



# **Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état**

RAPPORT FINAL

ARTELIA Eau et Environnement  
Equipe Hydrogéologie



## SOMMAIRE

<b>1. OBJECTIFS DE L'ETUDE</b>	<b>2</b>
<b>2. CONTEXTE GEOLOGIQUE</b>	<b>3</b>
2.1. A L'ECHELLE REGIONALE	3
2.2. A L'ECHELLE DE LA CARRIERE	4
<b>3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE</b>	<b>5</b>
<b>4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE</b>	<b>7</b>
4.1. CARTE PIEZOMETRIQUE	7
4.2. INCIDENCE DE LA MAREE	8
4.3. RELATION ENTRE LES AQUIFERES	9
4.3.1. Nappe de la craie	9
4.3.2. Relation entre la nappe de la craie et l'aquifère superficiel	10
<b>5. TENEURS EN SEL</b>	<b>11</b>
5.1. BISEAU SALE : INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE	11
5.2. SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES AU DROIT DE LA CARRIERE	12
5.2.1. Répartition spatiale de la salinité	12
5.2.2. Variation temporelle de la salinité au sein de l'aquifère	14
5.3. SALINITE DES REMBLAIS DU PORT DU HOURDEL	15
5.4. SEUILS REGLEMENTAIRES	16
<b>6. PERMEABILITE DES SEDIMENTS DU PORT DU HOURDEL</b>	<b>17</b>
<b>7. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE</b>	<b>19</b>
7.1. MODELE UTILISE	19
7.2. INTERET DU MODELE 3D PAR RAPPORT A L'UTILISATION DE L'OUTIL HYDROTEX	20
7.3. EMPRISE DU MODELE	20
7.4. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES	21
7.5. DISCRETISATION SPATIALE	21
7.6. INTEGRATION DES PLANS D'EAU	22
7.7. CONDITIONS AUX LIMITES	22
7.8. SIMULATIONS REALISEES	24
<b>8. SIMULATIONS DES SCENARIOS DE REMBLAIEMENT DE LA CARRIERE</b>	<b>25</b>
8.1. APPROCHE ADOPTEE	25
8.2. SCENARIO DE REFERENCE	26
8.2.1. Représentation du plan de réaménagement	26
8.2.2. Résultats du scénario de référence	26
8.3. SCENARIO 1 : REMBLAI PARTIEL DE LA BARGE	28
8.3.1. Représentation du réaménagement	28
8.3.2. Résultats du scénario 1	29
8.3.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités	30
8.4. SCENARIO 2 : REMBLAI TOTAL DE LA BARGE	32
8.4.1. Représentation du réaménagement	32
8.4.2. Résultats du scénario 2	32
8.4.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités	34

---

<b>8.5. SCENARIO 3 : REMBLAI TOTAL DE LA BARGE ET PARTIEL DE SILMER</b>	<b>36</b>
8.5.1. Représentation du réaménagement	36
8.5.2. Résultats du scénario 3	36
8.5.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités	38
8.5.4. Sensibilité du modèle à la recharge pluviométrique	40
<b>8.6. SCENARIO 4 : REMBLAI TOTAL DE LA BARGE, PARTIEL DE SILMER ET PARTIEL DE LA FAÇADE LITTORALE</b>	<b>40</b>
8.6.1. Représentation du réaménagement	40
8.6.2. Résultats du scénario 4	41
8.6.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités	43
8.6.4. Sensibilité du modèle à la recharge pluviométrique	44
<b>9. CONCLUSION</b>	<b>46</b>
<b>ANNEXE 1 - Analyses 16 janvier 2017 réalisées par Kalité'o (suivi GSM)</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXE 2 - Tableau du suivi de la salinité des plans d'eau de la carrière (données GSM)</b>	<b>50</b>

## TABLEAUX

TABL. 1 -	SALINITE DES SEDIMENTS DU PORT DU HOURDEL (DONNEES CG 2014 ET GSM 2017)	16
TABL. 2 -	SEUILS REGLEMENTAIRES POUR L'ACCEPTATION DES DECHETS	16
TABL. 3 -	SC1 – TESTS DE SENSIBILITE : PERMEABILITES TESTEES	30
TABL. 4 -	SC2 – TESTS DE SENSIBILITE : PERMEABILITES TESTEES	34
TABL. 5 -	SC3 – TESTS DE SENSIBILITE : PERMEABILITES TESTEES	38
TABL. 6 -	SC4 – TESTS DE SENSIBILITE : PERMEABILITES TESTEES	43

## FIGURES

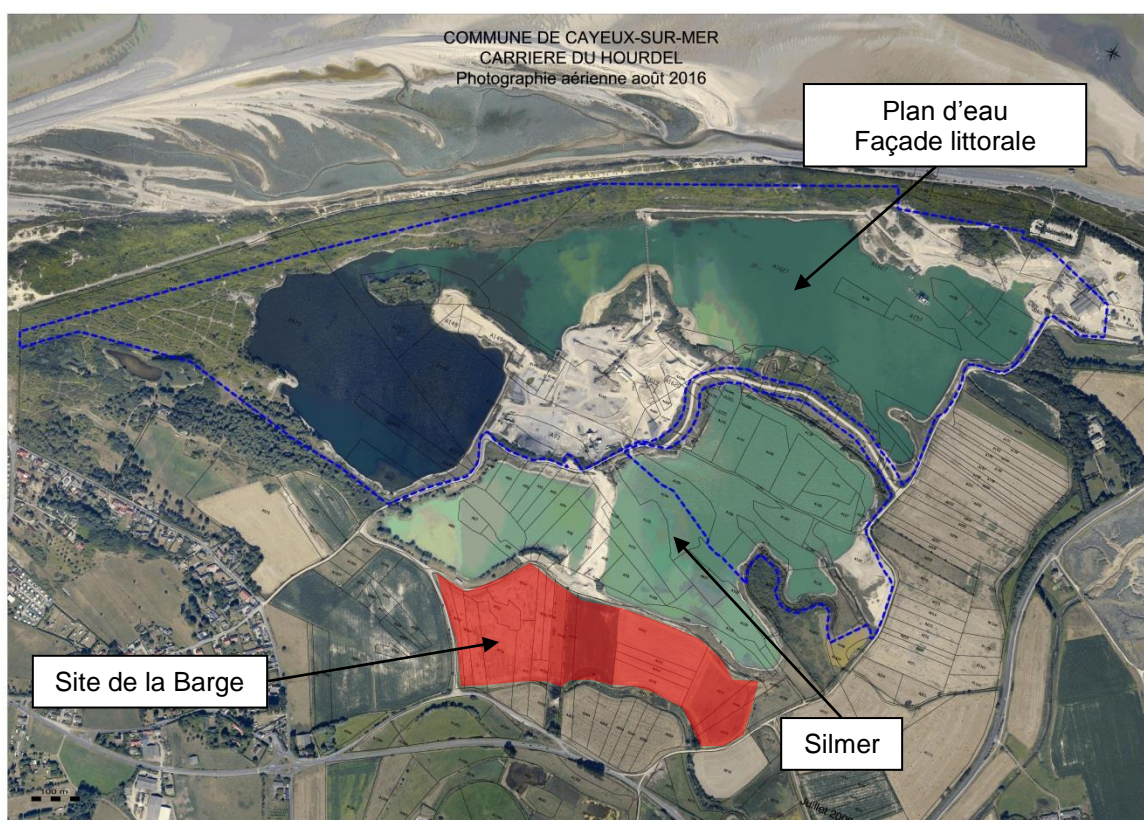
FIG. 1.	CARRIERE DU HOURDEL – SITUATION AU MOIS D'AOUT 2016	2
FIG. 2.	COUPE GEOLOGIQUE AU DROIT DES BAS-CHAMPS (EXTRAIT BRGM 93NPC91)	3
FIG. 3.	EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE ET COTE DU SUBSTRATUM CRAYEUX AU DROIT DES BAS – CHAMPS	4
FIG. 4.	GEOLOGIE AU DROIT DE LA BARGE (SONDAGES GSM)	5
FIG. 5.	EVALUATION DES PRECIPITATIONS EFFICACES DE SEPTEMBRE 2016 A AOUT 2017 (METEO FRANCE)	6
FIG. 6.	EUX DE SURFACE A PROXIMITE DE LA CARRIERE (GEOPORTAIL)	7
FIG. 7.	ESQUISSE PIEZOMETRIQUE AU DROIT DE LA CARRIERE LE 17 JANVIER 2017 (BASSE MER)	8
FIG. 8.	INFLUENCE DE LA MAREE SUR LA PIEZOMETRIE (CG SOMME)	9
FIG. 9.	NAPPE DE LA CRAIE - CARTE PIEZOMETRIQUE (AE ARTOIS PICARDIE)	9
FIG. 10.	NAPPE DE LA CRAIE – CAPTAGES EN EAU POTABLE (PAPI SOMME, 2014)	10
FIG. 11.	APPROCHE DE GHYBEN – HERZBERG : POSITION THEORIQUE DU BISEAU SALE AU SEIN D'UN AQUIFERE LIBRE COTIER	11
FIG. 12.	ZONE DE TRANSITION EAU DOUCE/EAU DE MER DANS UN AQUIFERE COTIER HOMOGENE	11
FIG. 13.	SALINITE DE LA NAPPE 17 JANVIER 2017 (NIVEAU SUPERFICIEL)	13
FIG. 14.	PROFILS DE CONDUCTIVITE AU DROIT DE LA CARRIERE (JANVIER 2017)	14
FIG. 15.	EVOLUTION DE LA SALINITE AU SEIN DE L'AQUIFERE SUPERFICIEL AU DROIT DE LA CARRIERE DEPUIS 2008 (SUIVI GSM)	15
FIG. 16.	REPARTITION GRANULOMETRIQUE AU TAMIS DES SEDIMENTS	17
FIG. 17.	REPARTITION GRANULOMETRIQUE AU LASER (FRACTION INFERIEURE A 2 MM) DES SEDIMENTS	17
FIG. 18.	COUPE EST-OUEST : PIEZOMETRIE SIMULEE AFFINEE AU DROIT DES PLANS D'EAU DE LA CARRIERE	19
FIG. 19.	SUBDIVISION VERTICALE DE MODELE NUMERIQUE DE LA NAPPE SUPERFICIELLE (LOCALISATION DE LA COUPE SUR LA FIGURE 19)	21
FIG. 20.	MAILLAGE AU DROIT DE LA CARRIERE	22
FIG. 21.	MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE PROPOSE DE L'AQUIFERE SUPERFICIEL	23
FIG. 22.	SCENARIO DE REFERENCE : REPRESENTATION DES PLANS D'EAU DE LA CARRIERE	26
FIG. 23.	SCENARIO DE REFERENCE : CARTE PIEZOMETRIQUE A 3600 JOURS (COUCHE N°3)	27
FIG. 24.	SCENARIO DE REFERENCE : INTRUSION SALINE AU SEIN DE L'AQUIFERE SUPERFICIEL (COUCHE N°3)	27
FIG. 25.	SCENARIO DE REFERENCE : COUPE OUEST-EST DE LA SALINITE AU SEIN DE LA L'AQUIFERE SUPERFICIEL	28
FIG. 26.	SCENARIO 1 : PLAN DE REAMENAGEMENT SIMULE	28
FIG. 27.	SCENARIO 1 : CARTES DE LA PIEZOMETRIE ET DE LA SALINITE (COUCHE 3)	29
FIG. 28.	SCENARIO 1 : COUPE OUEST-EST DE LA SALINITE	30
FIG. 29.	SC1 - TESTS DE SENSIBILITE DE LA PERMEABILITE – CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	31
FIG. 30.	SC1 - TESTS DE SENSIBILITE DE LA PERMEABILITE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	31
FIG. 31.	SCENARIO 2 : PLAN DE REAMENAGEMENT SIMULE	32
FIG. 32.	SCENARIO 2 : CARTES DE LA PIEZOMETRIE ET DE LA SALINITE (COUCHE 3)	33
FIG. 33.	SCENARIO 2 : COUPE OUEST-EST DE LA SALINITE	34
FIG. 34.	SC2 - TESTS DE SENSIBILITE DE LA PERMEABILITE – CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	35
FIG. 35.	SC2 - TESTS DE SENSIBILITE DE LA PERMEABILITE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	35
FIG. 36.	SCENARIO 3 : PLAN DE REAMENAGEMENT SIMULE	36
FIG. 37.	SCENARIO 3 : CARTES DE LA PIEZOMETRIE ET DE LA SALINITE (COUCHE 3)	37
FIG. 38.	SCENARIO 3 : COUPES DE LA SALINITE AU DROIT DE LA CARRIERE	38
FIG. 39.	SC3 - TESTS DE SENSIBILITE A LA PERMEABILITE – CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	39
FIG. 40.	SC3 - TESTS DE SENSIBILITE A LA PERMEABILITE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	39
FIG. 41.	SC3 - TESTS DE SENSIBILITE A LA RECHARGE PLUVIOMETRIQUE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	40
FIG. 42.	SCENARIO 4 : PLAN DE REAMENAGEMENT SIMULE	41
FIG. 43.	SCENARIO 4 : CARTES DE LA PIEZOMETRIE ET DE LA SALINITE (COUCHE 3)	42
FIG. 44.	SCENARIO 4 : COUPES DE LA SALINITE AU DROIT DE LA CARRIERE	43
FIG. 45.	SC4 - TESTS DE SENSIBILITE – CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	44
FIG. 46.	SC4 - TESTS DE SENSIBILITE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	44
FIG. 47.	SC4 - TESTS DE SENSIBILITE A LA RECHARGE PLUVIOMETRIQUE – CHRONIQUES DE LA SALINITE	45
FIG. 48.	PROPOSITION DE PIEZOMETRES COMPLEMENTAIRES POUR LA SURVEILLANCE DES EAUX SOUTERRAINES	47

## 1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le cadre du projet de l'extension de la carrière du Hourdel, la société GSM souhaite utiliser des sédiments d'origine marine (port du Hourdel, dépoldérisation, ...) pour remblayer les secteurs exploités (Fig. 1).

Pour cela, une étude hydrogéologique analysant l'incidence du projet sur l'écoulement des eaux souterraines et la salinité (chlorure, sulfate,...) de la nappe a été menée. Quatre scénarios de réaménagement ont été étudiés :

- 1<sup>er</sup> scénario : comblement partiel de la Barge uniquement avec des matériaux inertes ;
- 2<sup>ème</sup> scénario : comblement total de la Barge avec des matériaux inertes et des sédiments marins (dragage de port, dépoldérisation, ...) ;
- 3<sup>ème</sup> scénario : comblement de la Barge et de la partie Nord-Est de l'ancienne carrière Silmer avec des matériaux inertes et des sédiments marins
- 4<sup>ème</sup> scénario : comblement de la Barge, de la partie Nord-Est de l'ancienne carrière Silmer et d'une partie du plan d'eau en façade littorale avec remblaiement jusqu'à 0,5-1,0m sous la surface de l'eau avec des sédiments marins.



**Fig. 1. Carrière du Hourdel – situation au mois d'août 2016**



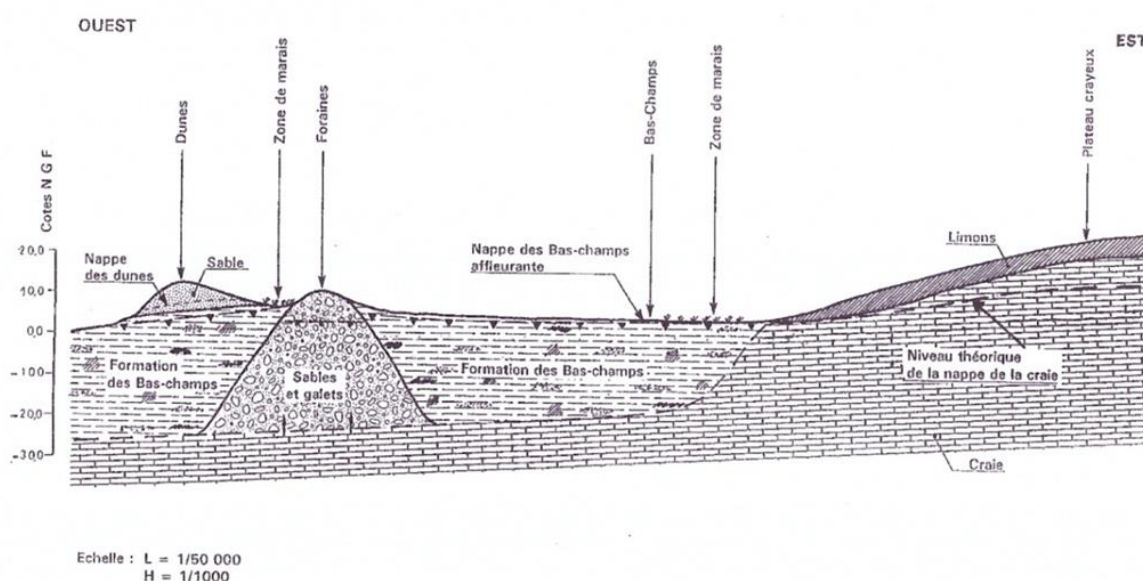
La nappe qui s'écoule dans les formations superficielles pourrait être directement impactée par les aménagements envisagés. Il est donc nécessaire d'évaluer cet impact et de proposer, si nécessaire, des solutions pour le minimiser. Les objectifs de cette étude étaient de répondre aux questions suivantes :

- Quel sera l'incidence du comblement des plans d'eau sur la piézométrie de la nappe superficielle ?
- Quel sera l'incidence des remblais d'origine marine (port du Hourdel, ...) sur la qualité de la nappe superficielle ?

## 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

### 2.1. A L'ECHELLE REGIONALE

La zone d'étude se situe au sein de la plaine maritime picarde remblayée de dépôts marins en bordure du plateau crayeux turo-sénonien (Fig. 2 et Fig. 3).



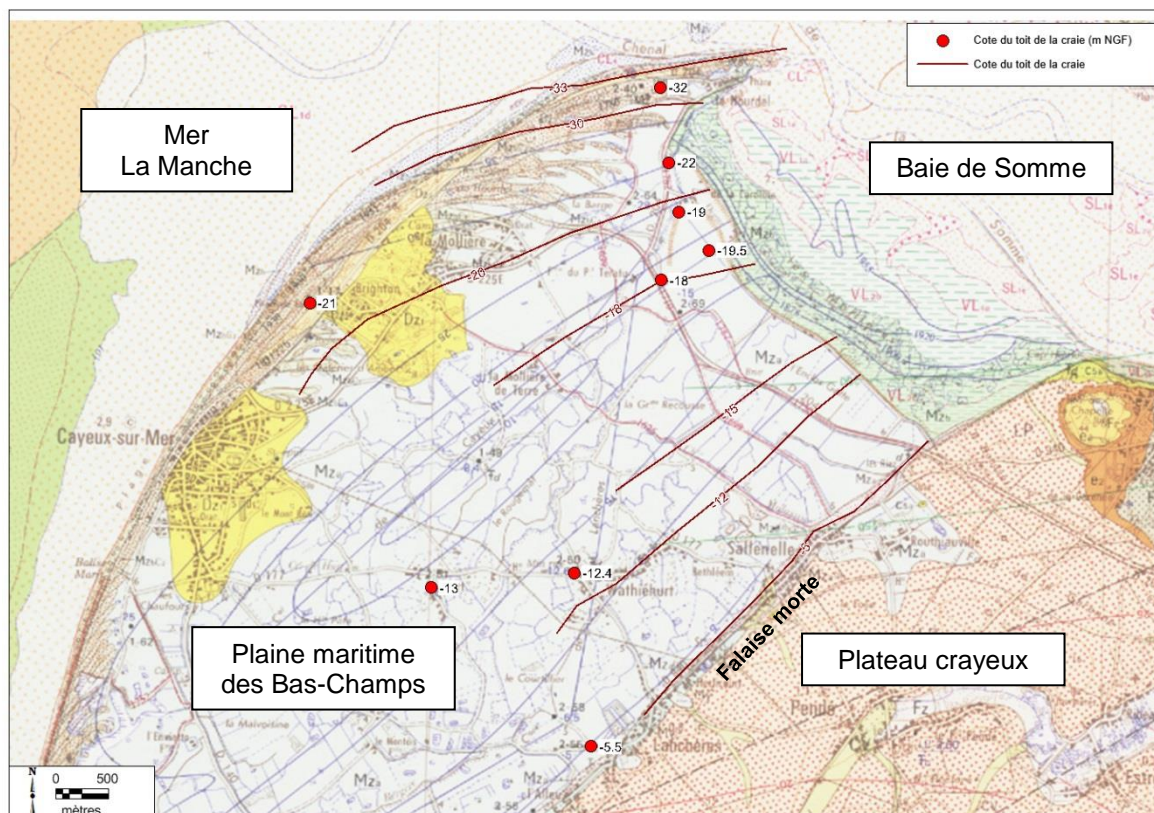
**Fig. 2. Coupe géologique au droit des Bas-Champs (extrait BRGM 93NPC91)**

A l'échelle régionale, cette plaine s'étend des falaises jurassiques du Boulonnais, au Nord, aux falaises crétacées de Normandie, au Sud. A l'échelle de la zone d'étude, cette plaine est recoupée par la Somme. Au Sud, elle forme les Bas-Champs de Cayeux.

Cette formation résulte de la combinaison de phénomènes naturels ainsi que d'actions humaines, notamment avec l'édification de rencloîtres pour se protéger contre les inondations. Ces dépôts d'âge quaternaire sont décrits comme des sédiments marins, composés de matériaux sablo-argileux qui se sont accumulés pendant les phases de retrait et d'avancée de la mer. L'épaisseur de cette formation est en moyenne d'une vingtaine de mètres : les sondages atteignent la craie à

des profondeurs variées de quelques mètres en bordure du plateau crayeux à plus de 30 m vers le large (Fig. 3).

En bordure du littoral, le secteur du Hourdel dans les Bas-Champs est caractérisé par l'accumulation de galets, provenant du démantèlement des falaises normandes, au Sud. Les galets sont très abondants en bordure de cote et laissent place progressivement à des dépôts sableux de colmatage marin. Au sein de la plaine, ces dépôts marins sont entrecoupés par d'anciens cordons de galets de silex qui témoignent des rivages anciens. La carrière GSM exploite actuellement ces cordons.

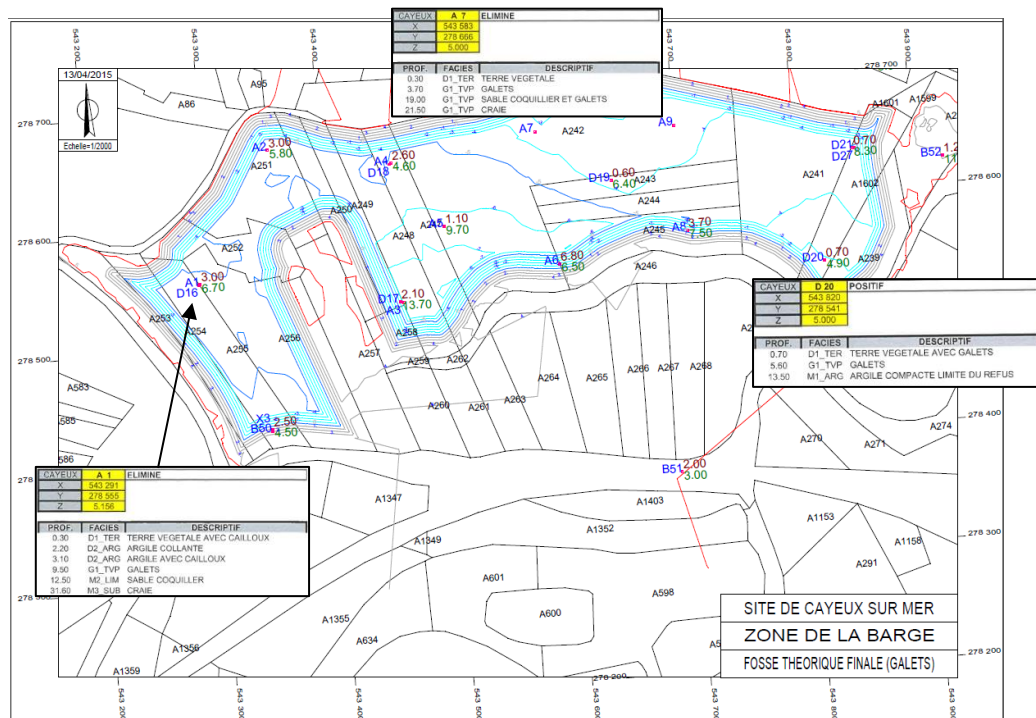


**Fig. 3. Extrait de la carte géologique et cote du substratum crayeux au droit des Bas - Champs**

## 2.2. A L'ECHELLE DE LA CARRIERE

Des coupes géologiques ont été levées sur les sondages réalisés par GSM au droit du site d'exploitation envisagé et de l'extension de la Barge. Les terrains recoupés sur l'ensemble des sondages sont essentiellement composés de sables avec des niveaux plus grossiers de graviers et de galets.

Sur ce site, le substratum crayeux se situe entre 20 et 30 m de profondeur. Localement, des niveaux argileux peuvent s'intercaler au sein des sables et galets.



**Fig. 4. Géologie au droit de la Barge (sondages GSM)**

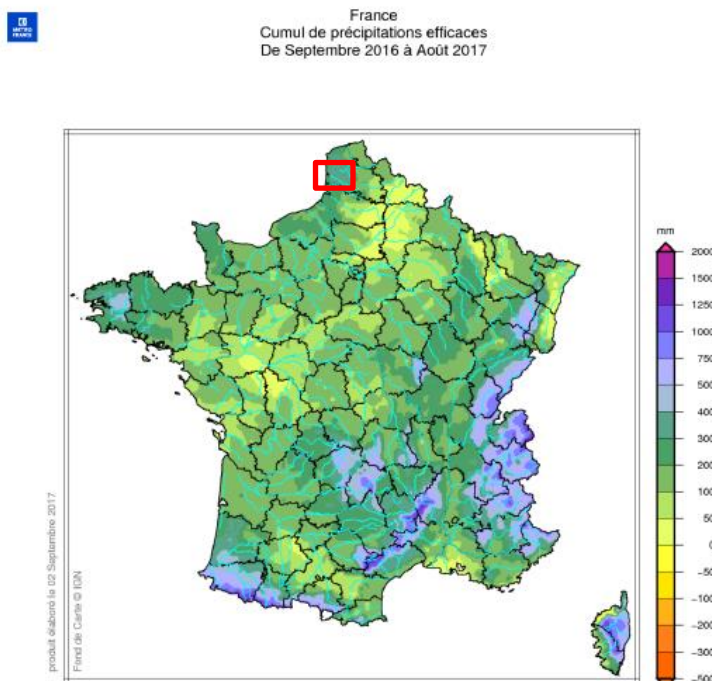
## 3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

### 3.1. PLUVIOMETRIE

Météo France indique que pour la période étudiée (sept 2016 – aout 2017), les pluies efficaces (ruissellement + infiltration vers la nappe) sur le secteur ouest du département de la Somme sont de l'ordre de 300 à 400 mm / an (Fig. 5). Or l'indice IDPR (indicateur spatial créé par le BRGM qui traduit l'aptitude des formations du sous-sol à laisser ruisseler ou s'infiltrer les eaux de surface) indique que le ruissellement est majoritaire. L'infiltration des pluies vers la nappe a donc été considérée de 30% des précipitations efficaces, soit de 120 à 150 mm / an, pour les formations les plus fines et de 60% pour les formations les plus grossières. Cette fourchette est cohérente avec les études antérieures (travaux de Beun, 1972).

Lors du calage du modèle, l'estimation de l'infiltration des pluies a été affinée et calée avec les enregistrements piézométriques notamment lors d'événements pluvieux significatifs.





**Fig. 5. Evaluation des précipitations efficaces de septembre 2016 à aout 2017 (Météo France)**

### 3.2. EAUX DE SURFACE

Au droit de la zone d'étude, les eaux de surface sont :

- Les plans d'eau des Bas – Champs qui résultent de l'exploitation des anciens cordons de galets. Ces plans d'eau représentent l'affleurement de la nappe phréatique.
- Un réseau dense de canaux qui a été développé par l'homme afin d'optimiser l'exploitation agricole des terrains. Ce réseau est hiérarchisé en canaux, courses et petits fossés qui s'écoulent vers la mer via le Courant à Poissons qui est aménagé d'une porte à flots et d'une vanne à crémaillère permettant de limiter les remontées d'eau salée au sein des terres. En raison des écoulements faibles, les lits des canaux sont tapissés de vases et limons qui limitent les échanges avec les eaux souterraines (DREAL Picardie, juin 2010).



**Fig. 6. Eaux de surface à proximité de la carrière (Géoportail)**

## 4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

### 4.1. CARTE PIEZOMETRIQUE

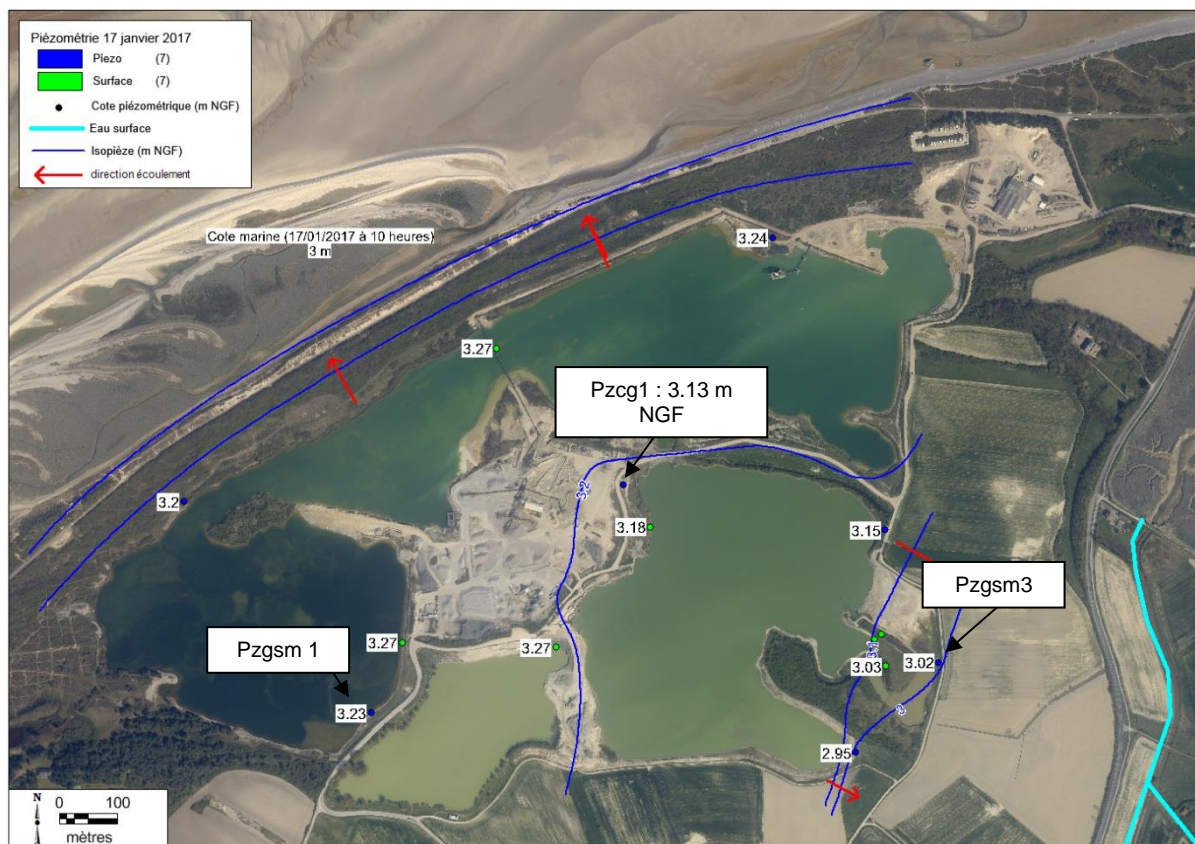
Les formations quaternaires, composées de sédiments sableux plus ou moins fins, sont le siège d'écoulements souterrains.

Dans le cadre de cette étude, des mesures ont été réalisées au mois de janvier 2017 en période de basse mer sur l'ensemble des plans d'eau de la carrière et les 7 piézomètres actuellement surveillés par GSM.

Les mesures de la profondeur de l'eau montrent que la nappe se situe à des profondeurs de 1.42 (Pzgsm1) à 3.3 m (Pzcg3) par rapport au sol.

Une esquisse piézométrique a été réalisée pour une situation de basse mer (17/01/2017). Les mesures mettent en évidence :

- le faible gradient d'écoulement au sein de l'aquifère superficiel,
- le plan d'eau le long de la façade littoral est un point haut vis-à-vis de l'écoulement souterrain,
- les faibles échanges entre l'aquifère et les plans d'eau illustrés par le décalage piézométrique entre les plans d'eau et les piézomètres les plus proches (ex. Pzcg1).



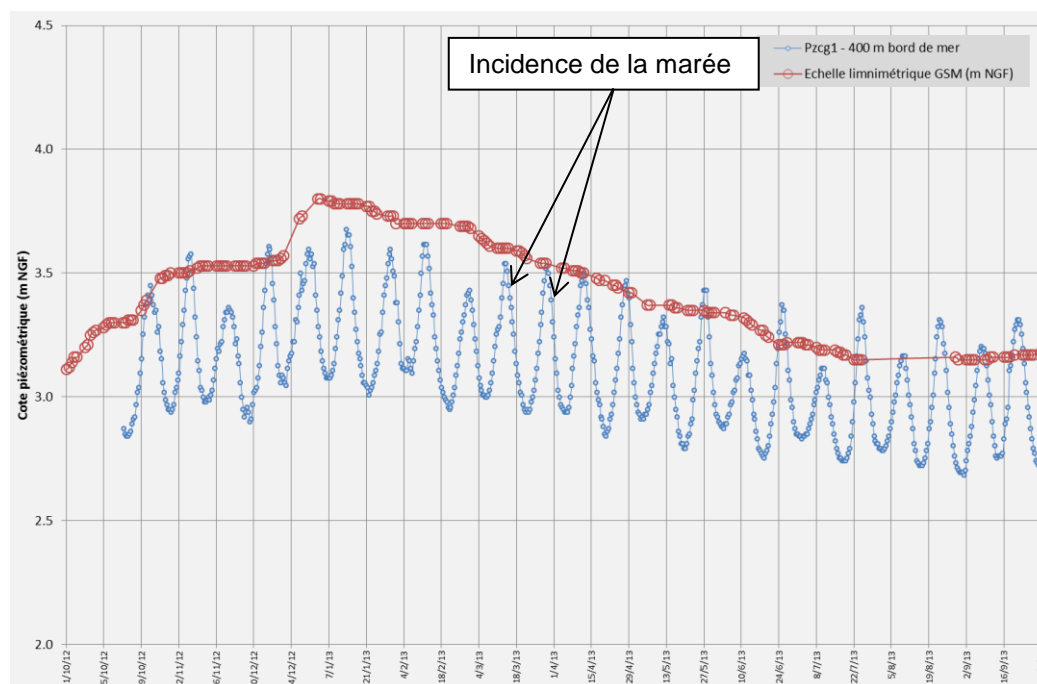
**Fig. 7. Esquisse piézométrique au droit de la carrière le 17 janvier 2017 (basse mer)**

## 4.2. INCIDENCE DE LA MAREE

La piézométrie des nappes côtières est soumise aux fluctuations dues à la marée. L'amplitude de la fluctuation est maximale aux rivages et diminue avec la distance vers l'intérieur des terres.

Sur le piézomètre Pzcg1 situé à quelques mètres du plan d'eau des Granets, un suivi piézométrique a été réalisé lors de l'étude de dépoldérisation de la ferme Caroline (ARTELIA, 2014). Cette chronique montre que le niveau de la nappe est impacté par le cycle Vive Eau (VE) – Morte (ME) avec des variations de 0.5 m (Fig. 8). En revanche, le suivi journalier du plan d'eau GSM n'a pas enregistré l'effet de la marée en raison du colmatage des berges du plan d'eau.

Lors de la campagne piézométrique de janvier 2017, des mesures en situations de basse mer et de haute mer ont confirmé ces faibles échanges entre la nappe superficielle et les plans d'eau de la carrière. En effet, la cote du plan d'eau de la façade littorale n'a pas été impactée par les marées tandis que le niveau d'eau dans les piézomètres a légèrement été modifié.

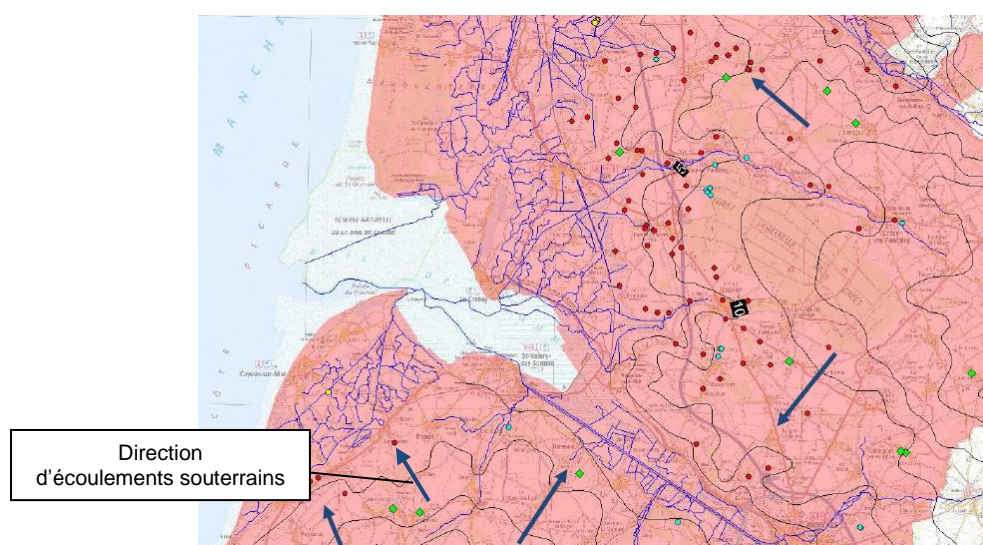


**Fig. 8. Influence de la marée sur la piézométrie (CG Somme)**

### 4.3. RELATION ENTRE LES AQUIFERES

#### 4.3.1. Nappe de la craie

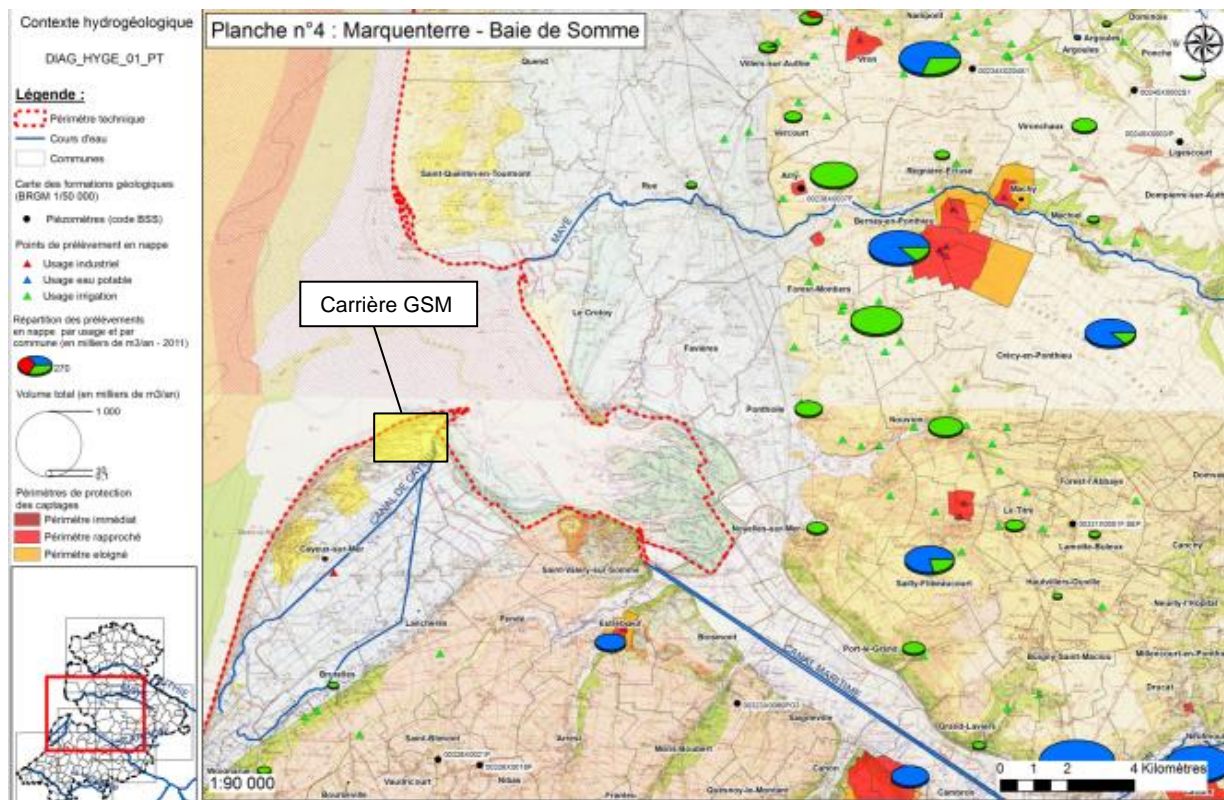
Au sein du bassin Artois-Picardie, la majorité des prélèvements en eau potable est assurée par les ressources souterraines (94%). La plupart des agglomérations captent la nappe de la craie, principale ressource souterraine disponible. Les captages en eau potable, les plus proches de la carrière, se trouvent à plusieurs kilomètres en amont hydraulique de la carrière (Fig. 9 et Fig. 10).



**Fig. 9. Nappe de la Craie - carte piézométrique (AE Artois Picardie)**



# **Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état** **Rapport final**



**Fig. 10. Nappe de la Craie – captages en eau potable (PAPI Somme, 2014)**

## **4.3.2. Relation entre la nappe de la craie et l'aquifère superficiel**

En baie de Somme, la limite entre la nappe de la craie et les alluvions quaternaires est marquée par une bande marécageuse longeant la falaise morte (marais de Poutrincourt, baie de Routhiauville...). Dans cette zone, des apports de la nappe de la craie vers les alluvions quaternaires ont lieu par le biais de sources plus ou moins artésiennes au niveau du pied de la falaise morte. Il est à noter toutefois que les travaux de Beun (1973) ont montré que les apports de la nappe de la craie vers la plaine maritime ne sont pas significatifs.

Au droit de la plaine maritime où le toit de l'aquifère crayeux se trouve à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, l'artésianisme de la nappe de la craie a été observé sous les alluvions quaternaires lorsqu'il y avait des niveaux argileux et tourbeux entre ces deux formations aquifères. De même, les travaux de Lammerville (1968) sur le Marquenterre ont montré qu'à quelques mètres de distance les niveaux mesurés dans l'aquifère crayeux sont plus élevés que ceux mesurés dans les alluvions quaternaires. A l'échelle de la plaine, les deux aquifères ne semblent donc pas en continuité hydraulique.

**Aux vues de l'éloignement des captages en eau potable, des faibles échanges entre l'aquifère quaternaire et la craie, les forages ne seront pas impactés par les aménagements de la carrière.**

## 5. TENEURS EN SEL

### 5.1. BISEAU SALE : INTERFACE EAU DOUCE – EAU SALEE

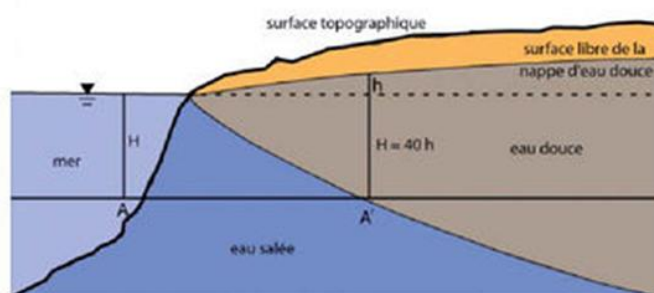
En raison de la présence d'eau de mer dans les formations aquifères sous le niveau de la mer, une zone de contact se forme entre l'eau douce plus légère (masse volumique  $\rho_f \sim 1000$  g/l) s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente plus lourde (masse volumique  $\rho_s \sim 1025$  g/l).

En première approche, on peut supposer qu'il existe une interface abrupte entre les eaux de la nappe et de la mer. La loi de Ghyben-Herzberg permet alors de déterminer la position de cette interface pour un aquifère côtier libre et stabilisé. L'hypothèse de Ghyben-Herzberg établit que la position de l'interface est fonction de la hauteur de l'eau douce située au-dessus du niveau de la mer, et de la différence de densité entre les deux types d'eau :

$$H = (\text{densité eau douce}) / (\text{densité eau salée} - \text{densité eau douce}) \times h$$

$h$  : hauteur de la nappe d'eau douce /  $H$  : profondeur du biseau salé

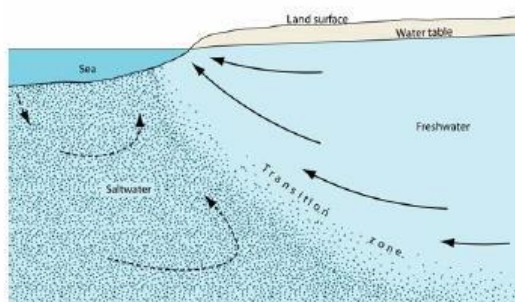
Pour le secteur de la Somme, la densité de l'eau de mer est de 1023 g/l. La formule donnant la profondeur du biseau salé est alors :  $H = 43 \times h$



**Fig. 11. Approche de Ghyben – Herzberg : position théorique du biseau salé au sein d'un aquifère libre côtier**

Cette formule n'est applicable que pour les piézomètres relativement éloignés du rivage.

Dans la réalité, l'eau douce et l'eau de mer étant des fluides miscibles, la zone de contact entre ces deux fluides prend la forme d'une zone de transition (ou zone de mélange) induite par les phénomènes de dispersion hydrodynamique. A l'intérieur de cette zone, la densité varie depuis celle de l'eau douce jusqu'à celle de l'eau de mer.



**Fig. 12. Zone de transition eau douce/eau de mer dans un aquifère côtier homogène**

## **5.2. SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES AU DROIT DE LA CARRIERE**

### **5.2.1. Répartition spatiale de la salinité**

La salinité désigne les teneurs de l'ensemble des sels dissous présents dans un liquide tel que l'eau.

Pour l'eau de mer, la salinité est composée de 6 espèces chimiques principales : chlorure (55.2%), sodium (30.7%), sulfate (7.7%), magnésium (3.7%), calcium (1.2%) et potassium (1.1%). La proportion de ces différents sels demeure constante dans l'eau de mer. Il est donc possible de déduire la salinité d'une eau de mer en connaissant la concentration d'une seule espèce. Généralement, les teneurs en chlorure sont exploitées pour ce calcul<sup>1</sup>.

Au droit de la carrière, les teneurs en chlorure et sulfate mesurées en laboratoire à partir des échantillons d'eau prélevés lors de la campagne du 17 janvier 2017 sont comprises :

- 390 mg/l < chlorure < 15 000 mg/l
- 62.1 mg/l < sulfate < 1 880 mg/l

La salinité calculée à partir du chlorure est alors comprise entre 705 et 27 098 mg/l pour une valeur médiane de 4 512 mg/l.

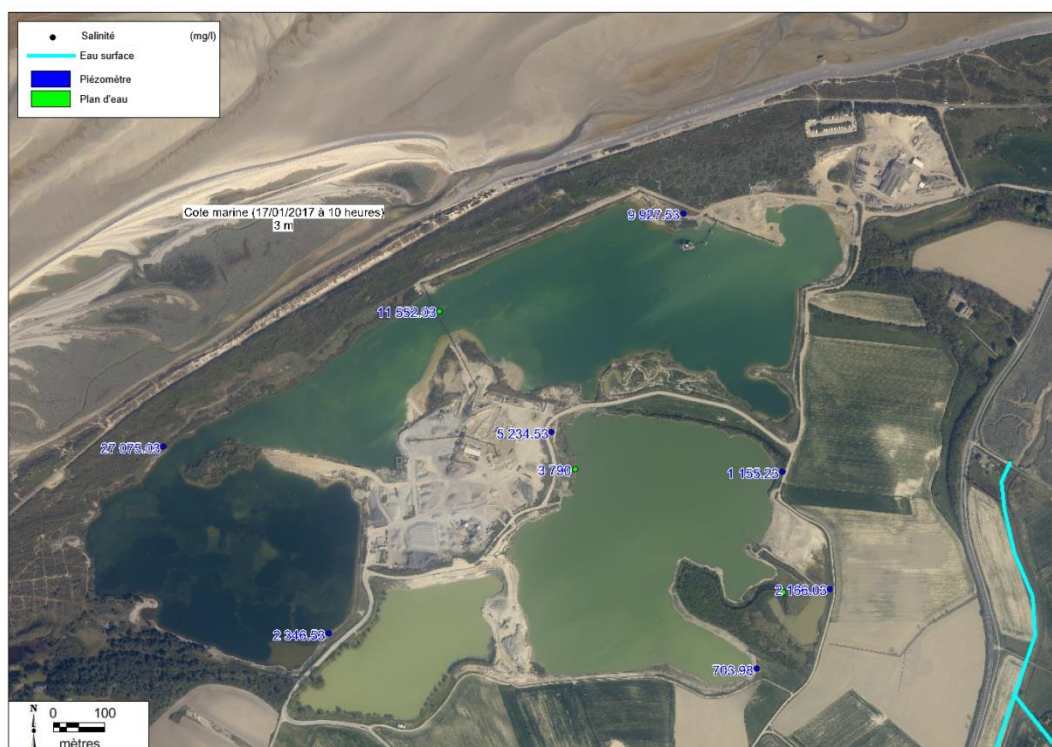
Les piézomètres en façade littorale présentent les teneurs en sels les plus élevées, signe qu'ils recoupent le biseau salé à faible profondeur.

Pour les piézomètres les plus éloignés de la mer, l'eau de la nappe est saumâtre avec des valeurs proches ou supérieures à 1 000 mg/l.

L'ensemble des analyses effectuées est présenté en annexe 1.

---

<sup>1</sup> Salinité (mg/l) = 1.80655\*[Chlorure] (UNESCO, 1969)



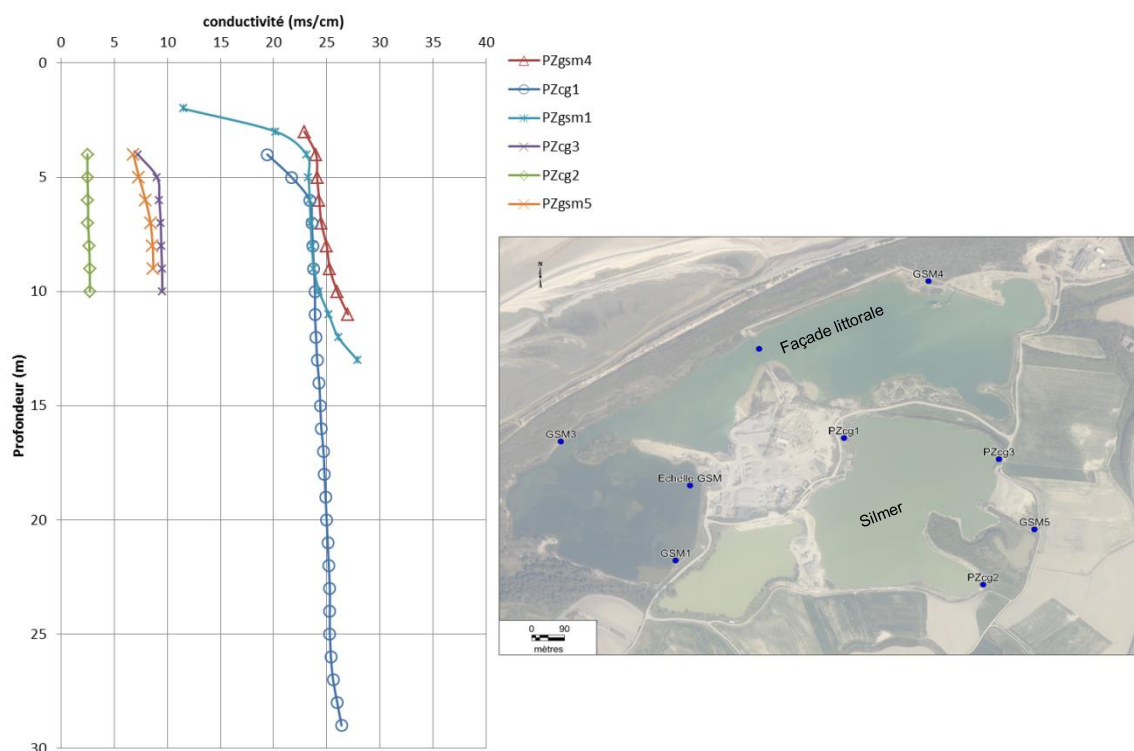
**Fig. 13. Salinité de la nappe 17 janvier 2017 (niveau superficiel)**

Afin de préciser la position des eaux salées au sein de la nappe, des profils de conductivité, paramètre directement corrélé à la salinité, ont été réalisés dans les piézomètres de la carrière.

Le profil de conductivité de Pzcg1, recoupant toute l'épaisseur de l'aquifère quaternaire, présente des valeurs relativement homogènes et élevées de 24 mS/cm.

Ces teneurs élevées en sel ne peuvent être expliquées uniquement par une intrusion de l'eau de mer via le fonctionnement hydrogéologique actuel. Ces fortes valeurs témoignent, a priori, d'intrusions anciennes de l'eau de mer au sein des Bas – Champs via le réseau hydrographique. « Les inondations » d'eau de mer sur les Bas-Champs induisaient alors une infiltration d'eau salée dans le sol, celle-ci atteignant ensuite la nappe (salinisation per descendum).





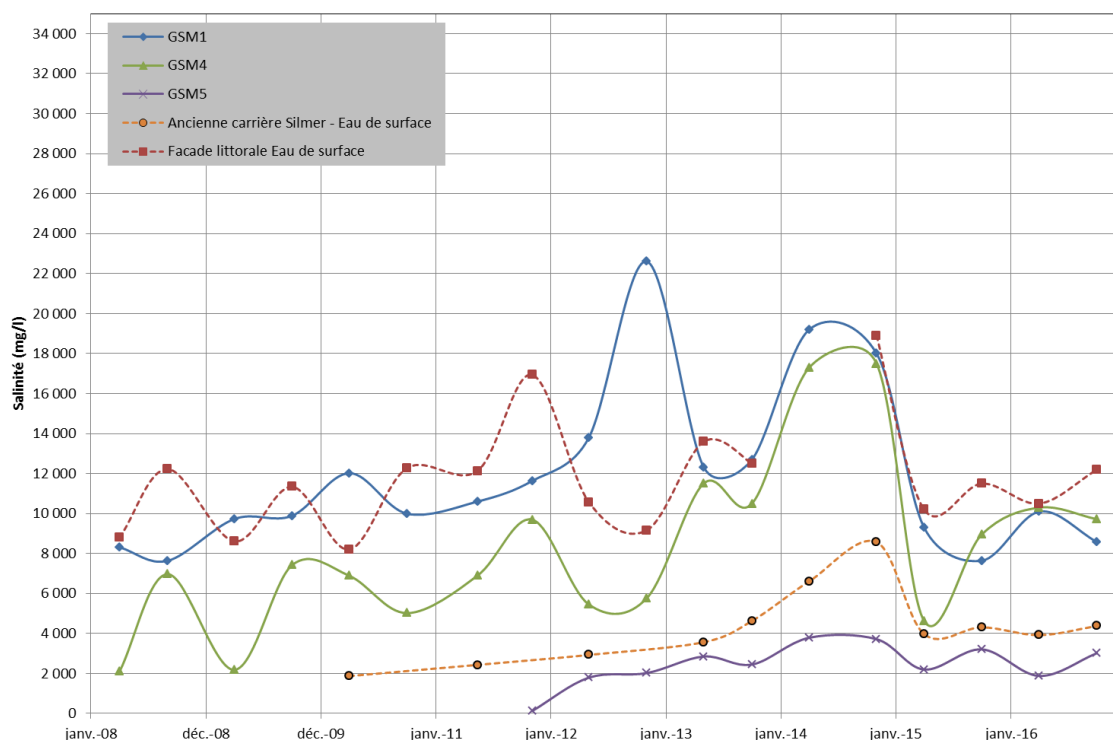
**Fig. 14. Profils de conductivité au droit de la carrière (janvier 2017)**

### 5.2.2. Variation temporelle de la salinité au sein de l'aquifère

GSM effectue un suivi de la salinité au droit de la carrière depuis 2008 sur plusieurs piézomètres et plans d'eau. Plusieurs chroniques sont présentées ci-après (Fig. 15).

Ces chroniques confirment que les salinités les plus élevées sont logiquement observées au droit de la façade littorale pour les piézomètres ainsi que pour les eaux de surface (plan d'eau de la façade littorale).

Sur le long terme, l'évolution des teneurs en sels sur presque 10 années montre aussi qu'il n'y a pas d'augmentation régulière de la salinité pour l'ensemble des ouvrages surveillés qui pourrait être induite par l'extraction des granulats sous eau.



**Fig. 15. Evolution de la salinité au sein de l'aquifère superficiel au droit de la carrière depuis 2008 (suivi GSM)**

### 5.3. SALINITE DES REMBLAIS DU PORT DU HOURDEL

Il est envisagé d'utiliser les sédiments d'origine marine (port du Hourdel,...) pour remblayer les plans d'eau de la carrière. GSM a prélevé pour analyse deux échantillons de sédiments superficiels issus du port en décembre 2016 (Tabl. 1 - ).

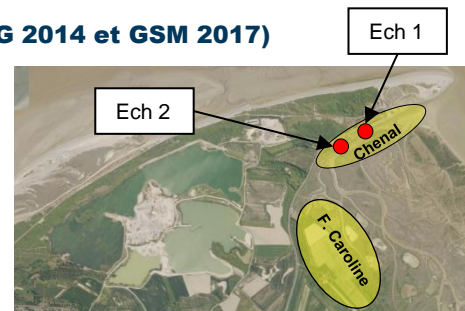
Des tests de lixiviation ont été réalisés sur ces échantillons afin de vérifier le caractère inerte ou non des sédiments susceptibles d'être mis en dépôt dans la carrière GSM.

La salinité de ces remblais est homogène avec une moyenne de 690 mg/l. Cette valeur est inférieure à la salinité actuelle de la nappe superficielle calculée au droit de la carrière (valeur médiane de 4 512 mg/l).

Ces valeurs sont cohérentes avec les données extraites de l'étude d'aménagement de la ferme de la Caroline en 2014 (données Conseil Général (CG) de la Somme).

**Tabl. 1 - Salinité des sédiments du port du Hourdel (données CG 2014 et GSM 2017)**

Echantillon	Chlorures (mg/l)	Sulfates (mg/l)	Salinité (mg/l)
Digue Caroline (CG80, 2014) <sup>2</sup>	358	-	646
Chenal Hourdel (CG80, 2014) <sup>2</sup>	422	-	762
Chenal Port n°1 (GSM, 2017)	430	170	776.8
Chenal Port n°2 (GSM, 2017)	320	160	578



## 5.4. SEUILS REGLEMENTAIRES

Afin de caractériser la qualité d'un matériau, une lixiviation est effectuée.

Les seuils permettant de déterminer son caractère inerte sont les suivants pour le chlorure et le sulfate (d'après l'arrêté du 12 décembre 2014) :

**Tabl. 2 - Seuils réglementaires pour l'acceptation des déchets**

Critère	Valeur limite à respecter <sup>3</sup> (mg/kg MS)	Valeur limite à respecter (mg/l)	Seuil x 3 (mg/l)
<b>Chlorure</b>	800	80	240
<b>Sulfate</b>	1 000	100	300
<b>Salinité</b>	-	144.6	433.6

Au droit de la carrière, les teneurs en chlorure des eaux souterraines sont comprises entre 390 et 15 000 mg/l. Le fond géochimique de la masse d'eau est donc nettement supérieur aux valeurs seuils spécifiées dans l'arrêté et proche des valeurs de sédiments (578 à 777 mg/l).

De même, les teneurs en sulfate sont comprises entre 62.1 et 1 880 mg/l. Le fond géochimique de la masse d'eau est proche, voire supérieur, aux valeurs seuils spécifiées dans l'arrêté ainsi qu'aux teneurs mesurées dans les sédiments (160 mg/l).

D'après l'article 12-3 de l'Arrêté Ministériel du 22 septembre 1994, faisant référence à l'article 6 de l'arrêté de 12 décembre 2014, il est possible d'adapter par arrêté préfectoral ces valeurs limites, après justification particulière et sur la base d'une étude visant à caractériser le comportement d'une quantité précise d'un déchet dans une installation de stockage donnée et son impact potentiel sur l'environnement et la santé. Cette adaptation pourra notamment être utilisée pour permettre le stockage de déchets dont la composition correspond au fond géochimique local.

Le taux de salinité (chlorure, sulfate, ...) des sédiments envisagés pour le remblaiement est « en l'état » supérieur au seuil maximal autorisé par l'arrêté du 12 décembre 2014. Pour permettre l'utilisation des sédiments comme remblais, ceux-ci seront laissés après extraction à l'influence de

<sup>2</sup> Digue Caroline : moyenne des 6 échantillons prélevés (CG80, 2014) / Chenal Hourdel : moyenne des 5 échantillons prélevés (CG80, 2014)

<sup>3</sup> Valeur (mg/l) = valeur (mg/kg MS) / 10

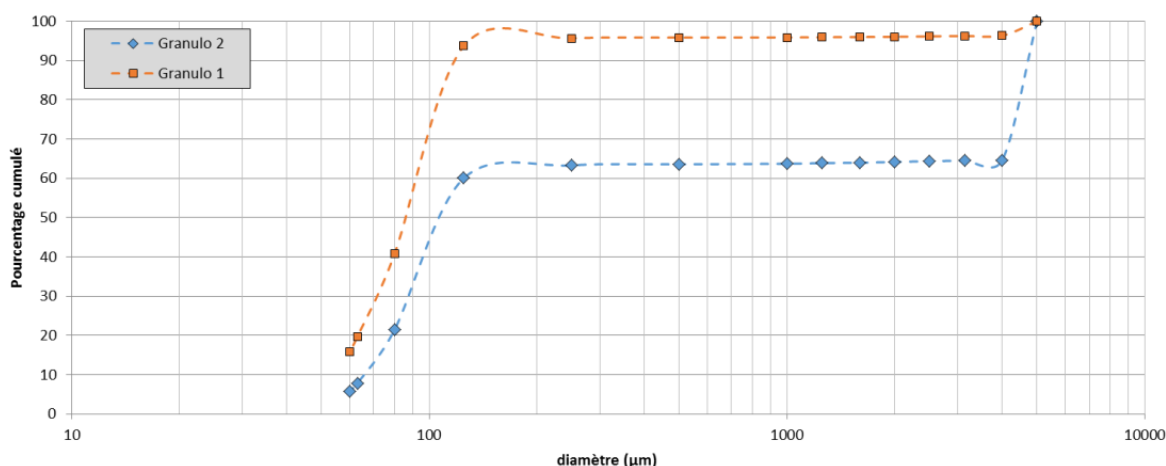
la pluie pour lessivage. Quelques mois devraient suffire pour que le taux de salinité (chlorure et sulfate) diminue et atteigne des valeurs inférieures aux seuils X3 réglementaires. Ce retour d'expérience résulte d'une expérimentation menée par les carriers du Crotoy sur les sédiments du bassin de chasse du Crotoy (Etude Impact Eurarco, 2017).

## 6. PERMEABILITE DES SEDIMENTS DU PORT DU HOURDEL

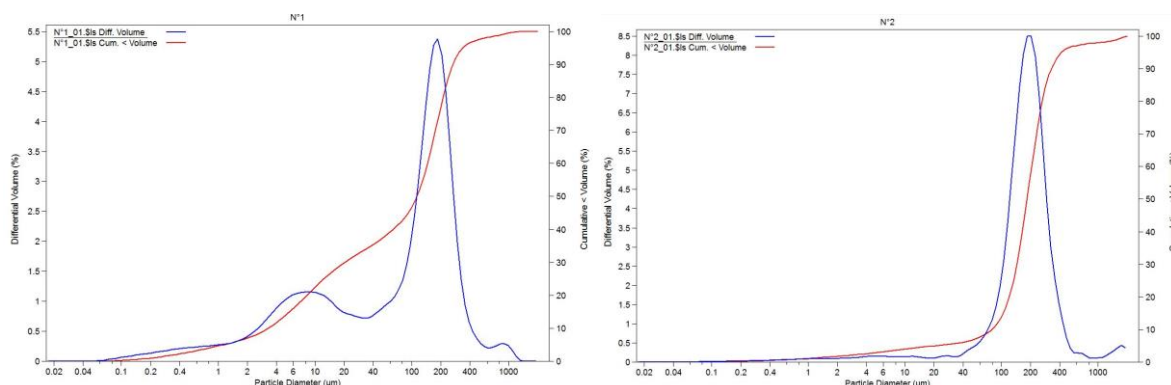
Des analyses granulométriques ont été réalisées par le laboratoire de géologie de l'université de Caen sur les 2 échantillons de sédiments prélevés dans le port du Hourdel par GSM avec le Conseil Général de la Somme en décembre 2016. La répartition granulométrique est présentée ci-après.

Pour chaque échantillon, une 1<sup>ère</sup> analyse granulométrique a été réalisée par tamisage. Les résultats sont présentés sur la Fig. 16.

Pour la fraction fine (< 2 mm), une analyse granulométrique au laser a été réalisée. Les résultats sont présentés sur la Fig. 17.



**Fig. 16. Répartition granulométrique au tamis des sédiments**



**Fig. 17. Répartition granulométrique au laser (fraction inférieure à 2 mm) des sédiments**



---

Les sédiments échantillonnés sont des sables classés comme fins à très fins avec un diamètre médian inférieur à 200 µm. La teneur en particules fines (inférieures à 63 µm) a été mesurée à 15.8% et 5.8%.

A partir de ces analyses, il est possible d'estimer la perméabilité des sédiments grâce à l'application de la formule de Hazen :

$$K = CD_{10}^2$$

C : coefficient d'uniformité Hazen /  $D_{10}$  : diamètre des grains correspondant à un passant de 10%

On obtient ainsi pour l'échantillon 1 une perméabilité de  $5.10^{-8}$  m/s et pour l'échantillon 2 une perméabilité de  $1.10^{-6}$  m/s. D'après la bibliographie, les valeurs calculées sont contrastées mais restent cohérentes avec la nature des matériaux (Banton & Bangoy, 1999).

En raison de cette disparité, des tests de sensibilité sur la perméabilité des remblais seront réalisés pour chaque scénario simulé. Cette démarche consiste à modifier un seul paramètre du modèle pour ainsi évaluer son influence sur la piézométrie et la position du biseau salé au sein de l'aquifère.

## 7. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

### 7.1. MODELE UTILISE

Dans le cadre de l'étude de dépoldérisation de la Ferme Caroline en 2014, un modèle hydrogéologique sur le secteur des Bas-Champs de Cayeux a été construit et calé pour le compte du conseil général de la Somme.

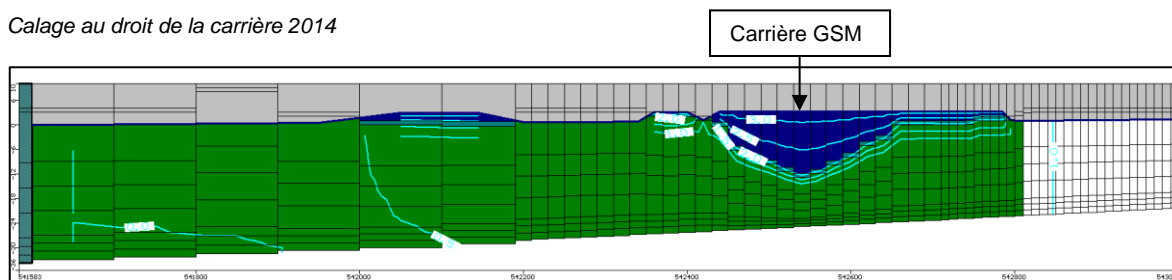
Grâce à l'acquisition de données sur un cycle hydrogéologique, la piézométrie a été calée en régimes permanent et transitoire.

Afin d'étudier la problématique de l'intrusion saline au sein de l'aquifère superficiel, ce modèle hydrogéologique a été réalisé avec le plugin SEAWAT, qui est un logiciel reconnu pour les études de modélisation hydrogéologique avec intrusion saline.

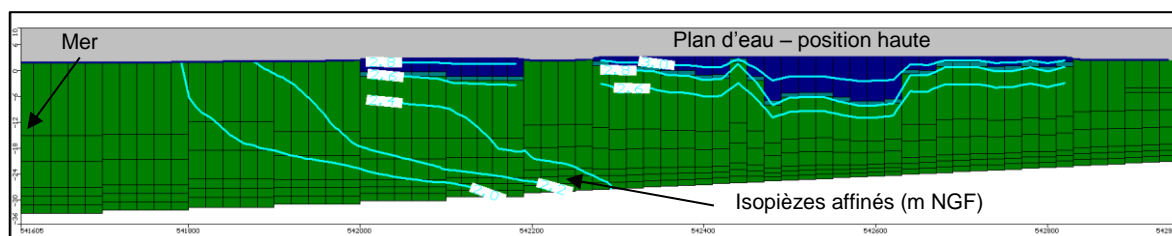
Pour l'évaluation de l'impact du réaménagement de la carrière GSM, il a été décidé de reprendre ce modèle hydrogéologique. Le calage n'a pas été repris dans le cadre de cette étude mais a été affiné au droit de la carrière GSM afin de mieux représenter les écoulements déduits des mesures piézométriques de janvier 2017 (Fig. 18).

Ensuite, le modèle a été utilisé pour simuler l'impact de la modification des conditions d'écoulement souterrain (apport de remblais) sur les niveaux piézométriques et la position de l'interface eau douce / eau salée.

*Calage au droit de la carrière 2014*



*Calage affiné au droit de la carrière 2017*



**Fig. 18. Coupe Est-Ouest : piézométrie simulée affinée au droit des plans d'eau de la carrière**

## **7.2. INTERET DU MODELE 3D PAR RAPPORT A L'UTILISATION DE L'OUTIL HYDROTEX**

L'outil HYDROTEX a été développé par le BRGM pour permettre aux services administratifs de vérifier que les terres excavées peuvent être réutilisées dans des projets d'aménagement selon certaines conditions hydrogéologiques sans affecter la qualité de la ressource en eau souterraine.

Cet outil est une feuille de calcul développée sous Excel prenant en considération :

- La concentration initiale des terres d'apport (test de lixiviation : concentration mesurée sur éluat)
- Le phénomène de dilution au sein de la nappe à partir des valeurs suivantes : pluviométrie efficace, épaisseur de la nappe, perméabilité, gradient hydraulique
- Le phénomène de dispersion, adsorption et dégradation au sein de l'aquifère

Cet outil est donc une approche simplifiée (aquifère homogène, régime permanent...) d'évaluation de l'impact de terres excavées au droit du site receveur, permettant de calculer rapidement l'acceptabilité du projet.

Dans le cadre de l'étude de la carrière du Hourdel, il a été décidé d'évaluer l'incidence des différents projets d'aménagement de la carrière à partir d'un modèle numérique 3D permettant d'intégrer plus finement :

- L'hétérogénéité des formations au sein de l'aquifère
- Les disparités spatiales de la géométrie de l'aquifère
- La complexité des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines
- La présence du biseau salé

L'approche adoptée dans cette étude est donc plus détaillée et permettra d'avoir une évaluation plus fine qu'avec Hydrotex de l'incidence des scénarios d'aménagement.

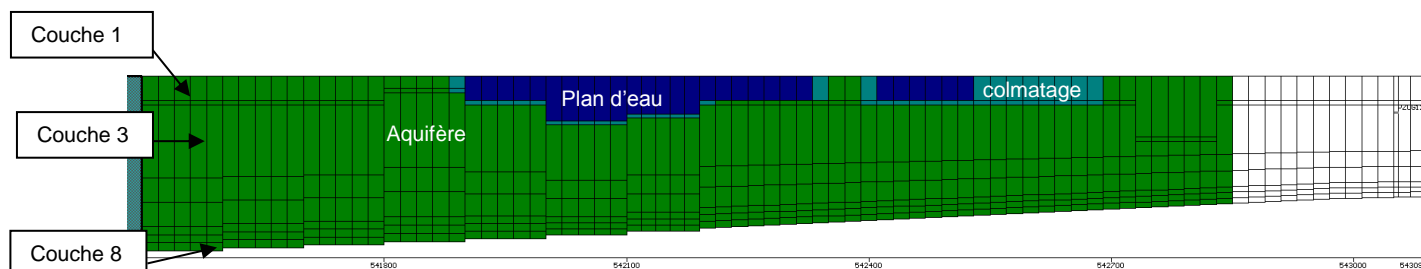
## **7.3. EMPRISE DU MODELE**

L'extension latérale du modèle a été définie :

- A l'Ouest, au trait de côte de la Manche
- A Nord, à l'embouchure de la Somme
- Au Sud et à l'Est, perpendiculairement à l'écoulement supposé des eaux souterraines.

Verticalement, la géométrie de l'aquifère a été définie d'après la carte du substratum établie à partir des coupes lithologiques traversant toute l'épaisseur de la formation quaternaire. Le substratum correspond au toit de la craie turo-sénonienne. Les échanges avec l'aquifère inférieur de la craie ont été considérés comme négligeables d'après les sources bibliographiques.

Le modèle est composé de 8 couches de façon à intégrer les plans d'eau, leurs colmatages et à simuler correctement l'intrusion saline au sein de l'aquifère (Fig. 19).



**Fig. 19. Subdivision verticale de modèle numérique de la nappe superficielle**  
 (localisation de la coupe sur la figure 19)

## 7.4. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère permettent d'évaluer, d'une part, sa facilité à laisser l'eau circuler lorsqu'il est soumis à un gradient de charge hydraulique et, d'autre part, sa capacité d'emmagasinement de l'eau. Les paramètres qui décrivent ces caractéristiques sont respectivement la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement.

Pour l'aquifère superficiel (formations quaternaires), les valeurs de perméabilité sont basées sur les données présentées dans la thèse de Beun et les analyses granulométriques réalisées par GSM sur le tout-venant. La perméabilité des sables a été évaluée entre  $4 \cdot 10^{-4}$  et  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s.

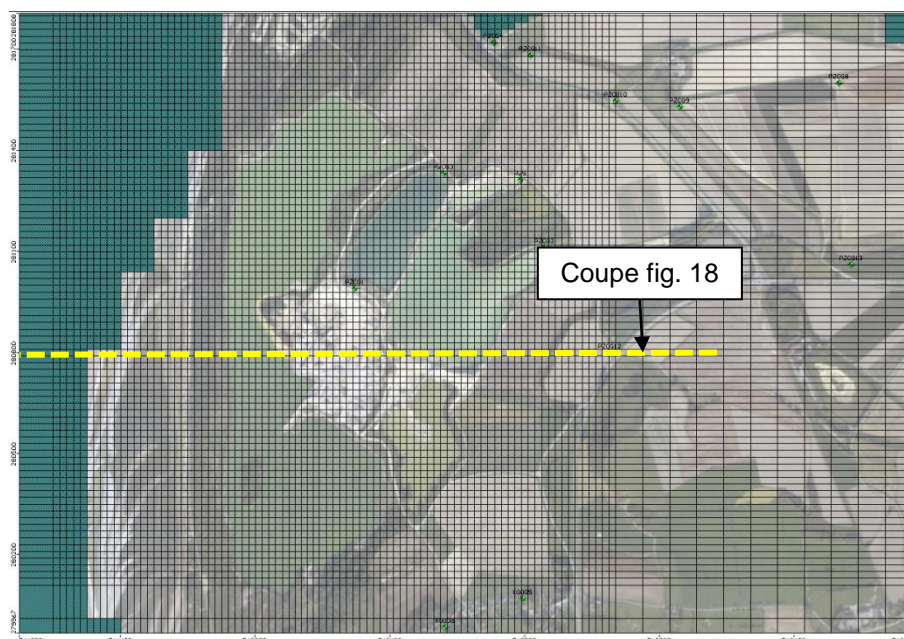
Une faible perméabilité a été intégrée pour représenter le colmatage des plans d'eau de la carrière ( $5 \cdot 10^{-8}$  m/s).

Le coefficient d'emmagasinement n'est pas connu sur la zone d'étude et a été estimé dans un premier temps d'après la connaissance lithologique. Ce paramètre a ensuite été affiné au cours du calage. Un coefficient d'emmagasinement de 0.02 a été considéré sur l'ensemble de la zone.

## 7.5. DISCRETISATION SPATIALE

Au droit de la carrière, le modèle a été discrétisé en maille élémentaire carrée de 20 m de côté. Ce maillage fin permet de représenter correctement le contour des différents plans d'eau et est nécessaire pour aborder la problématique de l'intrusion marine.





**Fig. 20. Maillage au droit de la carrière**

## 7.6. INTEGRATION DES PLANS D'EAU

Les plans d'eau ont été intégrés dans le modèle comme des zones à perméabilités élevées. Une valeur de 10 m/s a été fixée.

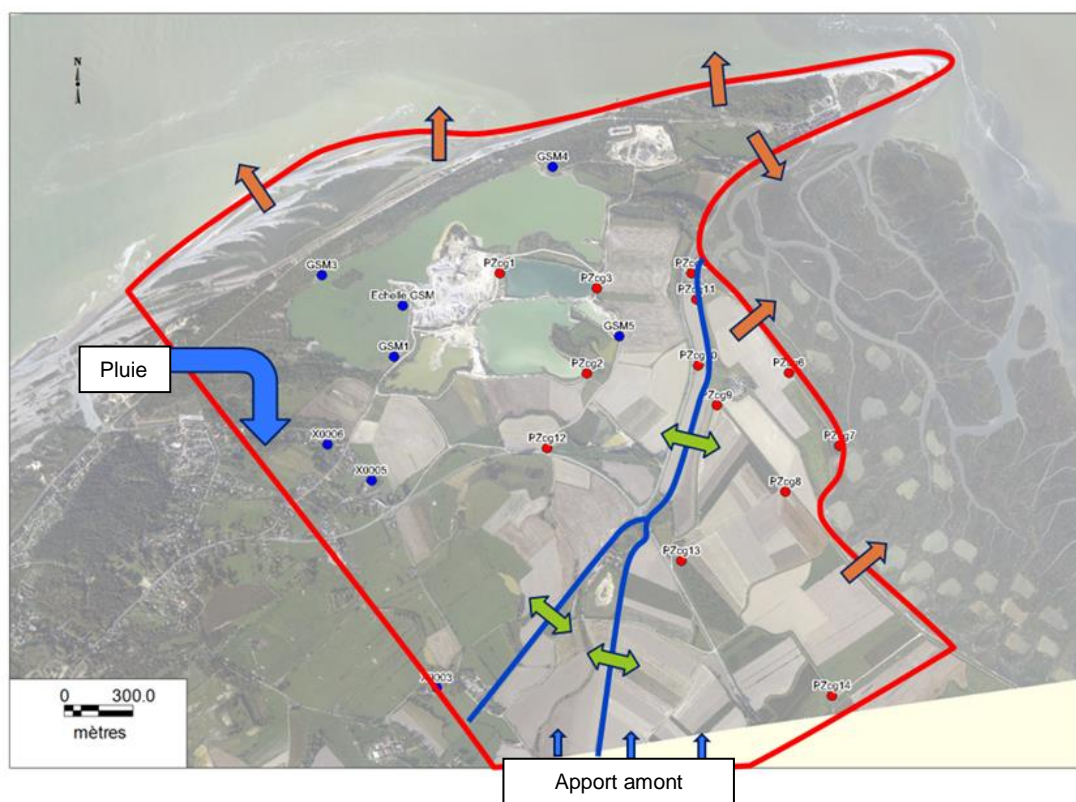
D'après l'analyse des données piézométriques, une couche à faible perméabilité a été intégrée entre les plans d'eau et l'aquifère pour simuler le colmatage des plans d'eau et leurs faibles réactivité face aux cycles de la marée.

## 7.7. CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions hydrauliques aux limites définies pour le système aquifère sont :

- La recharge par les précipitations efficaces, prises en compte sous la forme d'un débit surfacique imposé sur la couche supérieure. Un zonage a été distingué entre les zones les plus perméables et celles moins perméables.
- la cote de la mer représentée par un potentiel imposé de 0 m NGF.
- L'apport amont souterrain qui a été considéré comme faible d'après les informations piézométriques.
- Les canaux qui ont été représentés comme des conditions de rivières rechargeant ou drainant la nappe en fonction de la position relative du niveau d'eau dans la rivière et de la nappe. Les profils en long des canaux ont été déduits du LIDAR 2001. En l'absence de données, les hauteurs d'eau dans les canaux ont été considérées comme constantes et un colmatage a été pris en compte. La salinité au sein de ces canaux a été considérée comme nulle. Les courses et les petits fossés n'ont pas été intégrés dans le modèle aux vues des faibles échanges avec la nappe superficielle (cf. paragraphe 3.2).

Aucun prélèvement n'est pris en compte dans le modèle tel que puits ou rabattement de nappe.



**Fig. 21. Modèle conceptuel hydrogéologique proposé de l'aquifère superficiel**

## **7.8. SIMULATIONS REALISEES**

Ainsi, 5 simulations ont été réalisées avec le modèle hydrogéologique :

- Scénario de référence pour simuler la piézométrie et la salinité de la nappe superficielle après le réaménagement autorisé de la carrière,
- Scénario 1 pour évaluer l'incidence sur la salinité et la piézométrie du réaménagement de la Barge lors du remblaiement avec des matériaux inertes,
- Scénario 2 pour évaluer l'incidence sur la salinité et la piézométrie du réaménagement de la Barge lors du remblaiement avec des matériaux inertes et marins,
- Scénario 3 pour évaluer l'incidence sur la salinité et la piézométrie du réaménagement de la Barge et du bassin Silmer lors du remblaiement avec des matériaux inertes et marins,
- Scénario 4 pour évaluer l'incidence sur la salinité et la piézométrie du réaménagement de la Barge, des bassins Silmer et de la façade littoral lors du remblaiement avec des matériaux inertes et marins.

Les résultats de chaque simulation sont détaillés ci-après.

## 8. SIMULATIONS DES SCENARIOS DE REMBLAIEMENT DE LA CARRIERE

### 8.1. APPROCHE ADOPTEE

Les salinités élevées observées aujourd'hui au sein de la nappe alluviale ne peuvent s'expliquer par le fonctionnement hydrogéologique actuel. En effet, ces concentrations en sel doivent résulter des intrusions de la mer lorsque le site des bas-champs n'avait pas encore été aménagé par l'homme. Il est donc impossible de simuler les concentrations actuelles en sel à partir du modèle hydrogéologique, seule la simulation des impacts en relatif par rapport à une situation de référence théorique permet d'estimer de façon pertinente les impacts du projet sur la nappe.

L'approche proposée pour simuler l'incidence du projet sur les eaux souterraines est ainsi la suivante :

- Dans un 1<sup>er</sup> temps, une simulation de « référence » a été effectuée pour simuler la position théorique du biseau salé selon les conditions hydrogéologiques actuelles. Dans le cadre de cette étude, le scénario de référence correspond au réaménagement final du périmètre actuellement autorisé pour la carrière GSM et la salinité au droit de la carrière a été considérée à 0 mg/l.
- Ensuite, lors de la réflexion sur les différents scénarios d'aménagement envisageables, différentes simulations ont été menées en intégrant des modifications des valeurs de la perméabilité des matériaux de remblaiement et des conditions de recharge. Les résultats de ces simulations ont ensuite été comparés à cette référence, permettant ainsi de mettre en évidence l'incidence relative par rapport à la situation actuelle des aménagements sur la position du biseau salé au sein de l'aquifère et de l'augmentation de la salinité de la nappe.

Enfin, des tests de sensibilité ont été menés pour chaque scénario sur la perméabilité des remblais utilisés pour le réaménagement des plans d'eau en raison de l'incertitude de ce paramètre. Ces tests ont permis d'évaluer l'incidence de la variabilité de ce paramètre sur la position du biseau salé.

Chaque simulation a été réalisée, dans un 1<sup>er</sup> temps, sur une période de 10 années avec des conditions hydrauliques variant peu. Lorsqu'une modification de la position du biseau était mise en évidence, la période simulée a alors été prolongée jusqu'à 50 années. En effet, étant donné les mécanismes lents de circulation au sein de l'aquifère, cette durée a permis de reproduire la dynamique de propagation de la salinité.

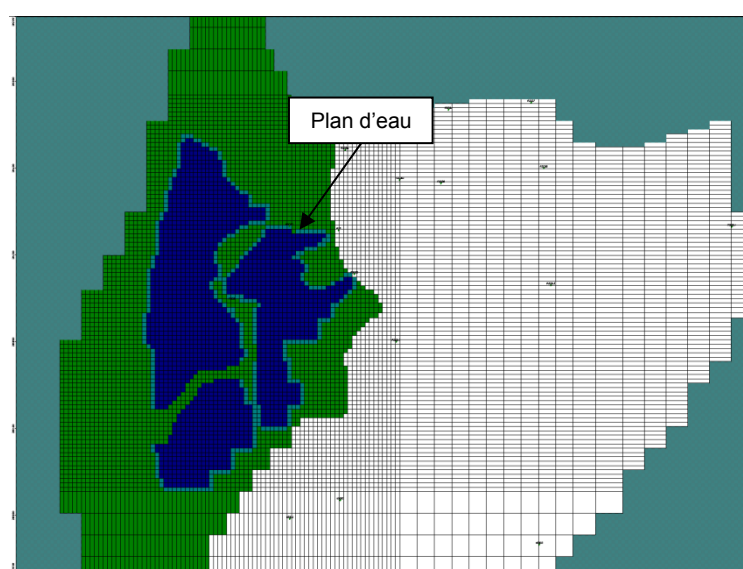


## 8.2. SCENARIO DE REFERENCE

### 8.2.1. Représentation du plan de réaménagement

Pour le scénario de référence, le plan de réaménagement proposé par GSM et validé dans l'Arrêté Préfectoral du 26/04/2011 autorisant l'exploitation des granulats a été simulé.

Tous les autres scénarios d'aménagement ont été comparés aux résultats de cette simulation pour évaluer s'ils induisaient des modifications plus importantes de l'écoulement et de la qualité des eaux souterraines par rapport à cette référence hydrogéologique.



**Fig. 22. Scénario de référence : représentation des plans d'eau de la carrière**

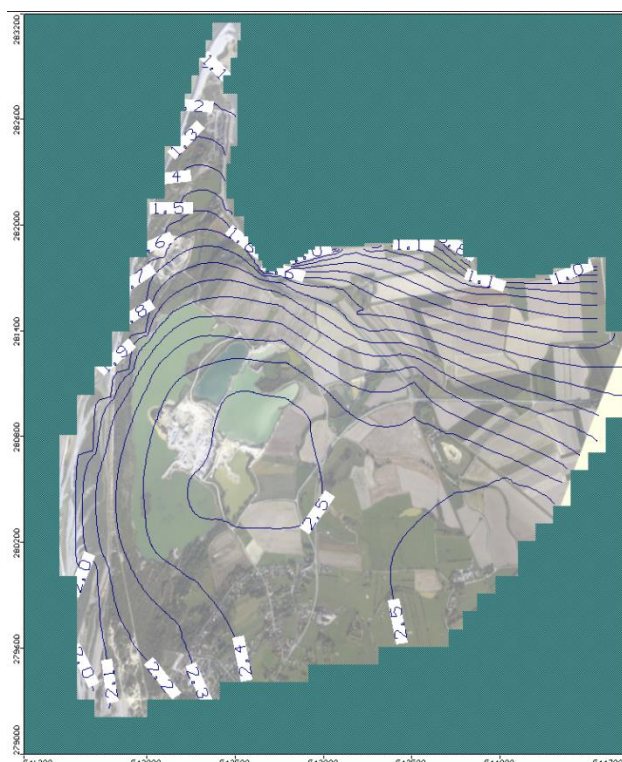
### 8.2.2. Résultats du scénario de référence

Les résultats de la simulation sont présentés sous les formes suivantes :

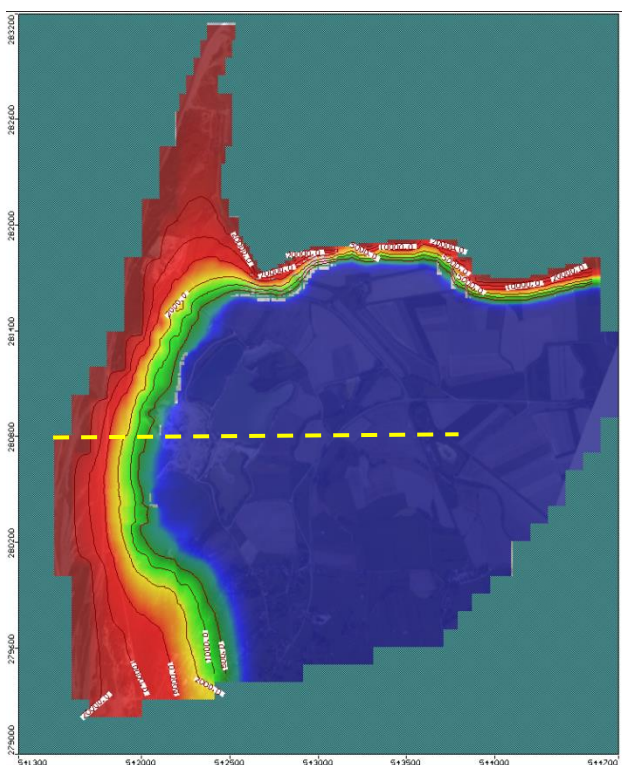
- Une carte piézométrique de l'aquifère au bout de 10 années (Fig. 23)
- Une carte de la répartition des eaux salées au sein de la nappe au bout de 10 années (Fig. 24)
- Une coupe de l'avancée du biseau salé au droit de la carrière (Fig. 25)

Pour permettre la comparaison de l'ensemble des scénarios, il a été choisi de présenter les isopièzes simulés sous les plans d'eau, soit la couche n°3. Pour les couches supérieures (plans d'eau), les cotes piézométriques simulées sont planes.

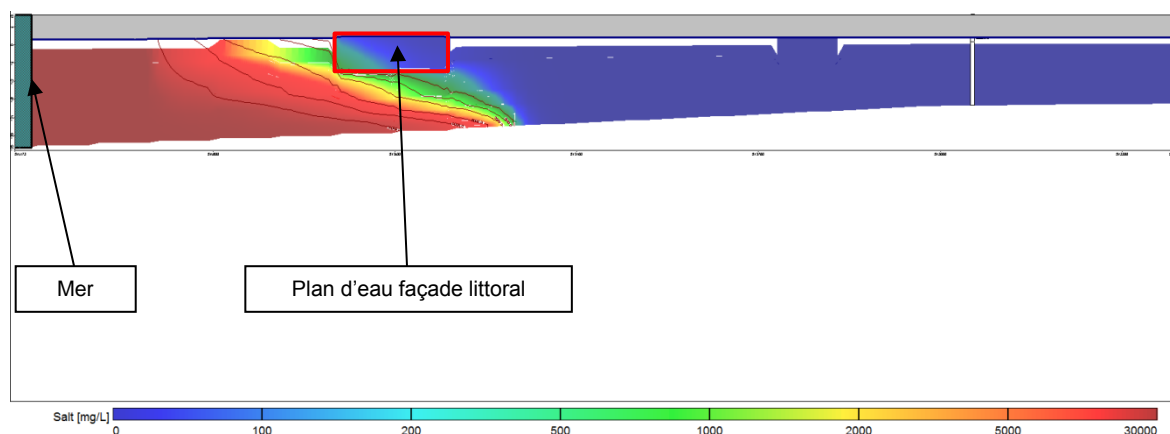
**Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état**  
Rapport final



**Fig. 23. Scénario de référence : carte piézométrique à 3600 jours (couche n°3)**



**Fig. 24. Scénario de référence : intrusion saline au sein de l'aquifère superficiel (couche n°3)**



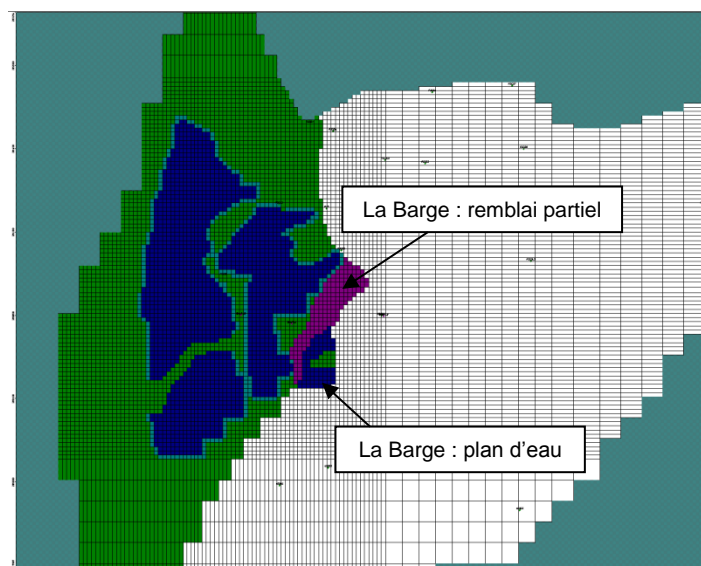
**Fig. 25. Scénario de référence : coupe Ouest-Est de la salinité au sein de la l'aquifère superficiel**

## 8.3. SCENARIO 1 : REMBLAI PARTIEL DE LA BARGE

### 8.3.1. Représentation du réaménagement

Ce 1<sup>er</sup> scénario d'aménagement a été effectué en intégrant le remblaiement partiel de la Barge avec des sédiments inertes après l'exploitation du gisement de granulats.

Pour cette simulation, la répartition des remblais est présentée sur la figure ci-dessous :



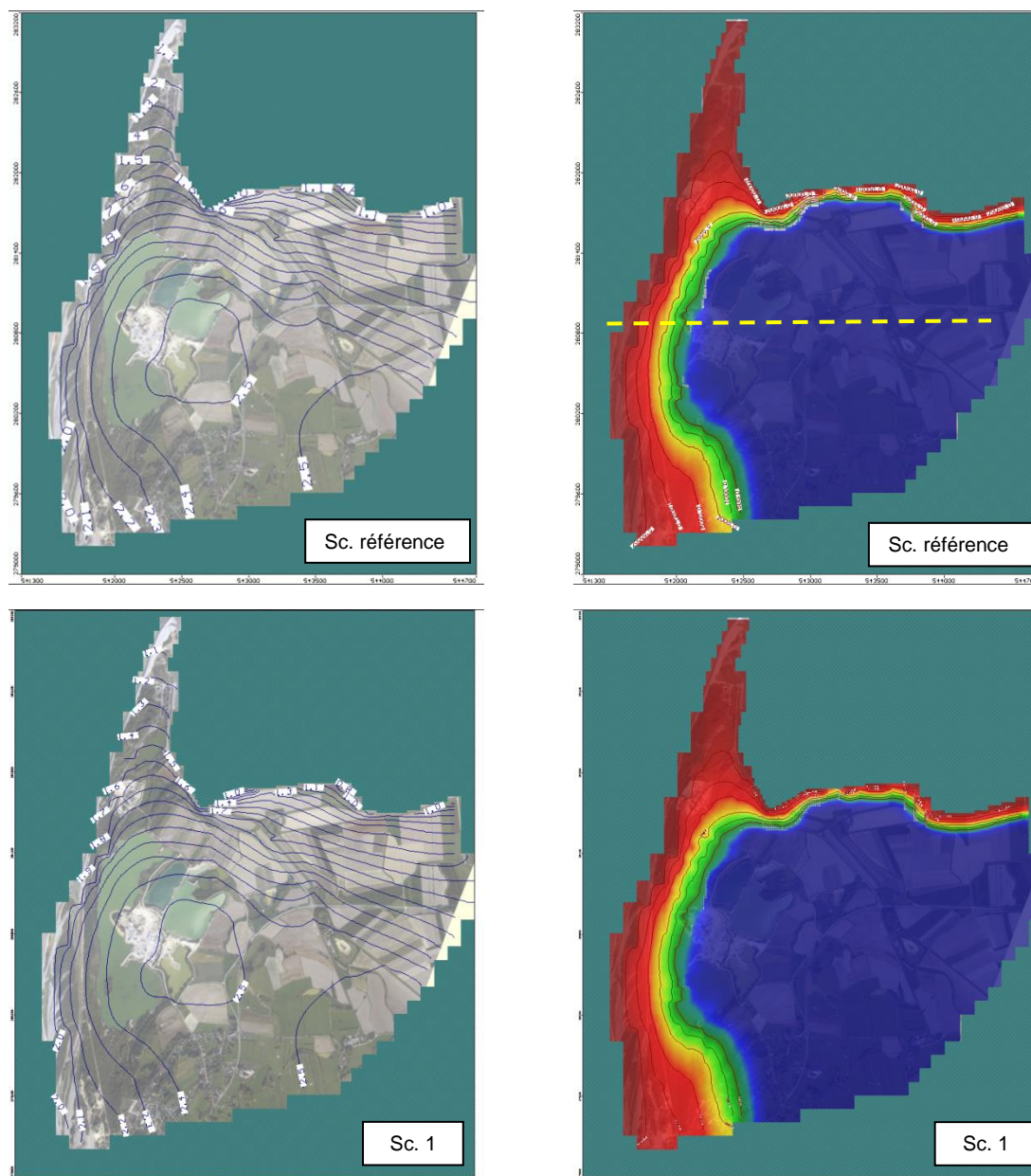
**Fig. 26. Scénario 1 : plan de réaménagement simulé**

Les matériaux inertes qui serviront pour le remblaiement du plan d'eau de la Barge proviendront essentiellement des chantiers BTP (tranchée, déconstruction,...). L'apport en sel de ces remblais a donc été considéré comme nul lors de cette simulation.

D'après les données de la bibliographie, la perméabilité de ces matériaux a été définie à  $10^{-5}$  m/s. Des tests de sensibilité ont ensuite été réalisés sur ce paramètre pour évaluer son influence sur la piézométrie simulée.

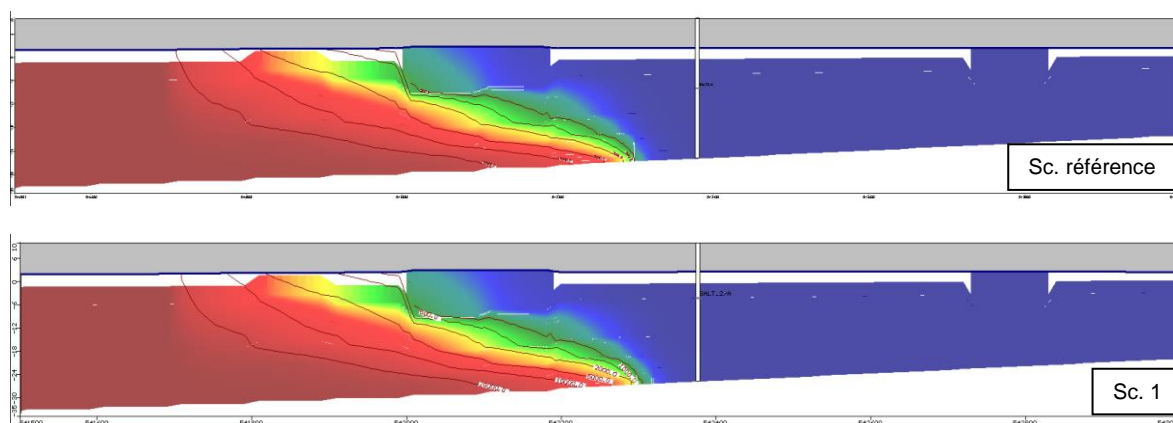
### 8.3.2. Résultats du scénario 1

Une carte de la piézométrie et une carte de la salinité au sein de l'aquifère au bout de 10 années de simulation sont présentées par comparaison avec le scénario de référence.



**Fig. 27. Scénario 1 : cartes de la piézométrie et de la salinité (couche 3)**





**Fig. 28. Scénario 1 : coupe Ouest-Est de la salinité**

Le remblai partiel du site de la Barge n'a pas d'incidence significative sur l'écoulement des eaux souterraines et la position du biseau salé. Le faible gradient ainsi que les directions d'écoulement sont conservés.

### 8.3.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités

Des tests de sensibilité ont été effectués sur la perméabilité des remblais : une perméabilité de  $10^{-6}$  puis de  $10^{-4}$  m/s a été simulée.

Pour comparaison, les chroniques simulées de la salinité et de la piézométrie au droit de piézomètres de référence, situés à proximité du site de la Barge, sont présentées ci-dessous pour l'ensemble des simulations.

**Tabl. 3 - Sc1 – Tests de sensibilité : perméabilités testées**

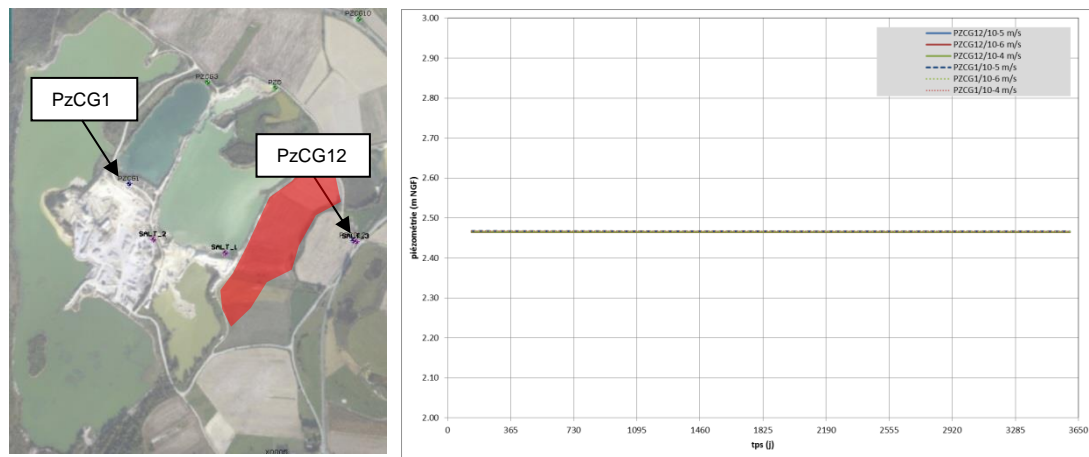
	Scénario 1		
	1a	1b	1c
La Barge	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-4}$ m/s

Aux vues des figures Fig. 29 et Fig. 30, il est possible de conclure que pour les 3 valeurs de perméabilité testées, aucune modification n'a été observée pour la piézométrie et la salinité (chlorure, sulfate,...) du plan d'eau de la carrière :

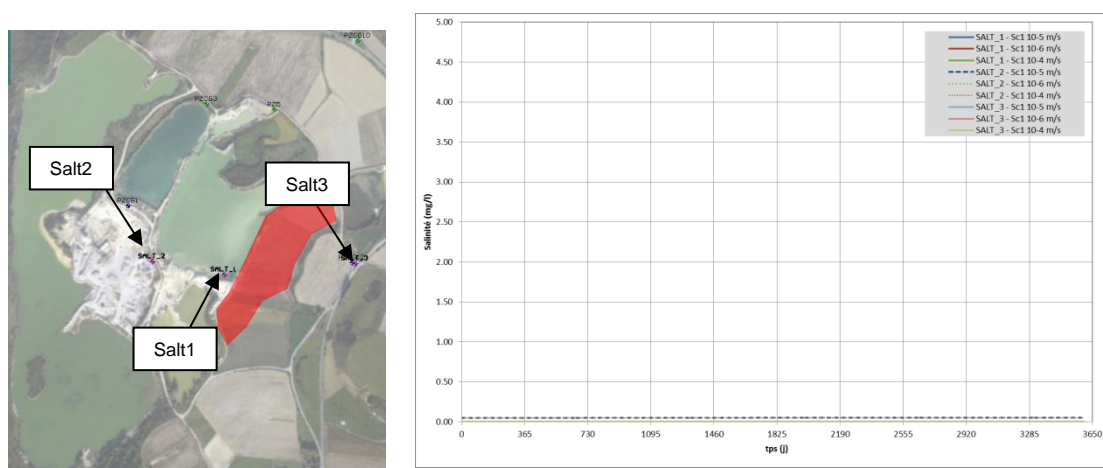
- La piézométrie au droit des ouvrages de référence reste constante autour de la valeur de 2.45 m NGF,
- La salinité est constante, proche de 0 mg/l.

# Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état

Rapport final



**Fig. 29. Sc1 - tests de sensibilité de la perméabilité – chroniques piézométriques**

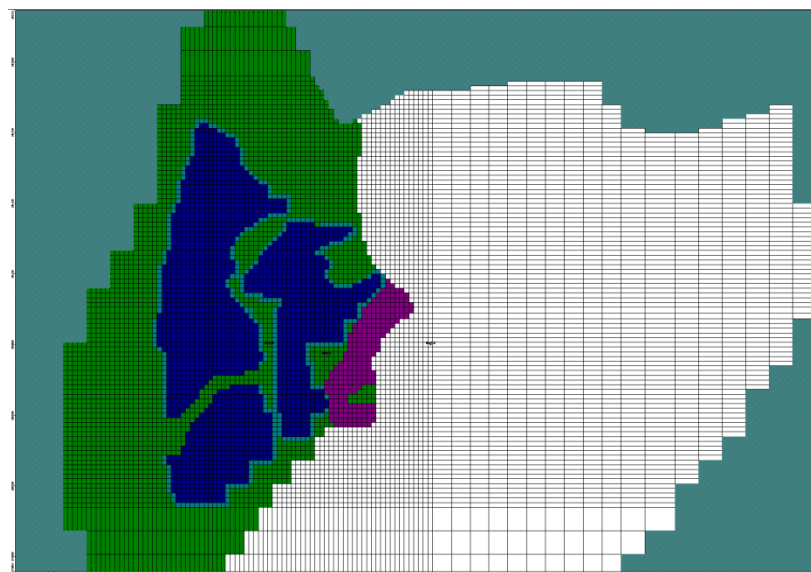


**Fig. 30. Sc1 - tests de sensibilité de la perméabilité – chroniques de la salinité**

## 8.4. SCENARIO 2 : REMBLAI TOTAL DE LA BARGE

### 8.4.1. Représentation du réaménagement

Ce 2<sup>nd</sup> scénario d'aménagement intègre le remblaiement total de la Barge avec des matériaux inertes (chantiers BTP) (50%) et des sédiments marins (port du Hourdel, dépollérisation...) (50%).



**Fig. 31. Scénario 2 : plan de réaménagement simulé**

Pour ce scénario, la perméabilité des sédiments a été définie comme suit :

- 50% des sédiments marins avec une perméabilité de  $10^{-7}$  m/s,
- 50% de remblais inertes avec une perméabilité de  $10^{-5}$  m/s,

Soit, en 1<sup>ère</sup> approximation, une perméabilité totale des matériaux de  $10^{-6}$  m/s.

Aux vues des teneurs en sel (sulfate, chlorure,...) des sédiments marins (moyenne 690 mg/l) proches, voire inférieures, à celle de la nappe superficielle (moyenne 4 592 mg/l), l'apport en sel de ces sédiments a été considéré comme nul.

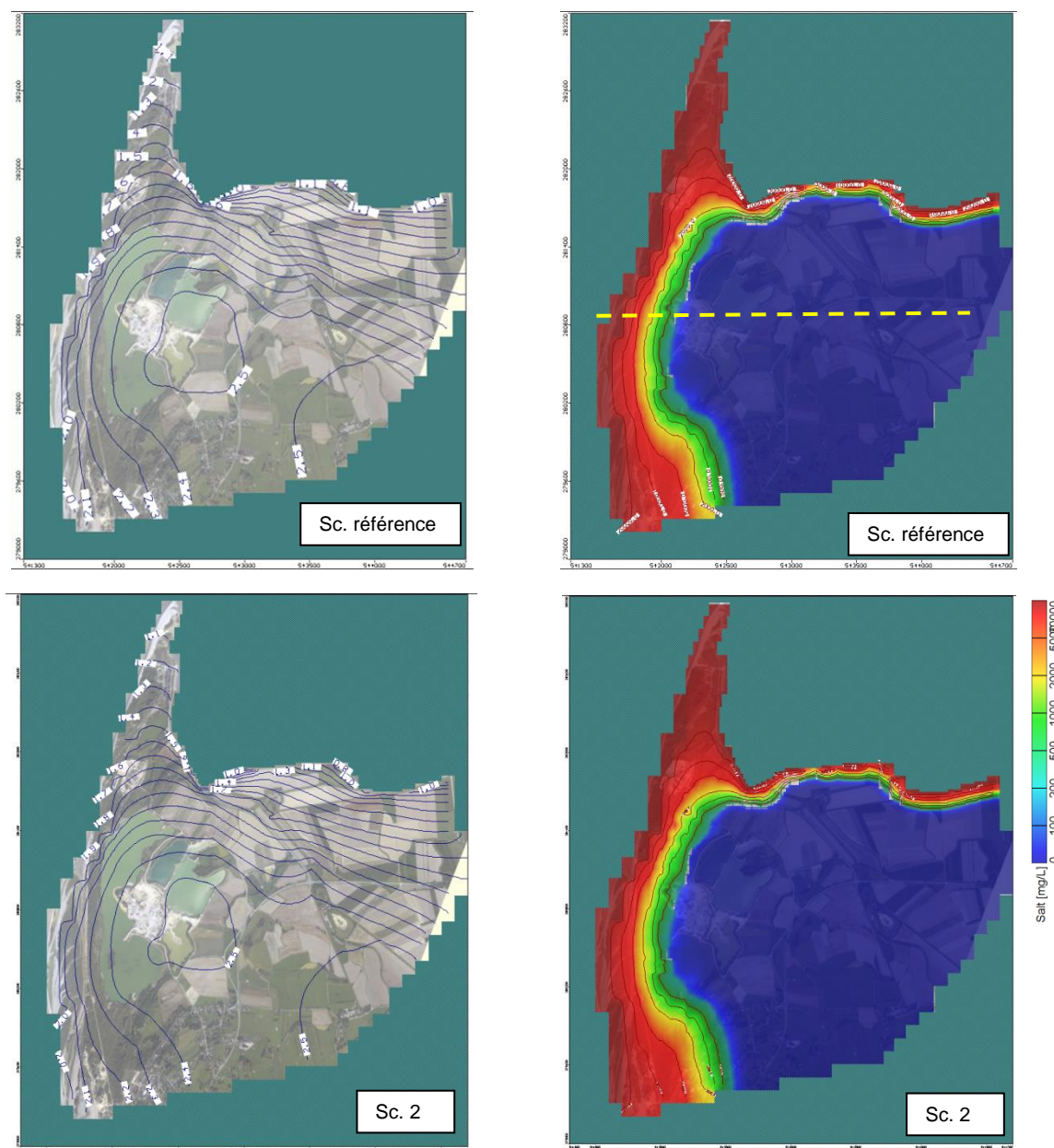
La pluviométrie efficace au droit des zones remblayées a été considérée comme moins importante (baisse de 25%) en raison de la perméabilité plus faible des remblais. En effet, il a été estimé qu'une part plus importante des pluies ruissellerait en surface via les courses jusqu'à la mer. Cette hypothèse sécuritaire (baisse des apports d'eau douce au sein de l'aquifère) permet alors d'évaluer son influence sur la position du biseau salé.

### 8.4.2. Résultats du scénario 2

Une carte de la piézométrie et une carte de la salinité au sein de l'aquifère au bout de 10 années de simulation sont présentées par rapport au scénario de référence.

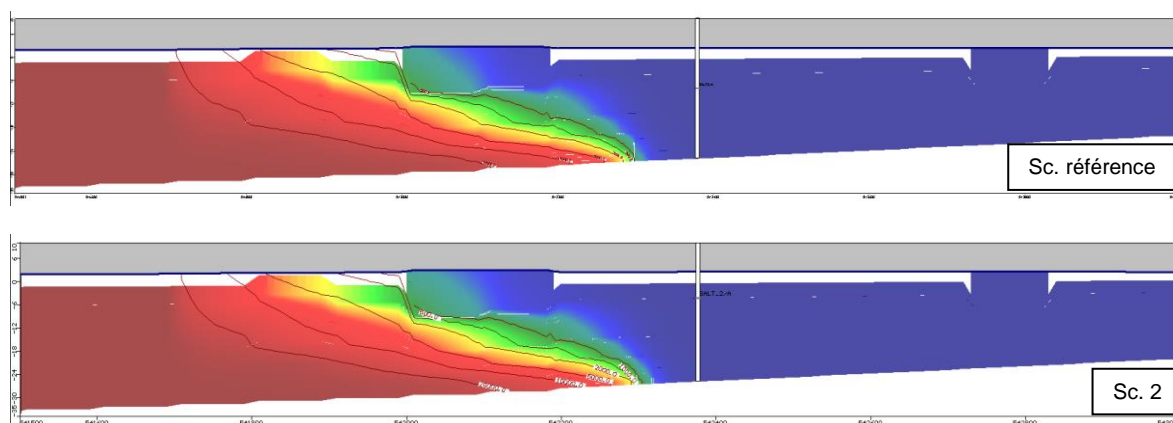
Au droit de la carrière, une coupe de l'évolution des teneurs en sel est présentée à titre de comparaison avec le scénario de référence.

**Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état**  
Rapport final



**Fig. 32. Scénario 2 : cartes de la piézométrie et de la salinité (couche 3)**





**Fig. 33. Scénario 2 : coupe Ouest-Est de la salinité**

Le remblai total du site de la Barge n'a pas d'incidence significative sur l'écoulement des eaux souterraines et la position du biseau salé. Le faible gradient ainsi que les directions d'écoulement sont conservés.

#### 8.4.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités

Deux tests de sensibilité ont été effectués sur la perméabilité des remblais :

- Une perméabilité totale plus élevée à  $10^{-5}$  m/s
- Une perméabilité totale plus faible à  $10^{-7}$  m/s

**Tabl. 4 - Sc2 – Tests de sensibilité : perméabilités testées**

	Scénario 1			Scénario 2		
	1a	1b	1c	2a	2b	2c
La Barge	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-4}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s

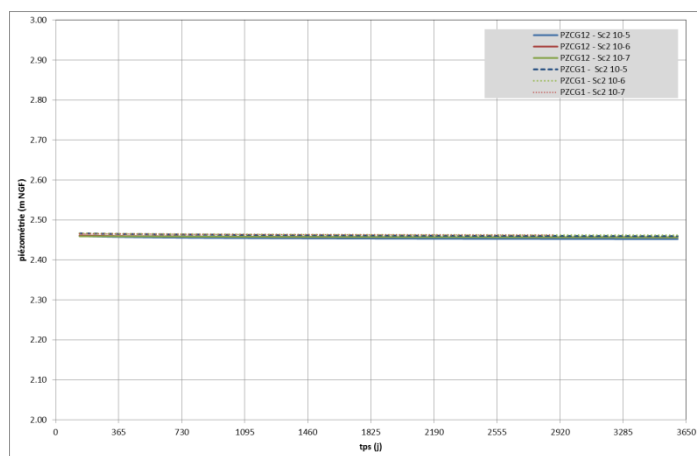
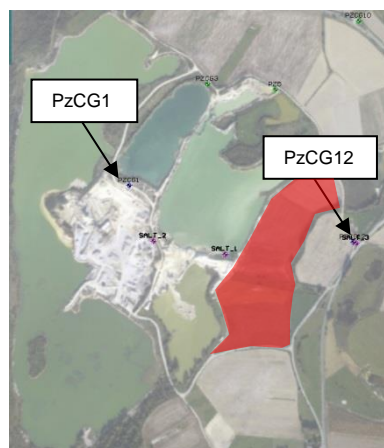
Pour les 3 valeurs de perméabilité testées, les chroniques piézométriques et de la salinité ne montrent aucune modification (Fig. 34 et Fig. 35) :

- La piézométrie au droit des ouvrages de référence reste constante autour de la valeur de 2.45 m NGF,
- La salinité est constante, proche de 0 mg/l.

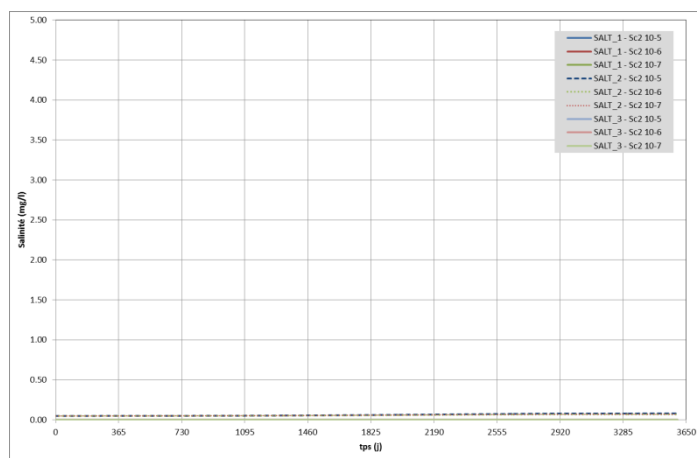
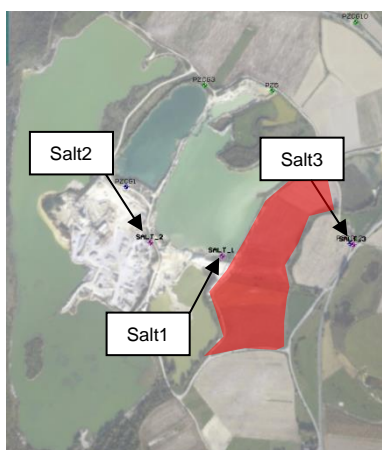
**Le remblai total du site de la Barge n'a pas d'incidence significative sur l'écoulement des eaux souterraines. Le faible gradient ainsi que les directions d'écoulement sont conservés.**

# Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état

Rapport final



**Fig. 34. Sc2 - tests de sensibilité de la perméabilité – chroniques piézométriques**

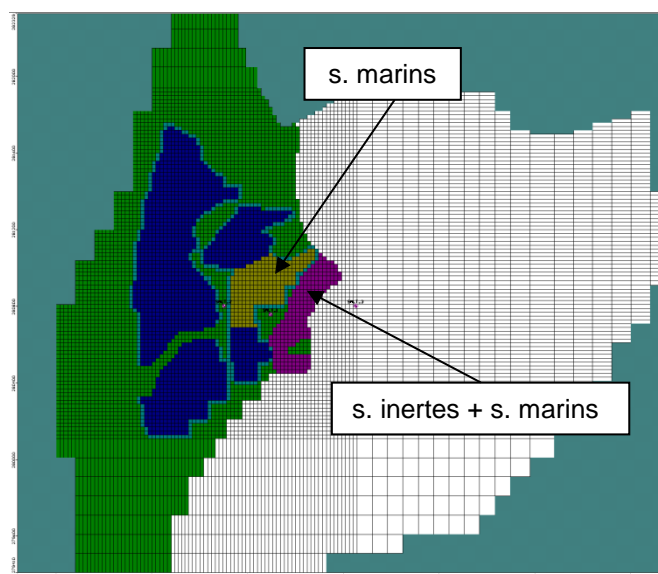


**Fig. 35. Sc2 - tests de sensibilité de la perméabilité – chroniques de la salinité**

## 8.5. SCENARIO 3 : REMBLAI TOTAL DE LA BARGE ET PARTIEL DE SILMER

### 8.5.1. Représentation du réaménagement

Ce 3<sup>ème</sup> scénario d'aménagement intègre le remblaiement avec des sédiments inertes et marins (Barge : 50% inerte / 50% marins et Silmer : 100% marins).



**Fig. 36. Scénario 3 : plan de réaménagement simulé**

Pour ce scénario, la perméabilité des sédiments a été définie comme suit :

- Pour la Barge : 50% des sédiments marins avec une perméabilité de  $10^{-7}$  m/s et 50% de remblais inertes avec une perméabilité de  $10^{-5}$  m/s soit une perméabilité moyenne de  $10^{-6}$  m/s
- Pour Silmer : 100% de sédiments marins avec une perméabilité de  $10^{-7}$  m/s

Aux vues des teneurs en sel (chlorure, sulfate,...) des sédiments marins (moyenne 690 mg/l) proches, voire inférieures, à celle de la nappe superficielle (moyenne 4 512 mg/l), l'apport en sel de ces remblais a été considéré comme nul.

La pluviométrie efficace au droit des zones remblayées a été considérée comme moins importante (baisse de 25%) en raison de la perméabilité plus faible des remblais utilisés.

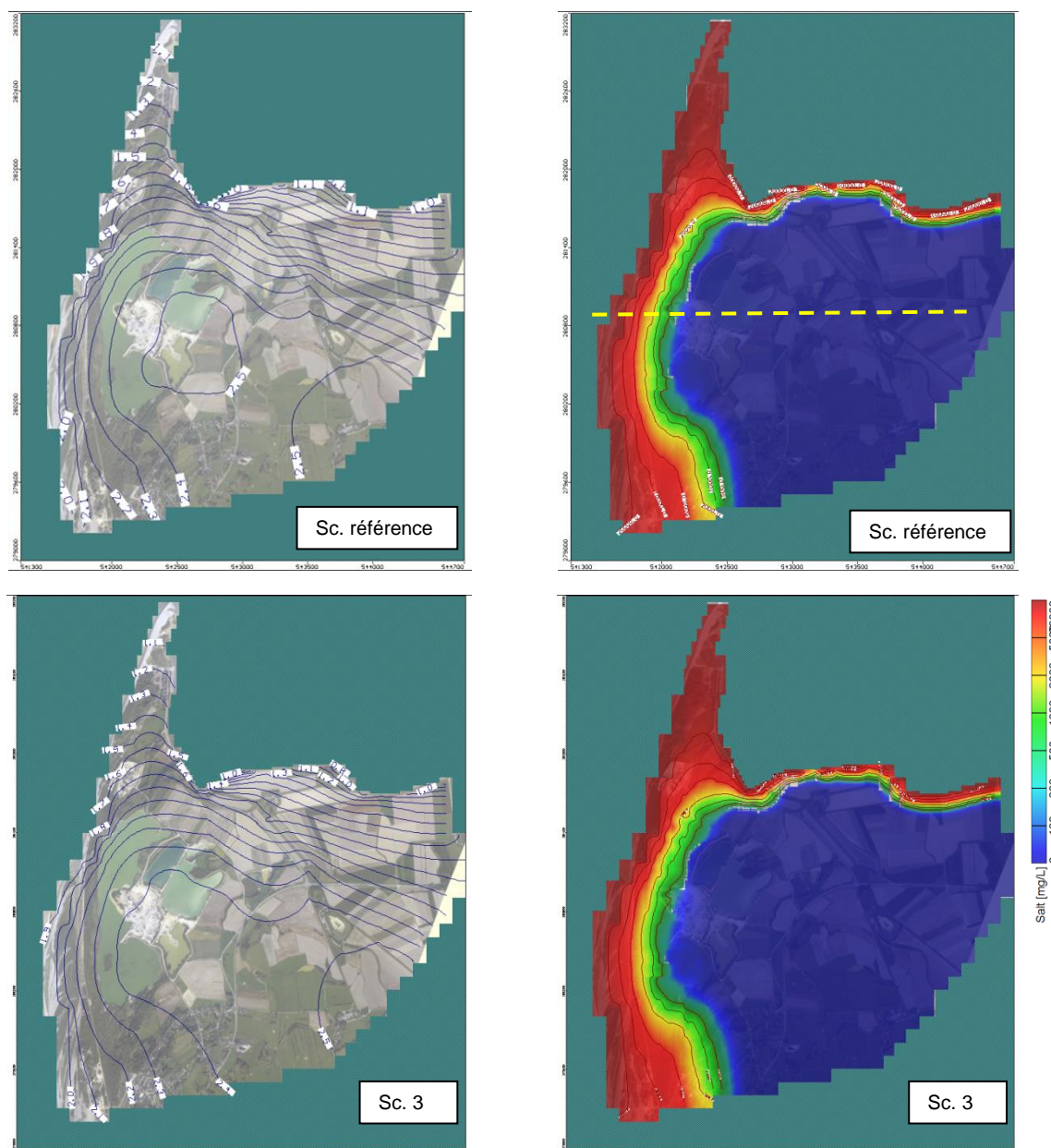
### 8.5.2. Résultats du scénario 3

Une carte de la piézométrie et une carte de la salinité au sein de l'aquifère sont présentées par rapport au scénario de référence (Fig. 37).

Deux coupes de la salinité de l'aquifère au droit de la carrière sont aussi présentées (Fig. 38).

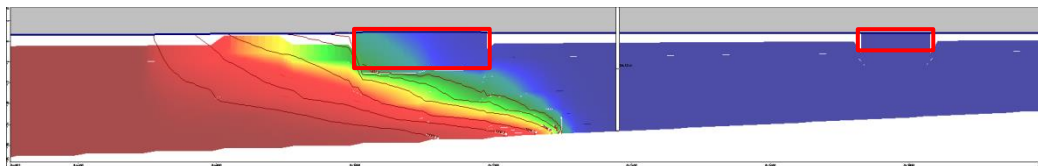
Le comblement des plans d'eau avec des matériaux peu perméables, accompagné d'une baisse de la recharge pluviométrique sur ces zones, ne modifie pas les directions d'écoulement mais

provoquent une baisse du niveau de la nappe sur le site de la Barge inférieure à 0.1 m qui favorise alors l'avancée du biseau salé au sein de l'aquifère d'environ 100 m.

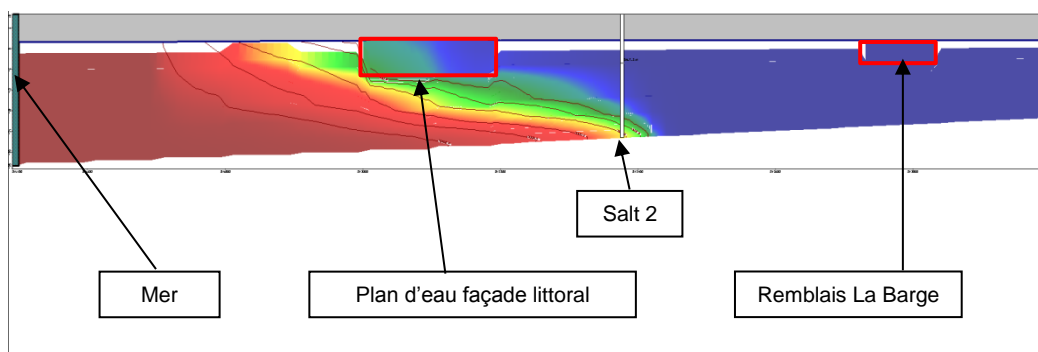


**Fig. 37. Scénario 3 : cartes de la piézométrie et de la salinité (couche 3)**

Scénario de référence – salinité au droit de Salt 2 (3600 j)



Scénario 3 – salinité au droit de Salt 2 (3600 j)



**Fig. 38. Scénario 3 : coupes de la salinité au droit de la carrière**

### 8.5.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités

Des tests de sensibilité ont été effectués sur la perméabilité des remblais :

- Pour le site de la Barge : perméabilité totale des matériaux de  $10^{-7}$  m/s et  $10^{-5}$  m/s
- Pour le plan d'eau Silmer : perméabilité des sédiments marins de  $10^{-8}$  m/s et  $10^{-6}$  m/s

**Tabl. 5 - Sc3 – Tests de sensibilité : perméabilités testées**

	Scénario 1			Scénario 2			Scénario 3		
	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c
La Barge	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-4}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s
Silmer	-	-	-	-	-	-	$10^{-7}$ m/s	$10^{-8}$ m/s	$10^{-6}$ m/s

En raison de l'incidence du remblaiement sur la position du biseau salé observé lors de la 1<sup>ère</sup> simulation, tous les scénarios ont été simulés sur une période de 50 ans afin de pouvoir bien observer la stabilisation de cette avancée au sein de l'aquifère.

Toutes les chroniques piézométriques montrent que les valeurs de perméabilité influencent peu la piézométrie simulée. Au droit de la carrière, la piézométrie baisse très légèrement et se stabilise autour de 2.4 m NGF.

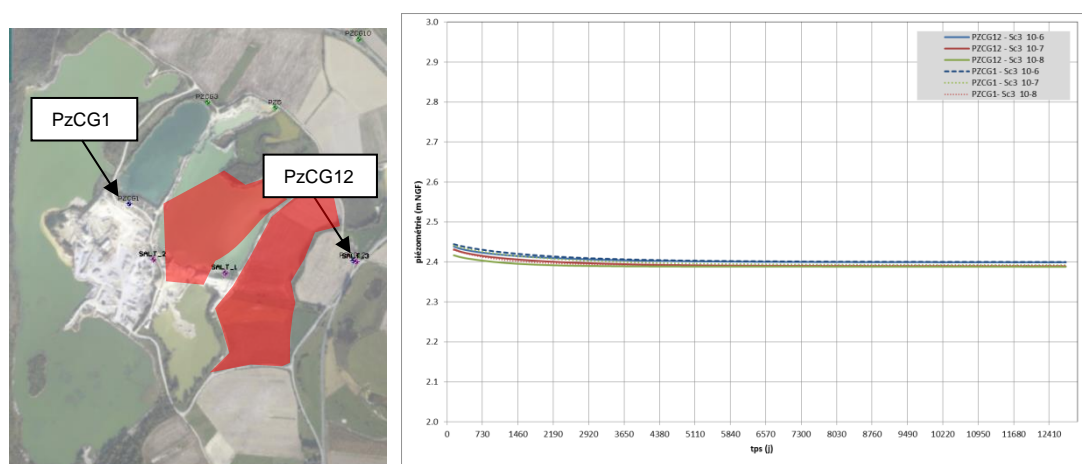


## Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état

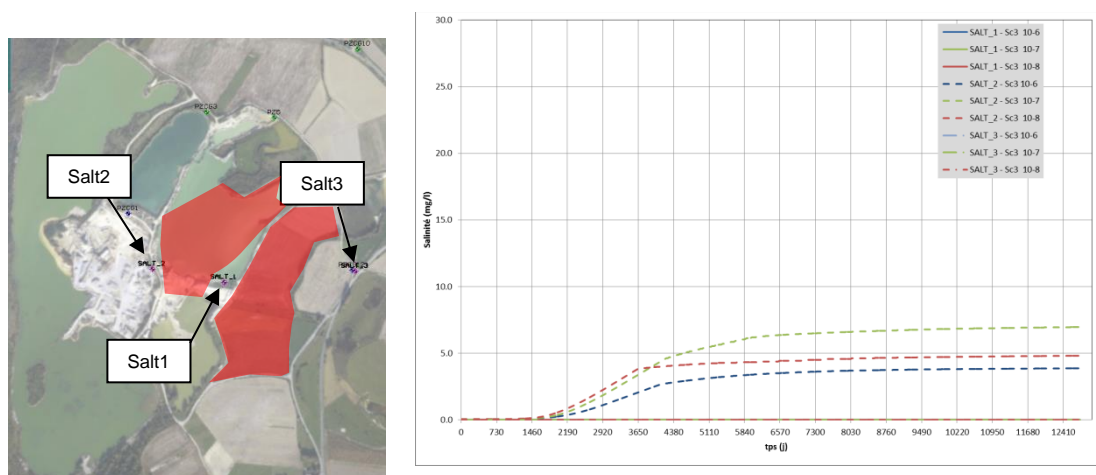
Rapport final

Les 3 valeurs testées montrent une augmentation de la salinité uniquement au droit du piézomètre le plus proche de la mer (Salt 2) : jusqu'à 7 mg/l pour une valeur de perméabilité des remblais la plus faible (Fig. 40).

Aux vues des teneurs actuelles en sel au droit de la carrière (salinité la plus faible : 705 mg/l), cette augmentation représente seulement une hausse de 1% des teneurs en sels de la nappe superficielle<sup>4</sup>.



**Fig. 39. Sc3 - tests de sensibilité à la perméabilité – chroniques piézométriques**



**Fig. 40. Sc3 - tests de sensibilité à la perméabilité – chroniques de la salinité**

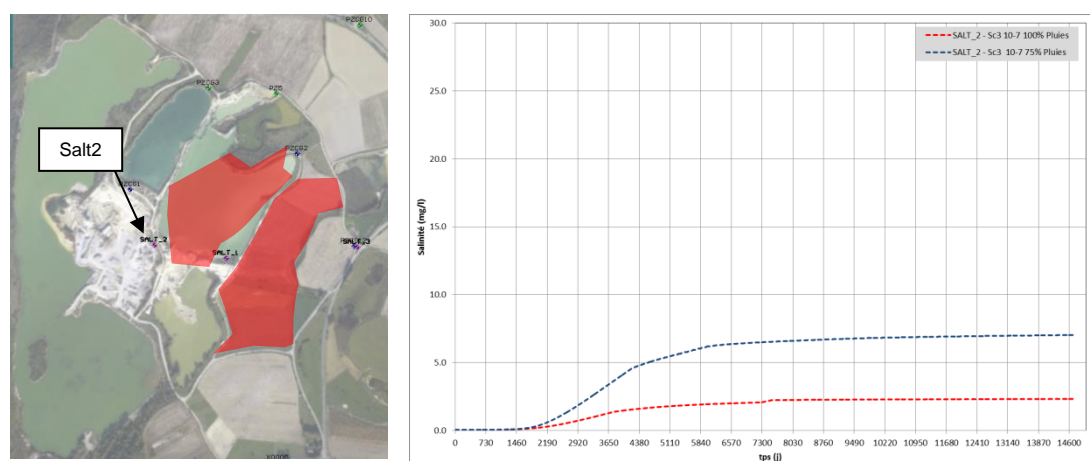
<sup>4</sup> D'autre part, d'après le suivi de la salinité du plan d'eau depuis 2008, l'augmentation mise en évidence par le scénario de remblaiement sera très inférieure aux variations naturelles de la salinité comprises entre 1675 mg/l et 8570 mg/l (annexe 2).

#### 8.5.4. Sensibilité du modèle à la recharge pluviométrique

En raison du déplacement du biseau salé au sein de l'aquifère, il a été décidé d'évaluer l'incidence de la baisse de la recharge pluviométrique sur ce résultat.

Sachant que des aménagements spécifiques pourront être mis en place au droit des zones remblayées pour permettre la ré-infiltration des eaux de pluie au droit de la carrière (évacuation des eaux vers les plans d'eau limitrophes, exploitation agricole avec travail régulier du sol), une simulation complémentaire a été réalisée en considérant qu'il n'y a pas de diminution de la recharge pluviométrique par rapport au scénario de référence (Fig. 41).

L'évolution des teneurs en sel au droit de Salt 2 montre alors que la conservation des capacités de recharge pluviométrique au droit de la carrière permet de limiter l'avancée du biseau salé. L'augmentation de la concentration en sel au sein de l'aquifère est alors stabilisée autour de 2.5 mg/l.



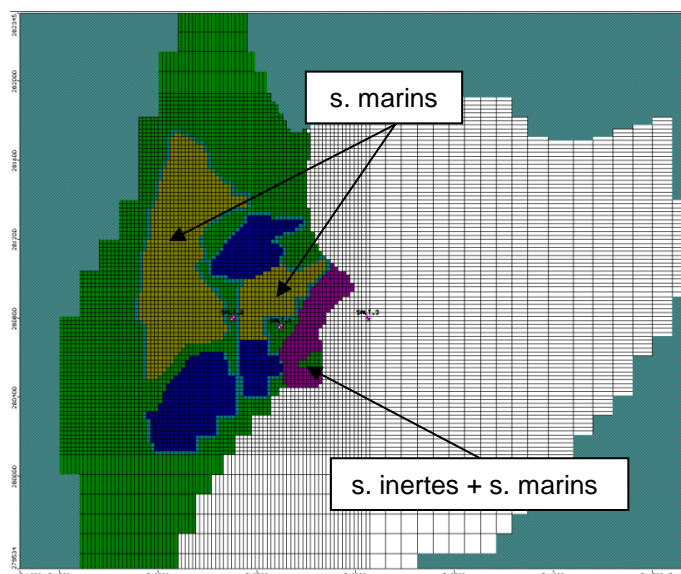
**Fig. 41. Sc3 - tests de sensibilité à la recharge pluviométrique – chroniques de la salinité**

## 8.6. SCENARIO 4 : REBLAI TOTAL DE LA BARGE, PARTIEL DE SILMER ET PARTIEL DE LA FAÇADE LITTORALE

### 8.6.1. Représentation du réaménagement

Ce 4<sup>ème</sup> scénario d'aménagement intègre le remblaiement avec des sédiments inertes et marins :

- La Barge : 50% sédiments inertes / 50% sédiments marins
- Plan d'eau Silmer : 100% sédiments marins
- Plan d'eau Façade littorale : 100% sédiments marins



**Fig. 42. Scénario 4 : plan de réaménagement simulé**

Pour ce scénario, la perméabilité des sédiments a été définie comme suit :

- Pour la Barge : 50% des sédiments marins à  $10^{-7}$  m/s et 50% de remblais inertes à  $10^{-5}$  m/s soit une perméabilité moyenne de  $10^{-6}$  m/s
- Pour les plans d'eau Silmer et de la façade littorale : 100% de sédiments marins à  $10^{-7}$  m/s

Aux vues des teneurs en sel des sédiments marins (moyenne de 690 mg/l) proches, voire inférieures, à celle de la nappe superficielle (moyenne 4 512 mg/l), l'apport en sel de ces remblais a été considéré comme nul.

La pluviométrie efficace au droit des zones remblayées a été considérée comme moins importante (baisse de 25%) en raison de la perméabilité plus faible des remblais utilisés.

### 8.6.2. Résultats du scénario 4

Une carte de la piézométrie et de la salinité au sein de l'aquifère sont présentées par rapport au scénario de référence (Fig. 43).

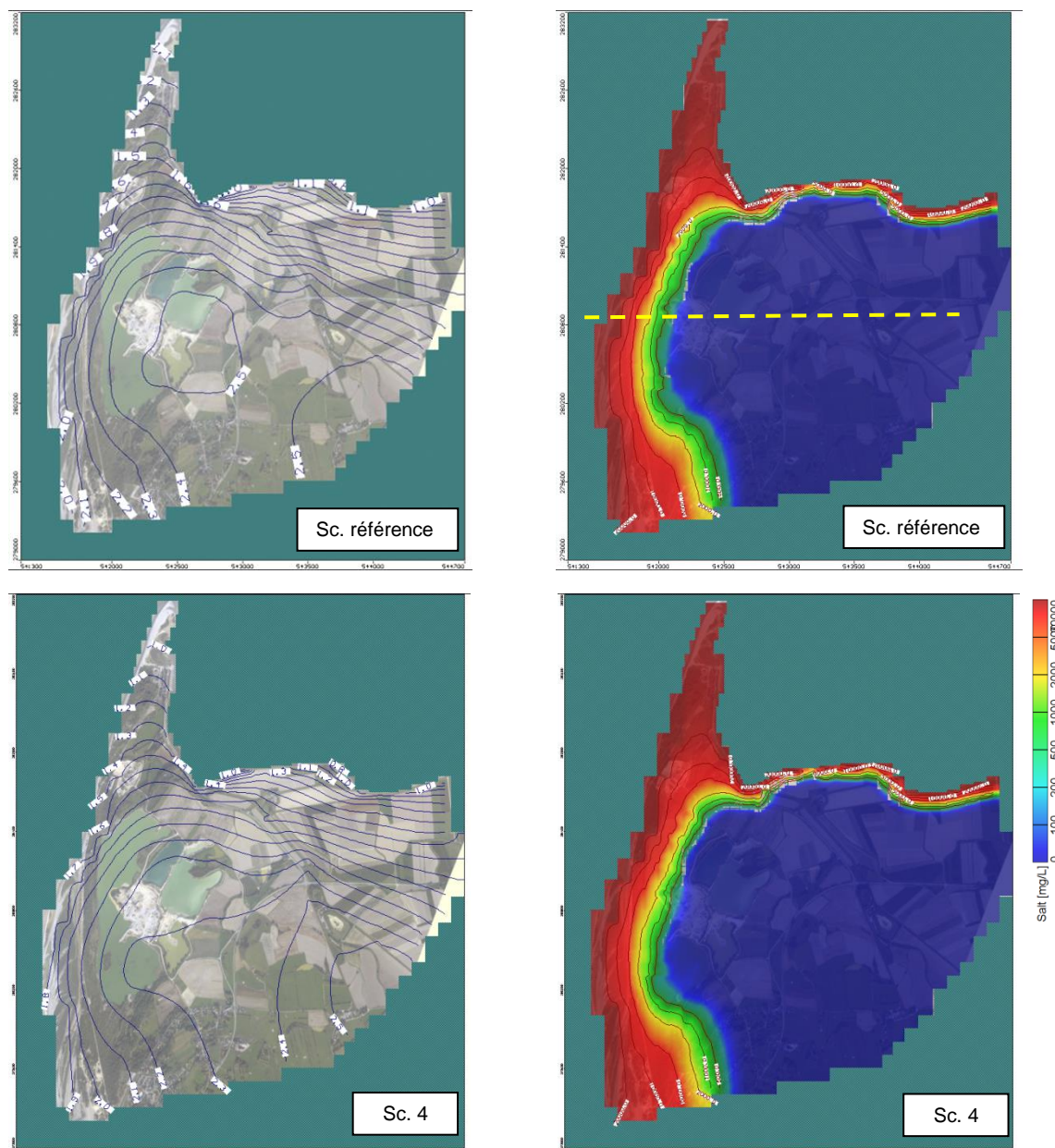
Deux coupes de la salinité de l'aquifère au droit de la carrière sont aussi présentées (Fig. 43).

Le comblement des plans d'eau avec des matériaux peu perméables, accompagné d'une baisse de la recharge pluviométrique ne modifient pas les directions d'écoulement mais provoquent une baisse du niveau de la nappe sur le site de la Barge de l'ordre de 0.2 m.

La piézométrie se stabilise autour de 2.3 m NGF au droit du site de la Barge.

Cette baisse favorise alors l'avancée, très localisée, du biseau salé au sein de l'aquifère superficiel comme l'illustre les coupes transversales (Fig. 43).

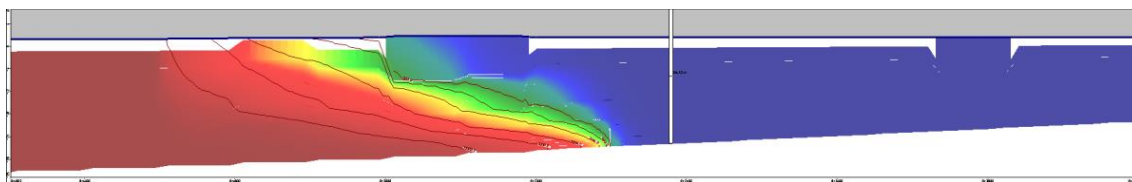
**Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état**  
Rapport final



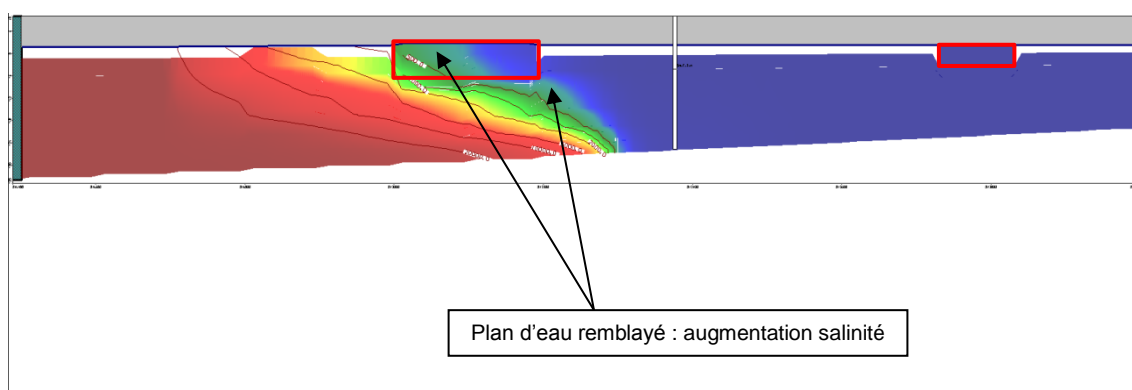
**Fig. 43. Scénario 4 : cartes de la piézométrie et de la salinité (couche 3)**



Scénario de référence – salinité (3600 j)



Scénario 4 – salinité (3600 j)



**Fig. 44. Scénario 4 : coupes de la salinité au droit de la carrière**

### 8.6.3. Sensibilité du modèle aux perméabilités

Des tests de sensibilité ont été effectués sur la perméabilité des remblais :

- Pour le site de la Barge : perméabilité de  $10^{-7}$  m/s et  $10^{-5}$  m/s
- Pour les plans d'eau Silmer et de la façade littorale : perméabilité de  $10^{-8}$  m/s et  $10^{-6}$  m/s

**Tabl. 6 - Sc4 – Tests de sensibilité : perméabilités testées**

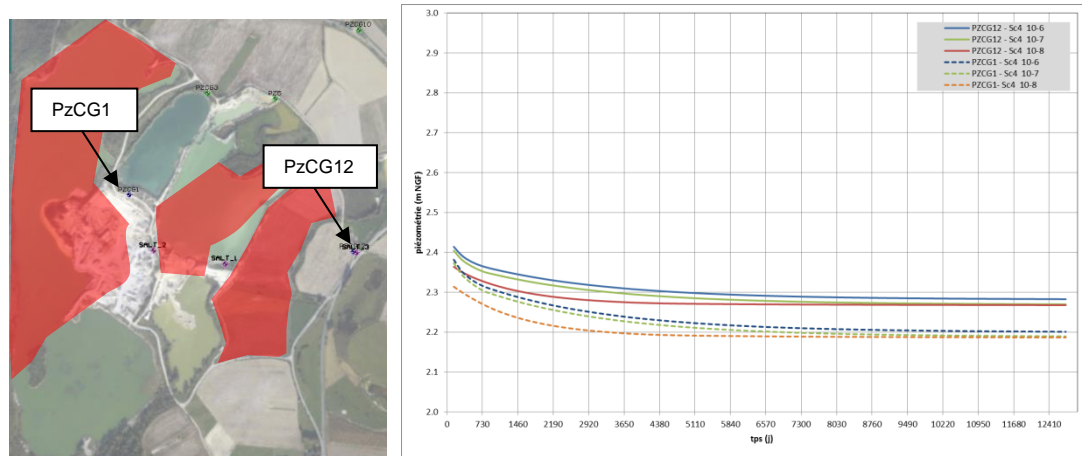
	Scénario 1			Scénario 2			Scénario 3			Scénario 4		
	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c	4a	4b	4c
La Barge	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-4}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-5}$ m/s
Silmer / façade littorale	-	-	-	-	-	-	$10^{-7}$ m/s	$10^{-8}$ m/s	$10^{-6}$ m/s	$10^{-7}$ m/s	$10^{-8}$ m/s	$10^{-6}$ m/s

En raison du déplacement du biseau salé, les simulations ont été réalisées sur une période de 50 ans afin d'observer la stabilisation de la position du biseau au sein de l'aquifère.

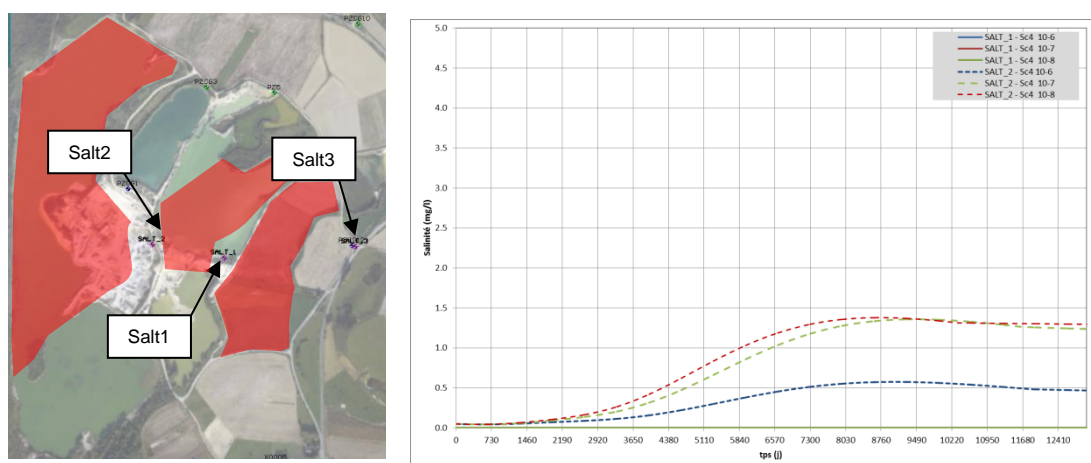
Toutes les chroniques montrent que la perméabilité des remblais a une faible incidence sur la piézométrie et l'évolution des teneurs en sels au sein de l'aquifère :

- La piézométrie se stabilise autour de la cote piézométrique 2.2 m NGF au droit de la carrière soit une baisse inférieure à 0.3 m (Fig. 45).
- La concentration en sel augmente au droit de Salt2, le plus proche de la mer avec une concentration stabilisée en deçà de 1.5 mg/l (Fig. 46). Aux vues des teneurs actuelles en sel au droit de la carrière (salinité la plus faible : 705 mg/l), cette augmentation représente une hausse inférieure à 1% des teneurs en sels de la nappe superficielle.





**Fig. 45. Sc4 - tests de sensibilité – chroniques piézométriques**



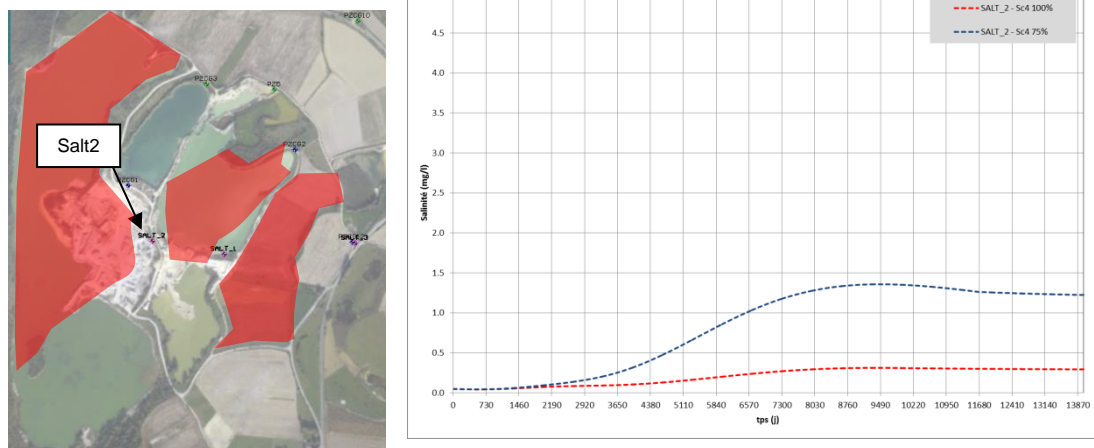
**Fig. 46. Sc4- tests de sensibilité – chroniques de la salinité**

#### 8.6.4. Sensibilité du modèle à la recharge pluviométrique

Comme pour le scénario 3, l'incidence de la baisse pluviométrique sur le déplacement du biseau salé a été évaluée.

Une simulation complémentaire a été réalisée en considérant que la recharge pluviométrique est identique à celle du scénario de référence (Fig. 41).

L'évolution des teneurs en sel au droit de Salt 2 montre que la conservation des capacités de recharge de l'aquifère au droit de la carrière permet de diminuer la concentration en sel : l'augmentation est alors stabilisée en deçà de 0.5 mg/l au bout de 50 ans.



**Fig. 47. Sc4 - tests de sensibilité à la recharge pluviométrique – chroniques de la salinité**

## 9. CONCLUSION

L'incidence des projets de remise en état envisagés sur le site de la Barge a été modélisée et évaluée en termes de niveaux piézométriques et de teneurs en sels (chlorure, sulfate,...) de la nappe superficielle.

Les teneurs en chlorure et en sulfate des remblais marins ont montré que la salinité de ces matériaux étaient proches, voir inférieures, à celles des eaux souterraines pour l'ensemble des plans d'eau de la carrière. Le comblement des plans d'eau d'extraction avec ces matériaux, qui sont compatibles avec le fond géochimique local de la masse d'eau, n'augmentera donc pas la concentration en sel de l'aquifère.

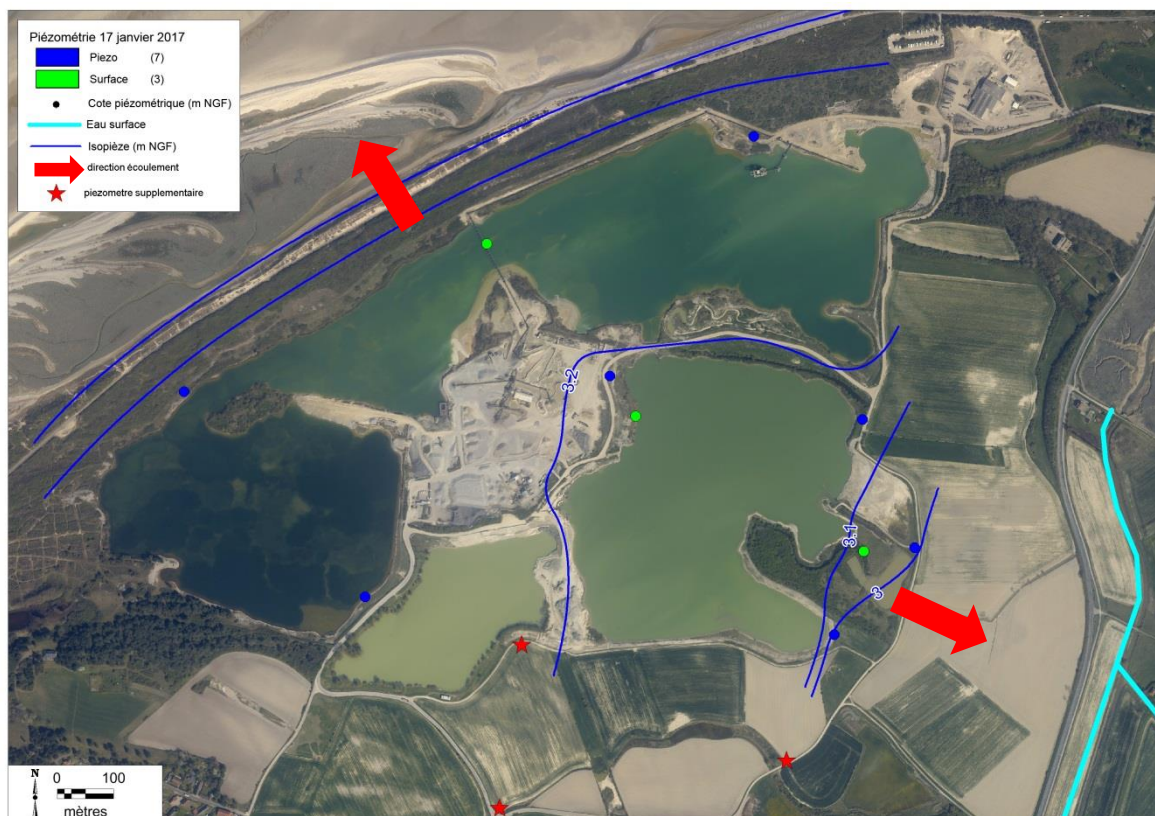
Plusieurs scénarios de remblaiement des plans d'eau ont été testés avec la prise en considération de la variabilité de la perméabilité des matériaux utilisés.

Pour le scénario le plus impactant, le remblai avec des matériaux fins a modifié localement le gradient d'écoulement des eaux souterraines ce qui a induit une faible avancée du biseau salé au sein de l'aquifère. Cette incidence sera d'autant plus limitée en conservant les capacités d'infiltration de la pluie au droit de la carrière grâce à la restitution des zones remblayées en terres agricoles qui permettra un travail régulier du sol.

Dans le cadre du contrôle de l'évolution de la qualité des eaux souterraines lors de l'extraction de la Barge, il est recommandé de poursuivre, grâce à un réseau piézométrique dédié, la surveillance piézométrique et qualitative de la nappe superficielle, notamment le suivi de la conductivité (Fig. 48) :

- Un piézomètre supplémentaire est proposé entre le périmètre d'exploitation actuellement autorisé et le futur site d'extraction de la Barge. Ce piézomètre intermédiaire permettra de préciser l'origine d'une éventuelle pollution identifiée en aval des plans d'eau d'extraction.
- Deux piézomètres supplémentaires sont proposés en aval hydraulique du site de la Barge, vers le canal de la Maye (Sud-Est), afin de pouvoir surveiller l'arrivée d'une éventuelle pollution depuis le site d'extraction.

Ces piézomètres seront réalisés dans les règles de l'Art et équipé en diamètre 80/90 mm afin de pouvoir effectuer des prélèvements d'eau avec une pompe immergée. Ces ouvrages dédiés à la surveillance recouperont toute l'épaisseur de l'aquifère des alluvions quaternaires, a priori une profondeur de 20 et 30 m, afin de pouvoir réaliser régulièrement des profils de conductivité et ainsi surveiller l'évolution de la position du biseau salé au sein de l'aquifère en fonction de l'avancement de l'extraction des galets.



**Fig. 48. Proposition de piézomètres complémentaires pour la surveillance des eaux souterraines**

oOo

## **ANNEXE 1 - Analyses 16 janvier 2017 réalisées par Kalité'o (suivi GSM)**



		PZ1 SURFACE	PZ1 PROFONDEUR	PZ3 SURFACE	PZ3 PROFONDEUR	PZ4 SURFACE	PZ4 PROFONDEUR	PZ5 SURFACE	PZ5 PROFONDEUR	PZ CG1 SURFACE	PZ CG1 PROFONDEUR	PZ CG2 SURFACE	PZ CG2 PROFONDEUR	PZ CG3 SURFACE	PZ CG3 PROFONDEUR	CONVOYEUR FLOTTANT SURFACE	CONVOYEUR FLOTTANT PROFONDEUR	BASSIN SILMER SURFACE	BASSIN SILMER PROFONDEUR	NOUVELLE COURSE	ANCIENNE COURSE	PARCELLE A122 REMODELAGE	PARCELLE A122 TROU	PARCELLE A122 PLAN D'EAU
pH	upH	7.7	7.4	7.5	7.3	7.6	7.6	7.7	7.6	7.3	7.3	7.5	7.6	7.2	7.3	8.2	8.3	8.1	8.1	8.6	8	8.5	8.5	8.1
Température	°C	7.1	11.4	9.5	11.1	10.7	12.0	12.3	12.5	9.9	11.3	11.3	12.0	10.9	12.2	4.3	4.0	4.2	4.2	3.7	4.3	2.5	2.7	4.4
Conductivité	µS/cm	4360	17900	19170	42500	16650	18710	4220	4540	11720	17910	1901	2019	3500	5660	18730	18990	6990	7020	682	982	611	846	6980
Carbone Organique Total (COT)	mg/L																			12.7	12.5	5.6	21.8	3.7
Chlorures	mg/L	1300	5700	6300	15000	5500	6300	1200	1200	2900	6000	390	450	640	1600	6400	6200	2100	2100					
Demande biochimique en oxygène (DBO5)	mg/L																			3.4	2.2	1.8	3.4	1.7
Salinité	mg/L	2349	10297	11381	27098	9936	11381	2168	2168	5239	10839	705	813	1156	2890	11562	11201	3794	3794	416	675	400	550	4480
Sulfates (SO4)	mg/L	122	639	747	1880	634	699	145	152	407	741	62.1	67.9	116	156	769	779	255	258					
Salinité calculée																								

## **ANNEXE 2 - Tableau du suivi de la salinité des plans d'eau de la carrière (données GSM)**

# Carrière du Hourdel : Evaluation des impacts sur la nappe de différents scénarios de remise en état

Rapport final

Salinité (mg/l)	avr.-08	sept.-08	avr.-08	avr.-09	oct.-09	avr.-10	oct.-10	mai.-11	nov.-11	mai.-12	nov.-12	mai.-13	oct.-13	avr.-14	nov.-14	avr.-15	oct.-15	avr.-16	avr.-17	nov-17
AP97 / Bassin Silmer	2 630	2 598	1 974	1 675	1 932	2 334	2 432	2 706	2 930	3 100	3 568	4 630	6 610	8 570	3 970	10 200	11 500	10 500	12 300	15 000
Façade littorale	8 796	12 228	8 610	11 340	8 204	12 272	12 132	16 938	10 572	9 164	13 600	12 500		18 900	10 200	11 500		10 500	12 300	15 000
Les Granets	4 236	4 516	3 762	4 420	4 008	4 378	4 484	4 986	3 066	3 152	3 400	4 530	6 680	8 500	3 970	4 370	4 370	4 080	4 400	4 520

