

AMÉNAGEMENT DES ACCÈS DÉFINITIFS
DU PONT FLAUBERT EN RIVE GAUCHE DE LA SEINE



Pièce E - Annexe 4
Études hydrogéologiques



www.acces-pontflaubert-rivegauche.fr



4.

Annexe 04 Études hydrogéologiques



DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'AMÉNAGEMENT ET DU LOGEMENT
DE HAUTE NORMANDIE
SERVICE DÉPLACEMENTS, TRANSPORTS MULTIMODAUX ET INFRASTRUCTURES

**LIAISON SUD III/A150
VOIRIES DÉFINITIVES DU PONT FLAUBERT**
ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE

2

Rapport L01-2 – 27 mars 2015



Iduna Environnement – SARL au capital social de 47.000 Euros – APE 7490B
SIRET : 451 842 298 00031 – RCS : Nanterre B 451 842 298 – TVA Intracomm. : FR18451 842 298
Siège social : 33, avenue de la République 92500 Rueil Malmaison
Tél. : 06 17 36 22 83 - www.iduna.fr - email : iduna-env@iduna.fr

Rapport n°L01-2

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE - *Liaison Sud III/A150 - Voiries définitives du Pont Flaubert - Étude hydrogéologique*

VERSION	DATE	OBJET
1	25/02/2015	1 ^{re} rédaction
2	27/03/2015	Corrections et compléments

 Liaison Sud III / A 150 Étude hydrogéologique	
SOMMAIRE	
PRÉAMBULE	1
1 Objet et portée de la mission	2
2 Contenu de la présente phase 2 - volet hydrogéologique	2
3 Localisation de la zone d'étude	3
4 Raccordement du Pont Flaubert au réseau routier	4
4.1 Historique du projet	4
4.2 Objectifs de la liaison Sud III / A150	4
4.3 Situation actuelle et projet final	5
4.4 Variantes étudiées	6
4.4.1 Rive droite	6
4.4.2 Rive gauche	6
Synthèse des données utilisées dans le modèle	9
1 Topographie	10
2 Géologie	12
2.1 Contexte géologique local	12
2.1.1 Formations superficielles - alluvions	12
2.1.2 Substratum crayeux et calcaire - structure	12
2.2 Reconnaissances géologiques réalisées sur le linéaire du Pont Flaubert et ses accès	17
3 Hydrogéologie	23
3.1 Masses d'eau souterraines	23
3.2 Piézométrie	24
3.2.1 Piézométrie générale	24
3.2.2 Influence de la marée de la Seine sur la piézométrie	25
3.2.3 Altitude de la Seine	27
3.2.4 Piézométrie observée au droit du Pont Flaubert	28
3.2.5 Température de la nappe	30
3.2.6 Paramètres hydrodynamiques	32
Modélisation	33
1 Définition du modèle conceptuel	34
2 Construction du modèle numérique hydrodynamique, description	35
2.1 Hypothèses de base et logiciels utilisés	35
2.2 Extension, domaine représenté	35
2.3 Topographie	36
2.4 Géologie	37
2.4.1 Formations superficielles	37
2.4.2 Stratigraphie	37
2.4.3 Lithologie	39
2.4.4 Paramètres hydrodynamiques	41
2.5 Recharge de la nappe	43
2.5.1 Pluviométrie sur la période de suivi	43
2.5.2 Recharge de la nappe	43
2.5.3 Altitude de la Seine	44
2.6 Conditions aux limites	45
2.7 Maillage	46
2.7.1 Maillage en plan horizontal	46
2.7.2 Structure verticale	47
3 Calage	48
3.1 Démarche générale	48

 Liaison Sud III / A 150 Étude hydrogéologique	
4 Modélisations Rive droite	49
4.1 Calage - état de référence	49
4.2 État impacté	50
5 Modélisations Rive Gauche	60
5.1 Calage - état de référence	60
5.2 États impactés	62
6 Conclusions	71



FIGURES

Figure 1 : Zone d'étude.....	3
Figure 2 : Raccordement actuel : « projet fonctionnel »).....	5
Figure 3 : Raccordement futur : « projet définitif ».....	5
Figure 4 : Rive droite (nord) : projet fonctionnel	6
Figure 5 : Rive gauche (sud) : variante souterraine.....	7
Figure 6 : Rive gauche (sud) : variante aérienne	8
Figure 7 : Topographie de la vallée de la Seine et du Cailly autour du Pont Flaubert.....	11
Figure 8 : Extrait de la carte géologique de la boucle de la Seine à Rouen.....	13
Figure 9 : Carte géologique sous alluvions aux abords immédiats du Pont Flaubert.....	14
Figure 10 : Coupes géologiques synthétiques de la boucle de Seine aux abords du Pont Flaubert.....	15
Figure 11 : Sondages rive gauche - CETE novembre 2010.....	19
Figure 12 : Sondages rive gauche rive droite SEERS-FORALO – décembre 2000 à février 2001	21
Figure 13 : Coupes géologiques dans l'axe du Pont Flaubert	22
Figure 14 : Localisation des masses d'eau	23
Figure 15 : Esquisse piézométrique de la nappe de la Craie à Rouen.....	24
Figure 16 : Courbe de marée au niveau de l'estuaire, à Caudebec et à Rouen	25
Figure 17 : Influence des marées sur le niveau de la nappe de la Craie en aval de Rouen	26
Figure 18 : Points de mesure de l'onde de marée en Seine mesurée du 13/09 au 13/11/2013	27
Figure 19 : Onde de marée en Seine mesurée du 13/09 au 13/11/2013 (en m NGF)	27
Figure 20 : Localisation des points de suivi piézométrique en rive gauche.....	28
Figure 21 : Suivi piézométrique sur la presqu'île Rollet et le site CEI	29
Figure 22 : Suivi piézométrique sur le site Grande Paroisse.....	29
Figure 23 : Suivi thermique de la Seine.....	30
Figure 24 : Suivi thermique de la nappe alluviale sur la presqu'île Rollet et le site CEI	30
Figure 25 : Suivi thermique de la nappe alluviale sur le site Grande Paroisse	31
Figure 26 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère crayeux dans la vallée de la Seine	32
Figure 27 : Méthodes de calculs et modélisation hydrogéologique	34
Figure 28 : Topographie modélisée – état actuel	36
Figure 29 : Topographie modélisée – état futur	36
Figure 30 : Stratigraphie modélisée – rive droite	38
Figure 31 : Stratigraphie modélisée – rive gauche	38
Figure 32 : Lithologie modélisée – Rive droite	39
Figure 33 : Lithologie modélisée – Rive droite	39
Figure 34 : Détail de la lithologie modélisée – Rive droite	40
Figure 35 : Attribution des perméabilités au substratum de la zone modélisée – Rive droite	41
Figure 36 : Attribution des perméabilités sur la zone modélisée – Rive gauche	42
Figure 37 : Pluviométrie quotidienne mesurée à Rouen du 13/09 au 13/11/2013	43
Figure 38 : Marée horaire utilisée dans le modèle	44
Figure 39 : Extension et maillage de la zone modélisée – Rive droite	46
Figure 40 : Extension et maillage de la zone modélisée – Rive gauche	46
Figure 41 : Maillage vertical de la zone modélisée - Rive droite	47
Figure 42 : Maillage vertical de la zone modélisée - Rive gauche	47
Figure 43 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive droite modélisée	49
Figure 44 : Rive droite : Vues du modèle intégrant la charge de la voie d'accès nord	50
Figure 45 : Onde de marée correspondant aux piézométries impactées présentées	51
Figure 46 : Piézométries calculées à marée basse	52
Figure 47 : Piézométries calculées 2 heures après la marée basse	53
Figure 48 : Piézométries calculées à marée haute	54
Figure 49 : Piézométries calculées 1 heure après la marée haute	55
Figure 50 : Piézométries calculées 3 heures après la marée haute	56
Figure 51 : Piézométries calculées 5 heures après la marée haute	57
Figure 52 : Piézométries calculées 1 heure avant la marée basse	58
Figure 53 : Piézométries calculées à marée basse	59
Figure 54 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive gauche modélisée (marée haute)	60
Figure 55 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive gauche modélisée (marée basse)	60
Figure 56 : Esquisses piézométriques bibliographiques de la nappe de la Craie à Rouen	61



Figure 57 : Plan du projet de raccordement : variante aérienne	62
Figure 58 : Plan du projet de raccordement : variante souterraine	62
Figure 59 : Rive gauche : Vues du modèle intégrant la charge de la voie d'accès nord	62
Figure 60 : Piézométries calculées à marée basse	63
Figure 61 : Piézométries calculées 2 heures après la marée basse	64
Figure 62 : Piézométries calculées à marée haute	65
Figure 63 : Piézométries calculées 1 heure après la marée haute	66
Figure 64 : Piézométries calculées 3 heures après la marée haute	67
Figure 65 : Piézométries calculées 5 heures après la marée haute	68
Figure 66 : Piézométries calculées 1 heure avant la marée basse	69
Figure 67 : Piézométries calculées à marée basse	70

TABLEAUX

Tableau 1 : Sondages (40) décrits dans le rapport CETE Nord-Picardie n°10-60-00221 du 30/11/2010 – Diagnostic de sols – Raccordements du Pont Flaubert	18
Tableau 2 : Sondages décrits dans les rapports EEG SIMECSOL et al du 29/11/2002 – Reconnaissances géotechniques Vle franchissement de la Seine à Rouen	20

ANNEXES



PRÉAMBULE

1 OBJET ET PORTÉE DE LA MISSION

La présente mission a pour objet la réalisation des études hydrologique (eaux superficielles), hydrogéologique (eaux souterraines) et d'assainissement nécessaires au dossier d'études préalables des voiries définitives du Pont Flaubert (concernant le projet routier définitif en rive gauche).

Ces études seront intégrées, au même titre que celles relatives aux autres thèmes environnementaux, dans le dossier d'études préalables.

Ces études portent sur la zone d'étude (phase 1) et les différentes variantes (phase 2) dans un premier temps – avec prise en compte de l'impact des deux variantes en rive gauche et des voiries existantes en rive droite. Dans la phase 3, une étude plus détaillée portera sur le projet fonctionnel en rive droite, et sur la variante finalement retenue pour la rive gauche.

La prestation confiée à IDUNA Environnement porte sur le volet hydrogéologique de la mission.

2 CONTENU DE LA PRÉSENTE PHASE 2 - VOLET HYDROGÉOLOGIQUE

Le présent rapport porte sur l'étude hydrogéologique des impacts des variantes.



3 LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est localisée à l'Ouest de l'agglomération rouennaise, de part et d'autre de la vallée de la Seine à l'aval de Rouen, et s'étend de la vallée du Cailly au nord à la zone industrielle au sud (cf. Figure 1).

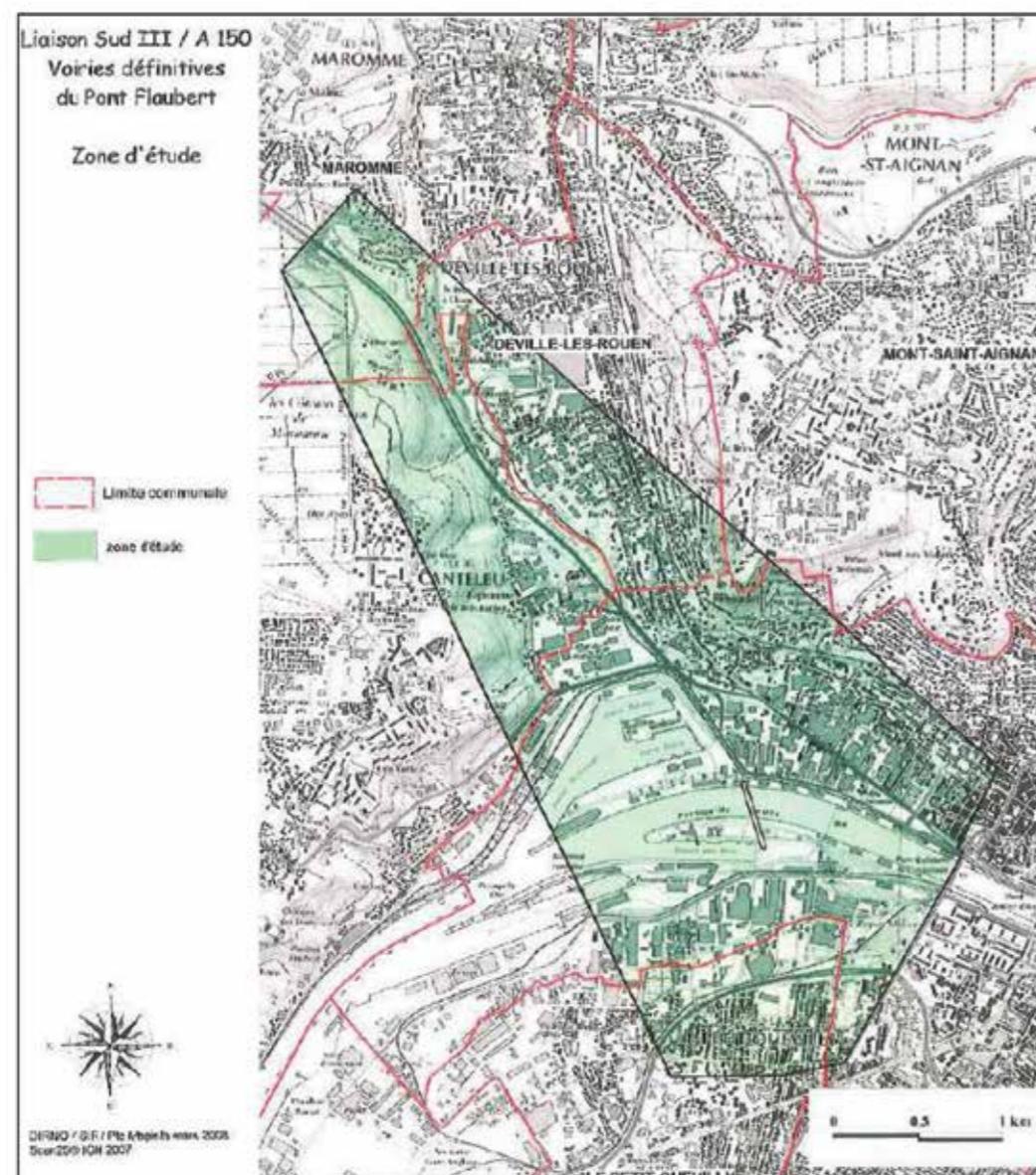


Figure 1 : Zone d'étude

4 RACCORDEMENT DU PONT FLAUBERT AU RÉSEAU ROUTIER

4.1 HISTORIQUE DU PROJET

L'opération « Voiries définitives du 6^e pont » consiste à raccorder définitivement le Pont Flaubert aux rives gauche (sud) et droite (nord) de Rouen. Cette opération fait partie du programme de liaison entre les autoroutes A13 au sud et A150 au nord, déjà inscrit au schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme (SDAU) de l'agglomération de Rouen en 1972.

Le projet comprend tous les ouvrages nécessaires pour relier le Pont Flaubert :

- à Sud III au niveau de la commune de Petit-Quevilly, rive gauche (sud),
- à l'A150 au niveau du viaduc des barrières du Havre, rive droite (nord).

Il comprend également tous les échanges qui se feront par des carrefours dénivelés entre la voie rapide à 2x2 voies créée et la voirie urbaine.

Cette opération fait suite à une première phase appelée « projet fonctionnel » au cours de laquelle a été construit :

- l'ouvrage de franchissement de la Seine,
- les raccordements provisoires aux voiries existantes caractérisés par un objectif de construction minimum et des carrefours à niveaux.

4.2 OBJECTIFS DE LA LIAISON SUD III / A150

La liaison Sud III / A150 a pour objectifs :

- l'écoulement du trafic nord-sud et le franchissement de la Seine sans passage par le centre-ville de Rouen, assurant la continuité des autoroutes A13 au sud et A150 au nord,
- la desserte du Port Autonome de Rouen et des zones industrielles attenantes,
- l'amélioration des conditions de circulation dans l'ouest de l'agglomération et la desserte des zones urbanisées,
- l'accompagnement des mutations des quartiers situés au pied du pont Flaubert, en rive droite et en rive gauche.



4.3 SITUATION ACTUELLE ET PROJET FINAL

Le principe de raccordement actuel (dénommé « projet fonctionnel ») et le projet définitif, décrits en détails dans les dossiers étudiés par ailleurs, sont résumés sur les deux figures ci-dessous extraites du *dossier d'instruction mixte à l'échelon local de mars 2000*.

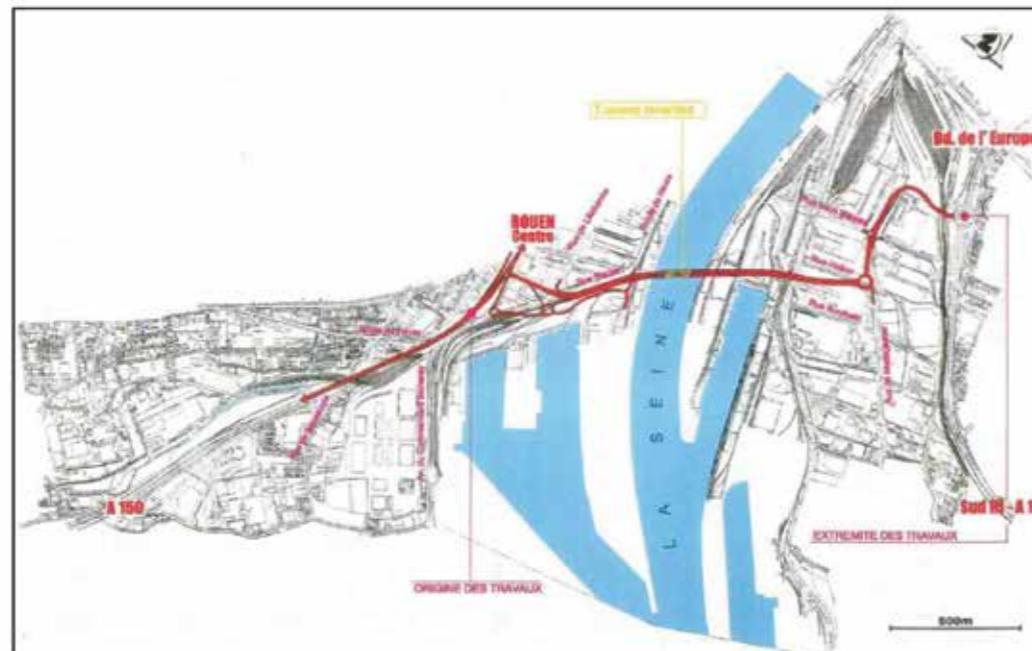


Figure 2 : Raccordement actuel : « projet fonctionnel »)

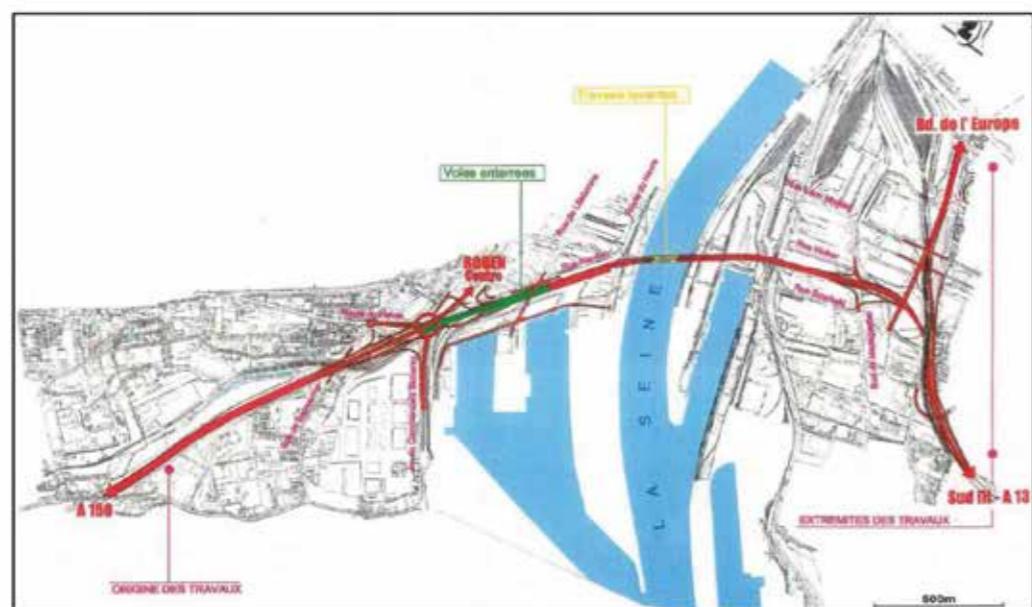


Figure 3 : Raccordement futur : « projet définitif »



4.4 VARIANTES ÉTUDIÉES

Le linéaire du projet est séparé en deux tronçons, sur la rive gauche et la rive droite de la Seine, sur lesquels plusieurs variantes routières sont étudiées.

4.4.1 RIVE DROITE

En rive droite de la Seine, le présent marché n'a pas pour objet d'étudier les différentes variantes routières de raccordements définitifs au Pont Flaubert, mais porte sur l'**étude de l'impact des voiries actuelles** (« **projet fonctionnel** » en service depuis septembre 2008) sur l'**hydrogéologie** et l'**hydrologie**.

L'étude tient compte des quartiers en cours d'urbanisation : Quartier Luciline, rives de Seine, Dock 76, Palais des Sports, Port de Plaisance, Espace des Marégraphes y compris ses voiries et aménagements connexes.



Figure 4 : Rive droite (nord) : projet fonctionnel

4.4.2 RIVE GAUCHE

En rive gauche, les configurations à étudier sont les deux variantes qui relient les viaducs d'accès au Pont Flaubert à la voie rapide Sud III, en s'y rattachant au niveau de l'échangeur de Stalingrad :

- la **variante en tranchée ouverte ou semi-enterrée**, caractérisée par un tracé en déblais et un passage sous les voies SNCF longeant Sud III (cf. Figure 5)
- le **projet aérien**, composé de deux ouvrages d'art et de remblais de forte hauteur : un premier d'environ 160 m enjambant la future place de Madagascar, et un second passant au-dessus de la voie SNCF (cf. Figure 6)

L'étude tient compte des quartiers en cours d'urbanisation : Ecoquartier Flaubert y compris ses voiries, voies fermées et aménagements connexes.



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique



Figure 5 : Rive gauche (sud) : variante souterraine



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

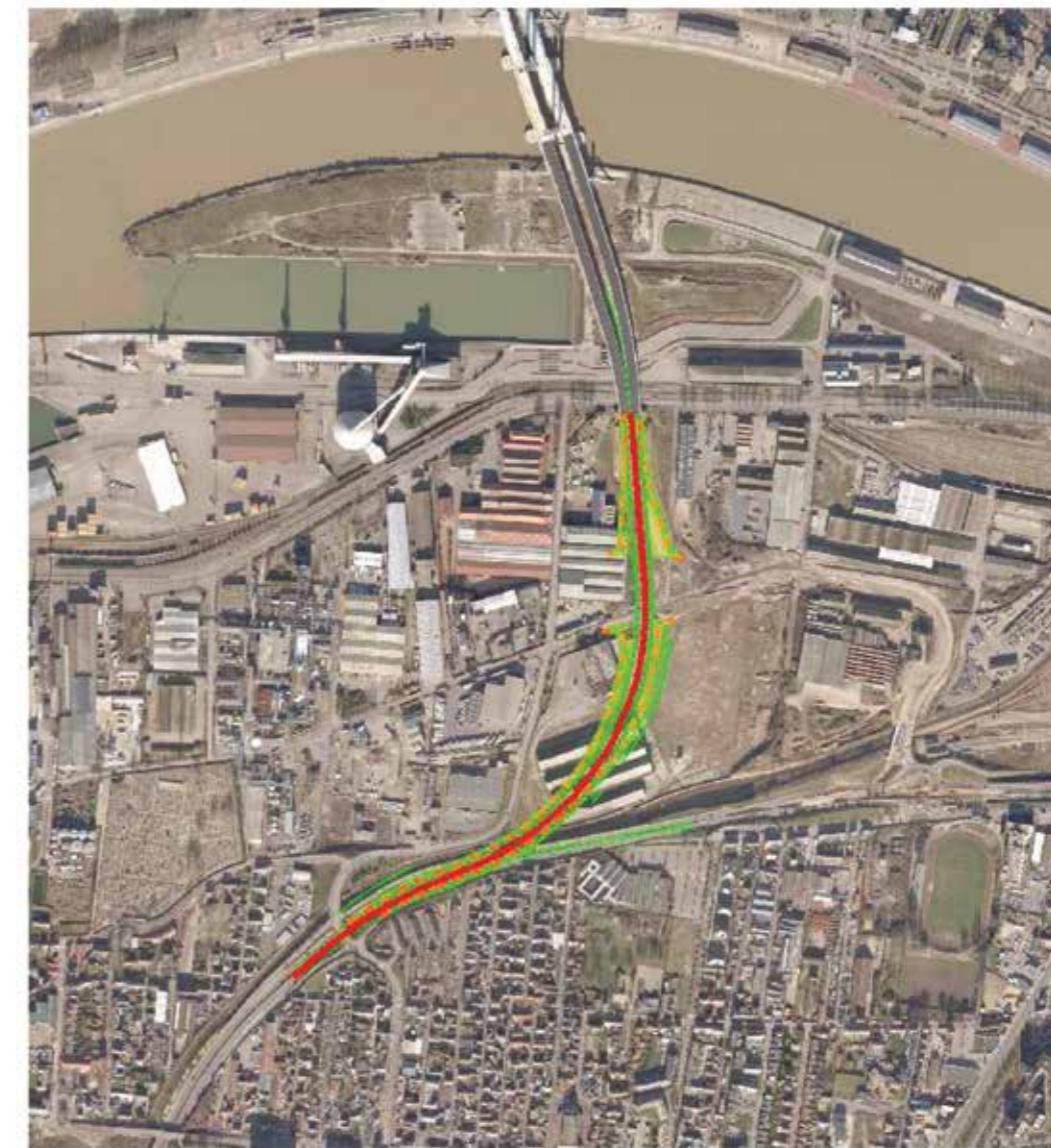


Figure 6 : Rive gauche (sud) : variante aérienne



SYNTHÈSE DES DONNÉES UTILISÉES DANS LE MODÈLE



1 TOPOGRAPHIE

Le Pont Flaubert a été implanté à l'Ouest de Rouen, à l'extrémité nord du méandre de la Seine, à la confluence avec la vallée du Cailly.

Les berges de Seine s'établissent à la cote moyenne +5mNGF.

En rive droite, concave, la Seine a profondément entaillé le plateau, et forme même la limite sud du plateau du pays de Caux. Le fond de vallée relativement plat (glacis) qui subsiste à l'amont du Pont Flaubert (quartiers du Vieux Rouen) entre la vallée du Cailly à l'Ouest et la vallée de l'Aubette et du Robec à l'Est est effacé à l'aval du Pont Flaubert, où le plateau rejoint la Seine par un talus de plus de 30% entre les cotes +130 mNGF à +10mNGF (rôle de la faille de Rouen, cf. plus loin).

La vallée du Cailly orientée nord-sud entaille profondément le plateau par des flancs abrupts à pentes de près de 30% entre les cotes +130 mNGF à +10mNGF. Son fond plat est large d'environ 800 m, et descend vers le Pont Flaubert sur la Seine en pente douce inférieure à 1% (cote +20mNGF à 4 km au nord du Pont, cote +5mNGF sur le port).

En rive gauche, convexe, les terrains sont quasiment plats sur une bande de 1 à 1,5 km depuis les quais de Seine, avec une pente douce de moins de 0.3% entre les cotes +5 à +10mNGF, avant de remonter vers le sud avec une pente de l'ordre de 1 à 2 %.

Les données topographiques utilisées dans le modèle hydrogéologique sont issues du MNT à 5m de l'IGN (cf. Figure 7), complétées par le MNT des points topographiques fournis pour la zone du Pont Flaubert.

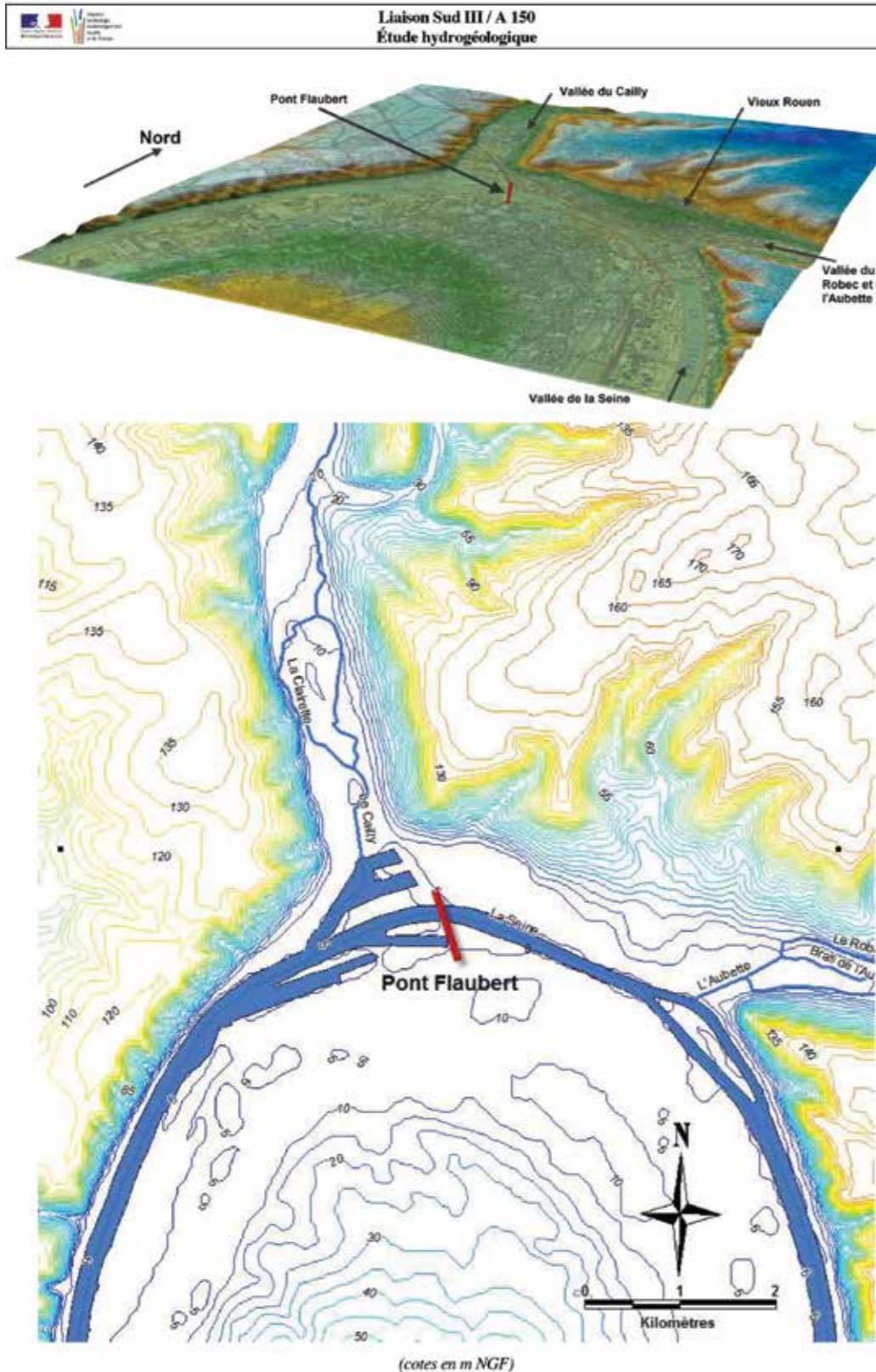


Figure 7 : Topographie de la vallée de la Seine et du Cailly autour du Pont Flaubert

2 GÉOLOGIE

2.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE LOCAL

Comme le montre déjà la topographie (cf. chapitre précédent), le secteur du Pont Flaubert à l'Ouest de Rouen au nord de la boucle de Seine est caractérisé :

- par l'opposition entre la rive droite concave dominée par l'érosion du plateau crayeux et la rive gauche convexe dominée par les dépôts alluvionnaires (cf. Figure 8),
- par la présence de la *faille de Rouen* qui met en contact les calcaires du Portlandien (Jurassique) à l'Est avec les craies du Crétacé à l'Ouest (cf. Figure 9).

2.1.1 FORMATIONS SUPERFICIELLES - ALLUVIONS

Les sols du secteur d'étude (zone portuaire) sont recouverts de **remblais actuels anthropiques** localement très épais (jusqu'à 10 mètres) constitués de matériaux hétérogènes : produits de dragage, fins et de faible portance, et matériaux de démolition divers.

Les **alluvions modernes de la Seine** (Fz), **fines**, à dominante d'argiles, de limons et de sables fins peu consolidés et de tourbes.

Elles reposent sur les **alluvions anciennes** (Fy) **plus graveleuses** : sables et galets de silex et calcaires (elles sont exploitées sur toute la vallée de la Seine par de nombreuses exploitations) étagées en terrasses superposées entre + 12 m NGF (basse terrasse) et plus de 55 m NGF (haute terrasse) formant notamment le relief du centre de la boucle.

En rive droite (notamment sous le quartier du Vieux Rouen), le fond de vallée (glacis) est composé de **limons et alluvions de vallées sèches** (LV), à silex, blocs de craie, sable, grès, localement très caillouteuses, provenant de l'érosion des formations massives voisines.

2.1.2 SUBSTRATUM CRAYEUX ET CALCAIRE – STRUCTURE

La structure de la boucle de la Seine à Rouen est caractérisée par la présence d'un **bombement local** des terrains profonds (brachy-anticlinal), érodé et **faillé selon son axe nord-ouest à sud-est** (cf. Figure 9).

La faille, complexe, a été reconnue en sondages à l'aval du Pont Flaubert. Dans l'axe de la Seine, elle se dédouble vers le nord en remontant sur le flanc ouest de la vallée du Cailly, où sont directement visibles à l'affleurement les contacts entre craies du Turonien au nord-est et craie du Coniacien au sud-ouest.

En rive droite, la **faille nord** a un **rejet de l'ordre de 50 m** (forages de Sotteville-Longboël). En rive gauche, la **faille sud** a un **rejet atteignant 120 m à Petit-Quevilly**. Dans les deux cas, c'est le compartiment nord qui est surélevé, remontant les terrains plus anciens.

Les limites des formations alluviales à l'affleurement et des calcaires et craies sous alluvions utilisées dans le modèle ont été numérisées à partir des cartes géologiques présentées ci-après.



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

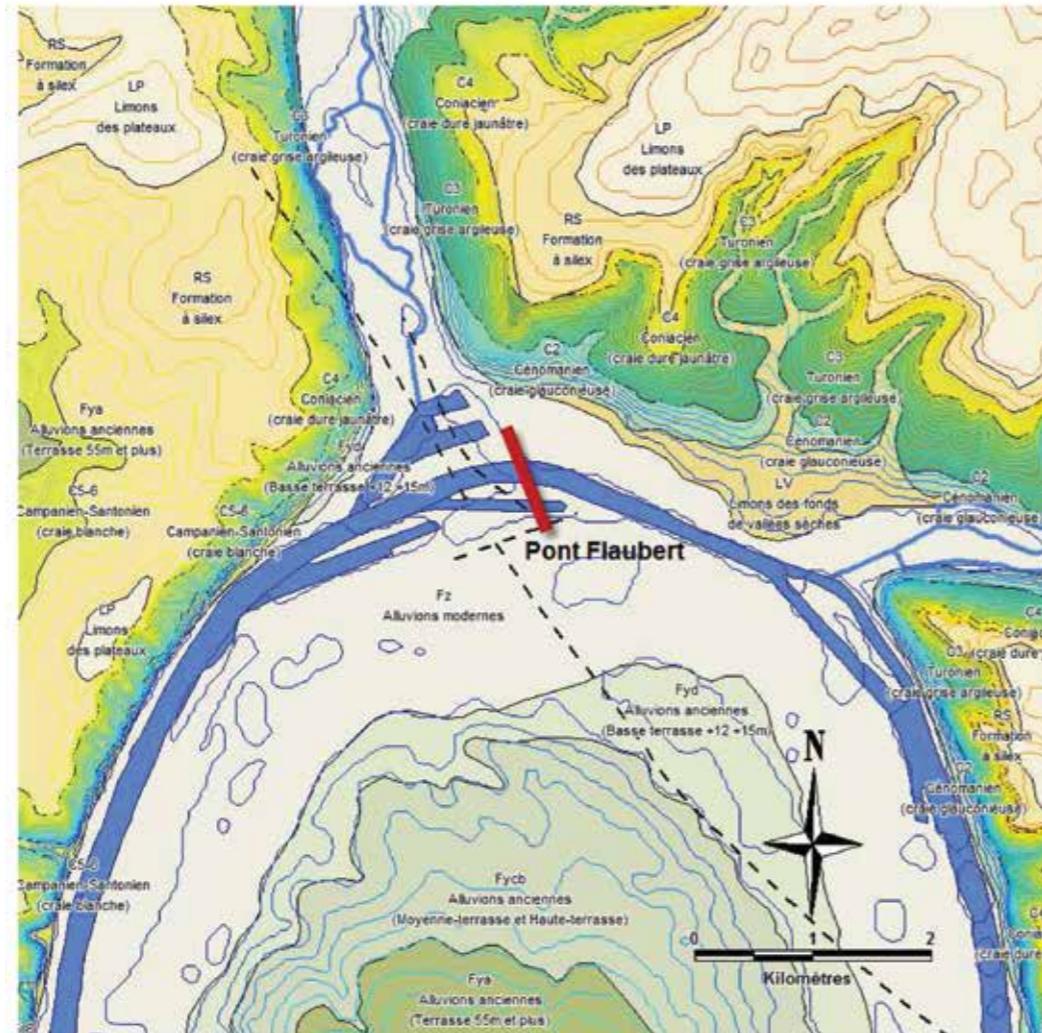


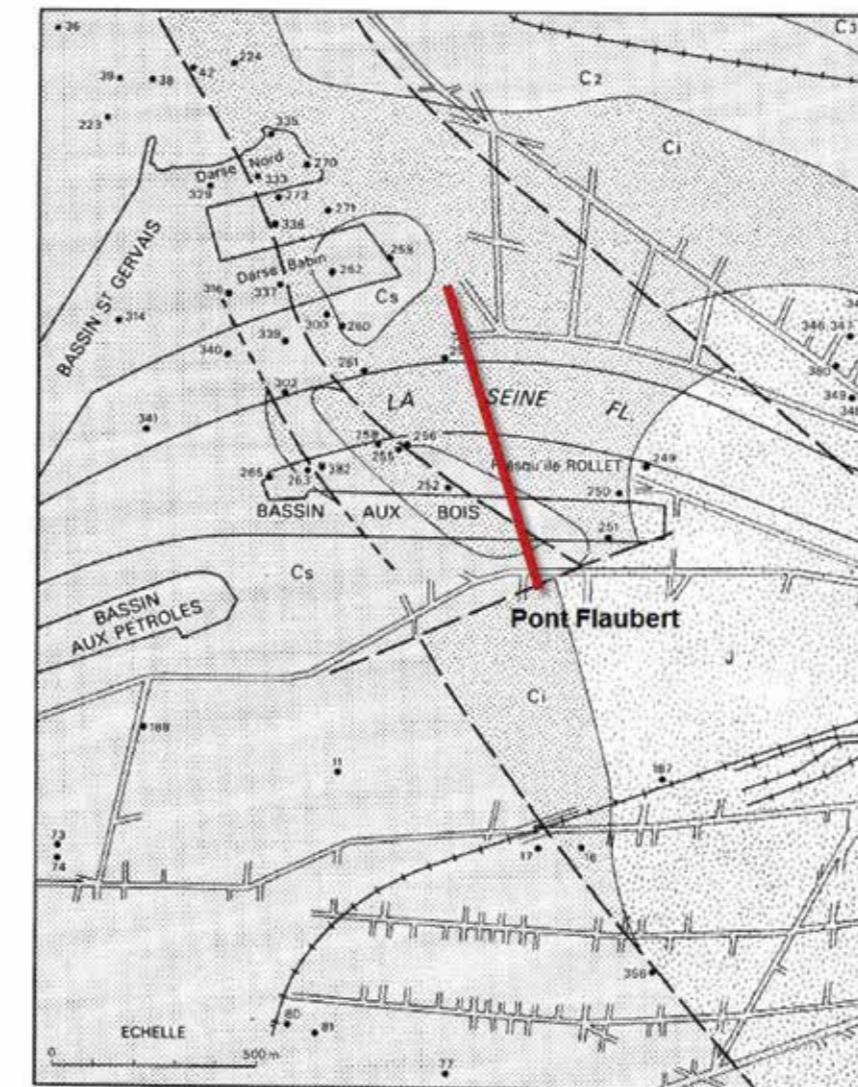
Figure 8 : Extrait de la carte géologique de la boucle de la Seine à Rouen



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

STRUCTURE DE ROUEN

Abstraction faite des formations récentes



LEGENDE

Cs	Crétacé supérieur	Sénonian	C1	Crétacé inférieur : Albien
		Turonian (C3)		
		Cénomanien (C2)		

* 39 Sondage avec indice BRGM

Extraite de la notice de la carte géologique BRGM au 1/50.000e n°99 Rouen Ouest

Figure 9 : Carte géologique sous alluvions aux abords immédiats du Pont Flaubert



Le Pont Flaubert et ses accès reposent directement sur les remblais et les alluvions modernes fines.

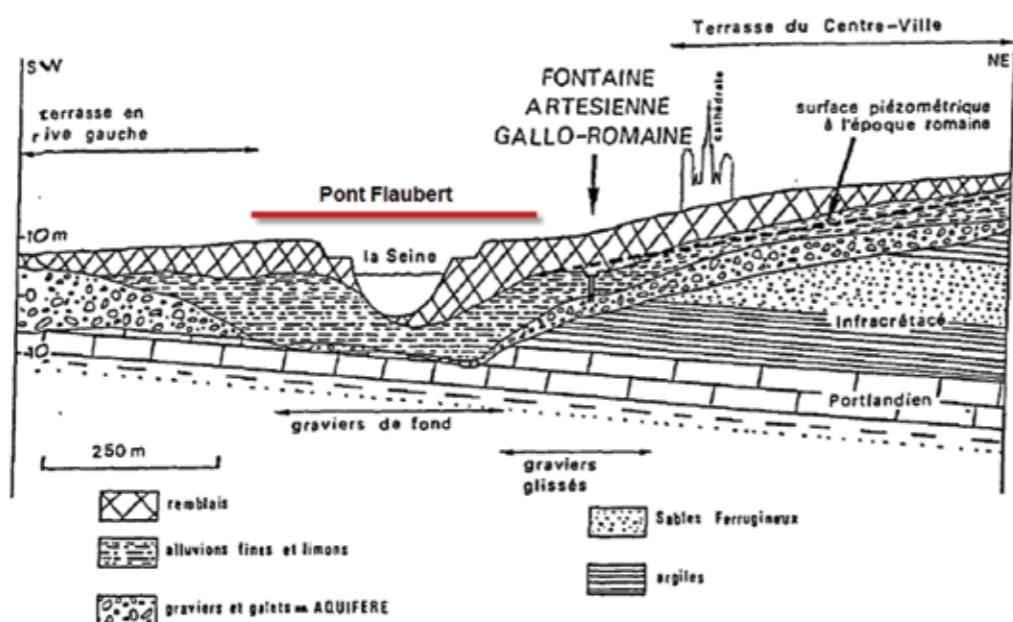
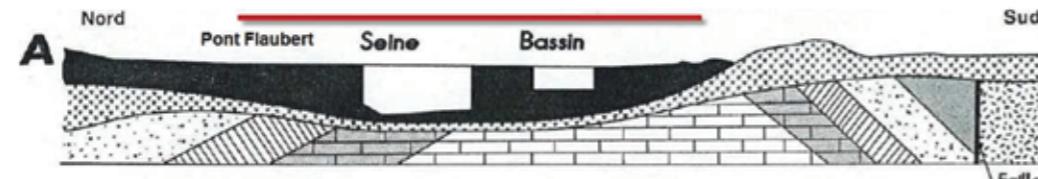


Fig. 4: Coupe à Rouen. La nappe captive des alluvions graveleuses sous le centre-ville.

Figure 10 : Coupes géologiques synthétiques de la boucle de Seine aux abords du Pont Flaubert



2.2 RECONNAISSANCES GÉOLOGIQUES RÉALISÉES SUR LE LINÉAIRE DU PONT FLAUBERT ET SES ACCÈS

Plusieurs campagnes de reconnaissances du sous-sol par sondages ont été réalisées sur le tracé du Pont Flaubert et de ses raccordements :

- Rapports EEG SIMECSOL et al du 29/11/2002 – Reconnaissances géotechniques VIe franchissement de la Seine à Rouen
- Rapport CETE Nord-Picardie n°10-60-00221 du 30/11/2010 – Diagnostic de sols – Raccordements du Pont Flaubert

Leurs descriptions confirment et précisent les données géologiques bibliographiques déjà acquises (cf. chapitre précédent).

Les souches profondes du modèle hydrogéologique du secteur du Pont Flaubert ont été construites à partir des coupes décrites dans ces rapports, précisées dans les tableaux ci-après, complétant les descriptions des forages recensés par le BRGM (BSS).

D'autres campagnes de reconnaissances ont été réalisées et leurs rapports géotechniques fournis, mais la localisation des sondages décrits n'est pas précisée et les plans d'implantation mal lisibles.



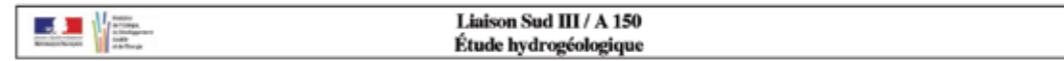
sondage	Longitude	Latitude	XLam2e	YLam2e	XLam1	YLam1	Elevation	Prof
T1	1.06396667	49.43420414	507614.491	2493728.758	507713.78	193471.38		6
T2	1.0645147	49.43439006	507654.61	2493748.808	507753.87	193491.38		6
T3	1.06423308	49.43456683	507634.485	2493768.815	507733.78	193511.38		6
T4	1.06478438	49.43457893	507674.527	2493769.514	507773.78	193512.05		6
T5	1.065336	49.43457898	507714.571	2493768.871	507813.78	193511.38		6
T6	1.06477523	49.43493255	507674.5	2493808.886	507773.78	193551.38		6
T7	1.06532669	49.43493862	507714.543	2493808.914	507813.78	193551.38		6
T8	1.06642496	49.43513058	507794.615	2493828.991	507893.78	193571.38		1
T9	1.06504164	49.43529523	507694.493	2493848.943	507793.78	193591.38		6
T10	1.065592	49.43530129	507734.456	2493848.971	507833.7	193591.38		6
T11	1.06641231	49.43531031	507794.02	2493849.012	507893.2	193591.38		6
T12	1.06531162	49.43547807	507714.421	2493868.978	507813.7	193611.38		6
T13	1.06585844	49.43566397	507754.45	2493889.028	507853.7	193631.38		6
T14	1.06613417	49.435667	507774.471	2493889.042	507873.7	193631.38		6
T15	1.06557804	49.43584075	507734.414	2493909.035	507833.7	193651.38		6
T16	1.06667634	49.4360327	507814.486	2493929.112	507913.7	193671.38		6
T17	1.06556873	49.43620039	507734.386	2493949.078	507833.7	193691.38		6
T18	1.06639595	49.4362095	507794.451	2493949.12	507893.7	193691.38		6
T19	1.06666703	49.43639235	507814.458	2493969.155	507913.7	193711.38		6
T20	1.06555942	49.43656004	507734.358	2493989.121	507833.7	193731.38		6
T21	1.06611918	49.4365662	507775.002	2493989.149	507874.3	193731.38		6
T22	1.06665773	49.43675199	507814.43	2494009.198	507913.7	193751.38		6
T23	1.06720922	49.43675806	507854.473	2494009.226	507953.7	193751.38		6
T24	1.0677607	49.43676412	507894.516	2494009.254	507993.7	193751.38		6
T25	1.06858793	49.43677321	507954.581	2494009.296	508053.7	193751.38		6
T26	1.06830754	49.43695	507934.545	2494029.303	508033.7	193771.38		6
T27	1.068574	49.43731267	507954.539	2494069.36	508053.7	193811.38		6
T28	1.06745708	49.43784002	507874.411	2494129.369	507973.7	193871.38		6
T29	1.06800857	49.43784608	507914.454	2494129.397	508013.7	193871.38		6
T30	1.06856006	49.43785214	507954.497	2494129.425	508053.7	193871.38		6
T31	1.06499863	49.43691361	507694.287	2494029.136	507793.7	193771.38		6
T32	1.06526972	49.43709646	507714.295	2494049.171	507813.7	193791.38		6
T33	1.06470892	49.43745003	507674.224	2494089.186	507773.7	193831.38		6
T34	1.06526041	49.43745611	507714.267	2494089.214	507813.7	193831.38		6
T35	1.0658119	49.43746218	507754.31	2494089.242	507853.7	193831.38		6
T36	1.06497536	49.43781272	507694.218	2494129.243	507793.7	193871.38		6
T37	1.06552685	49.43781879	507734.261	2494129.271	507833.7	193871.38		6
T38	1.0655203	49.43817847	507734.433	2494169.315	507833.9	193911.38		6
T39	1.06550823	49.43853807	507734.205	2494209.357	507833.7	193951.38		6
T40	1.06549892	49.43889772	507734.177	2494249.4	507833.7	193991.38		6

(carte de localisation page suivante)

Tableau 1 : Sondages (40) décrits dans le rapport CETE Nord-Picardie n°10-60-00221 du 30/11/2010 – Diagnostic de sols – Raccordements du Pont Flaubert



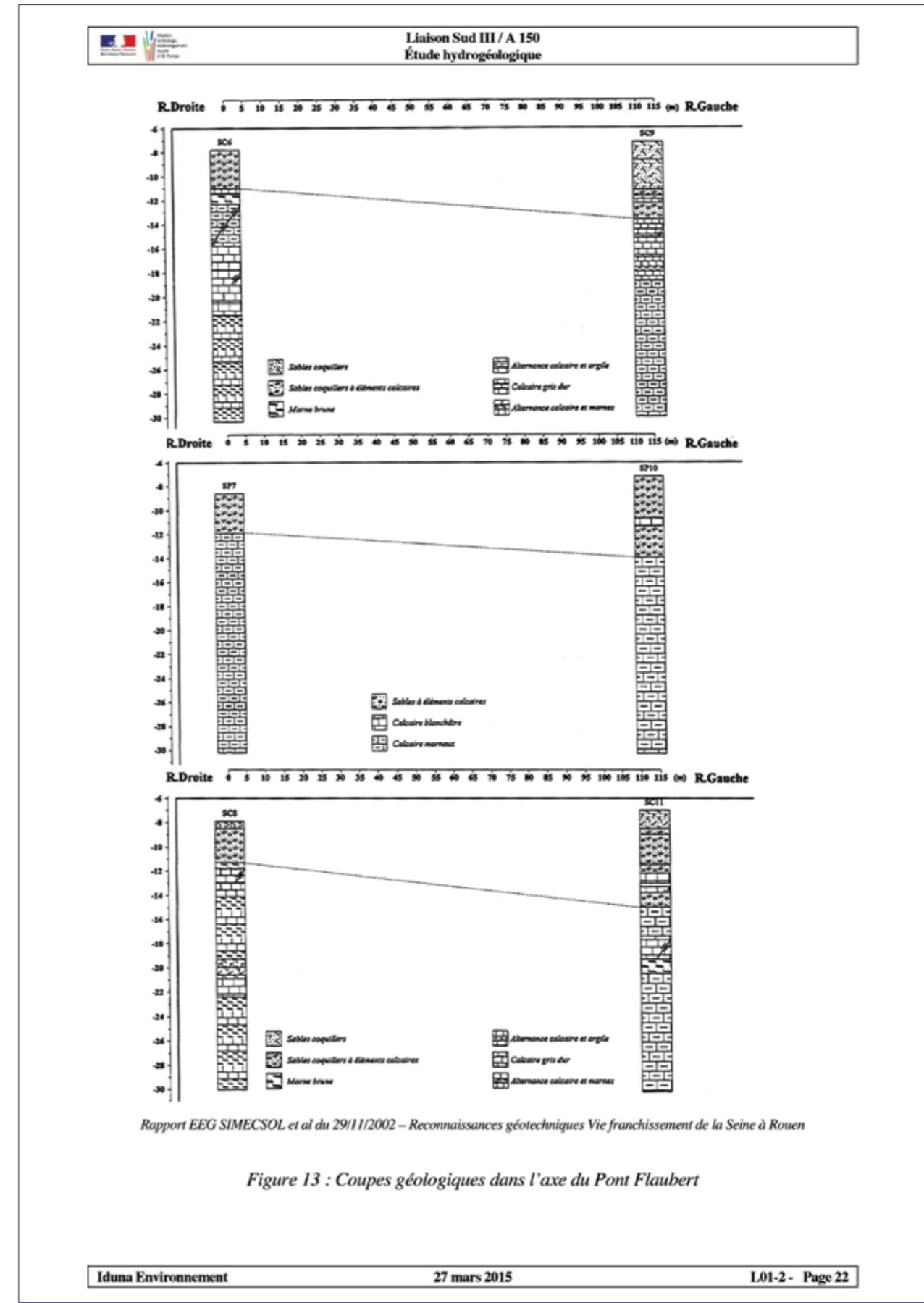
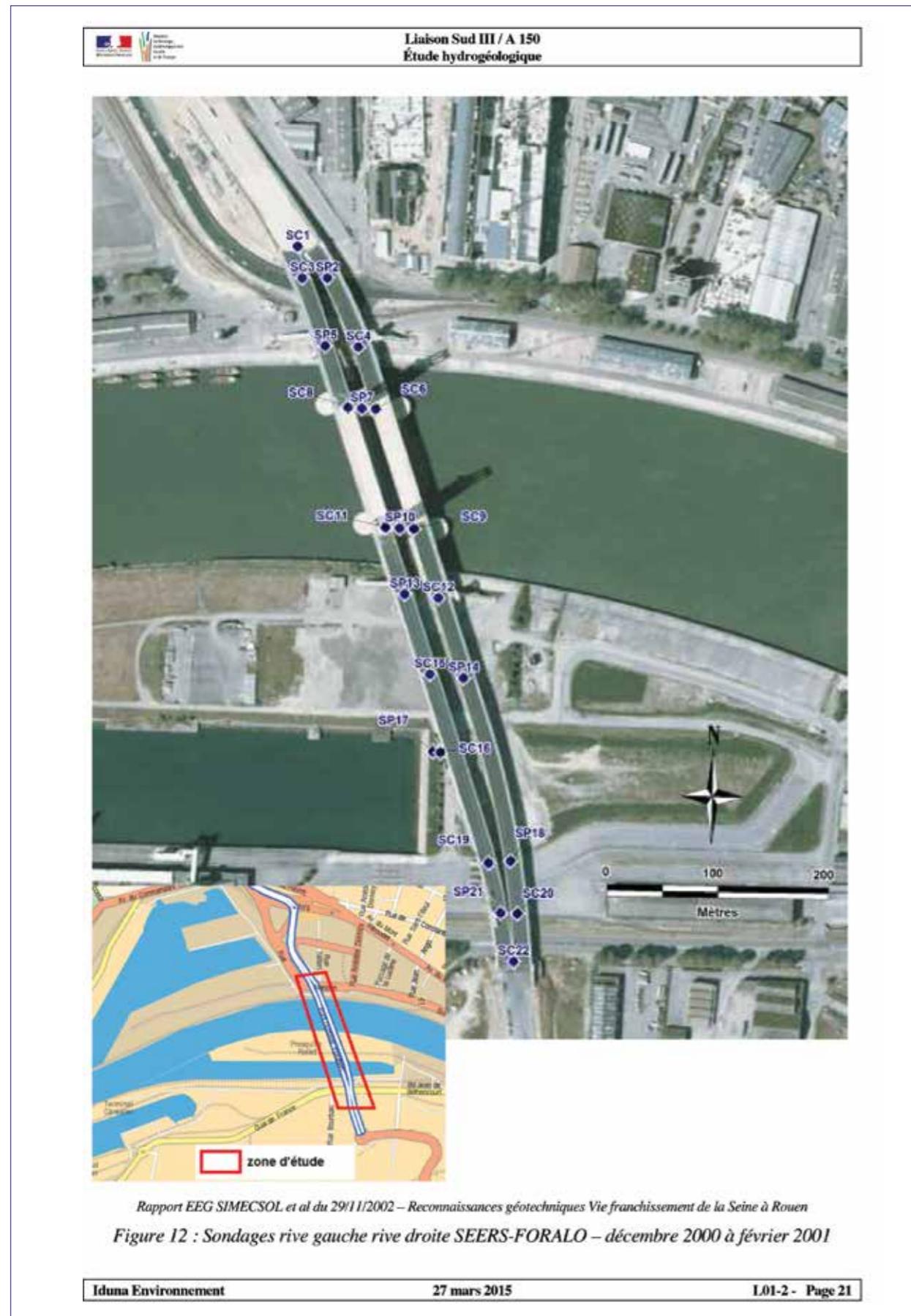
Figure 11 : Sondages rive gauche - CETE novembre 2010



sondage	Longitude	Latitude	XLam2e	YLam2e	XLam1	YLam1	Elevation	Prof
SC1	1.06303174	49.44543076	507566.882	2494979.499	507667.095	194720.808	6.39	31.4
SP2	1.06340909	49.4451827	507593.822	2494951.443	507693.986	194692.764	6.3	31
SC3	1.06309822	49.44517632	507571.248	2494951.099	507671.436	194692.436	6.26	30.8
SC4	1.0638123	49.44462978	507622.089	2494889.423	507722.179	194630.791	5.06	30.2
SP5	1.06340256	49.44463041	507592.351	2494889.975	507692.474	194631.363	5.08	32
SC6	1.0640475	49.44413138	507638.26	2494833.669	507738.294	194575.086	-7.8	22.5
SP7	1.06387223	49.4441333	507625.543	2494834.089	507725.591	194575.514	-8.6	21.6
SC8	1.06370124	49.44413601	507613.138	2494834.591	507713.199	194576.025	-7.9	22.1
SC9	1.06455358	49.44317127	507673.261	2494726.203	507773.182	194467.712	-7.2	22.8
SP10	1.06437831	49.44317318	507660.543	2494726.622	507760.478	194468.139	-7.2	23.15
SC11	1.06420417	49.44317508	507647.907	2494727.038	507747.856	194468.563	-7	23.2
SC12	1.06487722	49.44261603	507695.751	2494664.018	507795.604	194405.578	5.21	30.2
SP13	1.06445994	49.44263863	507665.504	2494667.024	507765.392	194408.602	5.2	31
SP14	1.06521552	49.44197436	507719.149	2494592.196	507818.927	194333.817	5.64	31
SC15	1.06479331	49.44199724	507688.545	2494595.239	507788.358	194336.878	5.6	30.5
SC16	1.06494411	49.44136642	507698.353	2494524.845	507798.107	194266.553	5.5	30.8
SP17	1.06485432	49.44137128	507691.845	2494525.491	507791.606	194267.203	5.47	31
SP18	1.06585059	49.44050403	507762.596	2494427.787	507862.213	194169.555	5.45	32
SC19	1.0655823	49.44048108	507743.081	2494425.547	507842.717	194167.331	5.45	30.65
SC20	1.06595064	49.4400797	507769.094	2494380.437	507868.671	194122.251	6	31
SP21	1.06574047	49.44008013	507753.84	2494380.731	507853.433	194122.556	6	31
SC22	1.06591953	49.43969095	507766.136	2494337.201	507865.686	194079.064	5.74	30.6

(carte de localisation page suivante)

Tableau 2 : Sondages décrits dans les rapports EEG SIMECSOL et al du 29/11/2002 – Reconnaissances géotechniques VIE franchissement de la Seine à Rouen





3 HYDROGÉOLOGIE

3.1 MASSES D'EAU SOUTERRAINES

La Directive Cadre introduit la notion de « masses d'eaux souterraines » qu'elle définit comme « un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères » (article 5 et Annexe II) ; un aquifère représentant « une ou plusieurs couches souterraines de roches ou d'autres couches géologiques d'une porosité et d'une perméabilité suffisantes pour permettre soit un courant significatif d'eau souterraine, soit le captage de quantités importantes d'eau souterraine ». La délimitation des masses d'eaux souterraines est fondée sur des critères hydrogéologiques, puis éventuellement sur la considération de pressions anthropiques importantes. Ces masses d'eau sont caractérisées par six types de fonctionnement hydraulique, leur état (libre/captif) et d'autres attributs. Une masse d'eau correspond d'une façon générale sur le district hydrographique à une zone d'extension régionale représentant un aquifère ou regroupant plusieurs aquifères en communication hydraulique, de taille importante. Leurs limites sont déterminées par des crêtes piézométriques lorsqu'elles sont connues et stables (à défaut par des crêtes topographiques), soit par de grands cours d'eau constituant des barrières hydrauliques, ou encore par la géologie.

Seuls les aquifères pouvant être exploités à des fins d'alimentation en eau potable, par rapport à la ressource suffisante, à la qualité de leur eau et/ou à des conditions technico-économiques raisonnables, ont été retenus pour constituer des masses d'eaux souterraines.

Le secteur du Pont Flaubert sur la vallée de la Seine à Rouen est le siège, de haut en bas, de :

- en niveau 1 : la masse d'eau FRH001 dite des « Alluvions de la Seine moyenne et avalé »
- en niveau 2 : la masse d'eau sous-jacente FRH202 dite de la « Craie altérée de l'estuaire de la Seine »
- en niveau 3 : la masse d'eau FRH218 dite de l' « Albien-néocomien captif »

Les alluvions, disposées en plusieurs terrasses à porosité et perméabilité variables, et qui reposent sur la craie, ne forment qu'un seul système hydrogéologique.

La nappe de la Craie est semi-captive sous les alluvions modernes fines, libre sous les alluvions anciennes plus grossières.

La masse d'eau de l'Albien néocomien captif, profonde, n'est pas impliquée dans la présente modélisation.

Toutes les mailles du modèle sont situées sur la nappe libre des alluvions sur la nappe semi-captive de la Craie sous-jacente.

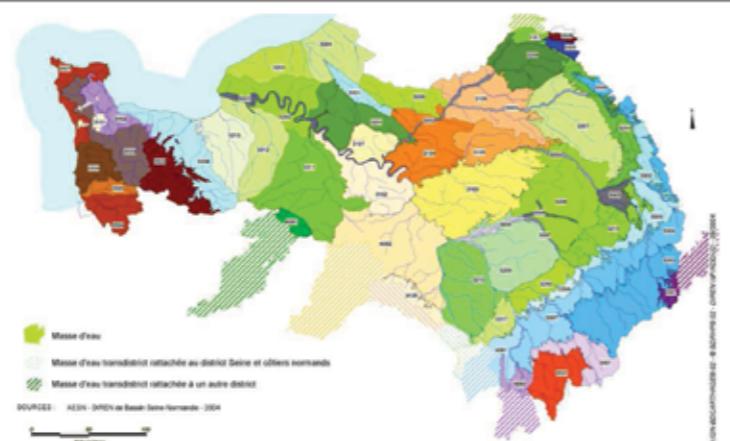


Figure 14 : Localisation des masses d'eau

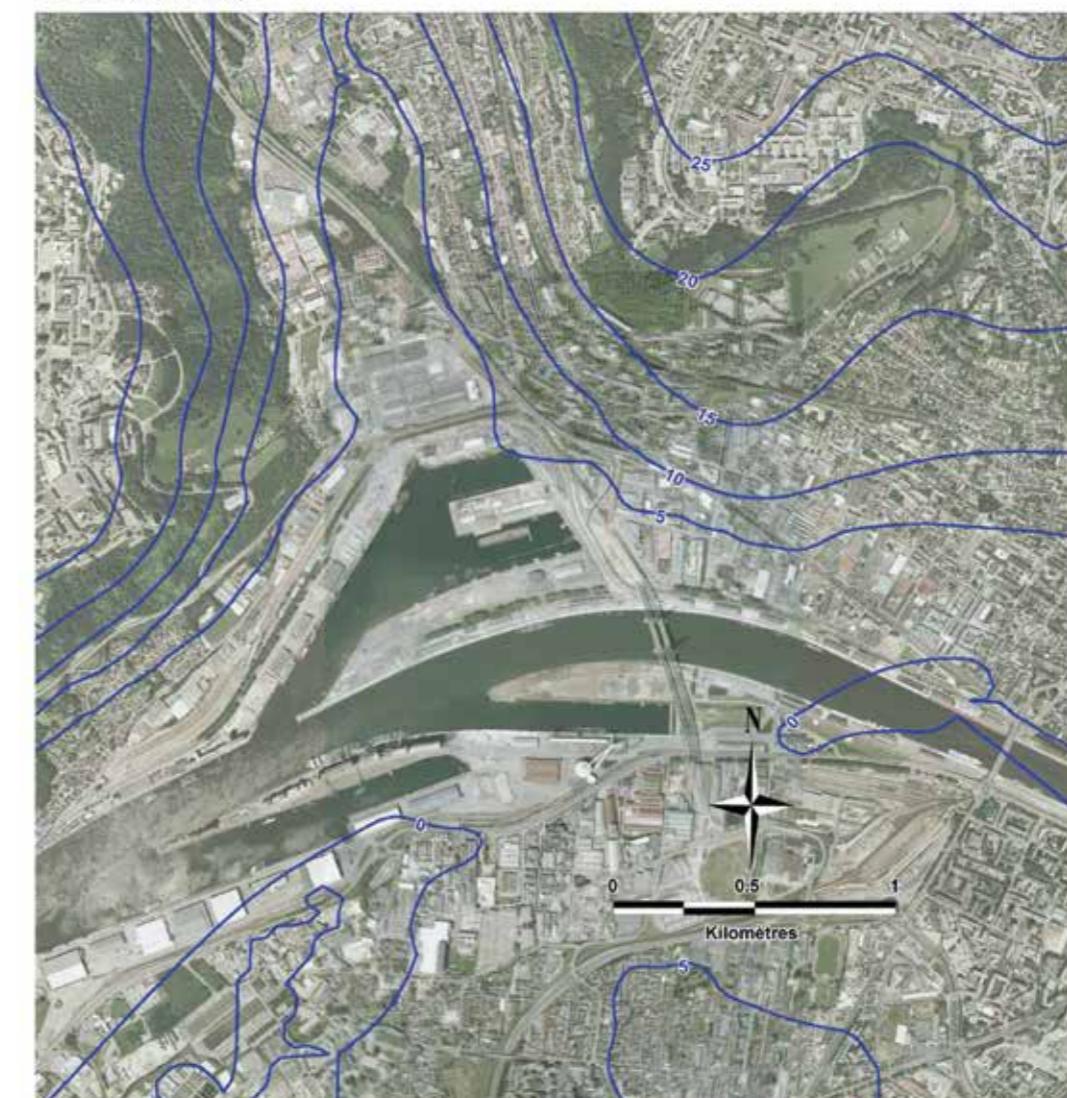


3.2 PIÉZOMÉTRIE

3.2.1 PIÉZOMÉTRIE GÉNÉRALE

Une esquisse piézométrique est présentée dans l'atlas hydrogéologique de Seine Normandie de 1990. Elle est complétée par une esquisse piézométrique de la nappe de la Craie tracée en 1998 par CGG (cf. Figure 15).

L'écart entre ces deux esquisses piézométriques semble lié aux pompages en zone industrielle, et à la période hydrologique (HE BE).



(d'après CGG, 1998)

Figure 15 : Esquisse piézométrique de la nappe de la Craie à Rouen



3.2.2 INFLUENCE DE LA MARÉE DE LA SEINE SUR LA PIÉZOMÉTRIE

Au niveau de la zone modélisée, l'altitude de la Seine est conditionnée :

- par le débit du fleuve, fonction directe de la dynamique de crue ou d'étiage du bassin versant ;
- par l'état de la marée qui remonte le fleuve depuis l'embouchure jusqu'au barrage de Poses (en amont de Rouen). En simplifiant, l'onde de marée remonte le fleuve entre Le Havre et Rouen en environ 6h00 en s'amortissant progressivement. Les graphiques ci-dessous, tirés de l'étude « *Évaluation des impacts hydrodynamiques de l'amélioration des accès maritimes du port de Rouen – Port Autonome de Rouen Vallée de Seine - décembre 2007* » illustrent ce phénomène

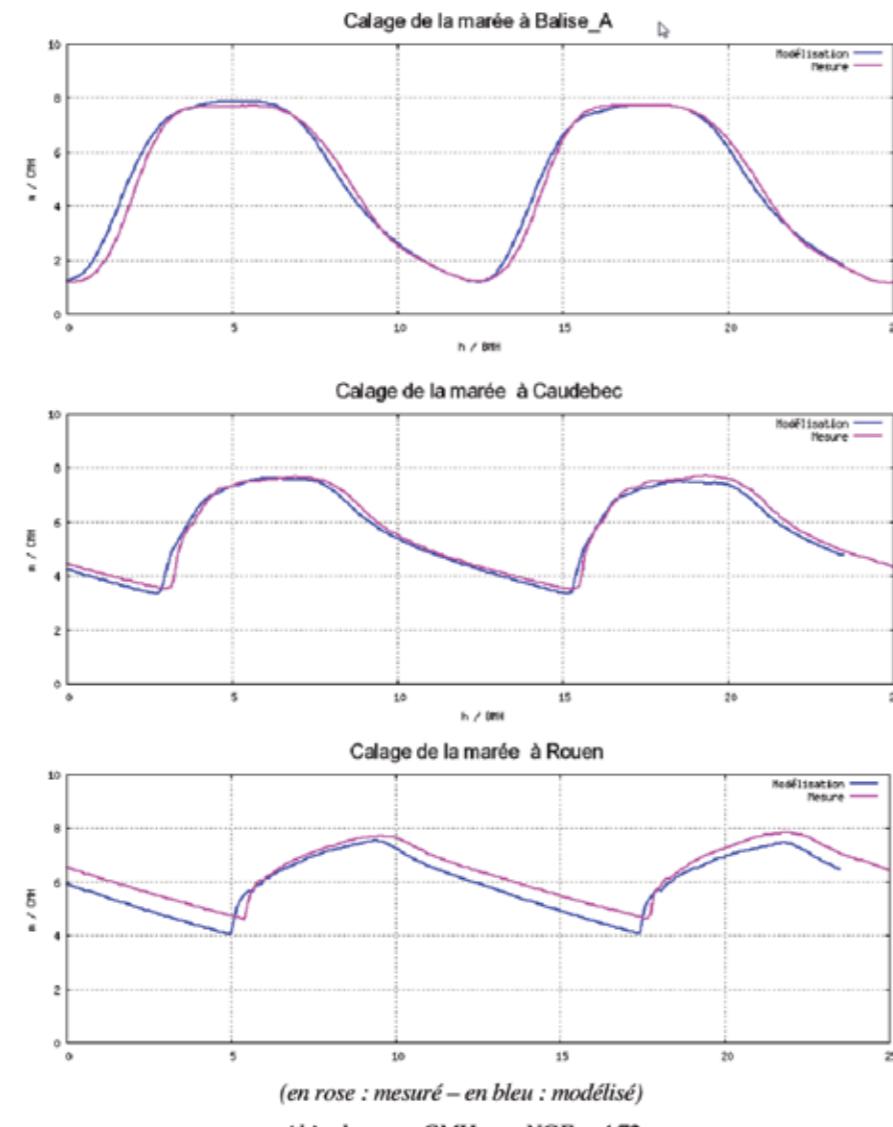


Figure 16 : Courbe de marée au niveau de l'estuaire, à Caudebec et à Rouen



Par conséquent il existe une grande diversité de situations, fonction de ces facteurs qu'il n'est pas envisageable de simuler. Il est de même illusoire de concevoir une situation « type » au regard du nombre de paramètres non maîtrisés.

Cette esquisse n'est pas directement transposable dans la modélisation aux abords de la Seine, où l'onde de marée influence les variations de la nappe, comme le montre la courbe de la Figure 17 ci-dessous.

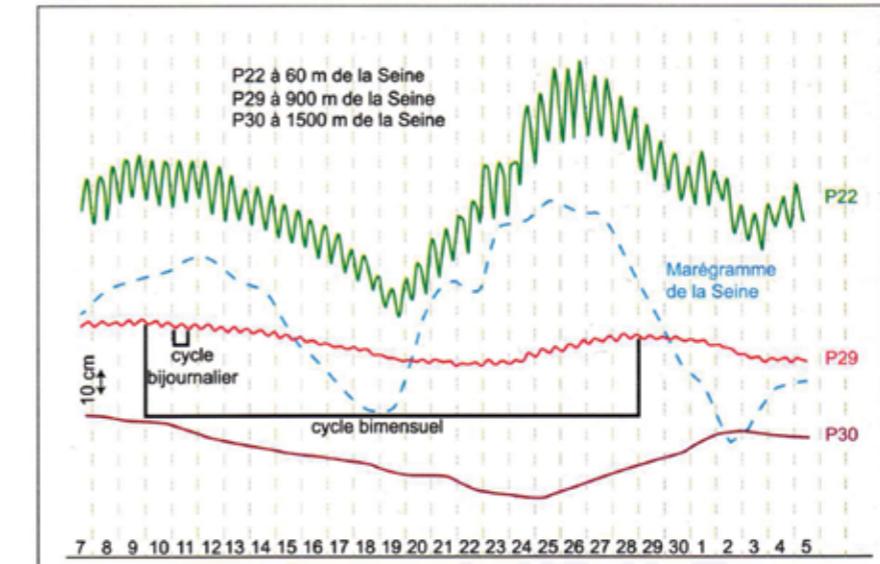


Fig. 4
Influence des marées sur le niveau de la nappe de la craie en aval de Rouen
(J.-C. Roux - J. Trémembert, 1978) [7].

(J.-C. Roux – J. Trémembert, 1978)

Figure 17 : Influence des marées sur le niveau de la nappe de la Craie en aval de Rouen



3.2.3 ALTITUDE DE LA SEINE

La courbe marégraphique à Rouen a été mesurée du 17 septembre au 13 novembre 2013 en deux points amont et aval de la zone modélisée.



Figure 18 : Points de mesure de l'onde de marée en Seine mesurée du 13/09 au 13/11/2013

Le décalage vertical maximal est de l'ordre de 1 cm entre ces deux points de mesure, selon le sens de déplacement de l'onde de marée. Il peut être considéré comme négligeable et n'est de ce fait pas pris en compte dans la modélisation. Les variations de niveau de la Seine ont donc été appliquées identiquement à l'Est (amont) et à l'Ouest (aval) des modèles sur les données horaires simplifiées (cf. Figure 38).

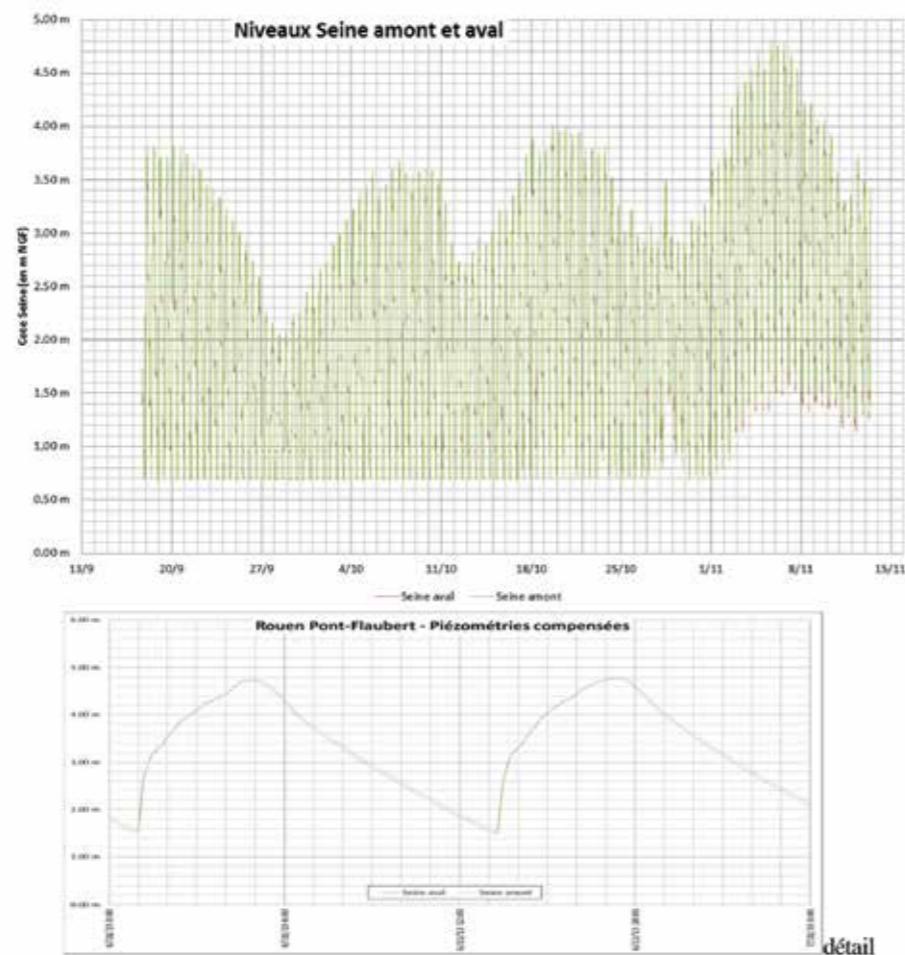


Figure 19 : Onde de marée en Seine mesurée du 13/09 au 13/11/2013 (en m NGF)



3.2.4 PIÉZOMÉTRIE OBSERVÉE AU DROIT DU PONT FLAUBERT

Plusieurs piézomètres ont été implantés aux abords du Pont Flaubert. Mais l'absence, dans les relevés fournis, de précisions sur les heures des mesures ponctuelles relevées, nécessaires pour évaluer l'influence de l'**onde de marée**, ne permet pas d'établir une esquisse piézométrique précise et synchrone dans le secteur immédiat du Pont.

De ce fait nous avons suivi la piézométrie locale par mesures continues et synchrones du 13 septembre au 13 novembre 2013, par des sondes automatiques enregistreuses mises en place dans six piézomètres situés sur les abords du trajet du projet de rive gauche.



Figure 20 : Localisation des points de suivi piézométrique en rive gauche

Sur la presqu'île Rollet la piézométrie s'établit entre + 3.3 et + 3.9 m NGF ; l'onde de marée n'est quasiment pas visible sur le piézomètre Pz3bis, avec une amplitude inférieure à 2 cm. Elle est plus franche sur le piézomètre Pz4bis, avec une amplitude de l'ordre de 10 cm. Le faible marnage de ces deux ouvrages est lié à la faible perméabilité des alluvions récentes dans lesquels ils sont forés.

Sur le site CEI à l'entrée du pont Flaubert, la piézométrie a été mesurée entre + 2.0 et + 2.7 m NGF, soit 1 m plus bas que sur la presqu'île ; l'onde de marée est en revanche nettement plus sensible, avec une amplitude de 30 à 40 cm : le piézomètre Pz2 plus éloigné de la Seine est également plus éloigné des alluvions fines, et réagit d'autant mieux aux marées dans un terrain plus perméable. Ses niveaux ont un retard de 3h environ sur la marée. La remontée de la nappe à partir du 15 octobre suit les précipitations.

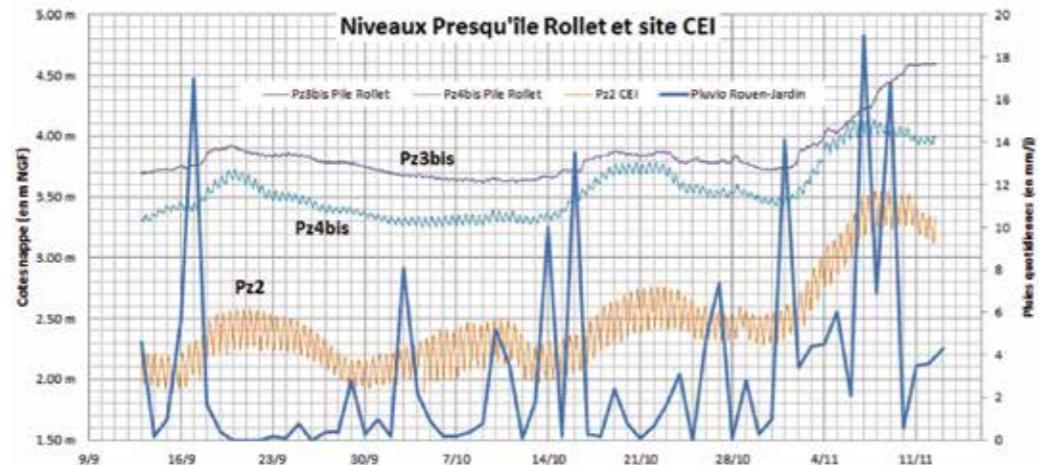


Figure 21 : Suivi piézométrique sur la presqu'île Rollet et le site CEI

Sur le site de la Grande Paroisse (Figure 22 ci-dessous), la piézométrie a été mesurée entre + 3.2 m NGF au nord (Pz4 le plus proche de la Seine) et + 2.7 m NGF au sud (Pz11 le plus éloigné de la Seine), soit 0.5 m plus bas que sur la presqu'île ; les amplitudes de marée sont quasiment invisibles sur les trois piézomètres suivis, avec des amplitudes quotidiennes de l'ordre du centimètre. La nappe est 60 cm plus basse en Pz11 au sud qu'en Pz4 au nord : influence des variations lithologiques importantes dans ce secteur et du retard de l'alimentation de la Seine (cf. Figure 26). La remontée de la nappe à partir du 15 octobre suit les précipitations.

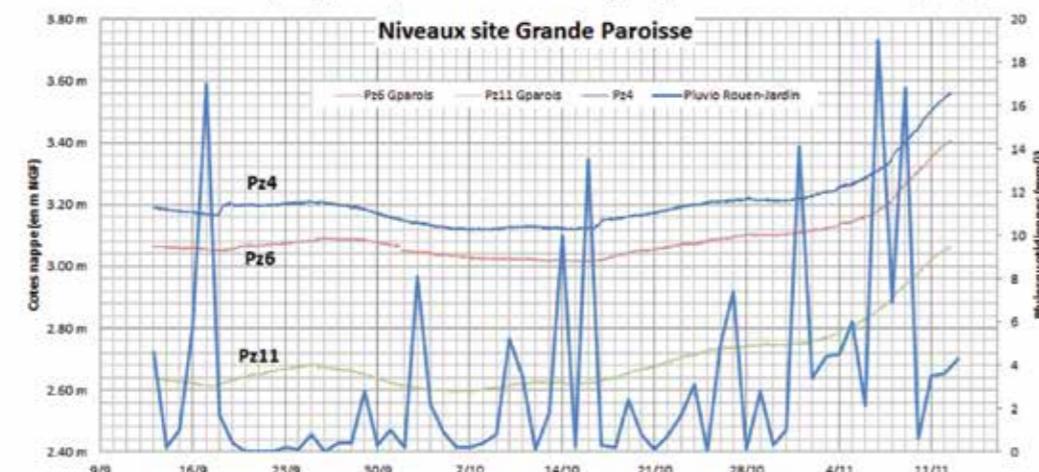


Figure 22 : Suivi piézométrique sur le site Grande Paroisse



3.2.5 TEMPÉRATURE DE LA NAPPE

La température de l'eau n'est pas un paramètre utilisé dans le modèle - il est cependant enregistré en même temps que la pression par les sondes mises en place pour le suivi piézométrique. Les résultats obtenus permettent d'établir des corrélations intéressantes.

La température de la Seine (Figure 23), stable vers 18°C jusqu'au 9/10, baisse ensuite rapidement pour atteindre 11.5°C le 12/11 : cette chute peut être corrélée avec les pluies quasi permanentes depuis le 10/10.

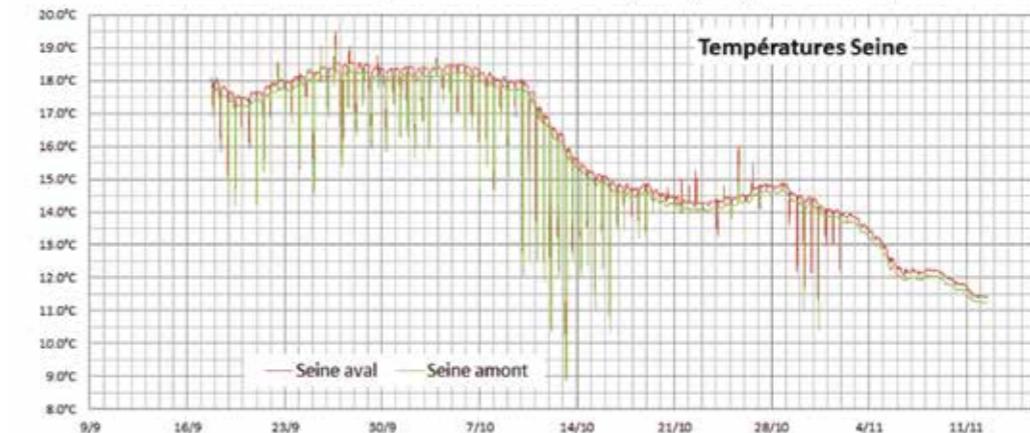


Figure 23 : Suivi thermique de la Seine

Sur la presqu'île Rollet (Figure 24), l'onde de marée qui a un marnage quotidien extrêmement faible (< 2 cm) dans le piézomètre Pz3bis montre une amplitude thermique de marée faible mais bien marquée (0.05 à 0.1°C). On remarque qu'à partir du 9/11, cette amplitude double brusquement, à 1.5°C.

Dans le piézomètre Pz4bis voisin qui montre un marnage plus important (10 cm), l'amplitude thermique associée n'est pas observable, et la température enregistrée croît linéairement de 13.4°C le 13/10 à 13.65°C le 13/11, soit +0.15°C en deux mois, sur une pente parallèle à celle de Pz3bis.

Sur le site CEI à l'entrée du pont Flaubert (Figure 24), le piézomètre Pz2 présente une amplitude thermique de marée de l'ordre de 0.2°C jusqu'au 9/11. A l'inverse de Pz3bis, cette amplitude est quasiment réduite de moitié à 0.05°C du 9 au 13/11.

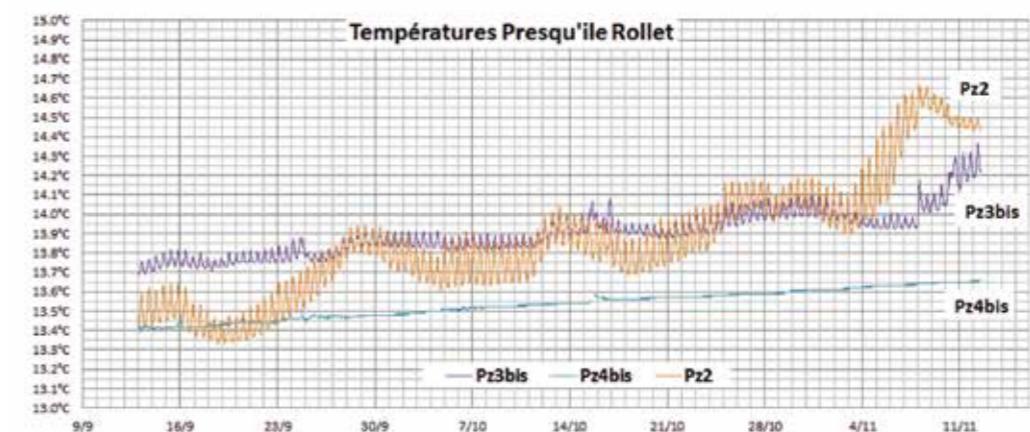


Figure 24 : Suivi thermique de la nappe alluviale sur la presqu'île Rollet et le site CEI

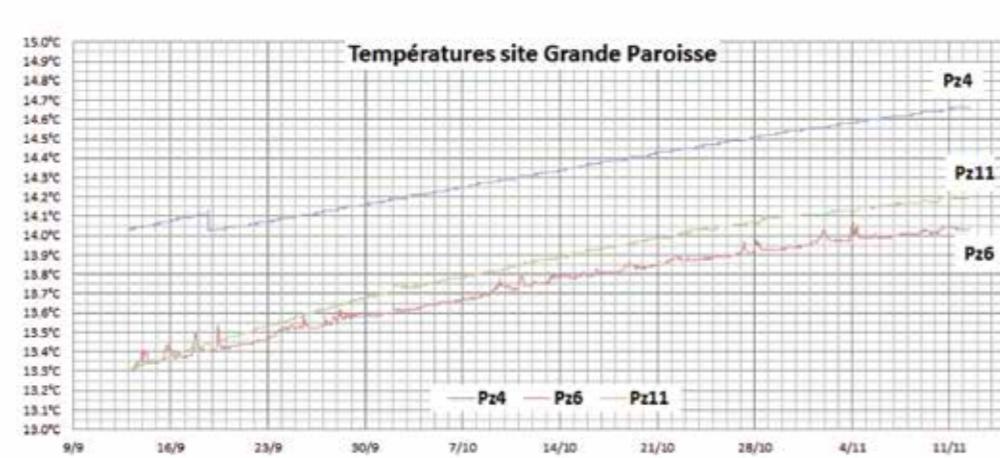


Figure 25 : Suivi thermique de la nappe alluviale sur le site Grande Paroisse

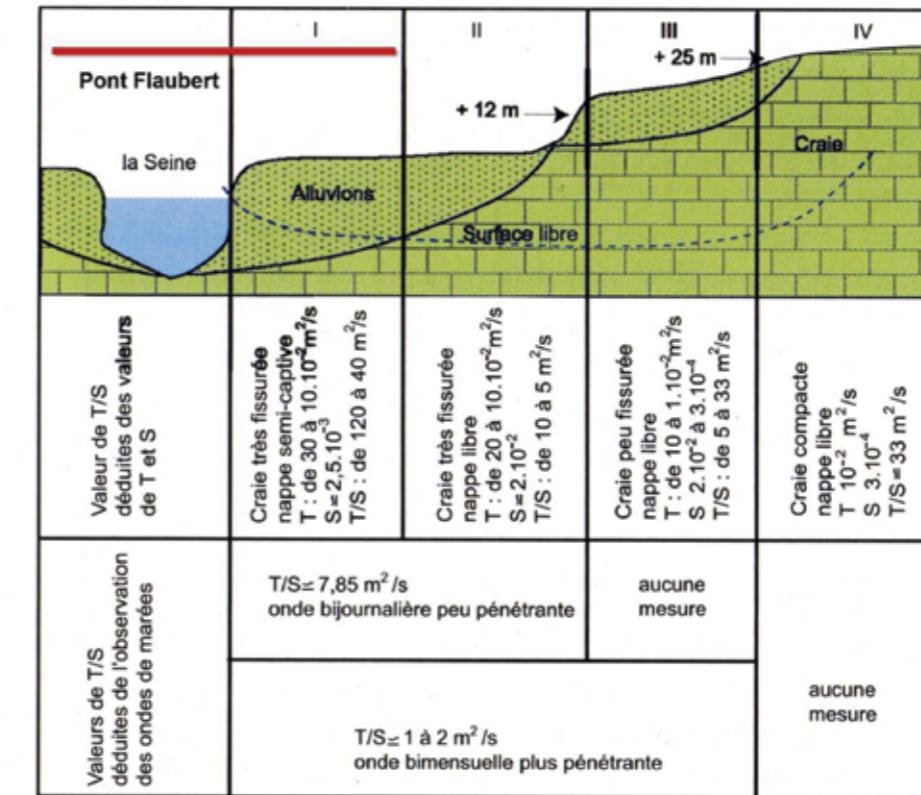


3.2.6 PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES

La zone alluviale, noyée, draine par sa forte perméabilité le réservoir crayeux. La nappe s'écoule ensuite en règle générale vers la Seine, même si dans certaines conditions la rivière alimente également en retour la nappe alluviale ; cette réalimentation directe par la rivière, calculée par pompages, est faible, de l'ordre de 20 à 30 %.

Les pompages d'essai réalisés dans les ouvrages locaux ont permis d'estimer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère crayeux, résumés ci-dessous :

- Transmissivité : de 30 à 10.10^{-2} m 2 /s
- Coefficient d'emmagasinement : $2.5 \cdot 10^{-3}$
- En absence de données locales, la porosité cinématique a été établie à 0.08 (8%) en référence à des données connues pour des formations géologiques semblables.



Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère crayeux dans la vallée de la Seine
(J.-C. Roux - J. Trémembert, 1978) [7].

Figure 26 : Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère crayeux dans la vallée de la Seine



MODÉLISATION



1 DÉFINITION DU MODÈLE CONCEPTUEL

La modélisation d'un aquifère permet d'intégrer les formules qui décrivent l'écoulement de l'eau dans le sous-sol - et l'entraînement conjoint des gaz, minéraux dissous, particules et polluants qu'elle peut véhiculer, sur une zone géographique naturellement hétérogène, que l'on va devoir découper en secteurs homogènes en termes de lithologie, perméabilité, pluies efficaces, occupation du sol etc ...

Le modèle hydrogéologique est donc construit sur les bases géologiques et hydrogéologiques régionales et locales synthétisées à partir des données bibliographiques disponibles (*).

Les résultats des calculs réalisés sur une maille du modèle influencent les résultats des calculs de ses voisines. Cette modélisation permet ainsi de visualiser les écoulements dans une zone géographiquement étendue et hétérogène, par exemple entre une zone d'exploitation d'alluvions, une rivière et des zones de pompage pour l'alimentation en eau potable.

Application : nappes superficielles ; optimisation de pompages rapprochés (champs captants), étude des impacts éloignés d'un rabattement (aire d'alimentation, zone d'influence), effet de barrage d'un ouvrage en sous-sol, propagation d'un polluant vers un forage, influence d'un cours d'eau sur la réalimentation de la ressource ...

Mise en œuvre : Iduna Environnement a réalisé la présente modélisation 3D à l'aide du **logiciel MODFlow Flex © de Waterloo Hydrogeologic**.

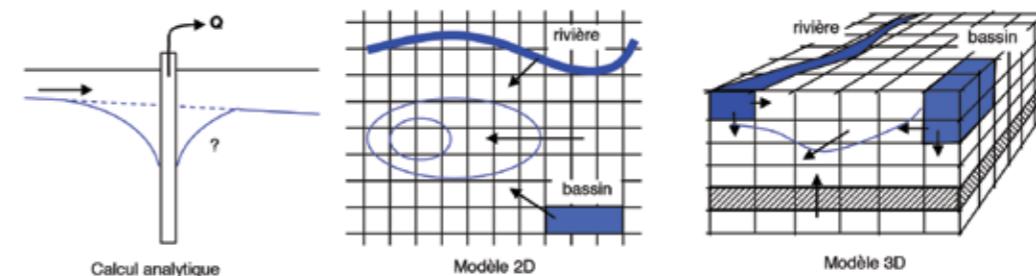


Figure 27 : Méthodes de calculs et modélisation hydrogéologique

Compte tenu des objectifs de la mission (impacts d'une éventuelle pollution sur la nappe alluviale superficielle et la nappe de la Craie) et de la configuration du secteur à étudier (de part et d'autre de la Seine), l'étude hydrogéologique a été réalisée par modélisation 3D.

(*) Sources utilisées :

- rapports des reconnaissances géotechniques de 2000 à 2011
- Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS)
- documentation interne de IDUNA Environnement



2 CONSTRUCTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRODYNAMIQUE, DESCRIPTION

La modélisation a été réalisée grâce au logiciel MODFlow Flex © utilisant la méthode des différences finies.

Il s'agit d'un modèle complet spécifiquement conçu pour simuler l'écoulement 3D des eaux souterraines (pompes, injections) et le transport de contaminants sous différentes influences à travers un matériau poreux.

S'agissant d'une modélisation des écoulements dans la nappe alluviale superficielle sans pompes sur le site même, l'option retenue pour cette étude est un modèle bicoche avec simulations en régime permanent puis en régime transitoire pour prendre en compte les marées de la Seine.

2.1 HYPOTHÈSES DE BASE ET LOGICIELS UTILISÉS

La modélisation a consisté à diviser la zone d'étude en mailles, auxquelles ont été appliquées les équations de base de l'écoulement en milieu poreux.

Les options retenues pour cette étude sont les suivantes :

- modèle bicoche, l'aquifère des alluvions reposant sur la Craie, substratum du site ;
- nappe des alluvions libre ; nappe de la Craie semi-captive ;
- calage en régime transitoire pour prendre en compte les marées

2.2 EXTENSION, DOMAINE PRÉSENTÉ

La représentation par modèle mathématique d'un système aquifère n'est autre que l'intégration numérique des équations de base de l'écoulement sur un ensemble de petits volumes décomposant le domaine modélisé.

En conséquence, la première étape de cette modélisation a consisté à définir la forme, la taille et la position de ces petits éléments de volume sous forme de mailles 3D.

La zone à modéliser couvre une surface de l'ordre de **2.5 km d'est (amont) en ouest (aval) et de 3 km du sud (rive gauche) au nord (rive droite) soit environ 7.5 km²**. Ce secteur est suffisamment étendu pour permettre de caractériser les interactions entre la Seine, les alluvions et la Craie.

Cette zone a été divisée en deux modèles, de plus petite superficie, permettant d'affiner les calculs en augmentant le nombre des mailles.

Extension des deux zones modélisées :

RIVE DROITE 3.65 km²

X Lam1n : 506.480 m à 509.200 m

Y Lam1n : 194.190 m à 195.700 m

RIVE GAUCHE 3.63 km²

X Lam1n : 506.480 m à 509.200 m

Y Lam1n : 193.150 m à 194.650 m



2.3 TOPOGRAPHIE

La représentation de la topographie a été réalisée par krigage des points topographiques fournis pour la zone, augmentés des points IGN pour les zones extérieures non couvertes le maillage des géomètres.

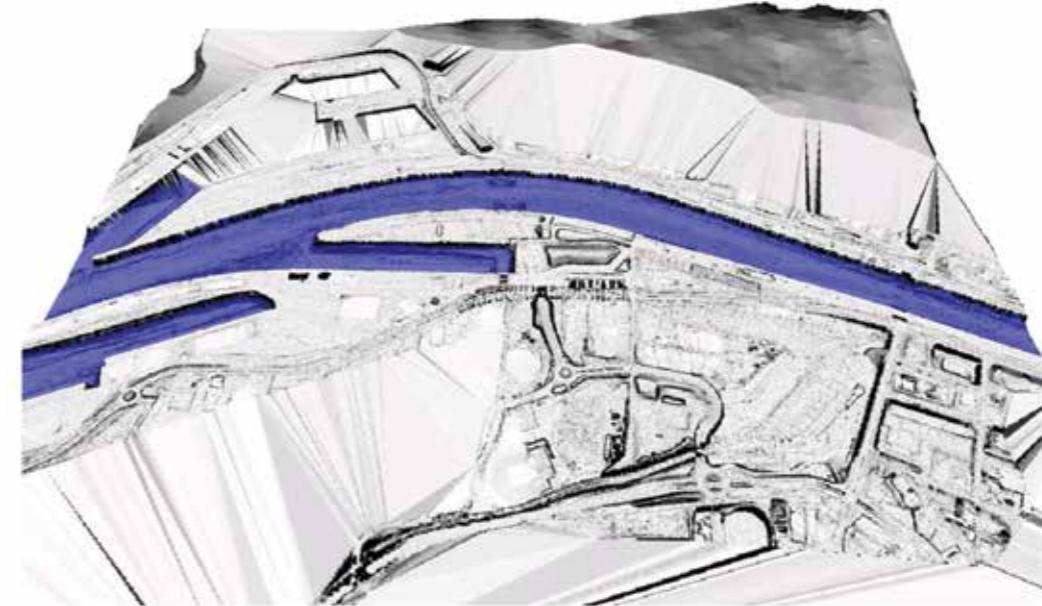


Figure 28 : Topographie modélisée – état actuel

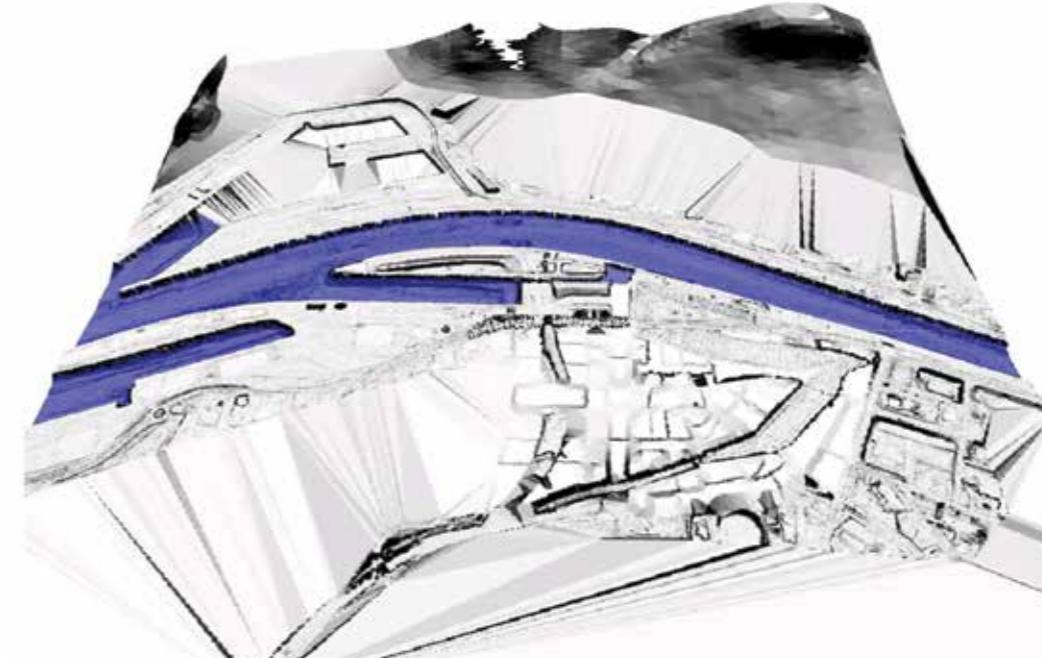


Figure 29 : Topographie modélisée – état futur



2.4 GÉOLOGIE

2.4.1 FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les limites des formations superficielles utilisées dans le modèle ont été numérisées à partir des cartes géologiques au 1/50.000^e :

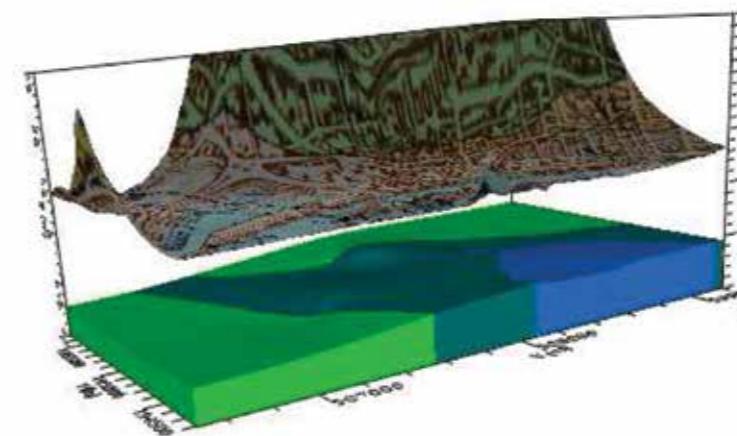
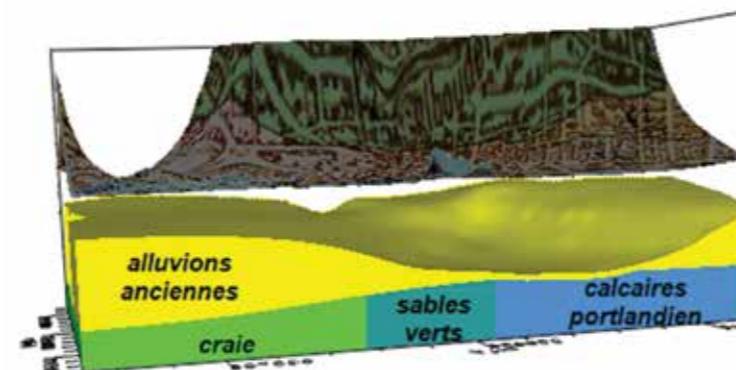
- n°0099 Rouen Ouest,
- n°0100 Rouen Est.

2.4.2 STRATIGRAPHIE

Les limites des formations profondes utilisées dans le modèle ont été numérisées à partir des coupes lithologiques :

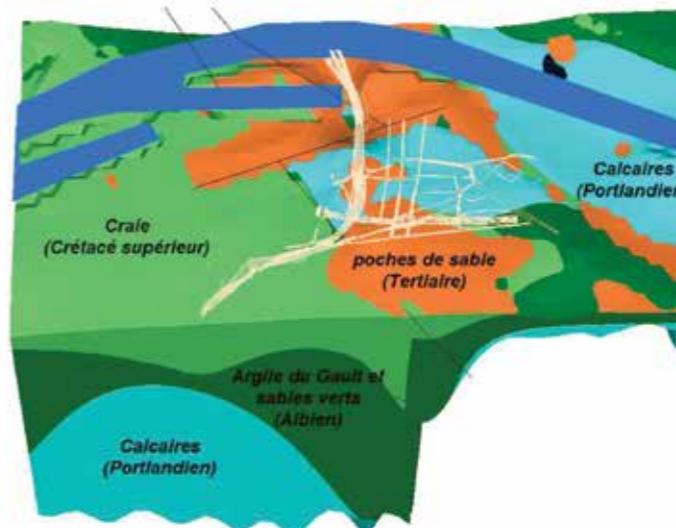
- des sondages BSS recensés sur le secteur : **355 coupes d'ouvrages** ont été synthétisées
- des sondages géotechniques fournis : **67 coupes d'ouvrages** ont été synthétisées
- des synthèses bibliographiques recueillies (cartes et coupes)

Bore	Easting	Northing	Elevation	TD	Bore	Depth-1	Depth-2	Stratigraphy
2000-12-SC11	507747.856	194468.563	-7	23.2	0099880393/0L11	0	0.3	Quaternaire
2000-12-SC6	507738.294	194575.066	-7.8	22.5	0099880393/0L11	0.3	0.5	Quaternaire
2000-12-SC8	507713.199	194576.025	-7.9	22.1	0099880393/0L11	0.5	5.5	Crétacé sup
2000-12-SC9	507773.182	194467.712	-7.2	22.8	0099880394/0L14	0	0.2	Quaternaire
2000-12-SP10	507760.478	194468.139	-7.2	23.15	0099880394/0L14	0.2	1.75	Quaternaire
					0099880394/0L14	1.75	5	Crétacé sup
					0099880395/0L16	0	0.2	Quaternaire
					0099880395/0L16	0.2	1	Quaternaire
					0099880395/0L16	1	1.3	Quaternaire
					0099880395/0L16	1.3	2.5	Quaternaire
					0099880395/0L16	2.5	9	Crétacé sup



(écorché après retrait des remblais et des formations alluviales)

Figure 30 : Stratigraphie modélisée – rive droite



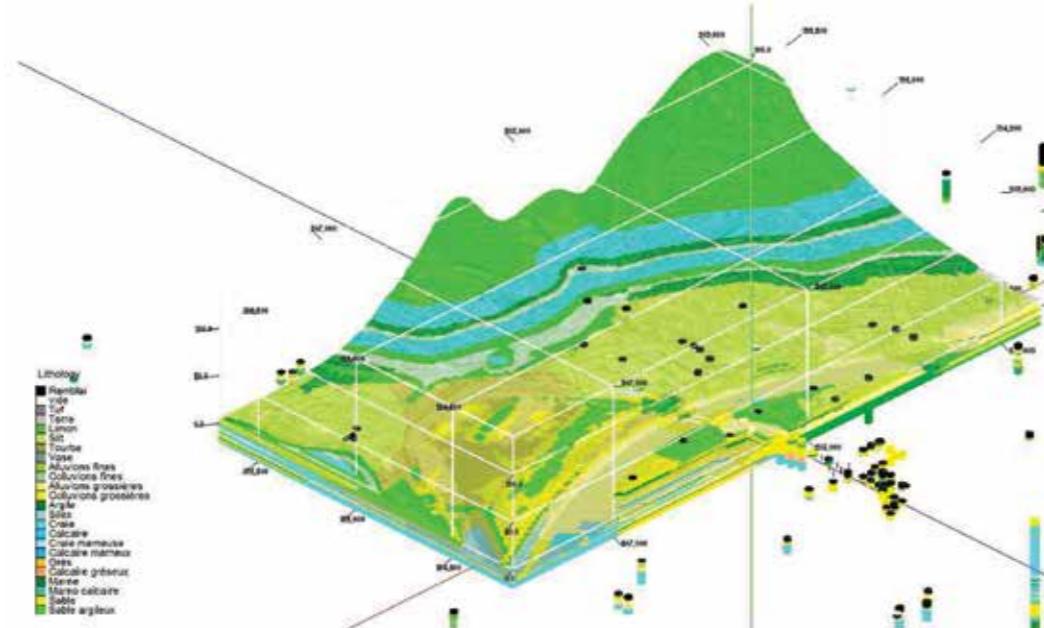
(écorché après retrait des remblais et des formations alluviales)

Figure 31 : Stratigraphie modélisée – rive gauche



2.4.3 LITHOLOGIE

La lithologie a été numérisée à partir des descriptions de ces mêmes coupes de sondages.



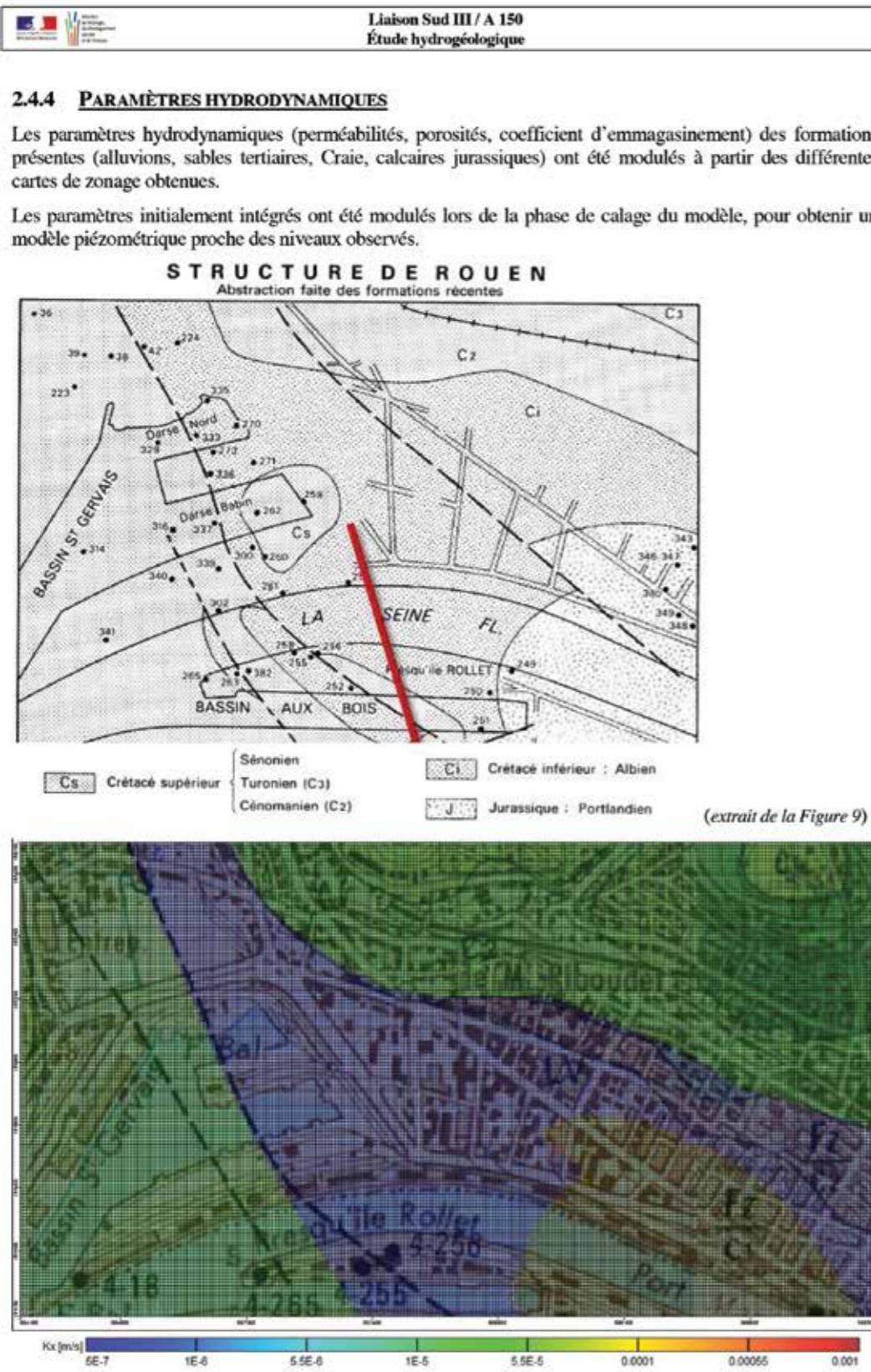


Figure 35 : Attribution des perméabilités au substratum de la zone modélisée – Rive droite

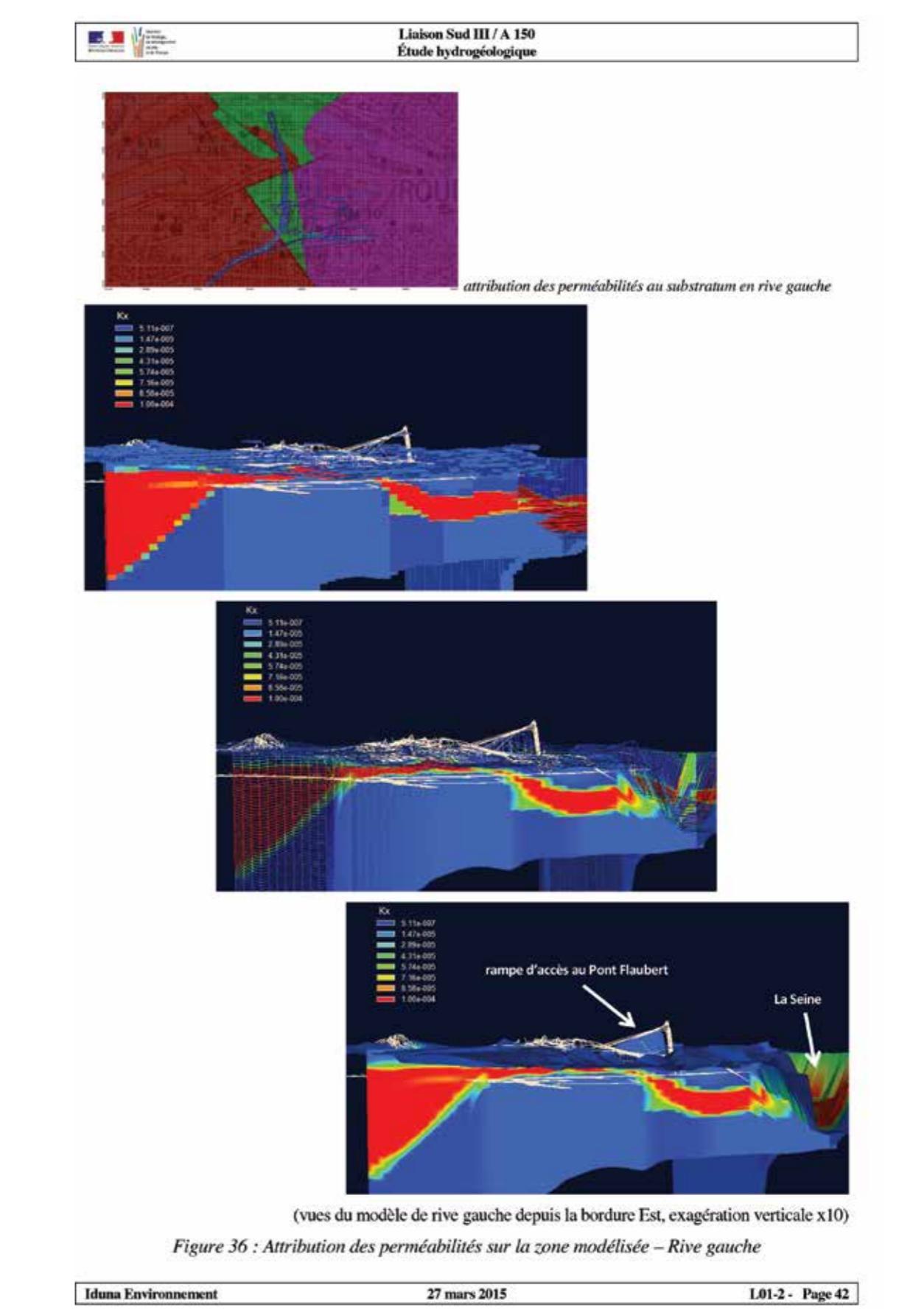


Figure 36 : Attribution des perméabilités sur la zone modélisée – Rive gauche



2.5 RECHARGE DE LA NAPPE

2.5.1 PLUVIOMÉTRIE SUR LA PÉRIODE DE SUIVI

Les pluviométries quotidiennes mesurées sur les stations Météo-France de Rouen-Jardin au Jardin des Plantes de Rouen, et de Rouen-Boos, sont reportées sur le graphique de la Figure 37 ci-dessous.

Durée du suivi : 61 jours de suivi, entre le 13 septembre et le 13 novembre 2013

Station météo :	Rouen Jardin	Rouen Boos
Distance au site :	2 km au SSE	10 km au SE
Altitude station :	+ 21 m NGF	+ 151 m NGF
Pluviométrie totale :	198.9 mm	182.4 mm
Moyenne quotidienne :	3.26 mm/j	2.99 mm/j

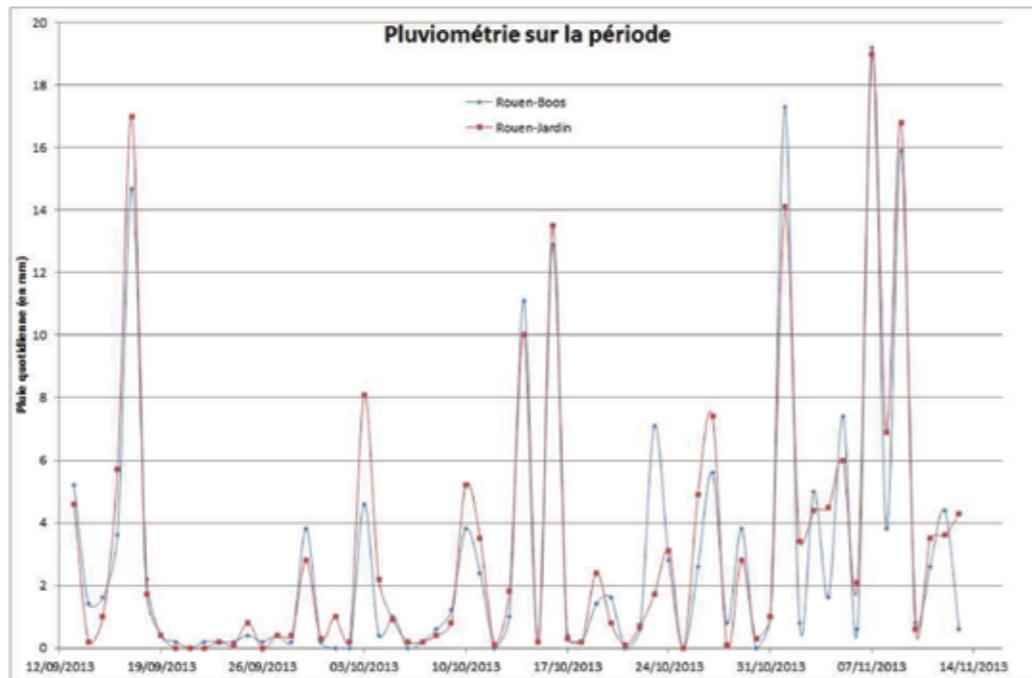


Figure 37 : Pluviométrie quotidienne mesurée à Rouen du 13/09 au 13/11/2013

2.5.2 RECHARGE DE LA NAPPE

En situation intégralement urbaine, comme c'est le cas sur la totalité de la surface modélisée, il est très difficile d'estimer l'alimentation par la pluie efficace (c'est à dire la fraction de la pluie qui s'infiltre dans le sol après ruissellement, évaporation et évapotranspiration).

A priori, elle doit tendre vers 0 compte tenu de la forte imperméabilisation et de la collecte des eaux dans des réseaux pluviaux avant rejet en Seine.

Nous avons toutefois maintenu une pluie efficace moyenne de l'ordre de 41 mm/an afin de prendre en compte la présence des espaces verts et les friches industrielles.

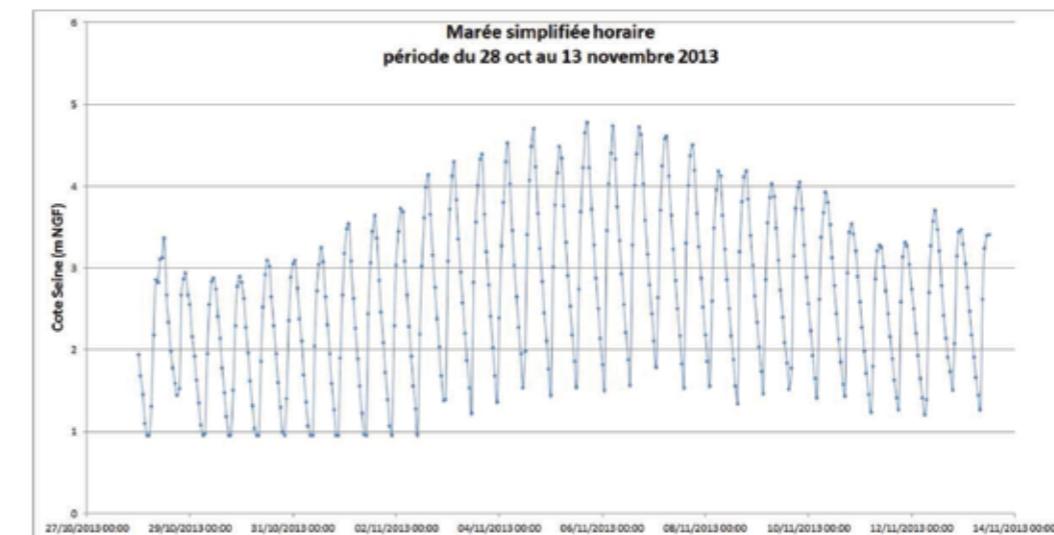
Compte tenu de la relativement faible superficie des deux zones modélisées (3.65 km²) par rapport à leurs bassins versants (80 km²), cette recharge est appliquée uniformément sur l'ensemble des mailles sans distinction de l'occupation réelle des sols.



2.5.3 ALTITUDE DE LA SEINE

L'altitude de la Seine du modèle a été calée sur la courbe simplifiée issue de nos mesures en continu du 17 septembre au 13 novembre 2013.

Les variations de niveau de la Seine ont été appliquées identiquement à l'Est (amont) et à l'Ouest (aval) des modèles sur les données horaires simplifiées (cf. Figure 38).



La marée horaire simplifiée a été extraite des enregistrements de la période du 28/10 au 13/11/2013 pour laquelle les amplitudes étaient complètes – Elle représente 31 ondes de marées sur ces 16 jours

Figure 38 : Marée horaire utilisée dans le modèle



2.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Deux types de conditions aux limites ont été utilisés pour ce modèle :

Flux imposé :

Le flux traversant la maille est imposé pour le modèle, le programme calcule le niveau piézométrique lié à ce flux dans chaque maille :

Un flux moyen a été ainsi imposé sur toutes les mailles représentant la **pluie efficace moyenne** c'est à dire la fraction de la pluie qui s'infiltre dans le sol après ruissellement évaporation et évapotranspiration ;

Un flux moyen a également été imposé aux mailles qui bordent le modèle au nord-ouest du modèle de rive droite, et au sud du modèle de rive gauche, afin de simuler l'alimentation latérale de l'aquifère des alluvions de la Seine par l'aquifère de la craie.

Potentiel imposé :

Les mailles du modèle qui représentent la Seine et ses annexes (port, darses) sont de type « potentiel imposé ».

Cette condition était dans le cas présent indispensable afin de simuler l'influence de la marée :

L'altitude de la Seine a été constamment imposée, ce qui permet une alimentation du modèle par la rivière et/ou inversement, au rythme horaires des marées simplifiées décrites ci-dessus (cf. Figure 38). Ces marées de l'ordre de 3 mètres d'amplitude représentent un **marnage moyen**, qui ne prend pas en compte les phénomènes exceptionnels (grandes marées, mortes eaux).

Ces variations horaires de niveau de la Seine ont été appliquées identiquement à l'Est (amont) et à l'Ouest (aval) des modèles.

Les calculs ont été réalisés sur plusieurs périodes de trois ondes de marées, représentant 37 phases de calculs.



2.7 MAILLAGE

La Seine étant une limite naturelle d'échanges avec les terrains adjacents, nous avons modélisé deux zones : zone de rive droite et zone de rive gauche.

2.7.1 MAILLAGE EN PLAN HORIZONTAL

La zone modélisée a été discréteisée en mailles de 100 m par 100 m (soit 1 ha) affinées progressivement jusqu'à des mailles de 50 m par 50 m puis de 20 m par 20 m à 5 m par 5 m à proximité immédiate des ouvrages d'accès au Pont Flaubert.

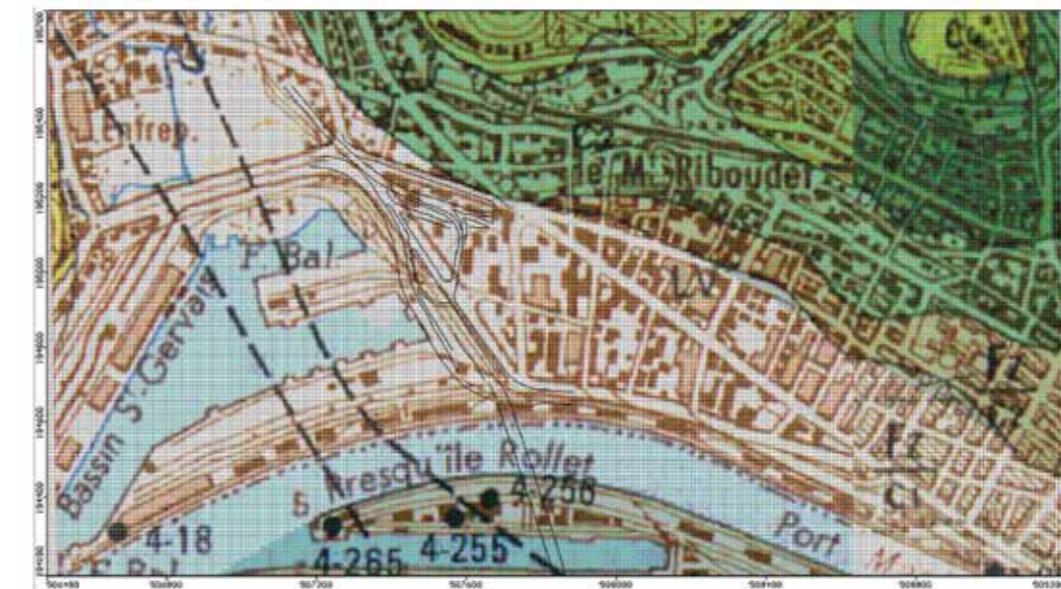


Figure 39 : Extension et maillage de la zone modélisée – Rive droite

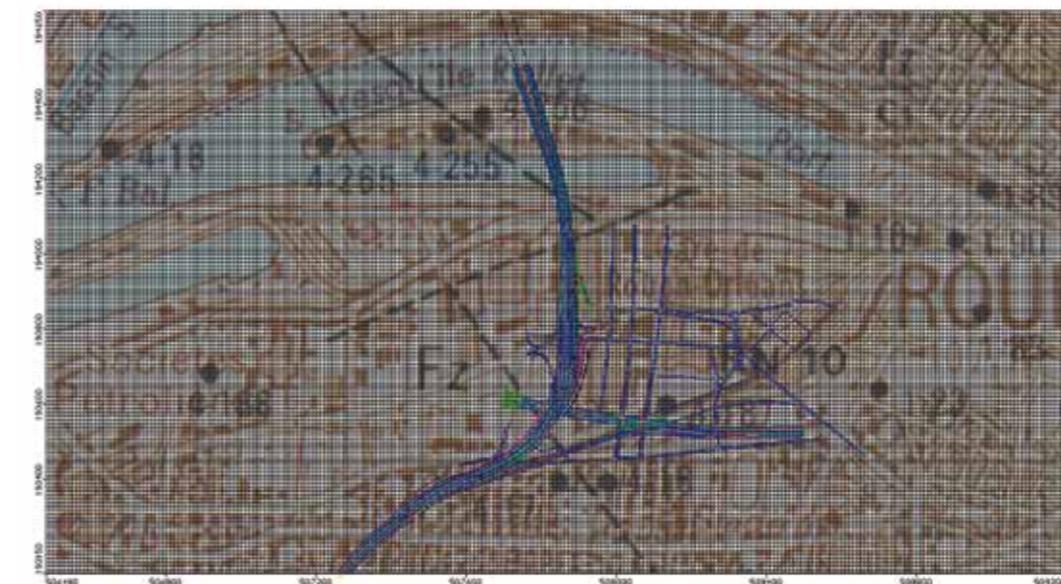


Figure 40 : Extension et maillage de la zone modélisée – Rive gauche



2.7.2 STRUCTURE VERTICALE

L'aquifère modélisé est celui des alluvions sur la Craie. Son mur (base) suit le profil 3D du toit de la Craie modélisé à partir des coupes synthétisées.

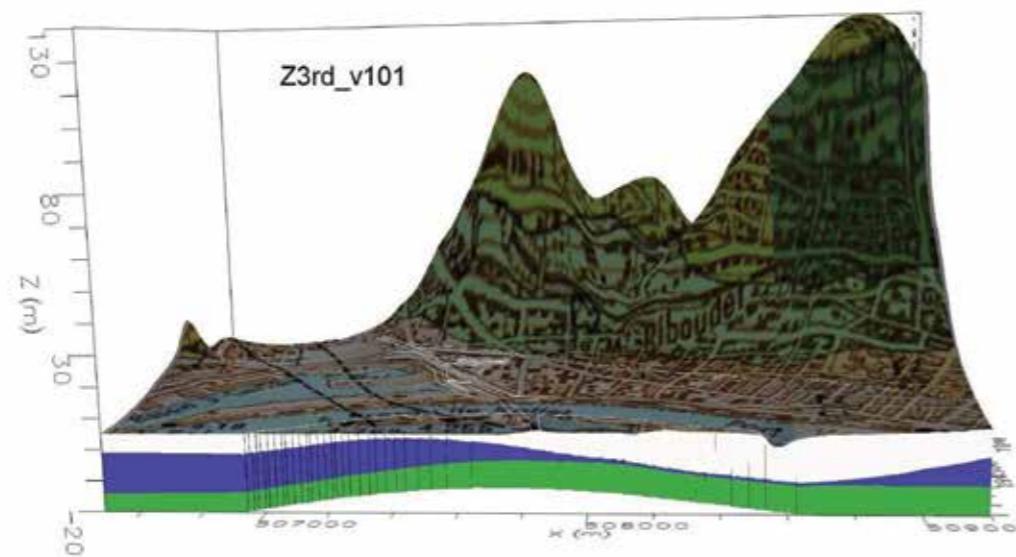


Figure 41 : Maillage vertical de la zone modélisée - Rive droite

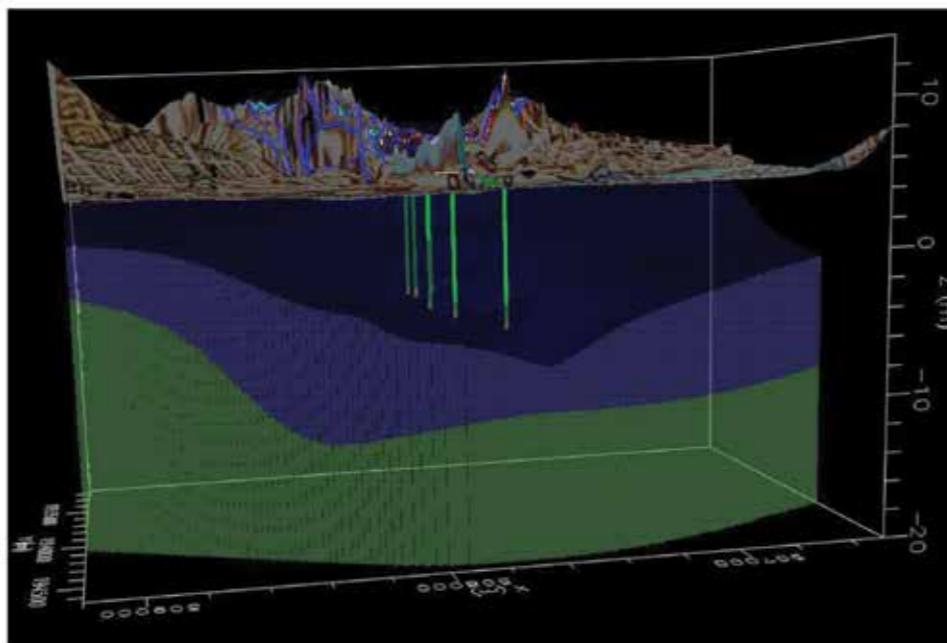


Figure 42 : Maillage vertical de la zone modélisée - Rive gauche



3 CALAGE

Le calage du modèle est l'étape durant laquelle, par l'ajustement de certains paramètres mal connus car très variables (dans le cas présent la perméabilité et le degré de colmatage des berges des cours d'eau et des gravières), on cherche à recréer mathématiquement la piézométrie mesurée sur le terrain ou une piézométrie bibliographique.

Le calage sert à caractériser l'état piézométrique initial du projet.

3.1 DÉMARCHE GÉNÉRALE

Le calage a été basé sur l'esquisse piézométrique CGG de 1998.

À partir de la base de modèle décrite ci-dessus, plusieurs modifications ont été apportées localement afin d'approcher la piézométrie décrite sur cette esquisse de référence. Ces modifications ont porté :

- sur la morphologie des polygones distinguant les alluvions de basse terrasse et les alluvions récentes
- sur la morphologie des polygones profonds distinguant calcaires jurassiques et Craie
- sur les valeurs aux limites pour affiner les courbes piézométriques aux abords des limites du modèle
- sur les flux entrants (recharge de la nappe) et sortants (débits des deux cours d'eau), pour affiner le bilan hydrique



4 MODÉLISATIONS RIVE DROITE

4.1 CALAGE - ÉTAT DE RÉFÉRENCE

Sur les bases hydrodynamiques décrites précédemment, l'esquisse piézométrique calculée est proche de celle de l'atlas hydrogéologique de Seine Normandie de 1990.

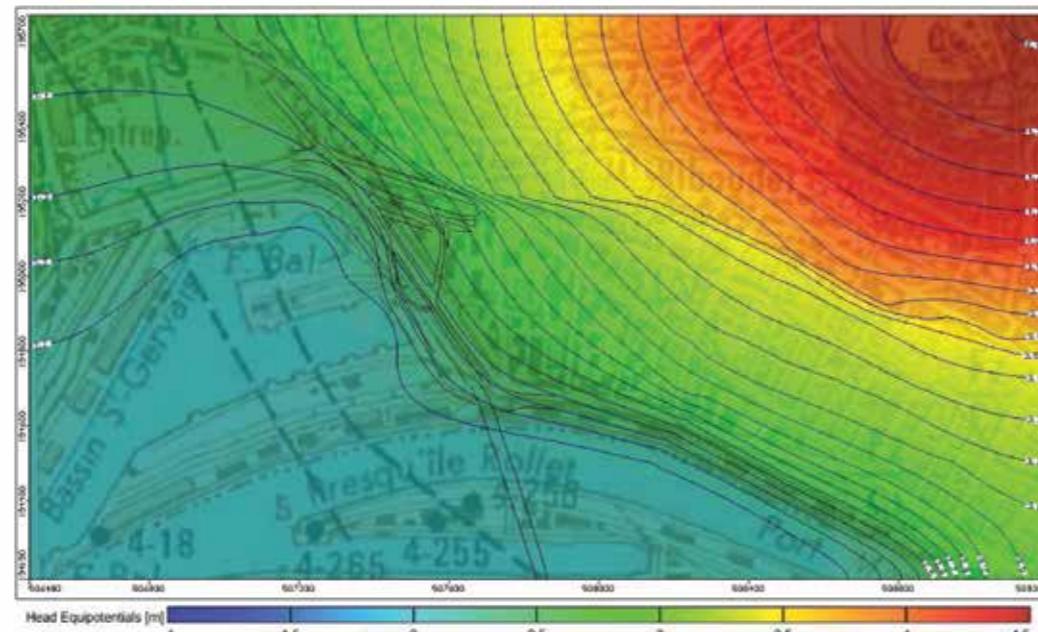
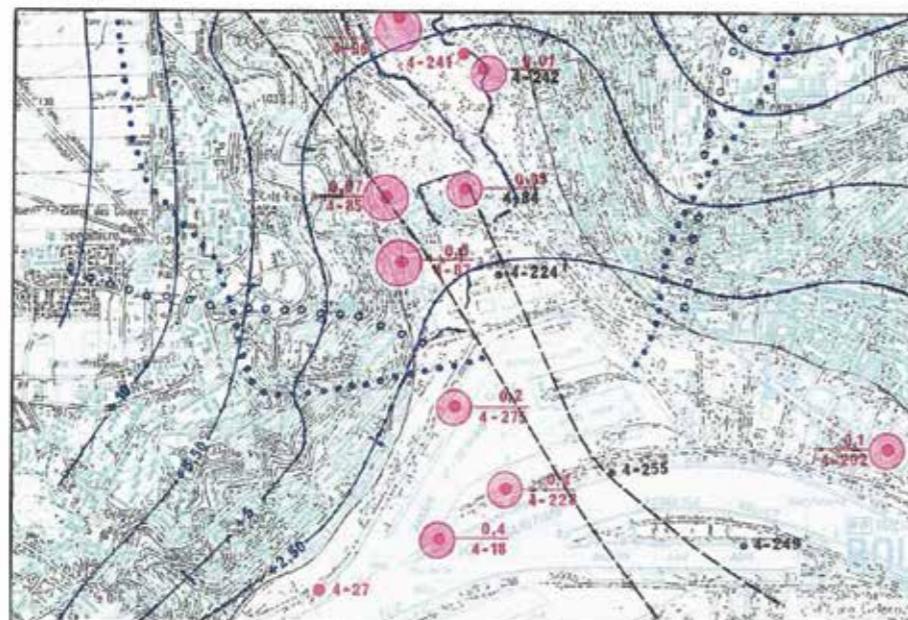


Figure 43 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive droite modélisée

4.2 ÉTAT IMPACTÉ

La modélisation de l'état impacté a été réalisée en affectant aux terrains situés à la verticale de l'ouvrage une perméabilité réduite résultant de la charge de compaction.

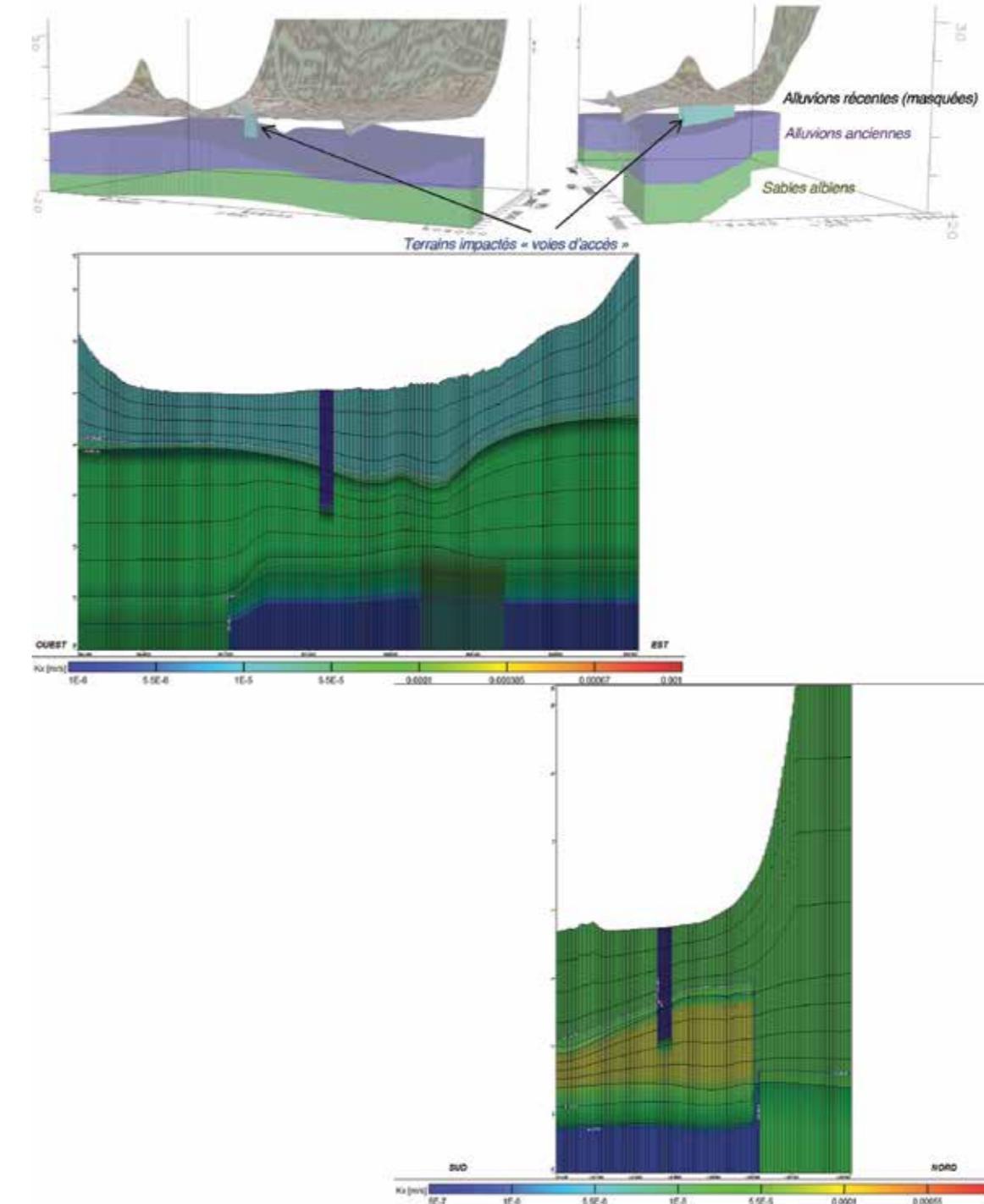


Figure 44 : Rive droite : Vues du modèle intégrant la charge de la voie d'accès nord



Les calculs ont été réalisés sur plusieurs périodes de trois ondes de marées.

Les résultats présentés ci-après correspondent à l'onde de marée du 7 novembre 2014 reportée ci-dessous.

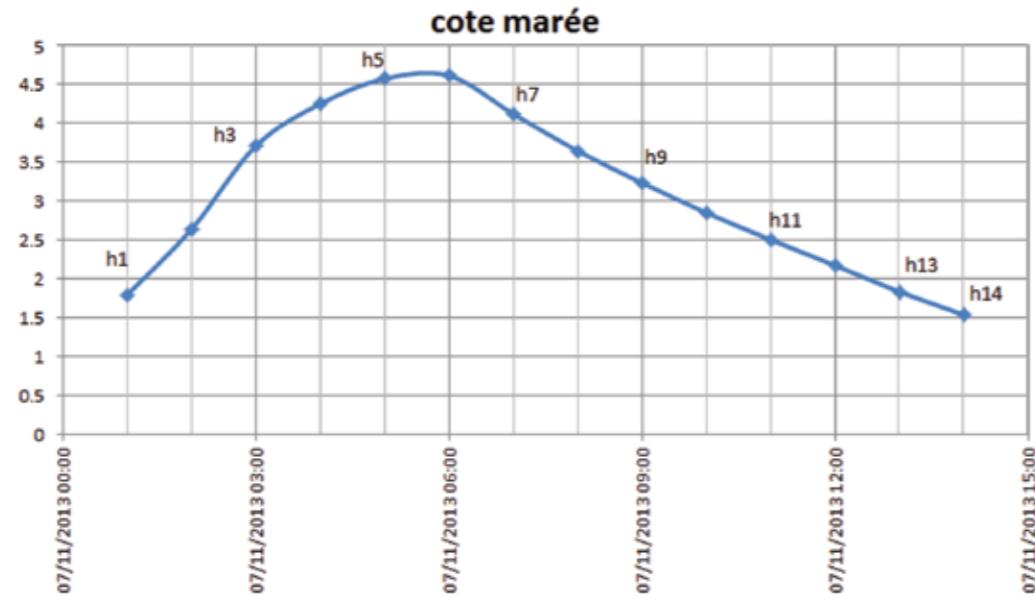
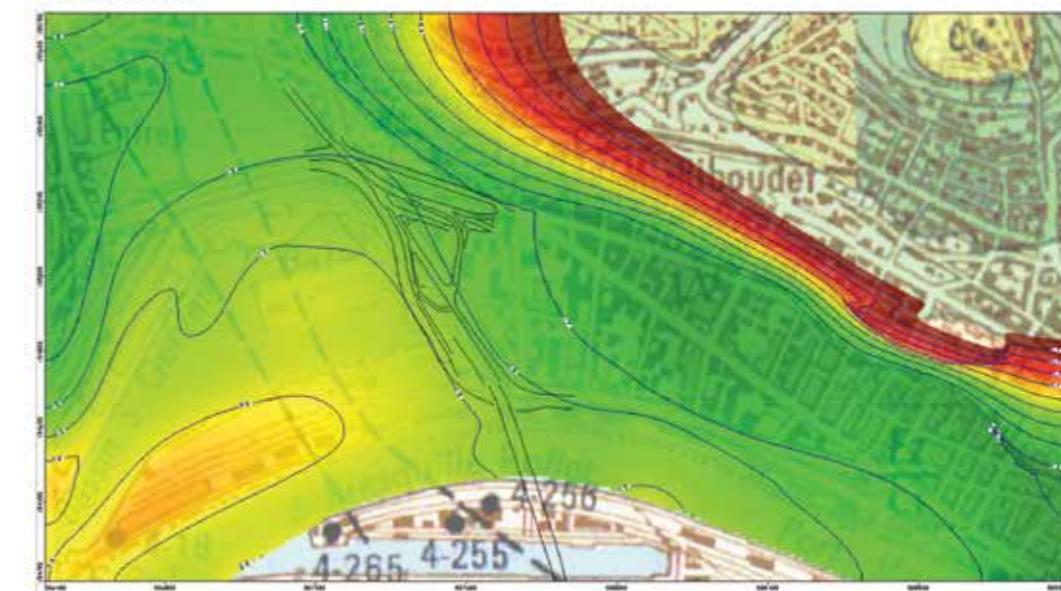


Figure 45 : Onde de marée correspondant aux piézométries impactées présentées

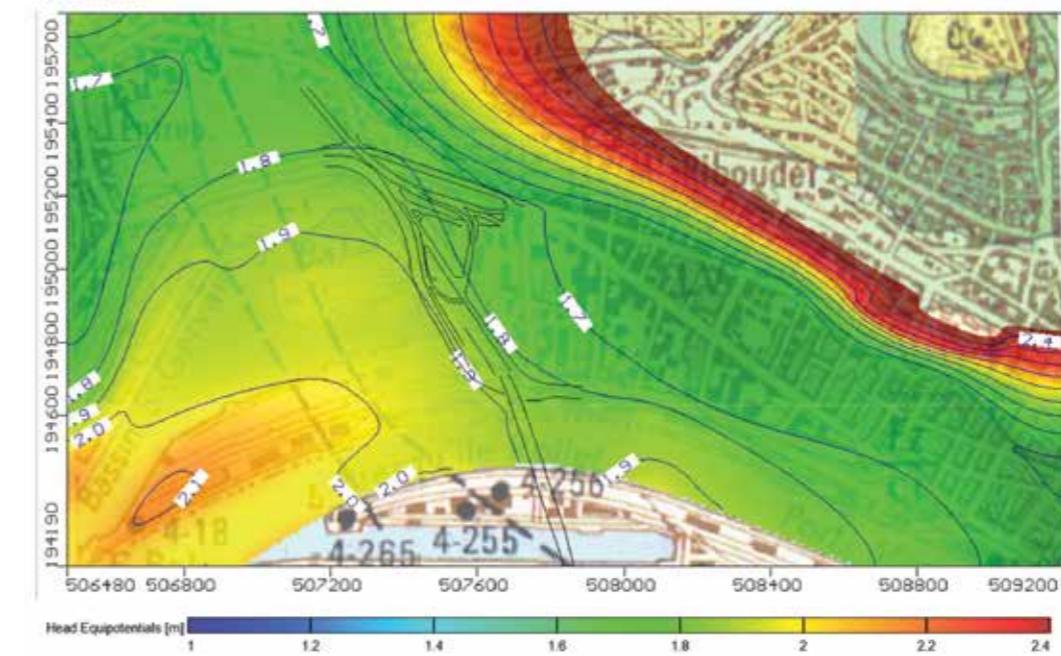
Sur cette période, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale au droit et aux abords de l'ouvrage, le décalage est inférieur à 10 cm.

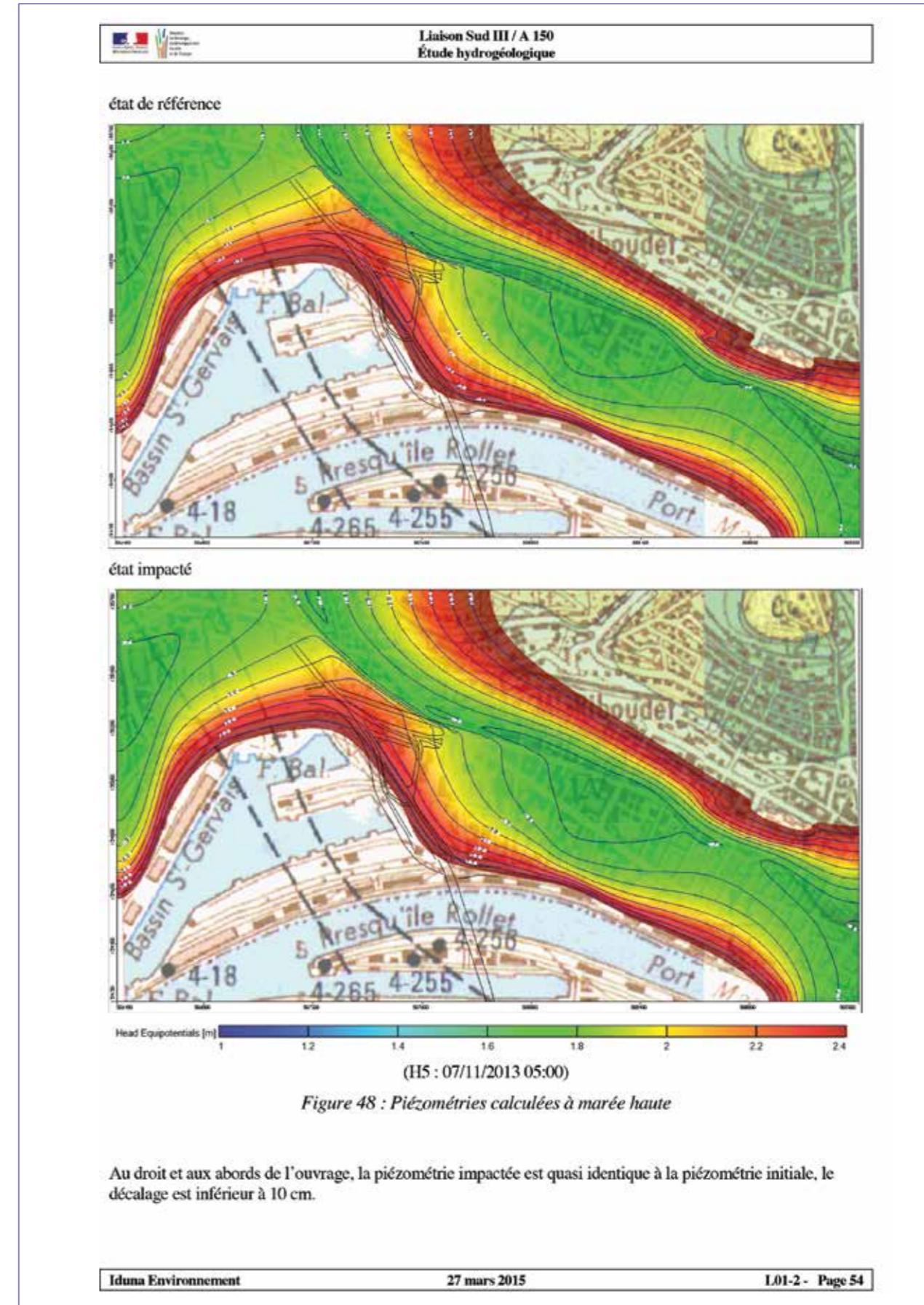
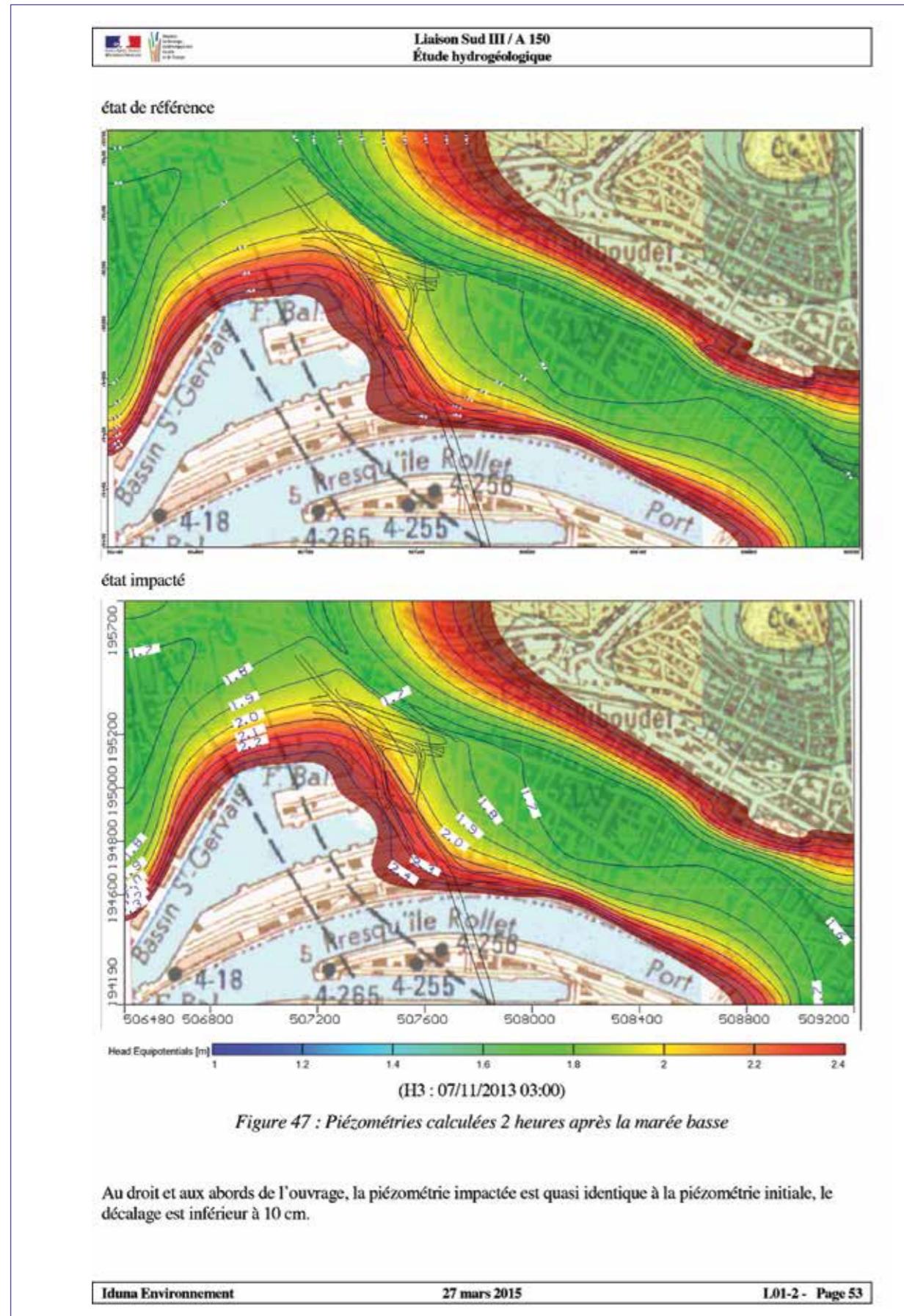


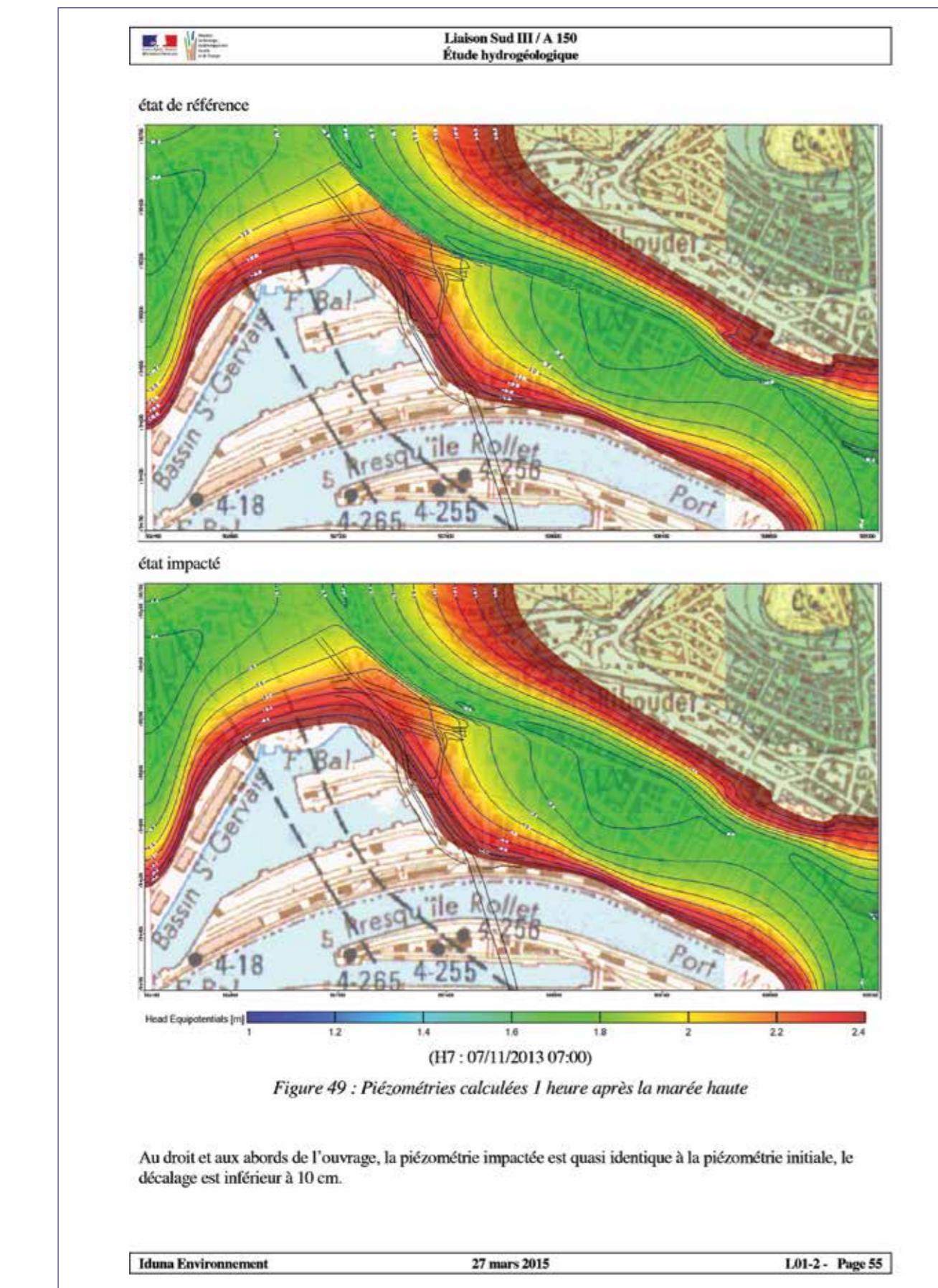
état de référence



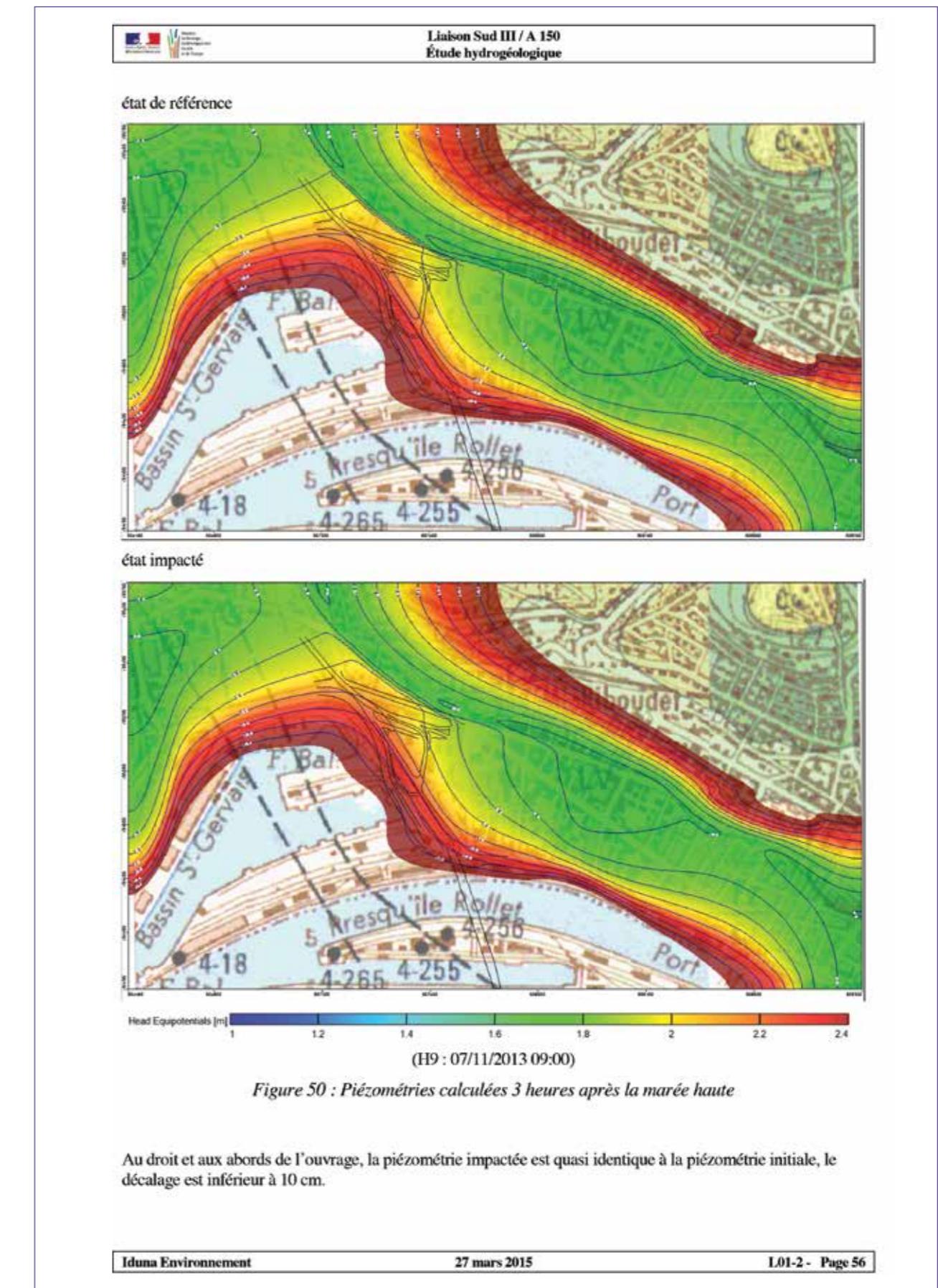
état impacté







Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

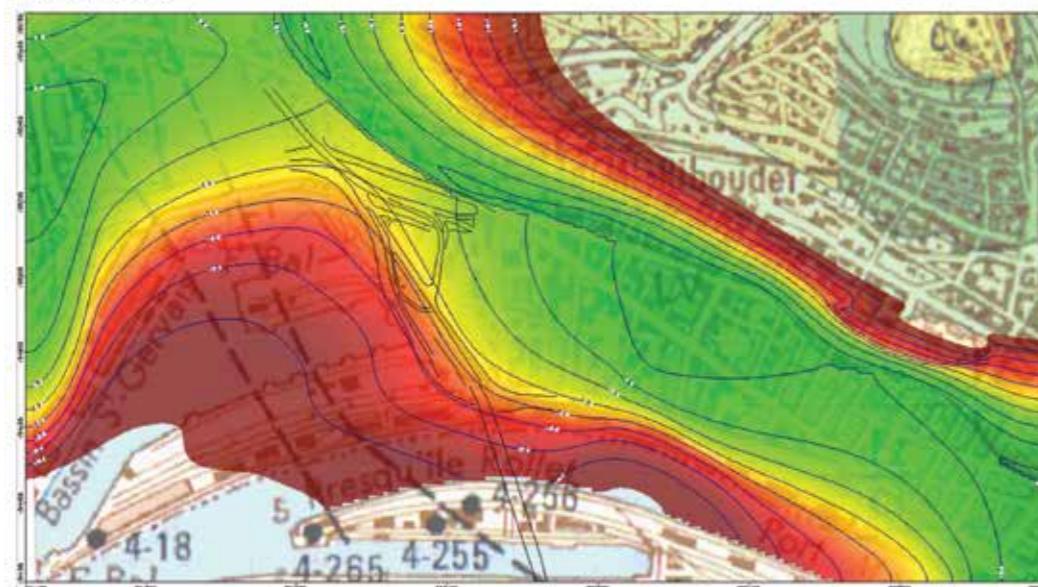


Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

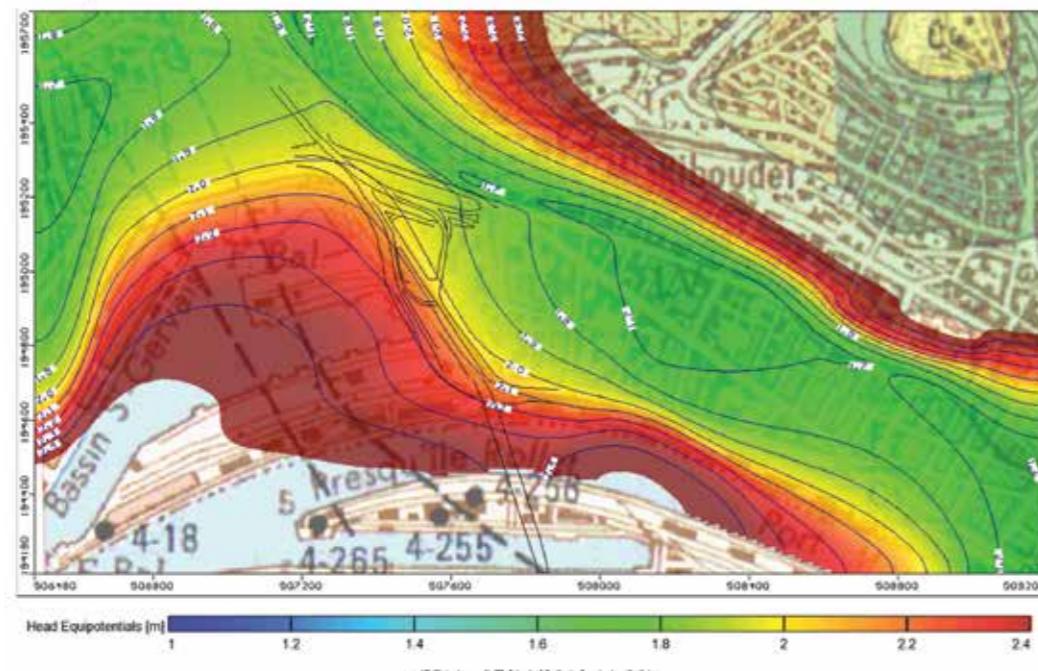


Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

état de référence



état impacté



Head Equipotentials [m] 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4

(H11 : 07/11/2013 11:00)

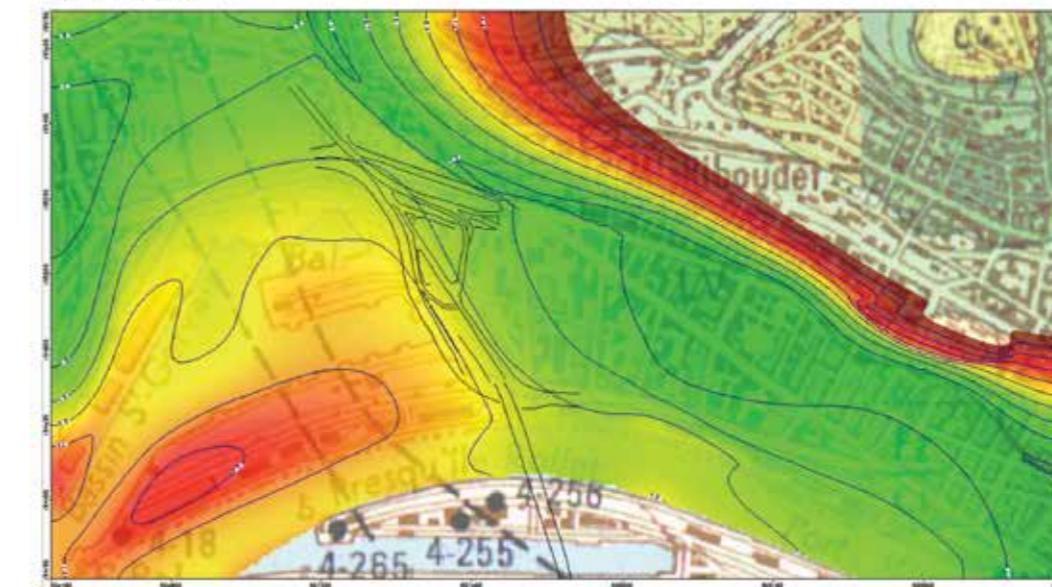
Figure 51 : Piézométries calculées 5 heures après la marée haute

Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

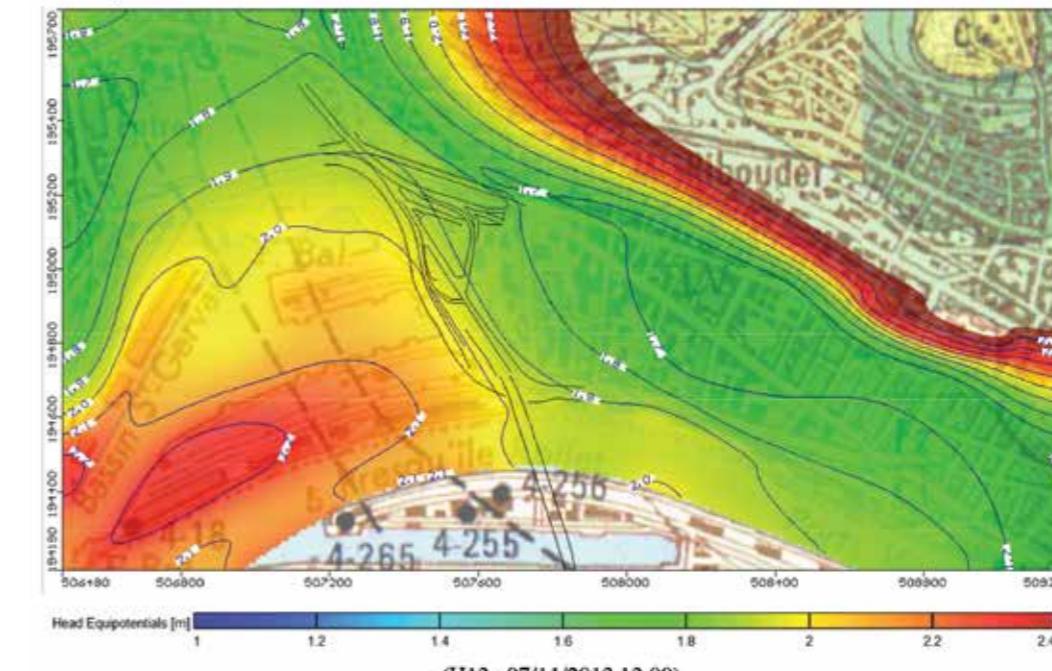


Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

état de référence



état impacté



Head Equipotentials [m] 1 1.2 1.4 1.6 1.8 2 2.2 2.4

(H13 : 07/11/2013 13:00)

Figure 52 : Piézométries calculées 1 heure avant la marée basse

Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

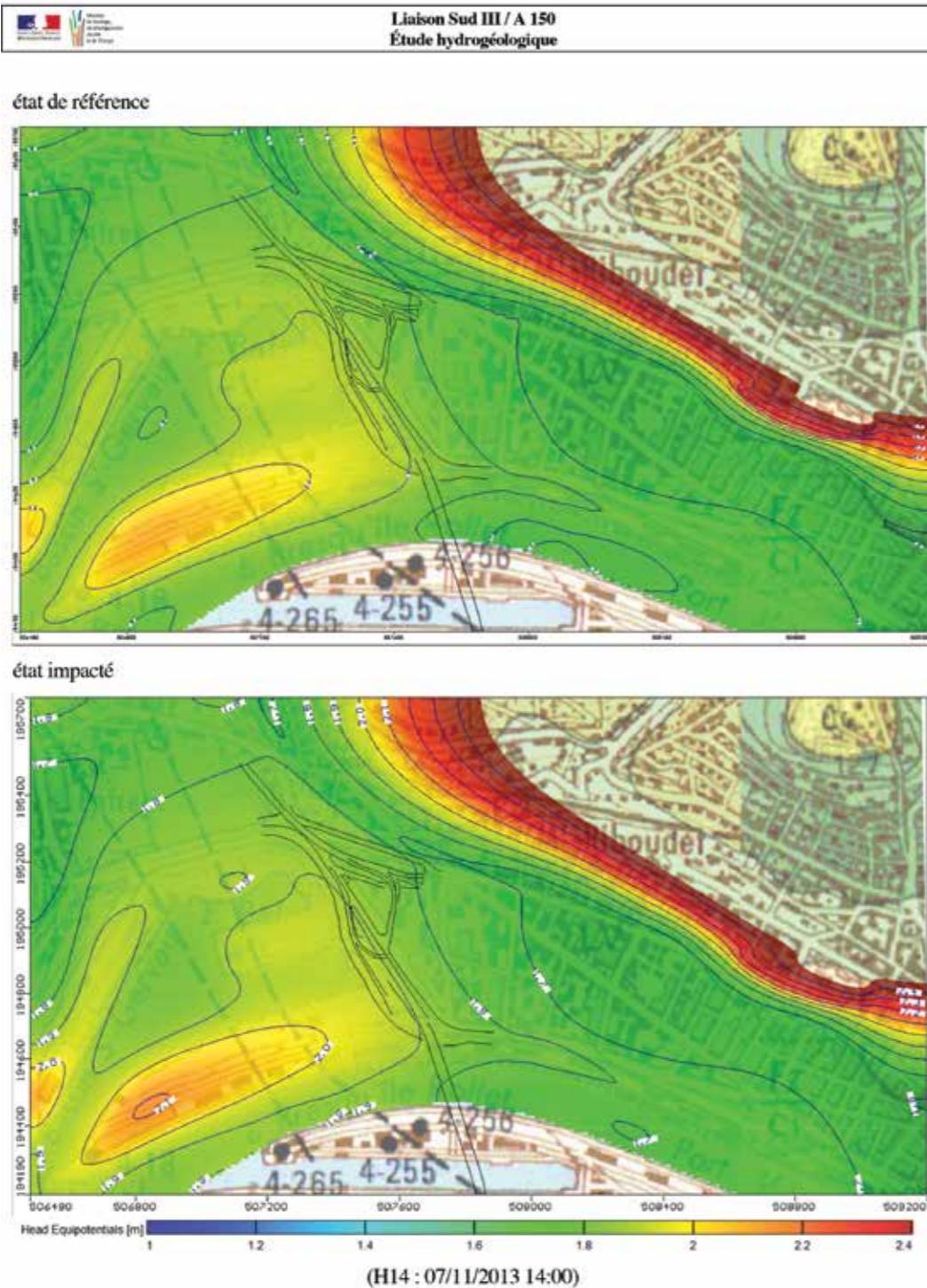


Figure 53 : Piézométries calculées à marée basse

Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

5.1 CALAGE – ÉTAT DE RÉFÉRENCE

Sur les bases hydrodynamiques décrites précédemment, les deux esquisses piézométriques calculées pour une Seine à marée haute (cote Seine 4.0 m) et une Seine à marée basse (cote Seine +2.6 m) sont proches de celle dressée par CGG en 1998 et de celle de l'Atlas hydrogéologique de 1990 (cf. Figure 56). L'écart entre ces deux esquisses piézométriques semble lié aux pompages en zone industrielle, et à la période hydrologique.

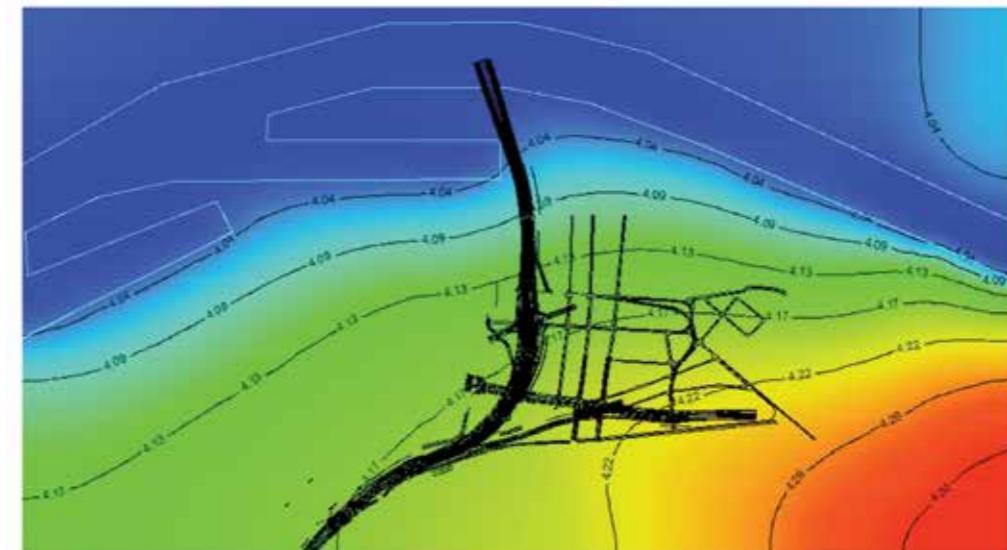


Figure 54 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive gauche modélisée (marée haute)

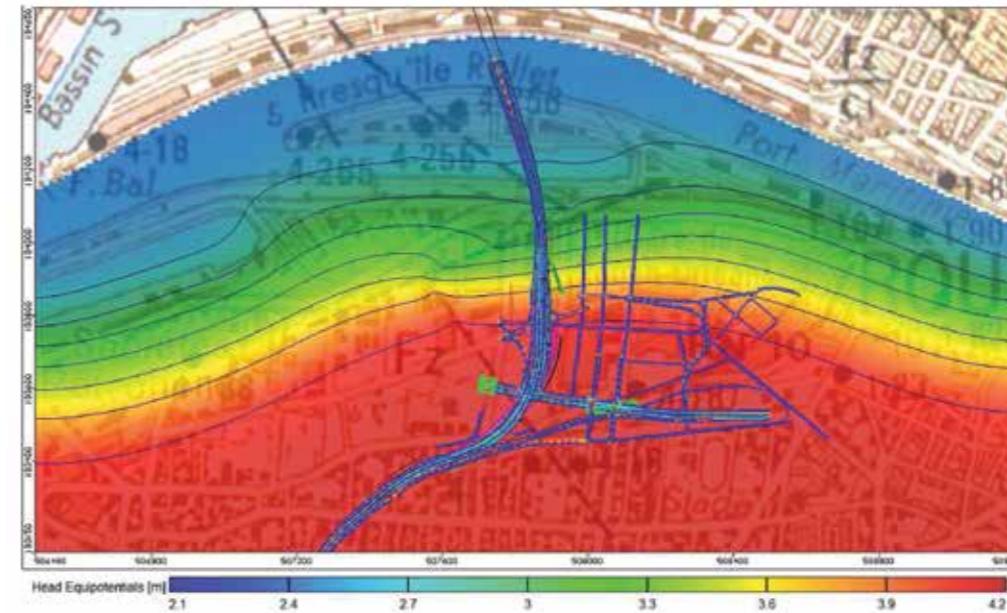


Figure 55 : Piézométrie calculée en régime permanent sur la rive gauche modélisée (marée basse)



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

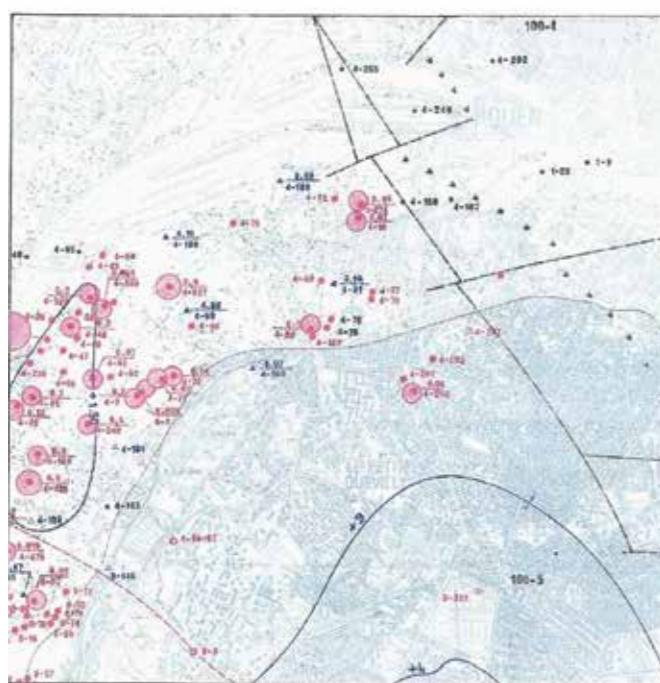
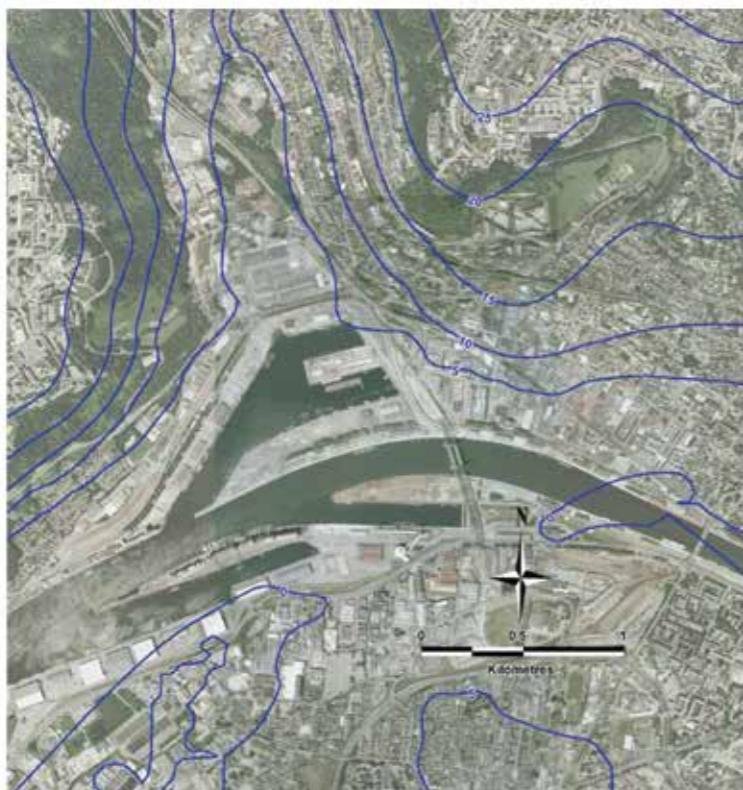


Figure 56 : Esquisses piézométriques bibliographiques de la nappe de la Craie à Rouen



Liaison Sud III / A 150
Étude hydrogéologique

5.2 ÉTATS IMPACTÉS

La variante aérienne du projet définitif de la rive gauche a été intégrée à la structure du modèle en situation actuelle. Ce projet relie les viaducs d'accès du pont Flaubert à la voie rapide Sud III, en s'y rattachant au niveau de l'échangeur de Stalingrad. Il sera composé de 2 ouvrages d'art et de remblais de forte hauteur. Un premier d'environ 160 m enjambant la future place de Madagascar (entre les rues Malétra et Bourbaki) et un second passant au-dessus de la voie SNCF.

Nord

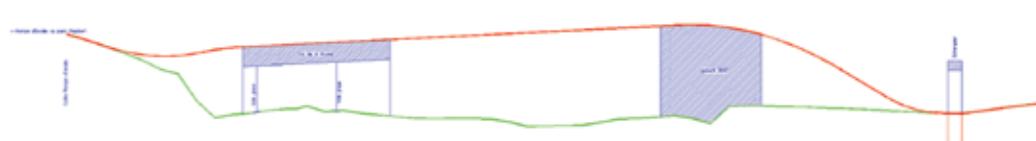


Figure 57 : Plan du projet de raccordement : variante aérienne

La variante en tranchée ouverte ou semi-enterrée est caractérisée par un tracé en déblais et un passage sous les voies SNCF longeant Sud III

Nord



Figure 58 : Plan du projet de raccordement : variante souterraine

La modélisation de l'état impacté a été réalisée en affectant aux terrains situés à la verticale de l'ouvrage une perméabilité réduite résultant de la charge de compaction, voire nulle pour traduire l'effet de barrage hydraulique pour l'ouvrage souterrain.

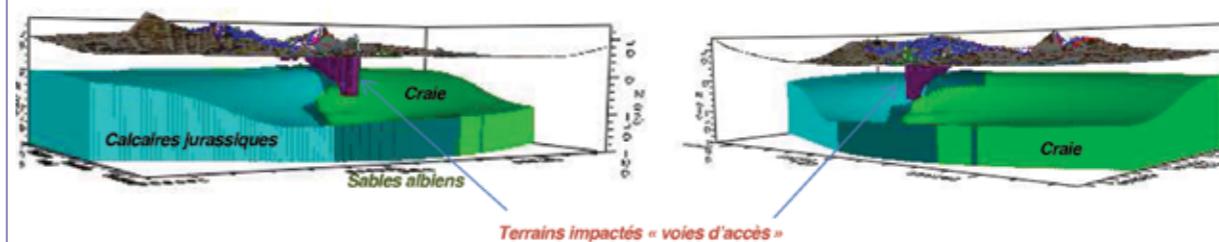
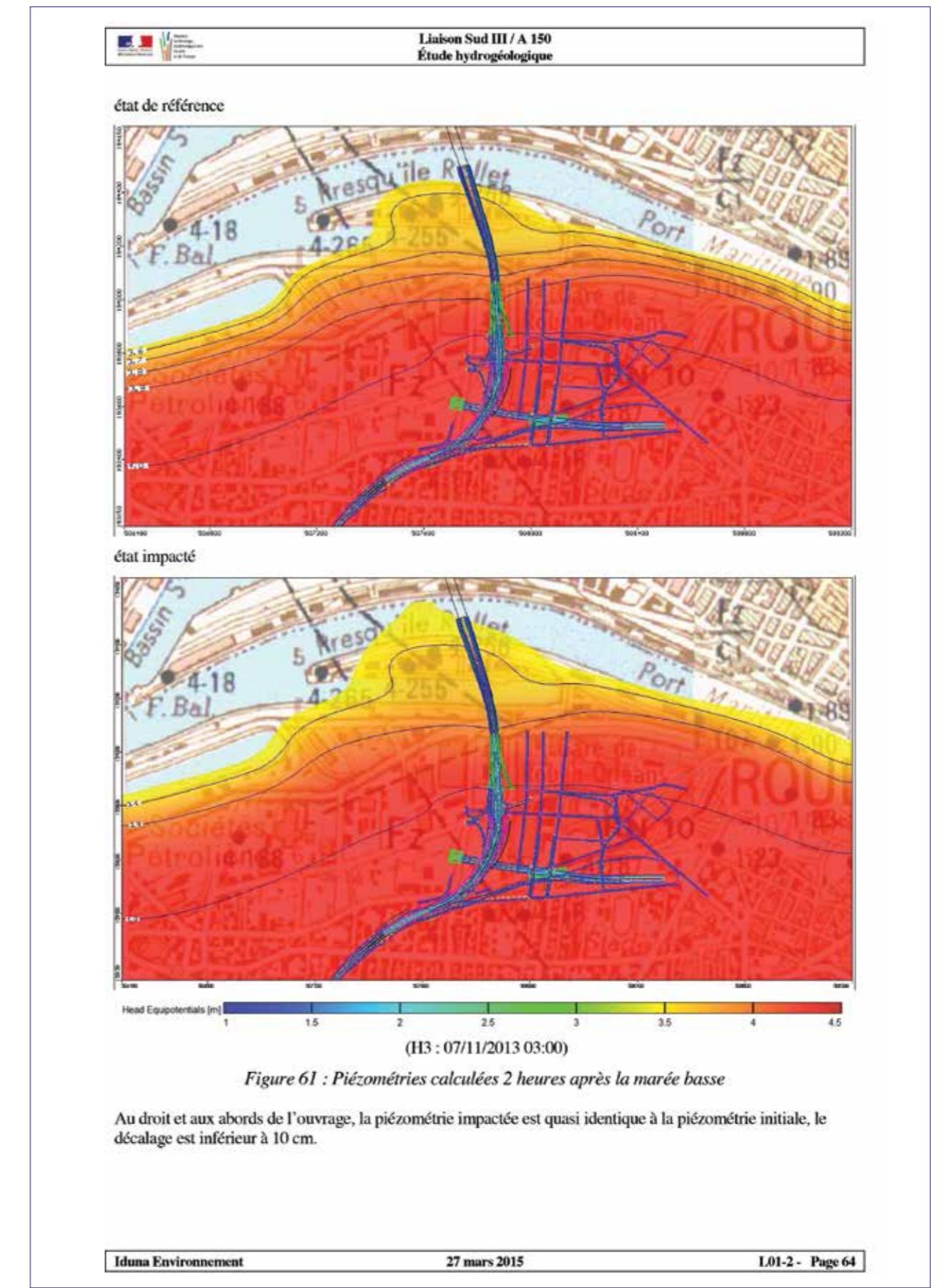
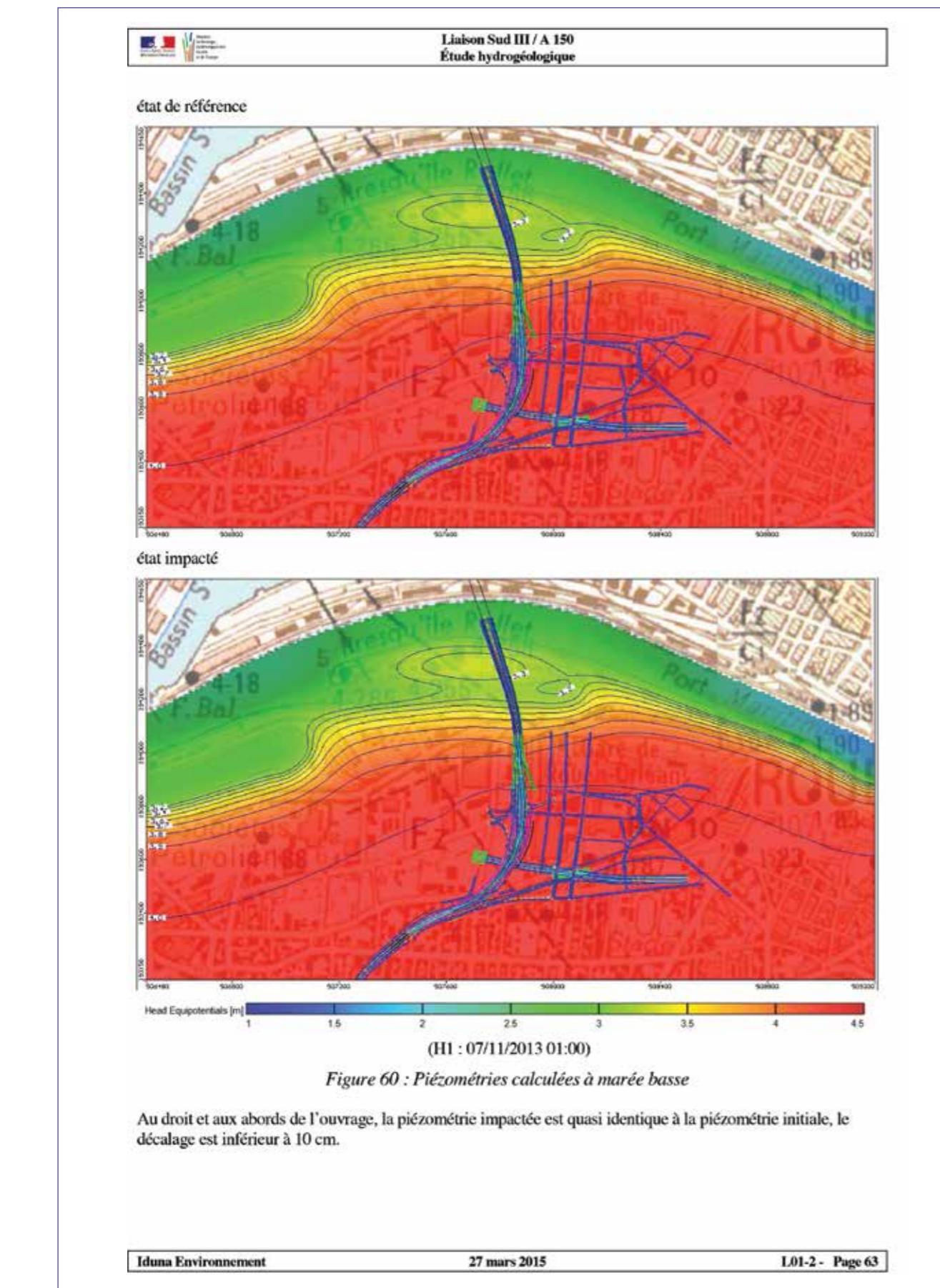
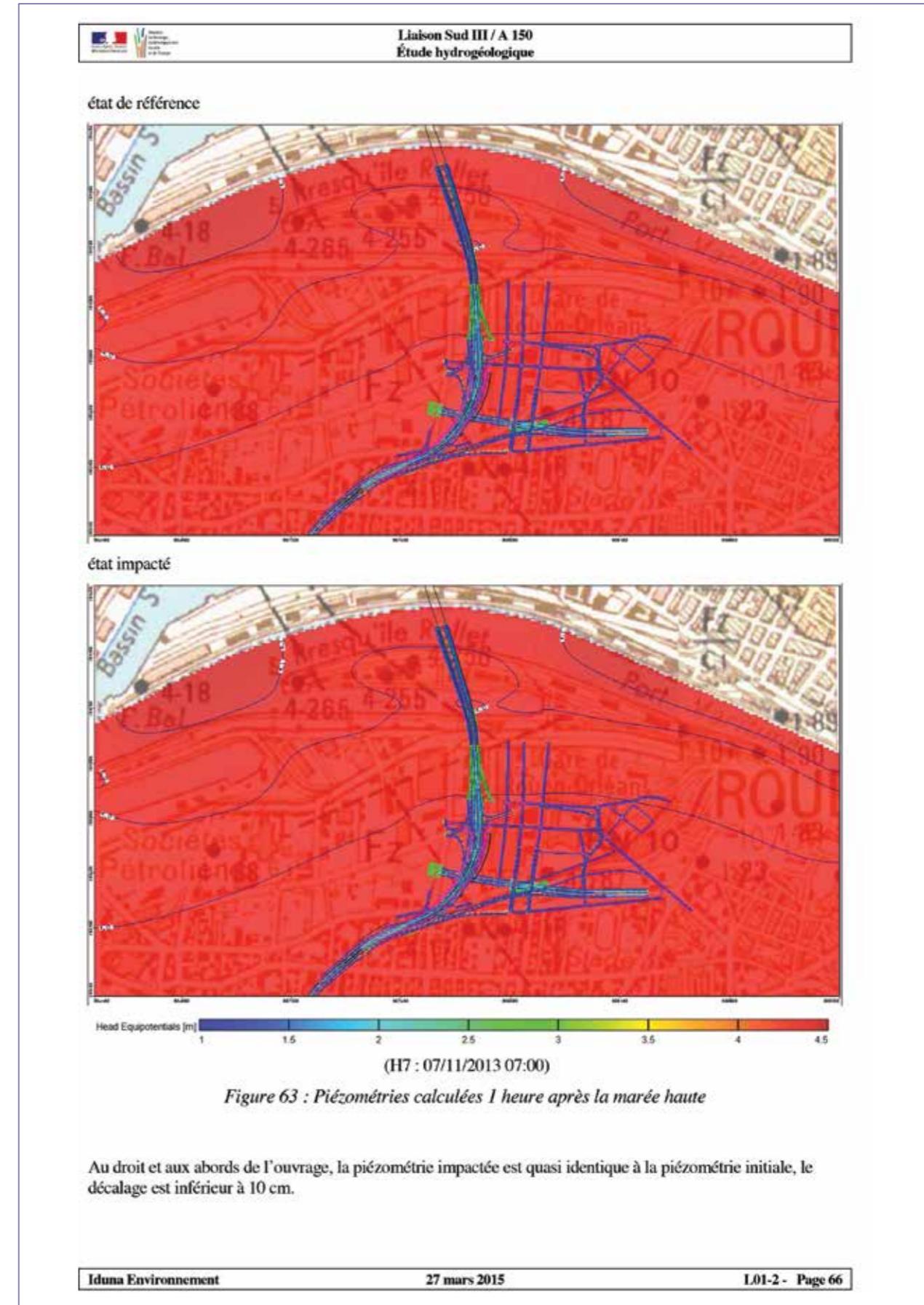
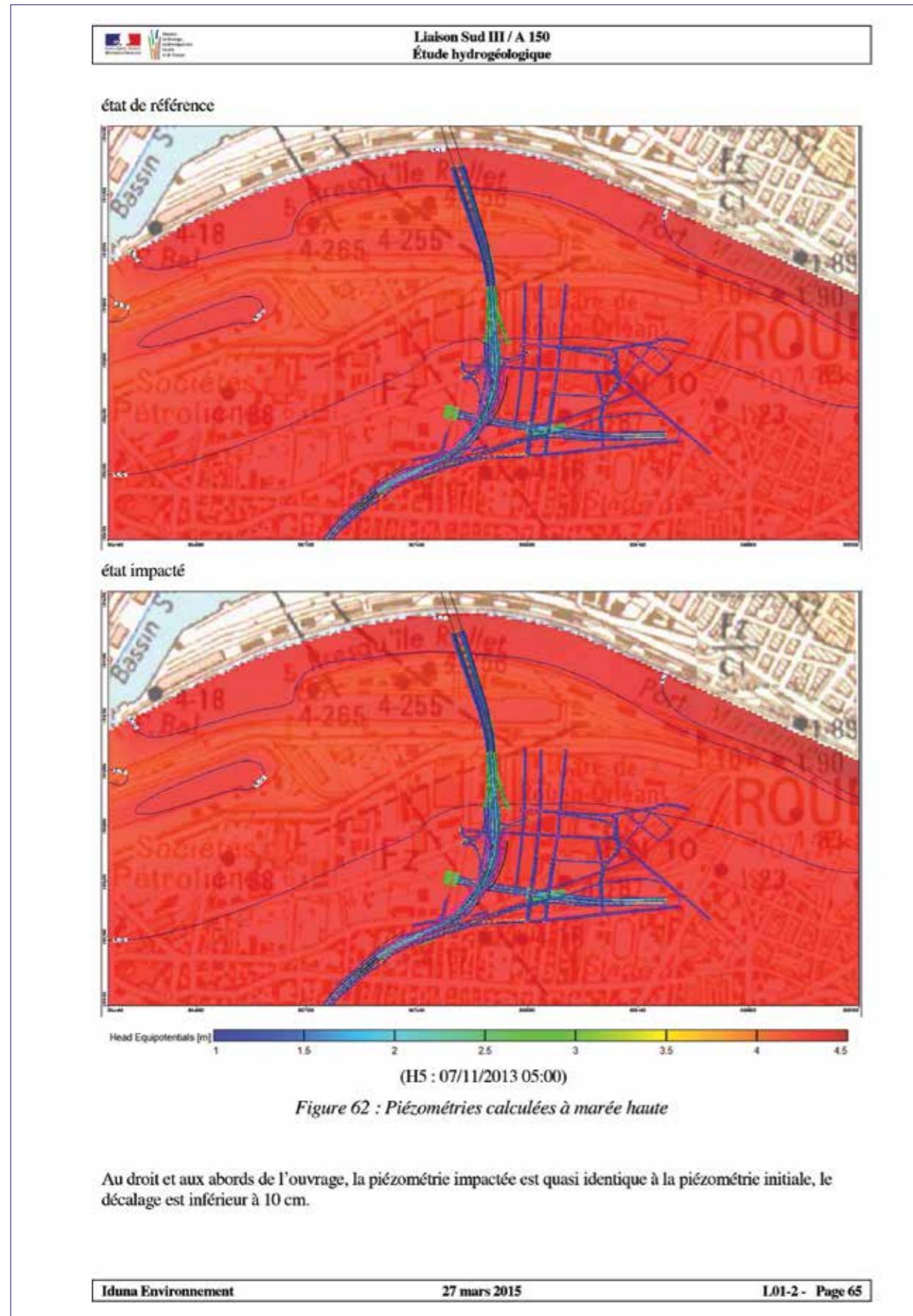


Figure 59 : Rive gauche : Vues du modèle intégrant la charge de la voie d'accès nord

Les calculs ont été réalisés sur plusieurs périodes de trois ondes de marées. Les résultats présentés ci-après correspondent à l'onde de marée du 7 novembre 2014 (cf. Figure 45).

La piézométrie impactée dans le cas le plus défavorable représenté par la variante souterraine, est quasi identique à la piézométrie initiale aux abords des ouvrages : le décalage est inférieur à 10 cm.





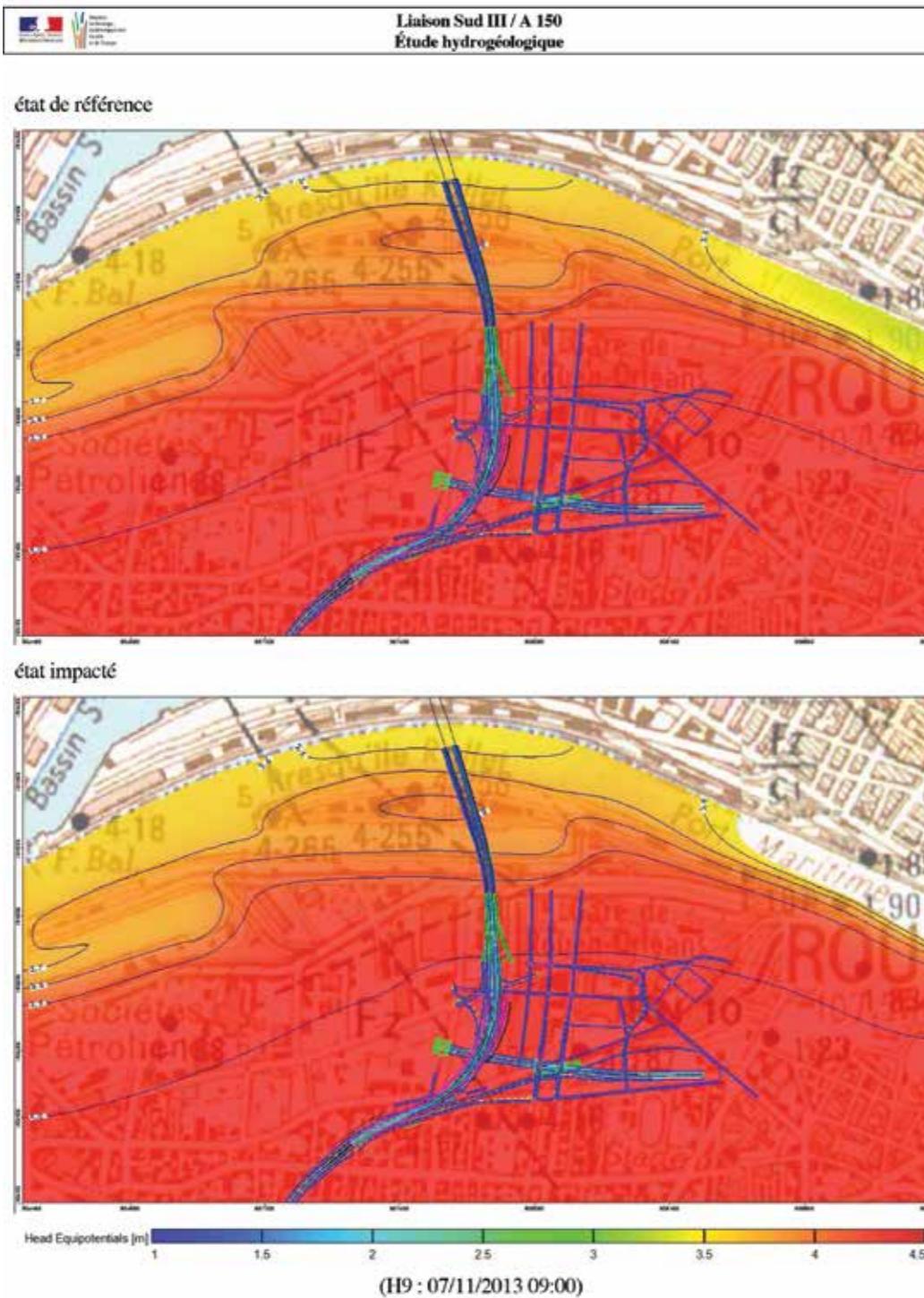


Figure 64 : Piézométries calculées 3 heures après la marée haute

Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.

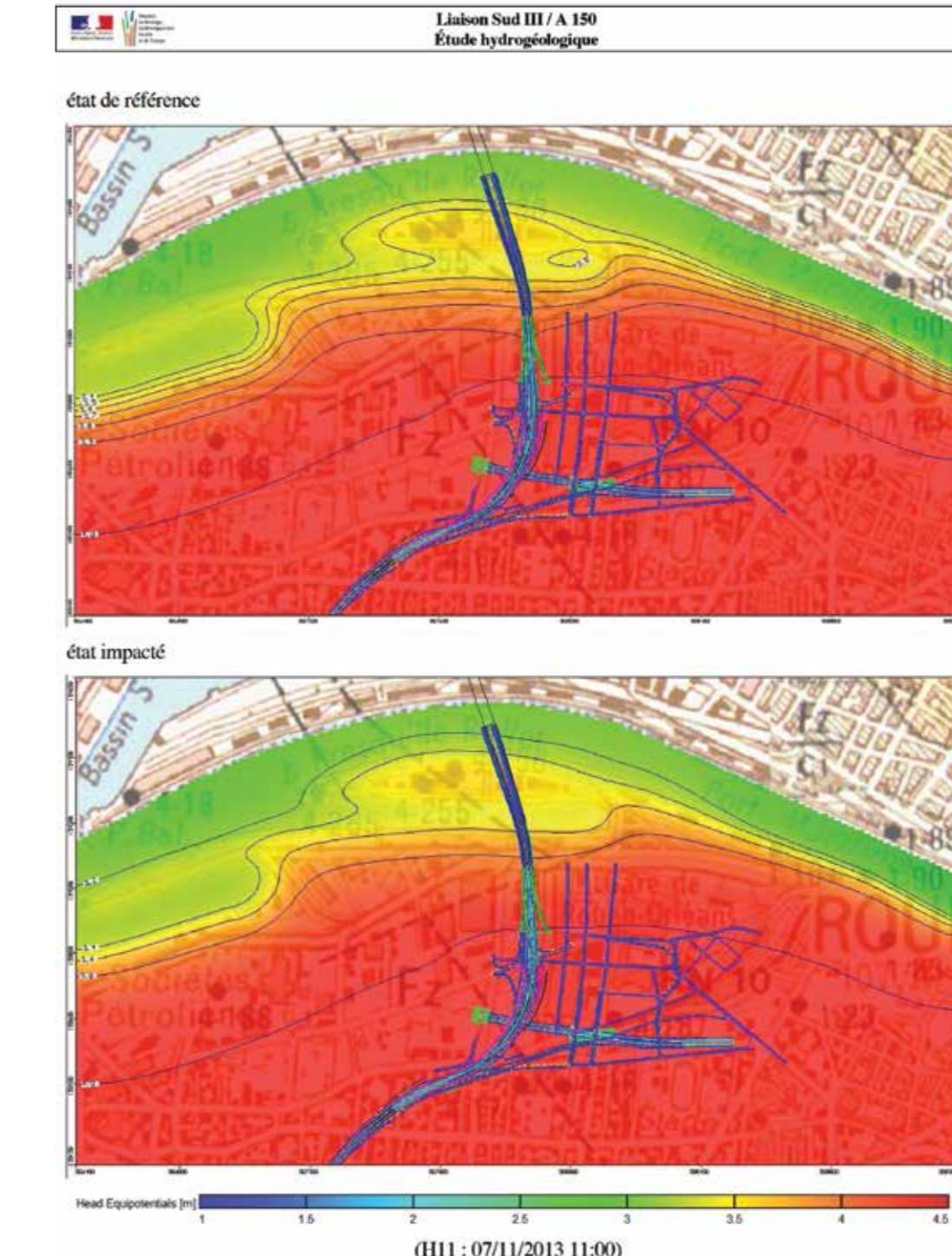
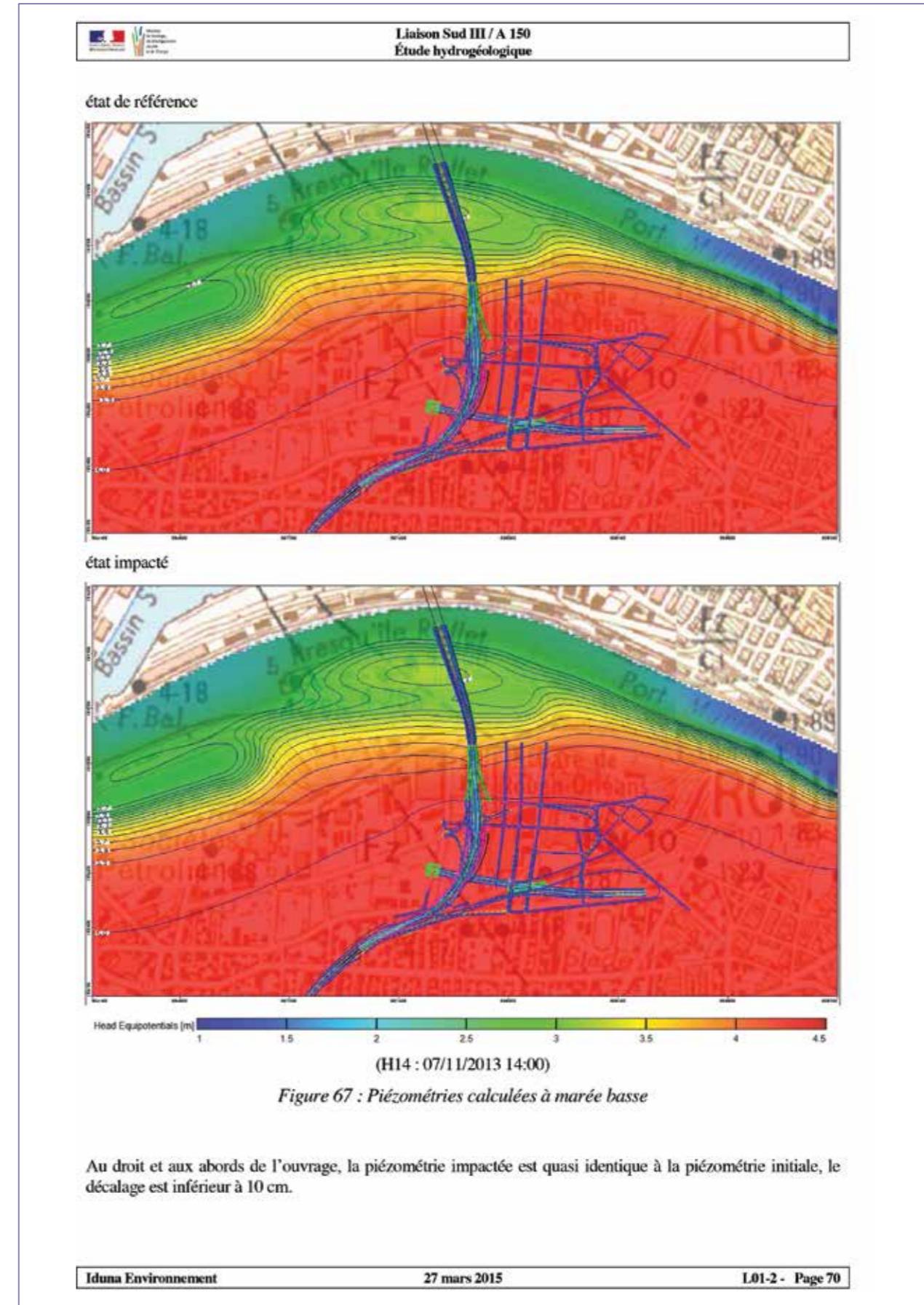
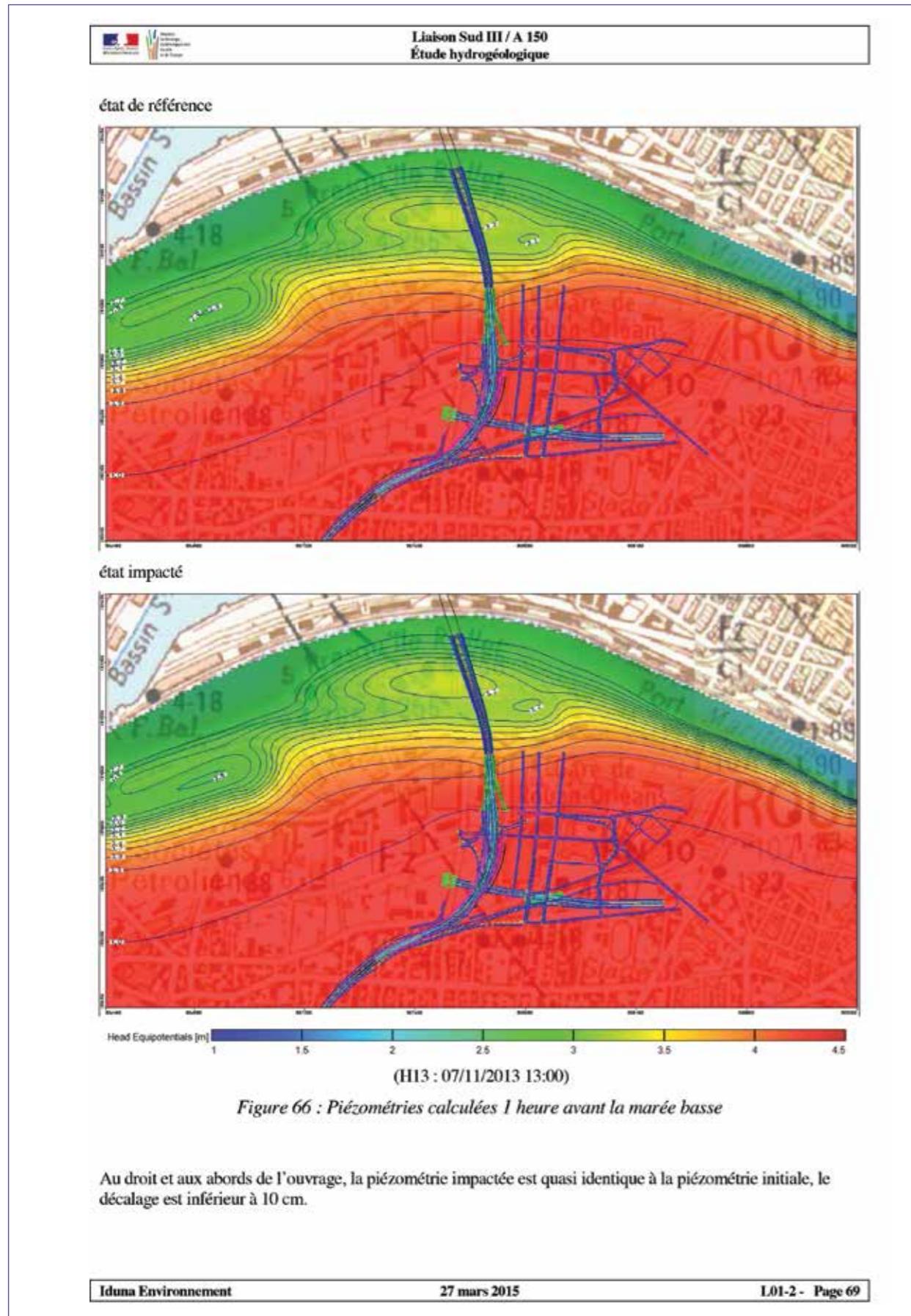


Figure 65 : Piézométries calculées 5 heures après la marée haute

Au droit et aux abords de l'ouvrage, la piézométrie impactée est quasi identique à la piézométrie initiale, le décalage est inférieur à 10 cm.





6 CONCLUSIONS

Les impacts hydrogéologiques des voies d'accès au Pont Flaubert ont été évalués en réalisant des modèles hydrogéologiques pour chacune des rives.

Chacun de ces deux modèles s'étend sur une superficie de 4.08 km², sur 2720 m d'est en ouest et 1500 m du nord au sud, centrés sur les voies d'accès étudiées. Les mailles de ces modèles ont pu être réduites à des cellules de 10 x 10m.

Les données géologiques ont été intégrées à partir des cartes géologiques et des descriptions de près de 500 de forages disponibles sur ces secteurs. Les piézométries ont été modélisées à partir des esquisses piézométriques de 1990 (BRGM) et de 1998 (CGG), ainsi que des mesures réalisées en continu pendant deux mois, de septembre à novembre 2013.

Les modèles ont été calés en régime permanent. Les impacts des ouvrages ont été évalués par modélisation en régime transitoire, permettant d'intégrer les amplitudes métriques horaires des ondes de marée de la Seine.

Ces modèles hydrogéologiques montrent que tant en rive droite qu'en rive gauche du Pont Flaubert, les projets de voies d'accès n'engendrent pas de modifications de la piézométrie supérieures à 10 centimètres.

