

Proposition d'un réseau piézométrique de suivi des nappes pour l'exploitation de la ligne 16 du Grand Paris Express

Piezometric network's suggestion for monitoring groundwater levels during operational phase of line 16 of the Grand Paris Express

Alexandre GIROUX^{1*}, Christophe MICHELIN², Léa BARON¹, Quentin BEAUMONT², Philippe ROUSSOT¹

1 EGIS, Montreuil, France

2 EGIS, Lyon, France

**alexandre.giroux@egis-group.com*

RESUME : Le projet de la ligne 16 du métro du Grand Paris Express est un tunnel situé en Ile-de-France. Long de 28 km, il se développe entre 15 et 30 m de profondeur, en reliant 9 gares souterraines. Il s'inscrit dans les formations sédimentaires du Bassin parisien baignées par des nappes libres ou captives. Un millier de piézomètres ont ainsi été réalisés lors des phases de conception et d'exécution entre 2014 et 2025 pour étudier et surveiller jusqu'à 4 nappes phréatiques. Les données recueillies ont alimenté des modèles hydrogéologiques qui ont permis de déterminer les niveaux caractéristiques des nappes phréatiques et de s'assurer de l'absence d'impact environnemental. A la fin des travaux, le Maître d'Ouvrage SGP a interrogé le MOE sur l'avenir de ce réseau. A-t-il un intérêt scientifique et sa conservation est-elle nécessaire ? Compte-tenu du coût économique nécessaire à son suivi, à son entretien et du risque de pollution des nappes, ne vaut-il mieux pas combler ces piézomètres ? Pour répondre à ces questions, les axes de définition d'un réseau de surveillance piézométrique sont à analyser. Ils dépendent principalement du nombre de nappes concernées. Ils doivent également tenir compte des interfaces avec le projet des bâtiments d'émergence accueillant du public, des aménagements de surface ainsi que les voiries et réseaux divers. Le suivi du réseau en phase exploitation de la ligne 16 du Grand Paris Express doit aussi permettre de répondre aux exigences réglementaires de l'Arrêté préfectoral vis-à-vis du risque de dissolution du gypse antéludien. Enfin, les enjeux environnementaux (zones naturelles sensibles, effets barrages et risque en zone inondable) nécessitent le cas échéant de vigiler la nappe phréatique.

ABSTRACT: The project of the line 16 of the Grand Paris Express metro is a tunnel located in the Ile-de-France region. It is 28km long, evolves at a depth between 15 to 30m and connects 9 underground stations. It is part of the Paris Basin sedimentary formations, which are bathed by unconfined and confined aquifers. A thousand piezometers were installed during the conception and execution phases between 2014 and 2025 to study and monitor up to 4 water tables. The collected data contributes to the hydrogeological models which helped determine the characteristic levels of the groundwaters and prevent the environmental impacts. At the end of the construction work, the project owner SGP questioned the project manager about the future of this network. Does it have a scientific interest and is its preservation necessary? Considering its necessary maintenance and upkeep cost and the risk of groundwater pollution, wouldn't it be better to fill these piezometers? To answer these questions, the definition axis of a piezometric monitoring network needs to be analyzed. It mostly depends on the number of aquifers involved. It also needs to consider the interactions with emergence buildings open to the public, as well as landscaping, roads and various networks. The monitoring of the network during the operational phase of line 16 of the Grand Paris Express also must meet the regulatory requirement of the prefectural decree concerning pre-ludian gypsum. Finally, the environmental issues (sensitive natural areas, damming effect and risks in flood zones) need to monitor the aquifers if necessary.

Mots-clés: Métro ; tunnel ; piézomètre ; gypse ; réseau.

1 INTRODUCTION

Lors de la construction d'infrastructures souterraines dans des terrains baignés par des eaux souterraines, il est indispensable d'identifier le nombre de nappes phréatiques concernées par le projet, de mesurer leurs évolutions sur une plage de temps suffisamment

longue et de surveiller l'impact des travaux sur leurs niveaux par l'intermédiaire de piézomètres. Chaque ouvrage va donc en comporter un, ou plusieurs, qui constituent, à l'échelle de celui-ci, un réseau. Une fois les travaux terminés, le maintien de tout ou partie de cette auscultation doit permettre de surveiller les

niveaux de référence retenus pour le dimensionnement, l'impact de l'ouvrage sur les écoulements et de surveiller les risques naturels qui peuvent compromettre la stabilité de l'ouvrage. Cet article propose le dimensionnement d'un réseau de piézomètres définitifs pour le projet de la ligne 16 du métro du Grand Paris Express implantée dans la banlieue nord-est de Paris. Le Maître d'Ouvrage de ce projet est la Société des Grands Projets (SGP).

Après avoir présenté les caractéristiques du projet, son contexte géotechnique et hydrogéologique, la communication analysera les axes de définition d'un réseau de surveillance piézométrique en phase exploitation de l'infrastructure, avant de proposer les principes d'un réseau et les préconisations nécessaires à son suivi.

2 LA LIGNE 16 DU GPE

2.1 Contexte géologique

La ligne 16 du métro du Grand Paris Express (GPE) traverse quatre grands ensembles géologiques, dans la série sédimentaire tertiaire du Bassin de Paris :

- La Plaine de France, dans les terrains de l'Eocène moyen (Lutétien et Bartonien) et inférieur (Yprésien) composés des formations suivantes :

Marnes à Pholadomies (MPH), Sables verts (SV), Calcaire de Saint-Ouen (SO), Sables de Beauchamp (SB), Marnes et Caillasses (MC), Calcaire grossier (CG), Sables supérieurs (SS) et Argiles plastiques (AP) ;

- Le Plateau de Clichy-Montfermeil, au sein des terrains de de l'Eocène supérieur (Priabonien ou Ludien) et de l'Oligocène inférieur (Rupélien) composés des formations suivantes : Calcaire de Brie (TB), Argiles vertes (GV), Marnes de Pantin (MP), Marnes d'Argenteuil (MA), Masses et Marnes du gypse (MMG) ;
- La Vallée de la Marne, dont les terrains rencontrés sous les alluvions sont les mêmes que ceux de la Plaine de France ;
- Le rebord nord du plateau briard sous lequel les terrains rencontrés sont les mêmes que le Plateau de Clichy-Montfermeil avec un faciès latéral aux Masses et Marnes du Gypse représenté par le Calcaire de Champigny (CC).

Des formations quaternaires naturelles (alluvions, limons des plateaux) ou anthropiques (remblais) recouvrent irrégulièrement la série tertiaire et sont concernées par le projet au niveau des gares et ouvrages annexes.

Tableau 1. Lithostratigraphie tertiaire du Bassin parisien

Epoque	Etage	Sous étage parisien	Formation	Abréviation	Type	
Oligocène	Rupélien	Sannoisien	Calcaire de Brie	TB	Aquifère	
			Argile verte	GV	Aquiclude	
			Marnes de Pantin	MP	Aquitard	
		Priabonien	Ludien	Marnes d'Argenteuil	MA	Aquiclude
				Masses et Marnes du Gypse	MPH	Aquitard
Eocène	Bartonien	Marinésien	Sables verts	SV	Aquifère	
			Calcaire de Saint-Ouen	SO	Aquifère	
			Sables de Beauchamp	SB	Aquifère	
		Lutétien	Auvervien	Sables de Beauchamp	SB	Aquifère
			Supérieur	Marnes et Caillasses	MC	Aquifère
		Yprésien	Inférieur	Calcaire grossier	CG	Aquifère
			Cuisien	Sables supérieurs	SS	Aquifère

2.2 Contexte hydrogéologique

Ces formations sont le siège de plusieurs nappes :

- La nappe du Sannoisien supérieur (Oligocène) contenue dans le Calcaire de Brie (TB), délimitée à sa base par le niveau imperméable des Argiles vertes (GV), et présente ici uniquement sur la butte de Clichy-sous-Bois – Montfermeil ;
- La nappe perchée des formations superficielles (remblais et éboulis notamment) qui reposent sur un niveau peu perméable (MPH ou SV) ;

- Les nappes des alluvions au droit de cours d'eau ;
- La nappe du Bartonien (partie supérieure de l'Eocène moyen) qui réunit SO et SB ;
- La nappe de la partie inférieure de l'Eocène moyen et de l'Eocène inférieur abritée par les formations lutétiennes (MC et CG) puis yprésiennes (SS).

Le système aquifère est alimenté par l'infiltration des pluies dans les secteurs où le développement urbain et l'imperméabilisation des sols restent modérés. Les écoulements sont ensuite guidés par la

topographie en épousant la forme des reliefs et influencés par différents effets plus ou moins locaux tels que la variabilité spatiale du champ de perméabilité, l'action des grands cours d'eau et les activités humaines

La carte piézométrique de référence de Delesse de 1862 est souvent considérée comme représentative d'une situation de hautes eaux historiques à l'échelle de la région parisienne (ici, la nappe du Bartonien) :

- L'urbanisme de la région était comparativement très peu développé et la recharge naturelle était donc bien plus importante qu'aujourd'hui ;
- Les prélèvements par pompage étaient peu nombreux voire quasi-inexistants à cette époque.

Au demeurant, cet état de référence doit être considéré avec prudence puisque les aménagements hydrauliques de la Marne et de la Seine, tels qu'ils existent actuellement, n'ont été mis en place qu'à partir du 20^{ème} siècle avec, des modifications notables des niveaux d'eau et donc des nappes en interaction.

Les cartes piézométriques de référence présentées dans l'Atlas des nappes aquifères de la région parisienne du BRGM de 1970 concernent notamment les nappes de l'Oligocène, de l'Eocène supérieur et de l'Eocène moyen et inférieur. Contrairement à la carte de Delesse, elles ont été établies à une époque où l'urbanisme était déjà densifié et où les prélèvements industriels étaient bien plus importants. Pour ces raisons, elles sont souvent considérées comme représentatives d'un état de basses eaux.

Les mesures sur les piézomètres de suivi longue durée du réseau patrimonial font apparaître une remontée continue des niveaux entre 1976 et le début des années 2000 (près de 7 m atteint au régime moyen et pseudo-stabilisé de 2002). Ce comportement résulte d'un relâchement progressif de la pression exercée par les prélèvements industriels dans le Lutétien.

Les niveaux de nappe, sont en effet par nature variables dans le temps. Ils sont mesurés au moyen de piézomètres sélectifs (crépinés dans une seule formation géologique). Ces données piézométriques sont ainsi exploitées, dans le cadre de la conception et des travaux du projet de métro du GPE L16 pour :

- Le calcul des niveaux d'eau caractéristiques de nappe (EB, EF, EH et EE) ;
- Le paramétrage et le calage des modèles hydrogéologiques destinés aux calculs d'impacts des niveaux de nappes sur les avoisinants et les milieux naturels ;
- Définir le sens d'écoulement des nappes ;
- Quantifier les gradients hydrauliques ;

- Vérifier l'absence d'impact sur les nappes à l'extérieur des ouvrages de génie civil souterrains lors des rabattements ou vidange réalisés à l'intérieur des ouvrages ;
- S'assurer du retour à l'équilibre du niveau des nappes.

La Figure 1 présente un extrait de la carte géologique et piézométrique de l'Eocène supérieur et moyen à l'échelle du tracé. Deux nappes distinctes sont visibles, au nord de la Marne, la nappe des Sables de Beauchamp (bleu) et au sud, celle des Calcaires de Champigny (violet). Bien que les niveaux soient remontés depuis, cette carte donne une vue d'ensemble des écoulements. Elle fait apparaître une ligne de partage des eaux souterraines orientée Nord-Sud au Nord du tracé qui s'infléchit à partir de la gare de Clichy-Montfermeil (CMF) pour prendre une direction franchement Est-Ouest au Sud. L'effet de relief, notamment la butte de CMF, y est visible et se matérialise par un dôme piézométrique (60 m NGF). Ainsi, la direction et le gradient des écoulements varient le long du tracé et d'une gare à l'autre.

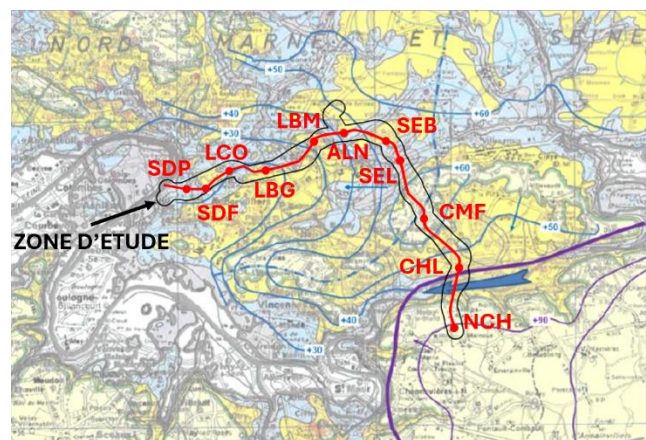


Figure 1 - Extrait de la carte piézométrique de la nappe de l'Eocène supérieur et moyen (Mégnyen, 1970)

3 OBJECTIFS ET METHODES

3.1 Intérêt de surveiller le niveau piézométrique

Le niveau des nappes évolue donc dans le temps et dépend de plusieurs facteurs, dont certains variables comme la pluviométrie et les activités humaines. Il convient donc de s'assurer que les niveaux caractéristiques des nappes restent valables tout le long de l'exploitation. En effet, dans le cas hypothétique d'une future réparation en phase maintenance, la connaissance du niveau

piézométrique et de ses fluctuations dans le temps sont nécessaires.

A titre d'exemple, les 420 piézomètres suivis depuis plusieurs années ont permis de définir les niveaux caractéristiques de nappe tenant compte de leurs fluctuations annuelles et interannuelles. L'analyse des chroniques correctement fournies en données a également mis en évidence plusieurs points suivant les secteurs :

- La présence de pompages en nappe importants, pouvant être à caractère transitoire et ayant un impact pluri-métrique sur les niveaux. 93 pompages industriels ont été répertoriés dans la zone d'étude du projet selon la banque de données du sous-sol BRGM-Infoterre (cf. Dossier d'Autorisation Unique (DAU));
- La continuité des niveaux entre les différentes nappes, en régime normal, mais présentant une discontinuité et une différence de comportement hydrodynamique face à une sollicitation anthropique (pompage) ;
- Des variations de nappe globalement homogène par zone géographique et de faible ampleur, sauf dans le cas de crue de cours d'eau (Marne, Seine).

En particulier, la Figure 2 illustre la chronique d'un piézomètre suivi durant plus de 5 ans au niveau de la plaine de France. Les variations annuelles y sont de l'ordre de 0,5 à 1 m, et de 1 à 2 m inter-annuellement. L'analyse des chroniques a montré la réaction des nappes (Bartonien et Lutétien) à la suite des crues importantes de la Seine en juin 2016 et janvier 2018, témoignant de l'effet longue distance de la crue et de leur interaction avec les eaux souterraines.

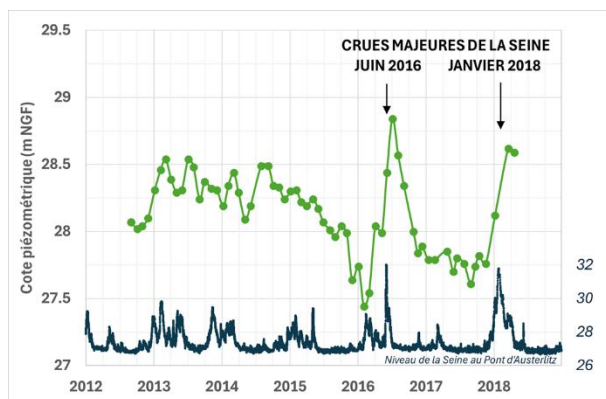


Figure 2 - Chronique du piézomètre STD-FAI-SC00336 crépiné dans les MC (nappe Lutétien)

Le réseau piézométrique définitif doit quant à lui permettre le suivi en phase exploitation du niveau de la nappe :

- d'une manière générale, sur l'ensemble de la ligne 16 puisque l'ensemble du projet est dans les nappes du Bartonien et du Lutétien et localement celle du Sannoisien ou encore alluviale ; la mise en place d'un réseau piézométrique est alors proposé au droit d'une partie ou de chaque ouvrage (gare, et puits de ventilation et/ou accès de secours) et en nombre suffisant, pour surveiller à l'échelle de la ligne, le comportement des différentes nappes ;
- et en particulier, sur les ouvrages présentant des enjeux géotechniques et environnementaux spécifiques qui concernent l'effet barrage, le risque naturel d'inondation (vallée de la Marne), les incidents au cours des travaux de l'ouvrage ou le risque dissolution du gypse antéludien (en particulier à Sevran).

Par ailleurs, le suivi piézométrique d'une telle infrastructure interdépartementale constitue une information d'intérêt général, qui pourrait intéresser d'autres institutions et motiver le suivi de piézomètres supplémentaires, du moins justifier la conservation et la pérennisation de piézomètres existants. Fouché et Hirschauer ont dressé une carte piézométrique de la nappe phréatique qui couvre une grande partie du département, mais pas totalement du fait du manque de données, (Fouché, 2007).

Tableau 2. Ecart entre les niveaux de nappe 2007 / EB L16

gare	Niveau 2007 (NGF)	EB L16 (NGF)	Δ (m)
LBG	34.5	37.5	+3
LBM	44	43.1	-0.9
SEL	52	53.3	+1.3

Le tableau n°2 illustre l'évolution des niveaux de nappe du Bartonien/ Lutétien au droit de quelques gares entre la figure n°3 et le niveau caractéristique Eau Basse (EB = médiane des relevés piézométriques validés) de la ligne 16 (2016). Les différences sont liées à l'activité ou à l'arrêt de pompages industriels. La conservation des piézomètres de la L16 pourrait constituer une source d'informations précieuse, du fait de l'existence de chroniques piézométriques relativement importantes. La Figure 3 illustre ainsi l'intérêt de posséder un réseau au droit de chaque ouvrage de la ligne 16 et compléterait les zones pour lesquelles peu d'informations sont disponibles comme le massif de l'Aulnoye, situé dans la partie orientale du département.

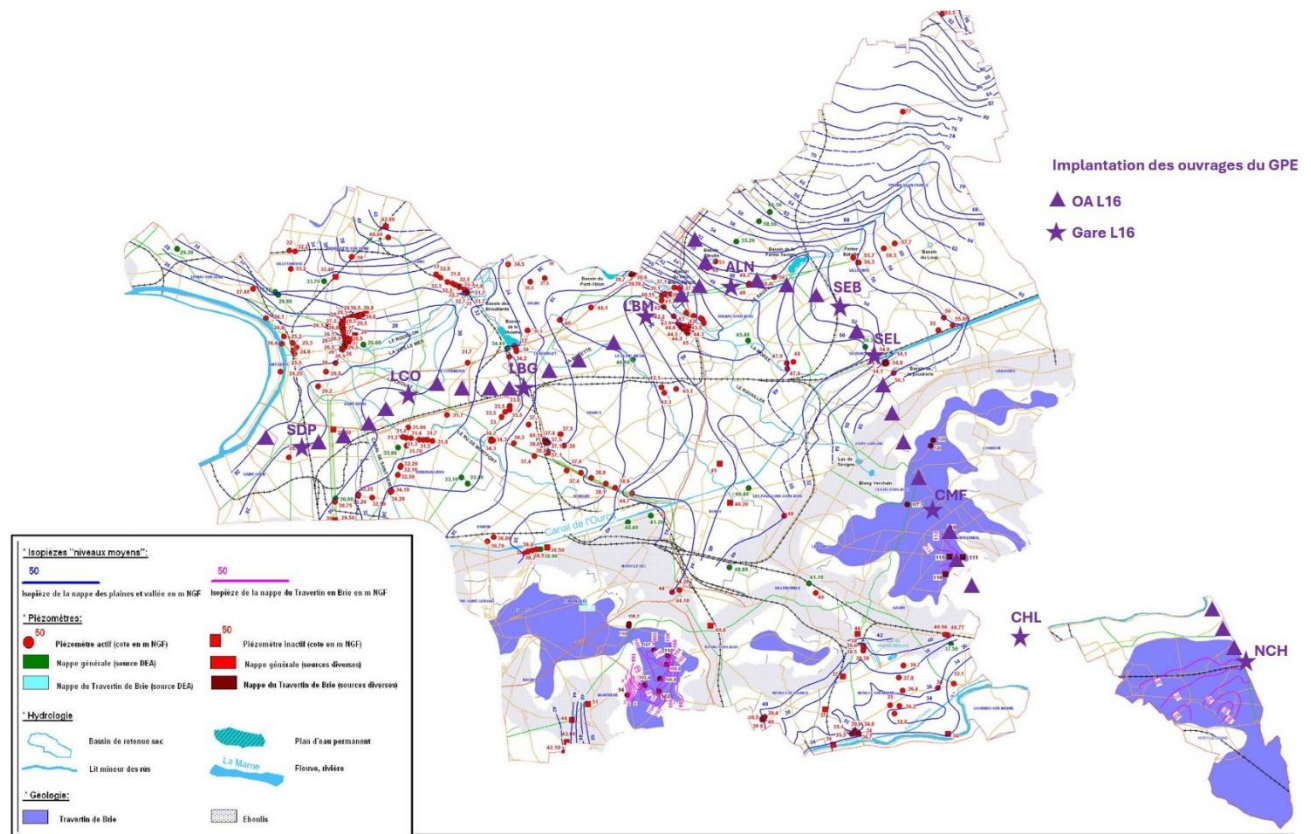


Figure 3 - Superposition des ouvrages L16 sur la carte piézométrique des nappes de l'Eocène (Bartonien et Lutétien confondus) et de l'Oligocène de Seine -Saint-Denis (Fouché, 2007)

3.2 Les contraintes à respecter

Les piézomètres sont des ouvrages interceptant la nappe. Subséquemment, ils sont soumis à des contraintes réglementaires, environnementales et contractuelles pendant les travaux.

Les obligations réglementaires sont détaillées dans plusieurs documents de l'Administration : un arrêté ministériel, des arrêtés préfectoraux et le Dossier d'Autorisation Unique (DAU). Le lecteur se référera aux documents cités en bibliographie pour plus de détails. Par exemple :

- Tout le cycle de vie de ces ouvrages est ainsi réglementé, de la déclaration, à la réalisation, au suivi jusqu'à leur comblement ;
- Un même piézomètre ne peut pas être crépiné simultanément dans plusieurs aquifères distincts superposés ;
- Un suivi mensuel est imposé pour la première année de mise en service, etc.

Au niveau des zones de biodiversité Natura 2000 du parc Georges Valbon (400 ha répartis sur les communes de La Courneuve, Saint-Denis, Stains, Dugny et Garges-Lès-Gonesse), du parc du Sausset (200 ha répartis sur les communes d'Aulnay-Sous-Bois et de Villepinte) et du parc de la Poudrerie (137

ha répartis sur les communes de Sevran, Livry-Gargan, Villepinte et Vaujours), un réseau piézométrique a déjà été mis en place pour permettre un suivi des niveaux pendant la phase chantier. Des puits de captage dans l'Yprésien ont été réalisés dans certains parc pour le cas où une compensation aurait été nécessaire en phase chantier par maintien du niveau des étangs.

La présence de piézomètres sur les emprises chantier constitue également une source de contraintes importantes pendant les travaux :

- Par leur emplacement : contraintes d'aménagement non nécessairement compatibles avec la présence de piézomètres ;
- Pour les ouvrages dépassant du sol : contrainte de circulations, stockages, risques de bris, élément accidentogène ;
- Pour les ouvrages à ras du sol : contraintes pour stockages et en partie circulations, risque de non-étanchéité et introduction d'eaux de surface ou polluants.

Pendant la phase chantier, les entreprises avaient pour obligation contractuelle de suivre les niveaux de nappe et donc de maintenir des piézomètres après l'arrêt des pompes pendant un an. Cependant, leur implantation ne tenait pas compte des contraintes liées aux marchés de travaux ultérieurs (Tout Corps

d'Etat (TCE), Voirie et Réseaux Divers (VRD) et aménagements paysagers). Comme de nombreux piézomètres, exécutés en phase conception dans les emprises chantiers, qui avaient généré des interfaces techniques avec les travaux, les piézomètres de suivi de chantier ont généré des interfaces avec les travaux des marchés ultérieurs. Pour ces raisons, la conservation des piézomètres internes aux emprises travaux n'est pas souhaitable et un comblement de 979 piézomètres a donc été effectué en partie afin de préserver les nappes de toute pollution accidentelle.

3.3 Les enjeux environnementaux et géotechniques

Les principaux impacts de la Ligne 16 vis-à-vis des nappes concernent l'effet barrage, le risque inondation et la dissolution du gypse.

Les ouvrages réalisés (tunnels, gares et ouvrages annexes et spéciaux) sont par construction réputés très peu perméables par rapport à l'encaissant et font en partie obstacle aux écoulements souterrains. Ceux-ci se rétablissent vers un nouvel état d'équilibre en s'accompagnant d'un basculement piézométrique : remontée de niveau à l'amont, baisse à l'aval. Le retour d'expérience montre que, sauf quelques cas particuliers (milieu fortement hétérogène à petite échelle notamment), l'effet barrage génère des anomalies de faible ampleur et que l'effet des tunnels en particulier est souvent peu perceptible. Les résultats des simulations numériques réalisées via les modèles hydrogéologiques 3D dans le cadre des études d'impacts du projet (cf. DAU) ont montré des impacts très faibles (± 0.1 m pour les tunnels et ± 0.5 m pour certaines gares). Ces variations sont très faibles comparativement au battement naturel des nappes qui est de l'ordre de 1,5 à 2,0 m. L'analyse des niveaux piézométriques avant, pendant et après les travaux de la ligne 16 sur quelques ouvrages significatifs n'a pas permis d'affirmer la présence d'un effet barrage dont l'impact serait supérieur à celui évalué au stade des études.

Le projet traverse la vallée de la Marne concernée par le risque inondation. Les niveaux de crue centennale (R1.15) redoutés aux droits des ouvrages varient entre +0.6 à +1.9 m au-dessus TN. En zone inondable par débordement direct d'une rivière, des piézomètres peuvent être de nature à identifier les remontées de nappe et donc anticiper les surveillances ou actions à mettre en œuvre au niveau des entrées/sorties de réseaux, réservations ou ouvertures diverses au travers des parois moulées. Pour la surveillance des ouvrages contre le risque des remontées de nappe, un piézomètre (en zone alluviale) et un piézomètre (aquifère du Bartonien ou

Lutétien) peuvent apparaître suffisants. Le couplage d'un suivi dans les alluvions et la nappe phréatique permet de vérifier la réaction cohérente des systèmes aquifères en lien hydraulique. On rappelle par ailleurs, que les niveaux caractéristiques de nappe sont définis de manière identique dans le Lutétien et le Bartonien (connexion hydraulique, comportement similaire). La présence de deux piézomètres peut s'avérer sécuritaire en cas de perte d'un piézomètre.

La dissolution du gypse est un phénomène naturel qui concerne la présence de gypse (roche soluble) dans le sous-sol en présence de circulations d'eau (Charmoille, 2021). Ce phénomène peut, dans les cas extrêmes, créer des cavités pouvant alors s'effondrer brutalement et remonter à la surface (fontis). L'Arrêté inter préfectoral complémentaire de 2023 précise, concernant le suivi du risque gypse que le suivi des piézomètres est maintenu pour la durée des travaux et de la phase d'exploitation pour certaines gares et ouvrages situés à Sevran. Selon les résultats des simulations numériques réalisées via les modèles hydrogéologiques 3D dans le cadre des études d'impacts du projet (cf. DAU), l'influence de l'infrastructure est très faible en phase définitive sur la piézométrie et le champ de vitesse. Il est donc considéré que le projet n'aura pas d'incidence significative sur la dissolution du gypse. Toutefois, afin de s'assurer de l'absence d'impact du projet sur le phénomène, les ouvrages où du gypse a été relevé en sondage et lors des excavations en quantité importante, en présence de nappe, doivent faire l'objet d'un suivi spécialisé (fluctuations des niveaux piézométriques, évolution de la conductivité et des concentrations des marqueurs de la dissolution du gypse : sulfates, calcium (Dumont, 2022 et 2024)). Les caractéristiques du réseau piézométrique, disposé à proximité des ouvrages concernés vis-à-vis du risque dissolution du gypse, seront :

- Pour les ouvrages annexes : au moins un à l'amont hydraulique de l'ouvrage et un autre à l'aval immédiat (moins de 5 m des Parois Moulées) ;
- Pour les gares : 3 à l'amont (en forme de triangle) et 3 à l'aval (en forme de triangle aussi) afin de quantifier le flux contournant l'ouvrage.

4 PROPOSITION DE RESEAU

Au vu des contraintes et enjeux énoncés précédemment, un réseau de piézomètres à conserver est proposé pour le suivi en exploitation qui prend également en compte la disponibilité des piézomètres existants actuels et l'ajout de piézomètres à créer lorsque nécessaire.

Les piézomètres éloignés des sites sont ici maintenus au réseau. Cependant, il serait préférable de combler tous les piézomètres externes aux sites afin d'éviter toute difficulté de maintenance et d'exploitation avec des tiers ou collectivités. En effet, ces piézomètres ne possèdent aucune garantie sur leur pérennité en raison de leur implantation et de l'absence de margelle et de capot de protection qui protègent la nappe de pollution anthropique et de chocs.

Les piézomètres extérieurs aux emprises définitives de l'ouvrage en exploitation doivent faire l'objet d'un conventionnement ou tout au moins d'une autorisation des propriétaires ou communes.

Sur les ouvrages et gares, le positionnement exact des piézomètres est défini qu'une fois l'ensemble des contraintes de site connu (pose des réseaux, aménagements divers, VRD, espaces verts, limites de propriété...). Etant donné que la valeur d'un piézomètre dépend principalement de la durée de sa chronique, un maximum de piézomètres actuels ont été identifiés pour être pérennisés et maintenir le suivi. Mais il ne saurait être garanti de pouvoir les conserver jusqu'à la fin des travaux. Il serait donc plus prudent de considérer que tous les piézomètres du réseau définitif soient mis en place spécifiquement en fin de projet d'aménagement et ce afin que le réseau soit homogène en type et qualité de construction. L'objectif de ce réseau est donc de surveiller :

- Le niveau piézométrique des nappes des ouvrages (un seul piézomètre pourra être conservé pour les ouvrages annexes si les nappes communiquent) ;
- Les nappes pour les ouvrages concernés par le risque de dissolution du gypse ;
- Le risque inondation dans les nappes alluviales et du Lutétien pour les ouvrages en zone inondable.

Le réseau piézométrique à la fin des travaux (1004 unités) n'est pas adapté à couvrir les besoins du réseau envisagé. 47 nouveaux piézomètres seront créés en complément de 25 piézomètres existants qui seront pérennisés. Le réseau comprendra donc 72 piézomètres (tableau n°3), dont 40 exclusivement dédiés à la surveillance du niveau. Les 32 autres répondront aussi à d'autres objectifs.

Tableau 3. Caractéristiques du réseau piézométrique

Nombre d'ouvrages concernés	Nombre de piézomètres	Objectif de surveillance
42	40	niveau
7	24	niveau/gypse
5	8	niveau/gypse /inondation

4.1 Caractéristiques des piézomètres existants

Lorsque plusieurs piézomètres étaient disponibles, le choix a été fait de garder les piézomètres ayant une antériorité de données plus conséquente.

Les piézomètres existants candidats doivent être aménagés conformément à l'Arrêté du 11 septembre 2003 avec une margelle en béton et un capot fermé par un cadenas sécurisé.

4.2 Caractéristiques des piézomètres à créer

L'implantation des piézomètres définitifs doit tenir compte de la position des réseaux (eau potable, assainissements, électricité, télécom, gaz, etc.), en étant à distance (3 à 5 m minimum) pour éviter toute destruction en cas d'intervention sur ces réseaux

Le diamètre de foration devra permettre la mise en place dans chaque piézomètre d'un tubage en PVC forage au minimum de 3 pouces (76 mm interne/ environ 90 mm externe), crépiné à fentes d'ouverture 1 mm au droit de la formation visée avec fond plein (en laissant une hauteur de garde d'un mètre avec le toit et le mur de la formation), et par un tube plein par ailleurs (c'est à dire une seule formation crépinée pour ne pas mettre deux nappes en communication, voire un seul horizon aquifère dans le cas des Sables de Beauchamp supérieur ou inférieur). Les travaux de forage seront exécutés par une entreprise spécialisée dans le forage suivant la norme NF X 10-999. Lors de la foration, des dispositions seront prises afin d'éviter tout risque de contamination des eaux souterraines. Un essai de réception des piézomètres sera réalisé après traitement destiné à accélérer la destruction des boues de forages, lavage à l'air lift et à l'eau du piézomètre. Ce test consiste à remplir le piézomètre jusqu'à son sommet et à suivre ensuite la vitesse de descente du niveau d'eau en fonction du temps jusqu'au retour du niveau de la nappe avant essai. Ce test sera réalisé trois fois de suite dans chaque piézomètre qui sera déclaré recevable si les résultats sont tous acceptables.

Afin d'éviter des coactivités entre les différents marchés de travaux lors de la réalisation des piézomètres ainsi que pour éviter une destruction des piézomètres due aux travaux qui pourraient être encore en cours pour les marchés de travaux ultérieurs (aménagements, tout corps d'état, voirie et réseaux divers, espaces verts), il est préconisé de réaliser les nouveaux piézomètres lorsque les travaux de terrassement des derniers marchés seront terminés et avant réalisation des enrobés afin de ne pas avoir à réaliser cette tâche de nouveau.

4.3 Exploitation du réseau définitif

Chaque piézomètre devra faire l'objet d'une déclaration via la plateforme DUPLOS afin d'obtenir l'attribution d'un numéro d'identifiant national et être inventorié dans la Banque de Données du Sous-Sol (BDSS) du BRGM.

Il est recommandé, à défaut d'installer des sondes automatiques, de réaliser des mesures manuelles mensuelles pendant 3 ans, puis en fonction des observations, de réduire la fréquence avec une limite minimale trimestrielle.

Pour définir les variations saisonnières, il est nécessaire d'observer les évolutions mensuellement sur une période de 3 ans minimum à 5 ans maximum, pour ensuite adapter le suivi aux observations. Au-delà de cette surveillance mensuelle, un suivi trimestriel est généralement adapté si les dates de mission sont calées sur les périodes hautes et basses eaux.

En période de crue observée ou suspectée, une télétransmission de relevés quotidiens puis à pas horaire à partir d'une valeur seuil, est recommandée.

Le suivi des éléments majeurs marqueurs du gypse (conductivité, teneur en calcium et en sulfates) sera analysé via des prélèvements mensuels.

Enfin, les relevés piézométriques donnent lieu, à l'établissement annuel d'un rapport de surveillance constitués des relevés et de leur analyse. Le contexte de chacun des piézomètres et les conditions météorologiques qui ont régnées pendant le relevé et dans la période le précédant y seront précisées.

5 CONCLUSIONS

Le réseau piézométrique doit permettre le suivi en phase exploitation du niveau de la nappe et de ses fluctuations d'une manière générale sur l'ensemble de la ligne 16 et en particulier sur les enjeux géotechniques et environnementaux : effet barrage, dissolution du gypse, risque inondation. Il permet de s'assurer que les niveaux caractéristiques des nappes restent valables tout le long de l'exploitation, et de connaître le niveau de la nappe dans le cas d'une hypothétique réparation dans le cadre de la maintenance.

La mise en place d'un réseau de 40 piézomètres est recommandé au droit de chaque ouvrage (gare, et puits de ventilation et/ou accès de secours) et en nombre équivalent aux nappes concernées par le projet pour surveiller dans le temps, à l'échelle de la ligne 16, l'évolution et le comportement de la nappe. Pour le suivi des enjeux géotechniques et

environnementaux, un réseau de 32 piézomètres supplémentaires est identifié.

En tout, un réseau piézométrique de 72 piézomètres est donc proposé pour le suivi et la surveillance des nappes lors de l'exploitation de la ligne 16 du métro du Grand Paris Express.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société des Grands Projets et monsieur Olivier Fouché pour son aimable autorisation de reproduire sa carte piézométrique de Seine Saint-Denis.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CFMS (2025). Recommandations pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques.
- Dumont E. (2024). Travaux souterrains en zone de dissolution du gypse – impact de rabattements de nappe (AFTES).
- Dumont E. et al. (2022). Ligne 16 du Grand Paris Express en zone de dissolution du gypse: apprendre des REX sur d'anciens pompages, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG), Lyon, France.
- Charmoille A. Et al. (2021). Adaptation des dispositions constructives des ouvrages de la ligne 16 du GPE en zone de dissolution du gypse Lutétien, AFTES, Paris, France.
- Société du Grand Paris (2016). Dossier d'Autorisation Unique de la ligne 16 du Grand Paris Express.
- Fouché O., Hirschauer A. (2007). Evolution piézométrique de la nappe phréatique de Seine-Saint-Denis et zonage d'infiltrabilité. *XIVes journées techniques du Comité français d'hydrogéologie*, Lyon, France. pp.63-88.
- AFTES (2005). Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains, recommandation AFTES G19R2F1.
- AFTES (1998). L'organisation de l'auscultation des tunnels, recommandation AFTES G19R1F1.
- Megnier C. (1970) Atlas des nappes aquifères de la région parisienne. BRGM, Paris, France
- Arrêté inter préfectoral compl. 2023-013 du 7/3/2023
- Arrêté inter préfectoral initial 2017-2455 du 23/8/2017
- Arrêté du 11 septembre 2003 fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration.