



Assistance Publique
Hôpitaux de Paris

ASSISTANCE
PUBLIQUE  HÔPITAUX
DE PARIS

Construction de l'Hôpital Universitaire de Saint-Ouen Grand Paris Nord Saint-Ouen (93)

Reprise des études hydrogéologiques



Rapport A120578 – **A** – Décembre 2022

Projet suivi par Matthias THOMAS – 06 16 90 08 94 – matthias.thomas@anteagroup.fr

www.anteagroup.fr

Fiche Signalétique

Construction de l'Hôpital Universitaire Saint-Ouen Grand Paris Nord à Saint-Ouen (93)

Reprise des études hydrogéologiques

CLIENT

Assistance Publique Hôpitaux de Paris
55 boulevard Diderot CS 22305
75 610 PARIS Cedex 12

Julien CAILLET
Ingénieur en chef
Service de la Maîtrise d'Ouvrage
Département Immobilier et Investissements
Mobile : 06 46 53 19 67
Fixe : 01 40 27 34 39

SITE D'INTERVENTION

Dénomination	Ancien site Stellantis 3 Avenue du Capitaine Glarner 93 400 SAINT-OUEN-SUR-SEINE
Famille d'activité	Pôle eau
Domaine	Hydrogéologie

DOCUMENT

Destinataires	Julien CAILLET
Date de remise	01/12/2022 – Rapport Version A
Nombre d'exemplaire remis	1
Pièces jointes	-
Responsable Commercial	Michel BOISSEAU

N° Rapport	A120758 – Bon de commande 4509609026 du 13/10/2022
Révision	Version A

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Matthias THOMAS	Chef de de Projets Hydrogéologue	Décembre 2022	
Vérification	Marie JOLY	Responsable Activité Eaux Ressources Géothermies	Décembre 2022	
Approbation	Michel BOISSEAU	Responsable Géotechnique Ile de France	Décembre 2022	

Sommaire

1	Contexte et objectifs.....	5
1.1	Le projet de l'HUSOGPN	5
1.2	Objectifs de la mission.....	5
1.3	Documents de référence	6
2	Données sur le projet.....	7
2.1	Localisation géographique.....	7
2.2	Avoisinants.....	8
2.3	Infrastructures envisagées	8
3	Etat initial du site et de son environnement	10
3.1	Cadre hydrographique.....	10
3.2	Contexte géologique.....	10
3.3	Contexte hydrogéologique	13
3.3.1	Les nappes en présence	13
3.3.2	Piézométrie et sens d'écoulement.....	14
4	Avis sur les investigations hydrogéologiques réalisées	16
4.1	Investigations réalisées	16
4.2	Avis et commentaires	18
4.2.1	Sur la présence de nappes distinctes	18
4.2.2	Sur le nombre de forages réalisés et leur conditions de comblement.....	20
4.2.3	Sur les résultats des essais menés	20
4.2.4	Sur les éventuelles investigations complémentaires à mener	23
5	Actualisation de l'étude des niveaux caractéristiques de la nappe	24
5.1	Définition des niveaux caractéristiques	24
5.2	Hypothèse concernant le niveau d'étiage de la nappe, EB.....	24
5.3	Effet barrage, B.....	25
5.4	Battement saisonnier, VS	26
5.4.1	Proposition d'un niveau de crue de chantier, EC.....	27
5.4.2	Estimation des battements d'occurrence 10, 50, 100 et 1 000 ans	27
5.5	Evaluation de l'impact des ondes de crue, A	31

5.5.1	Justification	31
5.5.2	Méthodologie	32
5.5.3	Evaluation de l'amortissement de la crue.....	33
5.6	Arrêt des pompages, R	34
5.6.1	Justification	34
5.6.2	Approche des arrêts de pompage.....	34
5.7	Synthèses des niveaux caractéristiques de la nappe retenus	36
6	Evaluation du débit d'exhaure en phase travaux.....	36
6.1	Définition de la profondeur de la fiche hydraulique	36
6.2	Scénario A : 3 niveaux de sous-sols	38
6.2.1	Hypothèses retenues pour le calcul	38
6.2.2	Débit de rabattement au sein de la paroi moulée	38
6.3	Scénario B1 : 5 niveaux de sous-sols	39
6.3.1	Hypothèses retenues pour le calcul	39
6.3.2	Débit de rabattement au sein de la paroi moulée	39
6.4	Scénario B2 : 4 niveaux de sous-sols	40
6.4.1	Hypothèses retenues pour le calcul	40
6.4.2	Débit de rabattement au sein de la paroi moulée	40
6.5	Dispositifs de rabattement envisageables	41
6.6	Remarque concernant les débits.....	41
7	Modalité de gestion des eaux d'exhaure en phase travaux	43
7.1	Solutions envisageables.....	43
7.2	Contraintes à prendre en compte	43
7.2.1	Pour un rejet au réseau d'assainissement	43
7.2.2	Pour un rejet direct en Seine	44
7.2.3	Pour la réinjection des eaux.....	44
7.3	Solution proposée	45
8	Préconisations complémentaires.....	46

1 Contexte et objectifs

1.1 Le projet de l'HUSOGPN

La présente étude, réalisée à la demande et pour le compte de l'Assistance Publique Hôpitaux de Paris, s'inscrit dans le projet de la création de l'Hôpital Universitaire Grand Paris Nord à Saint-Ouen (93) et concerne la parcelle sud, actuellement occupée par une ancienne usine PSA/Stellantis. Il y est actuellement projeté la construction d'un site hospitalier en R+4 avec 2 niveaux de sous-sol de grande hauteur (équivalent à 3 niveaux de sous-sol).

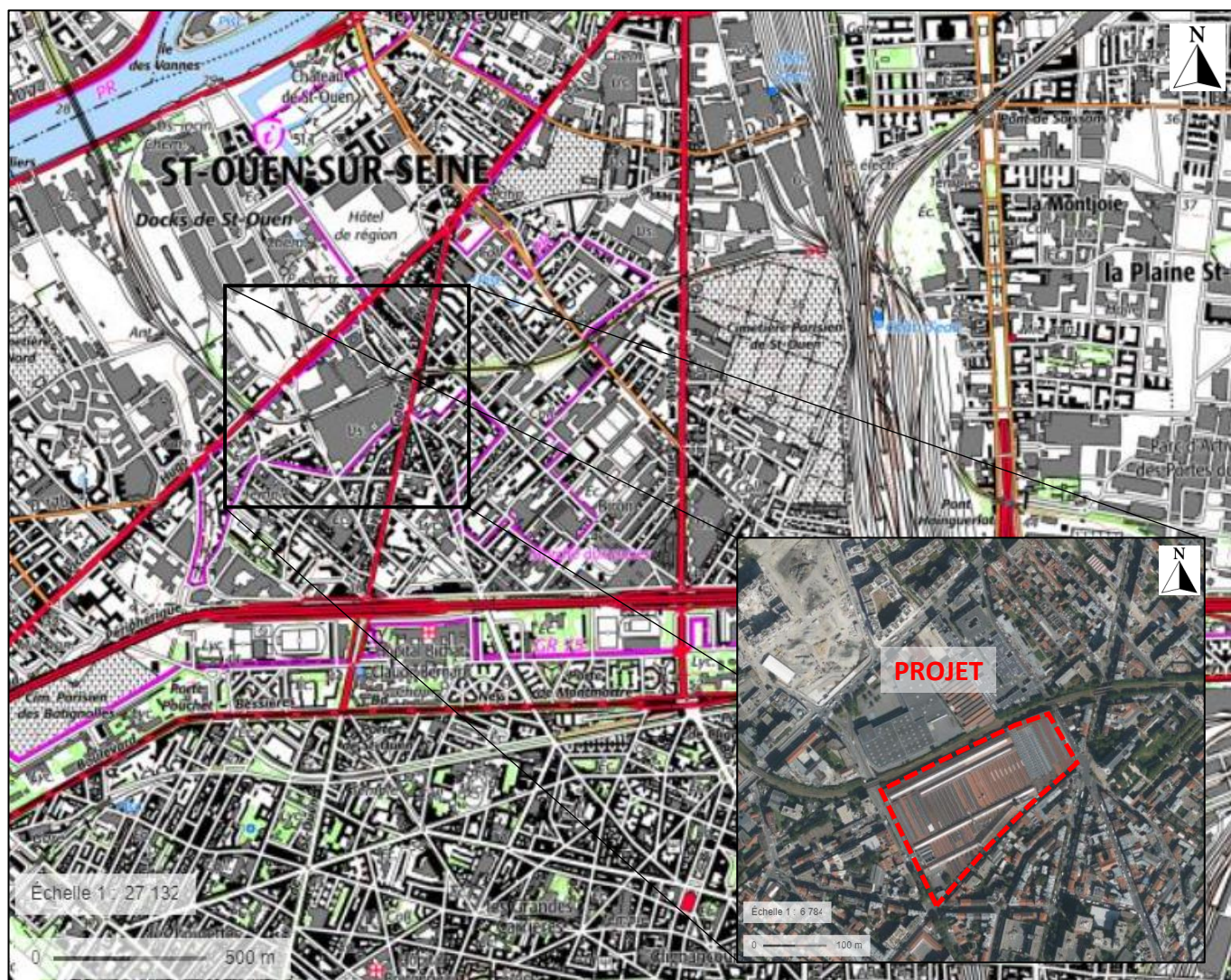


Figure 1 : Localisation du site sur fond IGN (source : Géoportail)

1.2 Objectifs de la mission

Dans le cadre de cette opération, l'Assistance Publique Hôpitaux de Paris (noté AP-HP dans la suite du rapport) a sollicité Antea Group pour une mission d'accompagnement hydrogéologique. Cette mission prend la forme d'un avis technique et une reprise des études hydrogéologiques réalisées par GAIDF en 2021-2022.

Ainsi, l'objectif de la présente note est :

- La prise en compte et l'analyse détaillée des documents transmis ;
- La proposition d'un niveau de crue de chantier plus adapté en indiquant les niveaux de risques associés ;
- La proposition d'une profondeur d'ancrage de la fiche hydraulique des futures parois et, le cas échéant, la proposition d'investigations complémentaires éventuelles ;
- Une analyse des solutions possibles pour l'évacuation des eaux de pompage ;
- La reprise des débits d'exhaure pour 3 géométries envisagées pour les futurs sous-sols ;
- La reprise des NPHE pour les 5 niveaux suivants : niveaux de chantier, les niveaux de récurrence décennale, cinquantennale, centennale et millénaire.

Le présent rapport exclut toute approche financière.

1.3 Documents de référence

Les documents mis à disposition pour la réalisation de ces études sont les suivants :

Documents généraux :

- Dossier n° 21145, Etude de faisabilité géothermique, Stratégéo, 18/01/2022, 73 pages ;
- 17399-6, Rapport d'Etude Géotechnique, G2 AVP, GAIDF, 20/04/2022 (rapport indice A), 145 pages ;
- R17399-2-NPHE-Indice B_2018/09098/Paris/02, étude des niveaux caractéristiques de la nappe, GAIDF, 11/05/2022 (rapport indice C), 41 pages ;
- 17399-8 - 2018/09098/PARIS/06, étude hydrogéologique, estimation du débit d'exhaure, GAIDF, 11/05/2022 (rapport indice A), 81 pages ;
- 17399-10-Modélisation – 2018/09098/PARIS/10, Modélisation hydrodynamique, GAIDF, 05/09/2022 (rapport indice O), 18 pages ;
- 17399-10 –2018/09098/PARIS/09, étude hydrogéologique, estimation du débit d'exhaure, GAIDF, 18/08/2022 (rapport indice O), 145 pages ;
- Données brutes des niveaux d'eau, GAIDF, (fichier Excel) ;
- Carnet des Etudes Parkings Solutions Alternatives des Infrastructures, RPBW, 23/09/2022, 12 pages.

Documents techniques et normatifs

- Missions d'ingénierie géotechnique – Classifications et Spécification, NF P 94-500, novembre 2013 ;
- Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages, NF X-10-999, août 2014 ;
- Eurocode 7, calcul géotechnique, partie I – règles générales – NF EN 1997-1, Juin 2005.

Documents et données en accès libre

- Le site Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) pour :
 - Les cartes IGN ;
 - Les photos satellites ;
- La carte géologique au 1/50 000^{ème} de Paris (Feuille n°183), et la notice qui l'accompagne ;
- La carte géologique au 1/25 000^{ème} de Paris (Feuille n°183), et la notice qui l'accompagne ;
- La thèse d'Aurélien LAME, Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains, décembre 2013,
- L'étude des variations de la nappe phréatique et cartographie de l'infiltrabilité des sols sur le territoire de la Seine-Saint-Denis présenté lors des XIV^{ème} journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie ;
- Les sites du BRGM :

- Le visualiseur Infoterre pour les cartes géologiques et les cartes d'aléa inondations par débordement de nappe (<http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>) ;
- La base de données de consultation et téléchargement des rapports BRGM (<http://infoterre.brgm.fr>) ;
- L'espace cartographique du Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines en Seine-Normandie (SIGES Seine-Normandie) pour un extrait de la carte hydrogéologique de la France au 1/50 000^{ème} (<http://sigessn.brgm.fr/?page=carto>) ;
- Le zonage carrières et dissolution de gypse – Paris et petite couronne établi par l'Inspection Générale des Carrières.

2 Données sur le projet

2.1 Localisation géographique

Le futur Hôpital Universitaire Grand Paris Nord sera localisé sur l'ancienne usine PSA/Stellantis rue du capitaine Glarner à Saint-Ouen (93). Le site couvre une superficie de près de 45 000 m², bordé :

- Au nord-ouest par une voie SNCF,
- Au nord-est par la rue Louis Blanc,
- Au sud-est par la rue Farcot,
- Au sud-ouest par l'avenue du Capitaine Glarner.



Figure 2 : Localisation du site sur fond de carte au 1/50 000e (source : Géoportail)

Le site, du fait de son utilisation, est nivelé par une dalle béton à +34,6 m NGF environ.

2.2 Avoisinants

Le long de la rue Farcot au sud, les bâtiments sont de type R+3 à R+4 avec probablement un niveau de sous-sol (cave et parking).

La rue Louis Blanc, à l'est, est en contrebas, les terrains en place étant retenus par un mur de soutènement en pierres de maçonnerie liée de 2 m de hauteur sans barbacanes de drainage. Un bâtiment en R+5 jouxte la rue.

L'avenue du Capitaine Glarner, à l'ouest, présente des résidences de type R+5 à R+7.

Au nord, un talus SNCF sépare cette parcelle d'un site industriel occupé par un Conforama.

2.3 Infrastructures envisagées

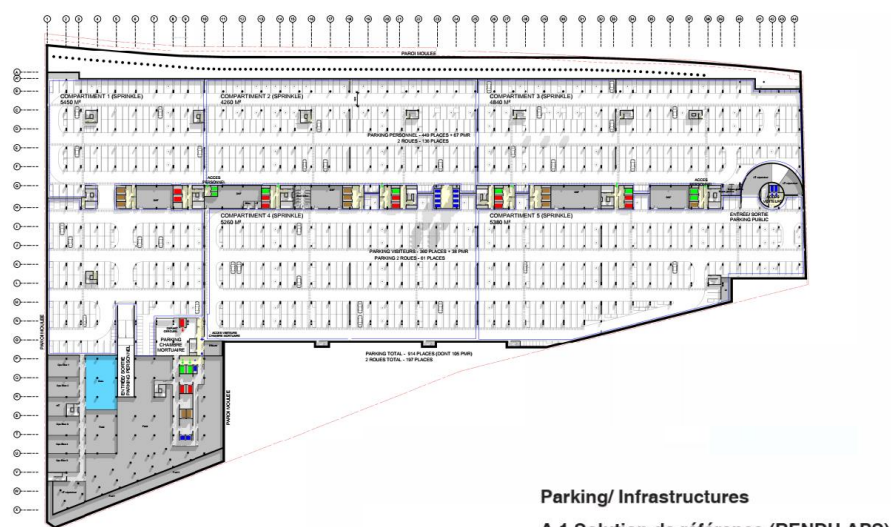
Selon les documents communiqués, 3 scénarios de sous-sols sont à étudier :

- La solution de référence (rendu APS) comprenant 3 niveaux de sous-sol de profondeur identique sur l'intégralité de la parcelle ;
- La solution alternative B1 intégrant deux niveaux de sous-sols sur l'ensemble de la parcelle couplé à un secteur présentant 3 niveaux de sous-sols supplémentaires (soit localement 5 niveaux de sous-sols) ;
- La solution alternative B2 intégrant deux niveaux de sous-sols sur l'ensemble de la parcelle couplé à un secteur, plus étendu que la solution B1, présentant 2 niveaux de sous-sols supplémentaires (soit localement 4 niveaux de sous-sols).

Les caractéristiques des sous-sols sont mentionnés ci-après :

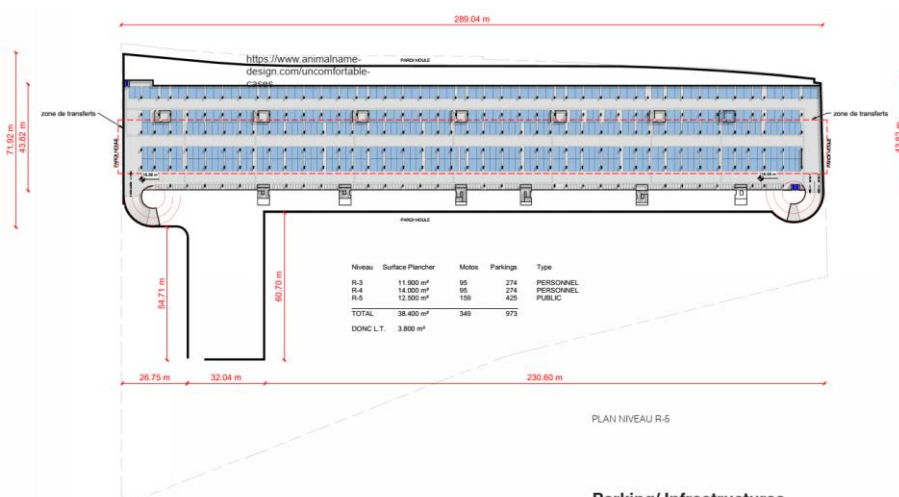
Tableau 1 : Cotes des infrastructures envisagées

Caractéristique	Solution de référence (A1)	Scénario B1	Scénario B2
Cote RDC (m NGF)	+34,2		
Cote sol R-1 (m NGF)	+31,2		
Cote sol R-2 (m NGF)	+28,2		
Cote sol R-3 (m NGF)	+24,1	+24,1	+24,1
Cote sol R-4 (m NGF)	-	+21,3	+21,3
Cote sol R-5 (m NGF)	-	+18,5	-
Surface (m²)	37 636	11 900 (R-3) 14 000 (R-4) 12 500 (R-5)	18 000 (R-3) 21 500 (R-4)



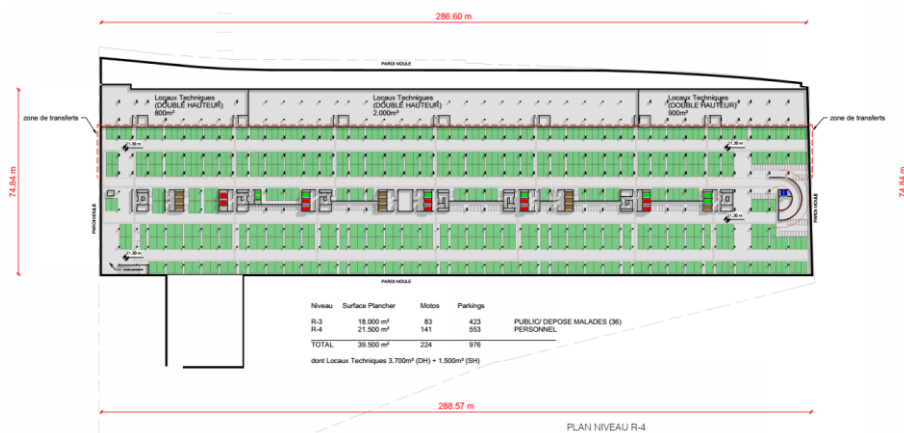
Parking/ Infrastructures

A.1 Solution de référence (RENDU APS)



Parking/ Infrastructures

B.1 Solution alternative (3 NIVEAUX PARKINGS)



Parking/ Infrastructures

B.2 Solution alternative (2 NIVEAUX PARKINGS)

Figure 3 : Emprises des diverses solutions de sous-sols envisagées

3 Etat initial du site et de son environnement

3.1 Cadre hydrographique

Les cotes de crues et les débits disponibles de la Seine au niveau du pont de Saint-Ouen, situé à environ 1,3 km du site, sont fournis dans le tableau ci-après :

Tableau 2 : Crues significatives de la Seine au niveau du Pont de Saint-Ouen

Période considérée	Réurrence	Débit estimé (m ³ /s)	Cote (m NGF)
Retenue Normale (RN)	-	-	+23,56
Plus Hautes Eaux Navigables (PHEN)	-	# 1 250	+26,99
Crue février 1977	>10 ans	# 1 416	+27,08
Crue mars-avril 1978	# 10 ans	# 1 650	+27,70
Crue mars 1970	# 10 ans	# 1 632	+27,74
Crue mars 2001*	# 10 ans	# 1 632	+28,59
Crue décembre-Janvier 1982	# 10 ans	# 1 650	+28,07
Crue juin 2016*	# 10 ans (amplitude) # 100 ans (dynamique)	# 1800	+29,14
Crue janvier 1955	# 50 ans	# 2 085	+28,79
Crue janvier 1924	>50 ans	# 2 140	+29,16
Crue janvier 1910	# 100 ans	# 2 560	+29,74
Crue extrême (1/1000)	# 1000 ans	# 3 300	+31,93

* = données au barrage de Suresnes

Le site du projet est situé à environ 1,1 km de la Seine, en dehors de la zone de cartographie réglementaire.

3.2 Contexte géologique

D'après les cartes géologiques 1/25 000e et au 1/50 000e de Paris (Feuille n°183) et les sondages antérieurs menés par GAIDF jusqu'en 2022, la stratigraphie attendue au droit du site d'étude est la suivante :

- **Remblais anthropiques (R)** : Les remblais constituent un horizon de surface souvent composé de matériaux de démolition et de débris d'origine anthropique, mêlés au sein de formations alluvionnaires ou limoneuses. Au droit du site, cette couche superficielle est composée de sable grossier marron à grisâtre, plus ou moins argileux, à cailloux et cailloutis. L'épaisseur des remblais varie de 2,0 à 3,5 m.
- **Marnes Infragypseuses et Sables Verts indifférenciés - (MIG/SV)** : Les Marnes Infragypseuses ou Marnes à Pholadomyes, sont des marnes argileuses magnésiennes souvent jaunâtres à blanchâtres, parfois bleutées et vertes. Cette formation est peu puissante et ne dépasse pas 2,0m d'épaisseur sur le site, elle y est rencontrée sous une nature marneuse, plus ou moins sableuse, beige à beige grisâtre. Les Sables Verts, ou Sables de Monceau, est une formation sablo-argileuse grise verdâtre, reconnue sur site sur des épaisseurs n'excédant pas 1,5 m.

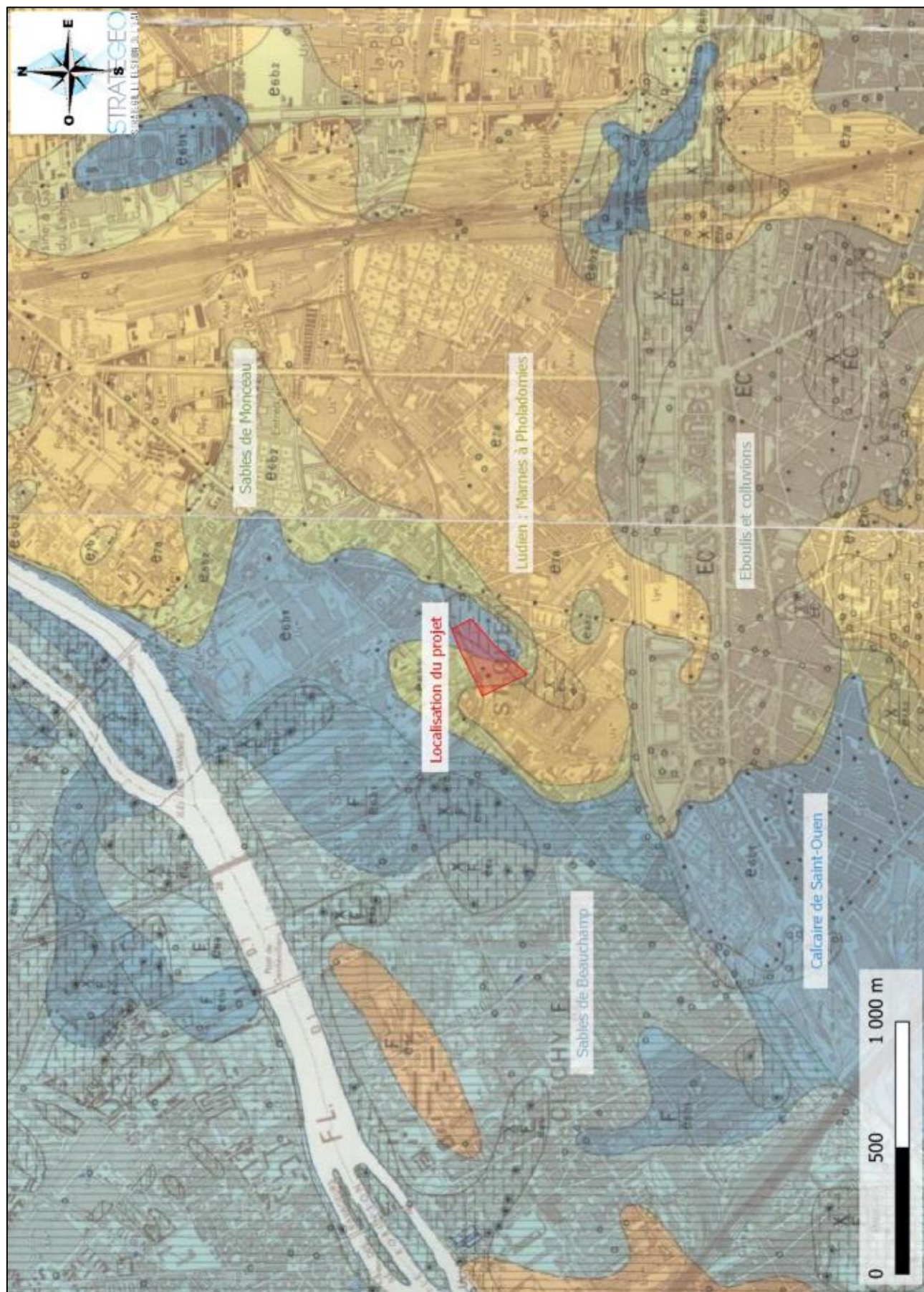


Figure 4 : Extrait de la carte géologique de Paris 1/25 000^e (Source : Stratégéo)

- **Marno-Calcaire de Saint-Ouen – Bartonien supérieur (e6b, SO) :** Cette série géologique est constituée de marnes crème à rosée et de bancs calcareux, parfois silicifiés (travertins). Ces bancs peuvent présenter des feuillets argileux, souvent magnésiens. Il est possible de retrouver des niveaux de gypse saccharoïde dans cette formation. L'épaisseur moyenne des Marnes et Calcaires de Saint-Ouen est de 10 mètres.
- **Sables de Beauchamp – Bartonien inférieur (e6a, SB) :** Cette formation est représentée par des sables quartzeux dont la couleur varie de vert foncé, bleu à gris. La base de cette couche devient plus argileuse et présente souvent des grès fossilifères, en bancs ou en géodes. Il est possible d'observer quelques passées calcaires et des niveaux gypseux au sein de cette formation, dont l'épaisseur moyenne varie entre 6 et 7 mètres.
- **Marnes et Caillasses – Lutétien supérieur (e5d, MC) :** Cette série laguno-lacustre est d'une épaisseur variant de 15 à 20 mètres. Elle est composée d'une alternance de marnes blanches, plus ou moins argileuses et magnésiennes, et de marnes calcaires contenant des blocs calcaires, dolomitiques ou siliceux, et parfois de bancs de calcaires en base. Cette formation peut présenter des niveaux de gypse.
- **Calcaire grossier – Lutétien inférieur (e5c, CG) :** La formation du Calcaire grossier est constituée d'une alternance de bancs de calcaire plus ou moins tendres, souvent fossilifères. Le toit de cette formation a été identifié à une cote de -10mNGF.

Une coupe lithologique représentative des terrains, dressée pour l'établissement de cette note, est reportée dans la figure ci-dessous et servira de base pour l'analyse :

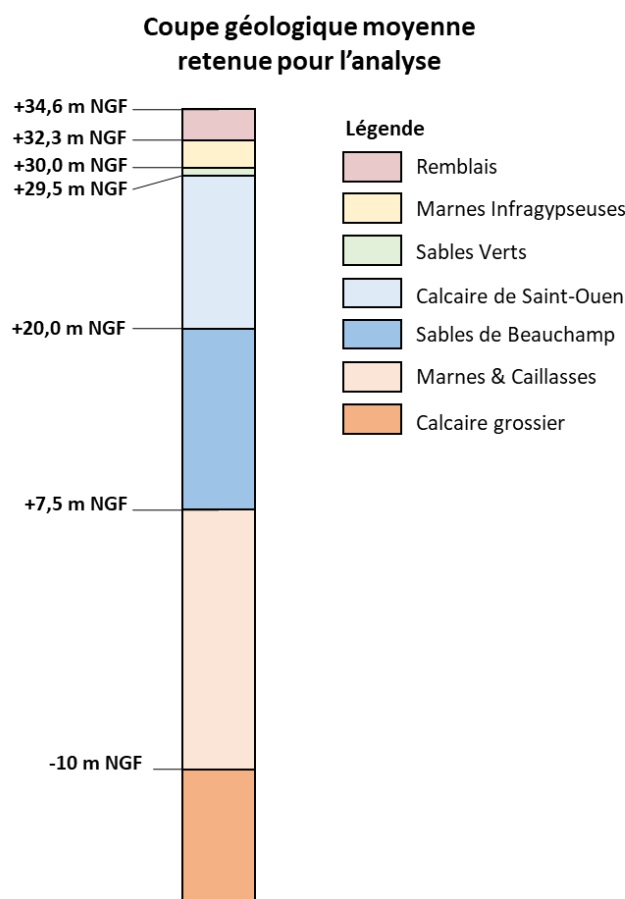


Figure 5 : Coupe géologique moyenne retenue pour l'analyse

3.3 Contexte hydrogéologique

3.3.1 Les nappes en présence

Parmi la succession des formations géologiques décrites précédemment, plusieurs horizons géologiques sont aquifères, on distinguera ainsi :

- **L'aquifère libre du Bartonien**, s'établissant dans la formation du Calcaire de Saint-Ouen (SO) et des Sables de Beauchamp (SB) supérieurs, qui concerne directement le projet ;
- **La nappe captive (voire semi-captive) du Lutétien**, s'établissant dans la formation des Marnes et Caillasses (MC) et du Calcaire grossier (CG) ;

Seules ces deux premières nappes intéressent le projet.

- Sous ses deux premières nappes, plus en profondeur, se développe la **nappe captive de l'Yprésien** contenue dans les sables du Soissonnais (SS).

Selon ces éléments, la nappe phréatique (= première nappe rencontrée) se développe dans la nappe du calcaire de Saint-Ouen, présente sous la totalité du projet. Toutefois, il existe potentiellement des nappes temporaires qui peuvent exister lors des périodes de recharge. Ces nappes perchées, a priori non continues, se développent à la faveur d'une argilosité plus importante au sein des remblais et ou des sables verts de Monceau. Des mesures ponctuelles en décembre 2021 n'ont pas identifié de nappe dans ces horizons.

Selon les informations disponibles au droit des sondages carottés au niveau du projet, il existerait un écran semi-perméable plus ou moins épais et profond au sein des Sables de Beauchamp. L'aquifère du Bartonien et la nappe du Lutétien sont donc a priori indépendants au niveau du projet :

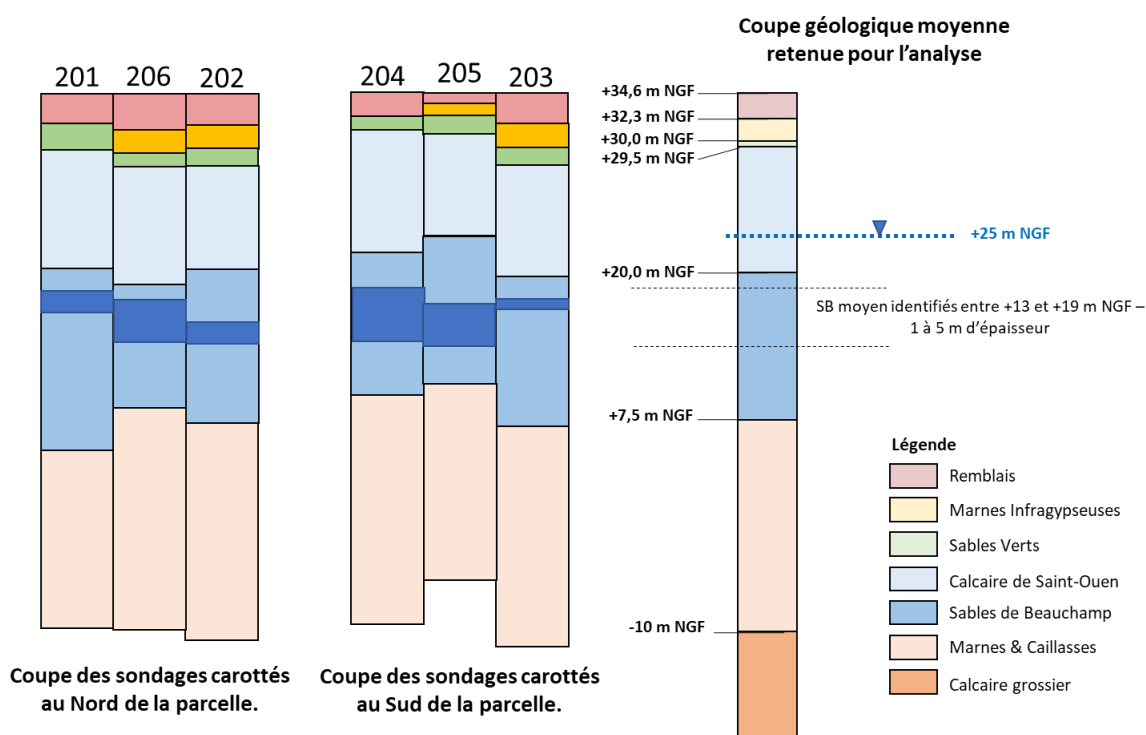


Figure 6 : Identification des sables de Beauchamp moyens dans les sondages carottés

De plus, il semble exister une différence d'altitude pour la base du Beauchamp (vers +7,5 m NGF dans la partie Est du site et vers +4 m NGF dans la partie Ouest). Il en est de même pour la profondeur de

l'horizon des sables de Beauchamp moyens (moins profond et plus épais dans le sud-ouest, plus profond et moins épais dans la partie nord-est)

Absent au niveau
du projet

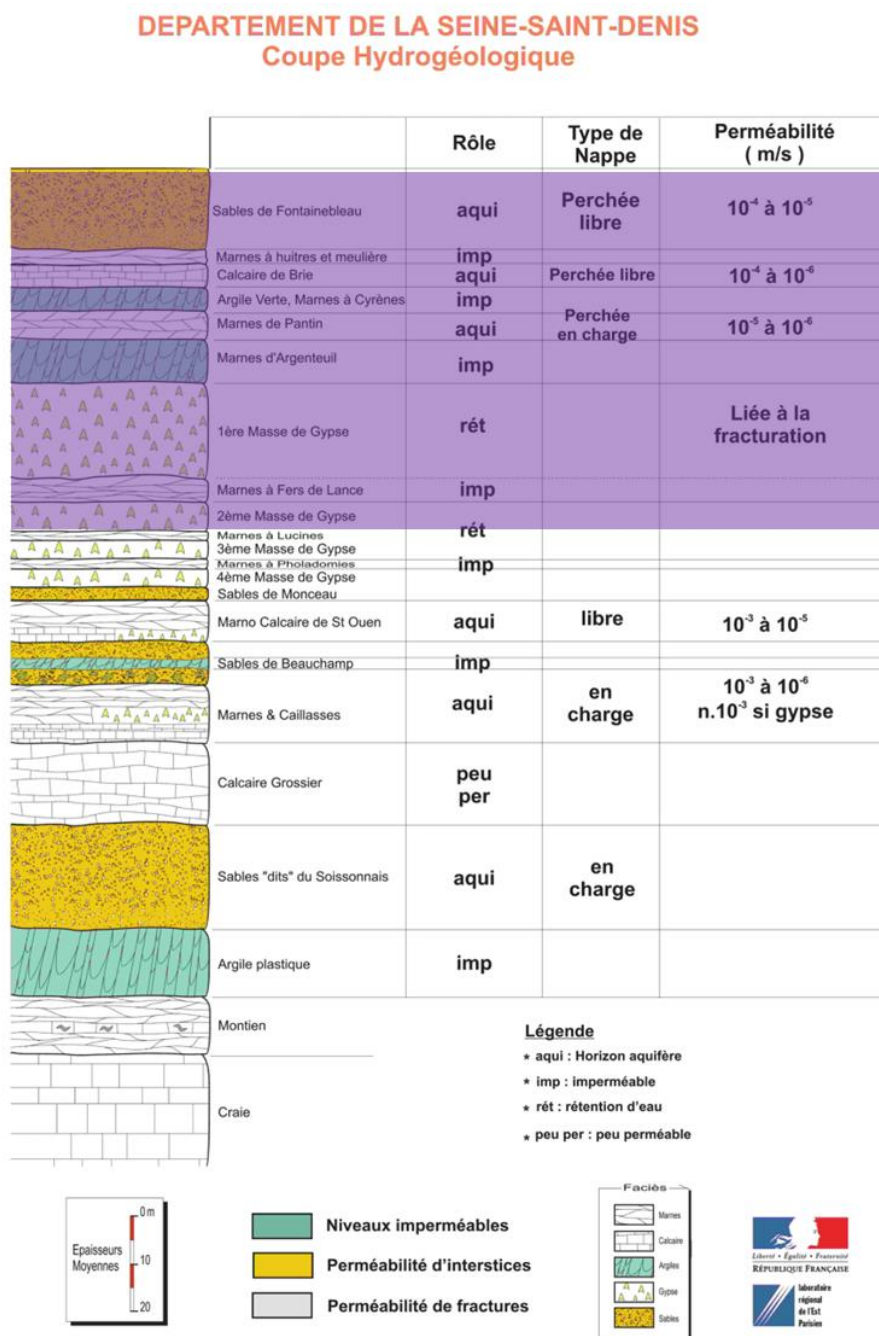


Figure 7 : Coupe hydrogéologique type au niveau de la Seine-Saint-Denis (source : LREP)

3.3.2 Piézométrie et sens d'écoulement

Les deux nappes susceptibles d'impacter le projet présentent des niveaux d'eau qui s'abouchent avec :

- un sens d'écoulement en direction de la Seine, soit du SE vers le NW
- un gradient compris entre 2 et 3 ‰. A noter : les mesures sur site montrent un gradient local pouvant atteindre jusqu'à 6‰.

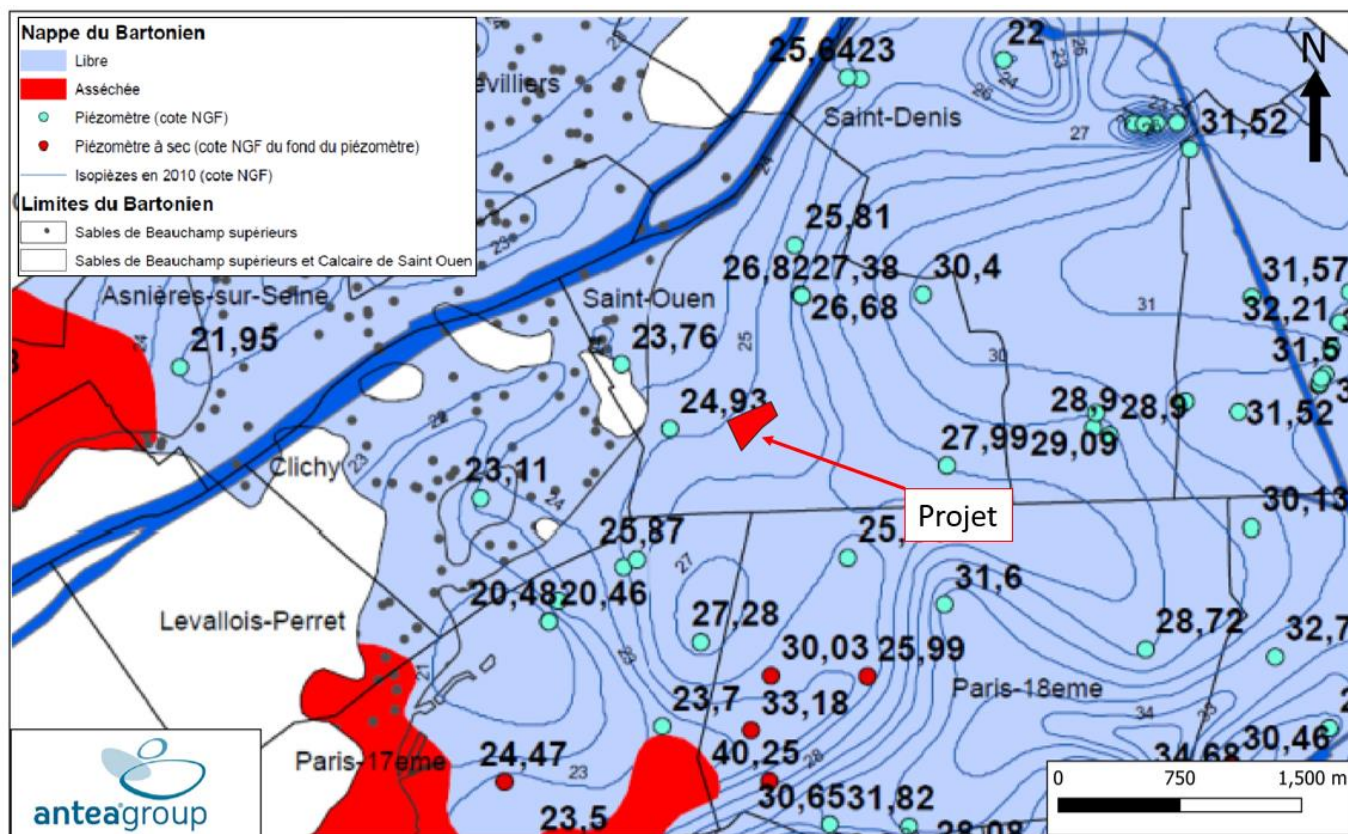


Figure 8 : Esquisse piézométrique de la nappe du Bartonien (source : Lamé)

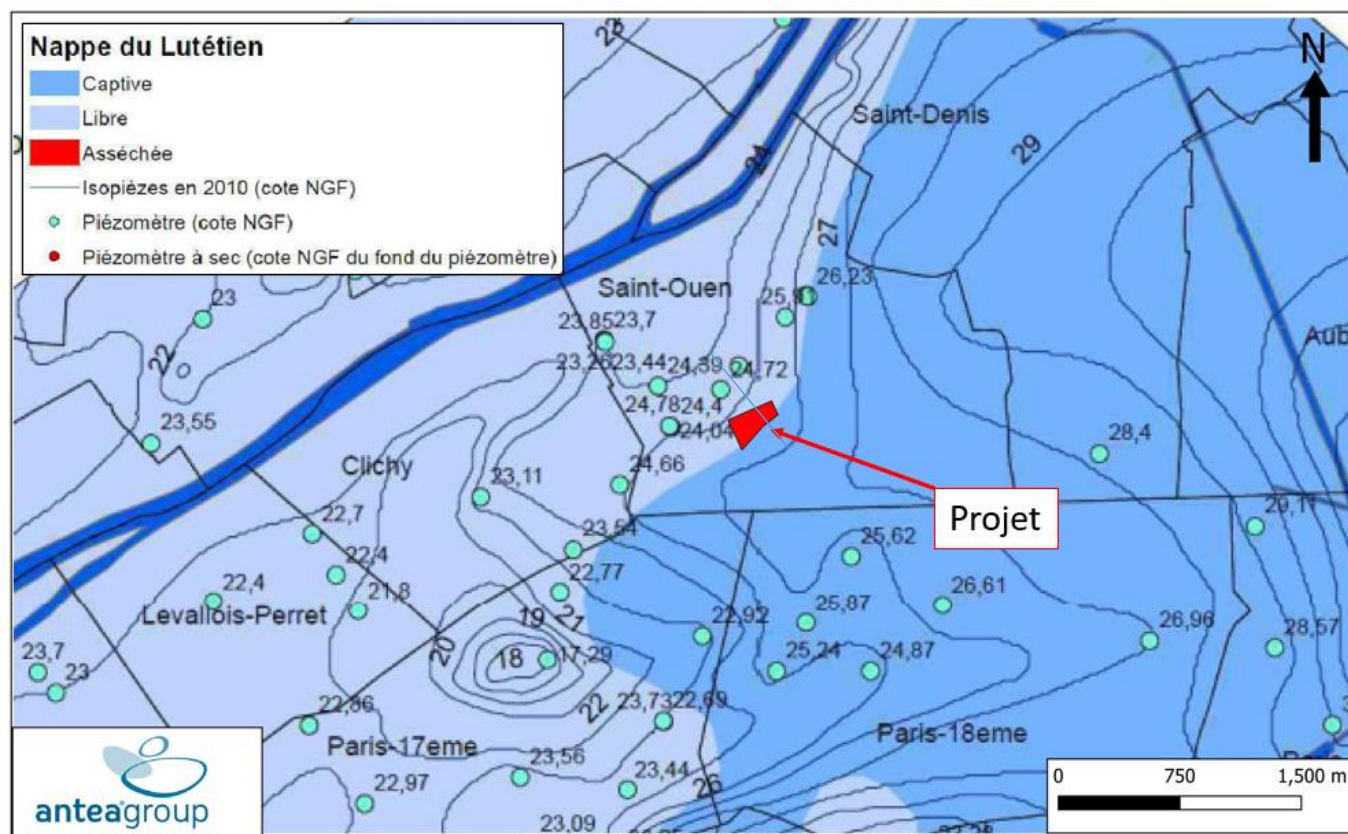


Figure 9 : Esquisse piézométrique de la nappe du Lutétien (source : Lamé)

4 Avis sur les investigations hydrogéologiques réalisées

4.1 Investigations réalisées

Les investigations réalisées par GAIDF se sont déroulées en plusieurs phases lors de leurs missions géotechniques et hydrogéologiques. Le programme d'investigations réalisé a été le suivant :

En G1 ES :

- 1 sondage pressiométrique de 50 m de profondeur, SP2, réalisé et équipé en PVC 52/60 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;

En G1 PGC :

- 1 sondage carotté de 50 m de profondeur, SC101, réalisé et équipé en PVC 52/60 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;
- 17 sondages pressiométriques de 50 m de profondeur (SD110 à SD126), équipés en PVC 52/60 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;

En G2 AVP :

- 3 sondages carottés de 7 m (SC211 à SC213), équipés en piézomètres, ces piézomètres se sont révélés secs en décembre 2021 ;
- 25 sondages pressiométriques de 50 m de profondeur (SP207 à SP231), équipés en PVC 52/60 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;
- 46 sondages destructifs de 50 m de profondeur (SD231 à SD276), équipés en PVC 52/60 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;
- 18 sondages destructifs de 50 m de profondeur (ER10 à ER18), équipés en PVC 60/70 mm pour effectuer une diagraphie gamma ray ;
- 10 essais Lefranc réalisés dans 10 sondages carottés (SC201 à SC210).

L'ensemble des études hydrogéologiques a réutilisé 9 ouvrages précédemment réalisés (cf. figure suivante) :

- En 2001 par ATOS (Pz1, Pz8, Pz16 et Pz20) dans le cadre du suivi de la pollution du site ;
- En 2019 par GAIDF (PzA, PzB, PzC, PzD et PzE) dans le cadre d'un diagnostic de pollution complémentaire.

Première étude hydrogéologique, estimation du débit d'exhaure n°1 :

- 5 piézomètres et 52/60 mm (Pz1 à Pz5)
- 3 piézomètres en 112x125 mm (Puits, MM1 et MM2)
- 1 essai de pompage de longue durée. Compte tenu d'un arrêt de la pompe inexpliqué lors d'un premier essai mené sur « Puits » en décembre 2021, un second essai a été réalisé sur MM2 en février 2022 ;
- 2 essais au Micromoulinet sur MM1 et MM2.

Seconde étude hydrogéologique, étude des niveaux des plus hautes eaux :

- Un suivi piézométrique en continu sur 4 ouvrages présents sur le site (Pz1, Pz20, PzB et PzD)

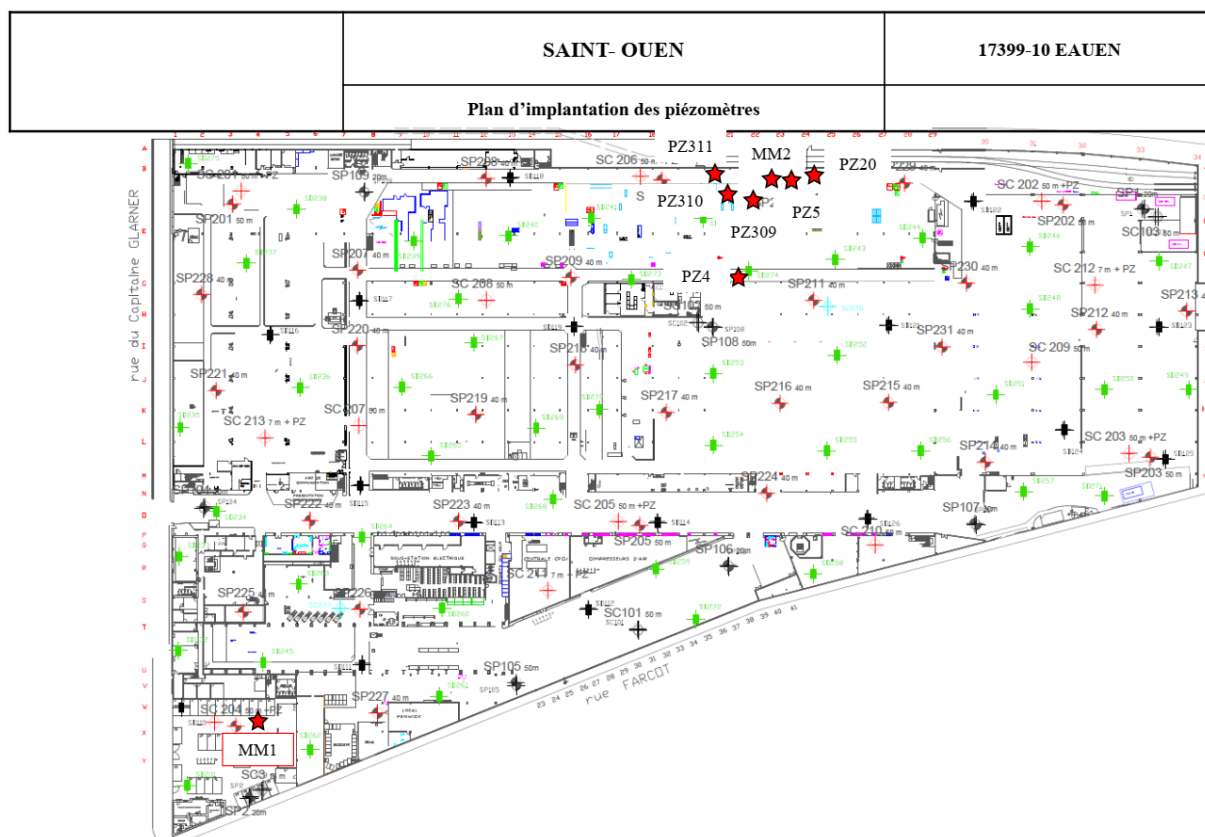
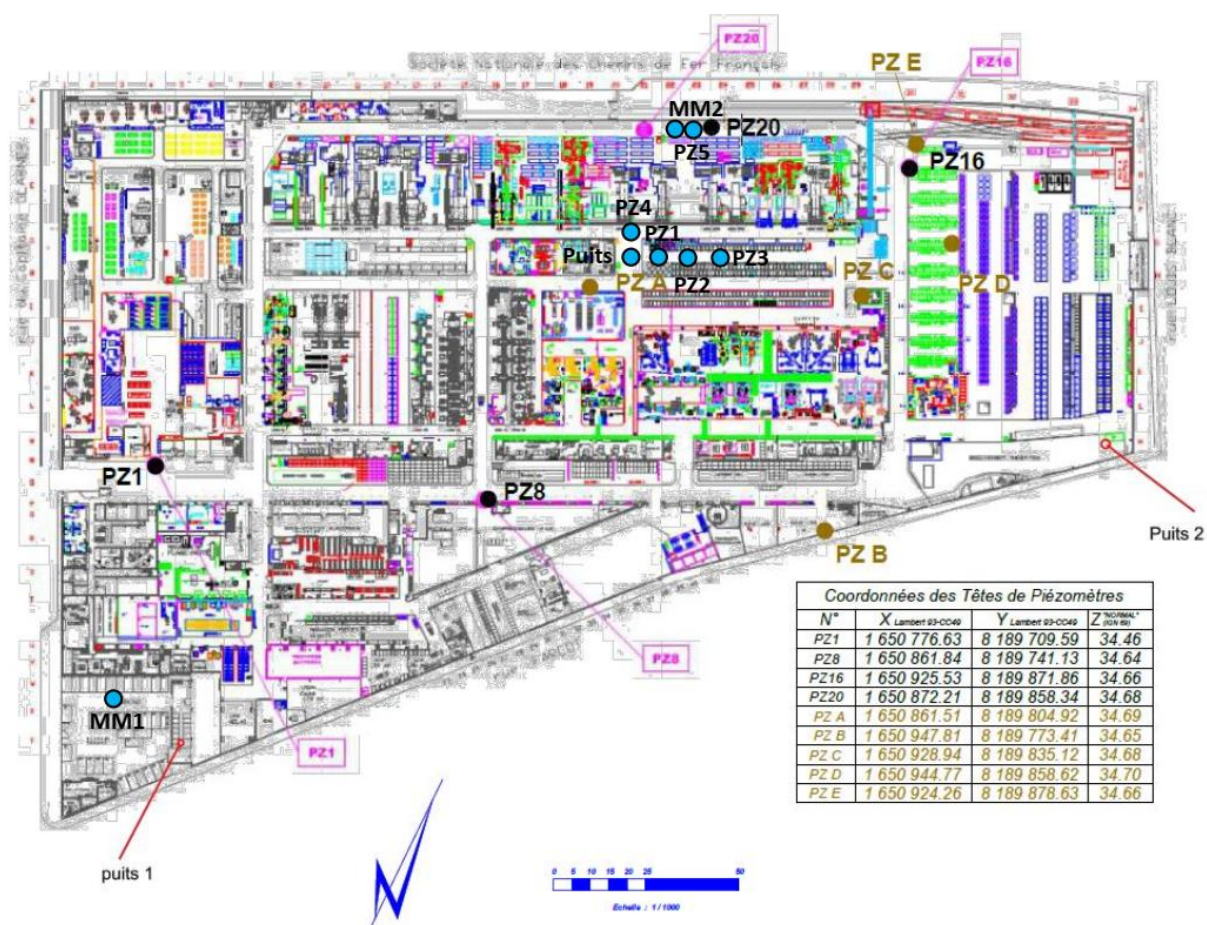


Figure 10 : Localisation des piézomètres réalisés sur le site par GAIDF

Troisième étude hydrogéologique, estimation du débit d'exhaure n°2 et modélisation :

- 32 essais Lefranc réalisés dans 16 sondages carottés (SC201 à SC210) ;
- 12 essais en laboratoire pour déterminer la perméabilité verticale ;
- 3 piézomètres sélectifs équipés en PVC 52/60 mm (SC309, SC310 et SC311) ;
- Un nouveau pompage de longue durée sur MM2 en juin 2022 ;
- Une modélisation hydrodynamique.

Dans la mesure du possible, l'ensemble des ouvrages/piézomètres du site devront être préservés dans le cadre de l'opération de démolition/dépollution actuellement en cours : si fonctionnels, documentés et ne perturbant pas le rabattement futur (Cf 4.2.2)

4.2 Avis et commentaires

4.2.1 Sur la présence de nappes distinctes

Selon les derniers éléments indiqués par GAIDF dans son étude d'août 2022, « lors du relevé piézométrique réalisé en juin 2022, les niveaux de la nappe au droit des piézomètres sélectifs crépinés dans le Marno Calcaire de Saint Ouen, au milieu des Sables de Beauchamp, à la base des Sables de Beauchamp et au toit des Marnes et Caillasses ont été relevés à la même cote. De ce fait, les charges piézométriques au droit de l'ensemble des ouvrages sont équivalentes et ne mettent pas en évidence de nappes distinctes entre ces formations ».

Il convient d'être vigilant sur cette affirmation. En effet, l'absence de différence d'altimétrie entre deux nappes ne signifie pas nécessairement que ces deux nappes sont continues d'un point de vue technique et/ou réglementaire.

Les définitions classiquement admises en hydrogéologie sont les suivantes :

- Un **aquifère** est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable. Un aquifère peut comporter une zone non saturée (définition de Margat et Castany). L'aquifère est homogène quand il a une perméabilité d'interstices (sables, graviers) : la vitesse de percolation y est lente. Il est hétérogène avec une perméabilité de fissures (granite, calcaire karstique) : la vitesse de percolation est plus rapide ;
- Les formations peu perméables (dites semi-perméables), comme les sables argileux, peuvent stocker de l'eau mais la vitesse de transit est faible : on parle d'**aquitard**. Ces formations peuvent assurer la communication entre aquifères superposés par le phénomène de drainance ;
- Les **aquicludes** sont des formations imperméables ne produisant pas d'eau ;
- Une **nappe** est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Margat et Castany).

Ainsi, un aquifère peut être composé de plusieurs nappes séparées par des aquitards. Une nappe reste caractérisée par des conditions de dépôt et des relations hydrauliques : ainsi, une nappe reste nécessairement bornée par des aquitards/aquicludes.

Dans le cas du projet :

- L'aquitard recherché reste le niveau des sables de Beauchamp moyen. Il a été identifié sur le site comme des sables argileux, voire des argiles sableuses ;

- Des niveaux d'eau proches avait déjà été relevés en 2010 par Lamé. En effet, les niveaux piézométriques de la nappe du Bartonien et celui de la nappe du Lutétien restent compris entre +25 et +25,5 m NGF (cf. §3.3), ce qui est cohérent avec les mesures de GAIDF.

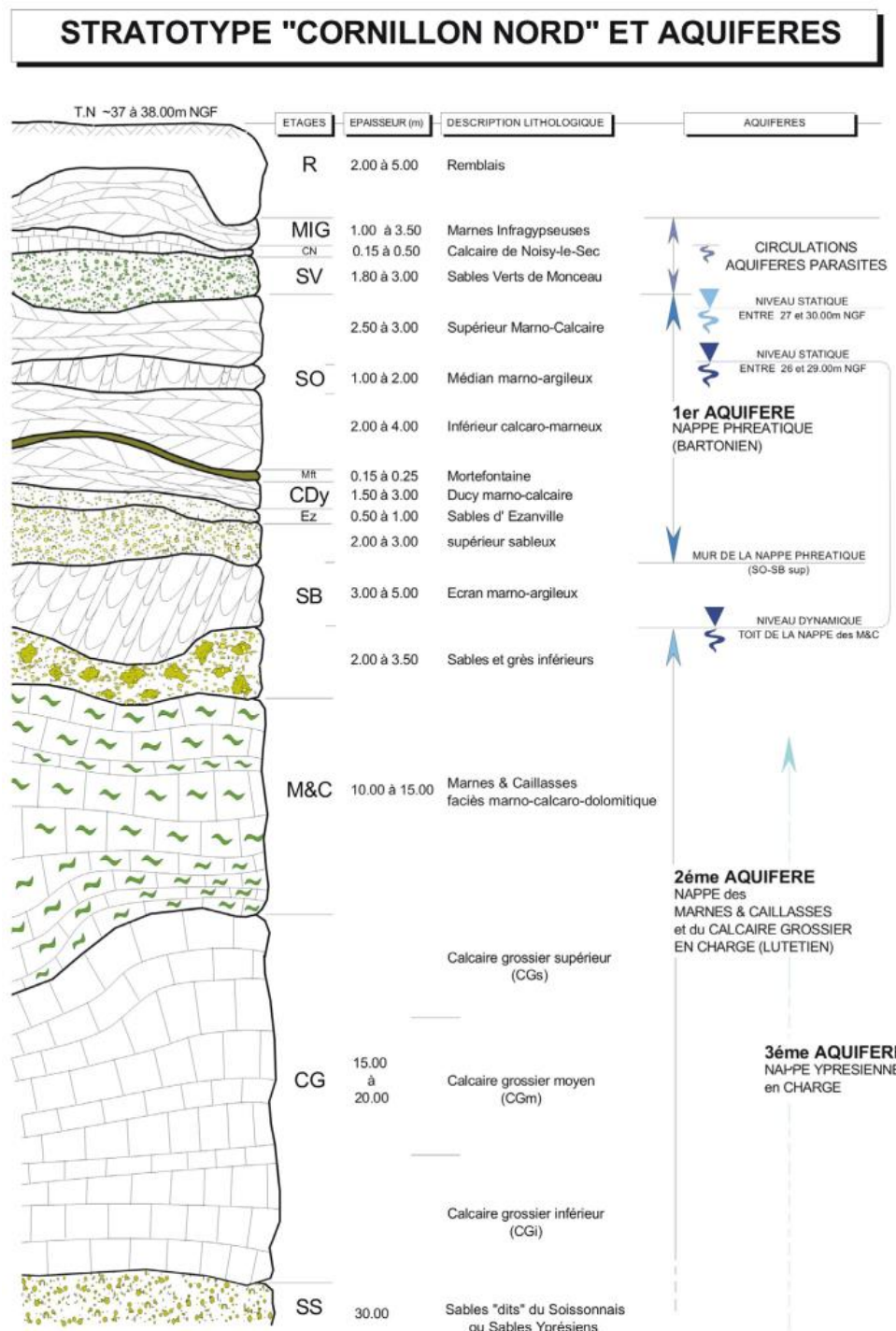


Figure 11 : Coupe hydrogéologique type au niveau du stade de France

En outre, la **présence d'ouvrages mixtes**, comme les ouvrages MM1 et MM2, peuvent également participer à l'équilibrage local des niveaux d'eau compte tenu du fait que ces ouvrages ont percé les horizons semi-perméables des sables de Beauchamp moyens dont l'existence est avérée sur site (dans les relevés des sondages carottés).

Ainsi, les ouvrages captant simultanément le calcaire de Saint-Ouen et les Sables de Beauchamp inférieurs **ne sont pas conformes à la réglementation puisqu'ils mettent en communication plusieurs nappes**.

Enfin, en cas de pompage, ce sont les caractéristiques des aquifères qui sont évaluées et non ceux des aquitards/aquicludes qui ne participent pas ou peu à l'essai. Les caractéristiques des aquitards/aquicludes peuvent être évalués via des essais type Lefranc.

4.2.2 Sur le nombre de forages réalisés et leur conditions de comblement

D'une manière générale, un grand nombre d'ouvrages hydrogéologiques ou géotechniques ont été créés dans le cadre des études GAIDF.

Tous ces ouvrages sont des points de faiblesse pouvant participer au mélange entre les nappes s'ils n'ont pas été comblés en rétablissant l'aquitard des sables de Beauchamp moyen.

Les demandes faites à GAIDF n'ont pas permis de répondre à cette problématique qui pourrait largement impacter le débit d'exhaure de la nappe. A partir des éléments à notre disposition, il n'est techniquement pas possible d'évaluer l'éventuel impact de comblements d'ouvrage sur le débit de rabattement de nappe.

Selon notre expérience sur des projets similaires, des débits instantanés de plusieurs (dizaines) mètres-cubes d'eau peuvent être observés pour chaque ouvrage non suffisamment étanchés.

Également, la réutilisation d'un forage profond en piézomètre plus superficiel peut perturber la représentativité des niveaux d'eau mesurés si le fond de l'ouvrage n'a pas été comblé correctement.

Ainsi, avant toute opération de terrassement/dépollution, il conviendra de combler tous les piézomètres et forages encore existants sur le site en respectant les Règles de l'Art. **De même en cas de découverte en cours de chantier, un traitement spécifique de chaque forage devra être réalisé pour circonscrire les débits d'eau provenant des ouvrages pas ou partiellement comblés.**

4.2.3 Sur les résultats des essais menés

Pompages d'essai

Trois pompages d'essai ont été réalisés, dont deux dans le même ouvrage. Ces essais ont été réalisés dans un seul et même secteur du site qui couvre plusieurs hectares (pas d'approche de la variabilité des perméabilités des terrains selon la position sur le site) :

- Le premier essai de décembre 2021 réalisé montre des paramètres hydrodynamiques faibles, ce qui a conduit à la réalisation d'un nouvel essai.
Or, ce pompage a été réalisé dans un ouvrage sollicitant uniquement la nappe du Bartonien (Calcaire de Saint-Ouen uniquement). Le débit est faible avec un rabattement important, ce qui témoigne de faibles caractéristiques hydrodynamiques.
- Les autres essais (février et juin 2022) ont été envisagés sur MM2, ouvrage mixte.
Ainsi, l'interprétation des essais reste délicate et dans tous les cas perturbée par la nappe la plus productrice.
En effet, l'ensemble des interprétations réalisées considère une nappe captive, ce qui n'est pas le cas pour la nappe des calcaires de Saint-Ouen. Compte tenu de l'absence de suivi en continu des débits, il apparaît très compliqué de réinterpréter les données brutes des pompages.

En outre, le degré de nettoyage des ouvrages, notamment des piézomètres, est inconnu. Or leur degré de colmatage peut influencer sur le suivi des niveaux d'eau.

Néanmoins, l'essai de juin 2022 réalisé à plus fort débit et suivi sur des piézomètres sélectifs semble confirmer la présence de deux nappes distinctes (et donc, la présence d'un aquiclude). En effet, à la fin de l'essai, deux piézomètres réalisés à une distance quasi-identique du puits de pompage (PZ309 et PZ20), mais sollicitant deux horizons distincts, ne réagissent pas de la même manière : le rabattement au sein des calcaires de Saint-Ouen (PZ20) est moins important qu'au niveau des Sables Beauchamp (Pz309).

Tableau 3 : Données obtenues lors des pompages de juin 2022.

	Puits MM2	PZ5	PZ309	PZ20	PZ310	PZ311	PZ4
Niveau statique / TA (m)	9,6	9,54	9,55	9,53	9,55	9,59	9,5
Niveau statique / TA (m NGF)	25,08	25,14	25,13	25,15	25,13	25,09	25,19
Distance au puits (m)	0	3,2	8,1	8,4	12,6	15,2	30
Rabattement en fin de pompage (m)	4,92	0,95	2,1	0,21	1,56	0,14	0,14
Formation(s) captée(s)	Saint Ouen et Sables de Beauchamp	Saint Ouen et Sables de Beauchamp	Sables de Beauchamp	Saint Ouen	Sables de Beauchamp	Marnes et Caillasses	Saint Ouen

L'interprétation de cet essai, en considérant la géométrie du cône de rabattement, montre que les piézomètres représentatifs des deux nappes en présence s'alignent approximativement sur des droites. Afin de pouvoir interpréter cet essai, il aurait été nécessaire de réaliser un micromoulinet au débit de l'essai. Néanmoins, une approche maximisant la transmissivité a été réalisée, présentée ci-après.

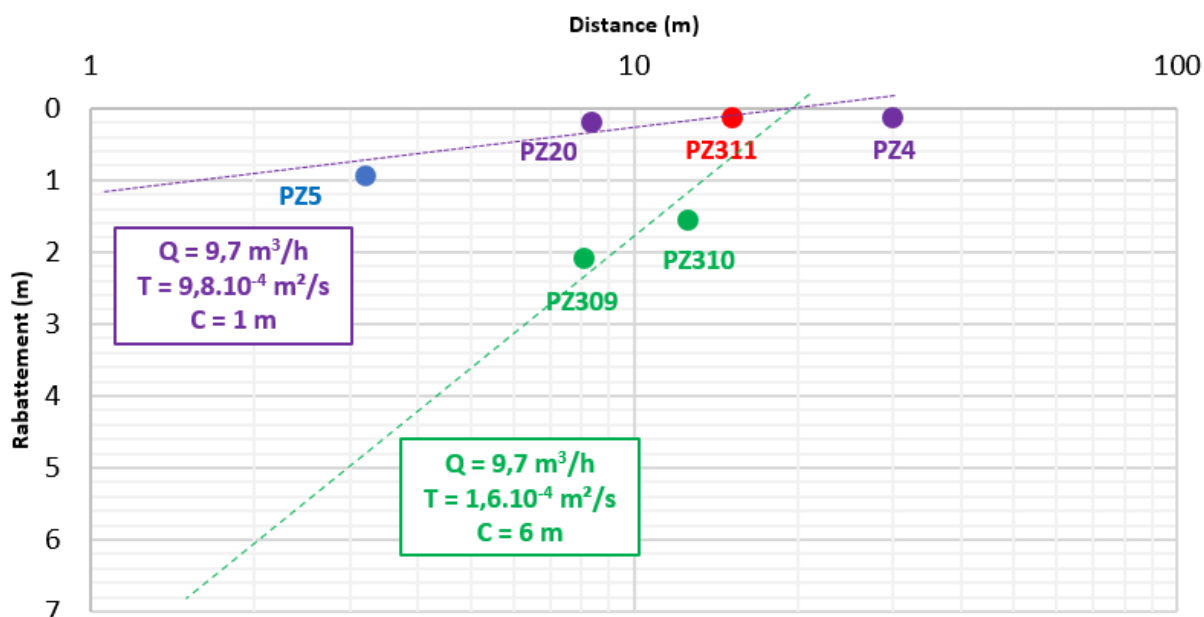


Figure 12 : Interprétation de l'essai de juin 2022 sur MM2

Essais Lefranc et essais au Laboratoire :

- Les 32 essais d'infiltration type Lefranc donnent des résultats très éloignés des interprétations du pompage. L'ensemble des perméabilités relevées sont beaucoup plus faibles pour toutes les formations.
Les plus faibles perméabilités sont rencontrées entre +15 et +25 m NGF dans les Sables de Beauchamps supérieurs et médians (moyenne $1,7.10^{-5}$ m/s). Cette formation reste moins perméable que le Calcaire de Saint-Ouen ;
- Selon les essais au Laboratoire, les perméabilités verticales sont très variables, à l'exception d'une valeur très imperméable. Les résultats de ces essais semblent contradictoires avec l'absence de distinction entre les nappes mentionnées par GAIDF.

Tableau 4 : Synthèse des résultats des essais menés par GAIDF

Formations	Couche considérée			Perméabilité horizontale par pompage d'essai (m/s)	Perméabilité horizontale par essai type Lefranc (m/s)		
	Zone	Profondeur (m/TA)	Cote (NGF)		Min	Max	Moyenne*
Marno Calcaire de Saint Ouen	Fond de fouille	9 à 13 m	25,6 à 21,6	3.10^{-4}	$2,3.10^{-7}$	$5,6.10^{-5}$	$2,2.10^{-5}$
	Base de la formation	13 à 15	21,6 à 19,6		6.10^{-7}	$1,2.10^{-5}$	$6,4.10^{-6}$
Sables de Beauchamp	Toit de la formation	15 à 17	19,6 à 17,6		$4,2.10^{-8}$	$2,3.10^{-5}$	$2,8.10^{-5}$
	Milieu de formation	17 à 25	17,6 à 9,6		2.10^{-7}	$2,2.10^{-5}$	6.10^{-6}
	Base de la formation	25 à 27	9,6 à 7,6		$8,4.10^{-8}$	$5,3.10^{-6}$	$1,8.10^{-6}$
Marnes et Caillasses	Toit de la formation	27 à 29	7,6 à 5,6	$2,8.10^{-3}$	$7,8.10^{-7}$	$1,3.10^{-4}$	$4,4.10^{-5}$
	-	29 à 33	5,6 à 1,6		$3,1.10^{-5}$	$2,8.10^{-4}$	2.10^{-4}

Micromoulinet

- Les 2 micromoulinets réalisés indiquent que l'essentiel des arrivées d'eau sont matérialisées à la transition entre la Base du Calcaire de Saint-Ouen et le sommet des Sables de Beauchamp ;
- Ces résultats restent à nuancer par le faible débit de pompage lors de ces essais (2 m³/h au maximum) : l'ensemble des arrivées d'eau n'ont vraisemblablement pas été sollicitées lors de ces essais.

4.2.4 Sur les éventuelles investigations complémentaires à mener

Afin d'affiner la réflexion, il pourrait être pertinent de réaliser de nouvelles investigations pour :

- Vérifier/préciser la géométrie et la lithologie des Sables de Beauchamp par la réalisation de sondages carottés sur la parcelle.
Toutefois, pour être vraiment pertinent, il serait nécessaire de prévoir un nombre important de sondages pour bien appréhender les variations de faciès et de les coupler à des reconnaissances géophysiques ;
- Réaliser de nouveaux essais type Lefranc au sein de l'aquitard (un essai pour la totalité de l'épaisseur plus argileuse de la formation des Sables de Beauchamp moyens) ;

Toutefois, la réalisation de ces premières investigations pourrait apporter plus de problèmes en mettant en communication plusieurs nappes dont la nappe captive du Lutétien : des mesures spécifiques de comblement de ouvrages devront être envisagées directement après leur création. Aussi, pour éviter de percer l'aquitard plus que nécessaire, nous recommandons de ne pas engager ces investigations (augmentation probable des débits de rabattement à terme).

- Réaliser des essais d'eau (pompage de courte durée avec suivi des niveaux et de la qualité des eaux) dans la totalité des ouvrages du site pour appréhender les variations latérales de perméabilité. Ces essais pourront être envisagés sans avoir besoin de réaliser de nouveaux ouvrages.
Pour les ouvrages mixtes, un essai pourra être réalisé avant et après comblement du fond de l'ouvrage.
Un inventaire des ouvrages résiduels devra être envisagé après la phase de démolition/dépollution en cours ;
- Réaliser un suivi piézométrique de l'ensemble des ouvrages du site jusqu'au démarrage du chantier ;
- Réaliser un nouveau micromoulinet à débit plus important dans les puits MM1 et MM2.

En conclusion, selon le degré de précision souhaité, des investigations complémentaires pourraient être envisagées notamment pour bien appréhender le faciès argileux au sein des Sables de Beauchamp moyens.

De plus, compte tenu des incertitudes sur le comblement des ouvrages existants est recommandé de prévoir dès à présent des adaptations en phase travaux (injections localisées en cas de fortes arrivées d'eau).

5 Actualisation de l'étude des niveaux caractéristiques de la nappe

5.1 Définition des niveaux caractéristiques

Le détail des niveaux caractéristiques de la nappe figure dans le DTU 14.1 (NF P11-221-1, mai 2000 : Travaux de bâtiment - Travaux de cuvelage - Partie 1: Cahier des clauses techniques) et dans l'Eurocode 7 (ANF – AN 4.1). Ces deux documents montrent quelques distinctions spécifiées dans le tableau ci-après :

Tableau 5 : Comparaison des niveaux caractéristiques de la nappe avec le DTU14.1 et l'Eurocode 7

Niveau	DTU 14.1	Eurocode 7
EB	Niveau des plus basses eaux qui donne les actions permanentes	Niveau des basses eaux ou niveau quasi-permanent. Il est défini comme étant susceptible d'être dépassé pendant la moitié du temps de référence
EF	-	Niveau fréquent. Il est défini comme étant susceptible d'être dépassé pendant 1% du temps de référence
EH	Niveau des hautes eaux qui correspond à la crue pouvant se produire au moins une fois tous les 10 ans	Niveau des hautes eaux ou niveau caractéristique. Il correspond au niveau de période de retour 50 ans.
EE	Niveau exceptionnel et conventionnel de l'eau qui correspond au niveau des plus hautes eaux connues et/ou prévisibles	Niveau des eaux exceptionnelles ou niveau accidentel. Il correspond au niveau où doit être prévu, dans la structure, un dispositif d'écoulement empêchant l'eau d'exercer une action plus haute

L'altitude du Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE en m NGF) se détermine à partir de la formule suivante :

$$\text{NPHE} = \text{EB} + \text{B} + \text{VS} + \text{A} + \text{R}$$

Avec

- EB : Niveau d'étiage de la nappe (m NGF) ;
- B : Effet barrage provoqué par les structures enterrées ;
- VS : Battement saisonnier de la nappe dû à la recharge par infiltration des eaux de pluies ;
- A : Amortissement d'une onde de crue de la Seine dans la nappe au droit du site ;
- R : Relèvement de la nappe en cas d'arrêt des prélèvements dans la nappe à proximité ou par réinjection via bassin d'infiltration.

5.2 Hypothèse concernant le niveau d'étiage de la nappe, EB

Un suivi piézométrique de la nappe du Marno-Calcaire de Saint-Ouen a été réalisé au droit du site entre le 19/08/2019 et le 02/09/2020. Ce suivi couvre une année hydrologique complète et met en évidence la période de basses eaux (mois d'août à octobre) avec des niveaux mesurés compris entre +25 m NGF et +25,3 m NGF, et la période de hautes eaux (mois de février à avril) avec des niveaux mesurés compris entre +25,6 m NGF et +25,8 m NGF.

Le niveau médian durant le suivi est de +25,4 m NGF.

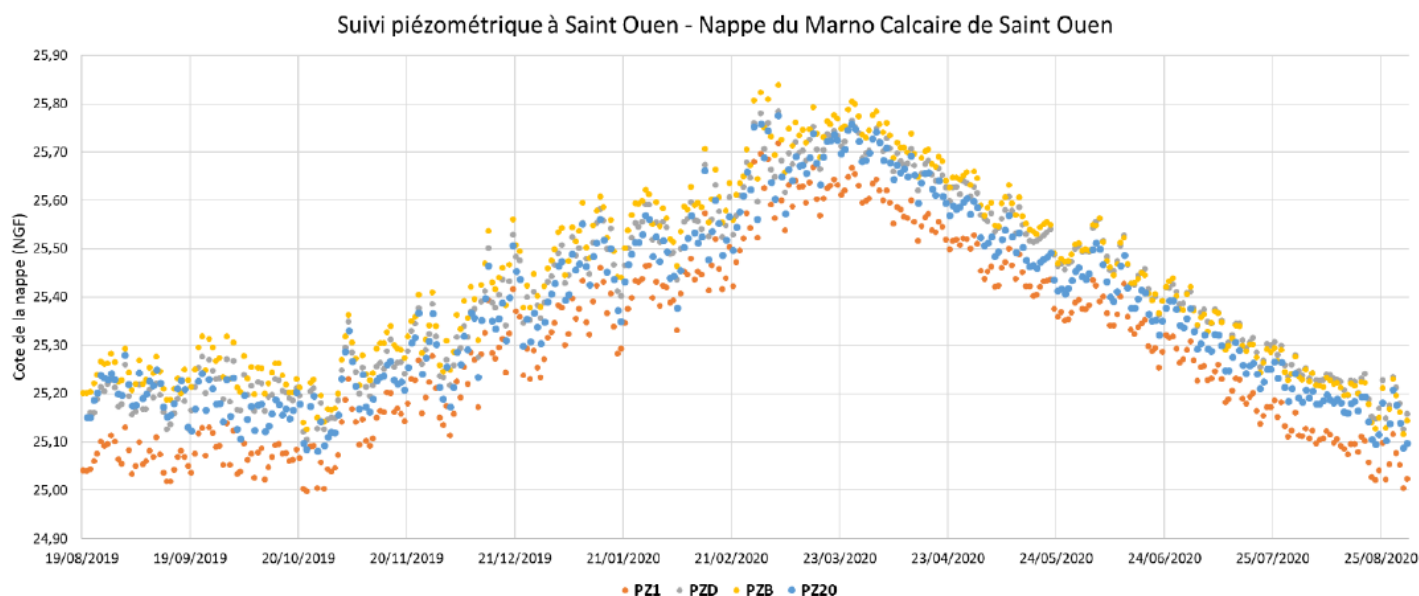


Figure 13 : Suivi piézométrique de la nappe du Bartonien au droit du site entre le 19/08/2019 et le 02/09/2020

D'autres mesures piézométriques ont été réalisées deux fois par an durant 9 années consécutives sur les piézomètres du site PZ16, PZ20, PZ8 et PZ1 entre juin 2010 et mai 2019. Au cours de ce suivi, le niveau moyen a été mesuré à + 25,3 m NGF.

Le niveau EB à l'étiage, défini comme étant susceptible d'être dépassé pendant la moitié du temps de référence, retenu pour le projet est +25,4 m NGF. Ce niveau correspond à une moyenne obtenue sur une période considérée comme étant suffisamment longue et représentative du comportement de la nappe. Compte tenu de la position des ouvrages de suivis dans la partie est du site, le niveau a été considéré comme étant identique sur toute la parcelle du projet (même si des différences d'altimétrie locale peuvent être observées).

EB = +25,4 m NGF

5.3 Effet barrage, B

L'effet barrage a été approché à l'aide du logiciel SEEP/W, version 2019, développé par Geostudio (www.geoslope.com), basé sur la méthode des éléments finis.

Les hypothèses prises en compte pour ce calcul sont :

- une piézométrie synchrone de janvier 2022 ;
- une perméabilité de 3.10^{-4} m/s (donnée GAIDF) ;
- un écoulement du SE vers le NW ;
- un gradient de nappe de 3‰ ;

En tenant compte de ces hypothèses, la hausse du niveau d'eau en amont des sous-sols du site serait de :

B = 0,1 m

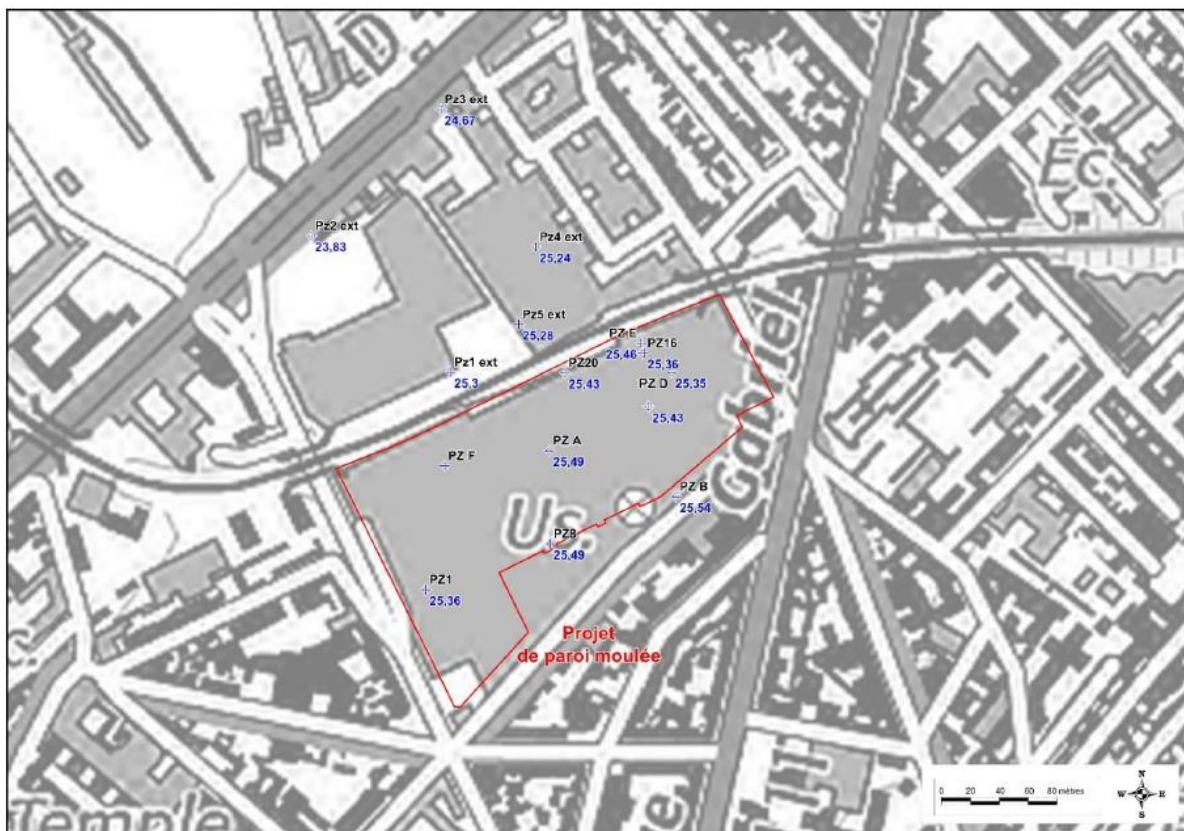


Figure 14 : Géométrie du sous-sol considéré pour le calcul de l'effet barrage

5.4 Battement saisonnier, VS

Pour le battement saisonnier, le suivi piézométrique réalisé entre 2019 et 2020 par GAIDF montre une valeur de l'ordre de 0,7 m alors que le battement pluriannuel observé entre 2010 et 2019 peut atteindre 1 à 1,25 m.

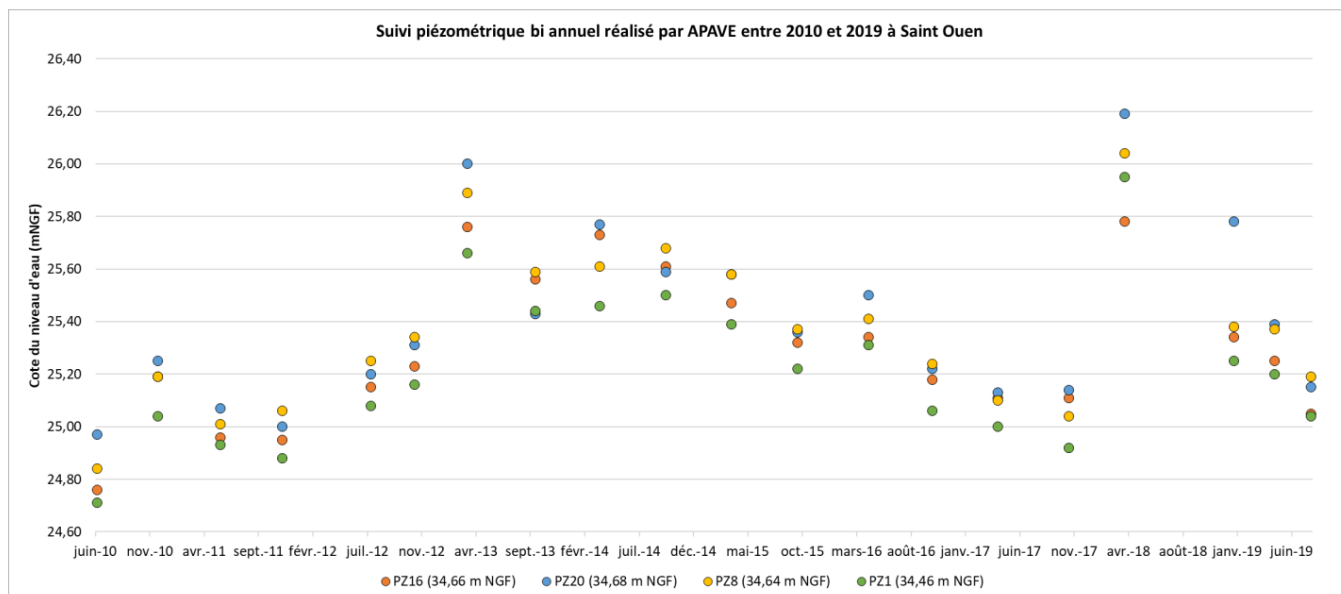


Figure 15 : Suivi piézométrique manuel de la nappe du Bartonien au droit du site entre le 18/06/2021 et le 19/08/2019

5.4.1 Proposition d'un niveau de crue de chantier, EC

Afin d'être cohérent avec les observations effectuées, nous proposons de retenir un niveau de crue de chantier, EC, correspondant à :

$$EC = EB + PS_{\text{observée}} = +25,4 \text{ m NGF} + 0,7 \text{ m} = +26,1 \text{ m NGF}$$

Le suivi piézométrique réalisé par GAIDF a atteint au maximum le niveau +25,8 m NGF en mars 2020. Le niveau proposé correspond approximativement à un battement saisonnier quinquennal.

5.4.2 Estimation des battements d'occurrence 10, 50, 100 et 1 000 ans

Les variations saisonnières peuvent être déterminées à l'aide de chroniques piézométriques in situ ou à défaut à l'aide de chroniques piézométriques disponibles sur des ouvrages représentatifs d'un contexte géologique et hydrogéologique considéré comme similaire.

Chroniques piézométriques disponibles

Ne disposant pas de relevés piézométriques suffisamment précis ou longs sur le site, nous avons utilisé 2 piézomètres tiers, représentatifs d'un contexte géologique et hydrogéologique similaire ou proche :

- Le piézomètre Pz2 (données IGC) du cimetière de Saint-Ouen (à environ 1,5 km à l'est du projet), dont les caractéristiques annoncées sont :
 - Profondeur : 11 m/sol
 - Formation captée : masses et marnes du gypse, Sables de Monceau et sommet du Calcaire de Saint-Ouen
 - Nappe : circulations superficielles

Ce piézomètre nous donne accès à une chronique piézométrique entre 1990 et 2012 sur un pas de temps mensuel et qui permet d'apprécier les variations saisonnières et interannuelles. Par ailleurs, ce piézomètre ne semble pas être soumis à l'influence des crues du chevelu superficiel.

La chronique piézométrique est présentée dans la figure suivante.

Chronique piézométrique - Pz2 du cimetière de Saint-Ouen (MIG+SM)

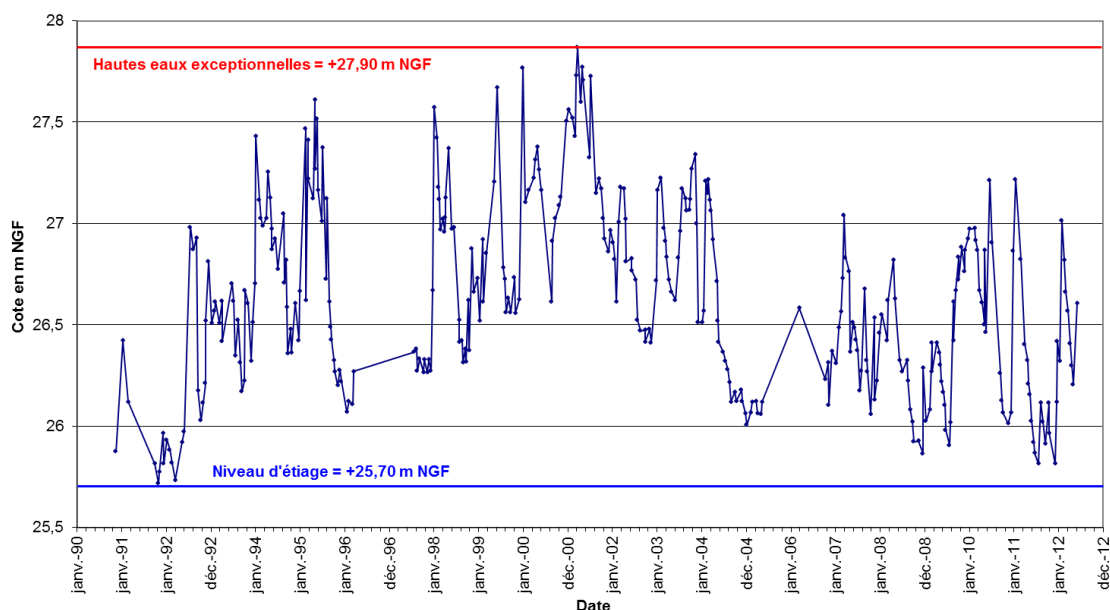


Figure 16 : Evolution du niveau d'eau au niveau du Pz2 du Cimetière de Saint-Ouen

- Le piézomètre de Bonneuil-en-France (données BRGM à environ 8,5 km au NE du projet), dont les caractéristiques annoncées sont :
 - Profondeur : 15,35 m/sol
 - Formation captée : Calcaire de Saint-Ouen
 - Nappe : Bartonien

Ce piézomètre nous donne accès à une chronique piézométrique entre 2007 et 2019 sur un pas de temps journalier. La chronique piézométrique est présentée dans la figure suivante.

Chronique piézométrique - Piézomètre de Bonneuil-en-France (BSS000NMUV)

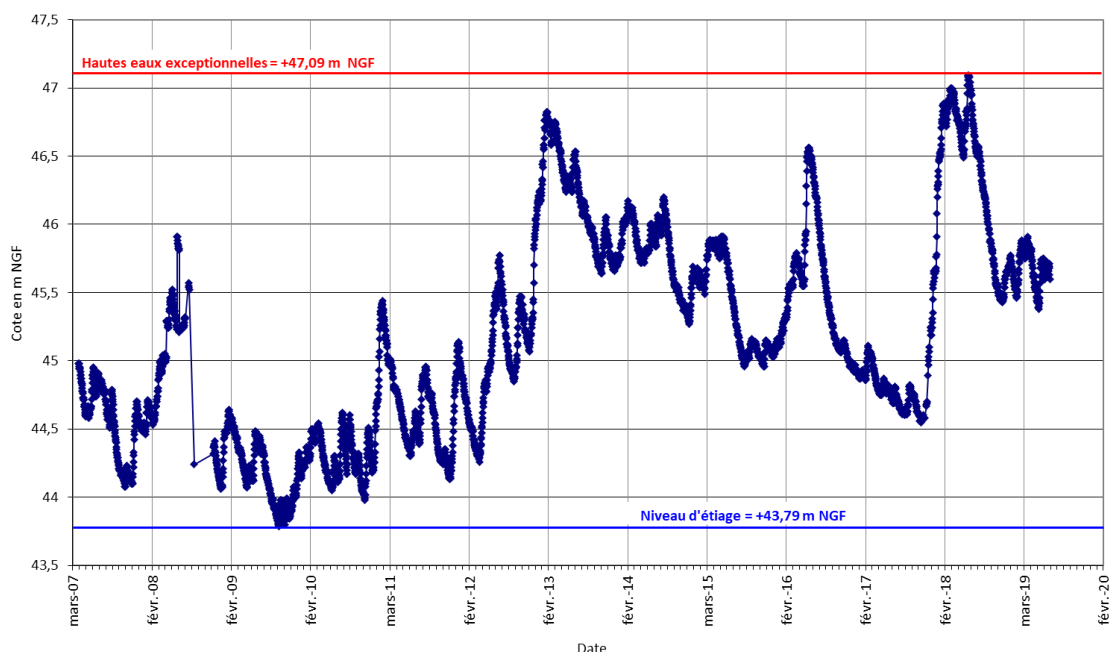


Figure 17 : Evolution du niveau d'eau au niveau du piézomètre de Bonneuil-en-France

Analyse statistique des variations saisonnières

On constate que l'amplitude des variations saisonnières de ces piézomètres varie en fonction des années et que l'amplitude maximale interannuelle peut être relativement importante : déterminer les variations saisonnières normales et exceptionnelles nécessite donc une analyse statistique des données piézométriques.

Tableau 6 : Synthèse des données piézométriques (Pz2 du Cimetière de Saint-Ouen)

Année	Hautes Eaux (m NGF)	Basses Eaux (m NGF)	Moyenne (m NGF)	Battement annuel (m)
1991	26,42	25,72	25,95	0,71
1992	26,98	25,73	26,26	1,25
1993	26,70	26,17	26,50	0,53
1994	27,43	26,36	26,84	1,07
1995	27,61	26,20	26,88	1,41
1996	26,27	26,07	26,14	0,20
1997	26,67	26,27	26,35	0,40
1998	27,57	26,31	26,84	1,26
1999	27,77	26,52	26,85	1,25
2000	27,50	26,62	27,15	0,89
2001	27,87	26,86	27,39	1,01
2002	27,18	26,41	26,74	0,77
2003	27,34	26,51	26,98	0,83
2004	27,22	26,06	26,54	1,15
2005	26,12	26,01	26,08	0,12
2006	26,58	26,10	26,40	0,48
2007	27,04	26,06	26,46	0,98
2008	26,82	25,87	26,29	0,95
2009	26,97	25,91	26,43	1,07
2010	27,21	26,01	26,59	1,20
2011	27,22	25,81	26,18	1,40
2012	27,01	26,21	26,54	0,81
Moyenne	27,07	26,17	26,56	-
Cotes extrêmes	27,9	25,7	-	-
Battement annuel moyen				0,86
Battement interannuel				1,46
Battement exceptionnel				2,15

A noter : les chroniques piézométriques disponibles couvrent au maximum une durée maximale de 22 ans, ce qui rend l'extrapolation des données piézométriques pour des fréquences supérieures à une période de retour de 30 ans assez délicate.

Les hauteurs extrêmes fournies dans la suite de ce rapport peuvent être imprécises.

Tableau 7 : Synthèse des données piézométriques (Bonneuil-en-France)

Année	Hautes Eaux (m NGF)	Basses Eaux (m NGF)	Moyenne (m NGF)	Battement annuel (m)
2007	44,98	44,08	44,56	0,90
2008	45,91	44,17	44,92	1,74
2009	44,64	43,79	44,18	0,85
2010	44,69	43,98	44,3	0,71
2011	45,44	44,13	44,65	1,31
2012	46,03	44,26	45,02	1,77
2013	46,82	45,64	46,21	1,18
2014	46,2	45,27	45,79	0,93
2015	45,91	44,96	45,41	0,95
2016	46,56	44,95	45,53	1,61
2017	45,25	44,55	44,8	0,70
2018	47,09	45,28	46,3	1,81
2019	45,91	45,38	45,67	0,53
Moyenne	44,98	26,17	44,56	-
Cotes extrêmes	47,09	43,79	-	-
Battement annuel moyen				1,15
Battement interannuel				2,44
Battement exceptionnel				3,30

Ajustement statistique

Un ajustement statistique a été réalisé en tenant compte de la loi de Gauss (ou loi Normale) et de Gumbel pour les épisodes extrêmes.

Par sécurité, nous avons choisi de garder la valeur la plus défavorable du NPHE, autrement dit la valeur la plus haute obtenue avec les différentes méthodes. L'exploitation des données conduit à adopter les cotes caractéristiques suivantes :

Tableau 8 : Ajustement statistique des variations saisonnières

	Niveau minimum m (m NGF)	Période de retour 10 ans		Période de retour 50 ans		Période de retour 100 ans		Période de retour 1000 ans	
		Cote en m NGF	Élévation en m	Cote en m NGF	Élévation en m	Cote en m NGF	Élévation en m	Cote en m NGF	Élévation en m
Bonneuil	+43,79	+46,83	3,04	+47,84	4,05	+48,27	4,48	+49,67	5,88
PZ2	+25,7	+27,68	1,98	+28,28	2,44	+28,53	2,83	+29,37	3,67
Projet	+24,71	+26,23	1,52	+26,64	1,93	+26,81	2,10	+27,38	2,67

5.5 Evaluation de l'impact des ondes de crue, A

5.5.1 Justification

Suite à l'étude comparative des variations du niveau de la Seine avec les chroniques de 238 piézomètres (160 piézomètres de l'IGC et 108 piézomètres de la RATP) implantés dans Paris et dans les villes limitrophes, Aurélie Lamé (2013) a délimité une zone d'alimentation de la nappe phréatique par la Seine qui se rapproche géographiquement du lit majeur du fleuve. Cette délimitation montre que le site n'intercepterait pas la zone d'influence de la nappe par la Seine et s'en trouverait à environ 500 m de distance. La zone autour du projet n'a toutefois pas fait l'objet de mesures.

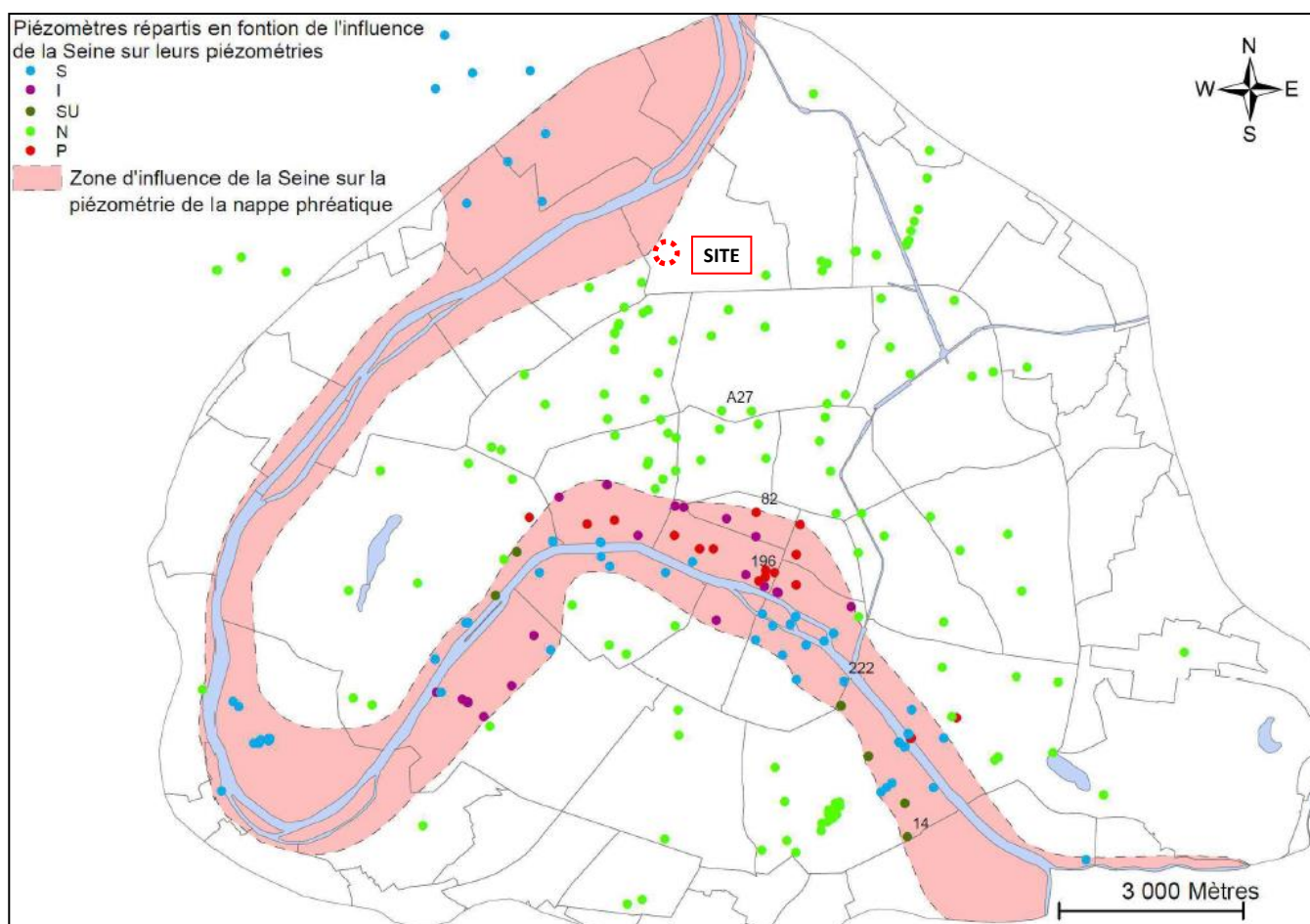


Figure 18 : Carte de la limite d'influence de la Seine sur la piézométrie des nappes (Lamé, 2013)

Le suivi piézométrique réalisé entre 2019 et 2020 ainsi que le niveau de la Seine ont été représentés sur la figure ci-dessous. Il semble difficile de voir une influence significative du niveau de la Seine sur l'évolution du niveau piézométrique, a minima pour les crues de faible intensité.

Ainsi en première approche, il n'existerait pas d'amortissement d'onde de crue au niveau du projet pour les crues de faible intensité.

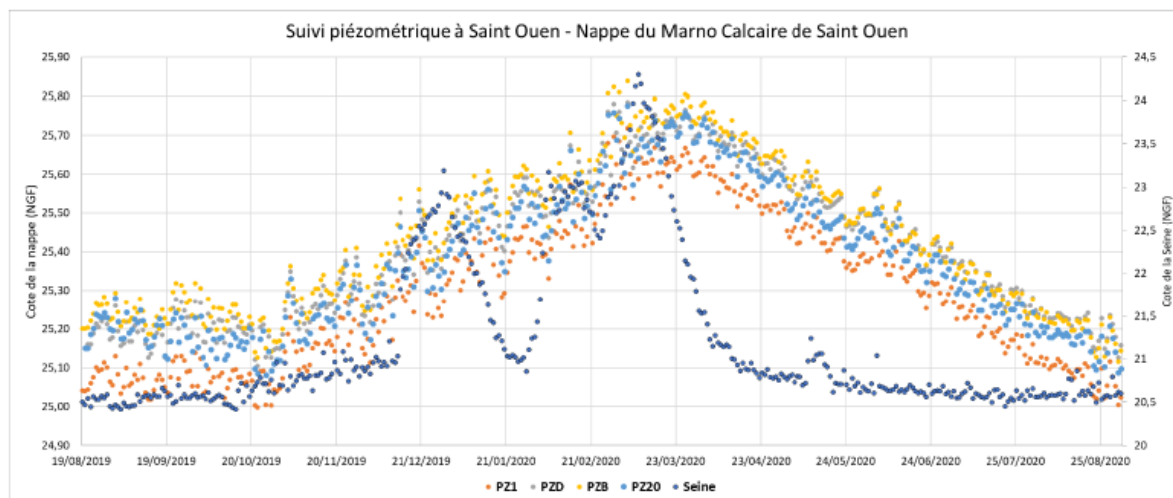


Figure 19 : Suivi piézométrique à Saint-Ouen, niveau de la Seine à Chatou (source :GAIDF)

Les parties suivantes consistent en une évaluation théorique de l'onde de crue pour des crues d'occurrence variable.

5.5.2 Méthodologie

L'impact de l'onde de crue de rivière sur le niveau de la nappe via les berges et/ou le lit de la nappe est calculé à partir de la formule suivante :

$$CS = CS_0 \times \exp\left(-x \times \sqrt{\frac{\pi \times S}{T \times t_0}}\right)$$

Avec :

- CS_0 : amplitude de crue
- T : transmissivité en m^2/s
- S : Coefficient d'emménagement
- x : distance à la Seine
- t_0 : durée de la crue

Le rapport T/S correspond à la diffusivité D de l'aquifère.

Approche de la diffusivité de la nappe

A partir des données bibliographiques, la diffusivité de la nappe a été approchée en utilisant les paramètres hydrodynamiques moyens de la nappe :

Tableau 9 : Approche de la diffusivité de la nappe

Paramètre	Pour le calcul de l'amortissement, A
Perméabilité (m/s)	3.10^{-4}
Epaisseur (m)	7
Transmissivité (m ² /s)	2.10^{-3}
Emmagasinement	1%*
Diffusivité (m ² /s)	0,2

* : représentatif d'une nappe libre

La valeur relativement faible de la diffusivité de la nappe témoigne d'une réalimentation théoriquement limitée de la nappe au droit du site.

Plus la valeur de diffusivité est grande, plus fort sera l'impact de la crue de Seine sur le niveau de la nappe : l'onde de crue est transmise plus rapidement dans l'aquifère.

Evaluation de l'amortissement de la crue

Les cotes de crues retenues sont issues des diverses bases de données consultées :

Tableau 10 : Amplitudes de crues de Seine considérées pour le calcul de l'amortissement

Récurrence	Niveau considéré (m NGF)	Amplitude (m)
Retenue normale	+23,56	-
10 ans	+27,74	4,18
50 ans	+28,79	5,23
100 ans	+29,74	6,18
1000 ans	+31,93	8,37

5.5.3 Evaluation de l'amortissement de la crue

Les calculs d'amortissement des crues de Seine ont été approchés en considérant des durées théoriques de crue de :

- 10 jours pour la crue décennale
- 45 jours pour la crue cinquantennale
- 60 jours pour les crues centennale et millénale

En tenant compte des hypothèses précédentes, les calculs d'amortissement théorique des crues de Seine ont été approchés :

Tableau 11 : Evaluation de l'amortissement des crues de Seine, A

Distance à la berge (m)	Récurrence	Amplitude de la crue (m)	Durée de la crue (cf. Figure 20)	Amortissement de la crue (m)
1 100	10 ans	4,18	10 jours	0,04
	50 ans	5,23	45 jours	0,57
	100 ans	6,18	60 jours	0,91
	1000 ans	8,37		1,23

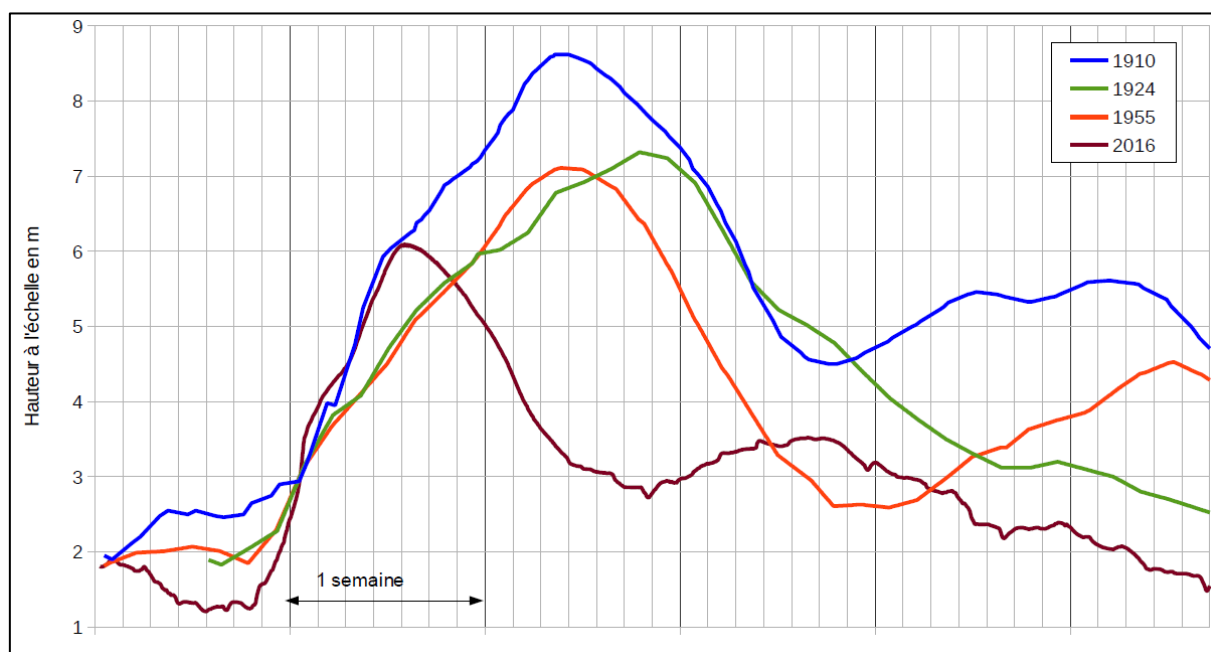


Figure 20 : Illustration des durées des crues historiques

5.6 Arrêt des pompages, R

5.6.1 Justification

Dans ce chapitre seront étudiés uniquement les impacts liés à l'arrêt des pompages. En effet, en fonction de la conception du projet (non connue dans le détail selon notre connaissance du projet), d'autres impacts complémentaires pourraient être à ajouter, notamment :

- L'impact de l'infiltration des eaux pluviales du projet à proximité du sous-sol. En effet, la réglementation en vigueur impose une gestion des eaux pluviales à la parcelle de l'intégralité des eaux pluviales générées par une nouvelle imperméabilisation. Cette gestion peut passer par une infiltration vers la nappe phréatique ;
- L'impact des réinjections des eaux issues de la géothermie sur nappe envisagée pour le projet. A ce stade, une remontée du niveau de la nappe du Lutétien de près de 5 m est prévue dans le voisinage des forages de réinjection. Or, les données à notre disposition ne permettent pas d'évaluer la transmission par drainance ascendante de la nappe du Lutétien vers la nappe du Bartonien. Cette réhausse peut être totale en cas d'ouvrages géotechniques non comblés dans les Règles de l'Art (cf. §4.2.2).

5.6.2 Approche des arrêts de pompage

Des prélèvements d'eau proches du site induisent une dépression du niveau d'eau de la nappe, ce qui se traduit par un impact sur le niveau piézométrique au droit du site.

Des prélèvements de rabattement de nappe (temporaires ou permanents), industriels ou de géothermie ne sont pas à exclure dans le voisinage du projet.

D'après la carte hydrologique de Paris de 1862 (A. Delesse), le niveau de la nappe au droit du site est +27,6 m dit Bourdalouë, soit +27,23 m NGF. L'état de la nappe (basses eaux ou hautes eaux) au moment de la réalisation de cette carte n'est pas connu.

La carte piézométrique de Delesse permet de connaître la piézométrie « naturelle » de la nappe, puisqu'elle est considérée pour la région parisienne comme étant la carte de référence de niveaux de nappe non affectés par le développement industriel occasionnant des pompages dans la nappe et par les infrastructures urbaines souterraines.

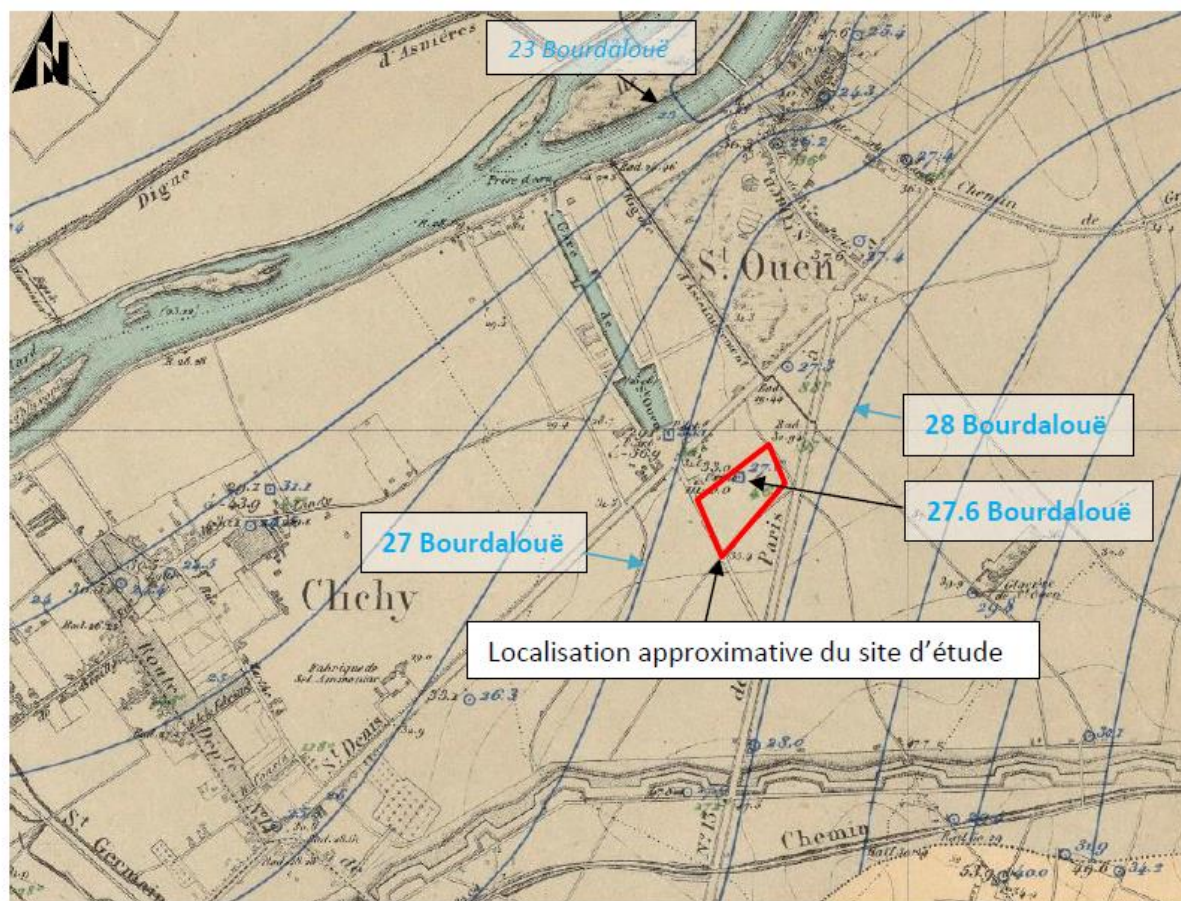


Figure 21 : Carte de Delesse à Saint-Ouen (source : GAIDF)

En considérant un niveau de nappe historique non influencé à +27,23 m NGF et un niveau moyen récent (et vraisemblablement influencé par des pompages) à +25,4 m NGF en 2019 et 2020, nous pouvons considérer un élèvement possible de nappe de 1,83 m en cas d'arrêt des pompages.

On suppose toutefois pour le calcul du NPHE que ce relèvement de la nappe n'est susceptible de se produire que pour les épisodes de plus forte récurrence. :

$$R_{50} = 0,92 \text{ m}$$

$$R_{100} = R_{1000} = 1,83 \text{ m}$$

Dans ces hypothèses, il est considéré qu'environ 50% des rabattements de nappe sont arrêtés en cas d'épisode cinquantennal.

5.7 Synthèse des niveaux caractéristiques de la nappe retenus

En considérant les diverses hypothèses exposées dans les paragraphes précédents, la synthèse des niveaux caractéristiques est fournie dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Synthèse des niveaux caractéristiques de la nappe au niveau du projet

Scénario	Réurrence 5 ans = EC	Réurrence 10 ans = EF	Réurrence 50 ans = EH ₅₀	Réurrence 100 ans= EH ₁₀₀	Réurrence 1000 ans = EE
Distance à la Seine (m)	1 100				
Cote de la Seine (m NGF)	+23,56	+27,74	+28,79	+29,74	+31,93
Amplitude de crue (m)	-	4,18	5,23	6,18	8,37
Durée de crue (jours)	-	10	45	60	
Niveau Moyen (m NGF), = EB	+25,4				
Battement saisonnier – VS (m)*	0,7	0,83	1,24	1,41	1,98
B – Effet Battage (m)	-	0,1			
A - Amortissement de crue (m)	0	0,04	0,57	0,91	1,23
Remontée induite par les arrêts de pompage – R (m)	0	0,92	1,83	1,83	1,83
NPHE (m NGF)	+26,10	27,28	29,14	29,65	30,55

* : données du Tableau 8 en considérant un niveau d'étiage de +25,4 m NGF

Ces estimations de niveaux caractéristiques ont été définies à partir de formules analytiques sommaires. Ces résultats restent à interpréter avec précaution puisqu'ils sont issus de l'analyse de données ponctuelles d'essai et de mesures de niveau d'eau sur de courtes périodes.

En outre, ces niveaux ne tiennent pas compte des évolutions du niveau piézométrique localisés en lien avec les aménagements du projet (infiltration des eaux pluviales, géothermie...).

Par ailleurs, il n'est pas exclu d'observer ponctuellement des niveaux de nappe perchés au sein des Sables de Monceau et/ou des remblais de surface. Une protection adaptée devra être mise en œuvre pour se protéger de ces arrivées temporaires (isolation partielle, drainage périmétrique...).

6 Evaluation du débit d'exhaure en phase travaux

6.1 Définition de la profondeur de la fiche hydraulique

A partir de l'analyse des données disponibles et des investigations réalisées dans le cadre des études GAIDF, la Maitrise d'Œuvre de l'opération envisage la mise en place d'une paroi moulée pour permettre la mise en place des niveaux d'infrastructures enterrées dans les divers scénarios étudiés (cf. §2.3).

Dans le cadre de la note géotechnique (Rapport A120064), Antea group indique que la paroi, y compris son prolongement pour fiche hydraulique, devra être ancrée dans les Sables de Beauchamp (fiche mécanique à +8,1 m NGF pour le scénario B1 et à +13 m NGF pour le scénario B2).

Compte tenu de la présence d'un horizon semi-étanche au sein de la formation des Sables de Beauchamp, la profondeur d'ancrage de la fiche hydraulique recommandée serait de +17,5 m NGF (cas du scénario A).

Cette profondeur correspond à la profondeur des sables de Beauchamp moyens (moins profonds et plus épais) dans la partie sud et ouest du site.

Dans cette configuration, l'isolation de la paroi sera imparfaite du fait de la géométrie et des variations de faciès des sables de Beauchamps. **Ainsi, il est recommandé de prévoir dès à présent des adaptations en phase travaux (injections localisées en cas de fortes arrivées d'eau ou mise en place d'un bouchon injecté).**

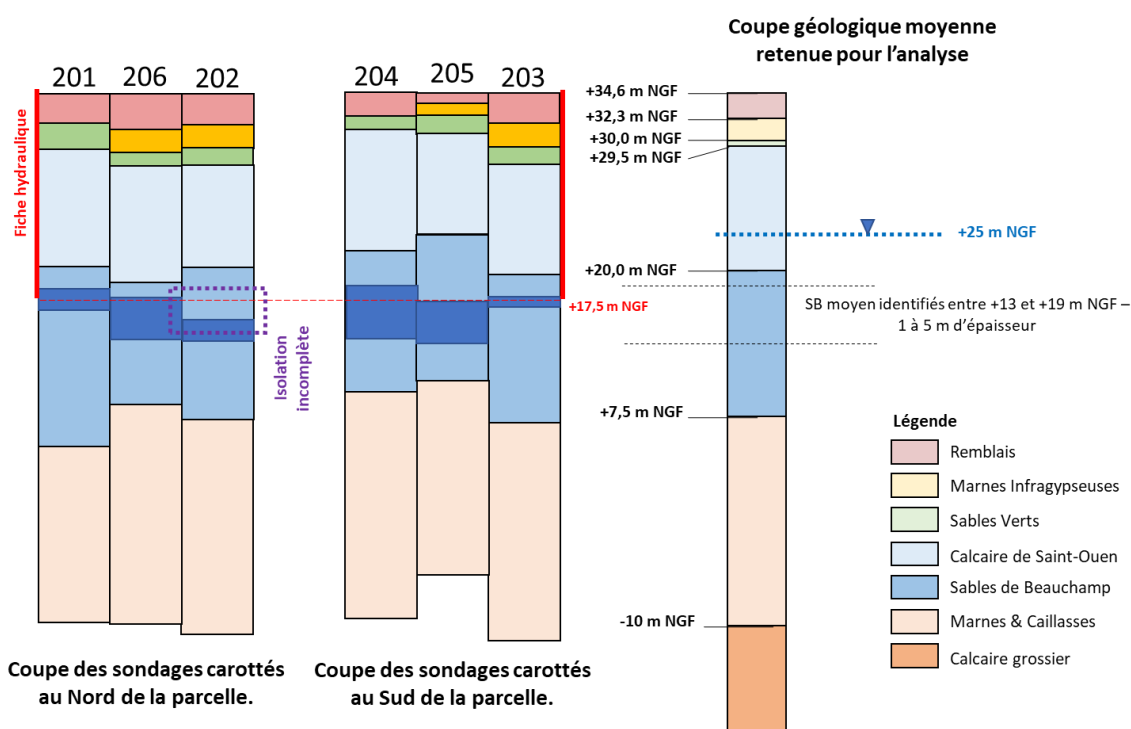


Figure 22 : Matérialisation de la profondeur minimale de la fiche hydraulique

Les estimations de débit d'exhaure de la nappe selon les diverses configurations/géométries sont mentionnées dans les paragraphes suivants. Ces calculs intègrent la profondeur minimale de la fiche hydraulique indiquée précédemment. Dans ces configurations, aucun rabattement n'est envisagé au niveau du Calcaire de Saint-Ouen. Toutefois, un pompage serait partiellement réalisé dans les Sables de Beauchamp.

A ce stade, compte tenu de la complexité du contexte et des infrastructures existantes et projetées, l'impact hydraulique, qu'il sera nécessaire de présenter dans le dossier réglementaire, ne pourra pas s'appréhender autrement que via une modélisation hydrodynamique.

6.2 Scénario A : 3 niveaux de sous-sols

6.2.1 Hypothèses retenues pour le calcul

Les hypothèses retenues pour caractériser le projet sont les suivantes :

- Cote terrain naturel : +34,6 m NGF
- Superficies des fouilles ; 37 636 m²
- Niveau fini maximal des sous-sols : +24,1 m NGF
- Niveau du rabattement : +25,1 m NGF (supposé 1 m sous le radier)
- Niveau de la nappe : +25,4 m NGF = niveau EB
+26,1 m NGF = niveau de protection du chantier
- Perméabilités supposées pour les SB moyens : comprises entre 1.10^{-6} et 5.10^{-5} m/s
- Perméabilités supposées pour les SB aquifères : comprises entre 1.10^{-4} et 3.10^{-4} m/s

Il a donc été considéré, que les fouilles du chantier seront maintenues hors d'eau jusqu'à une cote de la nappe de +26,1 m NGF. Au-delà, les fouilles pourraient être inondées et le chantier arrêté pendant la crue de la nappe. Ce niveau devra être validé par le maître d'ouvrage préalablement au démarrage du chantier.

6.2.2 Débit de rabattement au sein de la paroi moulée

Des estimations de débit ont été réalisées à partir de la formule de Davidenkoff au sein des Sables de Beauchamp moyens (test de sensibilité). Compte tenu de la présence d'une paroi partiellement étanche, une hypothèse (probable) en termes de linéaire de parois concerné par cette absence d'isolation a été formulée :

Tableau 13 : Estimations des débits pour le scénario A (Davidenkoff)

Perméabilité (m/s)	Contexte	Niveau d'eau	Hauteur de rabattement	Débit théorique
1.10 ⁻⁶	Cas enceinte totalement étanche	+26,1 m NGF	3 m	<5 m³/h
5.10 ⁻⁶				5-7,5 m³/h
1.10 ⁻⁵ (cas probable)				10-15 m³/h
5.10 ⁻⁵				50-60 m³/h
1.10 ⁻⁴	Cas enceinte totalement non étanche			130-150 m³/h
2.10 ⁻⁴ (cas probable)				260-280 m³/h
3.10 ⁻⁴				410-430 m³/h
Hypothèse concernant la proportion d'enceinte non étanche		Perméabilité		Débit théorique
60% totalement étanche 40% partiellement étanche		Extrême minimum		50-60 m³/h
		Cas probable		110-130 m³/h
		Extrême maximum		190-210 m³/h

Ces débits ont été évalués en considérant un niveau d'eau en crue (+26,1 m NGF), avant inondation de la fouille.

Le gradient en pied de paroi moulée conditionne la stabilité hydrogéotechnique (effet de renard hydraulique, stabilité de la fouille...) de la solution qui devra être vérifiée/validée en phase G2-PRO lors que la solution définitive sera retenue.

6.3 Scénario B1 : 5 niveaux de sous-sols

6.3.1 Hypothèses retenues pour le calcul

Les hypothèses retenues pour caractériser le projet sont les suivantes :

- Cote terrain naturel : +34,6 m NGF
- Superficies des fouilles ; 14 000 m²
- Niveau fini maximal des sous-sols : +18,5 m NGF
- Niveau du rabattement : +17,5 m NGF (supposé 1 m sous le radier)
- Niveau de la nappe : +25,4 m NGF = niveau EB
+26,1 m NGF = niveau de protection du chantier
- Perméabilités supposées pour les SB moyens : comprises entre 1.10^{-6} et 5.10^{-5} m/s
- Perméabilités supposées pour les SB aquifères : comprises entre 1.10^{-4} et 3.10^{-4} m/s

Il a donc été considéré, que les fouilles du chantier seront maintenues hors d'eau jusqu'à une cote de la nappe de +26,1 m NGF. Au-delà, les fouilles pourraient être inondées et le chantier arrêté pendant la crue de la nappe.

Ce niveau devra être validé par le maître d'ouvrage préalablement au démarrage du chantier.

6.3.2 Débit de rabattement au sein de la paroi moulée

Des estimations de débit ont été réalisées à partir de la formule de Davidenkoff au sein des Sables de Beauchamp moyens (test de sensibilité). Compte tenu de la présence d'une paroi partiellement étanche, une hypothèse (probable) en termes de linéaire de parois concerné par cette absence d'isolation a été formulée :

Tableau 14 : Estimations des débits pour le scénario B1 (Davidenkoff)

Perméabilité (m/s)	Contexte	Niveau d'eau	Hauteur de rabattement	Débit théorique
1.10 ⁻⁶	Cas enceinte totalement étanche	+26,1 m NGF	8,6 m	5-7,5 m³/h
5.10 ⁻⁶				20-30 m³/h
1.10 ⁻⁵ (cas probable)				50-60 m³/h
5.10 ⁻⁵				260-270 m³/h
1.10 ⁻⁴	Cas enceinte totalement non étanche			170-150 m³/h
2.10 ⁻⁴ (cas probable)				340-360 m³/h
3.10 ⁻⁴				520-540 m³/h
Hypothèse concernant la proportion d'enceinte non étanche		Perméabilité		Débit théorique
60% totalement étanche 40% partiellement étanche		Extrême minimum		60-80 m³/h
		Cas probable		130-150 m³/h
		Extrême maximum		240-260 m³/h

Ces débits ont été évalués en considérant un niveau d'eau en crue (+26,1 m NGF), avant inondation de la fouille. Toutefois, compte tenu de la profondeur de la fiche mécanique nécessaire dans le cadre de cette solution (+8,1 m NGF) et de la captivité de la nappe du Lutétien, **nous ne recommandons pas la mise en œuvre de cette solution dans la mesure où le toit des Marnes et Caillasses peut localement être plus haut que la profondeur de la fiche définie à partir du modèle géotechnique. Dans ce cas un**

apport d'eau complémentaire conséquent serait à prévoir (non évaluable à partir des éléments à notre disposition).

En outre, la mise en œuvre d'un dispositif géothermique (forage de rejet) pourrait également interagir avec la paroi.

6.4 Scénario B2 : 4 niveaux de sous-sols

6.4.1 Hypothèses retenues pour le calcul

Les hypothèses retenues pour caractériser le projet sont les suivantes :

- Cote terrain naturel : +34,6 m NGF
- Superficies des fouilles ; 21 500 m²
- Niveau fini maximal des sous-sols : +21,3 m NGF
- Niveau du rabattement : +20,3 m NGF (supposé 1 m sous le radier)
- Niveau de la nappe : +25,4 m NGF = niveau EB
+26,1 m NGF = niveau de protection du chantier
- Perméabilités supposées pour les SB moyens : comprises entre 1.10^{-6} et 5.10^{-5} m/s
- Perméabilités supposées pour les SB aquifères : comprises entre 1.10^{-4} et 3.10^{-4} m/s

Il a donc été considéré, que les fouilles du chantier seront maintenues hors d'eau jusqu'à une cote de la nappe de +26,1 m NGF. Au-delà, les fouilles pourraient être inondées et le chantier arrêté pendant la crue de la nappe.

Ce niveau devra être validé par le maître d'ouvrage préalablement au démarrage du chantier.

6.4.2 Débit de rabattement au sein de la paroi moulée

Des estimations de débit ont été réalisées à partir de la formule de Davidenkoff au sein des Sables de Beauchamp moyens (test de sensibilité). Compte tenu de la présence d'une paroi partiellement étanche, une hypothèse (probable) en termes de linéaire de parois concerné par cette absence d'isolation a été formulée :

Tableau 15 : Estimations des débits pour le scénario B2 (Davidenkoff)

Perméabilité (m/s)	Contexte	Niveau d'eau	Hauteur de rabattement	Débit théorique
1.10 ⁻⁶	Cas enceinte totalement étanche	+26,1 m NGF	5,8 m	<5 m³/h
5.10 ⁻⁶				7,5-10 m³/h
1.10 ⁻⁵ (cas probable)				15-20 m³/h
5.10 ⁻⁵				70-80 m³/h
1.10 ⁻⁴	Cas enceinte totalement non étanche			210-220 m³/h
2.10 ⁻⁴ (cas probable)				420-440 m³/h
3.10 ⁻⁴				520-540 m³/h
Hypothèse concernant la proportion d'enceinte non étanche		Perméabilité		Débit théorique
60% totalement étanche 40% partiellement étanche		Extrême minimum		80-100 m³/h
		Cas probable		170-180 m³/h
		Extrême maximum		290-310 m³/h

Ces débits ont été évalués en considérant un niveau d'eau en crue (+26,1 m NGF), avant inondation de la fouille. Le gradient en pied de paroi moulée conditionne la stabilité hydrogéotechnique (effet de renard hydraulique, stabilité de la fouille...) de la solution qui devra être vérifiée/validée en phase G2-PRO lors que la solution définitive sera retenue.

6.5 Dispositifs de rabattement envisageables

En fonction du contexte hydrogéologique et des débits, plusieurs techniques de rabattement sont envisageables :

- La mise en place de pointes filtrantes en périphérie des fouilles ;
- La mise en place de forages de rabattement au centre des fouilles ;
- La mise en place d'un drainage en fond de fouille ;
- Une solution mixte selon les enjeux et les délais d'exécution des travaux et les couts des différentes techniques.

Chacune des solutions présente des avantages et inconvénients, synthétisés ci-dessous :

Tableau 16 : Avantages et inconvénients des solutions de rabattement envisagées

Technique	Avantage	Inconvénient
Drainage (matelas et tranchées)	Rabattement homogène de la fouille Possibilité de sur-rabattement au niveau des pieux par le positionnement de tranchées	En fonction de la hauteur à rabattre, nécessite plusieurs phases de drainage Risque d'entraînement de fines impactant la qualité du rejet du fait de ces différentes phases
Forages de rabattement	Nombre de forage limité	Réalisation à l'intérieur des fouilles Un dispositif de pompage par forage
Pointes filtrantes	Réalisation en périphérie de la fouille Un seul dispositif de pompage (pompage sous vide)	Nombre important d'ouvrages Risque d'entraînement de sable/ensablement d'ouvrage Sur-rabattement à prévoir pour assurer le niveau de rabattement au centre de la fouille, ce qui induira un sur-pompage (débit et volume) significatif

Le scénario B1 n'étant pas recommandé, et à la vue des débits annoncés, le dispositif de rabattement le plus pertinent serait la mise en œuvre d'un dispositif de pompage par forage, couplé si nécessaire à un dispositif de drainage par tranchées. Le dispositif de rabattement envisagé devra être précisé par la maîtrise d'œuvre.

6.6 Remarque concernant les débits

Concernant les débits annoncés précédemment, il y a lieu d'ajouter :

- Le **débit de vidange** durant la phase de rabattement. Ce débit correspond à la vidange des terrains de la zone influencée et terrassée. De plus, ce débit peut être, momentanément, fortement augmenté par la vidange d'horizons perméables (graveleux ou sableux au niveau des remblais). Lors de l'ouverture des fouilles, des aménagements devront être faits de

manière à ce que les eaux qui pourraient circuler au sein de ces horizons, par exemple après une grosse averse, soient bien drainées et évacuées en direction des fouilles.

En d'autres termes, lors de l'ouverture des fouilles, il sera nécessaire de prévoir de pomper un débit plus important ponctuellement. Une solution alternative serait de pomper au débit de rabattement envisagé pendant plusieurs jours (voire semaines) avant le début du terrassement de manière à atteindre un régime stabilisé ;

- Le **débit des précipitations** durant une averse. Ce débit qui correspond aux apports météoriques sur l'emprise de la fouille peut considérablement augmenter le débit de drainage. L'incidence de ce débit dépend notamment de la dimension de la fouille et de la nature des terrains.

Ainsi, en première approche, en considérant une pluie de 10 mm d'une heure, le débit des précipitations pourrait dépasser 350 m³/h (pour une fouille de 37 636 m², en ne considérant que les apports verticaux) ce qui représente plus que le débit probable de rabattement envisagé dans la solution la plus probable.

Par ailleurs, le débit de rabattement pourrait se voir largement augmenté (non quantifiable à ce stade) par :

- Une éventuelle **défaillance du bétonnage de la paroi moulée** ou des joints entre panneaux. Une venue d'eau complémentaire venant de l'extérieur de la fouille serait alors observée.
- La présence **d'un ou plusieurs anciens forages ou sondages géotechniques** (sondage pressiométrique ou carotté) qui auraient été mal rebouchés. Ces forages ou sondages ayant percé l'aquitard des Sables de Beauchamp moyens, permettraient des résurgences de la nappe lutétienne au sein de la fouille en phase chantier ;
- Les éventuels **prélèvements nécessaires au sein de la nappe du Lutétien pour assurer la stabilité du fond de fouille** (puits de décharges). Ce point devra être vérifié/validé en phase G2-PRO lors que la solution définitive sera retenue.

7 Modalité de gestion des eaux d'exhaure en phase travaux

7.1 Solutions envisageables

Plusieurs solutions sont envisageables pour le rejet des eaux de rabattement :

- Le rejet dans le réseau d'assainissement du conseil Départemental de Seine-Saint-Denis ;
- Le rejet direct en Seine (via une canalisation de rejet) ;
- La réinjection des eaux via des forages/puits de réinjection ;
- Une solution mixte.

7.2 Contraintes à prendre en compte

7.2.1 Pour un rejet au réseau d'assainissement

Le rejet des eaux d'exhaure dans les réseaux d'assainissement correspond à la solution la plus simple à mettre en œuvre mais implique des coûts proportionnels à la qualité et au volume d'eau rejeté.

- Une **convention de rejet** devra être établie entre le pétitionnaire, le Conseil Départemental des Hauts de Seine (propriétaire du réseau), le SIAAP (collecte et traitement des eaux) et le gestionnaire du réseau.
Cette convention fixera les modalités du rejet (localisation, durée, débit, qualité des rejets...) ainsi que les modalités d'autosurveillance et de contrôle (relevé du compteur, analyses d'eau...).
En première approche, selon les éléments indiqués par les services du Département de Seine-Saint-Denis, l'ovoïde présent sous l'avenue du Capitaine Glaner dispose d'une capacité d'environ 1 400 m³/h : une autorisation jusqu'à un débit de 140 m³/h serait envisageable.
- D'un **point de vue réglementaire**, le rejet des eaux de rabattement dans un réseau d'assainissement n'est pas concerné par le Code de l'Environnement. En effet, l'Administration considère que le propriétaire de ce réseau dispose de sa propre autorisation).
Par ailleurs, le rejet devra justifier de la compatibilité au SDAGE Seine-Normandie qui recommande de limiter les eaux claires dans les réseaux d'assainissement notamment. Pour obtenir l'accord de la part de l'Administration, il faudrait justifier que le rejet au milieu naturel (rejet en Seine ou réinjection) est techniquement irréaliste ou que le coût des travaux est disproportionné.
- D'un **point de vue technique**, les eaux de rejet devront répondre à des objectifs qualitatifs. La qualité des eaux devrait respecter ces prescriptions. Toutefois, lors de la phase de démarrage des opérations de rabattement, il est possible que les ouvrages de pompage/drainage ne soient pas complètement développés et que l'eau soit chargée en fines au démarrage du pompage en raison de la nature argileuse des terrains d'ancrage. Aussi, il sera donc nécessaire de prévoir la mise en place d'un dispositif de décantation adapté avant rejet au réseau.
Une autosurveillance des rejets est à prévoir avec un suivi régulier du ou des compteurs et la réalisation d'analyses d'eau. La fréquence de prélèvement pour analyses pourrait par exemple être de 1 par mois en régime stabilisé. Au démarrage du pompage de rabattement, il pourra

être procédé à des prélèvements pour analyses plus fréquentes (par exemple 1 prélèvement par semaine jusqu'à la stabilisation).

De manière classique dans ce contexte, le programme analytique pourrait être le suivant : matières en suspension, DCO, DBO5, matières inhibitrices, azote global, azote Kjeldahl, phosphore, AOX, 8 métaux (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg), aluminium, hydrocarbures totaux, COHV, BTEX, HAP, cyanures, chrome VI (à confirmer par le département de Seine-Saint-Denis). En complément de ces suivis qualitatifs, un suivi quantitatif (niveau d'eau et débit) sera impératif. Un cahier de chantier sera à tenir pendant toute la durée de l'opération de rabattement.

En cas de pollution des eaux avérée, un traitement sera à mettre en place pour assurer le respect des critères d'acceptabilité au réseau.

- D'un **point de vue financier**, plusieurs taxes et redevances sont à prévoir :
 - La redevance d'assainissement instituée par délibération du Conseil Départemental.
 - La redevance d'assainissement, part « transport et épuration », instituée par délibération du conseil d'administration du SIAAP, soit 1,097 €/m3 en 2019.
 - La redevance prélèvement de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie de 0,039 € HT/m3, soit 39 € HT pour 1 000 m3 (pour la période 2019-2024).

En fonction de la date de démarrage de rejet, ces couts sont susceptibles d'évoluer.

En complément, il convient d'intégrer le coût d'analyse des échantillons d'eau prélevés dans le cadre de l'autosurveillance, estimé à environ 500 € HT (hors prélèvement car considéré comme étant à la charge de l'entreprise qui réalisera le rabattement de nappe). Le cout total d'analyse dépendra de la fréquence des prélèvements.

7.2.2 Pour un rejet direct en Seine

En l'état actuel, il n'existe pas de canalisations d'eau pluviale pouvant permettre le rejet des eaux de rabattement directement en Seine. Ainsi, compte tenu que la mise en place d'une canalisation aérienne est impossible (plus d'un 1 km jusqu'à la Seine), la seule solution envisageable serait la pose d'une canalisation dans le réseau d'assainissement départemental, jusqu'au déversoir d'orage le plus proche.

La mise en place d'une telle canalisation nécessitera une étude détaillée avec la Direction de l'Eau et de l'Assainissement du département de Seine-Saint-Denis et la signature d'une convention préalable. Toutefois, le coût de cette opération risque d'être disproportionné pour la seule phase travaux.

7.2.3 Pour la réinjection des eaux

Compte tenu de la proximité de la nappe, la réinjection des eaux totale est inenvisageable pour les scénarios A et B2 compte tenu des forts débits en jeu.

Toutefois, il pourrait être envisagé de réinjecter les eaux issues d'une paroi moulée. Toutefois, cette solution impose de disposer d'espaces libres en pleine terre en aval. Or la mise en œuvre des sous-sols sous la quasi-totalité de l'unité foncière limite les espaces en pleine terre.

Ainsi, il n'existe pas de zone permettant l'implantation des ouvrages de réinjection.

Compte tenu de la possibilité de mise en œuvre d'une solution alternative, moins impactante pour l'environnement, l'accord de la DRIEAT sur le rejet permanent en phase chantier n'est pas garanti.

7.3 Solution proposée

Ainsi en conclusion, seule la solution de rejet dans le réseau d'assainissement semble facilement/rapidement envisageable. Toutefois, compte tenu des coûts élevés des redevances et taxes de rejets, il apparaît comme pertinent de limiter au maximum les volumes rejetés (ce qui écarterait le scénario 2B).

En outre, la faisabilité d'une réinjection partielle des eaux pourrait être étudiée pour réduire les coûts des rejets.

8 Préconisations complémentaires

Préservation des ouvrages et forages existants

Afin de poursuivre l'acquisition de données hydrogéologiques complémentaires jusqu'au démarrage du chantier, il est nécessaire de sécuriser et préserver le maximum de piézomètres et forages qui ont été réalisés sur la parcelle. Parmi ces ouvrages, nous pouvons citer : les piézomètres de contrôle de la pollution, les piézomètres et forages réalisés dans le cadre des études Géotechniques, mais également les anciens forages d'exploitation de la nappe du Lutétien présents sur site.

En effet, des travaux de démolition, désamiantage et dépollution sont en cours. A l'issue de ces travaux, il pourrait être judicieux de réaliser de nouvelles mesures dans ces ouvrages.

Si des piézomètres sont présents dans l'emprise des travaux de dépollution, il sera impératif de les combler conformément aux Règles de l'Art préalablement aux terrassements.

Géométrie des sous-sols

L'analyse des formations géologiques montre une évolution de la profondeur et des faciès des sables de Beauchamp. D'un point de vue hydrogéologue, l'ouest et le sud de la parcelle sont plus favorables à la mise en place d'une paroi moulée (sables de Beauchamp moins profonds, mais surtout épaisseur des sables de Beauchamp moyens plus importante). Aussi, il serait intéressant d'étudier une géométrie des sous-sols maximisant l'implantation des sous-sols dans ces secteurs (pour limiter les débits d'exhaure de la nappe) :

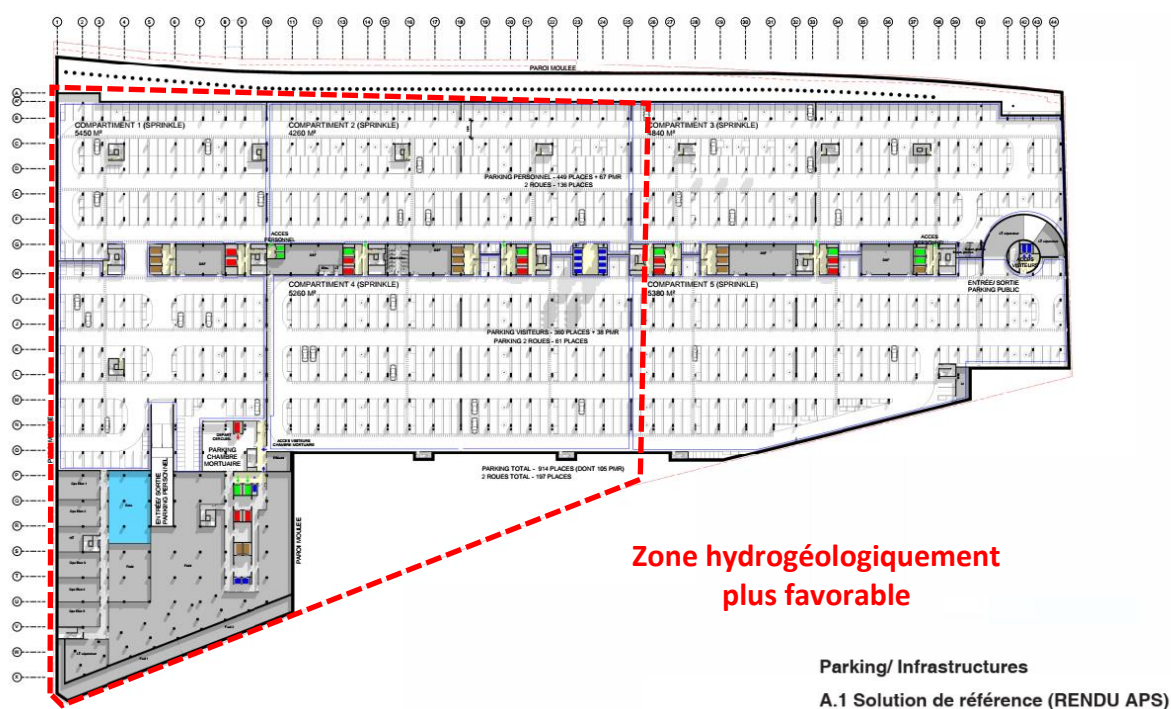


Figure 23 : Zone favorable hydro géologiquement pour l'implantation des sous-sols

Mise en œuvre d'un dispositif de géothermie

La mise en œuvre d'un dispositif de géothermie prévoit la mise en œuvre de forage permettant d'une part le pompage, et d'autre part, la réinjection des eaux. Au niveau des forages de rejet, une charge piézométrique va se créer. Selon l'étude de faisabilité réalisée, cette charge, d'au moins 10 m (cf. Figure 24), est susceptible de se proposer dans les formations plus superficielles (SB et SO). A ce stade il est délicat de définir quel sera l'impact réel de cette remontée notamment du fait de la présence de sondages géotechniques mal comblés dans le secteur.

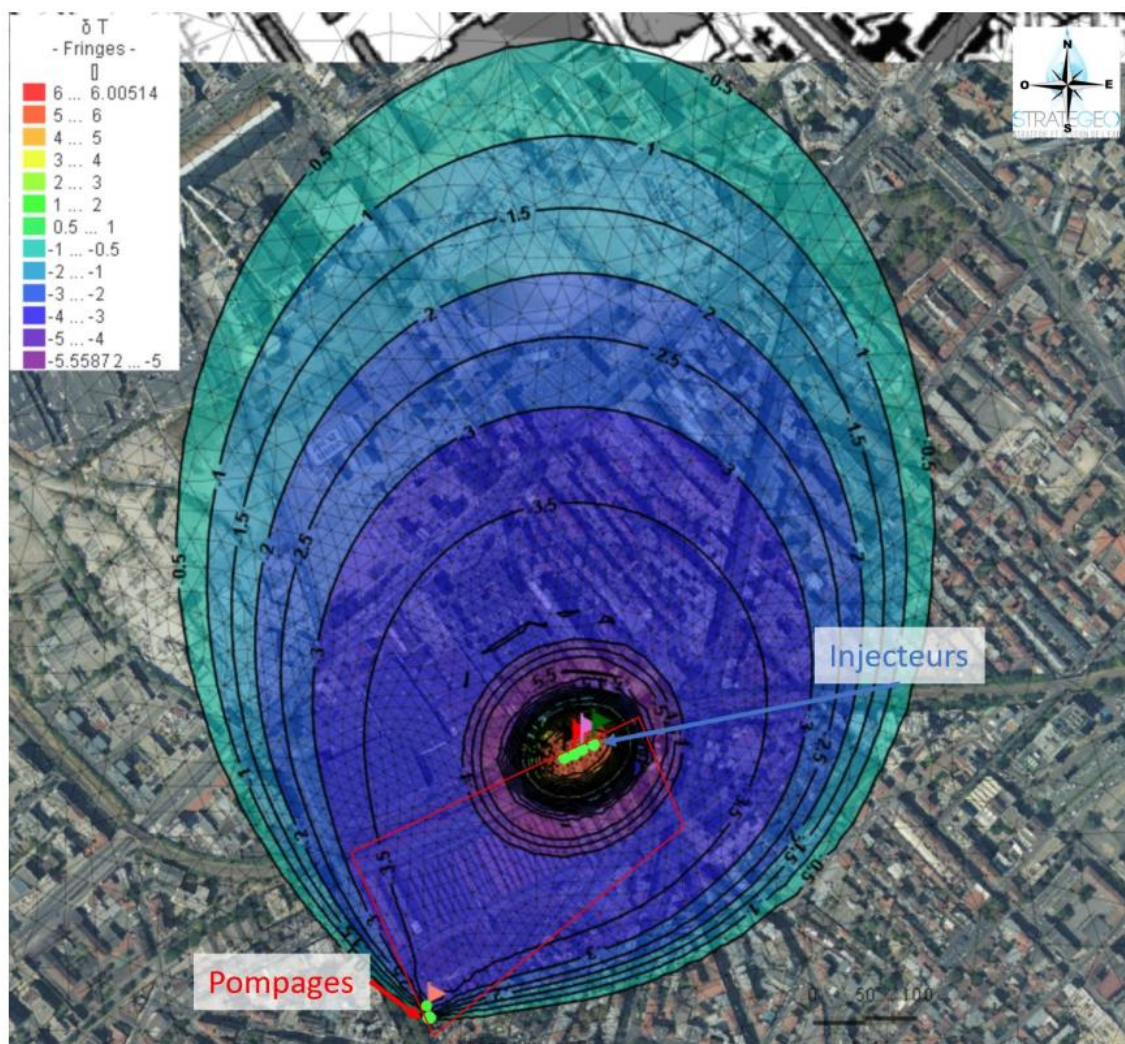


Figure 24 : Extension du panache technique dans le scénario 2 (Source : Stratégéo)

Des aménagements sont à prévoir pour permettre la mise en place des ouvrages de réinjection comme par exemple, le décalage des sous-sols profonds des forages de rejet. Un essai grandeur nature pourrait être envisagé sur l'un des forages d'exploitation de la nappe du Lutétien de l'ancien site pour appréhender plus finement cette problématique.

Comblement des ouvrages/forages

Conformément aux Règles de l'Art, un ouvrage à combler doit préalablement faire l'objet d'un diagnostic (inspection vidéo notamment) et d'une information des services de l'Etat avant de démarrer les opérations de comblement.

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation du site sur fond IGN (source : Géoportail)	5
Figure 2 : Localisation du site sur fond de carte au 1/50 000e (source : Géoportail)	7
Figure 3 : Emprise des divers solutions de sous-sols envisagées.....	9
Figure 4 : Extrait de la carte géologique de Paris 1/25 000e (Source : Stratégéo).....	11
Figure 5 : Coupe géologique moyenne retenue pour l'analyse	12
Figure 6 : Identification des sables de Beauchamp moyens dans les sondages carottés.....	13
Figure 7 : Coupe hydrogéologique type au niveau de la Seine-Saint-Denis (source : LREP) ...	14
Figure 8 : Esquisse piézométrique de la nappe du Bartonien (source : Lamé).....	15
Figure 9 : Esquisse piézométrique de la nappe du Lutétien (source : Lamé)	15
Figure 10 : Localisation des piézomètres réalisés sur le site par GAIDF	17
Figure 11 : Coupe hydrogéologique type au niveau du stade de France	19
Figure 12 : Interprétation de l'essai de juin 2022 sur MM2	22
Figure 13 : Suivi piézométrique de la nappe du Bartonien au droit du site entre le 19/08/2019 et le 02/09/2020.....	25
Figure 14 : Géométrie du sol sols-considéré pour le calcul de l'effet barrage.....	26
Figure 15 : Suivi piézométrique manuel de la nappe du Bartonien au droit du site entre le 18/06/2021 et le 19/08/2019	26
Figure 16 : Evolution du niveau d'eau au niveau du Pz2 du Cimetière de Saint-Ouen	28
Figure 17 : Evolution du niveau d'eau au niveau du piézomètre de Bonneuil-en-France.....	28
Figure 18 : Carte de la limite d'influence de la Seine sur la piézométrie des nappes (Lamé, 2013)	31
Figure 19 : Suivi piézométrique à Saint-Ouen, niveau de la Seine à Chatou (source :GAIDF) .	32
Figure 20 : Illustration des durées des crues historiques	34
Figure 21 : Carte de Delesse à Saint-Ouen (source : GAIDF).....	35
Figure 22 : Matérialisation de la profondeur minimale de la fiche hydraulique	37
Figure 23 : Zone favorable hydro géologiquement pour l'implantation des sous-sols	46
Figure 24 : Extension du panache technique dans le scénario 2 (Source : Stratégéo).....	47

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Crues significatives de la Seine au niveau du Pont de Saint-Ouen	8
Tableau 2 : Crues significatives de la Seine au niveau du Pont de Saint-Ouen	10
Tableau 3 : Données obtenues lors des pompages de juin 2022.	21
Tableau 4 : Synthèse des résultats des essais menés par GAIDF.....	22
Tableau 5 : Comparaison des niveaux caractéristiques de la nappe avec le DTU14.1 et l'Eurocode 7.....	24
Tableau 6 : Synthèse des données piézométriques (Pz2 du Cimetière de Saint-Ouen).....	29
Tableau 7 : Synthèse des données piézométriques (Bonneuil-en-France).....	30
Tableau 8 : Ajustement statistique des variations saisonnières.....	30
Tableau 9 : Approche de la diffusivité de la nappe	33
Tableau 10 : Amplitudes de crues de Seine considérées pour le calcul de l'amortissement..	33
Tableau 11 : Evaluation de l'amortissement des crues de Seine, A	33
Tableau 12 : Synthèse des niveaux caractéristiques de la nappe au niveau du projet	36
Tableau 13 : Estimations des débits pour le scénario A (Davidenkoff).....	38
Tableau 14 : Estimations des débits pour le scénario B1 (Davidenkoff).....	39
Tableau 15 : Estimations des débits pour le scénario B2 (Davidenkoff).....	40
Tableau 16 : Avantages et inconvénients des solutions de rabattement envisagées	41

