

**Projet SIMBA : Surveillance de
l'intrusion marine en Basse Crau**

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-67606-FR
Janvier 2018

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-67606-FR

Janvier 2018

Projet SIMBA : Surveillance de l'intrusion marine en Basse Crau

Rapport intermédiaire

BRGM/RP- 67606-FR

Janvier 2018

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)
de Service public (Recherche) du BRGM_AP16PAC044

Bailly-Comte V., Rivet F.
avec la contribution du SYMCRAU Villesseche D.

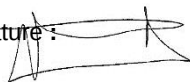
Vérificateur :

Nom : B. Dewandel

Fonction : Hydrogéologue

Date : 26 janvier 2018

Signature :



Approbateur :

Nom : J.-L. Lambeaux

Fonction Directeur régional :

Date : 2 février 2018

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Réseau, Intrusion saline, Basse Crau

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

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.

Synthèse

À l'heure actuelle, l'évolution spatiale et temporelle du biseau salé au sein des aquifères en basse Crau reste peu connue, c'est pourquoi un diagnostic préalable doit permettre 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.

Le projet SIMBA, pour Surveillance de l'intrusion marine en basse Crau, est mené avec cet objectif : mieux comprendre les mécanismes à l'origine de l'intrusion saline en basse Crau et proposer un réseau de surveillance adapté pour mieux prévenir le phénomène. Ce rapport intermédiaire a pour objet de présenter les travaux et résultats obtenus au bout d'une année de projet.

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 ». Ce rapport dresse une synthèse des observations historiques et des principaux résultats obtenus à ce jour, ce qui permet d'identifier de nouvelles questions relatives à l'origine et à l'extension du biseau salé dans l'aquifère de Crau à différentes échelles de temps.

Les protocoles d'acquisition des nouvelles données du projet SIMBA sont détaillés et concernent la réalisation de diagraphies sur une sélection de piézomètres, la mise en place d'un réseau de surveillance dédié à l'observation de l'intrusion saline, la réalisation d'une campagne de caractérisation géochimique pour caractériser l'origine de la salinité et l'estimation de la perméabilité de l'aquifère par essais slug-tests. Les méthodes d'interprétation de ces résultats sont exposées dans le but de proposer une représentation cartographique du biseau salé simple et utilisable par les gestionnaires et acteurs locaux. Les acquisitions en cours et leurs interprétations permettront de valider les méthodes retenues pour le tracé de l'interface de salinité « 20 » comme la limite du « biseau salé » *sensu stricto*.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE	9
1.2. CONTEXTE ET OBJECTIF DU PROJET SIMBA.....	10
1.3. CONTENU DU RAPPORT INTERMÉDIAIRE	10
2. Évolution du contexte hydrogéologique en Basse Crau	13
2.1. SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS DE LA ZONE INDUSTRIELLE DE FOS ET ÉTUDES « COIN SALÉ ».....	13
2.1.1. Historique des aménagements de la zone industrielle de Fos.....	13
2.1.2. Synthèse des études et suivis historiques.....	17
2.1.3. Suivi du captage AEP de la Pissarotte	21
2.2. CONDITIONS AUX LIMITES ACTUELLES ET PASSÉES DE L'AQUIFÈRE DE CRAU	22
2.2.1. Recharge et prélèvements de la nappe de Crau	22
2.2.2. Exutoires de la nappe libre de Crau : les laurons et les relations avec les canaux et la tranchée drainante	23
2.2.3. Exutoires de la partie captive : relation avec la mer	25
2.3. TYPES D'EAU RENCONTRÉES DANS LES CAILLOUTIS	26
3. Réseau de suivi « H.C.T »	27
3.1. OBJECTIF DU RÉSEAU	27
3.2. SÉLECTION DES POINTS DE SUIVI	27
3.2.1. Préambule	27
3.2.2. Présentation du réseau SIMBA et instrumentation	28
3.3. PROTOCOLE POUR LA RELÈVE ET LA GESTION DES DONNÉES DU RÉSEAU DE SUIVI	31
3.3.1. Contrôle des suivis de la hauteur d'eau	31
3.3.2. Réalisation de diagraphies.....	32
3.3.3. Contrôle des suivis physico-chimiques.....	32
4. Campagnes de mesure	33
4.1. CAMPAGNES GÉOCHIMIQUES	33
4.1.1. Campagne de mars 2016.....	33
4.1.2. Campagne d'août 2017.....	33
4.2. CAMPAGNE DE SLUG-TEST.....	36
4.2.1. Protocole et points testés.....	36
4.2.2. Résultats et interprétation	37

5. Représentation du biseau salé	41
5.1. APPROCHE THÉORIQUE	41
5.1.1. Objectifs du réseau SIMBA par rapport à la cartographie du biseau salé	41
5.1.2. Application des concepts de Ghyben-Herzberg et de zone de transition à l'aquifère de Crau	41
5.2. MÉTHODE D'ANALYSE DES DIAGRAPHIES	43
5.3. PREMIERS ÉLÉMENTS SUR LA VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DU BISEAU SALÉ	46
5.3.1. Principe et limites de la méthode de spatialisation	46
5.3.2. Evolution à long terme	46
5.3.3. Evolution saisonnière	49
5.3.4. Evolution à court terme (mensuelle, journalière et infra-journalière)	51
6. Perspectives	53

Liste des Illustrations

Illustration 1 : Secteur d'étude et principaux canaux le traversant	9
Illustration 2 : Extrait de la carte de l'État-Major 1820-1866, secteur de l'Écluse de Pont-Clapets (source IGN)	14
Illustration 3 : Carte au 1/50 000 de 1950 (source : IGN)	14
Illustration 4 : Comparaison de l'occupation des sols avant et après travaux d'aménagement de la zone industrielle (source https://remonterletemps.ign.fr/)	16
Illustration 5 : Bathymétrie et cote du toit des cailloutis (source GPMM et feuille géologique au 1/50 000 du BRGM n° 1019)	17
Illustration 6 : Première carte du biseau salé en Basse Crau établie à partir de mesures électriques (Cluseau, 1962)	18
Illustration 7 : Localisation des 5 piézomètres ayant fait l'objet d'investigations en 1968 (Hentinger, 1968)	19
Illustration 8 : Situation du captage de la Pissarotte dans la zone industrielle (Fond topo IGN au 1/25 000)	21
Illustration 9 : Évolution de la conductivité (à 25 °C) et de la concentration en chlorures depuis 1987 sur le captage de la Pissarotte (source ADES)	22
Illustration 10 : Bilan hydrique de la nappe de Crau (SYMCAU, 2016)	23
Illustration 11: Extrait de la carte piézométrique des 8 et 9 Juin 1977 (CERIC, 1977) où sont reportés le tracé de la tranchée drainante et les cotes piézométriques (en m NGF) mesurées au piézomètre X10 et X11	24
Illustration 12 : Coupe nord-sud de la Basse Crau mettant en évidence l'amincissement des dépôts holocènes recouvrant les cailloutis sous le golfe de Fos et le passage à un faciès de sables coquilliers et galets (Dellery <i>et al.</i> , 1964)	25
Illustration 13 : Piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies menées par le SYMCRAU en 2015 et 2016 (SYMCAU/GPMM, 2017)	28
Illustration 14 : Localisation des secteurs et points investigués (SYMCAU/GPMM, 2017)	29

Illustration 15 : 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	30
Illustration 16 : Détermination de la profondeur du capteur dans le piézomètre, illustration avec les diagraphies du piézomètre L2 (SYMCRAU/GPMM, 2017).....	30
Illustration 17 : Localisation des points du réseau de suivi du projet SIMBA et projet GAMBAS (SYMCRAU).....	31
Illustration 18 : Liste des points prélevés en mars 2016 (données SYMCRAU).....	33
Illustration 19 : Tableau des points initialement retenus pour la campagne spatiale. (1) : points de suivi étudiés dans le projet GAMBAS	35
Illustration 20 : Tableau récapitulatif des points d'eau prélevés, analyses réalisées, et mesures des paramètres physico-chimiques in-situ.....	35
Illustration 21 : Localisation des points prélevés lors de la campagne géochimique d'août 2017	36
Illustration 22 : Exemple d'enregistrement du rabattement (rabattement normalisé) obtenu à 1Hz au piézomètre X17	37
Illustration 23 : Tableau des résultats des slug-tests et représentation graphique des perméabilités estimées	38
Illustration 24 : Report des perméabilités estimées à partir des slug-tests et des isobathes du substratum sur le fond IGN	38
Illustration 25 : Carte des isopaques des formations plio-pléistocènes de la Crau, d'après Coulomb et Roux, 1978 modifiée par Roure 2004.....	39
Illustration 26 : Evolution théorique de la distribution de salinité lors d'une diagraphie selon le principe de Ghyben-Herzberg complété par l'hypothèse d'un transport dispersif 1D selon la verticale.	43
Illustration 27 : Profil de diagraphie calculé pour le piézomètre X19 et comparé aux différentes diagraphies mesurées, ainsi qu'à la coupe technique et géologique du piézomètre ..	44
Illustration 28 : Profil de diagraphie calculé pour le piézomètre L2 et comparé aux différentes diagraphies mesurées, ainsi qu'à la coupe technique et géologique du piézomètre	45
Illustration 29 : Limites théoriques du biseau salé - variations annuelles	47
Illustration 30 : Influence de la piézométrie sur la position théorique du biseau salé en septembre 1962 (a) et en mars 2017 (b) à proximité de la tranchée drainante	48
Illustration 31 : Influence de la position du substratum sur la position théorique du biseau salé en septembre 1962 (a) et en mars 2017 (b) à proximité de la tranchée drainante	49
Illustration 32 : Limites théoriques du biseau salé calculées en mars et octobre 2017 lors des deux campagnes piézométriques	50
Illustration 33 : Évolutions comparées de la salinité (exprimée en PSU, en rouge sur le graphique) et de la piézométrie (en mNGF, en noir sur le graphique) au piézomètre L2 du 20 au 24 juillet 2017.....	51
Illustration 34: Évolutions comparées de la salinité (exprimée en PSU, en rouge sur le graphique) et de la piézométrie (en mNGF, en noir sur le graphique) au piézomètre L2 en octobre 2017	51

1. Introduction

1.1. 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 est ensuite recouvert par des limons peu perméables, puis par les formations fluviomarines quaternaires de Camargue. Ce contact définit la zone naturelle d'émergence de la nappe, ces émergences pouvant être diffuses ou localisées (Laurons). 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 Viguerat, canal de Vergière et canal Centre Crau.

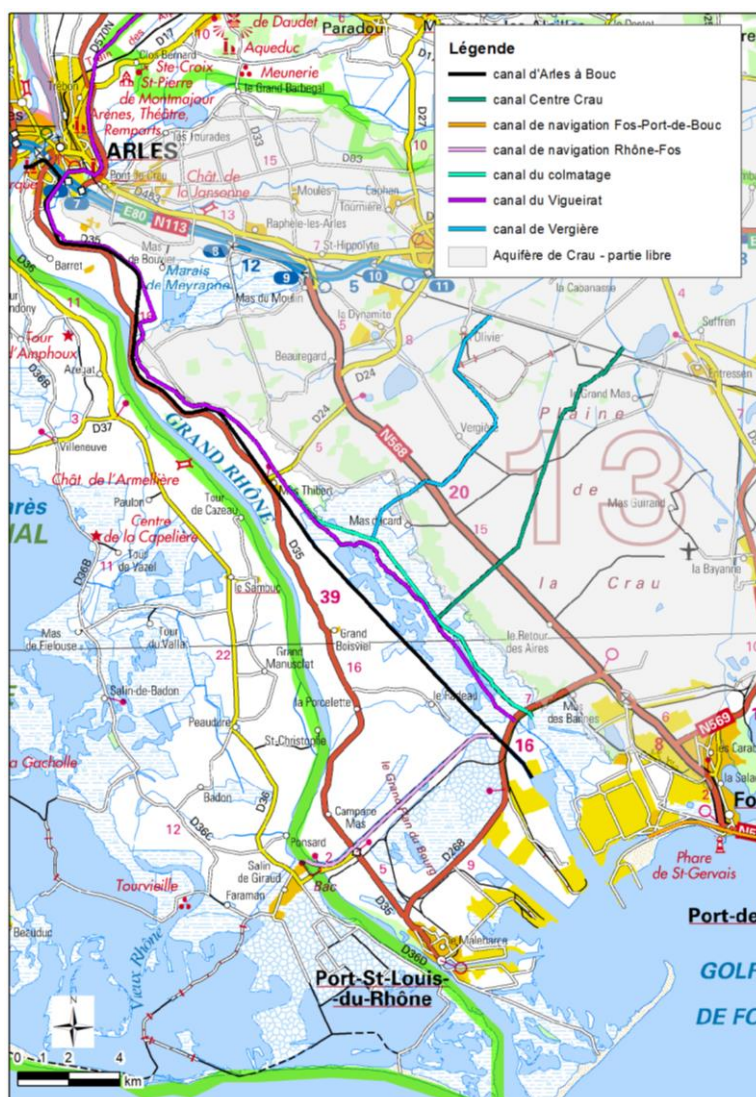


Illustration 1 : Secteur d'étude et principaux canaux le traversant.

1.2. CONTEXTE ET OBJECTIF DU PROJET SIMBA

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 représente 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 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 (SYM CRAU), 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 SYM CRAU 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.

1.3. CONTENU DU RAPPORT INTERMÉDIAIRE

Ce rapport est un rapport intermédiaire présentant les premiers résultats de l'étude à mi-parcours. Un travail a d'abord été mené pour caractériser l'évolution du contexte hydrogéologique à partir des données historiques. En effet, dès les années 1960, le Grand Port Maritime de Marseille (GPMM ex Port Autonome de Marseille) a mené des études hydrogéologiques pour évaluer l'impact des travaux portuaires sur le fonctionnement de la nappe de la Crau, notamment sur la position de la zone de transition eau douce-eau salée. Après les travaux, un suivi spécifique du biseau salé a été mis en place. Ces études sur le « coin salé » permettent de retracer l'historique des travaux d'aménagement et l'impact sur l'hydrogéologie. Ce travail est présenté dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du réseau de suivi haute fréquence (conductivité et piézométrie) déployé dans le projet SIMBA et précise le protocole d'acquisition de ces nouvelles données.

Le quatrième chapitre porte sur les campagnes d'acquisition de nouvelles données qui ont été menées durant la première année du projet : campagne de prélèvement pour la réalisation d'analyses géochimiques de l'eau, et campagne de réalisation d'essais slug-test pour estimer les caractéristiques hydrodynamiques locales (perméabilité).

Dans le cinquième et dernier chapitre une représentation de la zone de transition eau douce/eau salée est proposée, et les variabilités annuelles et pluri-annuelles de celle-ci sont présentées et discutées.

2. Évolution du contexte hydrogéologique en Basse Crau

2.1. SYNTHÈSE DES AMÉNAGEMENTS DE LA ZONE INDUSTRIELLE DE FOS ET ÉTUDES « COIN SALÉ »

La Basse Crau est le siège de circulations d'eau superficielle complexes liées à la présence de canaux dont les usages sont multiples : transferts d'eaux (agricole, industrielle), collecte des eaux de ruissellement pour les usages actuels, usage pour la navigation dans le passé. De plus leurs tracés ont fortement été modifiés au 20^{ème} siècle lors de la mise en place de la zone industrielle de Fos. Ces travaux, de par le creusement des canaux, des darses et l'assainissement de certaines zones de marais, ont également eu des conséquences sur l'écoulement des eaux souterraines et donc la position du front salé. Pour interpréter correctement les observations d'aujourd'hui il est indispensable de connaître l'historique de ces grands aménagements et leur impact sur les eaux de surface et souterraine. La synthèse proposée ici est issue en grande partie des différentes études « Coin salé¹ » réalisées par le GPMM (ex Port Autonome de Marseille) dès les années 1960 et qui se sont poursuivies jusqu'au début des années 2000.

2.1.1. Historique des aménagements de la zone industrielle de Fos

Le point de départ de l'historique des aménagements en Basse Crau semble être la construction du canal d'Arles à Bouc, dont l'objectif à l'origine était de faciliter la navigation entre le Rhône et la mer. Débuté en 1802, sa construction s'achève en 1834². Il dérive une partie des eaux du Rhône depuis Arles jusqu'à Port-de-Bouc. Composé de 3 biefs, bief supérieur, bief intermédiaire et bief marin, séparés par 4 écluses dont la dernière, l'Écluse de Pont-Clapets est proche de l'emplacement actuel du barrage anti-sel (Illustration 2).



¹ Le terme de coin salé était utilisé dans les études historiques sur la zone industrielle précédemment pour définir le « biseau salé » : intrusion d'eau saumâtre ou salée dans l'eau douce de la nappe. Il sera défini en chapitre 5 la limite précise pour retenir le biseau salé.

² <http://www.patrimoine.ville-arles.fr/>

Illustration 2 : Extrait de la carte de l'État-Major 1820-1866, secteur de l'Écluse de Pont-Clapets (source IGN³).

En 1963, le bief marin rejoignant la mer à Port-de-Bouc, présentait une profondeur de cunette à la cote de -2,33 m NGF (Colombani, 1965). Il se trouve alors au-dessus de la cote du toit des cailloutis, celle-ci étant comprise entre -2,50 et -3,40 m NGF le long de ce bief (Dellery, 1964).

Le canal d'Arles à Bouc collecte les eaux superficielles de la région d'Arles et des marais des Baux. À cette époque, les marais situés en Basse Crau le long du canal d'Arles à Bouc, collectent toutes les résurgences de la nappe de Crau et les eaux de ruissellement de la Crau, le canal de Vigueirat (Illustration 3), lui draine les eaux du Nord des Alpilles.

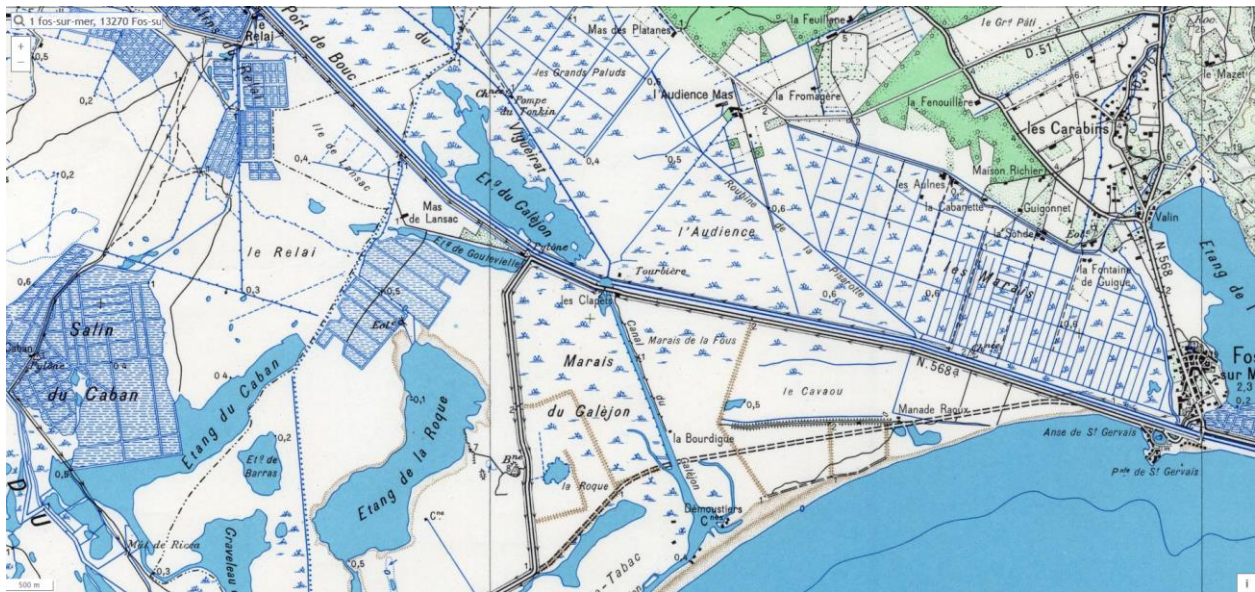


Illustration 3 : Carte au 1/50 000 de 1950 (source : IGN⁴).

À cette même époque, dans la perspective de la mise en place de la zone industrielle de Fos, le projet d'assainissement des basses terres entre la Durance et la mer est lancé (Couprie P., date non précisée). Il a pour but de :

- faire face à l'augmentation de la capacité des canaux qui assurent le drainage en période pluvieuse de la région Centre Crau, du Vigueirat, du canal d'Arles à Bouc qui recueille les eaux de surface de la région d'Arles et de la Vallée des Baux ;
- améliorer le fonctionnement du réseau de drainage par gravité durant l'été et les périodes d'étiage ;
- rendre possible le remblaiement d'une partie des marais situés à proximité de Fos ;
- contribuer à rendre possible l'utilisation du canal d'Arles à Bouc comme canal d'adduction d'eau douce vers la future zone industrielle de Fos.

Suite à ce projet, sont mis en place :

- le canal Centre-Crau ;
- le canal du Galéjon supérieur : constitué d'un approfondissement d'un chenal dans l'Étang du petit Landre ;

³ <https://remonterletemps.ign.fr/>

⁴ <https://remonterletemps.ign.fr/>

- l'ouvrage de contrôle : barrage muni de vannes disposé au raccordement du canal du Galéjon supérieur avec le canal d'Arles à Bouc ;
- l'ouvrage de rejet : barrage (barrage anti-sel) devant permettre le déversement du canal d'Arles à Bouc dans la future darse n° 1 tout en empêchant la remontée d'eau salée dans le canal ;
- une nouvelle écluse (écluse anti-sel) permettant le maintien de la navigation dans le canal d'Arles à Bouc.

L'ouvrage de contrôle, actuel ouvrage du Galéjon, est mis en service en 1968. L'ouvrage de rejet et l'écluse anti-sel sont situés plus en aval que le barrage anti-sel actuel, au niveau de l'actuel emplacement de GDF.

Début 70, les travaux d'aménagement commencent (Cabinet d'étude Ruby, 1968) :

- ouverture de 2 darses : darse n° 1 et darse n° 2. La darse n° 3, initialement programmée ne sera finalement pas construite ;
- déversement du canal d'Arles à Bouc au fond de la darse n° 1, à 1 000 m en amont de l'ancienne Écluse de Ponts Clapets ;
- ouverture d'un canal de grand gabarit dit canal de Fos à Port-de-Bouc (actuelle darse sud) parallèlement au front de mer, depuis la darse n° 1 jusqu'au canal d'Arles à Bouc ;
- remblaiement de tous les terrains et marais compris à l'intérieur de la zone limitée par le réseau routier et ferroviaire, et notamment le canal d'Arles à Bouc entre la darse n° 1 et le point où le canal de Fos à Port-de-Bouc s'y raccordera à l'aval.

Dès le départ, les conséquences de ces aménagements sur le contexte hydraulique et hydrogéologique sont identifiées :

- creusement de la darse n° 1 : en amenant le niveau de la mer profondément à l'intérieur des terres, risque de modifier la position du « coin salé », et d'impacter les captages existants ;
- en supprimant une partie des canaux de drainage et de colature de la nappe existante, risque de créer une nouvelle ligne d'émergence et par conséquent une nouvelle zone de marais à l'amont du remblaiement.

Pour éviter ces perturbations importantes, il est alors proposé de réaliser un drain sous la forme d'un fossé ouvert creusé dans les cailloutis de Crau, dont le tracé doit suivre la bordure de la zone remblayée en suivant dans sa partie nord-ouest une courbe isopiézométrique de la nappe afin de ne pas modifier l'organisation spatiale des écoulements souterrains en amont. Son objectif est de fixer la cote piézométrique à une cote minimum de + 1,30 m NGF (cote de la nappe de référence retenue). Une vanne AMIL est mise en place pour le maintien de cette cote. Ce drain creusé fin 1969 est l'actuelle tranchée drainante (Port Autonome, 1970).

À partir de 1980, les travaux de creusement du canal de liaison Rhône-Fos commencent. Le barrage et l'écluse anti-sel construits avant 70 sont remplacés par l'actuel barrage anti-sel au niveau de la station de contrôle du Vigueirat de GPMM, et par l'écluse de Barcarin sur le nouveau canal de liaison. Le canal est ouvert en 1982-83.

Les cartes de l'illustration 4 montre l'évolution de l'occupation des sols sur la zone industrielle avant et après les travaux d'aménagement réalisés sur les années 70 à 80.

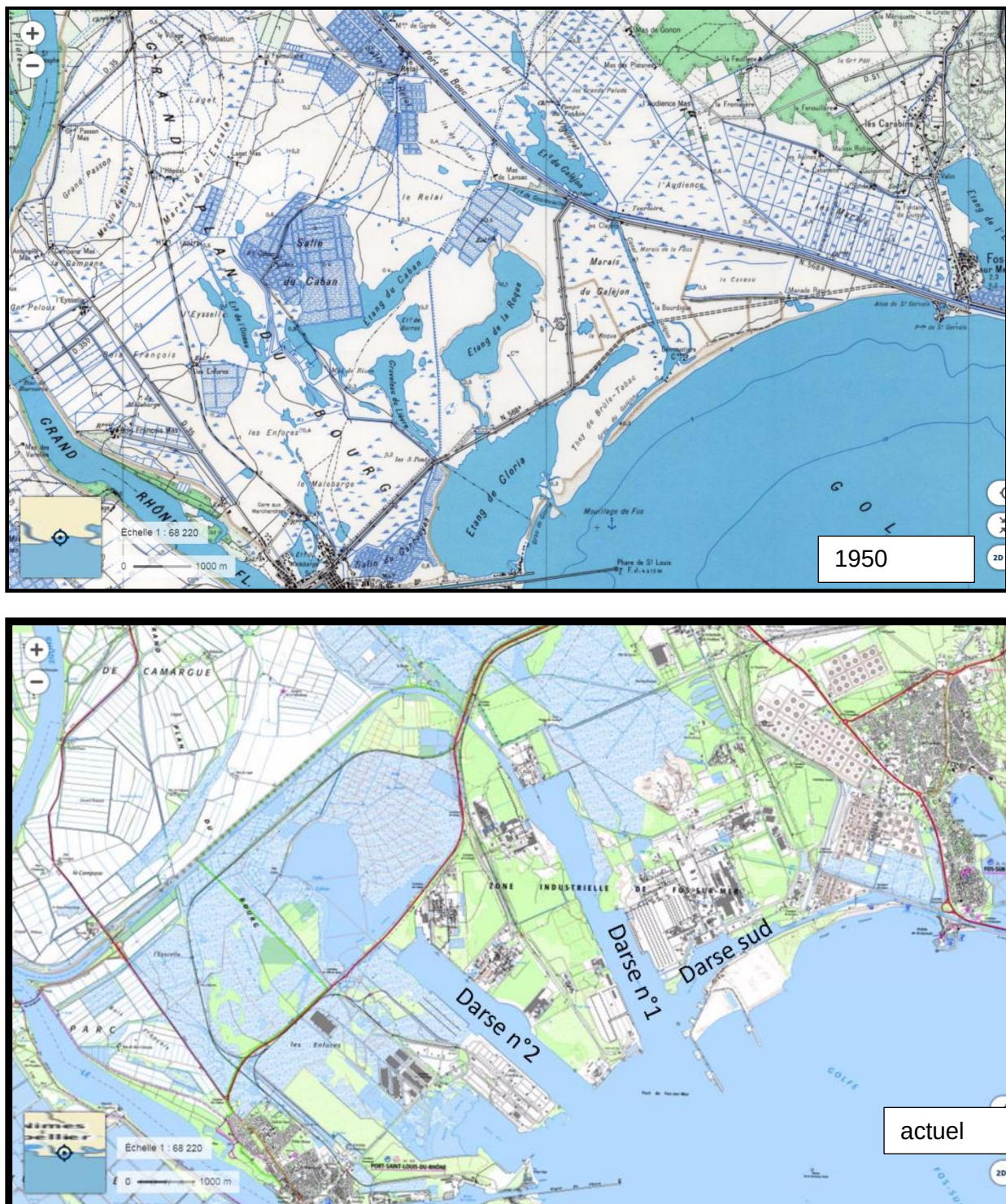


Illustration 4 : Comparaison de l'occupation des sols avant et après travaux d'aménagement de la zone industrielle (source <https://remonterletemps.ign.fr/>).

Des profils de bathymétrie établis début 2017 par le GPMF montrent que la cote NGF du fond du canal de liaison Rhône-Fos lorsqu'il rejoint le canal d'Arles à Bouc est au plus profond à - 4,9 m NGF. Au droit du barrage anti-sel, la cote du fond de la darse n° 1 est au plus profond à - 5 m NGF. Or l'isovaleur du toit des cailloutis de la carte géologique de 1975 montre une

valeur de - 5 m NGF au niveau du barrage anti-sel, et les deux forages disponibles en BSS⁵ et situés à proximité ont rencontré le toit des cailloutis à - 6,5 à - 5,5 m NGF (Illustration 5).

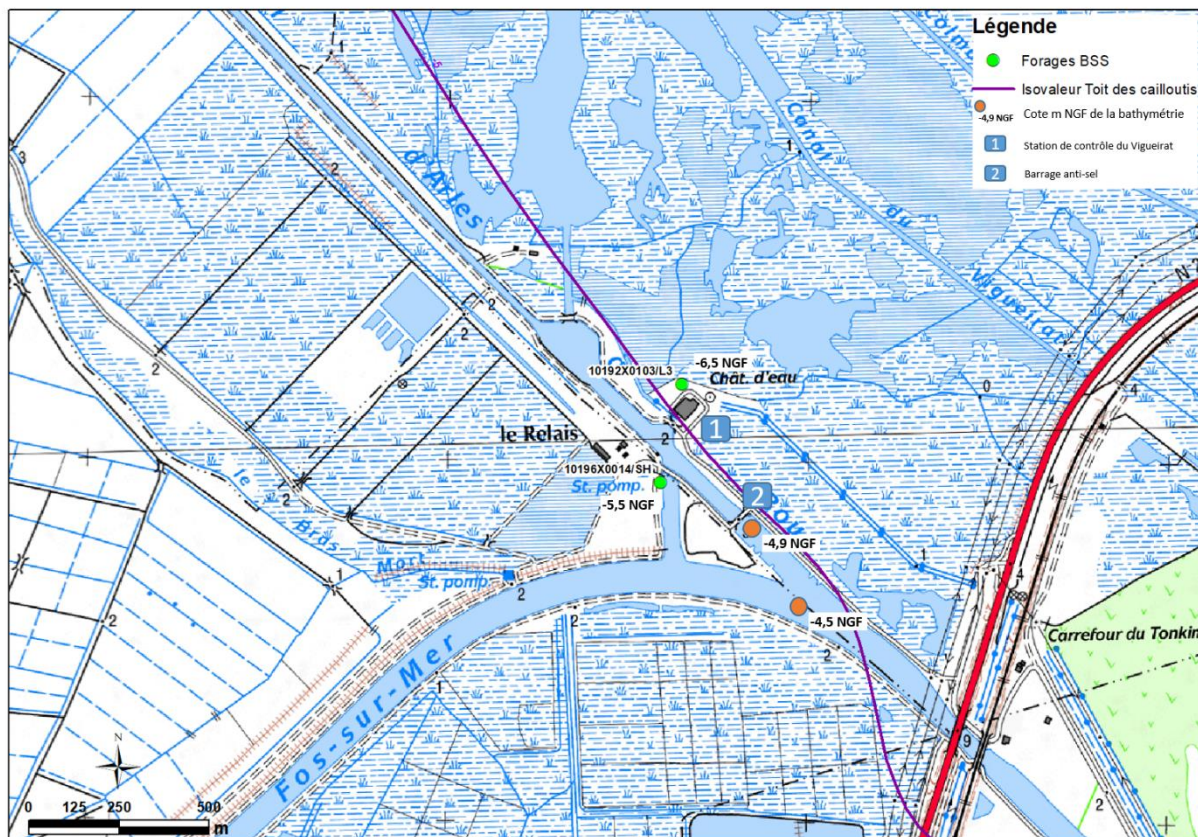


Illustration 5 : Bathymétrie et cote du toit des cailloutis
(source GPM et feuille géologique au 1/50 000 du BRGM n° 1019).

Ces données montrent que dans le secteur du barrage anti-sel, le canal de liaison et le canal d'Arles à Bouc présentent une bathymétrie sensiblement proche de la cote du toit des cailloutis. La couverture limoneuse peu perméable qui recouvrent les cailloutis de Crau a ainsi été largement érodée par les travaux d'aménagement, permettant le contact entre la nappe de la Crau et la mer.

2.1.2. Synthèse des études et suivis historiques

En vue des futurs travaux d'aménagement de la zone industrielle de Fos, dès 1962, les premières études sur le contexte hydrogéologique sont menées dans le secteur. Une campagne de sondages électriques, menée au printemps 1962 sur 155 sites, a permis de tracer une première carte de l'invasion marine de la nappe de la Crau dans le secteur de Fos (Cluseau, 1962). Le secteur prospecté est centré sur la zone de marais sur laquelle sera implantée la zone industrielle. Les profils tracés et la localisation des limites du biseau salé permettent d'avoir une image de l'état initial avant les travaux d'aménagement. Celui-ci remonterait à l'époque jusqu'au mas de l'Audience (Illustration 6). Sur la carte de l'illustration 6, les auteurs proposent 2 limites entre lesquelles doit se situer la fin du biseau salé :

- limite du biseau salé : le biseau salé se termine quand le substratum a une résistivité supérieure à 9 ohms/m ;

⁵ Banque de données du Sous-Sol du BRGM

- limite de la zone de diffusion : frontière en-deçà de laquelle, il est quasiment sûr de trouver de l'eau salée.

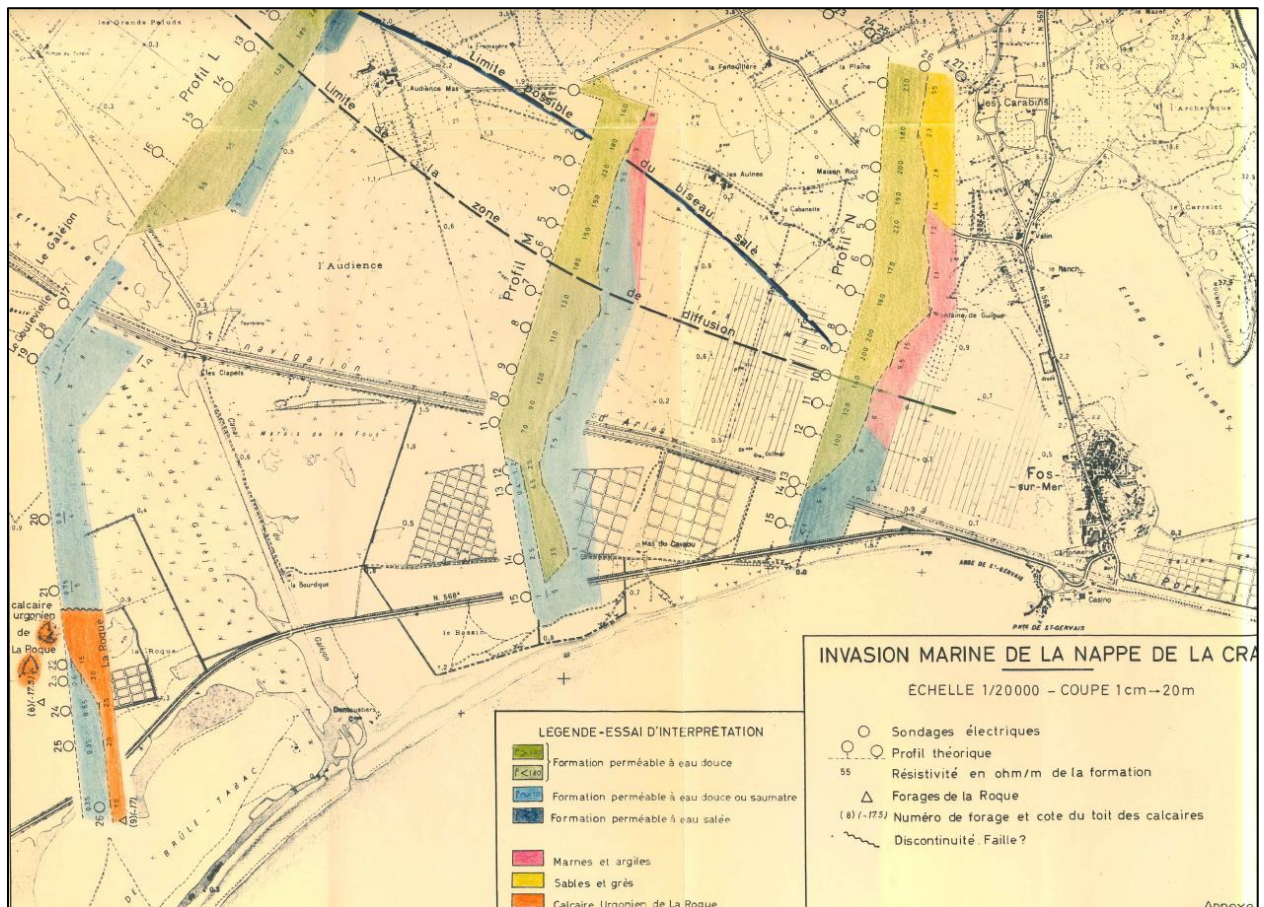


Illustration 6 : Première carte du biseau salé en Basse Crau établie à partir de mesures électriques (Cluseau, 1962).

En 1964, une étude sur l'hydrogéologie de la Crau est menée sur l'ensemble de la nappe (Dellery *et al.*, 1964). Un chapitre entier est consacré aux relations de la nappe de la Crau avec la mer à l'aval. Une première carte du toit des cailloutis de Crau en Basse Crau sous les limons récents est établie dans cette étude. Elle montre l'enfoncement régulier de ceux-ci jusqu'à Port-Saint-Louis, au-delà duquel le plongement s'accroît. Entre le secteur de la Roque et de la Pissarotte, la carte met en évidence une discontinuité structurale (possible faille) d'axe nord-sud dans les cailloutis. Il est donné également dans cette étude des informations sur le recouvrement des cailloutis en mer. Dans le golfe de Fos, les cailloutis sont recouverts de vases marines très récentes, localement concrétionnées dont l'épaisseur croît de 4 à 5 m à l'est de Port-de-Bouc à 33 m au sud-ouest de la pointe de la Gracieuse. Dans le fond du golfe, les vases font place à un sable fin, coquillier, dont l'épaisseur peut être très faible (30 cm) voir localement nulle. C'est le cas au sud-ouest de la pointe de Saint-Gervais, où un entonnoir reconnu à l'époque par plongée sous-marine, montre un affleurement des cailloutis de Crau, mettant ainsi naturellement la nappe d'eau douce contenue dans les cailloutis en communication avec la mer. Dans cette même étude, 2 cartes piézométriques ont été tracées en mars et septembre 1962.

En 1968, des mesures de résistivités verticales sont menées dans 5 piézomètres : X1, X2, X3, X4 et X5 (Hentinger, 1968). Ces dernières montrent une anomalie de salinité à 15 m (1,5 g/L)

de profondeur sur X4 qui se situe au nord du Mas de l'Audience (Illustration 7), à proximité immédiate du futur captage de la Pissarotte.

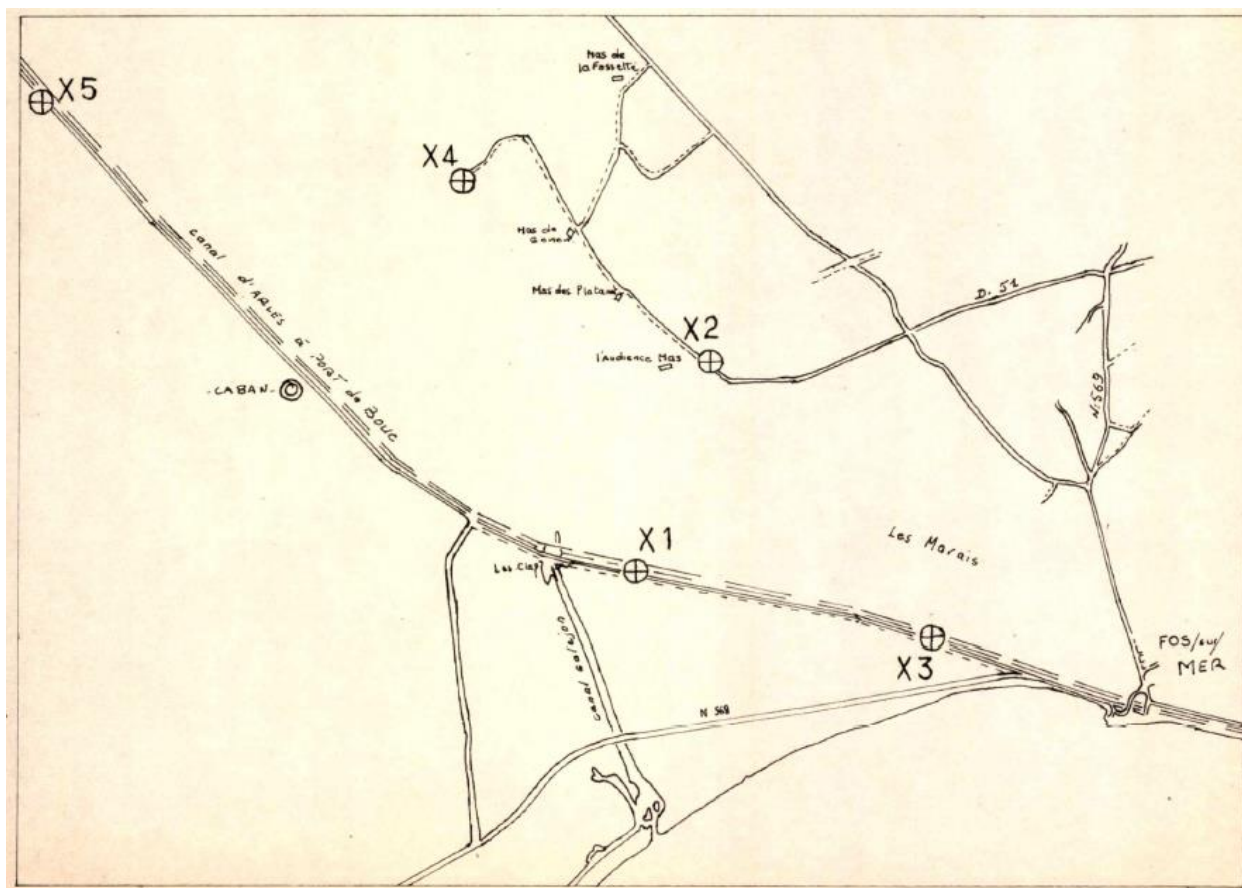


Illustration 7 : Localisation des 5 piézomètres ayant fait l'objet d'investigations en 1968 (Hentinger, 1968).

X1 quant à lui présente deux interfaces : une première séparant l'eau douce de la nappe d'une eau légèrement saumâtre, la seconde entre l'eau saumâtre et l'eau salée. En complément, des analyses isotopiques sur le deutérium sont menées sur X1 et X2 (Merlivat et Vuillaume, 1970). Elles montrent que les eaux salines du fond du forage X1 sont distinctes des eaux de la Méditerranée voisine. Les résultats indiquent également que les eaux d'irrigation fournissent l'essentiel de l'alimentation de la nappe de Crau. D'autres points de suivis dans la partie captive tels que les piézomètres X3, X1 et X5 présentent des salinités à 20 g/L à des profondeurs de 5, 19 et moins de 1 m respectivement.

En 1968, la première étude du « coin salé » est menée par le Port Autonome de Marseille pour étudier l'influence des aménagements projetés sur l'intrusion saline (cabinet d'étude Ruby, 1968). Une carte piézométrique est établie sur la Basse Crau en période de basses eaux : fin décembre 1967 - début janvier 1968. Cette carte a permis de définir pour des conditions défavorables de basses eaux une isopièze à 1,30 m NGF à l'aval de la future zone industrielle, cette valeur étant prise comme référence pour la gestion de la tranchée drainante (cf. § 2.1.1).

En 1970, une deuxième étude sur la géochimie des eaux de la Basse Crau est menée sur X1 et X2 avant le creusement des darses (Vuillaume et Merlinat, 1970). Les résultats des analyses isotopiques sur le deutérium mesurées en fonction de la profondeur montrent une zone de transition eau douce-eau de mer vers 14 m de profondeur (augmentation du rapport isotopique). Cette étude confirme les résultats de la campagne géophysique de 1962. Par ailleurs, les auteurs en reportant sur un même graphe les teneurs isotopiques en fonction de

la teneur en chlorure des échantillons prélevés sur X1 et sur des échantillons d'eau de mer au voisinage de X1, ont mis en évidence que les eaux salines du fond de l'ouvrage X1 ne sont pas identiques à l'eau de mer au voisinage de X1. Le pôle salé observé semble être une eau de mer ancienne piégée lors de la formation de l'aquifère.

En 1971-72, de nouveaux forages sont créés (X8 à X29). Des profils de salinité sont réalisés sur plusieurs d'entre eux et ont été interprétés en fixant la limite du biseau salé à une valeur de salinité de 20 g/L (CERIC, 1972). CERIC (1972) propose de représenter cartographiquement la limite d'extension du biseau salé comme la limite au-delà de laquelle il n'est pas possible d'observer vers l'amont une salinité de 20 g/l ou plus dans l'aquifère. Ainsi, quelle que soit la profondeur à laquelle cette limite est atteinte, si une salinité de 20 g/l est observée dans un piézomètre celui-ci sera défini comme atteignant le biseau salé. Au sud, cette limite avance en mer à proximité de la Pointe-Saint-Gervais, dans le secteur où les résurgences sous-marines d'eau douce ont été mises en évidence par des plongées. Vers l'amont en direction de Mas Thibert, le front salé « butte » sur une remontée du substratum au droit de l'ancienne écluse de l'étourneau (CERIC, 1972). Cela s'explique par le fait que bien que la charge piézométrique contrôle la position verticale de l'interface eau douce-eau salée, l'évolution latérale (vers l'amont) du biseau salé est contrainte par la géométrie de l'aquifère, en l'occurrence la profondeur du toit du substratum des cailloutis.

À partir de 1975, le GPMM effectue des tournées mensuelles sur 22 piézomètres pour mesurer la piézométrie, la salinité et la température de l'eau de la nappe. À partir de 1978, un dispositif de surveillance du front salé à proximité du captage de la Pissarotte est spécifiquement mis en place sur 10 piézomètres. Des profils verticaux mensuels de la salinité sont réalisés sur ces derniers. Début 1979, un réseau de piézomètres spéciaux est installé le long du futur canal de liaison Rhône-Fos. 4 piézomètres captent la nappe de la Crau (CERIC, 1980). Une nouvelle carte piézométrique est établie en mai 1980.

En 1993, un bilan est établi sur les mesures réalisées entre 1965 et 1992 (CERIC, 1993). Cette analyse montre une évolution des niveaux de nappe marqués surtout depuis 1980 avec :

- baisse de 0,5 à 2 m de la nappe dans le secteur de la zone industrielle ;
- diminution du gradient, la pente de la nappe est quasiment plate en période d'étiage à proximité de la Pissarotte.

En ce qui concerne l'évolution du biseau salé, deux limites sont identifiées : l'eau douce pour une salinité inférieure à 0,5 g/L et l'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 1971/1977 : l'eau salée avance de 100 à 200 m en direction du captage de la Pissarotte ;
- entre 1980/1991 : avancée généralisée du front salé, entre 100 m à La Pissarotte, jusqu'à 400 m à l'est ;
- 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).

Les suivis du front salé se sont ensuite poursuivis sur les piézomètres du réseau mis en place par le GPMM jusqu'en 2013.

2.1.3. Suivi du captage AEP de la Pissarotte

Le captage AEP de la Pissarotte (Illustration 8) alimente en eau potable la commune de Port-Saint-Louis. Ce captage est situé à l'intérieur de la zone industrielle de Fos et était déjà présent avant les travaux d'aménagement. Il est intéressant de regarder de plus près les chroniques de suivi de la salinité disponibles dans la base de données ADES⁶. Mais avant cela, il est nécessaire de préciser son fonctionnement qui a pu être éclairci lors de la visite menée dans le cadre de la campagne de prélèvement décrite au § 4.1. Il s'agit en fait d'un puits de reprise (10193X0049/P) d'un forage situé à 100 m à l'est (10193X0087). Le puits, de profondeur 5,7 m environ, est l'ouvrage d'origine qui était exploité jusque dans les années 40. D'après l'exploitant actuel, celui-ci a rencontré des problèmes de salinité et a été complété par un forage situé à l'est, de profondeur 16,2 m, foré en 1968. Le forage alimente le puits par un système de vases communiquant, les pompes sont uniquement dans le puits, et sont utilisées pour desservir l'eau dans le réseau de distribution.

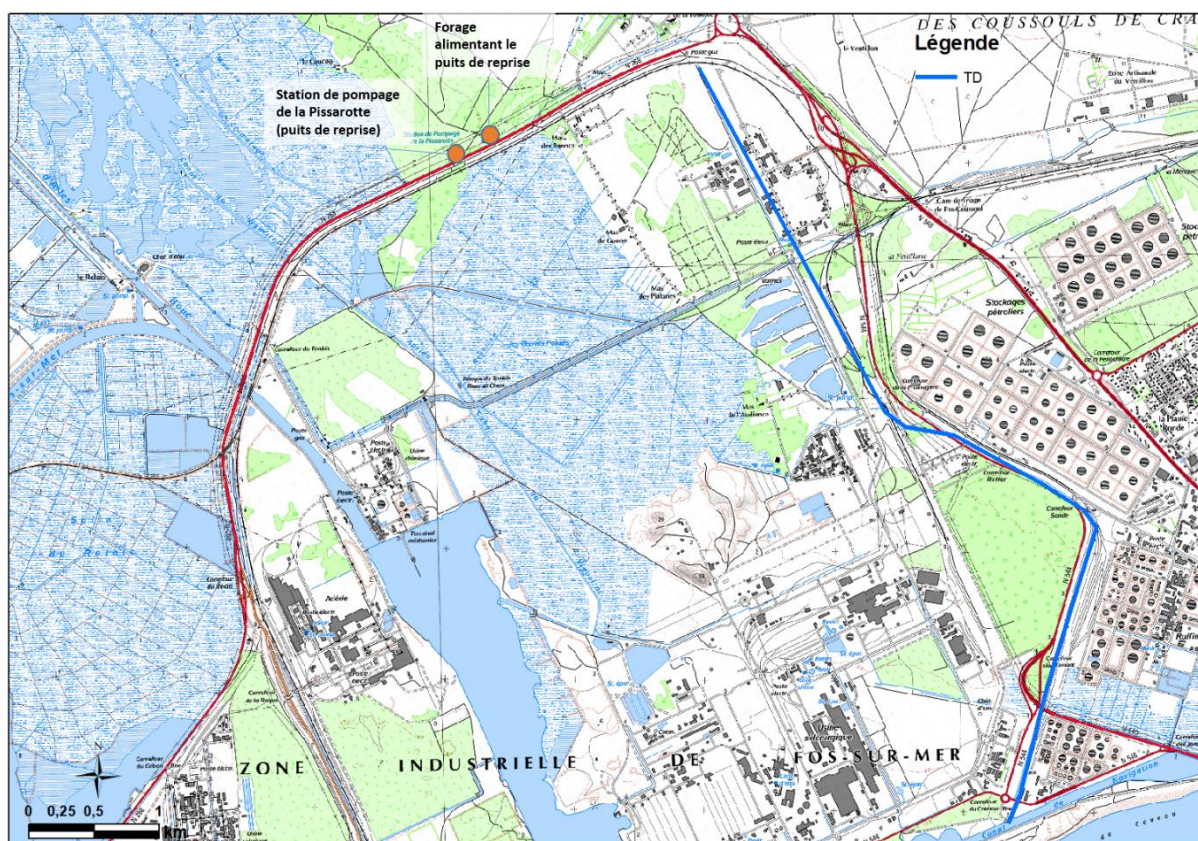


Illustration 8 : Situation du captage de la Pissarotte dans la zone industrielle (Fond topo IGN au 1/25 000).

Le puits d'origine avait donc été construit pour capter l'émergence d'une source, il est en effet aligné avec la zone de Laurons correspondant à la limite de la nappe libre. Ce captage se situe dans une zone où le substratum est peu profond (- 16,97 m NGF), ce qui lui confère une protection contre l'avancée du front salé qui vient buter sur le substratum.

Le puits dispose d'analyses dans la base de données ADES depuis 1987, ce qui permet de représenter l'évolution des chlorures et de la conductivité depuis cette date (Illustration 9). Ce captage ne connaît pas actuellement de problème majeur vis-à-vis de la salinité des eaux

⁶ <http://www.adess.eaufrance.fr/>

(teneurs en chlorures inférieures à 80 mg/L⁷). Le substratum empêche effectivement les eaux denses salées de remonter, sauf si le niveau piézométrique de la nappe est très faible, dans ce cas la charge d'eau douce ne permettra pas de maintenir le front salé qui remontera. De 1987 à 2013, la conductivité et la teneur en chlorure montrent une tendance à la hausse, avec des périodes de « pics » comme en 2013, où la teneur en chlorure a atteint 78 mg/L. Le déphasage observé entre la conductivité et les chlorures montrent que la conductivité n'est probablement pas un bon indicateur de l'intrusion saline pour des proportions de mélange très faibles. Depuis cette date, la tendance semble s'inverser, la dernière concentration en chlorures mesurée en octobre 2017 indique une valeur de 53 mg/L. Néanmoins, cet équilibre reste très fragile en raison de la proximité de l'interface eau douce-eau salée.

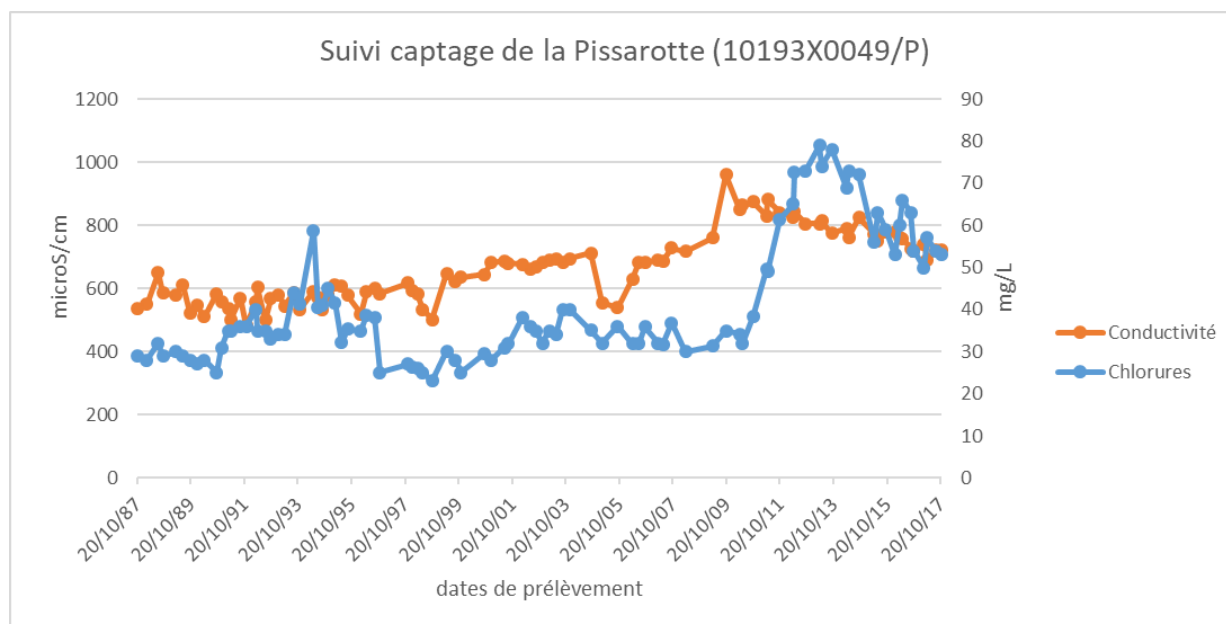


Illustration 9 : Évolution de la conductivité (à 25 °C) et de la concentration en chlorures depuis 1987 sur le captage de la Pissarotte (source ADES).

2.2. CONDITIONS AUX LIMITES ACTUELLES ET PASSÉES DE L'AQUIFÈRE DE CRAU

L'historique des aménagements portuaires a engendré des modifications importantes des conditions aux limites de l'aquifère en modifiant à la fois les flux et les différences de charges hydrauliques entre l'aquifère, le réseau hydrographique et la mer. Il convient donc de bien comprendre quelles étaient les conditions aux limites de l'aquifère avant ces aménagements afin de comprendre l'impact de ces aménagements sur le fonctionnement hydrogéologique de la Basse Crau, et in fine l'équilibre avec les masses d'eau souterraine salées. Les conditions d'émergences de la nappe sont contrôlées par des équilibres de charge entre les masses d'eau pouvant interagir avec la nappe de la Crau, à savoir les réseaux hydrographiques naturels (Rhône) ou artificiels (canaux, tranchée drainante) et la mer.

2.2.1. Recharge et prélèvements de la nappe de Crau

La nappe de Crau est alimentée par les précipitations et les eaux issues de l'irrigation provenant de la Durance. Cette dynamique de recharge est bien connue (de Montety, 2008,

⁷ Le seuil de qualité pour une eau destinée à la consommation humaine est de 250 mg/L (Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine)

Oliosio *et al.*, 2013, Seraphin *et al.*, 2016) et pré-existait avant les aménagements (Vuillaume et Merlivat, 1970). Ce fonctionnement peut être amené à évoluer dans le futur selon l'évolution des usages et de l'occupation du sol, et notamment les prélèvements. En effet, un bilan hydrique de la nappe de Crau a été dressé en 2013 dans le cadre du diagnostic du contrat de nappe réalisé par le SYMCRAU, qui s'est appuyé sur les données fournies par Oliosio *et al.* (2013). Ce bilan met en avant le rôle prépondérant de l'irrigation sur la recharge de la nappe à l'échelle de la nappe de Crau (de 60 à 80 % de l'ensemble des entrées), ainsi que l'influence notable des prélèvements (de l'ordre de 30 %) sur l'ensemble des sorties (Illustration 10).

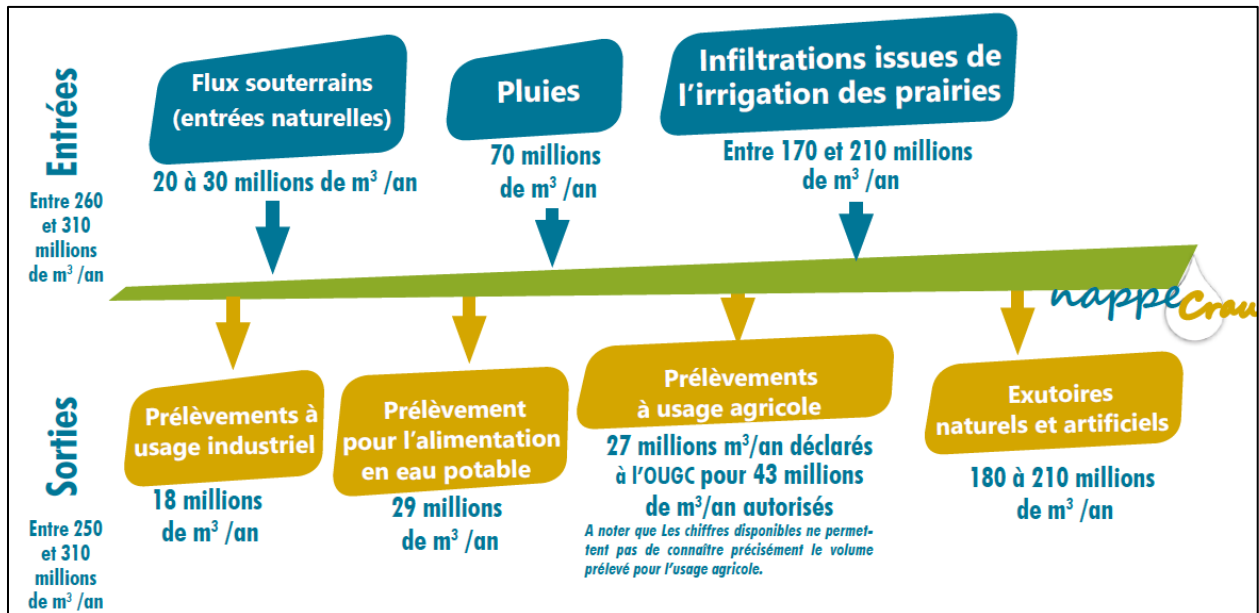


Illustration 10 : Bilan hydrique de la nappe de Crau (SYMCRAU, 2016).

L'évolution de ces prélèvements et de la stratégie d'irrigation des prairies sont donc des éléments importants du fonctionnement hydrogéologique de la Basse-Crau et doivent faire l'objet d'un suivi. Cependant, cet aspect ne sera pas plus détaillé dans ce rapport qui se focalise sur l'impact des aménagements industrialo-portuaires.

2.2.2. Exutoires de la nappe libre de Crau : les laurons et les relations avec les canaux et la tranchée drainante

La vidange de la nappe se réalise naturellement au niveau de « laurons », qui constituent des points de débordement de la nappe à la limite de captivité. Cette zone de débordement matérialise une ligne à potentiel imposé pour la nappe proche de 0.5 m NGF pour la Basse Crau (Dellery *et al.*, 1964). Ce fonctionnement induit la présence de marais continuellement alimentés par la nappe qui se développent en aval de la limite de captivité sur les formations alluviales Holocène imperméables. Elles ont été progressivement drainées (assainissement des « basses terres » entre la Durance et la Mer dès les années 60 cf. § 2.1.1), notamment au niveau de la zone industrielle par la réalisation de la tranchée drainante, ou remblayées afin de relever le niveau du sol dans l'actuelle zone industrielle. La tranchée drainante a été construite en 1969 pour une mise en service en 1972, dans le but de réguler les flux d'eau pour (i) limiter la mise en eau de la future plateforme industrielle remblayée à + 2 m NGF par les matériaux issus du creusement des darses, (ii) assurer une bonne tenue des terrains en limitant les sous-pressions ou la formation de laurons au contact de la zone remblayée, et (iii) maintenir une charge d'eau douce en aval de la zone industrielle pour éviter toute progression du biseau salé en amont vers les captages d'eau douce (CERIC, 1988). Cette tranchée est dimensionnée pour maintenir la surface libre à 1,30 m NGF pour un débit de fonctionnement de 400 l/s.

Les études menées dès les années 70 ont mis en évidence l'équilibre hydrodynamique entre les piézomètres X10, X11 et le niveau de la surface libre dans la tranchée drainante à ce niveau (1,51 m NGF), pour un débit drainé de l'ordre de 400 l/s (Ceric, 1977, Illustration 11).

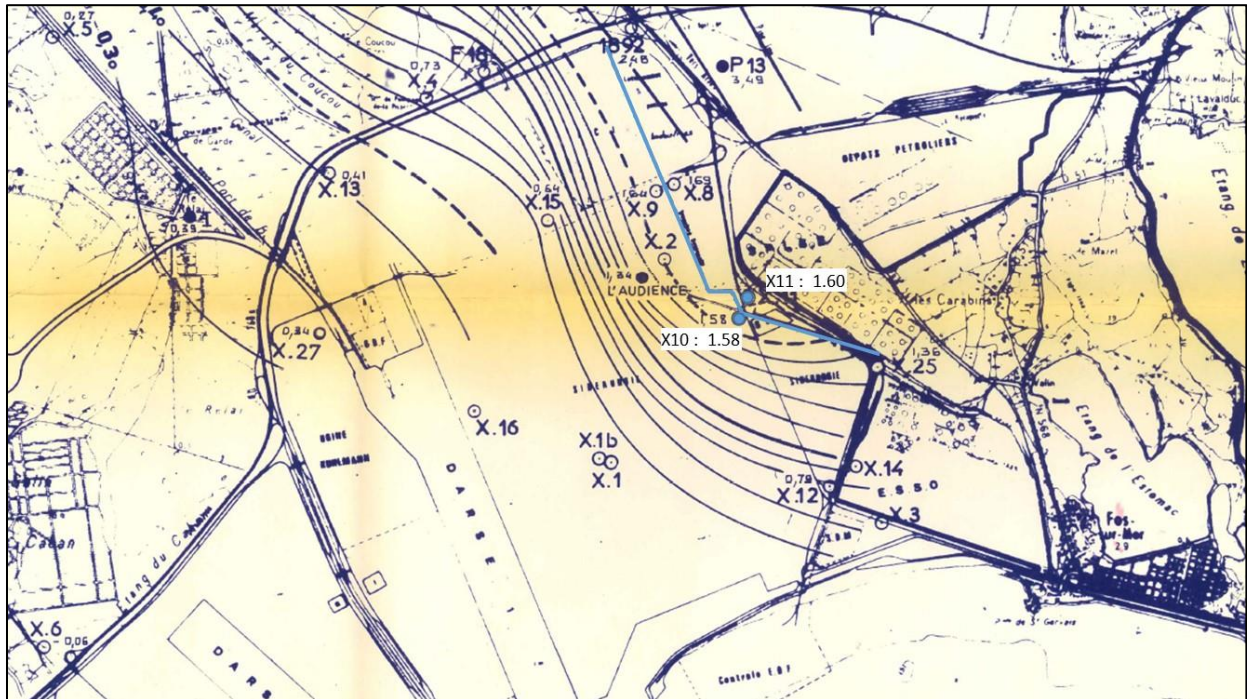


Illustration 11: Extrait de la carte piézométrique des 8 et 9 Juin 1977 (CERIC, 1977) où sont reportés le tracé de la tranchée drainante et les cotes piézométriques (en m NGF) mesurées au piézomètre X10 et X11.

Les niveaux d'eau sont parfaitement stabilisés par la tranchée drainante, ce qui s'observe également sur les cartes piézométriques de 1980 et 1989 où un « bombement » de la piézométrie pour l'isopièze 1 m NGF est attribué au soutien de la nappe par la tranchée drainante à l'aval (SAFEGE, 2006). En Février 1970, une étude des sols (Port Autonome de Marseille, 1970) mettait en évidence l'évolution du niveau de la nappe de 0,5 - 0,8 m NGF à 1,20 m NGF en lien avec le fonctionnement de la tranchée drainante. Ce bombement n'est effectivement pas visible sur les cartes piézométriques de 1962 (Dellery *et al.*, 1964), et apparaît déjà sur les cartes réalisées en octobre 1971, puis en juin 1977 (CERIC, 1977), ce qui confirme le rôle de drain joué par la tranchée drainante dans la partie amont, puis son rôle de soutien des niveaux de la nappe dans la partie aval à partir des piézomètres X10 et X11 jusqu'au point X25 (vanne AMYL).

Les canaux et les drains réalisés sur la partie libre de l'aquifère de Crau ont donc pour effet d'abaisser la surface piézométrique en amont, mais peuvent également recharger certains secteurs en aval, notamment en basses eaux en aval de la zone industrielle à proximité du point X25.

Par ailleurs, une étude récente (Mayer *et al.*, 2016) a permis de localiser et de quantifier les apports de la nappe au canal d'Arles à Fos, ce qui confirme le rôle de drainage également joué par le canal d'Arles à Fos.

Des échanges entre la nappe des cailloutis de Crau et le Rhône sont également envisageables. En effet, les formations de cailloutis affleurent au niveau du seuil de Terrin. À ce niveau, la nappe est en charge par rapport au Rhône, sauf lors des épisodes de crues (cf. suivis du piézomètre S7 comparé au niveau du Rhône lors de l'étude de la salinisation de l'aquifère de Camargue, de Montety, 2008). Plus en aval, au sud de Mas Thibert, le piézomètre

X23 permet de suivre l'évolution de la piézométrie de la nappe de la Crau à proximité du Rhône (500 m en rive gauche). Ce point a été retenu dans le réseau de suivi SIMBA (cf. § 3.2), ce qui permettra de discuter des relations Rhône-nappe de Crau à ce niveau, en lien avec l'interprétation des diagaphies.

2.2.3. Exutoires de la partie captive : relation avec la mer

La connexion directe de la nappe de Crau avec la mer est limitée par la présence de la couche de limons récents Holocène qui recouvre les cailloutis. L'étude du BRGM de 1964 (Dellery *et al.*, 1964) met néanmoins en évidence un amincissement de cette couche protectrice dans le golfe de Fos, et une évolution vers un faciès plus perméable (sable coquiller). De plus, les cailloutis de Crau ont bien été observés au large de la pointe St Gervais au fond d'une dépression en forme d'entonnoir (Illustration 12).

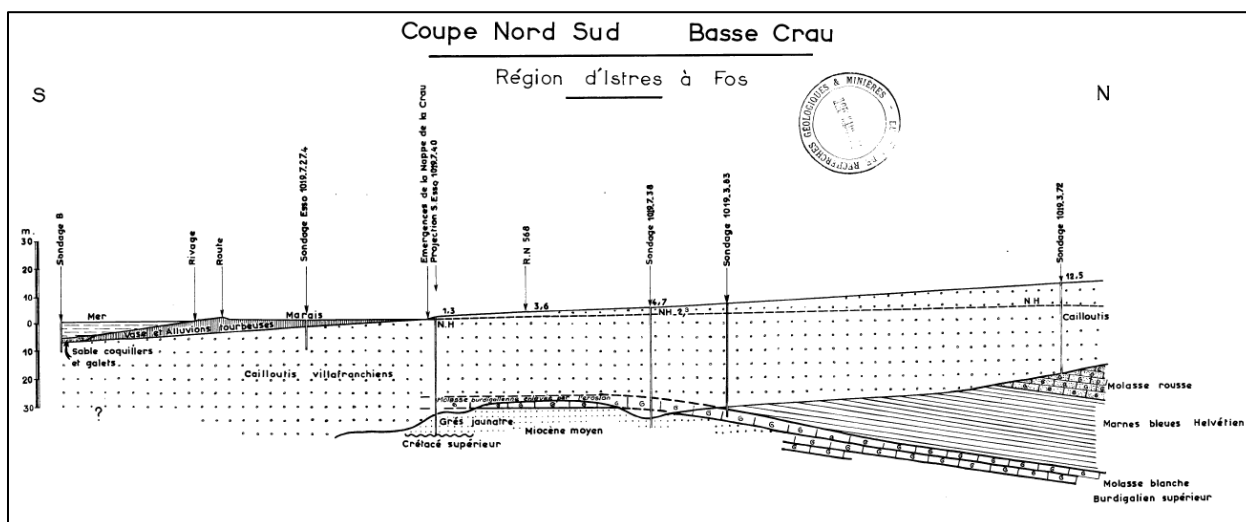


Illustration 12 : Coupe nord-sud de la Basse Crau mettant en évidence l'amincissement des dépôts holocènes recouvrant les cailloutis sous le golfe de Fos et le passage à un faciès de sables coquilliers et galets (Dellery *et al.*, 1964).

Il existe donc un contact entre la mer et la nappe des cailloutis de Crau que l'on peut localiser à quelques km du littoral actuel, pré-existant au creusement des darses et des canaux. Ce contact dans la partie captive permet d'expliquer la présence d'eau salée dans l'aquifère bien avant les aménagements portuaires (Vuillaume, 1970), en équilibre avec la charge imposée par la zone d'émergence des laurons vers 0,5 m NGF (Dellery *et al.*, 1964). Cet équilibre permet d'envisager une situation stabilisée avant les aménagements portuaires où la mer se comportait comme une limite imperméable, forçant les écoulements circulant dans la partie libre à émerger à la limite de captivité. Ce fonctionnement est en accord avec les âges de l'eau de plusieurs milliers d'années proposés par de Montety (2008) pour l'eau salée dans la partie captive de l'aquifère.

Les aménagements industrialo-portuaires ont modifié la profondeur et la distance de contact entre les cailloutis et la mer : en 1970, la darse 1 est creusée et pénètre de 5 km à l'intérieur des terres. Sa profondeur est telle qu'elle s'enfonce de 5 à 10 m dans les cailloutis aquifères de Crau. Par contre les darses 2 et 3 restent dans les limons (CERIC, 1977). Le canal de liaison Rhône-Fos (1984) modifie également le contact entre l'aquifère des cailloutis de Crau et la mer. Le fond de ce canal recoupe les cailloutis de Crau dans le secteur du Relai du fait d'une remontée locale du toit des cailloutis. Les aménagements des darses et du canal Rhône-Fos aboutissent donc à un nouvel équilibre entre les masses d'eau salée et douce, en faisant progresser le biseau salé vers l'amont.

2.3. TYPES D'EAU RENCONTRÉES DANS LES CAILLOUTIS

Les cailloutis de Crau contiennent une nappe fortement influencée par l'irrigation par des eaux issues de la Durance (Vuillaume, 1970, Seraphin, 2016). Ces eaux circulent jusqu'en Basse Crau en interagissant avec les galets fluviaux plus ou moins scellés par une matrice carbonatée. Les interactions eau-roche permettent d'obtenir au niveau de la zone d'émergence des laurons une eau présentant une salinité inférieure à 0,3 correspondant à une conductivité spécifique (25 °C) de l'ordre de 600 à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, une concentration en chlorure de l'ordre de 25 mg/l et un faciès bicarbonaté calcique à tendance sulfatée (Dellery *et al.*, 1964, de Montety, 2008). La signature de ce pôle sera précisée lors de l'analyse des données de la campagne géochimique prévue dans le cadre du projet SIMBA.

À l'aval, l'aquifère contient une nappe d'eau salée dont les caractéristiques sont très proches de l'eau de mer actuelle (Merlivat et Vuillaume, 1970 ; de Montety, 2008). Les principales différences observées sont imputables aux échanges cationiques avec la phase argileuse de la matrice qui entoure les cailloutis de Crau, et qui ont pour effet pour une même concentration en chlorure de diminuer la concentration en sodium au profit du calcium. Dans la partie captive, d'autres processus influencent la salinité de ce pôle liés (i) à des flux de drainance verticale descendante depuis les limons contenant une nappe salée à sur-salée, notamment au niveau des zones déprimées du fait des pompages (Dellery *et al.*, 1964), ou (ii) à des interactions au contact du substratum (Dellery *et al.*, 1964). Ceux-ci restent toutefois négligeables devant l'impact d'un mélange avec le pôle salé contenue dans les cailloutis en Basse-Crau et dans l'aquifère profond captif de Camargue.

Ainsi, la salinité de l'eau souterraine contenue dans les cailloutis de Crau en Basse-Crau et en Camargue (aquifère profond captif) peut s'expliquer par un simple mélange binaire entre une eau salée ayant la salinité de l'eau de mer actuelle, soit de l'ordre de 38 à 40 pour une densité de 1,026 pour une température de 25 °C et une eau douce de salinité négligeable (Dellery, 1964 ; Merlivat et Vuillaume, 1970 ; Vuillaume, 1970 ; de Montety, 2008). Le pôle salé peut cependant avoir au moins deux origines puisqu'il a pu être daté à plusieurs milliers d'années en certains points (de Montety, 2008), alors que les aménagements industriels-portuaires suggèrent également une intrusion saline actuelle (CERIC, 1977). Cette question de l'origine de la salinité observée aujourd'hui en Basse Crau sera abordée à l'aide de la campagne géochimique relative à la datation des eaux et au degré d'interactions eau-roche menée dans le projet SIMBA (§ 4.1.2).

3. Réseau de suivi « H.C.T »

3.1. OBJECTIF DU RÉSEAU

Le réseau « hauteur - conductivité - température » mis en place dans le projet SIMBA a pour objectif de permettre le suivi à haute fréquence de l'intrusion saline en Basse Crau. Il s'agit dans un premier temps de proposer un réseau de suivi centré sur la zone de transition eau douce/eau salée, qui a vocation à la fin du projet à être conforté ou adapté selon les conclusions de l'étude, afin d'être pérennisé en réseau de surveillance opérationnel sur le long terme.

3.2. SÉLECTION DES POINTS DE SUIVI

3.2.1. Préambule

Plusieurs dizaines de piézomètres ont été historiquement suivis en Basse Crau pour la mesure de la conductivité électrique et de la hauteur d'eau (mesures manuelles puis automatiques, diagraphies de conductivité) dans le cadre des études « front salé » menées par le GPMM suite aux travaux d'aménagement de la zone industrielle de Fos-sur-Mer. Ces suivis se sont arrêtés en 2013. Le 7 novembre de cette même année est publié un arrêté préfectoral portant sur la mise en place d'un dispositif de gestion active autour des ouvrages du Galéjon et du barrage anti-sel gérés par le GPMM, permettant de suivre l'évolution du front salé. Ce dispositif fait l'objet d'un projet dédié à la mise en place d'un réseau de surveillance autour des ouvrages du GPMM : le projet GAMBAS.

Le projet SIMBA concerne le suivi de l'intrusion saline sur l'ensemble de la Basse Crau, son emprise est donc plus étendue. Pour identifier les piézomètres les plus pertinents pour le suivi du front salé, les données de suivi du GPMM ont été mises à disposition, et le SYMCRAU a complété ces suivis par plusieurs campagnes de diagraphies de conductivités menées entre juin 2015 et août 2016 sur des piézomètres mis en place par le GPMM, mais aussi de nouveaux points pour couvrir l'ensemble de la Basse Crau. L'analyse détaillée a fait l'objet d'un rapport (SYMCRAU/GPMM, 2017), dont les conclusions sont reprises ici. Les piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies sont présentés ci-dessous (Illustration 13). Le projet SIMBA a démarré en décembre 2016, et le choix des points s'est appuyé sur les données déjà acquises. L'analyse n'intègre pas les diagraphies qui ont été réalisées durant le présent projet.

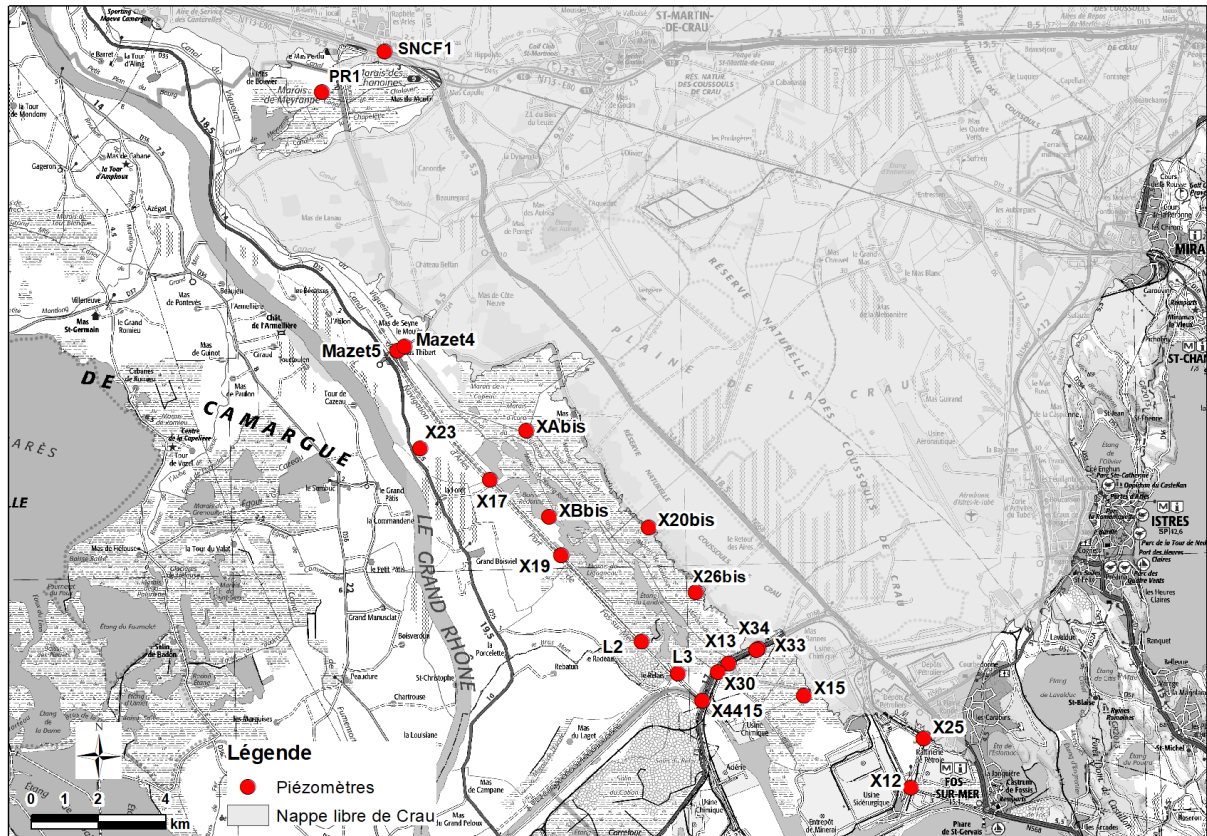


Illustration 13 : Piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies menées par le SYMCRAU en 2015 et 2016 (SYMCRAU/GPM, 2017).

3.2.2. Présentation du réseau SIMBA et instrumentation

Les diagraphies réalisées par le SYMCRAU en 2015-2016 ont été utilisées pour déterminer les points à équiper en suivi automatique de la conductivité et de la piézométrie. L'approche a été menée par secteurs géographiques couvrant la Basse Crau. La carte de l'illustration 14 localise les secteurs. Le détail des diagraphies et réflexion menée pour retenir les points de suivi est présenté dans le rapport portant sur la mutualisation d'un réseau de suivi des intrusions marines en Basse Crau (SYMCRAU/GPM, 2017).

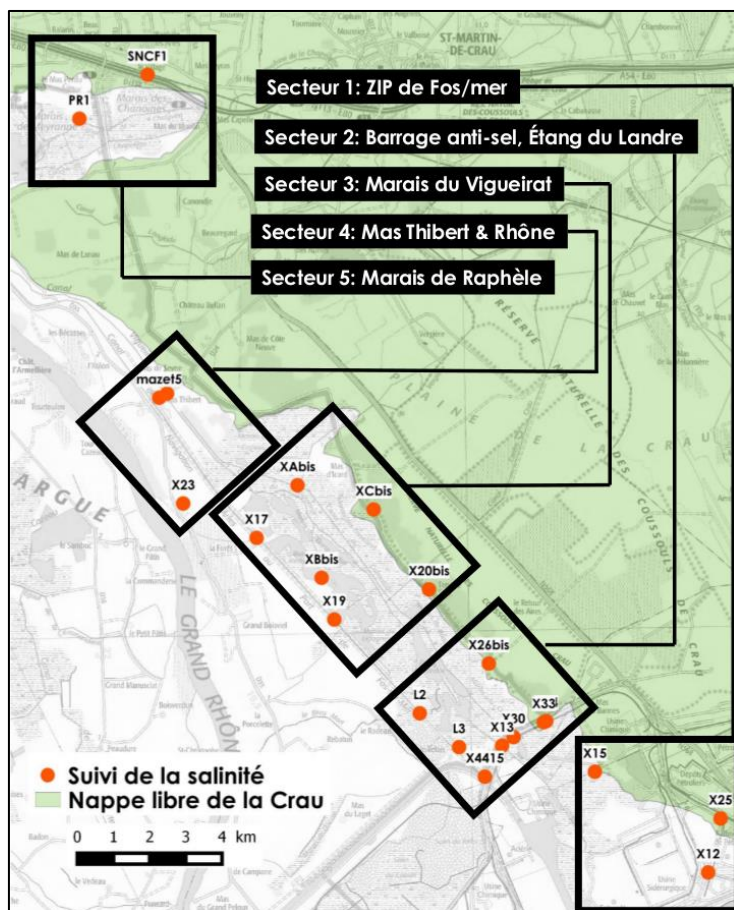


Illustration 14 : Localisation des secteurs et points investigués (SYMCRAU/GPM, 2017).

Les piézomètres retenus pour le réseau d'observation sont au nombre de 8. Leur sélection est basée sur :

- leur position, l'idée étant de bien couvrir l'ensemble de la nappe en Basse Crau ;
- leur diagraphie de conductivité électrique de l'eau : identification de l'interface eau douce/eau salée et variabilité saisonnière.

La tranchée drainante, drainant la nappe de la Crau en amont de la zone industrielle et jouant un rôle essentiel dans la dynamique des phénomènes d'intrusion saline a également été équipée (sonde hauteur d'eau, température et conductivité) Finalement, le réseau d'observation de l'intrusion saline mis en place dans le projet SIMBA est récapitulé dans l'illustration 15.

Secteur	Nom	Altitude des capteurs	Prof. du capteur /sol	Prof. de l'ouvrage/ sol	Nature aquifère	Intérêt pour le réseau SIMBA	Variabilité saisonnière	Équipement	Télétransmission	Date de mise en service
1	X12	-21 m NGF	23 m	40 m	Sous couverture	Proximité de la tranchée drainante	+++	Solinst LTC	non	31/05/2017
2	L2	-14,5 m NGF	17 m	23 m	Sous couverture	Proximité de l'étang du Landre	++	OTT Ecolog 800	oui	24/05/2017
3	X26 bis	-18 m NGF	30 m	19,5 m	Libre	Bordure de la nappe libre	-	Solinst LTC	non	30/05/2017
	XA bis	-11 m NGF	30 m	12 m	Sous couverture	Pompages agricoles	+++	OTT Ecolog 800	oui	30/05/2017
	X17	-11 m NGF	29 m	12 m	Sous couverture	Proximité canal d'Arles à Fos	+++	Solinst LTC	non	24/05/2017
4	X23	-18,5 m NGF	28,50 m	20,4 m	Sous couverture	Proximité du Rhône	++	Solinst LTC	non	23/06/2017
	Mazet5	-16 m NGF	18,6 m	18,50 m	Sous couverture	Proximité du captage AEP Mas Thibert, du Rhône et de captages agricoles	++	OTT Ecolog 800	oui	08/06/2017
5	PR1	-22 m NGF	72 m	23 m	Sous couverture	Proximité captage AEP de Sint-Hyppolyte	++	OTT Ecolog 800	oui	20/06/2017
Tranchée drainante	TD		0 m			Suivi de la nappe de Crau		CTD Diver	non	24/07/2017

Illustration 15 : 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 d'esuivi en continu de la hauteur d'eau, température et conductivité.

Les profondeurs des capteurs ont été déterminées à partir des diagraphies afin de suivre l'évolution de l'interface eau douce/eau salée. Un exemple de positionnement de capteur est donné ci-dessous, avec les diagraphies de conductivité réalisées sur L2 (Illustration 16). L'interface se situe entre - 12 m NGF et - 20 m NGF, et en zoomant sur les profondeurs où se situent le « saut » de conductivité, la cote - 14,5 m NGF est retenue pour le positionnement du capteur sur cet ouvrage.

L'intérêt de positionner le capteur au niveau de l'interface est double :

- suivi l'évolution du suivi de l'interface, et notamment la fréquence des passages eau douce-eau de mer ;
- intérêt pour le capteur de pression : son positionnement à l'interface fait en sorte qu'au-dessus de lui c'est de l'eau douce, donc le niveau enregistré correspond bien à un niveau piézométrique (pas besoin de correction de densité) .

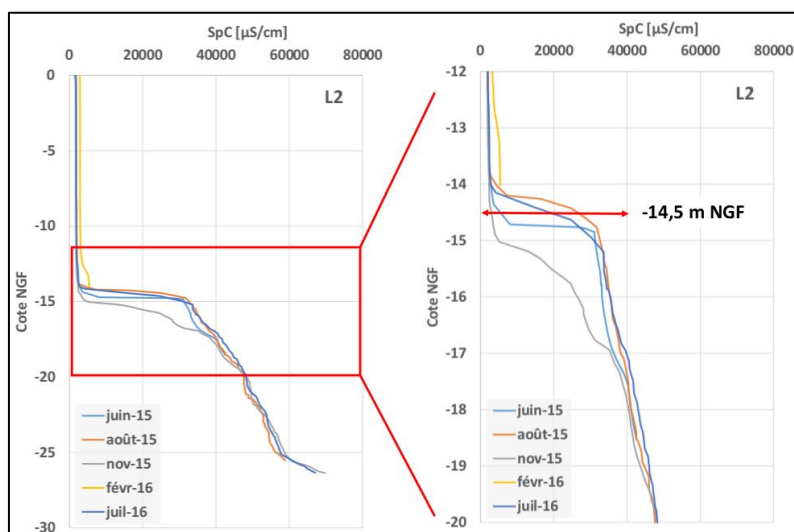


Illustration 16 : Détermination de la profondeur du capteur dans le piézomètre, illustration avec les diagraphies du piézomètre L2 (SYMCRAU/GPMM, 2017).

Les 9 points retenus pour le réseau d'observation sont localisés sur l'illustration 17. Les points de suivi du réseau installé dans le projet GAMBAS y sont également reportés, ainsi que les piézomètres ayant fait l'objet de diagraphies par le SYMCRAU.

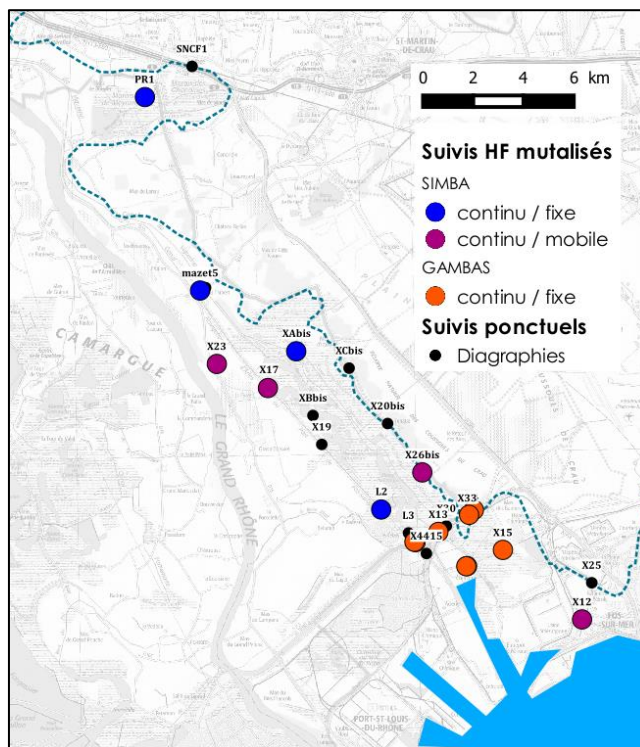


Illustration 17 : Localisation des points du réseau de suivi du projet SIMBA et projet GAMBAS (SYMCRAU).

3.3. PROTOCOLE POUR LA RELÈVE ET LA GESTION DES DONNÉES DU RÉSEAU DE SUIVI

Le réseau de suivi est focalisé sur des points d'eau de faibles altitudes à proximité du littoral, et pour lesquels une précision de l'ordre du cm est nécessaire pour comprendre l'organisation des écoulements et la position du biseau salé. Les trois étapes décrites ci-dessous sont indispensables pour éviter les erreurs de mesure et permettre l'exploitation correcte des données de terrain.

3.3.1. Contrôle des suivis de la hauteur d'eau

Concernant les relevés des niveaux d'eau, ceux-ci doivent toujours être exprimés en profondeur relative par rapport à un repère nivelé pour chaque point d'eau. Ce repère correspond dans la plupart des cas à la tête de puits et doit faire l'objet d'un marquage bien identifié sur le tube pour éviter toute erreur. Une campagne de nivellement a été organisée dans le cadre du projet pour s'assurer du nivellement de l'ensemble des points du réseau SIMBA.

Cette donnée de profondeur piézométrique constitue la donnée brute et doit être conservée sous cette forme. La profondeur piézométrique par rapport au sol ne doit pas être retenue car elle induit des erreurs d'interprétation lors de la saisie des données.

Les relevés manuels peuvent donner un résultat différent de la dernière valeur enregistrée par la sonde. Dans ce cas, il est proposé de noter cet écart mais de ne pas réaliser de recalage systématique de la sonde tant que l'origine de cet écart n'a pas été comprise. Une erreur de

mesure liée au caractère salé de l'eau (dysfonctionnement de la sonde piézométrique manuelle qui ne « s'arrête » pas), ou une évolution haute fréquence de la piézométrie (effet de marée) peut induire un décalage entre la valeur observée et mesurée de plusieurs cm.

3.3.2. Réalisation de diagraphies

Les campagnes de diagraphies ont pour but de décrire l'évolution de la conductivité électrique de l'eau en fonction de la profondeur. Cette donnée est utile pour décrire la répartition de la salinité selon la verticale en différents points du réseau (cf. chapitre 5). La donnée brute doit être stockée au format Excel dans un classeur spécifique au point d'eau ; ce même classeur renseignera la valeur de la piézométrie au moment de la diagraphie. Si le logiciel utilisé le permet, la donnée brute exprimée en conductivité spécifique sera également traduite en salinité.

3.3.3. Contrôle des suivis physico-chimiques

Les suivis physico-chimiques sont dépendants de la position du capteur dans le piézomètre suivi. Cette position a été déterminée à partir de l'interprétation des diagraphies (cf. Illustration 16). Aussi, toute modification de la position du capteur, même minime (changement du système de fixation) devra être reportée afin de comprendre l'origine de sauts éventuels sur les chroniques. La donnée enregistrée de conductivité électrique de l'eau devra être accompagnée d'une information (métadonnée) précisant les corrections éventuelles apportées sur la donnée brute (par ex. conductivité spécifique à 20 °C, 25 °C ou non corrigée de la température). Si possible, la mesure sera directement transmise en conductivité spécifique à 25 °C.

4. Campagnes de mesure

4.1. CAMPAGNES GÉOCHIMIQUES

Deux campagnes géochimiques ont eu lieu en Basse Crau pour apporter des éléments sur l'origine de l'intrusion saline en Basse Crau. La première menée par le SYMCRAU en mars 2016, avant le démarrage du projet SIMBA, et la seconde menée dans le cadre de SIMBA en août 2017. Ces deux campagnes sont présentées ici, mais les résultats de la deuxième campagne n'étant pas tous disponibles au moment de l'écriture de ce rapport, ils seront présentés et interprétés dans le rapport final du projet.

4.1.1. Campagne de mars 2016

En mars 2016, le SYMCRAU a réalisé des prélèvements sur 7 piézomètres en Basse Crau (Illustration 18). Ces analyses ont porté sur les éléments majeurs et les éléments traces. Ces investigations préalables ont pour objectif de contribuer aux choix des piézomètres à retenir pour la campagne géochimique approfondie (§ 4.1.2), et d'apporter les premiers éléments sur l'origine de la salinité en Basse Crau.

Nom	Date de prélèvement	Profondeur de la pompe (m NGF)
L2	21/03/2016	- 20,02
X26 bis 8m	18/03/2016	-6,77
X26 bis 21m	18/03/2016	-19,77
XA bis	17/03/2016	-19,31
X19	18/03/2016	-18,73
X23	17/03/2016	-23,59
X15	17/03/2016	-18,60
Mazet5	18/03/2016	-15,90

Illustration 18 : Liste des points prélevés en mars 2016 (données SYMCRAU).

Une première analyse des résultats par le SYMCRAU montre que la salinisation des eaux souterraine en Basse Crau semble principalement contrôlée par un processus de mélange binaire entre les pôles « mer » et « Crau ». Ces résultats seront également utilisés dans l'interprétation à venir des résultats de la campagne d'août 2017 présentée ci-après.

4.1.2. Campagne d'août 2017

Objectifs

Pour améliorer la compréhension de la minéralisation et de la salinisation de la Basse Crau, une campagne d'analyses géochimiques a été réalisée dans le projet SIMBA. Celle-ci doit permettre de disposer d'une photographie de la répartition spatiale des types d'eau rencontrés en basses eaux. Les résultats doivent permettre 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 holocènes) ;
- identifier l'origine des eaux salées observées en Basse Crau connaissant les signatures des eaux salées de l'aquifère captif de Camargue (De Montety, 2008), 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.

Pour mener à bien ces réflexions, les analyses utiles portent sur :

- les ions majeurs et les éléments traces ;
- les isotopes du strontium (Sr) afin d'identifier les interactions eau/roche et de caractériser les différents pôles géochimiques ainsi que leur contribution relative à la minéralisation des eaux de la nappe de Crau (à l'aide d'un diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = f(1/\text{Sr})$ notamment) ;
- les isotopes de l'eau et du tritium : les eaux du secteur présentent en effet un fort contraste isotopique au niveau des stables de l'eau (due à la contribution des eaux d'irrigation issues de la Durance) mais aussi au niveau du tritium (^3H), qui marque la contribution des eaux du Rhône très influencées par l'activité nucléaire en amont. La mesure de ces isotopes doit permettre d'apporter des éléments pour identifier et quantifier les proportions de mélanges à l'origine de la minéralisation des eaux contenues dans les cailloutis ;
- les isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$). Ils permettent d'évaluer le degré d'évolution de l'eau et pourront apporter des compléments d'information sur l'existence de deux niveaux salés superposés sur le piézomètre X12 (le niveau inférieur étant plus minéralisé que l'eau de mer) ;
- la datation des eaux en ciblant les phénomènes récents (CFCs, SF6, $3\text{H}/\text{He}$) et anciens (activités du ^{14}C corrigées par le ^{13}C) pour tenter de distinguer les eaux anciennes salées piégées et remobilisées, des eaux salées actuelles provenant directement de la mer.

Points de suivis retenus

Les piézomètres ont été choisis en fonction de leur position vis-à-vis de l'intrusion saline, et afin de caractériser les flux sortant de la nappe, les captages AEP du secteur (Pissarotte et Ventillon), et les eaux issues des systèmes de drainage des laurons (canaux, tranchée drainante), ont aussi été retenus. Afin de comparer les résultats sur le niveau sur-salé observé sur X12, un point situé dans l'aquifère captif profond de Camargue est aussi retenu (point S8, sélectionné sur la base des résultats de la thèse de de Montety, 2008).

Les points initialement identifiés pour réaliser ces analyses sont donc au nombre de 14, mais tous n'ont pas pu être échantillonné (cf. paragraphe suivant). Le tableau suivant présente l'ensemble de ces points initiaux prévus (Illustration 19).

Nom	type	Majeurs + Traces	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴ C- ¹³ C	¹⁸ O/ ² H	SF6	³ H/He	¹¹ B
Darse_s (1)	ESOU	1	1		1			
Darse_p (1)	ESOU	1	1	1	1	1	1	
Captage Pissarotte (1)	ESOU	1	1	1	1	1	1	
Captage Ventillon (1)	ESOU	1	1	1	1	1	1	
Thibert aval	ESOU	1	1	1	1	1	1	
X17	ESOU	1	1		1			
X19 (	ESOU	1	1	1	1	1	1	
X20	ESOU	1	1		1			
X25	ESOU	1	1		1	1		
X12	ESOU	2	2	2	2	2	2	1
Canal drainant la nappe de la Crau	ESUP	1	1		1			
Galejon amont	ESUP	1	1		1			
Canal Arles à Fos amont barrage anti-sel	ESUP	1	1		1		³ H seul	
S8	ESOU	1	1	1	1			

Illustration 19 : Tableau des points initialement retenus pour la campagne spatiale. (1) : points de suivi étudiés dans le projet GAMBAS.

Déroulement et tableau récapitulatif

La campagne s'est déroulée les 28 et 29 août 2017.

Sur la liste des points établie avant le démarrage du projet SIMBA, des modifications ont dû être apportées. En effet, à cette date, le projet GAMBAS n'avait pas encore démarré et les nouveaux forages prévus (Darse_s, Darse_p) ne sont pas encore créés. D'autre part, la reconnaissance terrain des points en préparation de la campagne n'a pas permis de trouver le piézomètre S8. Celui-ci n'a pas pu être échantillonné. Des difficultés ont été également rencontrées sur X12 pour réaliser le prélèvement, et celui-ci n'a pas pu être prélevé.

Finalement, 9 échantillons ont été prélevés, le tableau récapitulatif des analyses effectuées et des mesures in-situ est présenté ci-dessous (Illustration 20) :

Nom	Profondeur de prélèvement (m/sol)	Profondeur de prélèvement (m/haut du tubage)	Date	Majeurs + Traces	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴ C- ¹³ C	¹⁸ O- ² H	SF6	³ H/He	NP/repère	pH	Temp (°C)	Oxygène dissous (%)	Cond. Sp. (μS/cm)	Potentiel rédox (mV)
X25	1	2	28/08/2017	1	1		1	1		1,95	712	16,8	77,9	719	246,4
PAR1	39,85	40	28/08/2017	1	1	1	1	1	1	1,44	6,51	15,8	0,8	27100	75,7
Lauron Chanoines	0	0	28/08/2017	1	1		1	1	1		7,09	18,3	70,72	781	94,2
Ventillon	16,22	16	29/08/2017	1	1	1	1	1	1		7,23	17,6	89,3	714	225,2
Pissarotte	Entre 5,8 et 15,80	Entre 6 et 16	29/08/2017	1	1	1	1	1	1	2,23	7,23	18,8	59,2	747	184,4
Galejon amont	Juste sous la surface	Juste sous la surface	29/08/2017	1	1		1				7,58	26,4	67,7	562	160,1
Barrage anti-sel	Juste sous la surface	Juste sous la surface	29/08/2017	1	1		1		³ H seul		7,69	25,8	86,2	729	175
X19	29,18	30	29/08/2017	1	1	1	1	1	1	1,87	7,06	25	10,8	53300	-261
X19	16,18	17	29/08/2017	1	1	1	1	1	1	1,84	8,07	16,9	0,9	4580	-70,5

Illustration 20 : Tableau récapitulatif des points d'eau prélevés, analyses réalisées, et mesures des paramètres physico-chimiques in-situ.

La carte de l'illustration 21 localise l'ensemble de ces points. Les résultats de cette première campagne vont permettre de dimensionner de nouvelles analyses qui seront réalisées prochainement afin de compléter le programme initialement prévu.

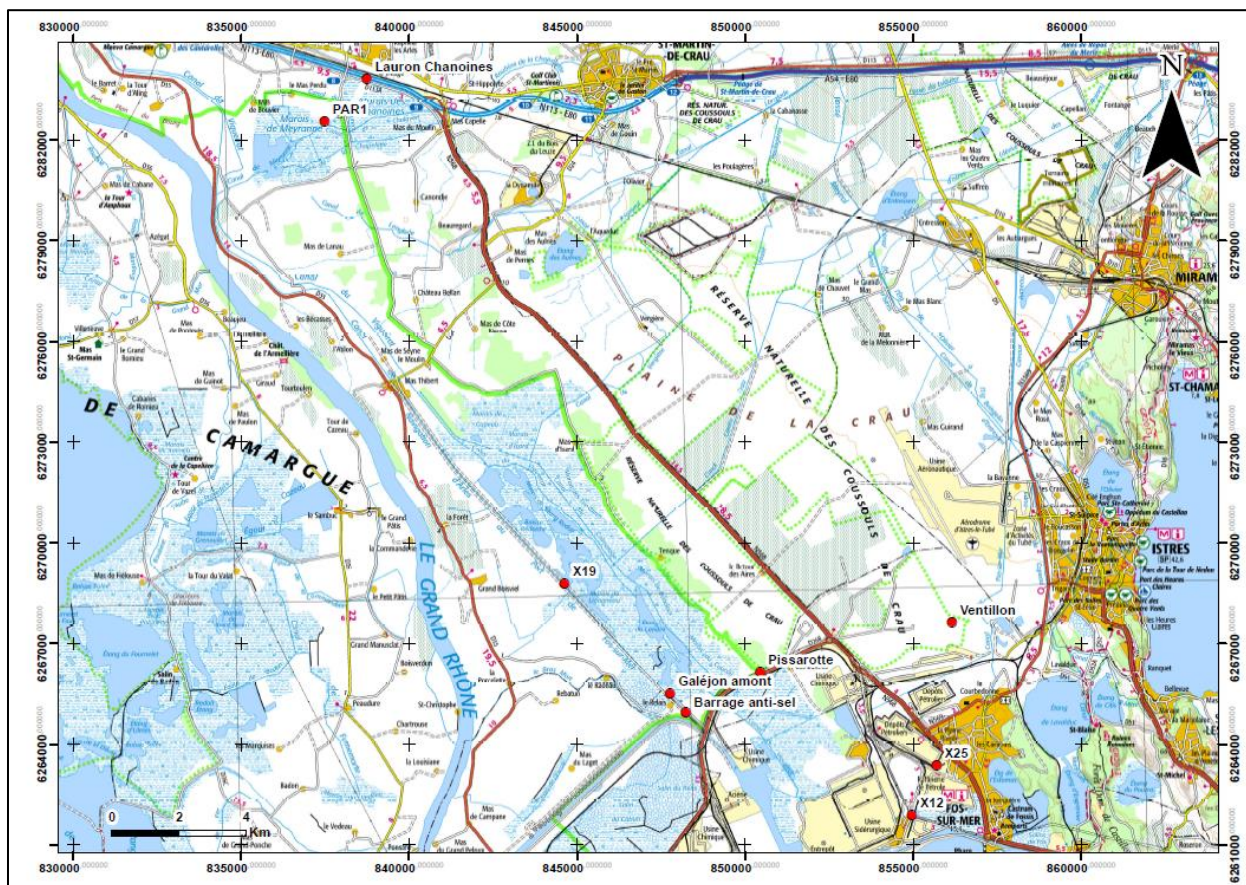


Illustration 21 : Localisation des points prélevés lors de la campagne géochimique d'août 2017.

4.2. CAMPAGNE DE SLUG-TEST

4.2.1. Protocole et points testés

Les cailloutis villafranchiens qui constituent le réservoir aquifère de la nappe de Crau sont connus pour être très perméables, mais peuvent présenter une variabilité en raison de la dynamique de dépôt dont ils sont issus et du degré de cimentation des cailloutis. L'objectif de cette campagne de slug-test est de mieux caractériser les points de suivis du réseau SIMBA afin de mettre en évidence d'éventuels liens entre (1) l'existence de paléo-chenaux, (2) une granulométrie plus grossière et (3) des axes de drainage identifiés sur les cartes piézométriques.

Un slug test consiste à créer un choc hydraulique dans le piézomètre assimilable à une impulsion (Dirac), et de suivre le retour à l'équilibre du niveau d'eau dans le piézomètre en fonction du temps. Dans le cas de milieux transmissifs, l'inertie de la colonne d'eau dans le piézomètre va repousser le niveau d'eau dans le piézomètre au-delà du niveau piézométrique initial. Le retour à l'équilibre se fait avec un rééquilibrage cyclique de la différence de charge hydraulique entre le piézomètre et l'aquifère, produisant une réponse oscillatoire amortie.

Il existe plusieurs modèles capables de reproduire ces évolutions pour en déduire les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (Bulter, 2003 ; Chen, 2006 ; Audouin et Bodin 2007,

2008). Le modèle de Chen a été retenu pour sa simplicité de mise en œuvre dans le cas de l'aquifère libre de la Crau, y compris pour des piézomètres recoupant partiellement l'aquifère. Ce modèle nécessite de connaître la coupe technique du piézomètre, puis de caler deux paramètres relatifs à la fréquence de l'oscillation et au coefficient d'amortissement à partir des observations réalisées dans le piézomètre.

Des tubes PVC de diamètre 32 mm ou 40 mm remplis de sable ont été utilisés afin de réaliser des tubes suffisamment lourds pour provoquer un choc hydraulique dans les piézomètres. Deux tubes sont utilisés en série en utilisant le diamètre maximal selon le diamètre interne du piézomètre testé. Au préalable, une sonde de pression est placée dans le piézomètre et enregistre pendant l'essai la variation de hauteur d'eau dans le piézomètre selon un pas de temps de 0,5 à 1 s.

4.2.2. Résultats et interprétation

Des slug tests ont été conduits sur 13 piézomètres. Chaque cycle de montée/descente a été réalisé 3 fois, permettant d'obtenir jusqu'à 6 estimations de la perméabilité indépendantes par point, sachant que certains enregistrements ont dû être écartés pour des problèmes techniques liés au déplacement de la sonde de mesure.

Tous les piézomètres testés présentent une réponse cyclique permettant l'application du modèle de Chen (2006). La figure suivante (Illustration 22) présente un exemple d'enregistrement obtenu à 1Hz au piézomètre X17 et le calage du modèle associé.

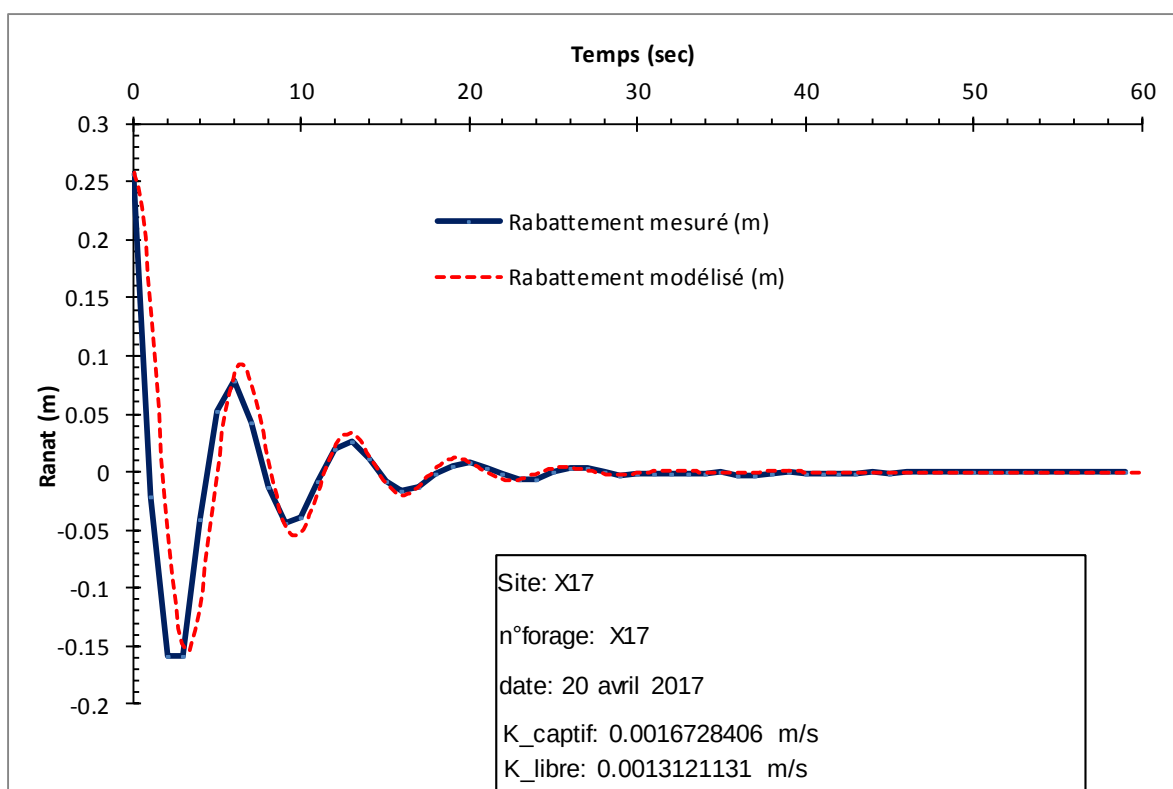


Illustration 22 : Exemple d'enregistrement du rabattement (rabattement normalisé) obtenu à 1Hz au piézomètre X17.

L'écart type σ calculé pour chaque point totalisant n mesures indépendantes a été utilisé pour calculer l'erreur relative associée à la valeur moyenne $\bar{K}$ de la perméabilité :

$$\epsilon(\%) = \frac{\sigma}{\bar{K}\sqrt{n}}$$

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant pour chaque point (Illustration 23), et représentés spatialement sur l'Illustration 24.

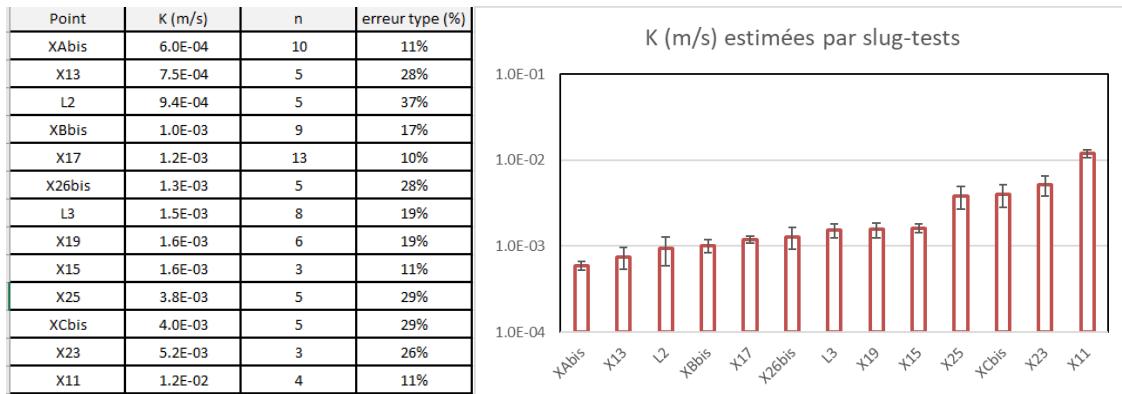


Illustration 23 : Tableau des résultats des slug-tests et représentation graphique des perméabilités estimées.

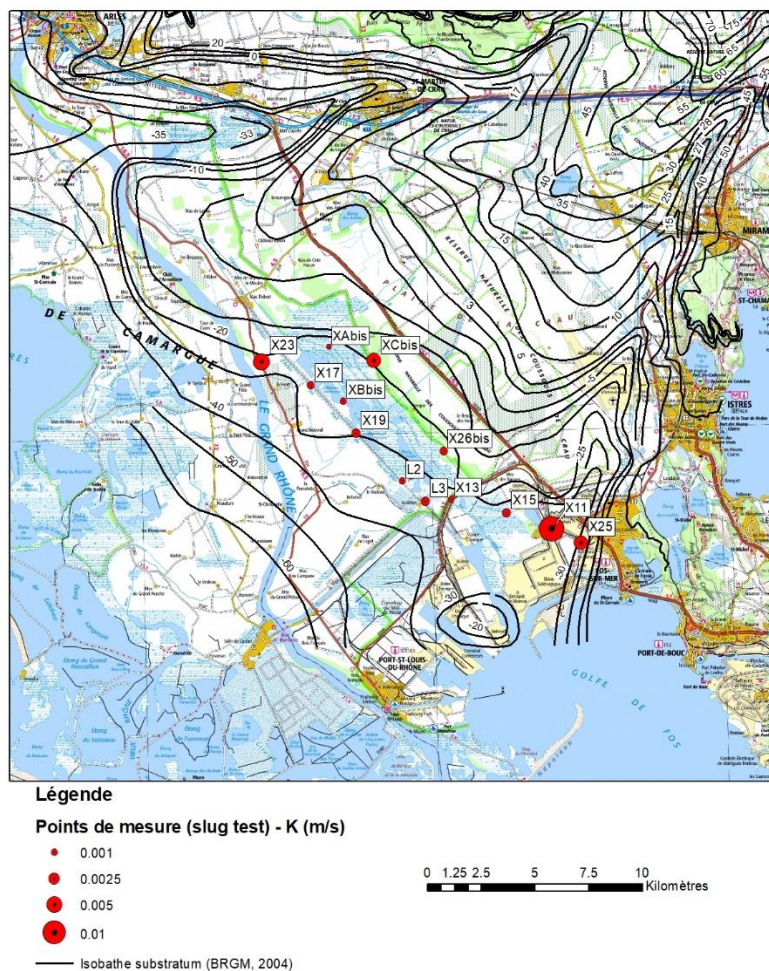


Illustration 24 : Report des perméabilités estimées à partir des slug-tests et des isobathes du substratum sur le fond IGN.

Les isobathes reportées sur l'illustration 24 sont issues de l'étude menée sur la géométrie de l'aquifère de Crau en 2004 (Roure, 2004). Depuis, des nouveaux forages ont été réalisés en Basse Crau et permettraient d'affiner cette géométrie dans le secteur. Ce sera mené dans la suite de l'étude.

Les résultats sont relativement homogènes et semblent mettre en évidence un secteur plus perméable vers X25 et X11. La variabilité observée sur la perméabilité peut résulter de l'état de cimentation de la matrice argilo-sableuse et de la succession d'épandage de nappes alluviales présentant des granulométries variables selon l'énergie de dépôt.

À ce stade, il est important de convertir ces informations en transmissivité à partir des informations relatives à l'épaisseur des cailloutis (Illustration 25) pour relier ces observations à l'évolution de la piézométrie de la Basse Crau. Ce résultat est cependant cohérent avec l'existence d'un approfondissement du substratum qui marque la position d'un paléo-chenal majeur (sillon de Miramas) assurant le drainage de la nappe de Crau sur sa bordure est (Dellery *et al.*, 1964 et Roure, 2004). Cette forte perméabilité vers X11 et X25, associée à une plus grande épaisseur des cailloutis (Illustration 25) permet d'expliquer par une forte transmissivité l'existence d'un axe d'écoulement préférentiel dans la nappe de Crau. Pour vérifier les résultats de transmissivité, les résultats seront comparés dans la suite du projet aux valeurs disponibles en bibliographie. Cela permettra de valider la réalisation des slug-test pour l'estimation de la perméabilité.

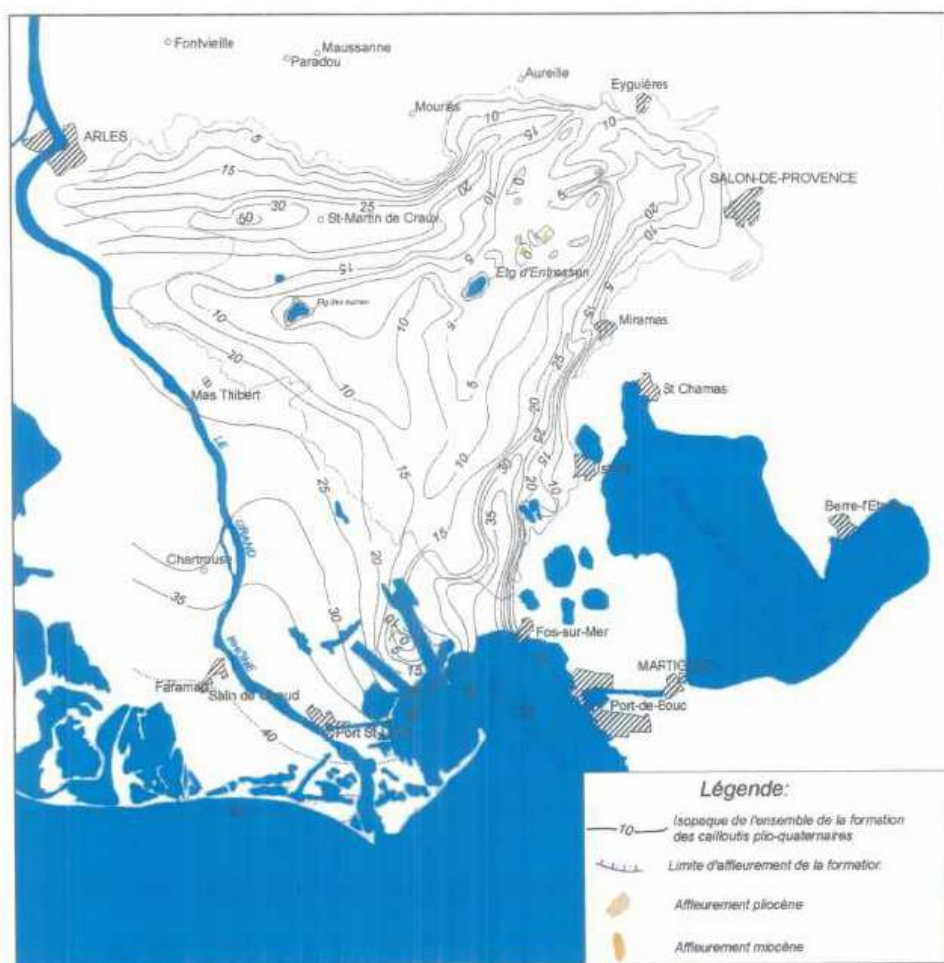


Illustration 25 : Carte des isopaques des formations plio-pléistocènes de la Crau, d'après Coulomb et Roux, 1978 modifiée par Roure 2004.

Le secteur le plus perméable est également à proximité immédiate de la tranchée drainante ; ces fortes perméabilités permettent d'envisager des interactions fortes entre l'aquifère et la surface libre de la tranchée drainante à ce niveau. Ce résultat est cohérent avec l'analyse de l'évolution de la piézométrie dans ce secteur suite à la mise en place de la tranchée drainante (cf. § 2.2).

Les autres points sont assez homogènes et montrent des perméabilités inférieures parfois d'un ordre de grandeur, à l'exception de XCBis et X23. Ces résultats sont cohérents avec les résultats des 2 campagnes de sondages réalisés dans les années 60 dont les résultats sont reportés par Dellery *et al.* (1964). Cela sera détaillé dans la suite du projet.

5. Représentation du biseau salé

5.1. APPROCHE THÉORIQUE

5.1.1. Objectifs du réseau SIMBA par rapport à la 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, ANTEA). 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. 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), 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. 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 paragraphe suivant.

5.1.2. Application des concepts de Ghyben-Herzberg et de zone de transition à l'aquifère de Crau

Les études de Dellery *et al.* (1964) et CERIC (1977) ont démontré que le concept d'équilibre hydrostatique entre deux masses d'eau de densités différentes selon la loi de Ghyben-Herzberg permet d'expliquer la répartition de la salinité dans l'eau souterraine de la Basse Crau. CERIC (1977) l'utilise également pour analyser différents scénarios d'aménagements tels que le creusement de canaux ou l'évolution relative de la charge hydraulique d'eau douce.

Ce concept relativement simple suppose néanmoins une interface abrupte entre l'eau douce et l'eau salée, tandis que les observations par diagraphies montrent toujours un passage plus ou moins rapide sur une verticale d'une eau douce à une eau salée en profondeur. La zone d'eau saumâtre isolée entre les niveaux d'eau douce et salée correspond à une zone de

transition décrite par Cooper *et al.* (1964), dont la forme dépend des flux d'eau et des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (Barlow, 2003).

Cette zone de mélange est décrite sous certaines hypothèses par une équation 1D du transport permettant d'assimiler une diagraphie en forage à une courbe de répartition de la salinité du type (Schmorak et Mercado, 1969) :

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{z - \bar{z}}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad Eq. 1$$

Avec ε l'évolution relative (%) de la salinité selon la verticale z , $\bar{z}$ la position du mélange en proportions égales (50 %) des deux eaux en contact et σ la largeur de l'interface. Cette largeur est définie par l'écart type de la fonction de répartition de la salinité, qui est directement mesurable à partir des observations selon la relation suivante :

$$\sigma = \frac{1}{2} [z_{\varepsilon=15,9\%} - z_{\varepsilon=84,1\%}] \quad Eq. 2$$

Où $z_{\varepsilon=15,9\%}$ et $z_{\varepsilon=84,1\%}$: profondeur du mélange contenant 15,9 et 84,1 % d'eau du pôle salé respectivement.

La position de l'interface est alors définie par $\bar{z}$. Elle est identifiable sur une diagraphie par la position du mélange en proportion égale d'eau douce de la nappe de la Crau avec une eau de salinité⁸ 39, soit la position de l'eau présentant une salinité de 19,5. La valeur de salinité 20 est retenue par la suite pour simplifier la définition de la position de l'interface salée, et pourra prendre l'unité de g/l afin de faciliter la compréhension des documents produits. On retrouve alors la valeur proposée par CERIC pour positionner l'interface eau douce/eau salée.

Ces éléments théoriques permettent de discuter de l'influence d'une faible variation de charge d'eau douce sur l'évolution de la salinité. La figure suivante (Illustration 26) montre l'évolution théorique des diagraphies dans un piézomètre qui présente initialement un niveau d'eau à 75 cm au-dessus de la mer, et qui va chuter de 25 cm à deux reprises (courbe verte puis rouge). L'application de la relation de Ghyben-Herzberg en tenant compte d'un effet de dispersion permet de proposer les évolutions des profils 1 et 2. La dispersivité utilisée (alpha) est de 5 cm, elle engendre un écart-type de la distribution de 1 m et 1,414 m relatifs aux déplacements x de 10 et 20 m de l'interface respectivement, calculés selon la relation suivante :

$$\sigma = \sqrt{2\alpha \times x} \quad Eq. 3$$

La figure de l'illustration 26 montre également le besoin de précision sur les relevés piézométriques et le nivellement des points.

⁸ La salinité d'une eau est exprimée sans unité depuis la création de l'échelle pratique de salinité en 1978 (Wagner *et al.*, 2006). Elle est mesurée de manière indirecte à partir de la conductivité spécifique de l'eau à 25 °C à la pression atmosphérique, et peut dans ce cas prendre l'unité PSU (Practical Salinity Unit).

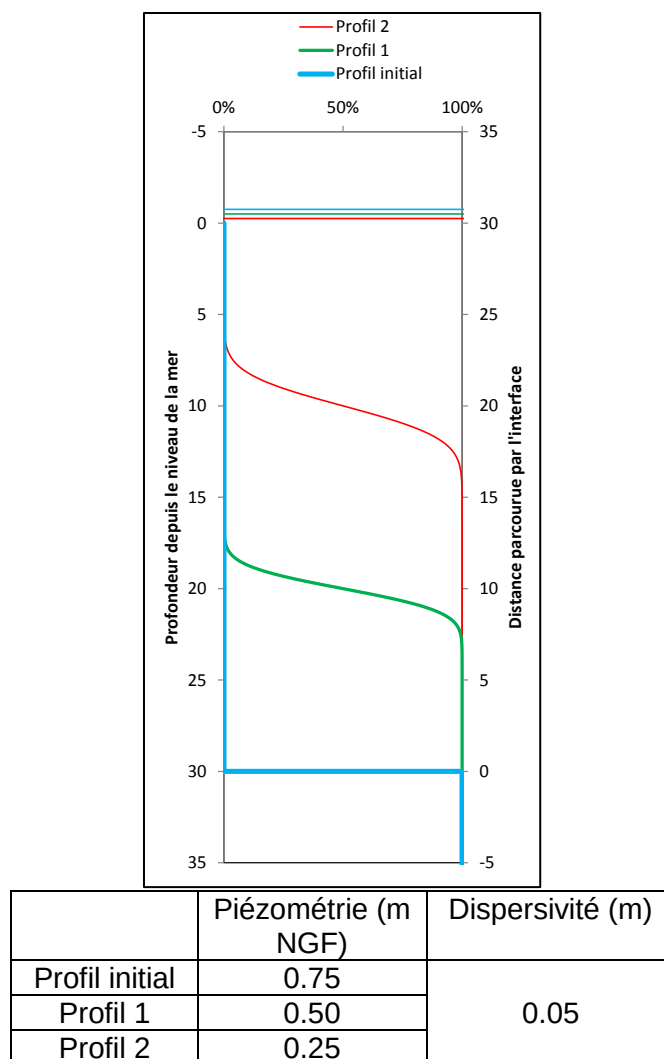


Illustration 26 : Évolution théorique de la distribution de salinité lors d'une diagraphie selon le principe de Ghyben-Herzberg complété par l'hypothèse d'un transport dispersif 1D selon la verticale.

Cette approche permet de décrire sur une verticale l'évolution de la salinité en tenant compte de l'étalement de la zone de transition sur une verticale. Elle suppose un aquifère homogène avec de très faibles écoulements horizontaux. Ce schéma simpliste doit pouvoir s'appliquer à l'aquifère de Crau en excluant les secteurs influencés par la recharge, notamment en cas d'alimentation par les eaux de surface. Cette méthode nécessite de connaître les paramètres suivants :

- la piézométrie ;
- la densité de l'eau douce de l'aquifère de Crau en amont et de l'eau salée, et la température de l'aquifère ;
- et la largeur de la zone de transition pour reconstituer la distribution complète de la salinité.

5.2. MÉTHODE D'ANALYSE DES DIAGRAPHIES

La méthode présentée précédemment est appliquée aux résultats des diagraphies réalisés dans le projet SIMBA selon le protocole défini au § 3.3. La masse volumique ρ_e de l'eau douce est supposée constante et égale à 1.00 kg/dm^3 pour une température de 15°C . Le pôle salé de l'aquifère présente une salinité de 39, ce qui permet de lui attribuer une masse volumique ρ_s de l'ordre de $1,025$ à $1,026 \text{ kg/dm}^3$ à 15°C . La relation de Ghyben Herzberg devient :

$$\bar{z} = \frac{\rho_e}{\rho_e - \rho_s} h \cong 39 \times h \quad \text{Eq.4}$$

La position théorique de l'interface est donc totalement déterminée par la connaissance de la piézométrie. L'étalement de la zone de transition est mesurable à partir de chaque diagraphie en appliquant l'équation 2 pour définir l'écart-type de la distribution.

Cette méthode d'interprétation n'est applicable que si le piézomètre testé permet d'atteindre la valeur de salinité de 20 pour définir $\bar{z}$. Dans le cas contraire, le piézomètre pourra présenter une salinité forte (mais <20) par effet de diffusion, mais il ne sera pas atteint par le biseau salé au sens strict.

Une application de cette méthode de caractérisation verticale du biseau salé est proposée pour le piézomètre X19 (Illustration 27) et L2 (Illustration 28).

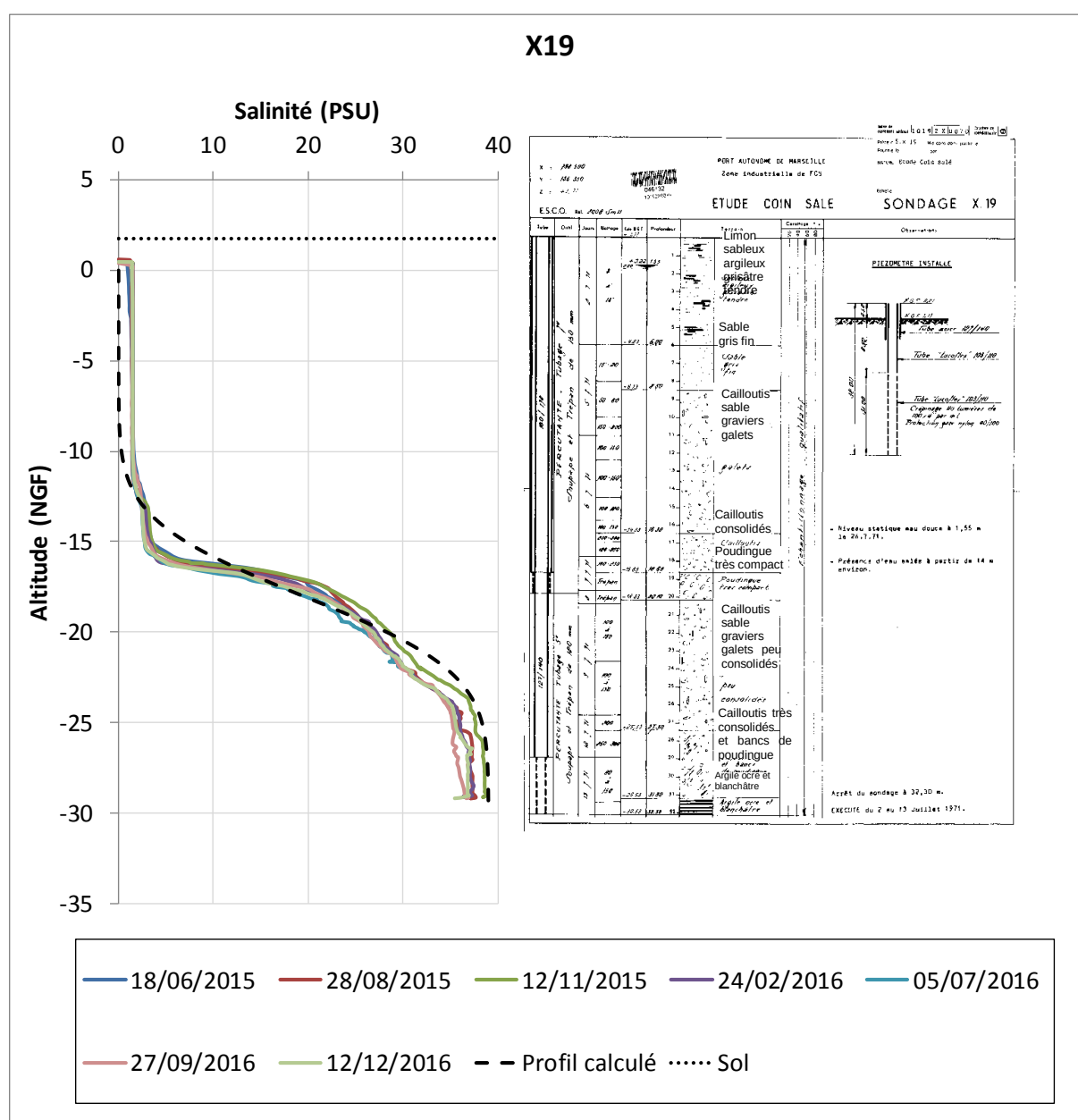


Illustration 27 : Profil de diagraphie calculé pour le piézomètre X19 et comparé aux différentes diagraphies mesurées, ainsi qu'à la coupe technique et géologique du piézomètre.

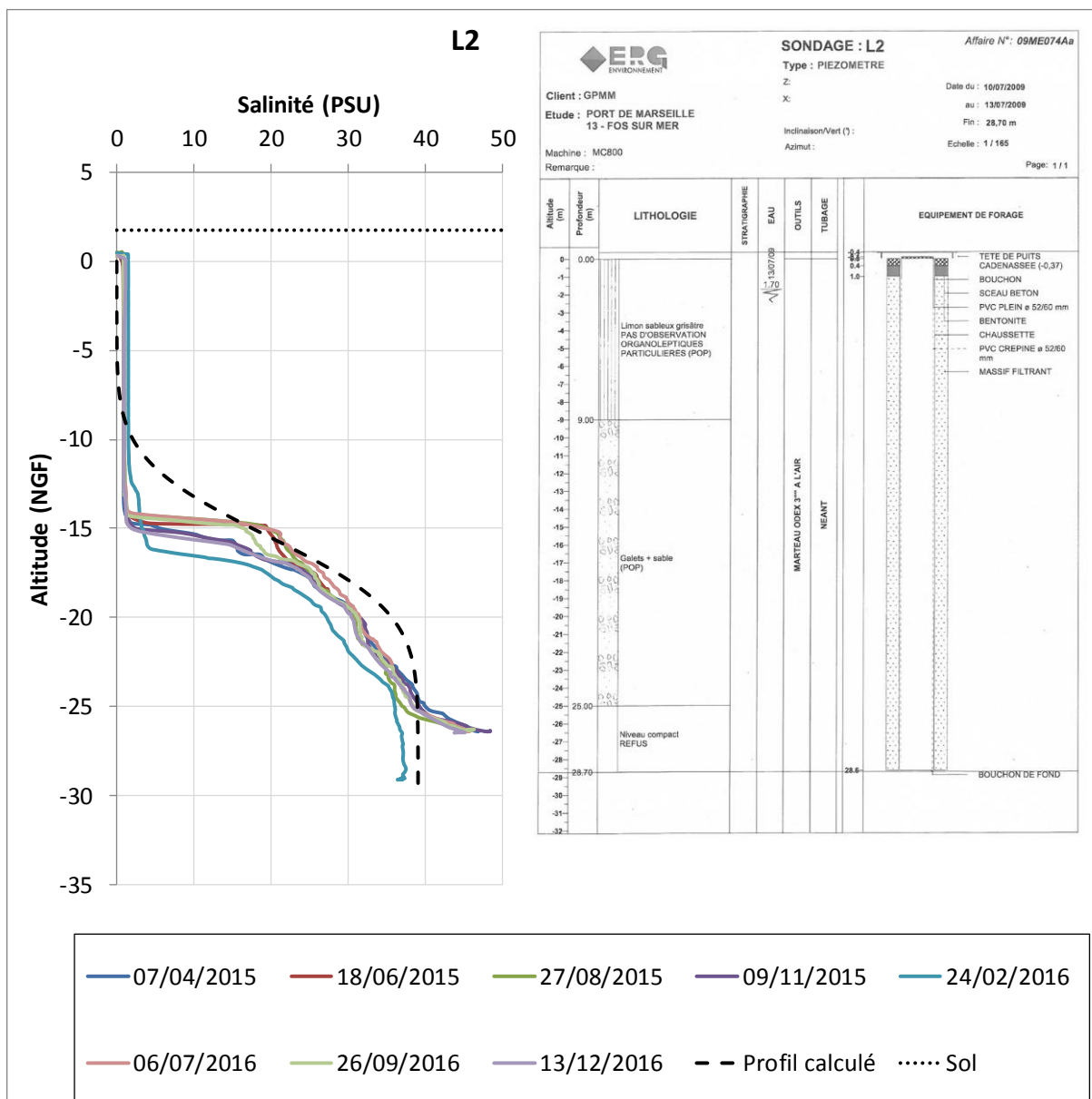


Illustration 28 : Profil de diagraphe calculé pour le piézomètre L2 et comparé aux différentes diagraphies mesurées, ainsi qu'à la coupe technique et géologique du piézomètre.

Les différents profils de salinité mesurés varient assez peu dans le temps et peuvent donc être représentés par un profil théorique moyen calculé à partir de l'équation 3 avec :

- un niveau piézométrique égal à la moyenne des relevés piézométriques réalisés pour chaque diagraphie ;
- un écart-type σ égal à la moyenne des écart-types obtenus par l'équation 2 pour chaque diagraphie.

L'application de cette méthode aux autres points du réseau devrait permettre de comprendre ce qui contrôle la variabilité de σ , à la fois dans le temps et l'espace. Ainsi, plusieurs diagraphies complétées par les suivis physico-chimiques du réseau SIMBA seront interprétés pour voir si σ évolue dans le temps en un point donné (analyse des évolutions journalières et saisonnières) et si l'évolution spatiale de σ peut être reliée à des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, notamment les gradients hydrauliques ou/et la transmissivité.

5.3. PREMIERS ÉLÉMENTS SUR LA VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE DU BISEAU SALÉ

5.3.1. Principe et limites de la méthode de spatialisation

L'application du principe de Ghyben-Herzberg permet de reproduire de façon satisfaisante la position de l'interface de salinité 20 sur les diagraphies. Cette méthode peut donc être généralisée à l'ensemble de l'aquifère en utilisant comme donnée d'entrée pour l'équation 4 la surface piézométrique, et en tenant compte de la profondeur maximale définie par le toit du substratum (cf. Illustration 24), puisque la position de l'interface calculée doit être dans la formation aquifère. Cette méthode correspond à la généralisation sous SIG de la méthode proposée par CERIC (1977).

Le calcul est réalisé à l'aide de l'extension Spatial Analyst d'ArcGIS à l'aide de la fonction SetNull (Eq. 5) :

$$Prof_{interface} = \text{SetNull}(-39 * \text{PIEZO} < \text{SUB}, -39 * \text{PIEZO}) \quad \text{Eq. 5}$$

Où PIEZO correspond à la surface piézométrique et SUB correspond à la surface définissant le toit du substratum.

Ce calcul est utilisé pour représenter l'extension vers l'amont de l'iso-salinité 20. Ainsi, plus en amont, une salinité de 20 ne peut théoriquement pas être atteinte dans les cailloutis, quelle que soit la profondeur d'observation dans le piézomètre recoupant la formation.

Ce calcul permet de comprendre que le biseau salé sera rapidement limité à l'amont par le toit du substratum. En effet, une piézométrie de 1 m NGF positionne déjà l'interface à - 39 m NGF, ce qui ne peut s'observer qu'au niveau des sillons des limites sud (vers Fos) et nord (vers Saint-Martin-de-Crau) de la zone étudiée. Compte tenu de la géométrie de l'aquifère, la position de l'interface est donc majoritairement contrôlée par les isopièzes comprises entre 0,2 et 0,5 m NGF, ce qui nécessite de réaliser des campagnes piézométriques focalisées sur l'aval de l'aquifère avec une résolution spatiale adaptée.

La sensibilité de cette méthode à la qualité de la donnée piézométrique est très importante et est directement déduite de l'application de l'équation 4. Aussi, même en présence de données piézométriques fiables, les incertitudes liées à l'interpolation spatiale de la surface piézométrique restent très importantes. De ce fait, il est difficile de comparer des résultats obtenus pour deux campagnes piézométriques différentes si celles-ci ne concernent pas les mêmes points et présentent une résolution spatiale différentes.

La surface piézométrique à prendre en compte correspond au niveau d'eau atteint par la colonne d'eau douce dans l'aquifère, quelle que soit la position du biseau salé sous-jacent. Il n'y a pas lieu ici de corriger la piézométrie mesurée tant que celle-ci correspond à un niveau d'eau douce mesuré dans un piézomètre crépiné sur toute la hauteur traversant les cailloutis. Toutes les coupes techniques disponibles pour les piézomètres utilisés lors des campagnes piézométriques montrent que cette hypothèse est vérifiée.

5.3.2. Évolution à long terme

Les études et suivis historiques montrent que le biseau salé était proche de la limite de captivité de la nappe avant les aménagements industrialo-portuaire. Il est difficile de représenter graphiquement à l'échelle de la Basse-Crau comment le biseau salé a évolué suite à ces aménagements, car le type de donnée disponible a également varié. En particulier, le

tracé d'isopièzes inférieures à 1 m NGF est rarement donné, ce qui est pourtant l'élément déterminant pour localiser le biseau salé.

À long terme, il est possible de comparer le déplacement théorique de l'interface 20 g/l suite à la mise en place de la tranchée drainante, car la profondeur des cailloutis est suffisante pour que l'isopièze 0,5 m NGF puisse décrire la position de l'interface en Septembre 1962. La figure suivante (Illustration 29) représente l'évolution de l'interface à 20 g/l pour deux situations de basses eaux de la nappe de Crau en 1962 et en 2017. La principale modification du fonctionnement hydrogéologique de ce secteur correspond à la mise en place de la tranchée drainante. Dans ce secteur, la tranchée drainante stabilise la piézométrie à un niveau légèrement supérieur et réalimente donc la nappe, notamment en aval de X25. Ceci a pour conséquence de repousser le biseau salé de 500 à 800 m plus en aval.

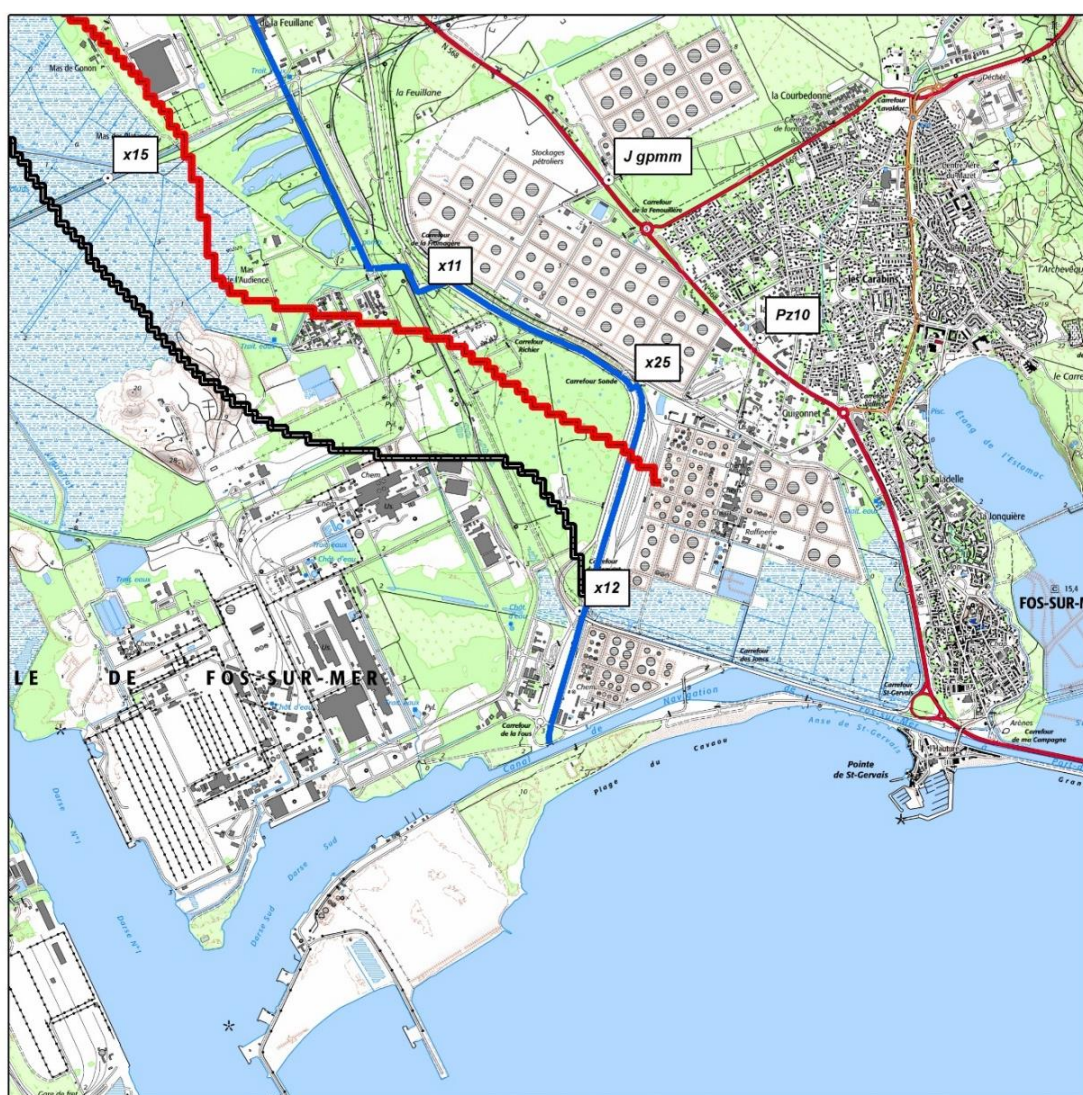


Illustration 29 : Limites théoriques du biseau salé - variations annuelles.

L'illustration 29 montre également une évolution du tracé du biseau salé à proximité du point X12, où le biseau salé semble être repoussé encore plus au sud. Pourtant, à ce niveau, la surface piézométrique correspond à un axe de drainage majeur et est donc plus basse, ce qui devrait au contraire faire « remonter » l'interface salée. L'explication provient de la remontée abrupte du substratum vers l'est qui amplifie l'influence de la piézométrie sur le déplacement du biseau salé vers le sud. Sur les figures suivantes, sont représentées les positions théoriques du biseau salé en septembre 1962 et mars 2017, et l'influence de la piézométrie et de la position du substratum (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et Illustration 31). En 1962 (à gauche sur l'illustration 31), l'interface à 20 g/l est à une altitude relativement haute et n'est pas influencée par la remontée du substratum jusqu'à environ 20 m de profondeur, puisque la piézométrie proche de 0.5 m NGF positionne le biseau salé à cette profondeur. La piézométrie n'est pas connue plus à l'est, ce qui ne permet pas de prolonger le tracé de l'interface qui doit logiquement s'orienter vers le sud. En 2017 (à droite sur la figure), cette même interface est située à une altitude plus basse et vient buter sur le substratum dès 25 m de profondeur.

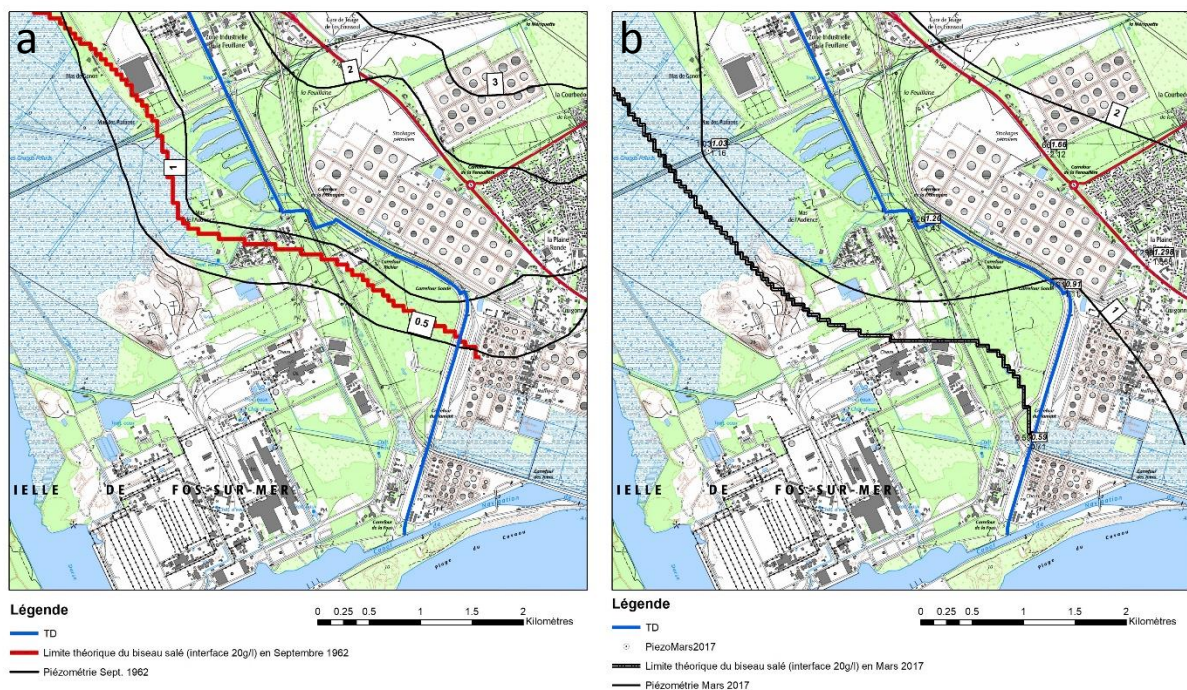


Illustration 30 : Influence de la piézométrie sur la position théorique du biseau salé en septembre 1962 (a) et en mars 2017 (b) à proximité de la tranchée drainante.

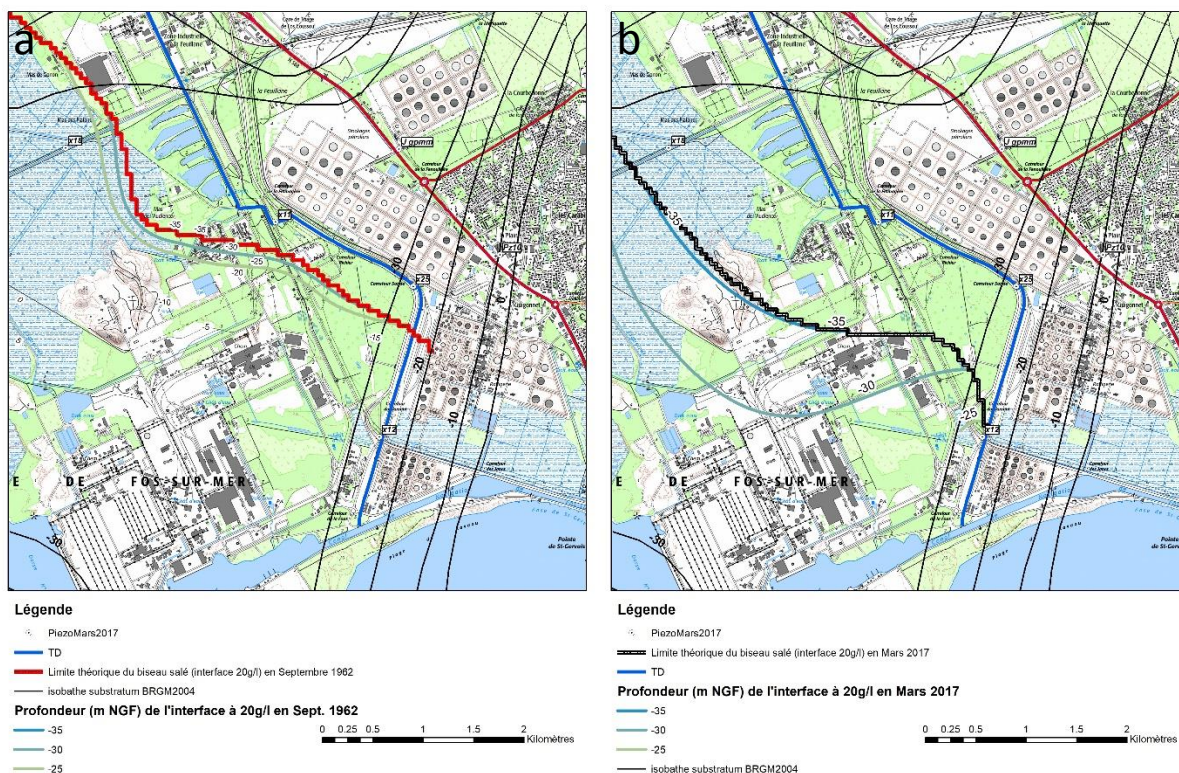


Illustration 31 : Influence de la position du substratum sur la position théorique du biseau salé en septembre 1962 (a) et en mars 2017 (b) à proximité de la tranchée drainante.

Ainsi, l'augmentation de la piézométrie consécutive à la mise en place de la tranchée drainante a permis de repousser l'interface qui se retrouve à plus grande profondeur limitée au sud-est par la géométrie du substratum. Cet exemple montre qu'il aurait été impossible de comprendre l'évolution spatiale du biseau salé suite à une variation de charge d'eau douce sans prendre en compte la géométrie de l'aquifère.

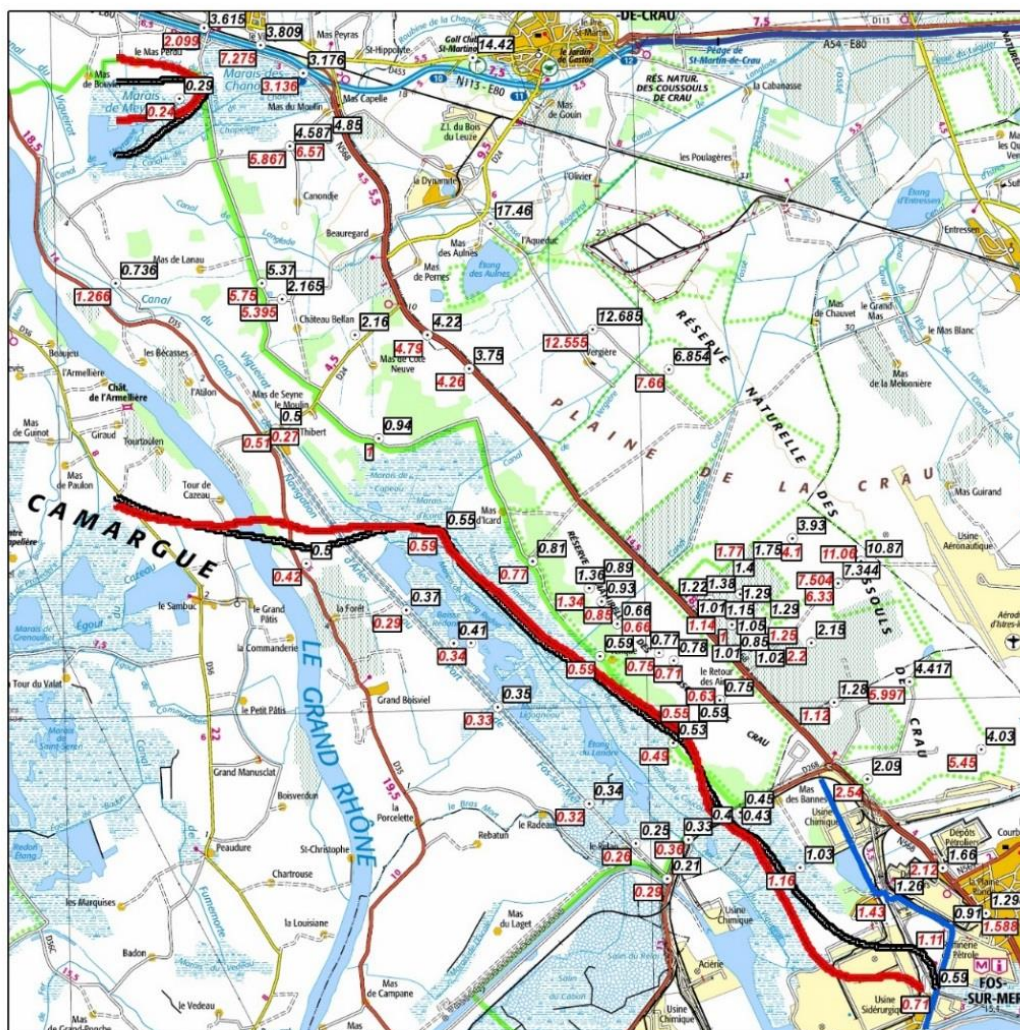
5.3.3. Évolution saisonnière

Des campagnes piézométriques sont réalisées dans le cadre du projet SIMBA pour identifier l'impact de l'évolution annuelle de la piézométrie (alternance hautes eaux/basses eaux) sur le déplacement du biseau salé.

Ces campagnes permettront de tracer avec précision les isopièzes inférieures à 1 m NGF pour reproduire l'évolution spatiale de l'interface à 20 g/l dans l'aquifère. Deux campagnes ont déjà été réalisées en 2017, l'une en mars 2017 et l'autre en octobre 2017. La campagne de Mars peut être considérée comme une campagne de basses eaux compte tenu de cette année hydrologique particulière. La campagne d'octobre 2017 est également une campagne réalisée en basses eaux, mais elle présente au niveau de la limite de captivité de la nappe des niveaux piézométriques légèrement plus élevés que ceux observés en mars d'environ 10 cm, et jusqu'à plus de 40 cm dans la zone amont drainée par la tranchée drainante. Par exemple, le niveau d'eau passe de 2,09 à 2,54 m NGF entre mars et octobre 2017 au piézomètre P13 à proximité du Ventillon. Cette fluctuation est probablement faible par rapport à l'alternance hautes eaux / basses eaux qui n'a pas pu être caractérisée jusqu'à présent, mais elle permet déjà de visualiser l'impact de l'évolution hydrodynamique sur le déplacement du biseau salé.

La figure suivante (Illustration 32) présente les relevés piézométriques de ces deux campagnes avec le tracé théorique de l'extension de l'isovaleur 20 g/l correspondante. Le déplacement de l'interface est très faible à l'exception de la zone sud-est qui enregistre un déplacement jusqu'à 800 m vers le sud en octobre, en lien avec la plus forte variation piézométrique enregistrée dans ce secteur.

Cette méthode permet de reproduire l'extension du biseau salé jusqu'au sud de Mas Thibert, mais également sous le marais de Meyranne, ce qui est cohérent avec les observations réalisées au piézomètre PAR1 (ou PR1) retenu dans le réseau SIMBA. Des campagnes piézométriques réalisées en hautes eaux permettront de préciser cette évolution saisonnière du biseau salé dans la nappe de Crau.



Légende

- Limite théorique du biseau salé (interface 20g/l) en Octobre 2017
- Limite théorique du biseau salé (interface 20g/l) en Mars 2017
- TD
- PiezoMars2017 (étiquettes noires)
- PiezoOct2017 (étiquettes rouges)

0 0.75 1.5 3 4.5 6 Kilomètres

Illustration 32 : Limites théoriques du biseau salé calculées en mars et octobre 2017 lors des deux campagnes piézométriques.

5.3.4. Évolution à court terme (mensuelle, journalière et infra-journalière)

Les premières observations réalisées sur les chroniques permettent de visualiser des fluctuations cycliques journalières de l'ordre de 5 cm liées à la propagation de l'onde de marée sur l'ensemble du réseau de suivi SIMBA. Ces variations doivent théoriquement s'accompagner de variations de près de 2 m ($39 \times 0,05 = 1,95$ m) de l'interface salée. À titre d'exemple, la figure suivante (Illustration 33) présente l'évolution de la ou piézométrie et de la salinité sur le piézomètre L2 au mois de juillet 2017. On observe bien une augmentation de salinité liée à la remontée de l'interface salée parfaitement corrélée à une baisse du niveau piézométrique.

La position du capteur dans la colonne d'eau au niveau de l'interface permet de supposer que la colonne d'eau a une densité moyenne qui reste proche de celle de l'eau douce, et que le déplacement du biseau salé ne modifie pas sensiblement la densité de la colonne d'eau au-dessus du capteur. Ainsi, l'effet de la variation de densité de la colonne d'eau sur la variation de charge hydraulique mesurée par le capteur de pression reste négligeable par rapport à la fluctuation liée au phénomène de marée.

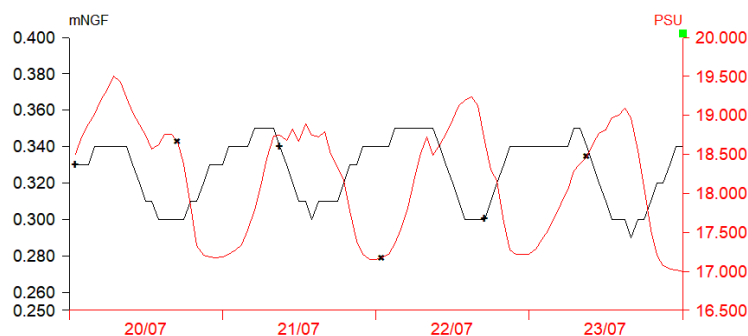


Illustration 33 : Évolutions comparées de la salinité (exprimée en PSU, en rouge sur le graphique) et de la piézométrie (en mNGF, en noir sur le graphique) au piézomètre L2 du 20 au 24 juillet 2017

À l'échelle mensuelle, et pour des conditions hydrologiques différentes, les fluctuations de salinité sont encore plus fortes (Illustration 34) pour une même variation piézométrique.

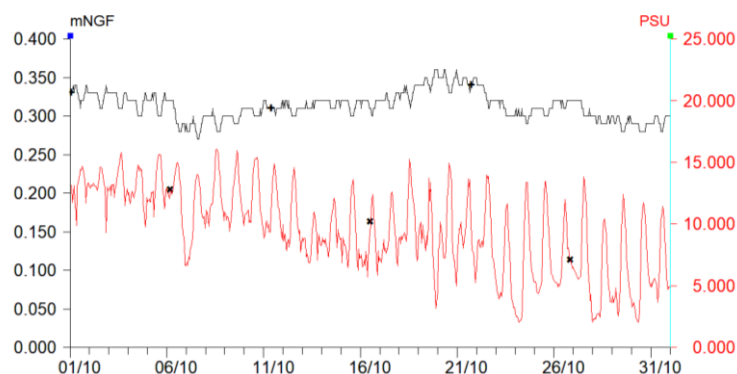


Illustration 34: Évolutions comparées de la salinité (exprimée en PSU, en rouge sur le graphique) et de la piézométrie (en mNGF, en noir sur le graphique) au piézomètre L2 en octobre 2017

L'interprétation des relations hauteur/salinité en fonction de la position du capteur sera réalisée en chaque point du réseau SIMBA pour comprendre la dynamique d'évolution journalière de la distribution de la salinité sur une verticale. Cette information sera utile pour bien comprendre

l'origine de la variabilité observée sur les diagraphies, mais aussi mieux comprendre à quelle échelle de temps il faut travailler pour bien identifier l'impact des changements de condition aux limites.

6. Perspectives

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 70. 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 celle-ci date de 2004 (Roure, 2004). Le tracé des isobathes du mur de l'aquifère proposée par celle-ci sont utilisées dans le rapport, mais de nouveaux forages ont été réalisés depuis en Basse Crau, permettant d'affiner la profondeur du substratum dans le secteur. Les données de ces forages disponibles en BSS seront utilisées par la suite pour affiner les isobathes du mur des cailloutis.

Ce premier travail a pu aller jusqu'à l'identification de variations saisonnières, annuelles et pluri-annuelles dans la position du biseau salé. Mais d'autres développements sont nécessaires pour que cette information sur la position de l'interface puisse permettre de proposer une évolution verticale de la salinité dans l'aquifère. Il sera alors possible de proposer des tracés théoriques de courbe d'iso-salinité pour des salinités inférieures et compatibles avec les usages (par exemple 0,5 ou 1). Ceci suppose de disposer d'un paramètre contrôlant la largeur de l'interface qui puisse être spatialisé. Les futures investigations chercheront donc 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 (cf. § 5.2).

Enfin, ces représentations théoriques du biseau salé supposent vérifiées certaines hypothèses fortes, dont la dominance des flux horizontaux par rapport aux flux. Les écarts entre le modèle théorique et les observations réalisées par des diagraphies pourront permettre de comprendre l'impact de la recharge par les eaux de surface sur le déplacement du biseau salé, notamment au point X23 à proximité du Rhône.

Bibliographie

- Audouin O., Bodin J. (2007). - Analysis of slug-tests with high-frequency oscillations. *Journal of Hydrology* (2007) 334, 282-289.
- Audouin O., Bodin J. (2008). - Cross-borehole slug-test analysis in a fractured limestone aquifer. *Journal of Hydrology* (2008) 348, 510-523.
- Barlow, P.M. (2003). - Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast, U.S. Geological Survey Circular 1262, 115 pp.
- Bulter J.J., Garnet E.J., Healey J.M. (2003). - Analysis of slug-test in formations of high hydraulic conductivity. *Ground Water* 41, no. 5 : 620-630.
- Cabinet d'étude RUBY (1968). - Étude du coin salé - État actuel - Influence des aménagements projetés, dispositions à prendre. Note mai 1968, 33 p., 22 pl., 2 annexes.
- Cabinet d'étude RUBY (1968). - Protection contre le coin salé - Étude de la tranchée drainante. Note novembre 1968, 7 p., 1 pl.
- Cabinet d'études RUBY (1968). Protection contre le coin salé - Étude de la tranchée drainante. Note Décembre 1968, 9 p., 4 pl.
- CERIC (1977). - Étude du coin salé - État 1977. Note. Etude n°3708/5102.K, 21 p.
- CERIC (1972). - Étude du coin salé - État 1971 et 1972. Note. Étude n° By/MM-2682/51.02A, 30 p.
- CERIC (1980). - Étude du coin salé - État actuel de l'hydrogéologie - Printemps 1980. Étude n° 4068/51.02A-Ry/BB, 20 p.
- CERIC (1988). - Tranchée drainante. Note de synthèse et état actuel. Étude n° 4757/5106-B1/BB, 17 p.
- CERIC (1993). - Nappe de Basse Crau - Niveaux et salinités depuis 25 ans. Rapport de synthèse. Rapport 5324/C2116, 29 p., 18 pl.
- Chen C.-S. (2006). - An Analytic Data Analysis Method for Oscillatory Slug Tests. *Ground Water* 44, no. 4 : 604-608.
- Cluseau R. (1962). - Étude géophysique de la nappe de la Crau dans la région de Fos-sur-Mer. Rapport BRGM/DS.62.A46, 15 p., 6 Ann.
- Colomb E. *et al.* (1975). - Carte géologique au 1/50 000, feuille de Istres - n° 1019.
- Coulomb E. et Roux R.M. (1978). - La Crau. Données nouvelles et interprétation. *Géologie Méditerranée* Tome, n° 3, p303-324.
- Colombani A. (1965). - Mouillage au canal d'Arles à Bouc. Courrier du 22/09/1965. Ponts et Chaussées, Département des Bouches-du-Rhône, Service Maritime, Canal d'Arles à Bouc.

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.

Couprie P. (date non précisée). - Assainissement des basses terres entre la Durance et la mer – Transformation du débouché à la mer des réseaux de drainage. Notice technique. 16 p.

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

Grand Port Maritime de Marseille (2017). - Bassins Ouest - Canal de Fos au Rhône, Partie Est. Échelle 1/2000. Bathymétrie.

Grand Port Maritime de Marseille (2017). - Bassins Ouest - Canal de Fos au Rhône, Postes d'attente - devant Anti-sel. Échelle 1/500. Bathymétrie.

Hentinger R. (1968). - Étude du biseau salé par carottage électrique - Vallée du Préconil - Vallée du Gapeau (Var) - Zone industrielle de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône). Rapport BRGM/68-SGL-11-GPH, 40 p.

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.

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.

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.

Oliosio A., Lecerf R., Baillieux A., Chanzy A., Ruget F., Banton O., Lecharpentier P., Trolard F., Cognard-Plancq A.L. (2013). - Modelling of drainage and hay production over the Crau aquifer for analysing impact of global change on aquifer recharge. Procedia Environmental Sciences 19. 691 - 700.

Port Autonome de Marseille (1970). - Étude des sols - Données géologiques générales. 35 p.

Port Autonome de Marseille (1981). - Construction de l'écluse. Àdition Port Autonome de Marseille. 20 p.

Roure S., Duvail C., Aunay B., Le Strat P. (2004). - Géodynamique des systèmes Plio-quaternaires 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.

Séraphin, P., Vallet-Coulomb, C., Gonçalves, J. (2016). - Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer, J. Hydrol., 542 (2016), pp. 241-253.

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

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. J., Oblinger, C. J. & Smith, B. A. (2006). - Guidelines and standard procedures for continuous water-quality monitors: station operation, record computation, and data reporting. United States Geological Survey Tech. Meth. 1-D3, 51 pp., <https://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm1D3/pdf/TM1D3.pdf>.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur

117, av. de Luminy
BP168

13276 - Marseille Cedex09 - France

Tél. : 04 91 17 74 77