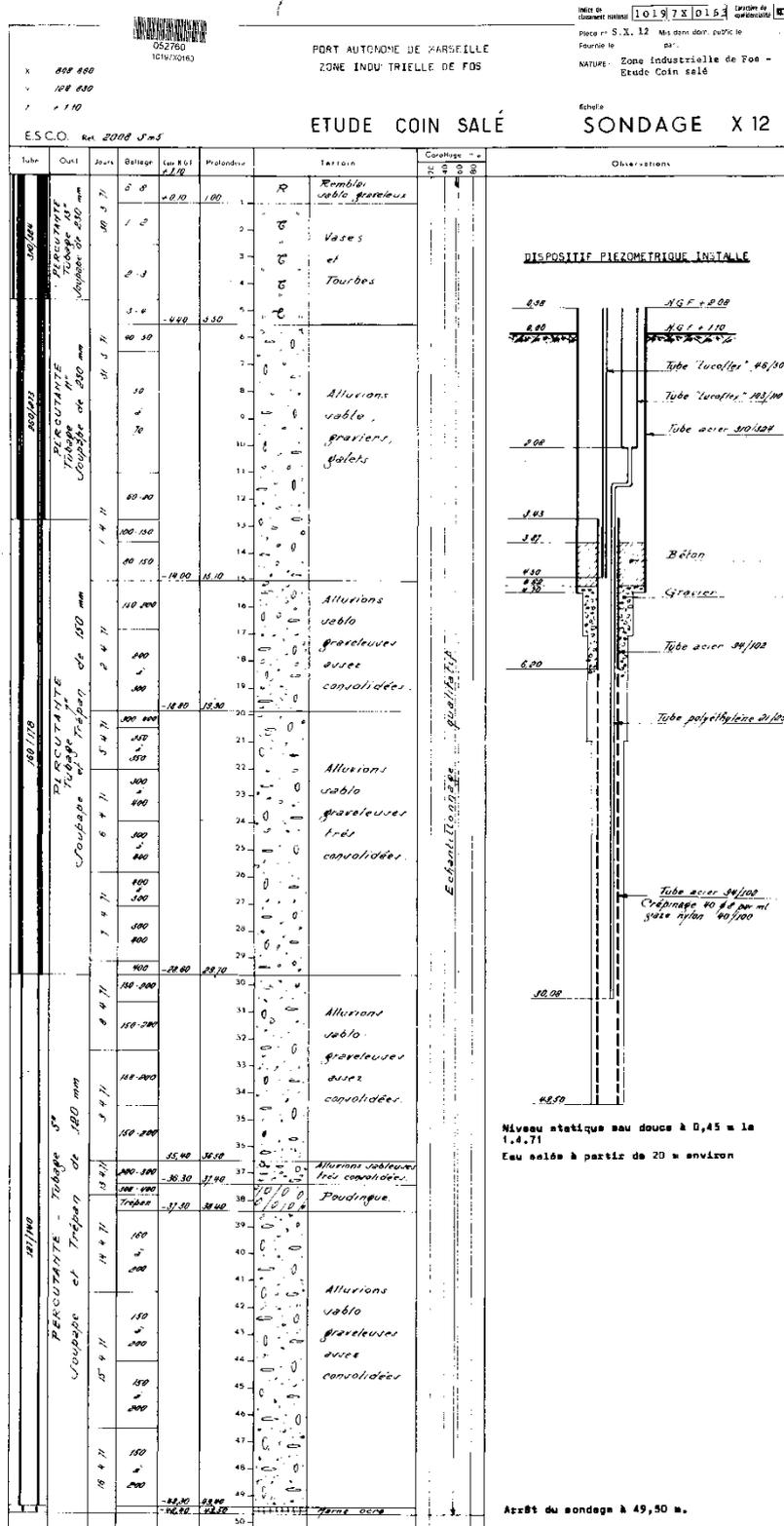
La valeur obtenue sur 16 déterminations du standard NBS987 analysé durant cette période est de 0.710246 ± 12 (2σ)
 La valeur certifiée du standard est de 0.710240. Les rapports mesurés sont normalisés à cette valeur.



Annexe 4

Coupes géologique et technique des piézomètres étudiés

X12



Indice de classement national 10192X0070 Caractère de confidentialité C

Pièce n° S.X 19 Mis dans dom. public le ...
Fournie le ... par :

NATURE : Etude Coin salé

Echelle

X = 198.500
Y = 136.550
Z = +1,77



PORT AUTONOME DE MARSEILLE
Zone industrielle de FOS

ETUDE COIN SALE SONDRAGE X.19

E.S.C.O. Réf. 2008 Sm1

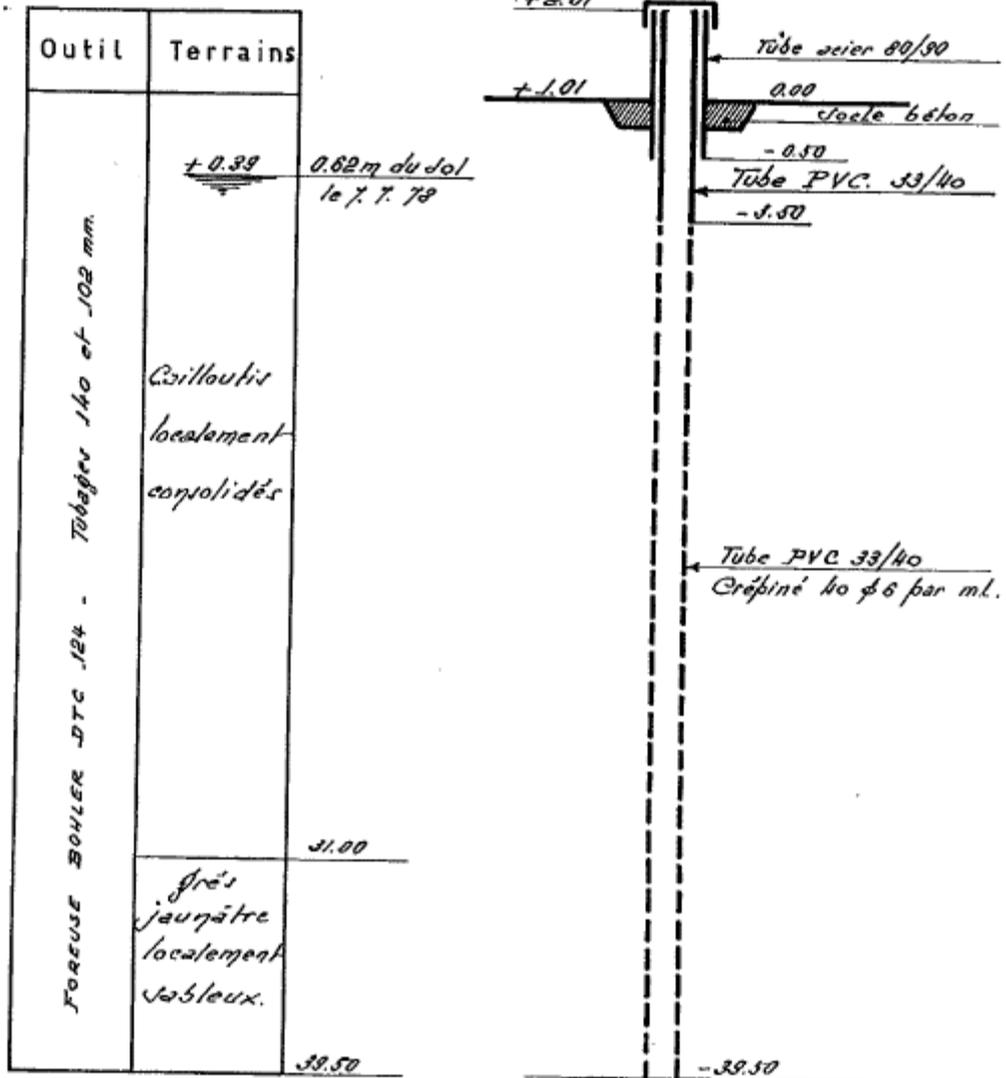
Tubo	Outil	Jours	Batage	Cote N.G.F. # 177	Profondeur	Terrain	Carottage %				Observations													
							20	40	60	80														
180/178 PERCUTANTE - Tubage 7" Soupepe et Trepan de 150 mm.		9.7.71		+0.20 0.00	1.55	Limon sableux argileux grisâtre tendre						<p>PIEZOMETRE INSTALLE</p>												
					2																			
					3																			
					4																			
					5																			
					6							-4.23	6.00	Sable gris fin										
					7																			
					8							-6.73	8.30	Cailloutis, sable, graviers, galets										
					9																			
					10																			
					11																			
					12																			
					13																			
					14																			
					15																			
					16							-14.53	16.30							Cailloutis consolidés				
					17																			
					18							-16.83	18.60	Poudingue très compact										
					19																			
20	-18.33	20.10	Cailloutis, sable, graviers, galets, peu consolidés.																					
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								
27	-25.53	27.30						Cailloutis très consolidés et bancs de poudingue.																
28																								
29	-29.53	31.30						Argile ocre et blanchâtre.																
30																								
31	-30.53	32.30																						
32																								

- Niveau statique eau douce à 1,55 m le 26.7.71.
- Présence d'eau salée à partir de 14 m environ.

Arrêt du sondage à 32,30 m.
EXECUTE du 2 au 13 Juillet 1971.

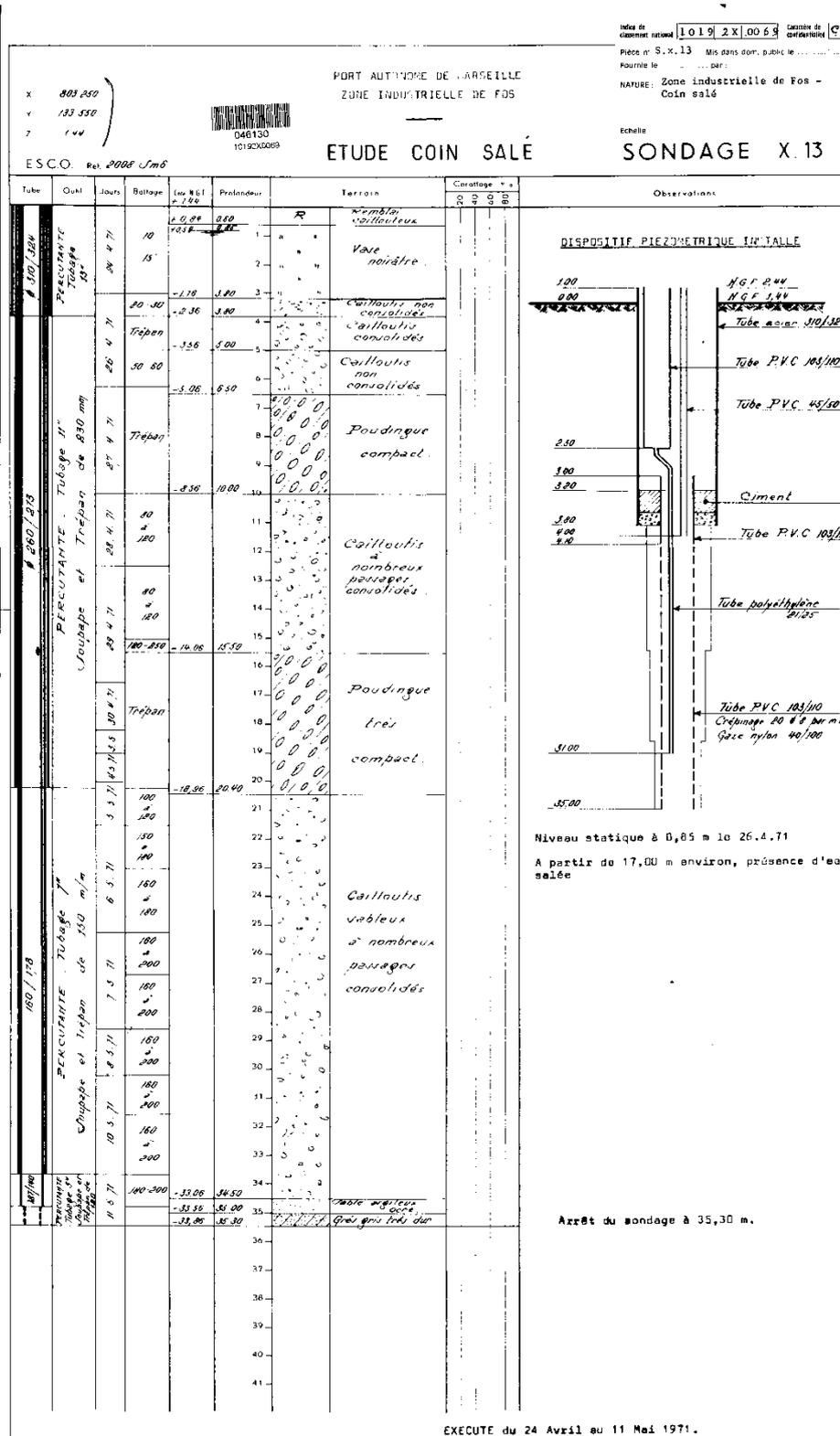
X = 803 283,50
 Y = 133 582,50
 Z = +1.01

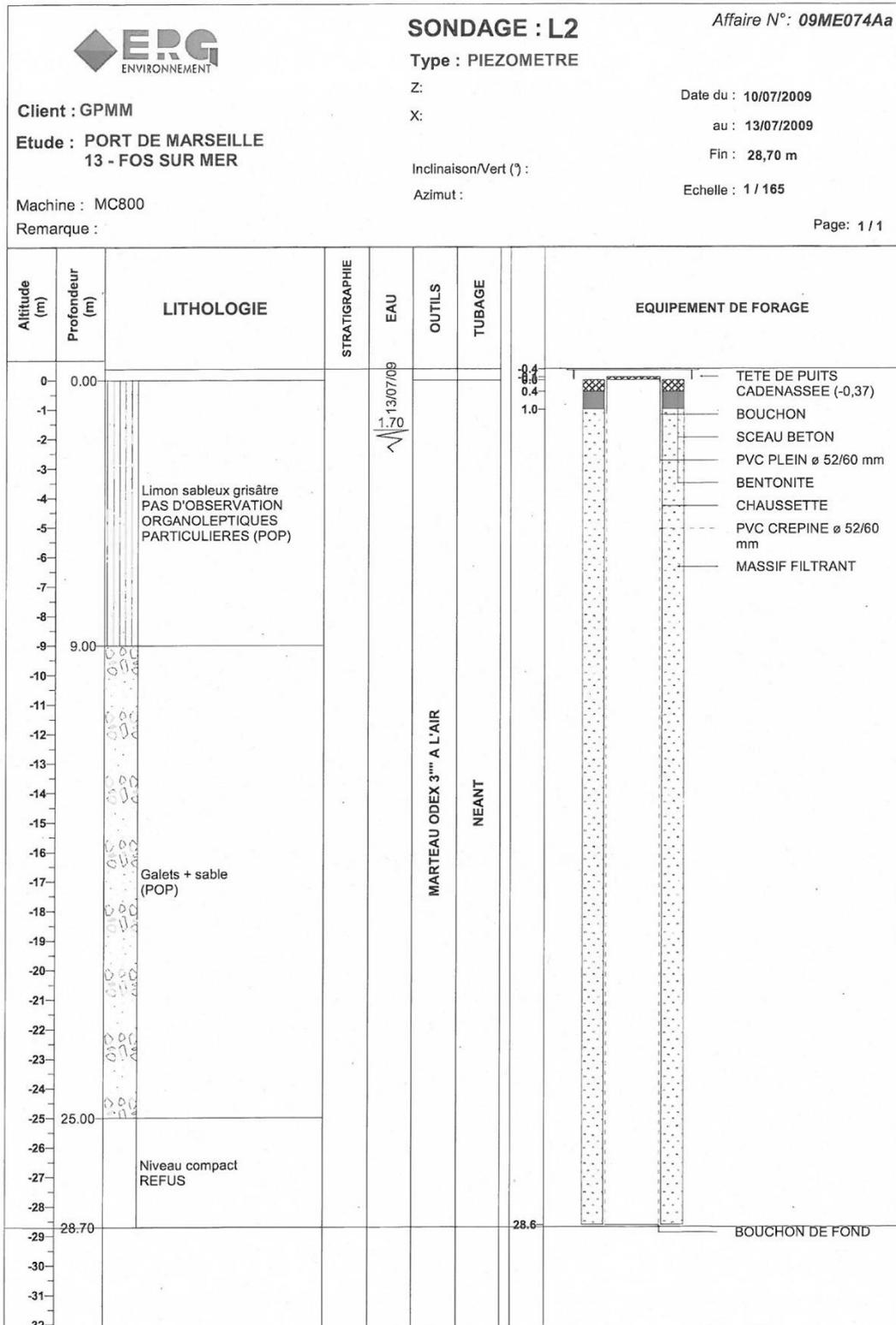
PIEZOMETRE X 30

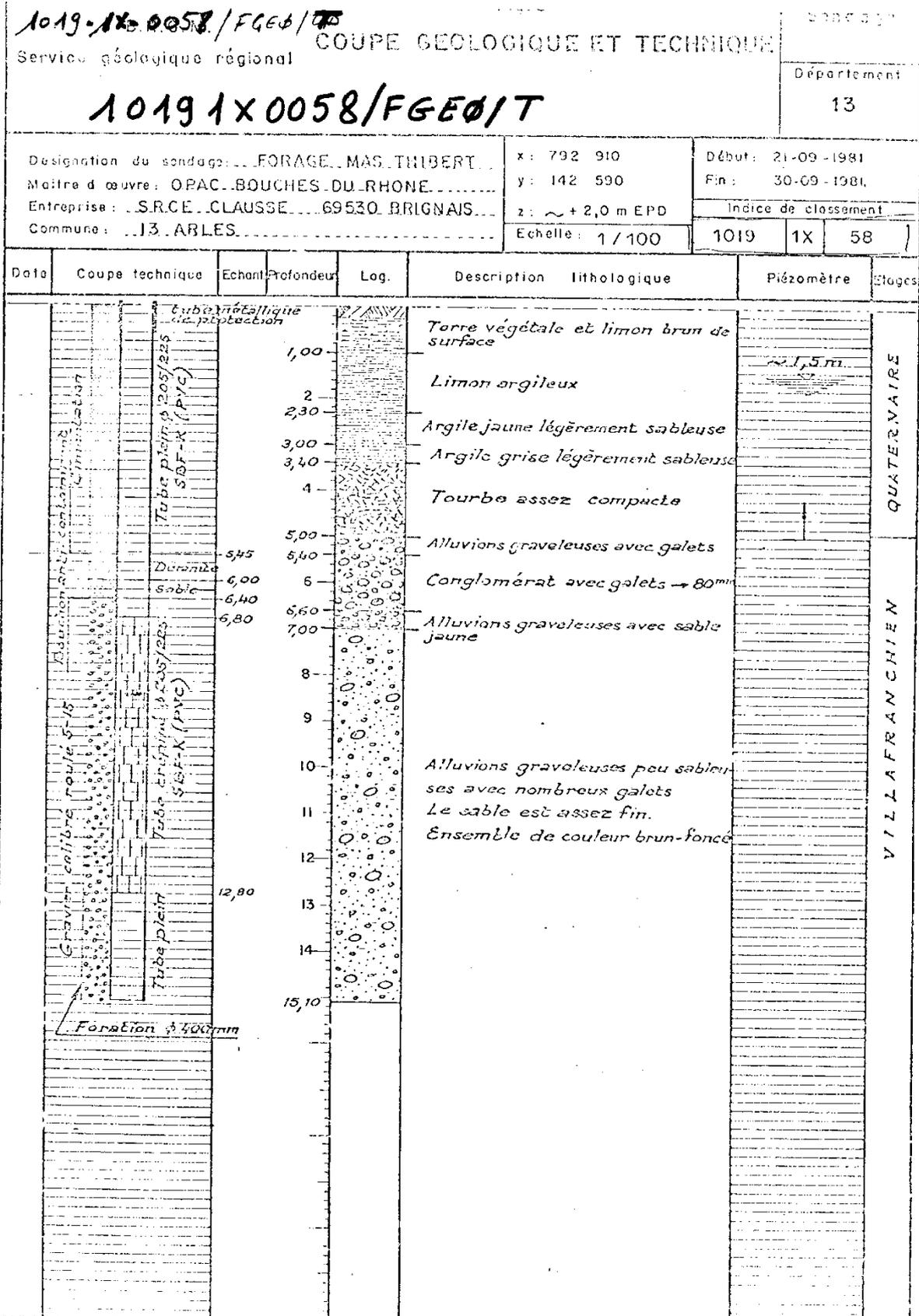


SCO 2619 S.n.1

EXECUTE DU 6 au 7 Juillet 1978

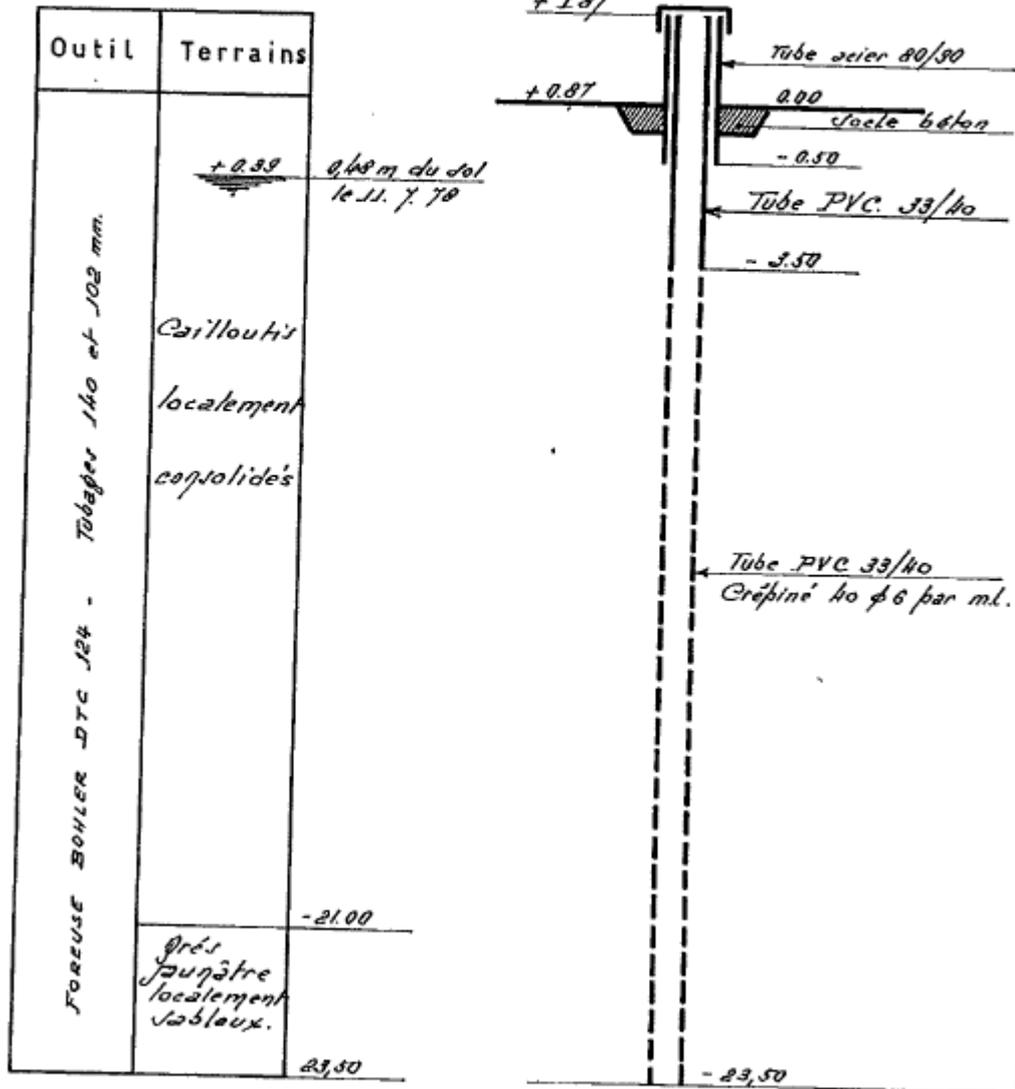






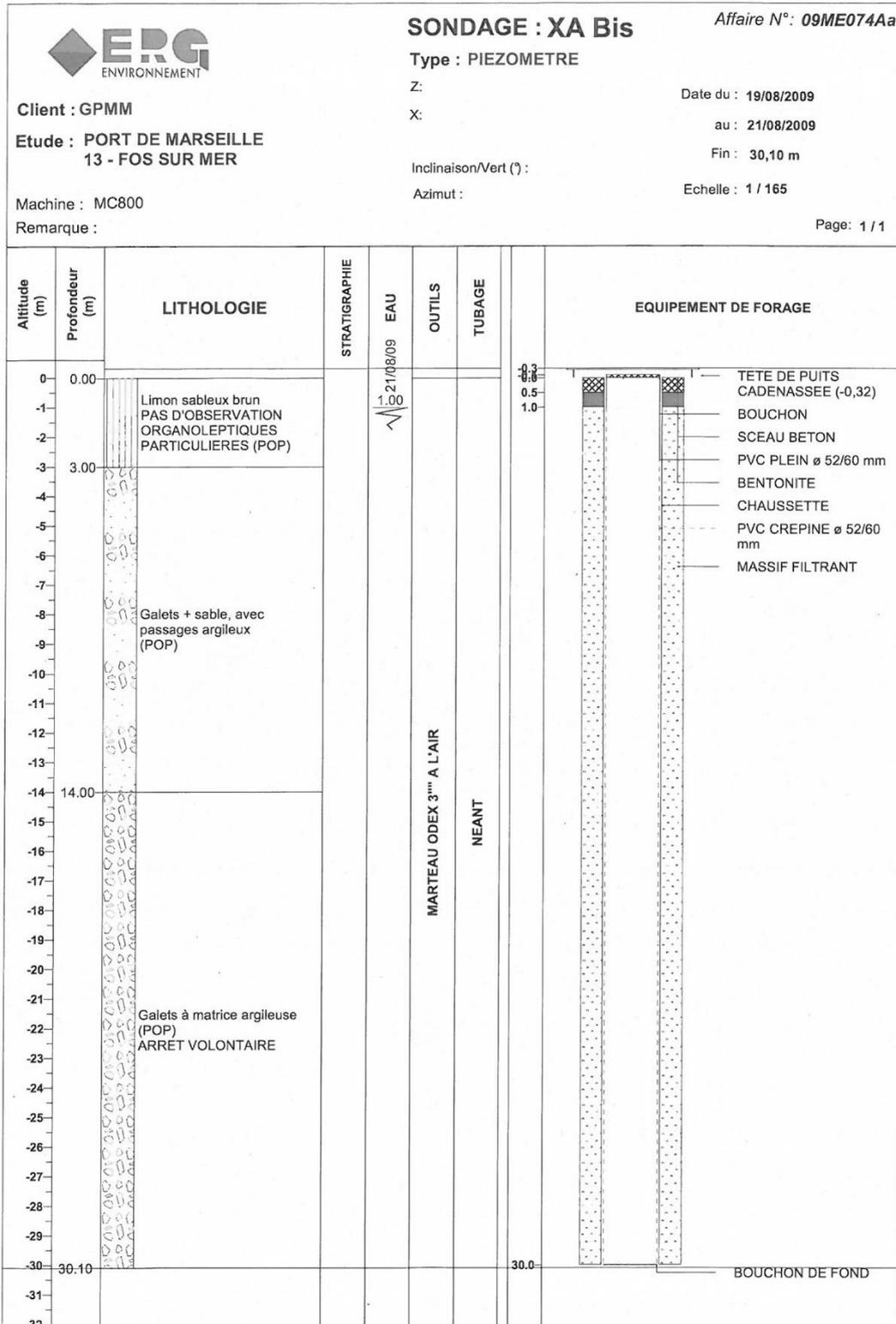
X = 803.539,50
 Y = 133.712,20
 Z = + 0,87

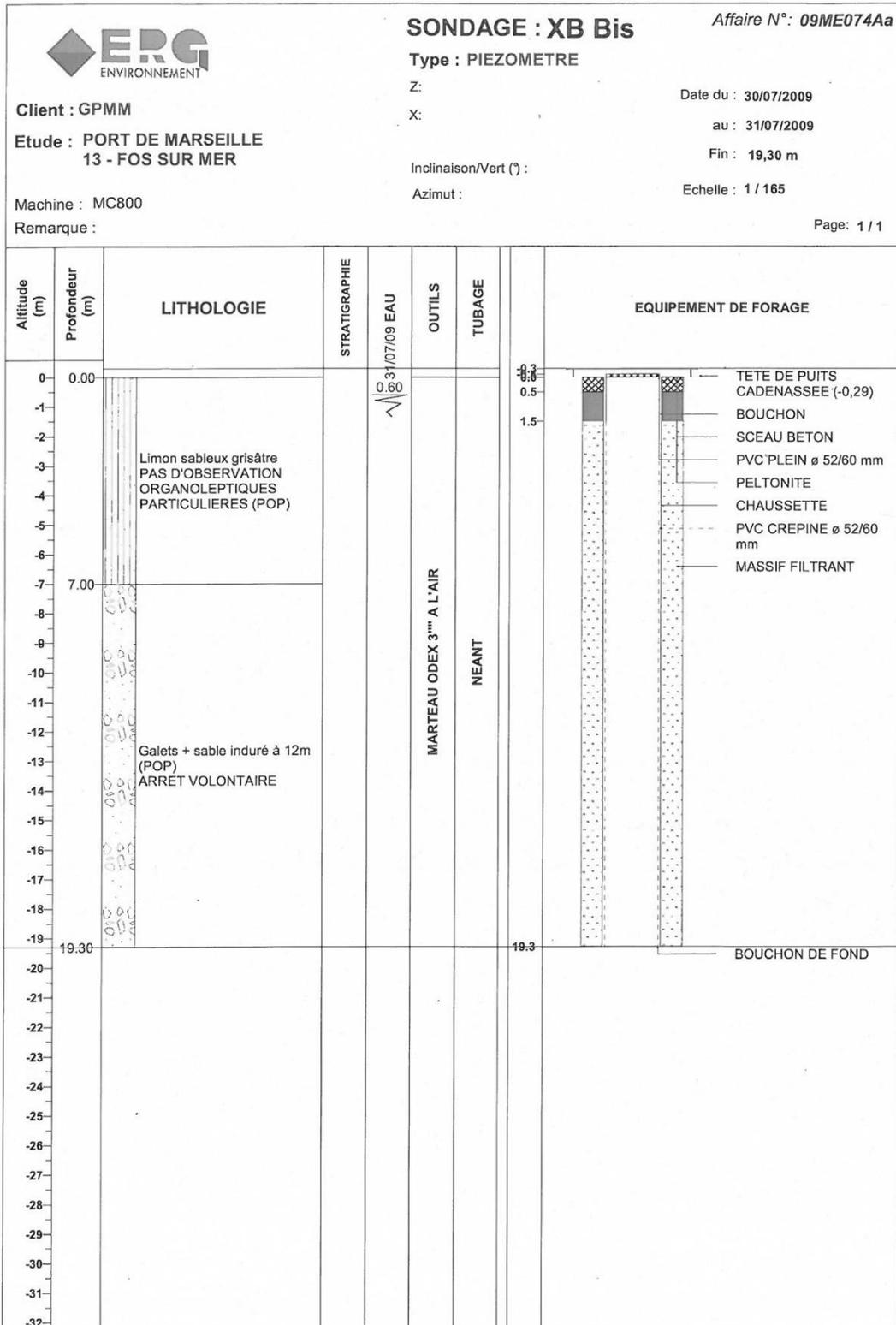
PIEZOMETRE X 31



ICO 2619 S.n.2

EXECUTE DU 6 au 7 Juillet 1978.







SONDAGE : XC Bis

Affaire N°: 09ME074Aa

Type : PIEZOMETRE

Client : GPMM

Date du : 19/07/2009

Etude : PORT DE MARSEILLE
13 - FOS SUR MER

Z:

au : 05/07/2009

Inclinaison/Vert (°) :

Fin : 15,05 m

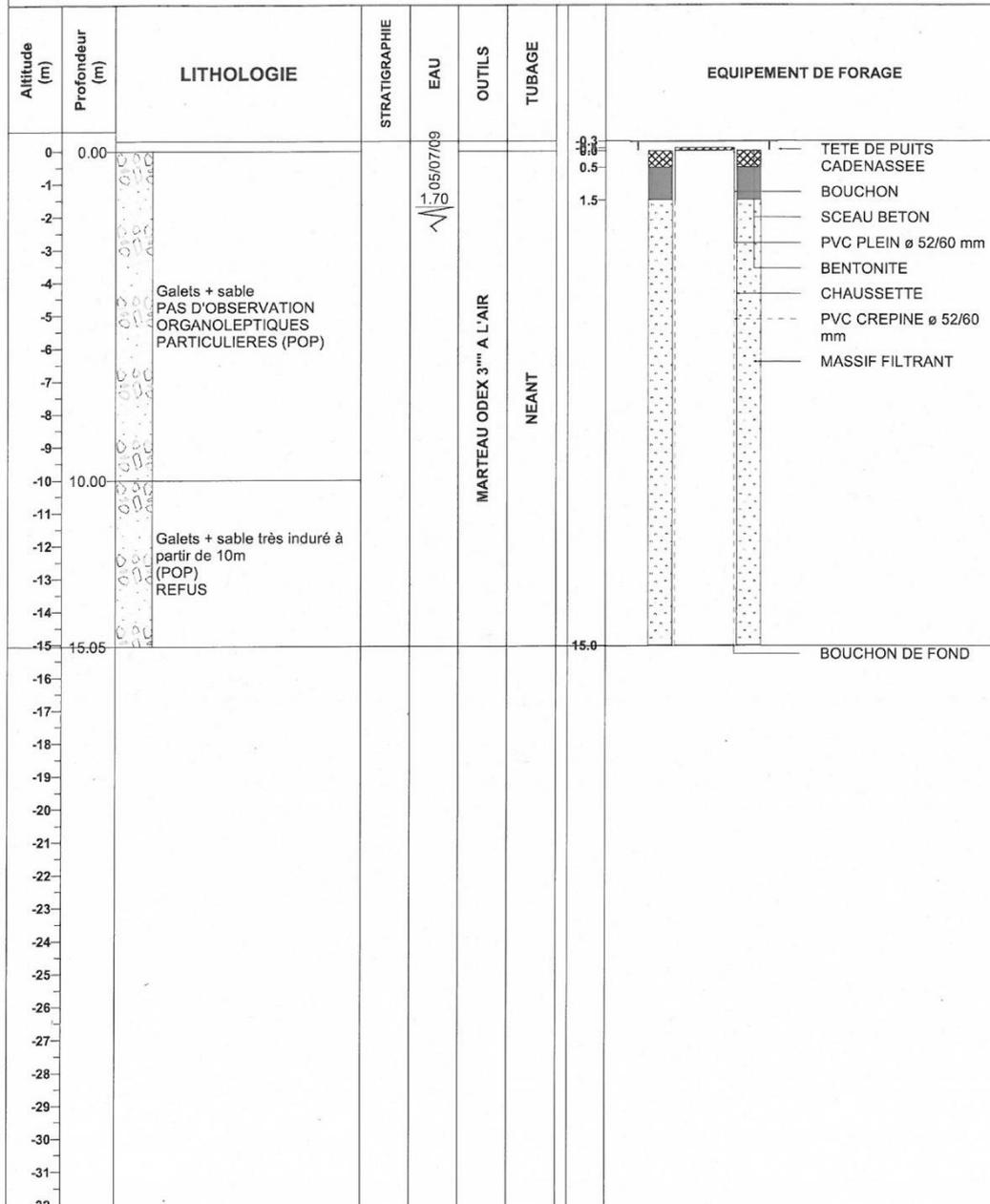
Azimut :

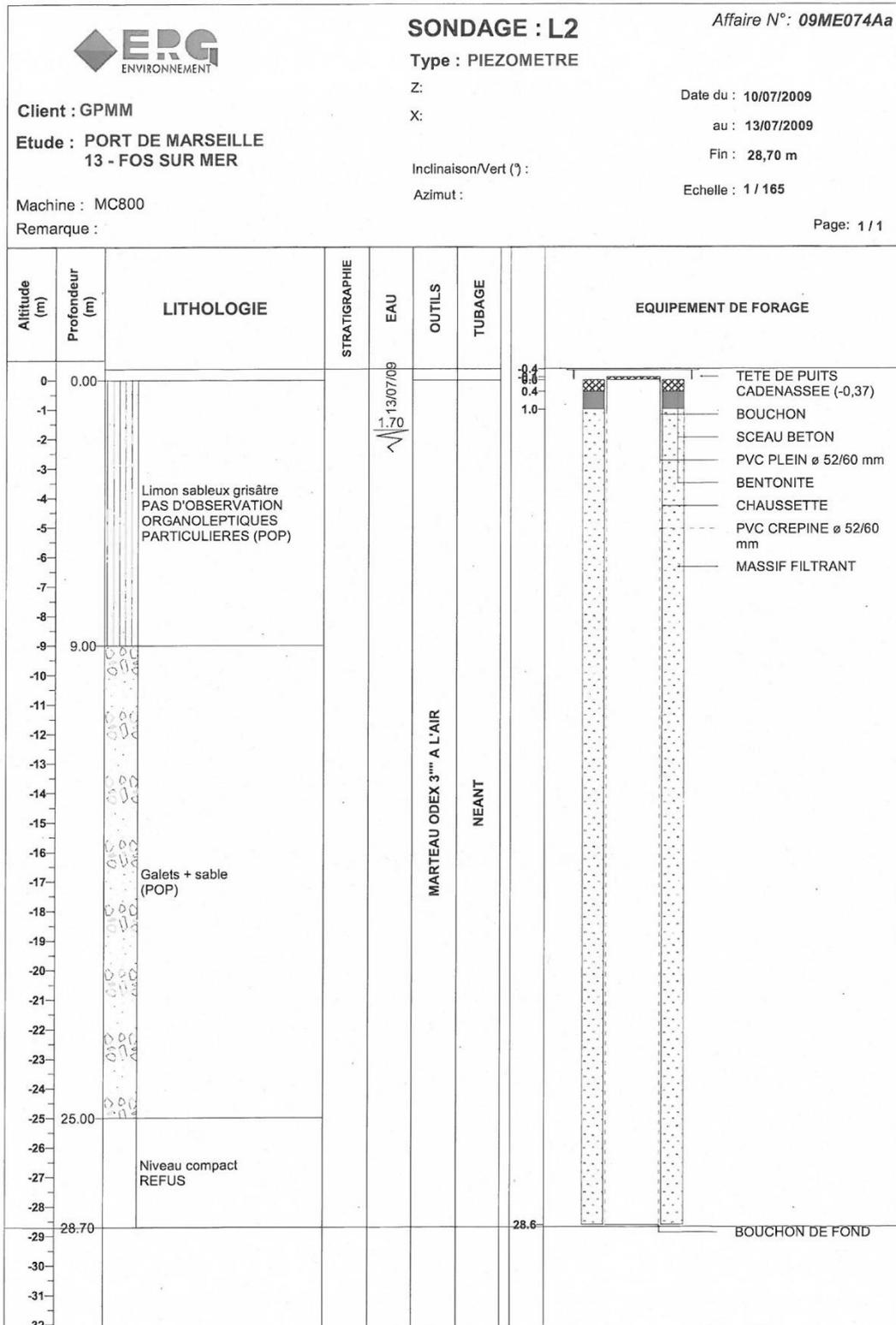
Echelle : 1 / 165

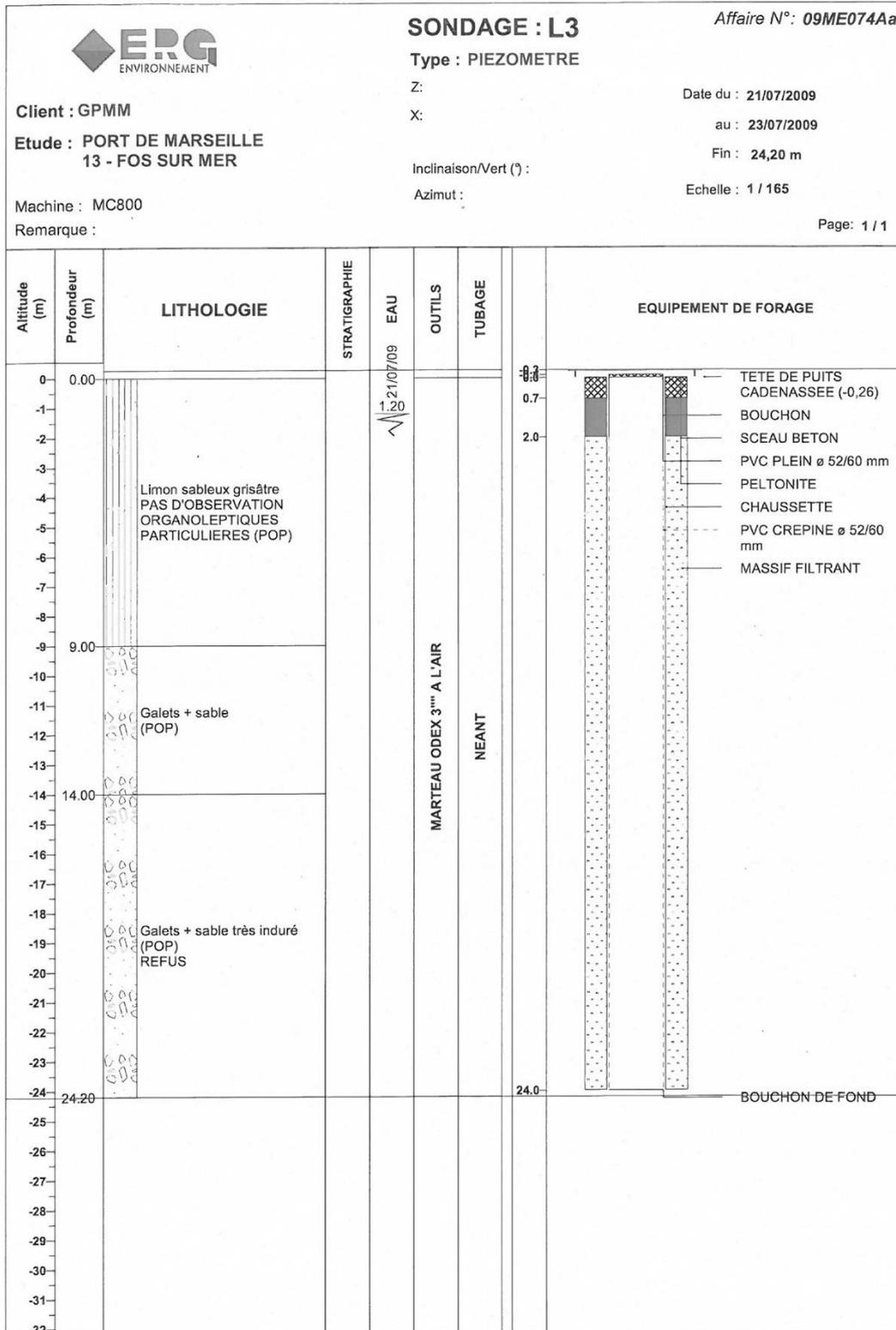
Machine : MC800

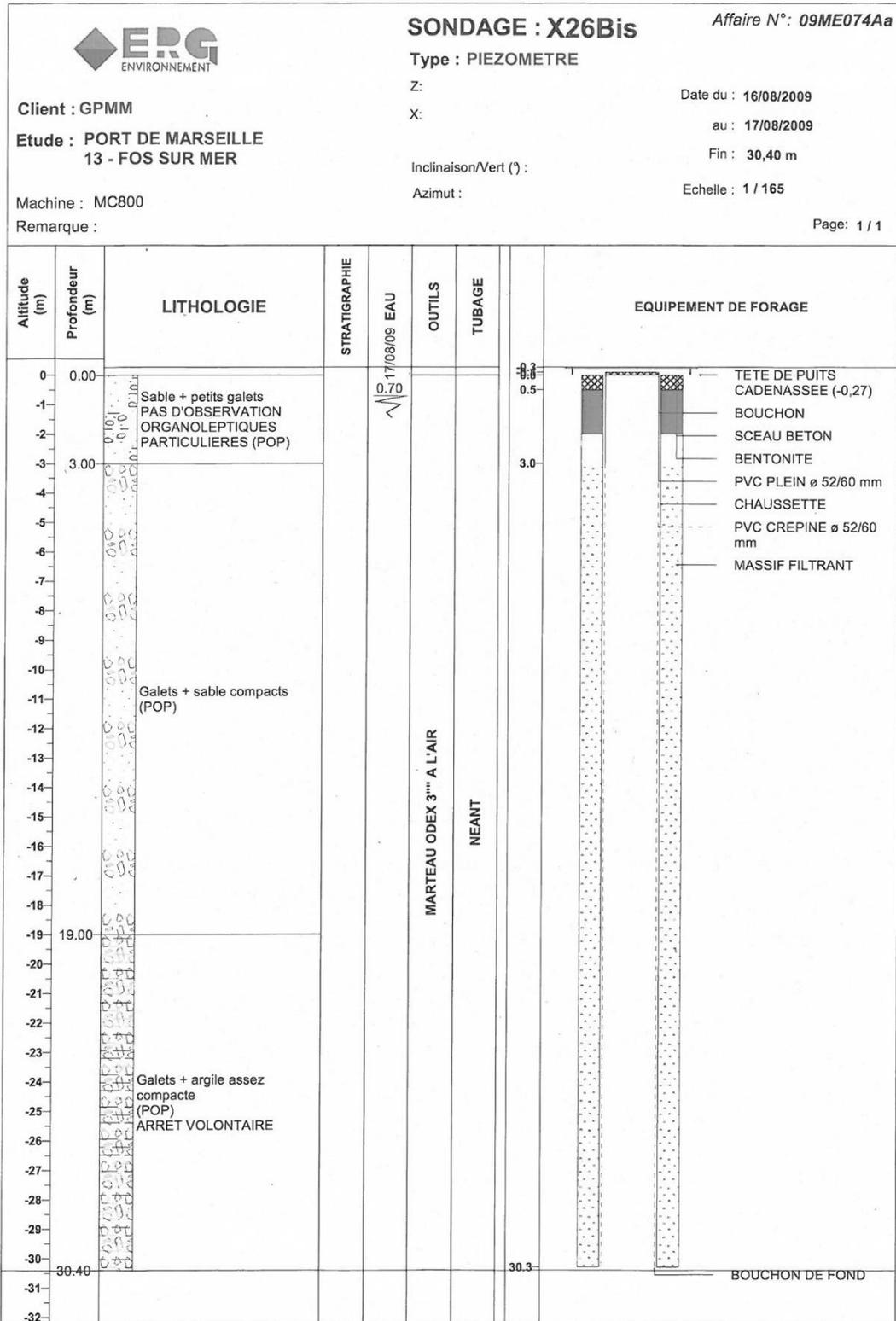
Remarque :

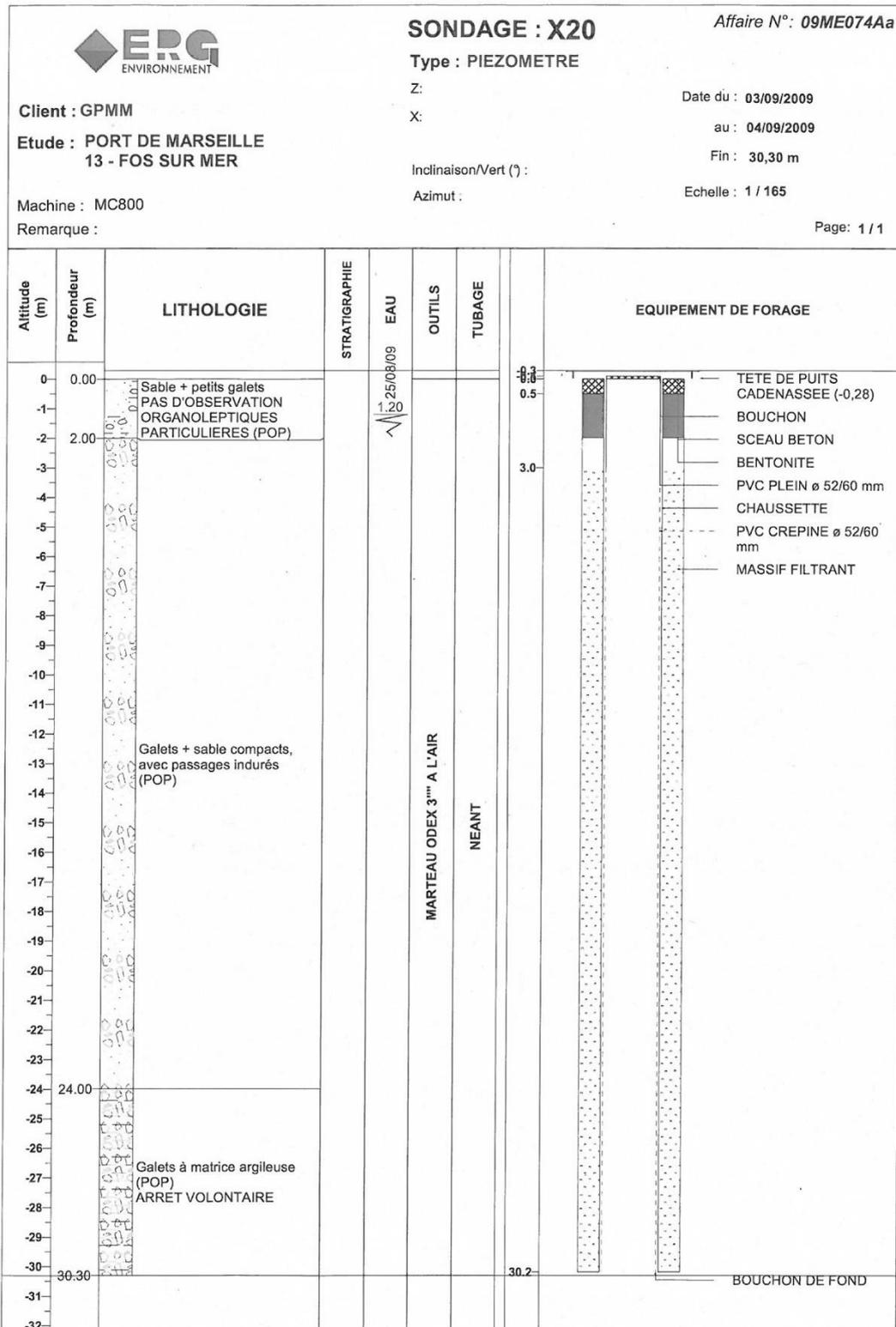
Page: 1 / 1











Indice de classement national 10197X0166 Caractère de confidentialité **C**

Pièce n° S.X.15 Mis dans dom. public le
Fournie le par :

NATURE: Zone industrielle de Fos -
Etude Coin salé

Echelle

X - 805 370
Y - 132 700
Z - + 1,90



PORT AUTONOME DE MARSEILLE
ZONE INDUSTRIELLE DE FOS

ETUDE COIN SALE

SONDAGE X15

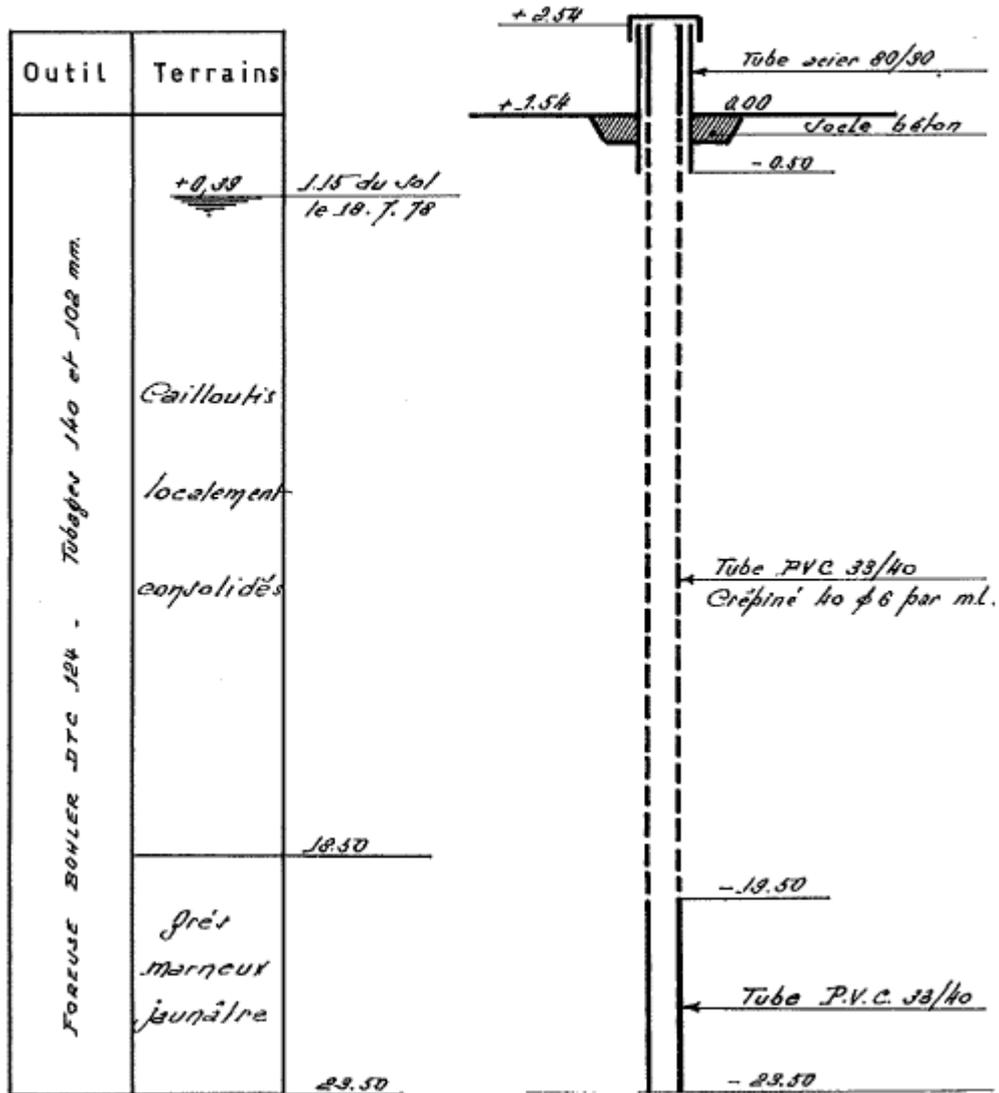
E.S.C.O. Ref. 2008 Sm 15

Tubo	Outil	Jours	Battage	Cote N.G.F. +1.90	Profondeur 0.00	Terrain	Carottage			Observations
							20	40	60	
110/324	PERCUTANTE Tubage 13"	16.8.71	15	+0.70	1.20	R	Remblai sable-graveleux.			<p>Dispositif piézométrique installé</p> <p>Niveau statique à 1,20 m le 24.8.71 (en charge à 3,00 m sous limons)</p> <p>Eau douce sur toute la hauteur du sondage.</p> <p>Arrêt du sondage à 23,50 m.</p>
			20	0.00	2.50	1	Tourbe noirâtre tendre.			
			20	-0.60	3.00	2	Limons argileux tendre.			
			20	-3.10	3.00	3	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			70	-3.10	5.00	4	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			90	-3.10	5.00	5	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			100	-3.10	5.00	6	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			150	-3.10	5.00	7	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			150	-3.10	5.00	8	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			150	-3.10	5.00	9	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
260/1878	PERCUTANTE - Tubage 11" Sous-bats et Trépan de 280 mm	16.8.71	100	-8.20	10.10	10	Cailloutis sable, gravier, galets, localement consolidés.			
			100	-8.20	10.10	11	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			100	-8.20	10.10	12	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			120	-8.20	10.10	13	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			100	-8.20	10.10	14	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			130	-8.20	10.10	15	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			130	-8.20	10.10	16	Cailloutis sable, gravier, galets.			
			100-200	-14.95	16.85	17	Poudingue compact.			
			100-200	-14.95	16.85	18	Poudingue compact.			
			200-250	-14.95	16.85	19	Poudingue compact.			
160/178	PERCUTANTE Trépan 160 mm	20.8.71	200	-18.00	18.90	20	Cailloutis consolidés.			
			150-200	-18.00	18.90	21	Marne argileuse ocre			
			150-200	-18.00	18.90	22	Marne argileuse ocre			
			150-200	-18.00	18.90	23	Marne bleue			
			24	-21.30	23.20					
			25	-21.60	23.50					
			26							
			27							
			28							
			29							
			30							
			31							

EXECUTE du 16 au 24 Août 1971.

X = 206.063,00
 Y = 133.905,00
 Z = +1.54

PIEZOMETRE X 34

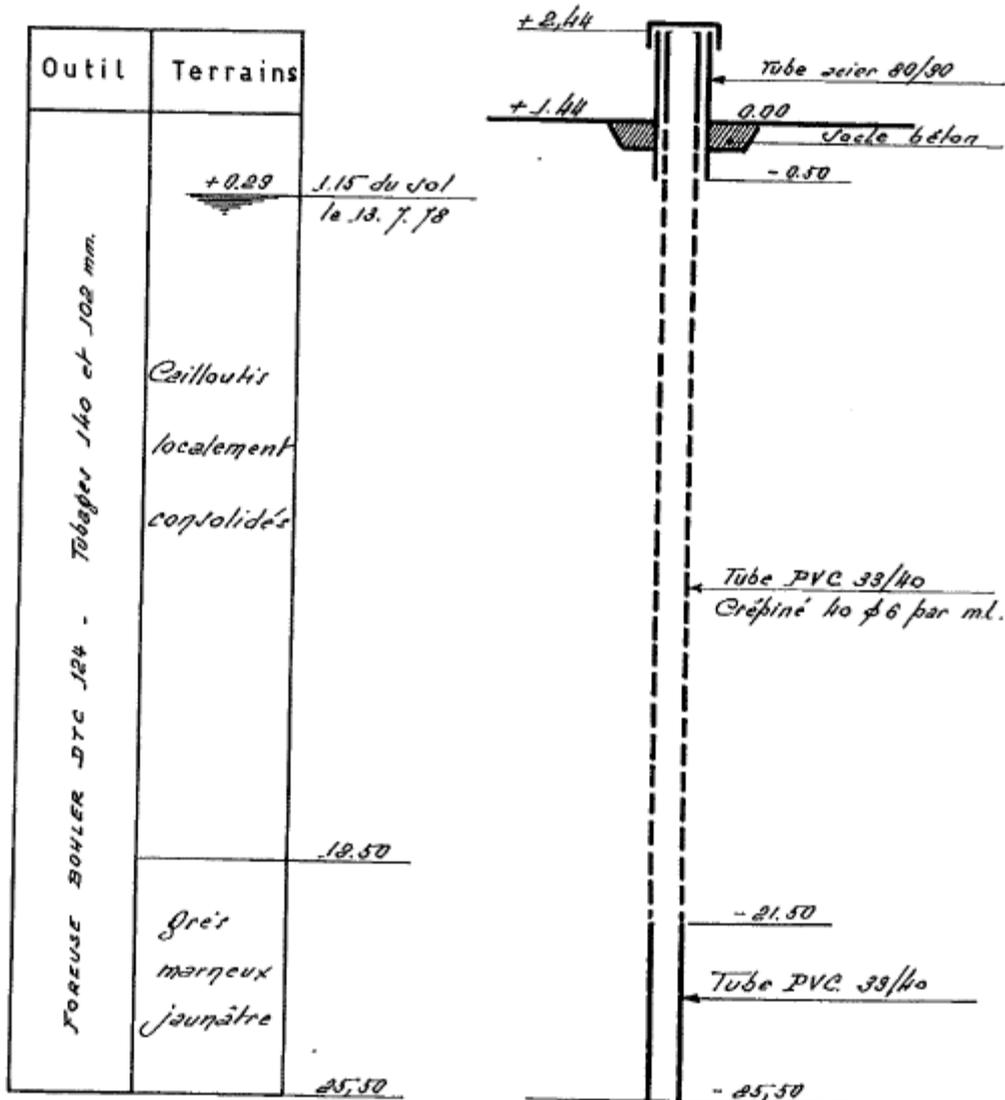


ESCO 2619 S.n.5

EXECUTÉ DU 13 AU 17 JUILLET 1978

X = 803.983,00
 Y = 133.916,20
 Z = +1,14

PIEZOMETRE X 33



SCO 2619 S.n. 4

EXECUTE LE 18 JUILLET 1978

Indice de classement national 10191X0035 Caractère de confidentialité

PORT AUTONOME DE MARSEILLE
Zone Industrielle de FOS

Pièce n° S.X. 17 Mis dans dom. public le ...
Fournie le ... par :
NATURE : Zone industrielle de Fos -
Etude Coin salé

x 798 000
y 139 000
z +1.34

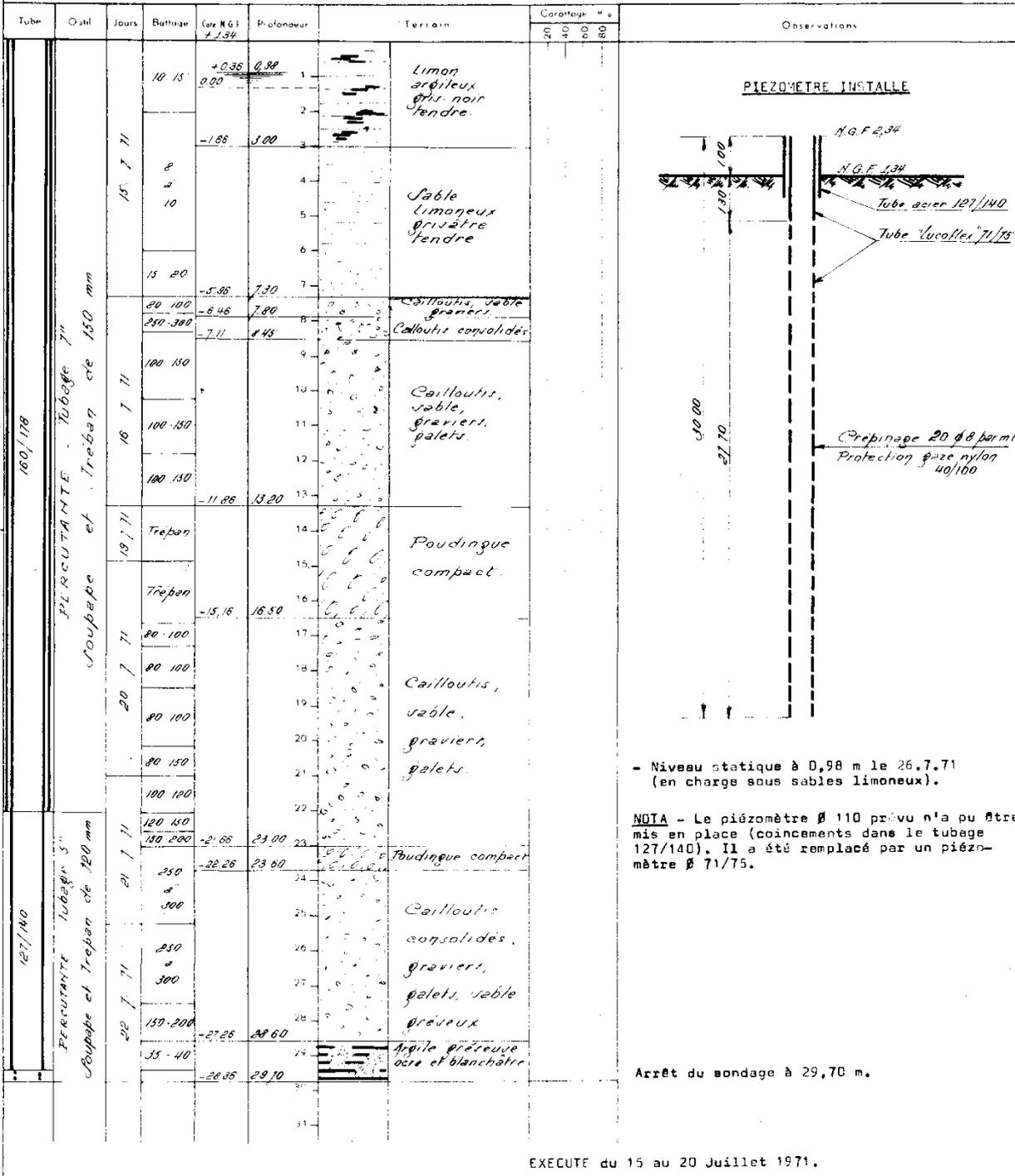


Echelle

ETUDE COIN SALE

SONDAGE X 17

ES.C.O. Ref 2008 Sm12



EXECUTE du 15 au 20 Juillet 1971.

PAR 1

Carte géologique EYGUIERES - Echelle : 1/50 000

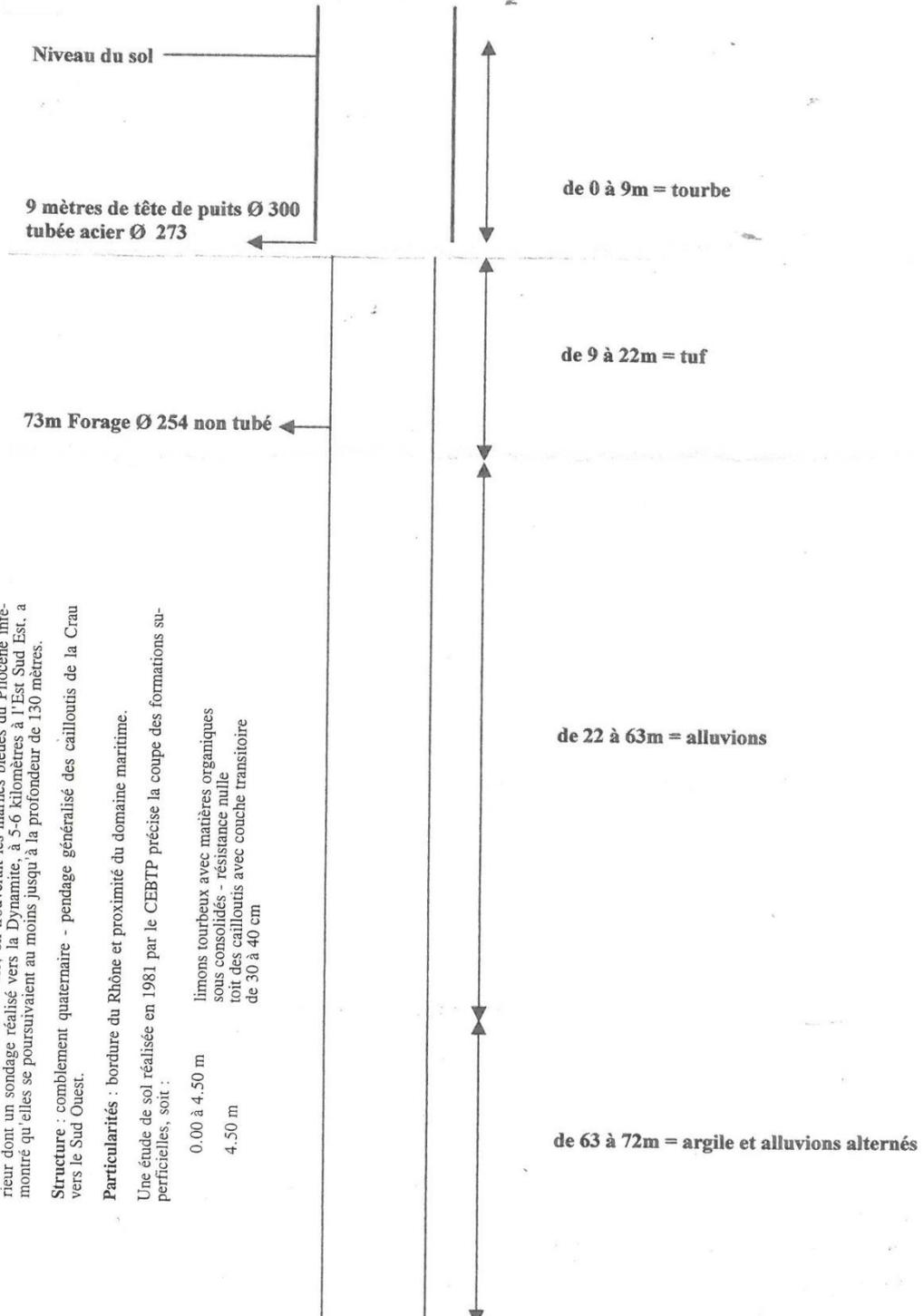
Nature des terrains : sous une couverture de quelques mètres de limons tourbeux riches en matières organiques, le substratum est constitué par les cailloutis de la Crau (Villafranchien) dont l'épaisseur semble pouvoir avoisiner ici une quarantaine de mètres. Plus bas dans la série, on trouverait les marnes bleues du Pliocène inférieur dont un sondage réalisé vers la Dynamite, à 5-6 kilomètres à l'Est Sud Est, a montré qu'elles se poursuivaient au moins jusqu'à la profondeur de 130 mètres.

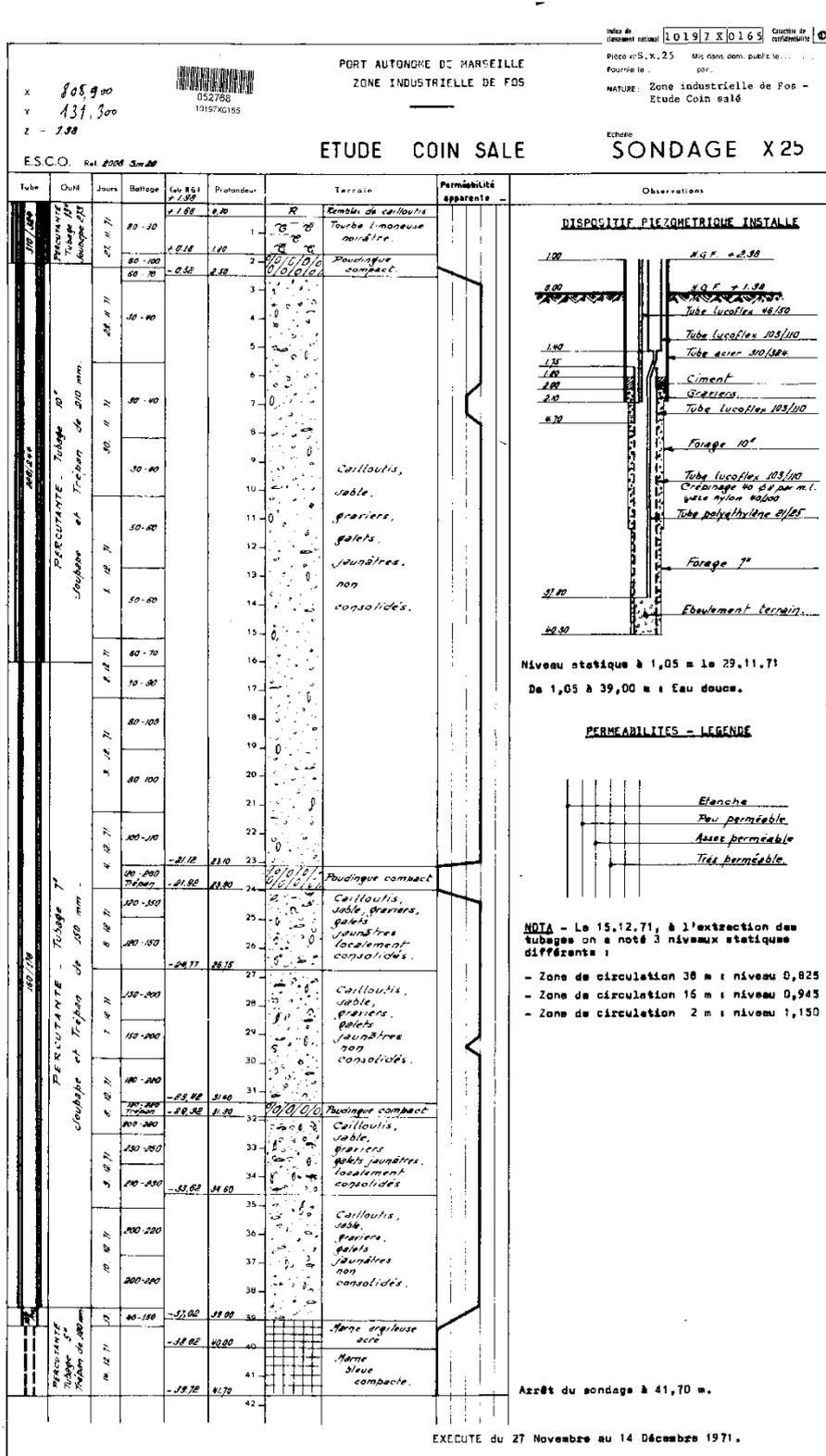
Structure : comblement quaternaire - pendage généralisé des cailloutis de la Crau vers le Sud Ouest.

Particularités : bordure du Rhône et proximité du domaine maritime.

Une étude de sol réalisée en 1981 par le CEBTP précise la coupe des formations superficielles, soit :

0.00 à 4.50 m	limons tourbeux avec matières organiques sous consolidés - résistance nulle
4.50 m	toit des cailloutis avec couche transitoire de 30 à 40 cm

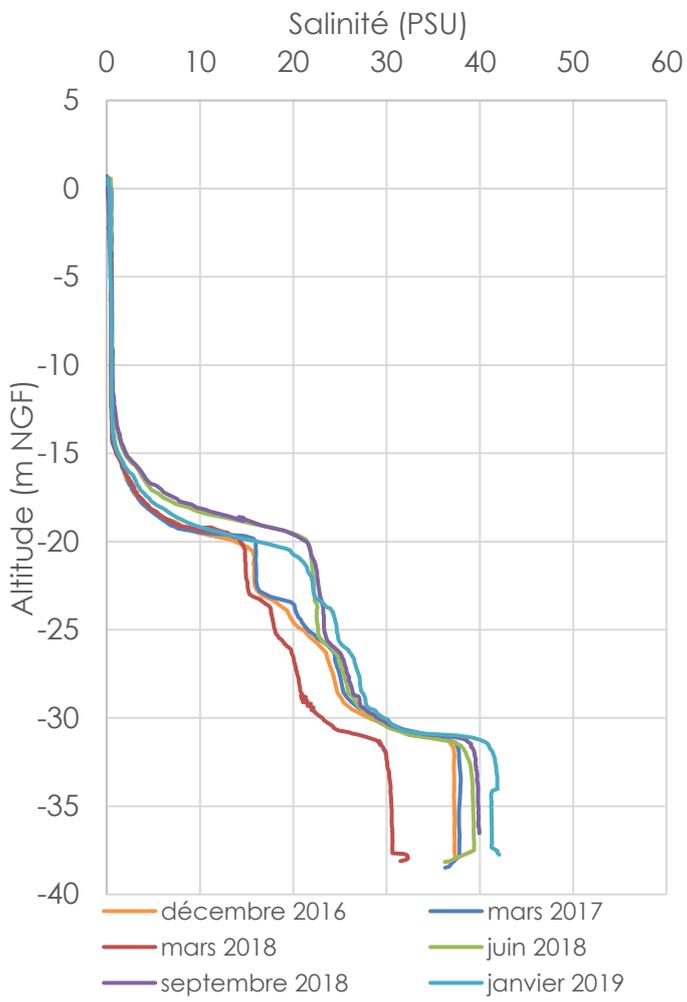




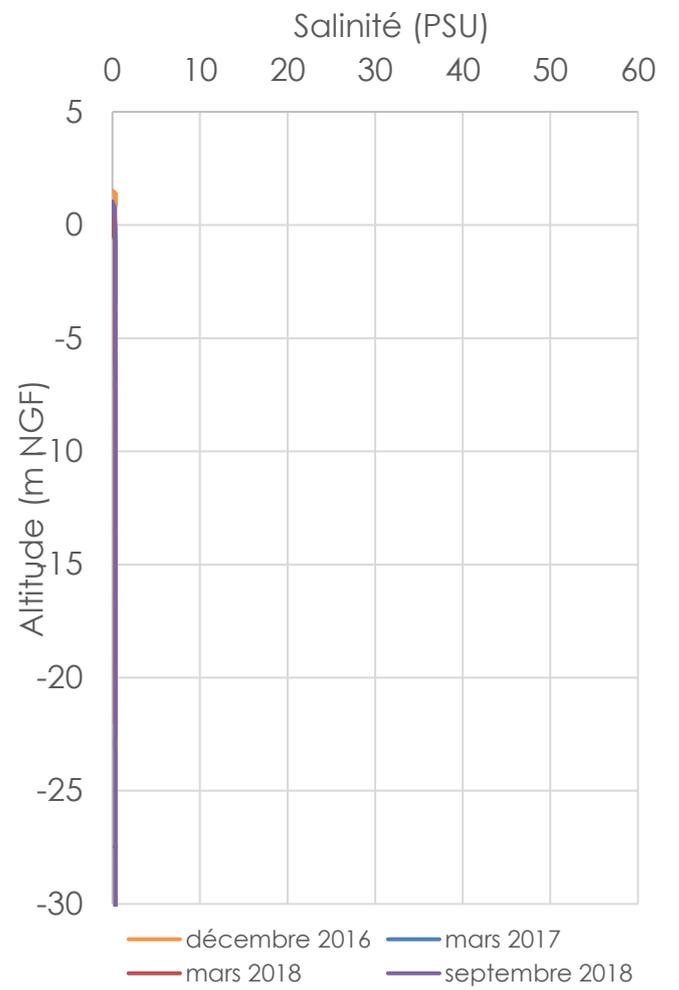
Annexe 5

Diagraphies de salinité

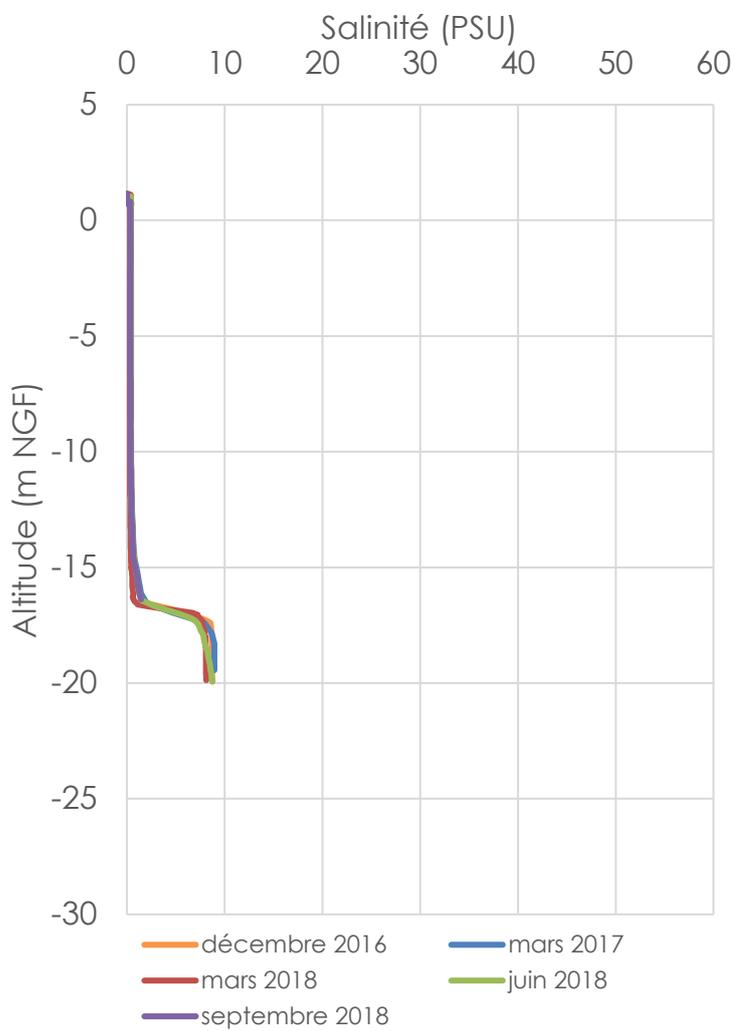
X12



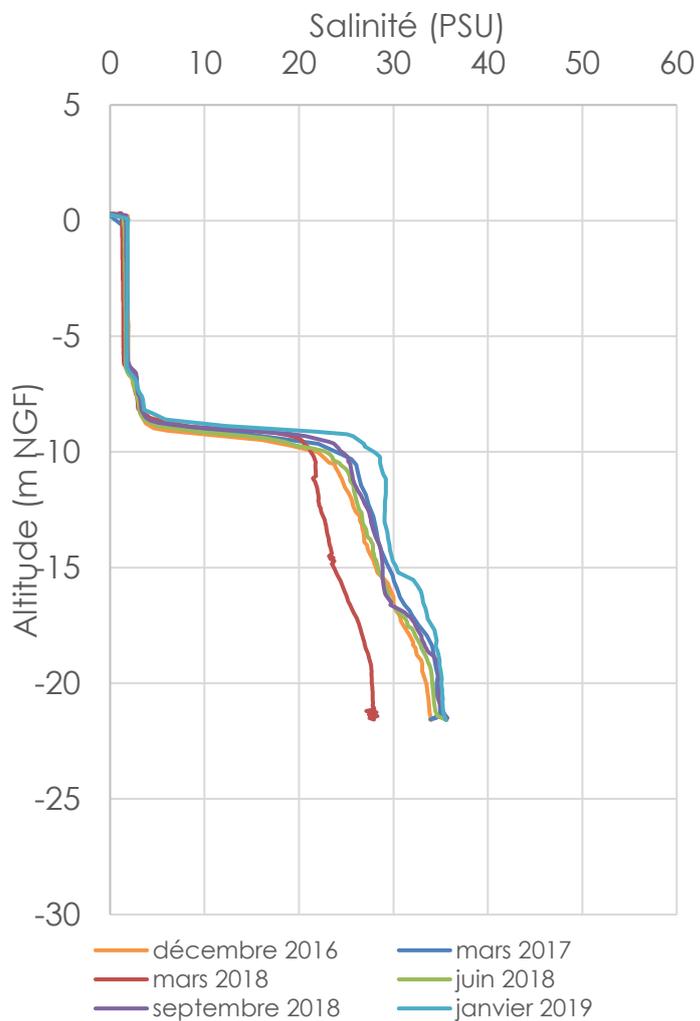
X25



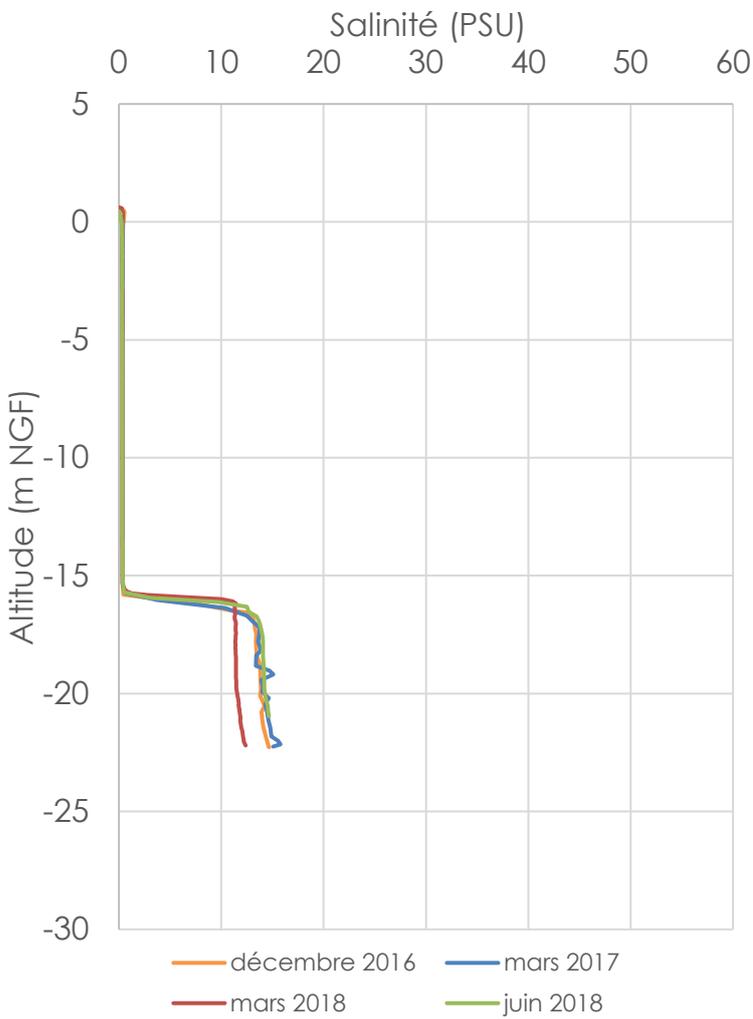
X15



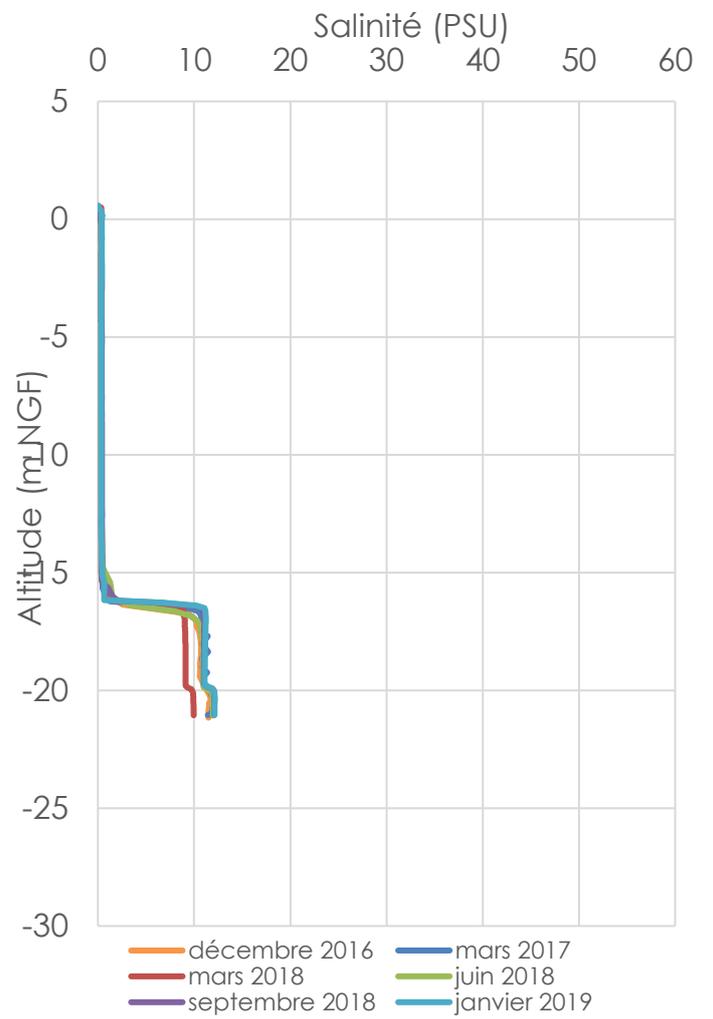
X4415



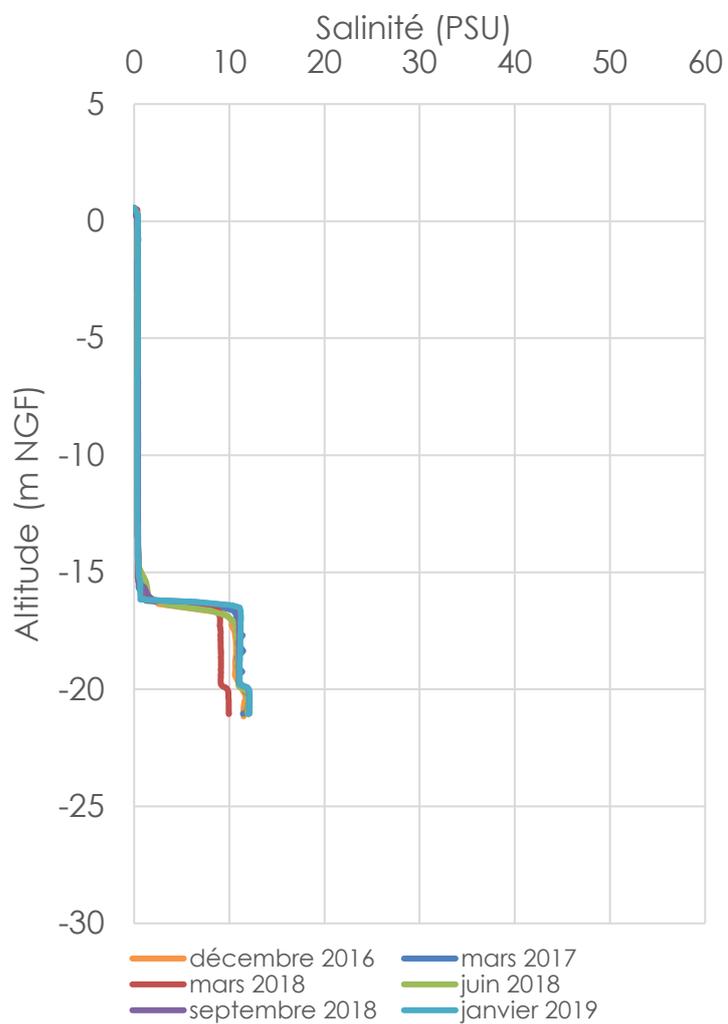
X34



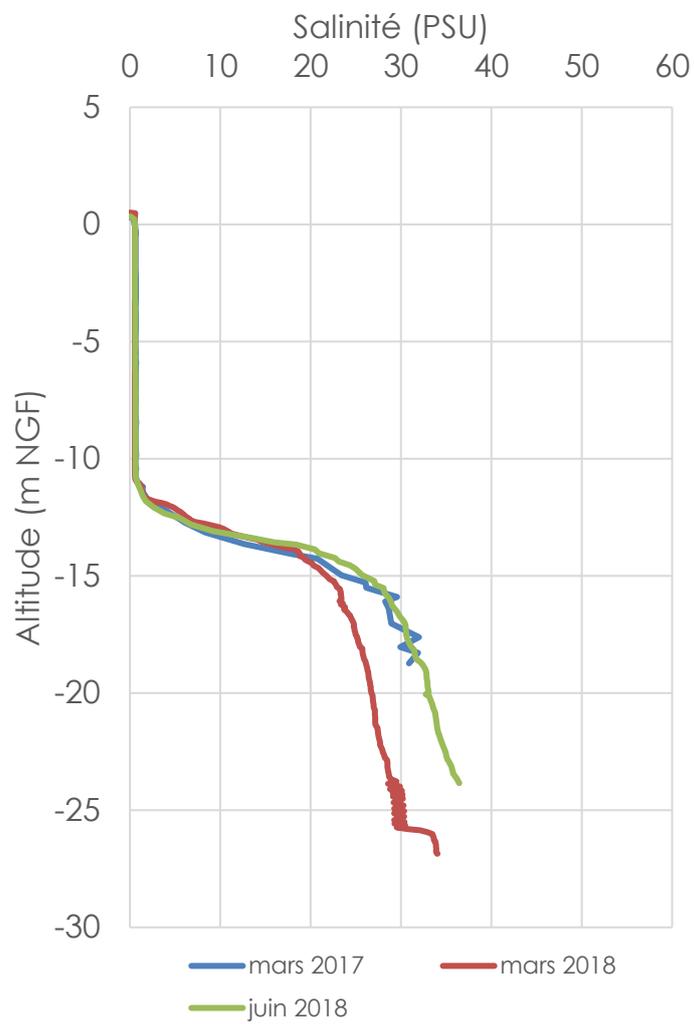
X33



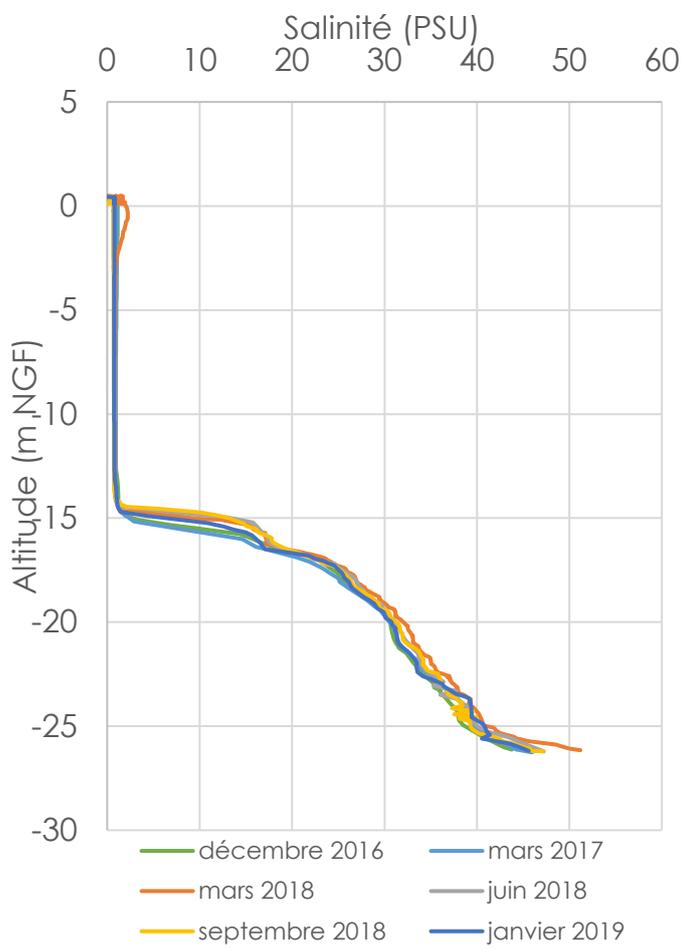
X30



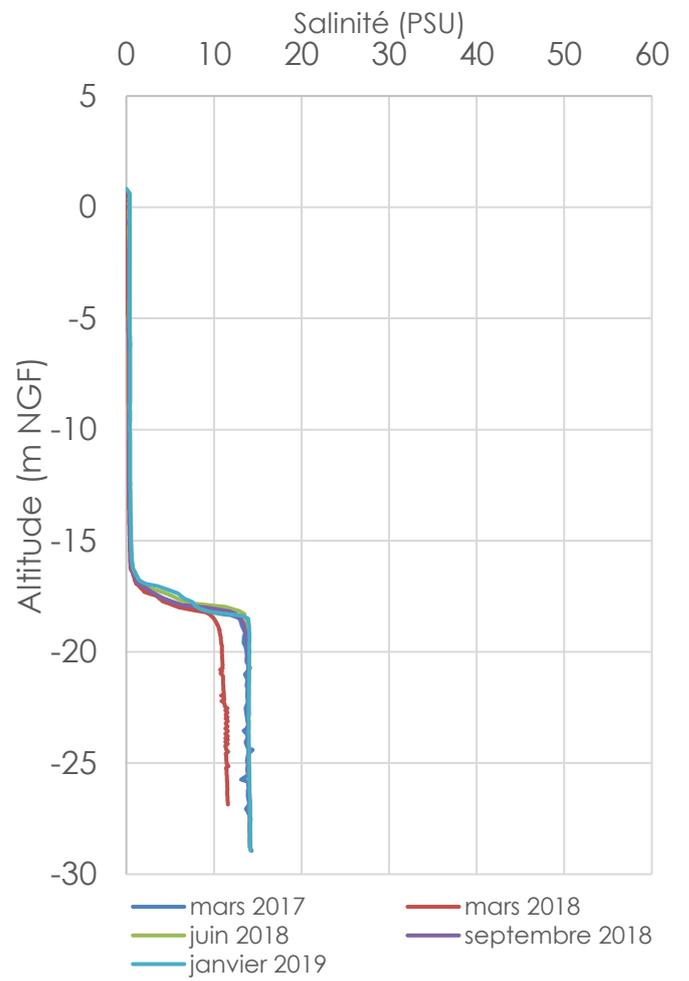
X13



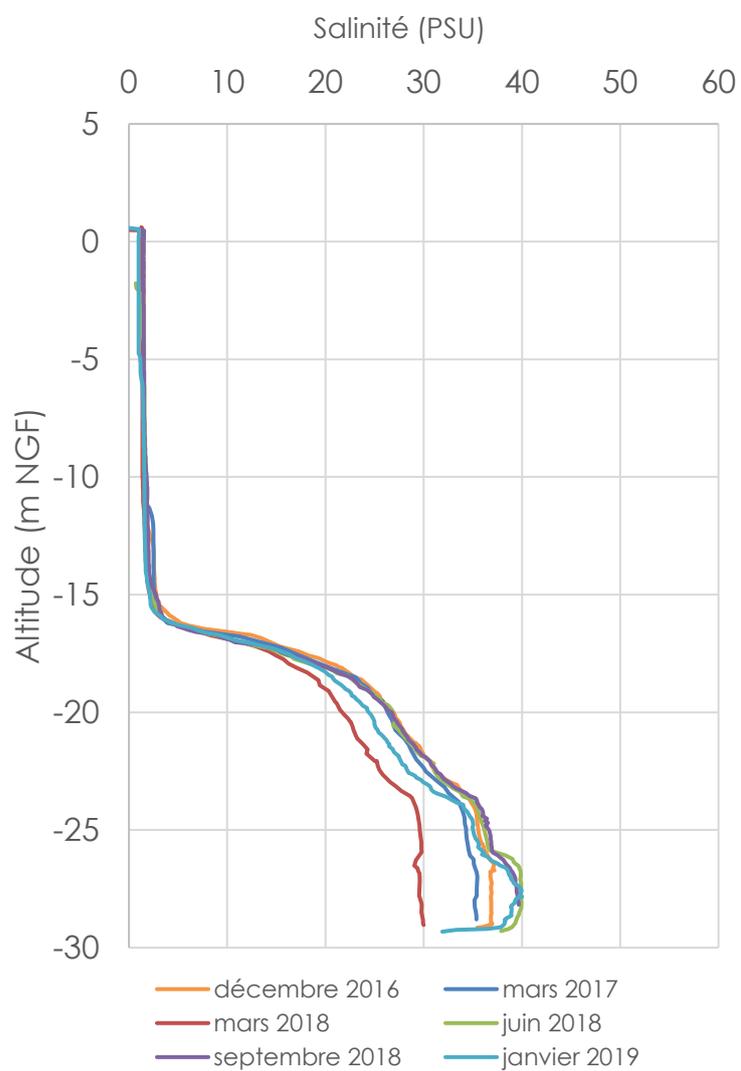
L2



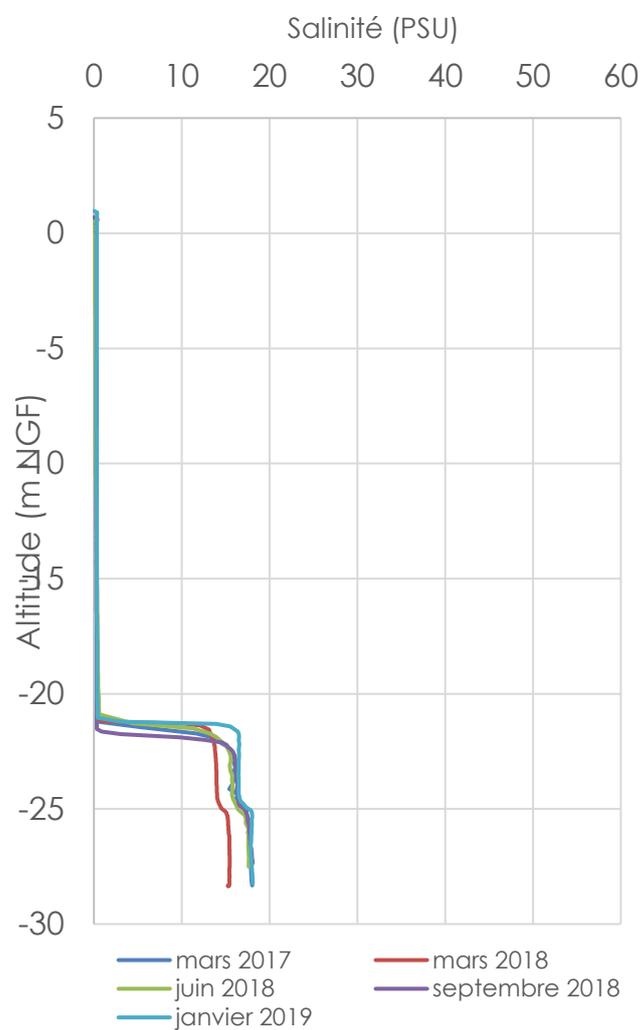
X26bis



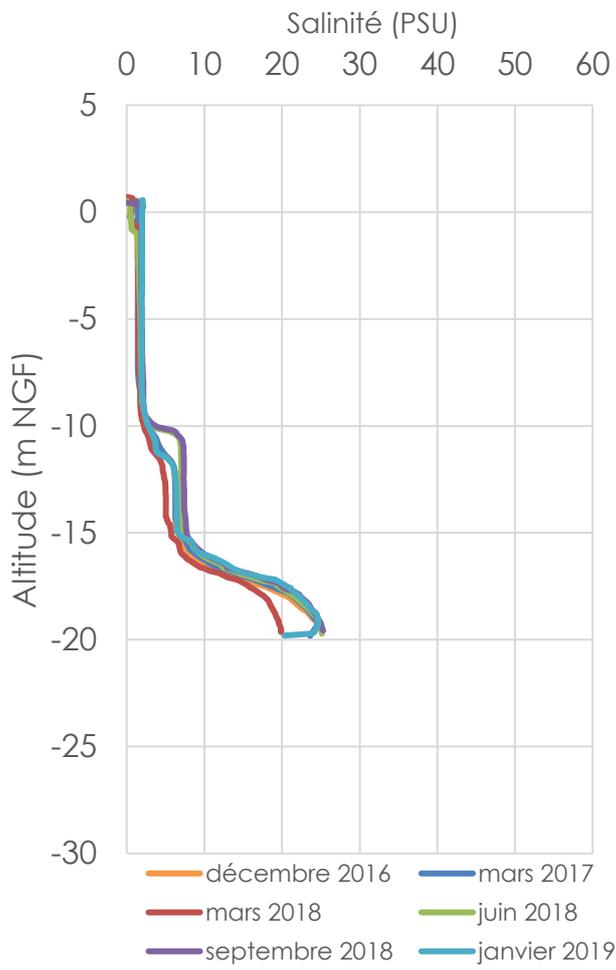
X19



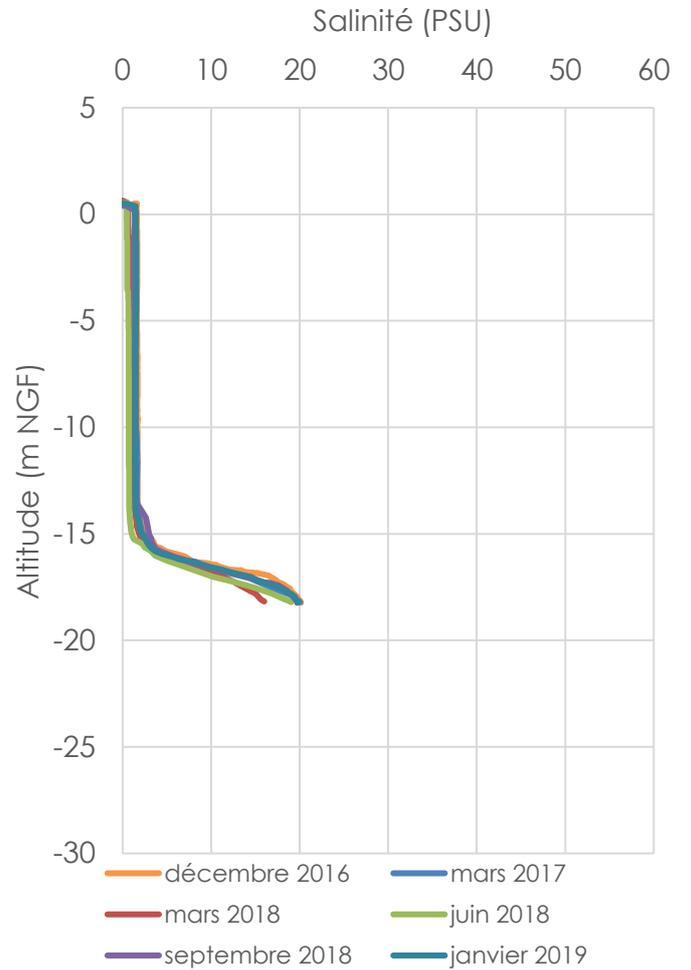
X20bis



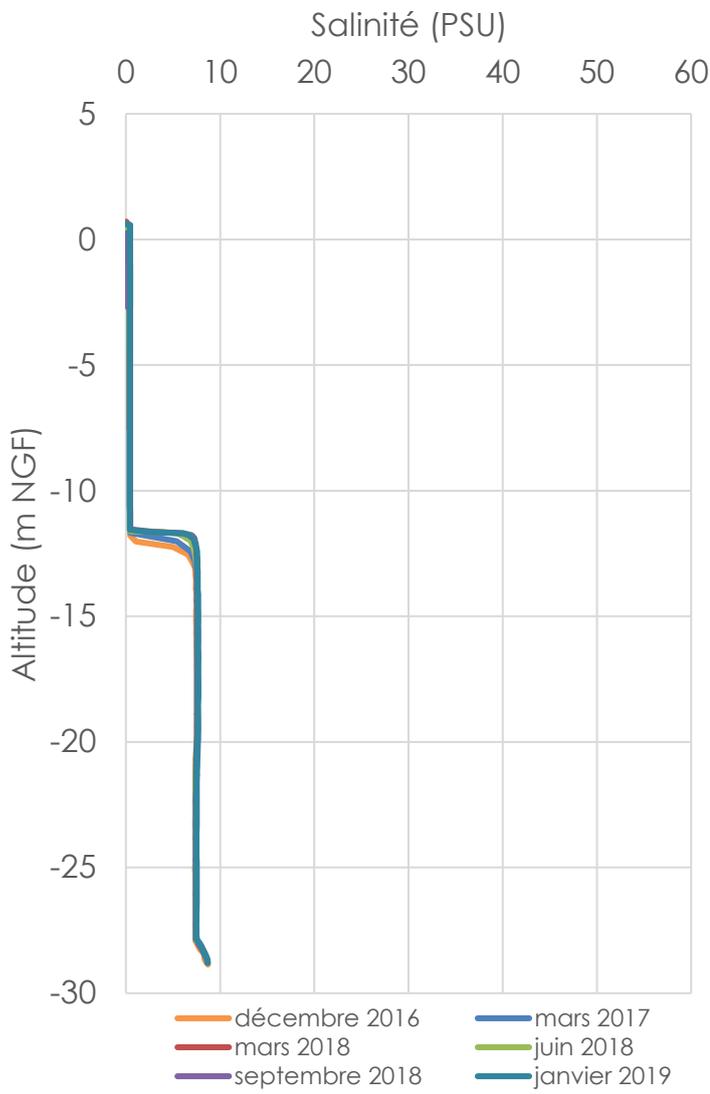
X17



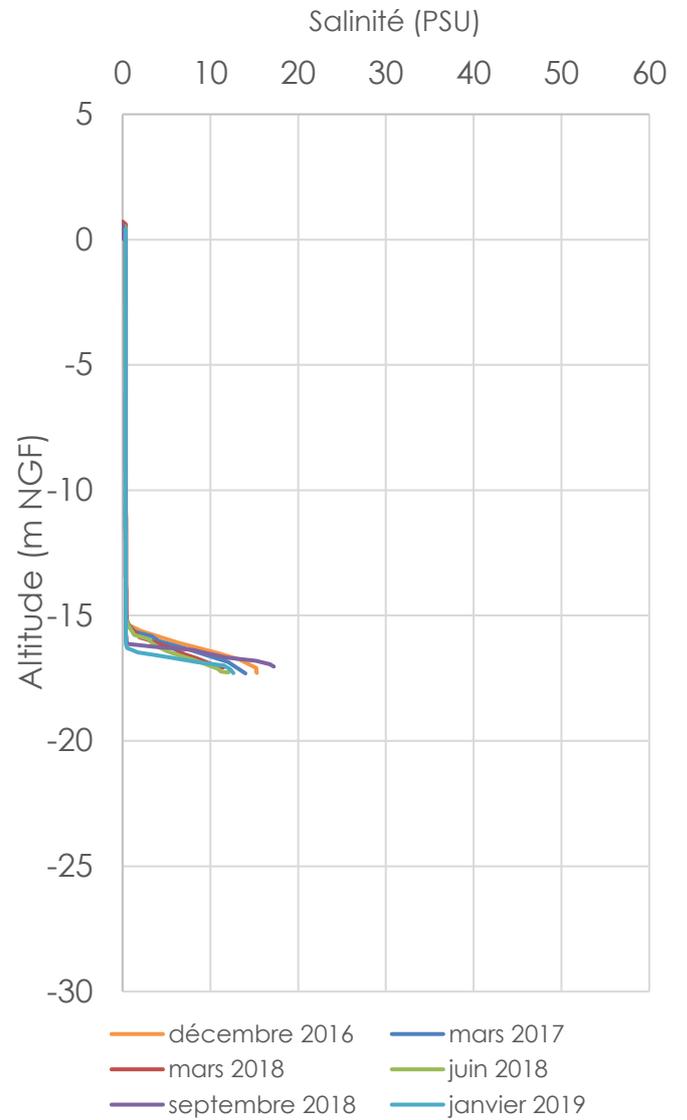
XBbis



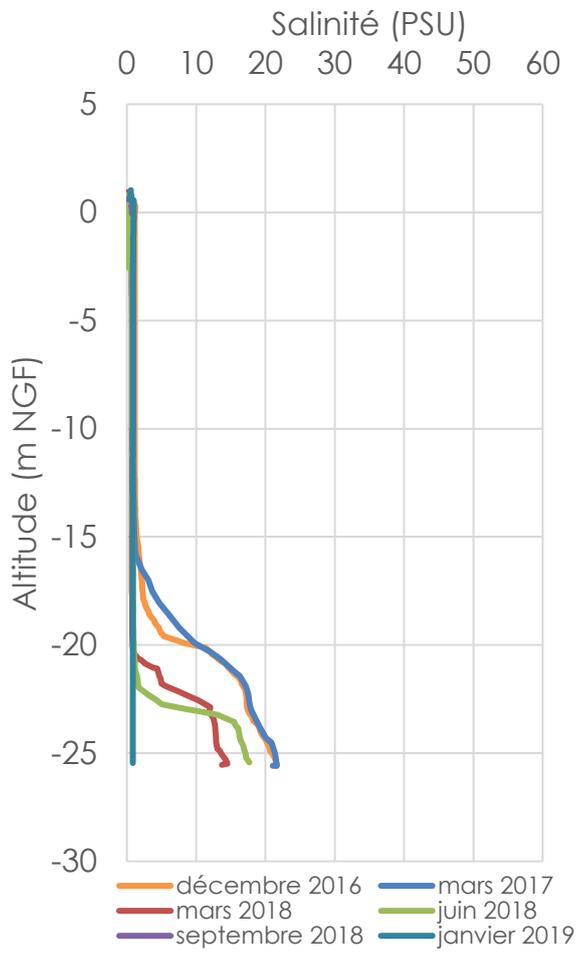
XAbis



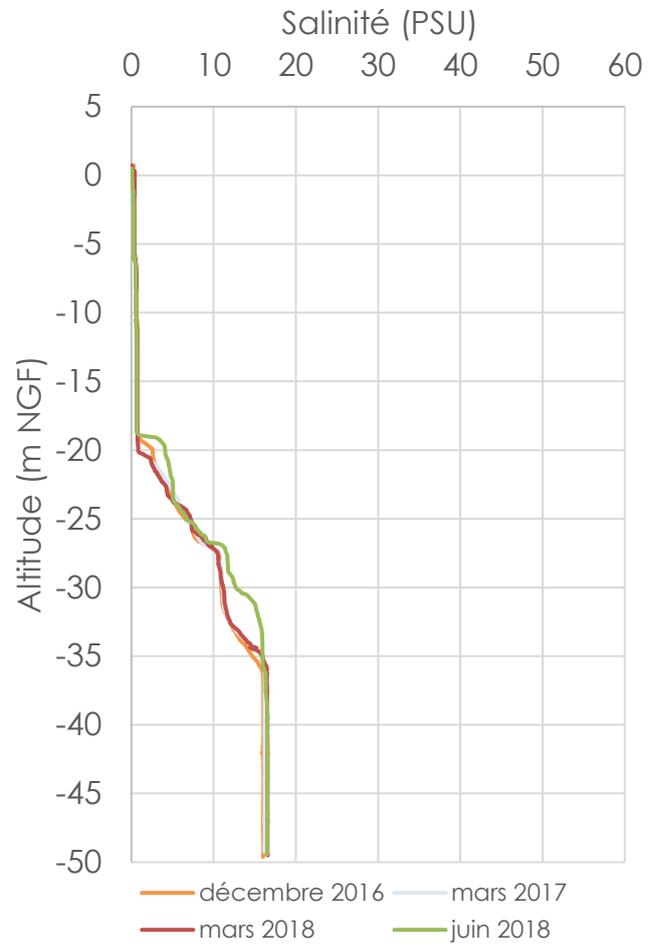
Mazet5

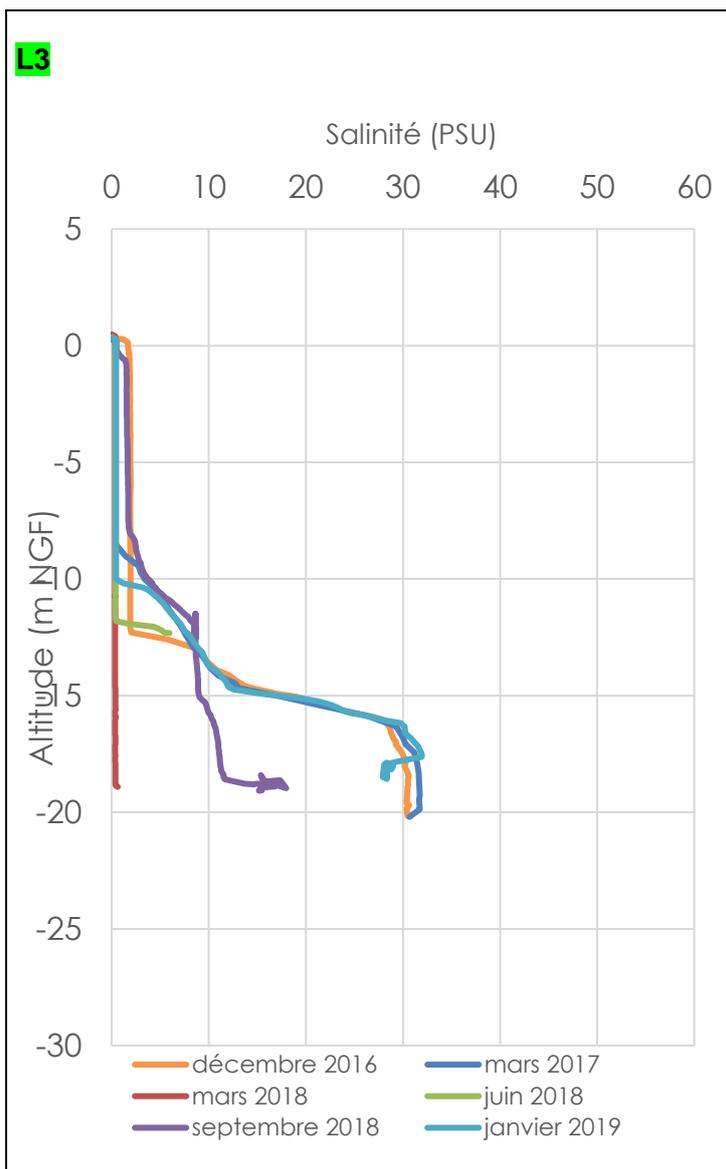


X23



PAR1





Annexe 6

Points définissant les conditions limites à charge imposée pour l'interpolation de la piézométrie

N°	Nom	X_L93	Y_L93	Charge imposée (mNGF)
1	Rhône	832907	6281710	1.6
1	Rhône	833246	6281420	1.6
1	Rhône	833637	6281020	1.6
1	Rhône	833842	6280570	1.6
1	Rhône	833882	6280070	1.6
1	Rhône	833888	6279470	1.5
1	Rhône	833986	6278960	1.5
1	Rhône	834121	6278460	1.5
1	Rhône	834598	6277670	1.5
1	Rhône	835127	6277010	1.4
1	Rhône	835876	6276340	1.4
1	Rhône	836959	6275460	1.3
1	Rhône	837687	6274630	1.3
1	Rhône	838433	6273880	1.3
2	Tranchée drainante	853202	6264950	1.3
2	Tranchée drainante	853347	6264630	1.3
2	Tranchée drainante	853471	6264370	1.3
2	Tranchée drainante	853572	6264150	1.3
2	Tranchée drainante	853825	6264150	1.3
2	Tranchée drainante	853905	6263990	1.3
2	Tranchée drainante	854077	6264050	1.3
2	Tranchée drainante	854101	6264070	1.3
2	Tranchée drainante	854390	6263890	1.3
2	Tranchée drainante	854844	6263660	1.3
3	Canal Rhône Fos (eau salée)	848453	6264670	0.0
3	Canal Rhône Fos (eau salée)	848046	6264770	0.0
3	Canal Rhône Fos (eau salée)	847628	6264700	0.0
3	Canal Rhône Fos (eau salée)	847310	6264500	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	848956	6264210	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	849353	6263820	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	849644	6263420	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	849803	6263050	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	850366	6263240	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	850599	6263320	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	850631	6262870	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	850048	6262620	0.0
4	Darse 1 (eau salée)	849803	6263050	0.0
5	Laurons Chanoines	838705	6283830	3.1
5	Laurons Chanoines	839537	6283420	4.2
5	Laurons Chanoines	839620	6282850	2.9
5	Laurons Chanoines	838763	6283080	1.6
5	Laurons Chanoines	838705	6283830	3.1

N°	Nom	X_L93	Y_L93	Charge imposée (mNGF)
6	Canal de Colmatage	849061	6265980	0.2
6	Canal de Colmatage	848312	6266740	0.2
6	Canal de Colmatage	847628	6267480	0.2
6	Canal de Colmatage	847081	6268560	0.2
6	Canal de Colmatage	846116	6269350	0.2
6	Canal de Colmatage	845783	6269750	0.2
6	Canal de Colmatage	843888	6272330	0.2
6	Canal de Colmatage	843587	6272460	0.2
7	Centre Crau	847272	6270387	1.6
7	Centre Crau	846553	6269740	0.2
7	Centre Crau	846144	6269380	0.2
8	Canal de Vergière	846935	6275130	8.6
8	Canal de Vergière	846315	6274580	6.8
8	Canal de Vergière	845654	6274740	5.1
8	Canal de Vergière	845283	6274440	4.7
8	Canal de Vergière	844665	6274100	3.0
8	Canal de Vergière	843964	6273600	0.2
8	Canal de Vergière	843611	6272540	0.2



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur

117 avenue de Luminy
BP 168

13276 MARSEILLE cedex 9

Tél. : 04.91.17.74.77