

MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS EN MILIEU URBAIN : IMPACT DE LA CRÉATION D'UN PASSAGE SOUS LES VOIES FERRÉES A BONNEUIL-SUR-MARNE

MODELING OF UNDERGROUND FLOWS IN URBAN AREA : IMPACT OF THE PASSAGE UNDER THE RAILWAYS IN BONNEUIL-SUR-MARNE

Rémi SOAVE¹, Hugues GIROUX¹, Philippe GUEZENNEC¹

¹ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Fontenay-sous-Bois, FRANCE

RÉSUMÉ – Le projet d'amélioration de la desserte du port de Bonneuil-sur-Marne prévoit la réalisation d'un passage souterrain pour franchir les voies ferrées et de trémies nord et sud. Le Cerema a réalisé une modélisation géologique et hydrogéologique des écoulements souterrains pour caractériser l'impact des ouvrages sur la nappe alluviale. L'étude de sensibilité des paramètres du modèle a permis de valider sa cohérence. L'effet barrage modélisé de ± 20 cm est faible.

ABSTRACT – The Bonneuil-sur-Marne Harbor service improvement project involves the construction of an underground passage to cross the railways and north and south hoppers. The Cerema has carried out geological and hydrogeological modeling of underground flows to characterize the tunnel impact on alluvial aquifer. The sensitivity study of the model parameters validated it. The modeled barrier effect of ± 20 cm is low.

1. Introduction

D'après l'ONU, deux personnes sur trois habiteront dans les grands centres urbains mondiaux d'ici 2050, soit l'équivalent d'environ 2,5 milliards de personnes supplémentaires par rapport à la population urbaine de 2018. Les pays confrontés à ce double enjeu de croissance et changements démographiques doivent répondre aux besoins de leurs populations grandissantes, notamment en matière de mobilités. En France, à l'heure où la métropole francilienne concentre plus de 12 millions d'habitants au dernier recensement INSEE (01/01/2015), l'État et les collectivités territoriales doivent relever le défi de l'augmentation des déplacements quotidiens et du trafic routier dans un contexte de limitation de l'espace disponible en surface. Les nouveaux projets d'aménagements passent donc souvent par la construction d'ouvrages souterrains profonds, qu'il s'agisse de parkings, gares ou tunnels pour les infrastructures de transports (métro, RER, routes). En Île-de-France, ces projets impactent souvent les nappes phréatiques, et notamment les nappes alluviales. Ainsi, il est nécessaire d'étudier le fonctionnement hydrogéologique des sols afin d'évaluer les interactions entre la nature des terrains, l'eau souterraine et les caractéristiques du projet. Il s'agit d'une part de limiter ou compenser les impacts du projet sur les écoulements souterrains et d'autre part, de protéger la future infrastructure vis-à-vis des circulations d'eau souterraine. L'opération de prolongement de la RN406 au port de Bonneuil-sur-Marne (94) rentre typiquement dans ce cadre. Le franchissement souterrain des voies ferrées sud de la Grande Ceinture a été modélisé par le Cerema à la demande de la Direction des Routes d'Île-de-France, afin de tester l'effet barrage du projet vis-à-vis des écoulements souterrains et le cas échéant, de dimensionner des solutions correctrices de transparence hydraulique.

2. Site du projet

L'amélioration de la desserte du Port de Bonneuil, deuxième plate-forme multimodale d'Île-de-France, en créant une nouvelle voie bidirectionnelle à 2 X 1 voie, vise à prolonger la RN406 existante sur environ 2 km, depuis l'échangeur avec la RN19 (sud) jusqu'au réseau de voiries interne au port (nord).

Le projet doit être implanté dans la plaine alluviale, proche de la confluence entre la Marne et la Seine (Fig.1). Le gradient d'écoulement de la nappe alluviale est orienté sud-est – nord-ouest.

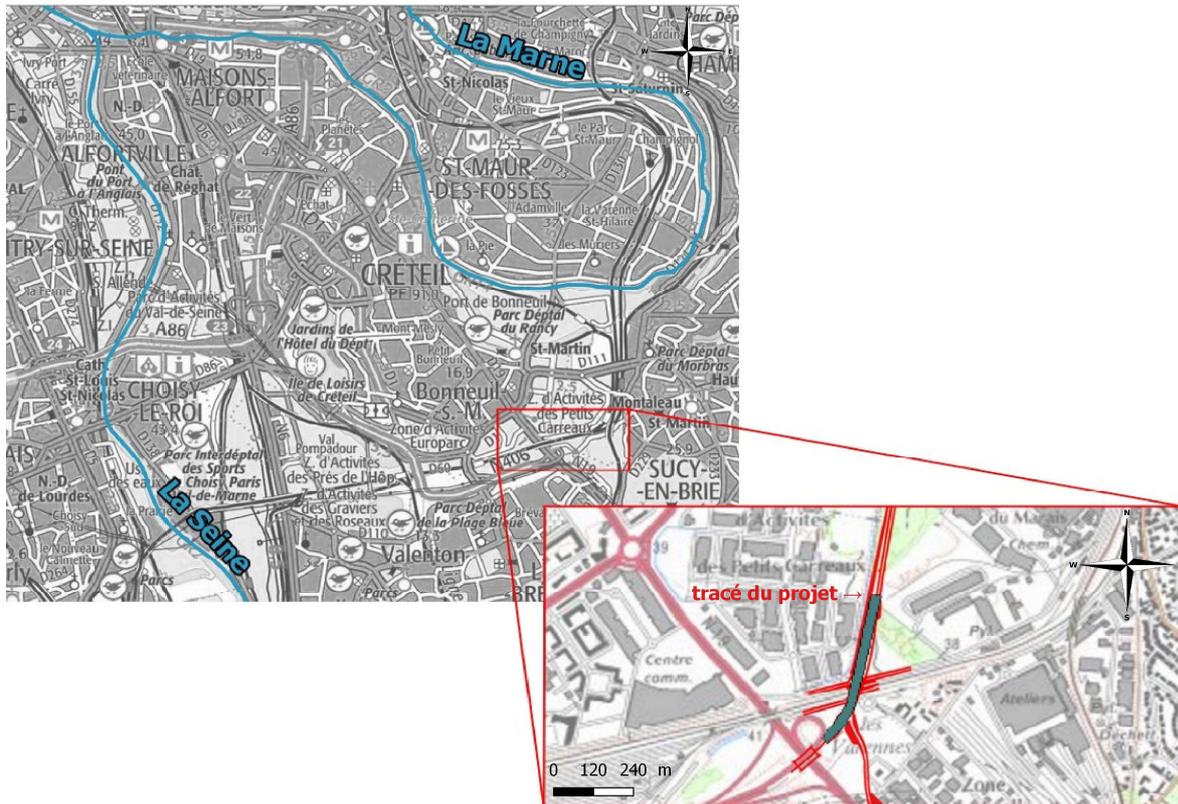


Figure 1. Localisation du site du projet.

Le projet prévoit la réalisation d'un ouvrage d'art enterré, sous les voies ferrées, d'environ 50 mL, d'une trémie nord de 250 mL et d'une trémie sud de 100 mL.

3. Contexte géologique et hydrogéologique

Le corridor alluvial entre la Marne et la Seine dans lequel s'inscrit le projet a été fortement mobilisé par des exploitations de sables et de graviers dans les alluvions anciennes, présentes sur des épaisseurs pouvant atteindre 6-7 m. Les zones déblayées ont ensuite été comblées par des matériaux substitués très divers et de mauvaises qualités physico-chimique et géotechnique (limons pollués, mâchefer, blocs de béton,...). Les deux principaux aquifères impactés par le projet sont :

- La nappe alluviale superficielle, en connexion hydraulique avec la Marne.
- La nappe semi-profonde du marno-calcaire de Saint-Ouen inférieur, en charge sous les alluvions.

4. Création du modèle géologique

Le modèle se compose de 6 couches superposées représentant la stratigraphie identifiée au droit de la zone d'étude : les remblais, les alluvions modernes, les alluvions anciennes, le saint-ouen supérieur marneux, le saint-ouen inférieur calcaire et les sables de beauchamp. Le logiciel GDM standard (© BRGM), a été utilisé pour interpoler les données de sondages relatives à chaque horizon géologique. Chaque analyse géostatistique aboutit à la création d'un variogramme qui est ensuite ajusté en utilisant la méthode d'interpolation avec le variogramme linéaire. Elle est la plus optimale puisqu'elle réduit au maximum les erreurs entre les données issues des coupes de sondages et les données simulées. La figure 2 ci-après représente la répartition spatiale du toit des alluvions anciennes, modélisées à partir des données de 381 sondages.

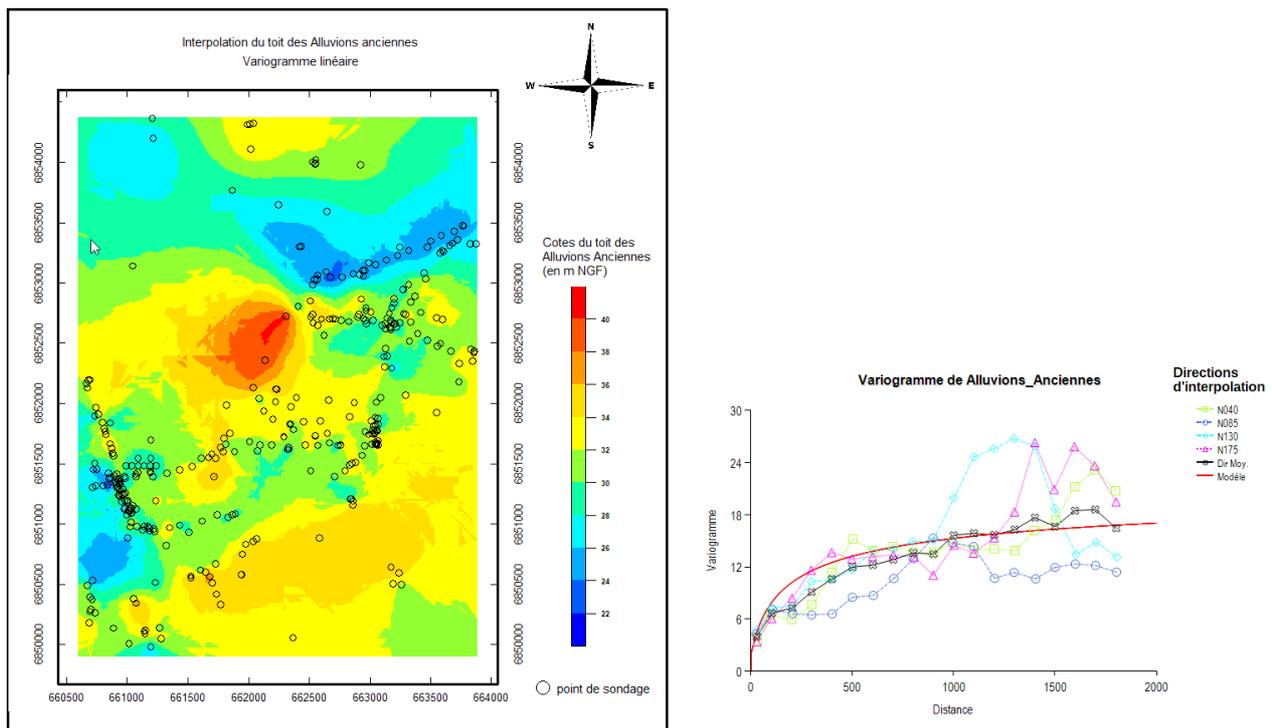


Figure 2. Modèle géologique du toit interpolé des Alluvions Anciennes.

5. Domaine d'étude

La zone d'étude couvre une superficie de près de 17,3 km² centrée sur le projet. Elle se caractérise par des limites naturelles (la butte du Mont-Mesly au nord-ouest, le plateau de Boissy-Saint-Léger au sud-est), structurales (la darse sud du Port de Bonneuil-sur-Marne au nord), géologiques et hydrogéologiques.

Entre 2011 et 2019, plusieurs campagnes discontinues de reconnaissances hydrogéologiques ont permis de constituer un réseau final de 58 piézomètres actifs. Les écoulements souterrains sont particulièrement complexes entre la Marne, la Seine et le Mont-Mesly.

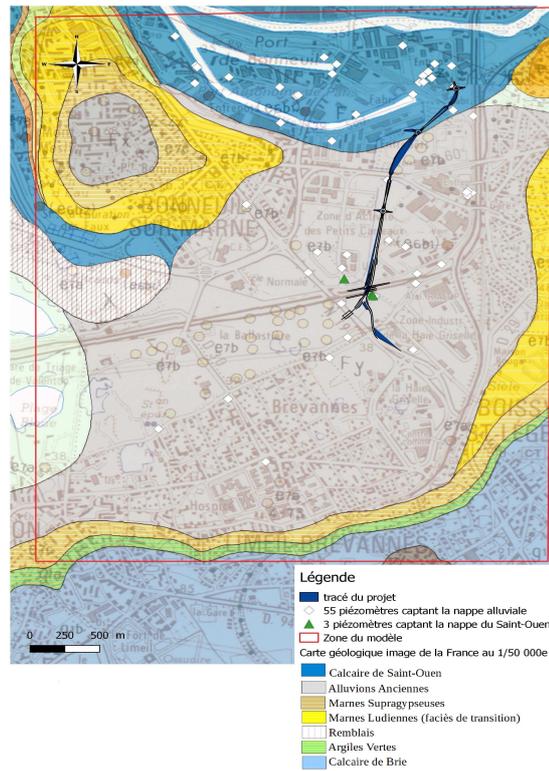


Figure 3. Zone d'étude modélisée et le réseau de piézomètres suivis.

6. Maillage de la zone d'étude

Les simulations sont réalisées en régime permanent à l'aide de la version 2009.1 Pro du logiciel MODFLOW. Cette méthode de modélisation par différences finies offre la possibilité de discrétiser localement le domaine d'étude autour des objets à géométrie complexe tout en limitant le nombre de mailles du modèle et ainsi le temps de calcul. Elle permet l'intégration des ouvrages profonds, dont les dimensions sont de l'ordre du mètre, dans la zone d'étude dont les dimensions sont de l'ordre du kilomètre. Elle est également bien adaptée à l'étude des écoulements souterrains puisqu'elle permet une discrétisation tridimensionnelle de l'espace à base de cellule parallélépipédiques (ou mailles) réparties en couches, lignes et colonnes (Fig. 4).

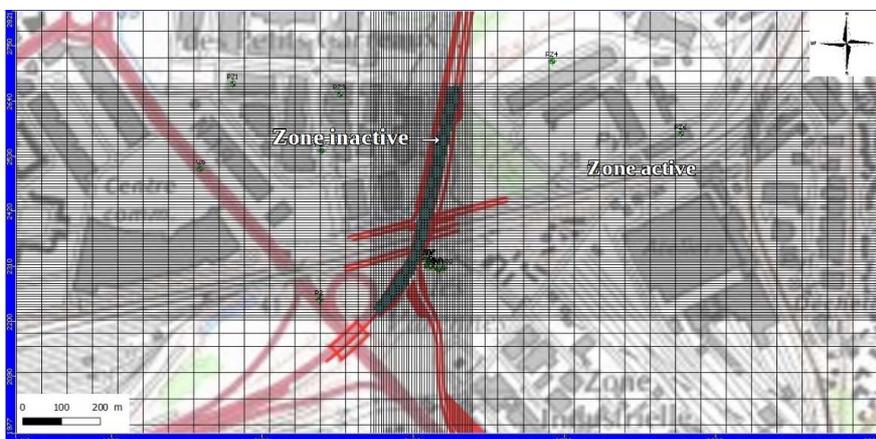


Figure 4. Maillage resserré du modèle sur la zone du projet.

La zone d'étude a été divisée en mailles de 50 m x 50 m pour les plus grandes et 5 m x 5 m pour les plus petites. Ce resserrage plus fin du maillage a été effectué au droit de la zone de franchissement des voies SNCF sud. Le modèle contient 19 376 mailles pour chacune des six couches géologiques (112 colonnes et 173 lignes par couche).

En plan, le modèle est subdivisé en deux grandes zones : une zone dite «active» correspondant à l'aquifère alluvionnaire et une zone dite «inactive» correspondant à une zone imposée à flux nul pour simuler le projet (voir figure 4).

7. Calage de l'état initial

Un relevé piézométrique synchrone a été réalisé par le Cerema le 03 avril 2019 en période de hautes eaux, sur 54 piézomètres actifs recensés. Il a permis de caler l'état initial du système d'étude afin de reproduire les conditions hydrogéologiques avant travaux.

Chaque couche géologique s'est vu affecter des paramètres hydrodynamiques propres : perméabilités horizontales (K_h) et verticales (K_v), coefficient d'emmagasinement (S) (tableau 1). Ils ont été obtenus par la mise en œuvre de deux essais de pompage longue durée (Althéa ingénierie., 2018 et Bidault et al., 1990) et d'essais de perméabilité (Althéa ingénierie., 2018, Belotti et al., 2017 et Dumora et al., 2011).

Tableau 1. Paramètres hydrodynamiques des couches géologiques

Terrain	K_h (m/s)	K_v (m/s)	S (%)
remblais	1,0E-04	1,0E-04	0,05
alluvions modernes	8,0E-04	8,0E-04	0,01
alluvions anciennes	6,7E-04	6,7E-04	0,01
Saint-Ouen > marneux	1,0E-05	1,0E-06	0,005
Saint-Ouen < calcaire	6,3E-04	6,3E-04	0,005

Les alluvions modernes et anciennes sablo-graveleuses ont été exploitées dans de nombreuses zones de la plaine de Créteil, si bien que les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère alluvionnaire ont pu être localement modifiées. Le remblaiement des gravières / sablières par des matériaux substitués aux alluvions modernes expliquerait leur perméabilité plus élevée effectivement identifiée lors d'essais d'eau. Il se peut également que les alluvions anciennes aient été exploitées et remplacées par des matériaux moins perméables. Ce contexte particulier tend à expliquer le faible écart de perméabilités constaté entre les alluvions modernes et anciennes dans la zone des voies ferrées de la Grande Ceinture.

Dans notre modèle, les charges hydrauliques le long de la Marne (darse sud étanche vis-à-vis de la nappe alluviale), du plateau de Boissy-Saint-Léger et autour de la butte du Mont-Mesly sont imposées comme potentiels constants. Les bords nord-est, nord-ouest, ouest et sud-ouest de l'aquifère sont affectés de gradients d'écoulement. Les niveaux d'eau imposés varient spatialement selon un gradient linéaire afin d'assurer la continuité entre les trois charges hydrauliques.

La figure 5 représente la comparaison entre piézométries mesurée et observée. Les niveaux piézométriques sont correctement reproduits puisque le coefficient de corrélation est de 0,89 et l'erreur moyenne résiduelle est de 14 cm. Le calage du modèle est satisfaisant au regard des écarts obtenus.

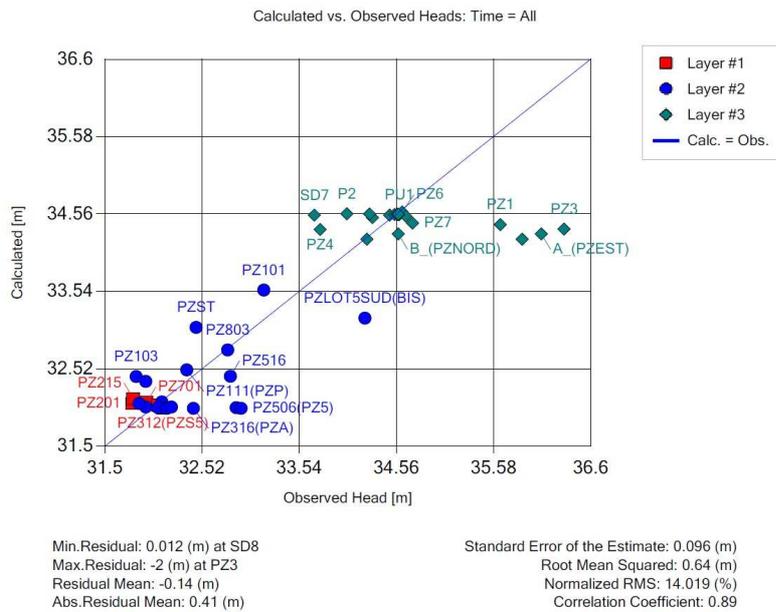


Figure 5. Résultat du calage de la piézométrie calculées sur la piézométrie observée.

8. Intégration du projet

Les trémies ont été modélisées en créant un mur amont et aval faisant obstacles aux écoulements. Ce mur implémenté dans le modèle couvre l'ensemble des six couches, jusqu'au mur du calcaire de saint-ouen modélisé. Les mailles situées entre les deux parois ont été désactivées en leur imposant un flux nul (voir figure 4).

9. Effet barrage

Un effet barrage est généré par la présence d'un obstacle aux écoulements souterrains. Les deux paramètres caractéristiques de l'effet barrage sont l'amplitude, qui représente l'écart à la piézométrie initiale, et la portée, qui correspond à la distance de l'isovaleur d'impact par rapport à l'obstacle, dans un plan horizontal. L'importance du rabattement des isopièzes de la nappe alluviale rencontrant l'obstacle est fonction :

- Du contexte géologique de type multi-couches stratiformes et des variations de perméabilités.
- De la longueur de coupure L du projet qui est fonction de la géométrie des ouvrages : environ 400 m de long, 30 m de large et une hauteur de coupure maximale de 20m. Le rapport de forme L/l est de 13. D'après Demongodin et al., il est caractéristique des ouvrages de type trémies et tranchées.
- De l'angle d'incidence α du projet avec la direction d'écoulement. La carte piézométrique du relevé synchrone réalisé en hautes eaux indique que les ouvrages font un angle moyen d'environ 20° avec les isopièzes de la nappe alluviale.
- Du gradient hydraulique, qui est de l'ordre de 2-3 ‰.
- Du niveau moyen de la nappe alluviale qui est de 35 m NGF.

Des tests de sensibilité du modèle ont été réalisés en faisant varier ces paramètres (tableau 2).

Tableau 2. Résultats des tests de sensibilité du modèle.

	modèle du projet	modèle multi-couches simulant le projet							modèle simplifié à une couche		
		influence de k des Alluvions Modernes		influence de k des Alluvions Anciennes		influence de la charge hydraulique du Mt-Mesly : 35 m NGF	influence de la piézométrie : battement maximal de la nappe généralisé de + 1,5 m	influence de la piézométrie + crue de la Marne	influence du gradient	influence de l'angle d'incidence α	influence de l'angle α et de la longueur L
Longueur du projet L (m)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	2000
Angle d'incidence α (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	90	90
Perméabilités k (m/s)	8E-04	8E-06	1E-02	8E-06	1E-02	8E-04	8E-04	8E-04	8E-04	8E-04	8E-04
Gradient hydraulique	2 ‰	2 ‰	2 ‰	2 ‰	2 ‰	2 ‰	2 ‰	2 ‰	3 ‰	2 ‰	2 ‰
Variation maximale du niveau d'eau amont	+ 7 cm	+ 6 cm	+ 7 cm	+ 7 mm	+ 8 cm	+ 10 cm	+ 40 cm	+ 20 cm	+ 8 cm	+ 34 cm	+ 1,45 m
Variation maximale du niveau d'eau aval	- 6 cm	- 2 cm	- 6 cm	- 5 mm	- 9 cm	- 10 cm	- 11 cm	- 6 cm	- 8 cm	- 34 cm	- 1,30 m

Ces tests confirment la fiabilité du modèle et indiquent notamment que :

- Les paramètres perméabilité et gradient hydraulique ont un impact faible sur la portée de l'effet barrage, tout du moins dans les gammes de valeurs testées.
- Un fort battement positif de la nappe alluviale a un impact important, notamment à l'amont des ouvrages.
- La portée de l'effet barrage est d'autant plus importante que la longueur de coupure est grande et les ouvrages perpendiculaires aux écoulements souterrains.

La figure 6 ci-après représente l'effet barrage provoqué par le projet modélisé.

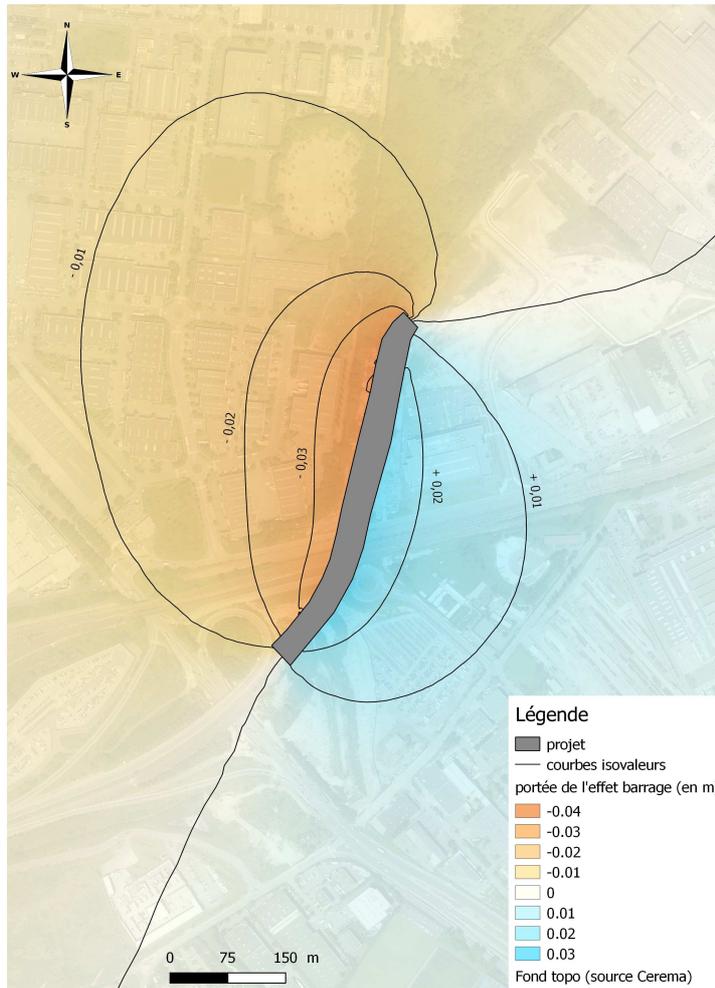


Figure 6. Modélisation de l'effet barrage du projet sur la nappe alluviale.

D'après notre modèle, l'impact maximal de + 0,07 m d'élévation du niveau d'eau à l'amont et de - 0,06 m d'abaissement du niveau d'eau à l'aval se localise au contact des murs des enceintes. L'isovaleur + 0,01 m est située à environ 210 m à l'amont des ouvrages et l'isovaleur - 0,01 m est située à environ 375 m à l'aval des ouvrages.

En tenant compte de l'erreur résiduelle moyenne du calage de l'état piézométrique initial (voir figure 6), l'effet barrage modélisé est de ± 20 cm.

10. Conclusion

L'effet barrage modélisé est faible et acceptable. Ce résultat repose en grande partie d'une part sur l'absence de contraste de perméabilités marqué entre les différents horizons géologiques traversés et d'autre part, sur la forte perméabilité des alluvions qui permet une réorganisation latérale des écoulements, limitant de fait l'effet barrage. En l'état actuel des connaissances, le projet apparaît orienté d'environ 20° par rapport au sens d'écoulement de la nappe alluviale. Une modification de cet angle d'incidence aurait un impact sur l'amplitude et la portée de l'effet barrage modélisé. Le calage de l'état initial du modèle joue un rôle important dans la quantification de l'effet barrage. La modélisation hydrogéologique est d'autant plus fiable que les écarts de mesures entre les piézométries observées et simulées sont faibles. La modélisation hydrogéologique aide les décideurs publics dans les choix à opérer pour une meilleure prise en compte des eaux souterraines dans leur projet.

11. Références bibliographiques

- Althéa ingénierie. (2018). RN406, projet de desserte du Port de Bonneuil-sur-Marne (94) : étude hydrogéologique, compte-rendu des essais de pompage et de perméabilité. Rapport d'étude n° AP17 2429_Ind.A d'Althéa.
- Belotti J., Melodramma V. (2017). Réalisation de sondages de reconnaissances : RN406, desserte du port de Bonneuil-sur-Marne (94) – compte-rendu d'investigations. Rapport d'étude n° C16-9482 de Semofi.
- Bidault J-P., Cailleux J-B., Gigan J-P. (1990). Voie de liaison entre la déviation de la RN406 et le CD60, tranchée sous les voies SNCF de grande ceinture, étude hydrogéologique, résultats de l'essai de pompage et application au projet. Rapport d'étude n° GEF 11 043 du LREP.
- Demongodin L., Floriat S. (2018). L'effet barrage : mythe ou réalité ?. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur.
- Dumora L., De la potterie L. (2011). Bonneuil-sur-Marne et Sucy-en-Brie (94), prolongement de la RN406, mission G12. Rapport d'étude n° IP.10.0323, pièce n° 002, PRO, Ind.A de Fondasol.