



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

Ce document a été vérifié par : GUTIERREZ Alexis - Hydrogéologue (D3E/DIR).

**Approbateur :**

Nom : Lambeaux Jean-Louis    Fonction : Dir.régional    Date : 25/02/2019

Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié  
par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

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

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

**Bailly-Comte V., Rivet F. avec la collaboration de Villesseche D. (SYMCAU).** (2019) - Projet SIMBA : Surveillance de l'intrusion marine en Basse Crau. Rapport de synthèse. BRGM/RP-68687-FR, 21 p., 10 ill.

## Synthèse

Le projet SIMBA – Surveillance de l’Intrusion Marine en Basse Crau – mené par le SYMCRAU en partenariat avec le BRGM, avait plusieurs objectifs :

- comprendre les mécanismes à l’origine de l’intrusion saline en basse Crau ;
- identifier les facteurs qui contrôlent l’évolution spatiale et temporelle de la salinité ;
- et, enfin, proposer un réseau de surveillance adapté pour mieux comprendre le phénomène.

Les résultats et les moyens utilisés sont détaillés dans le rapport final de l’étude (Bailly *et al.*, 2019). Le présent rapport a pour objectif de présenter de manière synthétique la problématique du biseau salé en basse Crau et les réponses apportées par le projet aux questions suivantes :

- quelle est l’origine de la salinité observée en basse Crau ?
- quel est l’état actuel de salinisation de l’aquifère de Crau ?
- quels sont les facteurs de contrôle ?
- quels sont les secteurs les plus vulnérables ? Comment peut-on surveiller l’évolution de la salinité de manière optimale ?

# Sommaire

<b>1. Le biseau salé : qu'est-ce que c'est ? Contexte en Crau .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Quels sont les enjeux de préservation sur la nappe de la Crau ? .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Quelle est l'origine de la salinité observée en basse Crau ? .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Quel est l'état actuel de salinisation de l'aquifère de Crau? .....</b>	<b>11</b>
<b>5. Quels sont les facteurs de contrôle de la salinité en basse Crau ? .....</b>	<b>15</b>
<b>6. Quels sont les secteurs les plus vulnérables ? Comment peut-on surveiller l'évolution de la salinité de manière optimale? .....</b>	<b>19</b>
<b>7. Incertitudes et limites de l'approche .....</b>	<b>21</b>
<b>8. Bibliographie.....</b>	<b>21</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Plan de localisation général de la zone d'étude. ....	5
Illustration 2 : Coupe hydrogéologique représentant le contact entre l'aquifère des cailloutis de la Crau et les niveaux peu perméables des limons et alluvions de la Camargue, l'emplacement de la coupe A-B est représenté sur l'illustration 1, SYMCRAU, 2015. ....	6
Illustration 3 : Carte de la nappe de la Crau et localisation des prélèvements agricoles, pour l'eau potable et les industries (source SYMCRAU). ....	7
Illustration 4 : Évolution de l'occupation des sols depuis les années 1950 dans le secteur de Fos-sur-Mer : mise en évidence des aménagements industrialo-portuaires (adapté d'après les cartes IGN disponibles sur Geoportail). La couleur orange correspond à des eaux salées.....	9
Illustration 5 : Synthèse des relations de proportionnalité entre les hauteurs de nappe et les profondeurs d'iso-salinité 20, 6,3 et 1. ....	11
Illustration 6 : Résultats du calcul de l'extension du front salé pour deux situations hydrologiques contrastées : en hautes-eaux (octobre 2017) et basses-eaux (avril 2018).....	12
Illustration 7 : Modèles conceptuels d'intrusion saline pour 2 géométries du toit du substratum. ....	15
Illustration 8 : Représentation simplifiée des différents forçages qui contrôlent l'évolution de la position du biseau salé en basse Crau. ....	16

## 1. Le biseau salé : qu'est-ce que c'est ? Contexte en Crau

D'un point de vue géologique, la plaine de la Crau, ancien cône de déjection de la Durance, est composée de cailloutis alluvionnaires fréquemment cimentés en poudingue compact, mais fissurés et discontinus et extrêmement perméables (Wuilleumier *et al.*, 2018). Ils abritent une nappe : la nappe de la Crau. 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 fluvio-marines quaternaires de Camargue (Illustration 1).

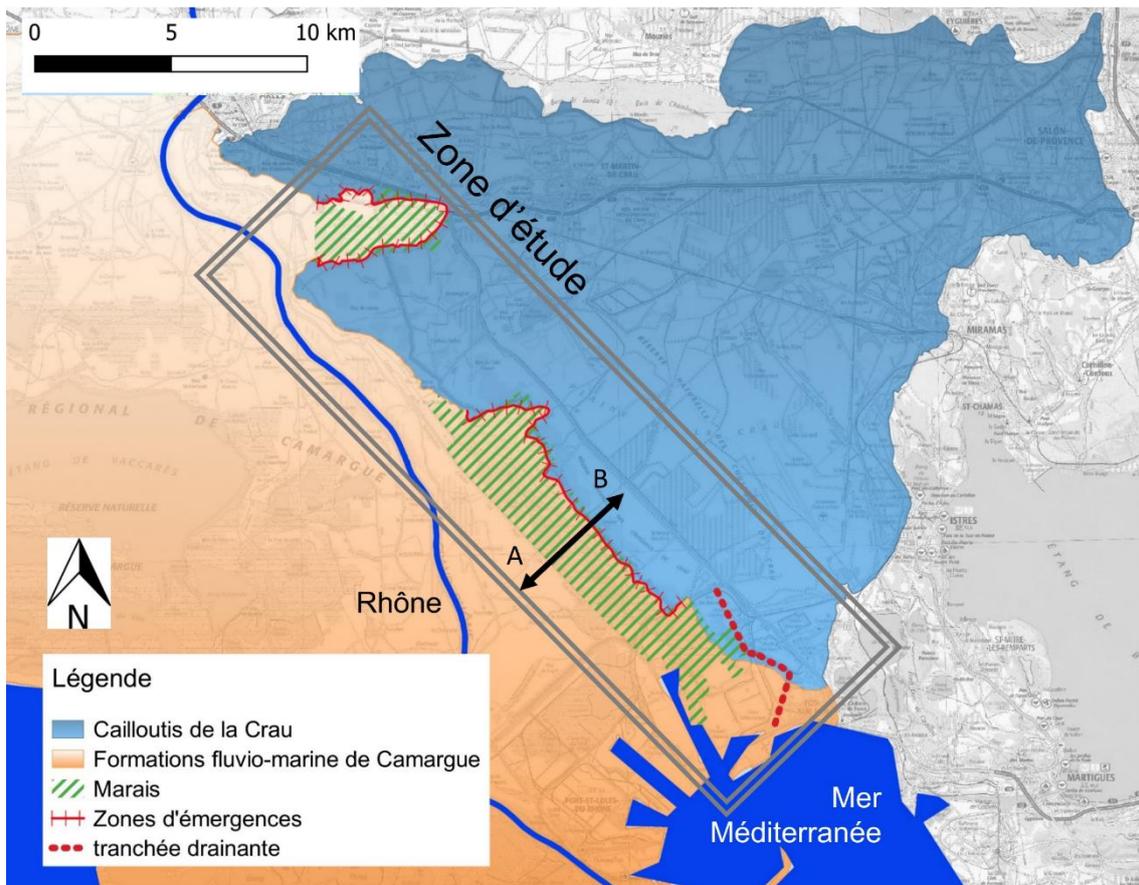


Illustration 1 : Plan de localisation général de la zone d'étude.

Dans les zones littorales, les aquifères sont en contact avec l'eau salée d'origine marine. En fonction de l'état quantitatif de la ressource, et des modalités de gestion, celle-ci peut envahir les formations géologiques côtières aquifères. L'eau salée, d'une densité moyenne de 1,025 kg/l est plus dense que l'eau douce. L'eau douce va ainsi « flotter » au-dessus des eaux marines souterraines salées qui sont susceptibles de pénétrer vers l'intérieur des terres avec une intensité variable selon le niveau de perturbations des équilibres entre les deux types d'eaux.

La nappe de la Crau s'écoule depuis le nord-est vers le sud-ouest en direction de la Camargue et de 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 l'eau douce et l'eau salée, ce qui constitue le biseau salé (Illustration 2, vue en coupe selon le transect A-B de l'illustration 1). La nappe de la Crau présente une salinité proche de 0,5<sup>1</sup>, tandis que l'eau de mer a une salinité proche de 40. Ainsi, le mélange constitué de 50 % d'eau douce et de 50 % d'eau salée présente une salinité de 20. Cette valeur permet ainsi de caractériser la position de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée dans la nappe.

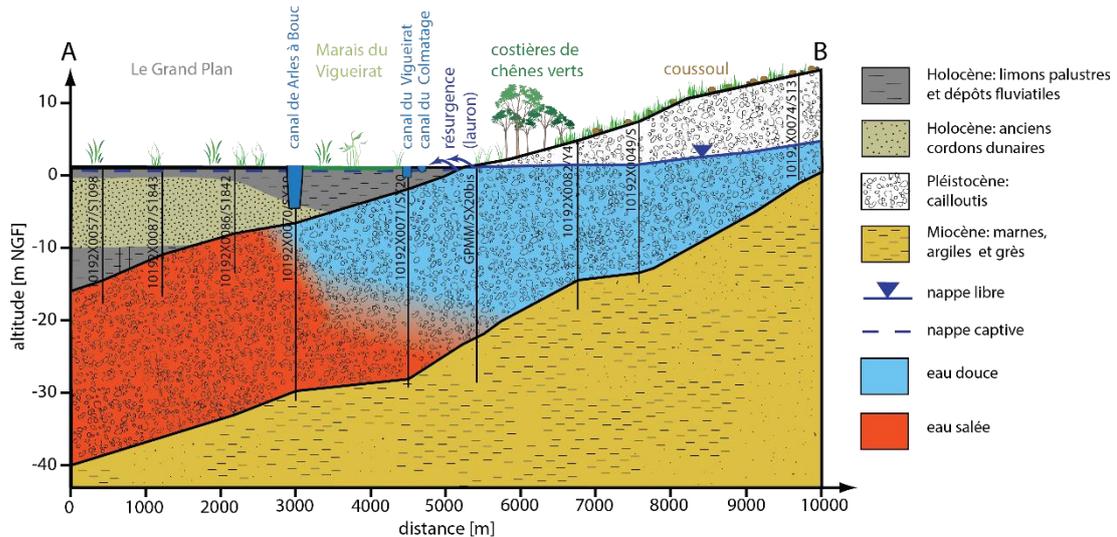


Illustration 2 : Coupe hydrogéologique représentant le contact entre l'aquifère des cailloutis de la Crau et les niveaux peu perméables des limons et alluvions de la Camargue, l'emplacement de la coupe A-B est représenté sur l'illustration 1, SYMCRAU, 2015.

<sup>1</sup> La salinité s'exprime sans unité ou en « unité de salinité pratique » (PSU en anglais). Une salinité de 1 (PSU) correspond à 1 g de sel par kg d'eau de mer.

## 2. Quels sont les enjeux de préservation sur la nappe de la Crau ?

En l'absence de ressource superficielle pérenne tout au long de l'année, la nappe de la Crau constitue l'unique ressource en eau sur le territoire. Sur un volume de réserve estimée à 550 Mm<sup>3</sup>, environ 80 Mm<sup>3</sup> sont prélevés annuellement. Les ordres de grandeur des prélèvements par usage sont : 45 % pour l'agriculture, 35 % pour l'eau potable, et 20 % pour les industries<sup>2</sup>.

### **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

*Illustration 3 : Carte de la nappe de la Crau et localisation des prélèvements agricoles, pour l'eau potable et les industries (source SYMCRAU).*

La problématique de l'intrusion saline est un véritable enjeu pour la nappe de la Crau de par l'importance des usages de la ressource en eau. En effet, en fonction des usages, l'eau affectée par le biseau salé peut devenir incompatible avec ces derniers. Par exemple, pour les eaux brutes destinées à la production d'eau potable la gamme de salinité acceptable se situe entre 0,5 et 0,75. Pour les eaux destinées à l'irrigation agricole, cette gamme de valeurs se situe entre 0.35 et 0.7 (140 - 360 mg/L en chlorures).

Ces gammes de salinité (< 1) peuvent être rapidement atteintes pour un aquifère en bordure littorale. C'est le cas en basse Crau, dans un secteur compris entre Fos-sur-Mer et le nord de Mas Thibert, mais aussi sous les marais de Meyranne, où ces limites ont été atteintes voir dépassées sur plusieurs piézomètres et à différentes profondeurs.

---

<sup>2</sup> Source : SYMCRAU



### 3. Quelle est l'origine de la salinité observée en basse Crau ?

L'identification d'une intrusion saline en basse Crau remonte à plusieurs dizaines d'années. Dès le début des années 60, en prévision des travaux d'aménagement de la zone industrielle de Fos, des études hydrogéologiques ont été menées sur l'ensemble de la nappe de la Crau, et plus particulièrement sur l'état du biseau salé en basse Crau. Les premières études situent celui-ci au droit de la ZIP actuelle de Fos-sur-Mer, au sud de l'actuelle D268, dans le secteur du Mas de l'Audience (Cluseau, 1962).

Les travaux d'aménagement ont par la suite fortement modifié le contexte hydrogéologique. On peut notamment citer dans les années 70 le creusement des darses, l'assèchement d'une partie des marais de l'actuelle zone industrielle, puis au début des années 80, le creusement du canal de navigation Rhône-Fos (Illustration 4). Le creusement des darses et des canaux a eu comme conséquence de modifier profondément le contact hydraulique entre l'aquifère de Crau et la mer.

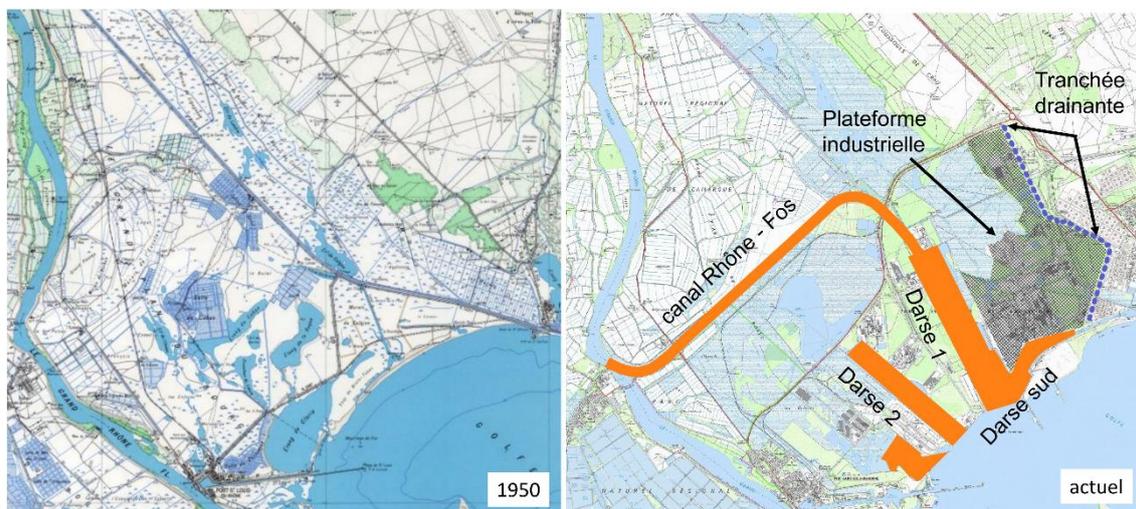


Illustration 4 : Évolution de l'occupation des sols depuis les années 1950 dans le secteur de Fos-sur-Mer : mise en évidence des aménagements industrialo-portuaires (adapté d'après les cartes IGN disponibles sur Geoportail). La couleur orange correspond à des eaux salées.

Le projet SIMBA a permis de mieux cerner l'origine et l'âge de l'eau salée en basse Crau, à l'aide notamment d'analyses sur la composition de l'eau (éléments chimiques et gaz dissous). Les résultats ont démontré que la salinité est bien due à une intrusion marine, mais que celle-ci ne mobilise pas une eau salée actuelle au niveau des points échantillonnés.

Les temps de résidence moyen des eaux salées dans l'aquifère sont de l'ordre de plusieurs dizaines d'années, mais il n'est pas exclu qu'une eau marine actuelle puisse avoir une influence à proximité immédiate des darses.



## 4. Quel est l'état actuel de salinisation de l'aquifère de Crau?

Les investigations qui ont été mises en œuvre ont permis de qualifier et de représenter l'état de salinisation actuel de la basse Crau. Plusieurs limites d'extension de la salinité, en adéquation avec les usages, ont pu être reportées sur des cartes :

- l'iso-salinité 20 correspond à l'interface théorique du biseau salé ;
- l'iso-salinité 6,3 correspond à la limite d'extension supérieure de la zone de transition selon la définition retenue dans le projet SIMBA ;
- l'iso-salinité 1 se rapproche des seuils compatibles avec les usages.

Dans le projet SIMBA, il a été choisi de définir la position du biseau salé *sensu stricto* par l'iso-salinité 20, correspondant à un mélange idéal entre une eau douce de salinité nulle (< 0,5) et une eau marine de salinité 40.

La méthode utilisée s'appuie sur le concept de Ghyben-Herzberg qui permet, pour un niveau marin constant, de relier la mesure piézométrique à la profondeur de l'iso-salinité 20 dans l'aquifère.

Pour identifier les relations plus fines entre la piézométrie et les profondeurs des différentes salinités, des diagraphies (profils verticaux de la salinité dans un forage) ont été réalisées régulièrement pendant tout le projet. Leurs analyses ont permis de proposer une relation simple de proportionnalité entre la piézométrie exprimée en mètres NGF et la profondeur de l'iso-salinité, valable dans le contexte particulier de la basse Crau où le niveau de la nappe est fortement contrôlé par le niveau d'eau des canaux. Le tableau de l'illustration 5 récapitule les relations utilisées :

Valeurs d'iso-salinité	Profondeur z de l'iso-salinité (en m NGF), avec h = hauteur de la nappe (en m NGF)
20	$z = h \times 39$
6,3	$z = h \times 30$
1	$z = h \times 21$

*Illustration 5 : Synthèse des relations de proportionnalité entre les hauteurs de nappe et les profondeurs d'iso-salinité 20, 6,3 et 1.*

La profondeur calculée doit être ensuite confrontée à la géométrie de l'aquifère, et notamment le toit du substratum, qui intervient dans la dynamique de progression ou retrait du biseau salé.

Plusieurs campagnes de mesures piézométriques, réalisées selon différentes conditions hydrologiques, ont été menées dans le projet. Elles ont permis de représenter sur des cartes en plan la position des trois valeurs d'iso-salinités : 20, 6,3 et 1. L'illustration 6 présente les résultats pour une situation de basses-eaux (octobre 2017) et de hautes-eaux (avril 2018).

Les résultats obtenus soulignent (i) la faible épaisseur de la zone de transition (eaux saumâtres) matérialisée par la proximité des courbes d'iso-salinité et (ii) la variabilité spatiale du déplacement du biseau salé, et de la zone de transition qui l'accompagne à l'échelle saisonnière. Les évolutions les plus marquées se retrouvent dans le secteur de Mas Thibert, du lieu-dit Tenque, et du côté de la plateforme industrielle de Fos-sur-Mer.

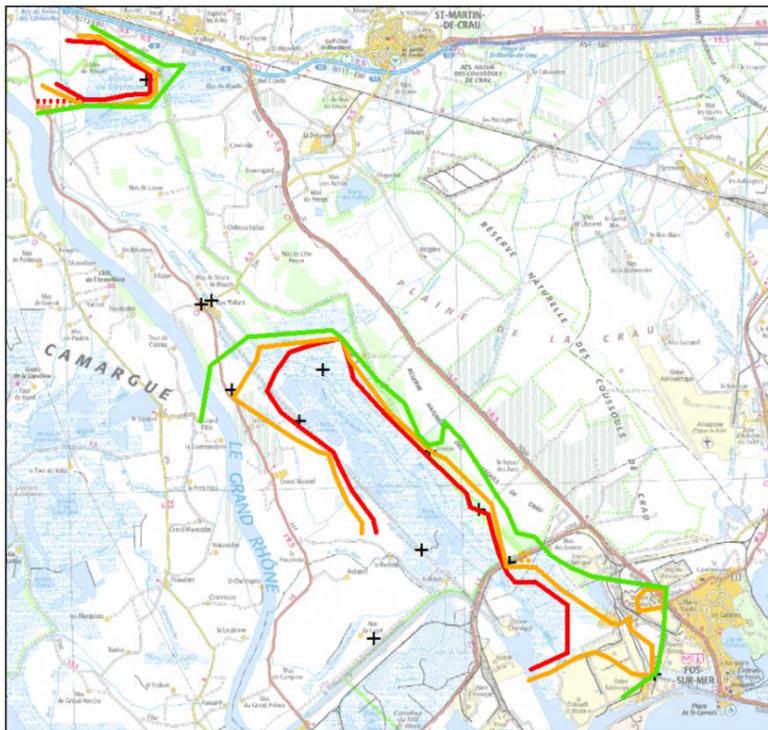
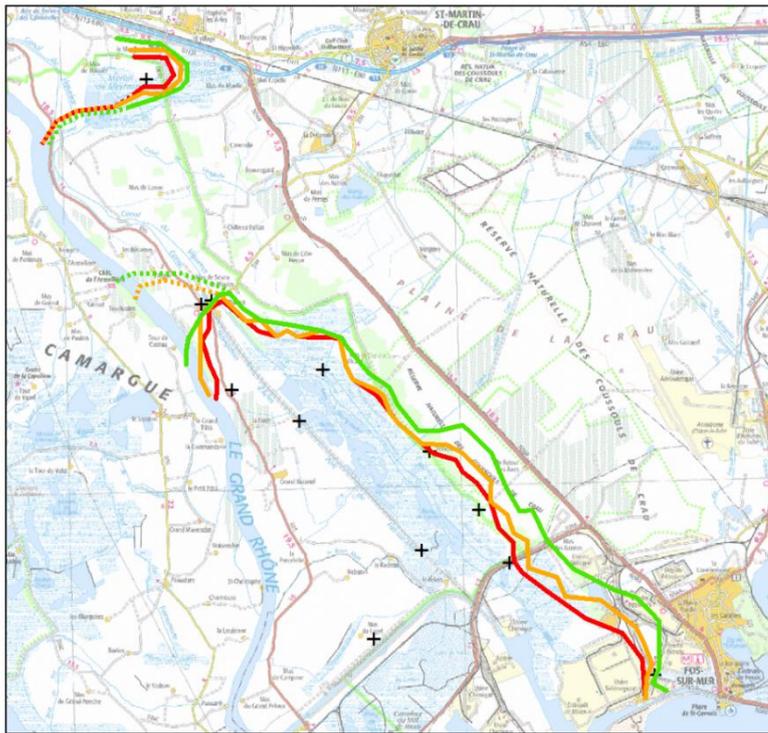


Illustration 6 : Résultats du calcul de l'extension du front salé pour deux situations hydrologiques contrastées : en hautes-eaux (octobre 2017) et basses-eaux (avril 2018).

La position du biseau salé dans l'aquifère des cailloutis de Crau se trouve actuellement dans une situation critique, avec des captages AEP très proches de sa limite d'extension. Néanmoins, aucune tendance à la dégradation n'est actuellement mise en évidence, en raison de la stabilité actuelle des conditions hydrodynamiques sur la basse Crau.

La fragilité de cet équilibre doit être néanmoins soulignée : toute modification de celui-ci (baisse de la recharge, modification de la gestion hydraulique au niveau du barrage anti-sel situé à Fos-sur-Mer, évolution du niveau de la mer) devra être soigneusement étudiée afin d'anticiper les impacts sur le biseau salé.



## 5. Quels sont les facteurs de contrôle de la salinité en basse Crau ?

Dans le cas de la basse Crau, le projet SIMBA a mis en évidence que :

- **la variabilité piézométrique à l'échelle saisonnière**, en partie contrôlée par la recharge de la nappe de Crau mais également par l'évolution des conditions limites de potentiels (niveau d'eau des canaux) est un des facteurs de contrôle déterminant ;
- **la géométrie du substratum explique la variabilité spatiale observée sur la position de l'interface salée**. Afin de comprendre cela, des coupes schématiques présentant le positionnement du biseau salé en fonction de la géométrie du substratum ont été proposées (Illustration 7). Le passage du cas A1 à A2 sur les coupes ci-dessous caractérise une intrusion saline dans le cas d'une topographie du toit du substratum ayant une pente uniforme, à la fois latéralement et longitudinalement, en réponse à une baisse de charge d'eau douce. Dans ce cas, le déplacement de l'iso-salinité 20 vers les terres sera également uniforme vue du dessus (A2). Dans le cas B, le front salé vient buter localement sur une remontée du substratum, cette irrégularité n'étant pas observée ailleurs. On obtient alors un déplacement latéral beaucoup plus faible de l'iso-salinité 20 pour la même baisse de charge d'eau douce, jusqu'à ce que cette rupture de pente soit dépassée ; on se retrouve alors dans le cas A ;

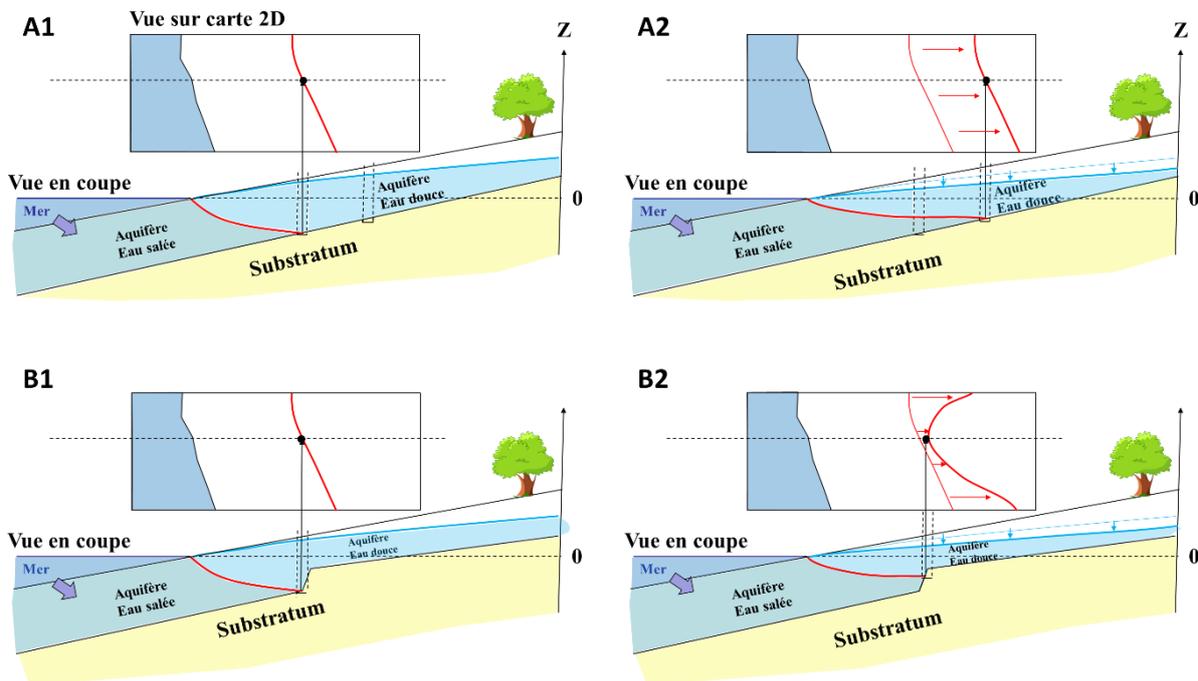


Illustration 7 : Modèles conceptuels d'intrusion saline pour 2 géométries du toit du substratum.

- **la variation du niveau marin à l'échelle journalière ou événementielle (surcotes liées aux tempêtes) entraîne selon la gestion hydraulique actuelle du barrage anti-sel une réaction des canaux et de l'aquifère qui limite le déplacement vertical du front salé, et qui peut même l'inverser**. Le déplacement du front salé est donc beaucoup plus sensible à une modification de la charge d'eau douce (baisse de la recharge par exemple) qu'à une modification de la charge d'eau salée ;

- **les niveaux limoneux localement aquifères qui recouvrent les cailloutis en basse Crau peuvent influencer les profils de salinité de certains ouvrages.** Par ailleurs, **des échanges avec les eaux douces des canaux sont temporairement possibles** du point de vue hydrodynamique, en crue ou en basses eaux. Ces équilibres entre ces milieux engendrent des flux verticaux qui perturbent localement la distribution du sel selon la verticale.

La figure suivante (Illustration 8) synthétise les informations relatives à l'équilibre hydrodynamique entre les masses d'eau douce et salées, en lien avec l'évolution du climat et des usages en Crau.

Cette figure met en évidence l'amincissement de la couverture limoneuse vers la mer et le passage progressif vers un faciès plus perméable dans le golfe de Fos, et notamment au large de la pointe Saint-Gervais, permettant ainsi des échanges directs entre la mer et l'aquifère. Ces échanges conditionnent l'équilibre entre les masses d'eau douce et salée qui se déplacent lentement vers les terres ou vers la mer selon les conditions hydrodynamiques. Ce schéma rappelle aussi qu'il n'est pas mis en évidence de contribution d'eau de mer actuelle au niveau des points d'eau échantillonnés dans l'aquifère de Crau.

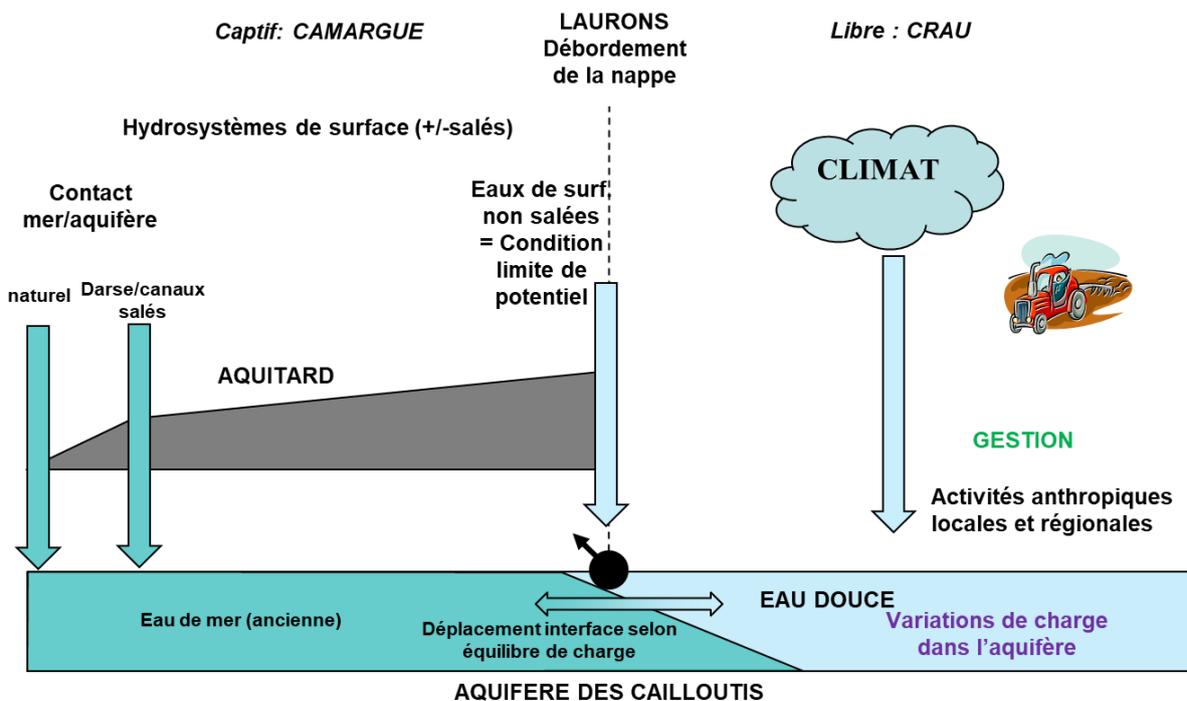


Illustration 8 : Représentation simplifiée des différents forçages qui contrôlent l'évolution de la position du biseau salé en basse Crau.

La position du biseau salé et l'épaisseur de la zone de transition observées dans l'aquifère de Crau dépendent principalement du niveau piézométrique de la nappe. Celui-ci est lui-même contrôlé par le niveau d'eau des canaux qui constituent l'exutoire de la nappe.

Par ailleurs la géométrie du toit du substratum, et notamment la pente en direction du pôle salé permet d'estimer l'ampleur du déplacement du biseau salé à l'intérieur des terres en réponse à une modification de la piézométrie.

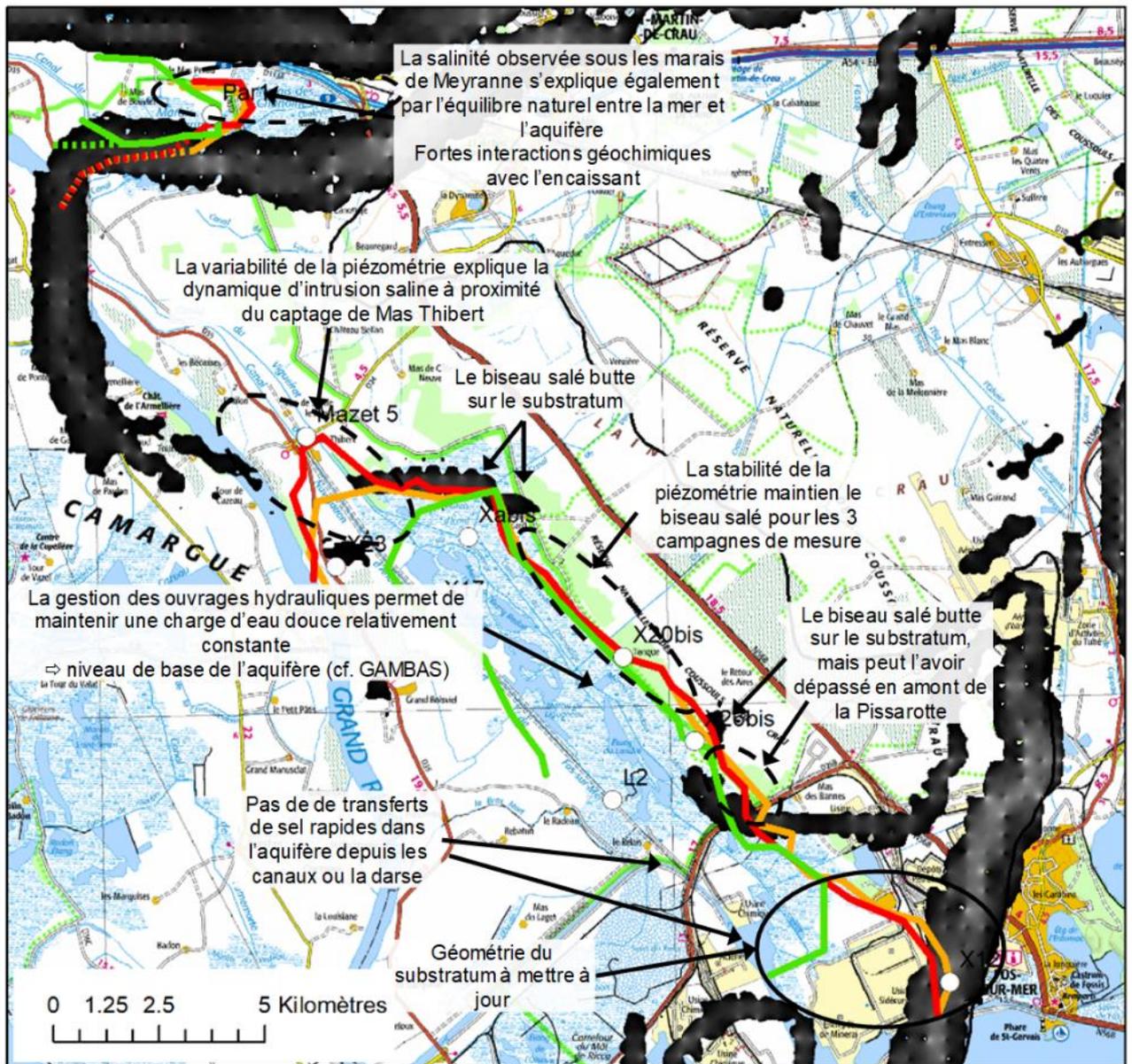


## 6. Quels sont les secteurs les plus vulnérables ? Comment peut-on surveiller l'évolution de la salinité de manière optimale?

Le projet SIMBA a permis de dresser une carte des principaux résultats relatifs à l'évolution saisonnière du biseau salé, et mettant ainsi en évidence les secteurs les plus vulnérables à l'intrusion saline (Illustration 9).

La notion de vulnérabilité est définie en considérant qu'un secteur sera plus vulnérable s'il permet au biseau salé de pénétrer plus vers les terres pour une même baisse de charge piézométrique de l'aquifère. C'est sur les secteurs les plus vulnérables qu'est proposé la mise en place d'un suivi opérationnel (hauteur d'eau, conductivité, température) sur le long terme. Ces secteurs sont les suivants :

- **Marais de Meyranne** : sur ce secteur, la géométrie du substratum permet à l'intrusion saline de progresser vers l'est en cas de baisse de charge piézométrique en Crau ;
- **Secteur du Mazet** : il existe déjà un réseau de suivi autour du captage AEP du Mazet mais les ouvrages suivis ne recoupent pas toute l'épaisseur de l'aquifère jusqu'au substratum, et ne permettent ainsi pas de bien identifier l'évolution du biseau salé. Un point de surveillance doit être mis en place dans ce secteur pour répondre aux enjeux liés à la préservation d'une ressource en eau de qualité ;
- **Tenque** : le biseau salé y est particulièrement vulnérable à une baisse de la piézométrie en Crau ;
- **Étang du Landre et barrage anti-sel** : les points de suivi utilisés dans SIMBA (L2 et X26bis) sont à maintenir car ils seront très utiles au projet GAMBAS mené par le GPMM, dont l'objectif est de mettre en place une gestion active du barrage anti-sel tenant compte du biseau salé ;
- **Pissarotte** : le suivi mis en place dans le projet SIMBA doit être maintenu pour permettre de suivre le biseau salé dans ce secteur à fort enjeu.



**Légende**

**Réseau SIMBA**

- Réseau SIMBA suivis HCT (HT pour X20bis)

**Iso salinité 20**

**Campagne, salinite, origine**

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

**Pente du substratum (%)**

- Valeur**
- 9
  - 4.5
  - 1

- Contour 0 mNGF du substratum
- Secteur vulnérable à l'intrusion saline

Illustration 9 : Carte de synthèse des résultats du projet SIMBA.

## 7. Incertitudes et limites de l'approche

**Géométrie du substratum** : les tracés d'iso-salinité proposés vers la zone industrielle (Illustration 6) sous-estiment la progression vers les terres de l'intrusion saline à cause d'une sous-estimation de la profondeur du substratum. Une connaissance fine du toit du substratum est indispensable pour évaluer avec justesse la progression de l'intrusion saline. Une validation de cette géométrie serait nécessaire particulièrement sur les secteurs de Mas Thibert, de Tenque ainsi qu'une mise à jour indispensable sur la zone industrialoportuaire de Fos (à proximité de X12).

**Connaissance des conditions aux limites** : la méthode de représentation spatiale du biseau salé s'appuie essentiellement sur les mesures piézométriques. La méthode d'interpolation entre les points d'observations peut être améliorée en prenant en compte les conditions aux limites, dans la mesure où celles-ci peuvent être bien comprises (notamment à proximité du Rhône).

**Résolution spatiale de la piézométrie** : de la même façon, la précision des tracés de salinité en plan dépend étroitement de la précision de la carte piézométrique qui sera utilisée pour les calculs. Il faut également s'attacher à avoir une densité de points de mesure suffisante pour caractériser précisément les faibles valeurs piézométriques, et conserver le même réseau de mesure d'une campagne piézométrique à l'autre.

Le projet SIMBA a été conduit à l'échelle de l'ensemble de l'aquifère en basse Crau. Malgré le nombre important de points d'observations qui permet de proposer un niveau de confiance élevé dans les résultats, il n'est pas exclu que des observations localisées puissent différer de ces tracés.

## 8. Bibliographie

**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.

**Bailly-Comte V., Rivet F. avec la collaboration de Dewandel. B. (BRGM) et Villesseche D. (SYMCRAU)** (2019) - Projet SIMBA : Surveillance de l'intrusion marine en Basse Crau. Rapport final. BRGM/RP-68639-FR, 136 p., 54 ill., 6 ann.

**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.

**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.

**Wuilleumier A., Rivet F.** (2018) - Avis sur le modèle hydrogéologique de la nappe de la Crau développé par le SYMCRAU. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-68025-FR. 48 p.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 - Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale « PACA »**  
117, av. de Luminy  
BP168  
13276 - Marseille Cedex09 - France  
Tél. : 04 91 17 74 77