

## LIGNE 16 DU GRAND PARIS EXPRESS EN ZONE DE DISSOLUTION DU GYPSE : APPRENDRE DES REX SUR D'ANCIENS POMPAGES

### « GRAND PARIS EXPRESS » IN GYPSUM DISSOLUTION AREA (LINE 16) : LEARNING FROM THE IMPACT OF FORMER PUMPING WORK

Emmanuel Dumont\*<sup>1</sup>, Imen Zaier<sup>2</sup>, Arnaud Charmoille<sup>2</sup>, Fabien Binet<sup>3</sup>, Charles Kreziak<sup>4</sup>, Parfait Pouemi<sup>5</sup>, and Valentin Pratesi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cerema Ile-de-France, Fontenay-sous-Bois, France

<sup>2</sup> Ineris, Verneuil-en-Halatte, France

<sup>3</sup> Setec-Terrasol, Paris, France

<sup>4</sup> Société du Grand Paris, Saint-Denis, France

<sup>5</sup> Egis, Guyancourt, France

#### RÉSUMÉ –

A Sevrans, les investigations géologiques réalisées dans le cadre des études de la future Ligne 16 du Grand Paris Express ont mis en évidence un contraste spatial de gisement des formations gypseuses. Des retours d'expérience sur d'anciens pompages et des travaux de recherche récents sur les mécanismes de dissolution du gypse ont permis d'adapter les méthodes de construction des ouvrages et ainsi maîtriser les risques.

**ABSTRACT** – The geological investigations carried out in Sevrans as part of the studies for the future line 16 of the Grand Paris Express revealed a spatial contrast in the formation of gypsum deposits. Feedback from previous pumping operations as well as recent research on gypsum dissolution processes have made it possible to adjust the construction methods of the structures and thus to control the associated risks.

#### 1. Introduction

Dans les zones d'aléa dissolution du gypse, les travaux souterrains et plus largement l'aménagement du territoire sont soumis à des contraintes fortes. C'est en particulier le cas pour les travaux souterrains de la ligne 16 du Grand Paris Express réalisés sur la commune de Sevrans, où des lentilles gypseuses d'extension kilométrique sont présentes dans la formation des Marnes-et-Caillasses (Lutétien), et où plusieurs désordres imputables à ce phénomène sont survenus.

Dans ce contexte, la société du Grand-Paris, soucieuse de maîtriser les risques en phase de construction et de garantir la pérennité de l'ouvrage, a sollicité en 2016 le Cerema et l'Ineris pour conduire des actions de recherche et développement sur les processus de dissolution du gypse et les mouvements de terrain associés. Ces travaux de recherche ont été menés à différentes échelles spatiales et temporelles afin de mieux comprendre et modéliser l'intensité des processus de dissolution in situ en fonction de différentes configurations géologiques et hydrogéologiques. Cet article s'intéresse en particulier aux retours d'expérience sur les impacts d'anciens pompages à Sevrans, et aux résultats des travaux de recherches menés pour caractériser la cinétique de dissolution et l'évolution des fronts de dissolution. Au fil du projet, le Maître d'Ouvrage a organisé des échanges réguliers avec le Cerema, l'Ineris et le Maître d'œuvre, sur l'avancement du projet et ses apports en termes de compréhension du fonctionnement des systèmes de dissolution. Ces échanges ont permis d'affiner le choix des dispositions constructives et des dispositifs d'épuisement des ouvrages situés à Sevrans. La maîtrise des risques est également assurée par la mise en place d'un suivi piézométrique et physico-chimique renforcé.

## 2. Caractérisations géologique, hydrogéologique et géochimique

A Sevrans, les formations du quaternaire recouvrent les assises tertiaires, que sont, du haut vers le bas, les reliquats des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> Masses-et-Marnes du Gypse (MMG), les Marnes à Pholadomies, le Marno-Calcaire de Saint-Ouen (CSO), les Sables de Beauchamp (SB), les Marnes-et-Caillasses (MC), le Calcaire Grossier (CG) et les formations de l'Yprésien (Figure 1). Les investigations géologiques de la Ligne 16 ont mis en évidence un contraste spatial de gisement dans les formations gypseuses luténiennes (MC) entre le nord et le sud de la commune. A l'aplomb de la gare de Sevrans-Livry, des bancs de gypse albaströide, d'une épaisseur cumulée d'une bonne dizaine de mètres et exempts ou presque d'indices de dissolution, ont été systématiquement reconnus par les sondages carottés. Vers le Nord (gare de Sevrans-Beaudottes), ces horizons gypseux disparaissent en grande partie et ne laissent place qu'à des lentilles de petites dimensions, fréquemment déstructurées ou décomprimées, mises en évidence à partir des paramètres de forage d'une série de sondages destructifs. A partir de ces observations, la présence d'un front de dissolution a été déduite au Nord de la gare de Sevrans-Livry, séparant une zone à gypse abondant et préservé au Sud, d'une zone à gypse largement dissous au Nord (Charmoille et al., 2021).

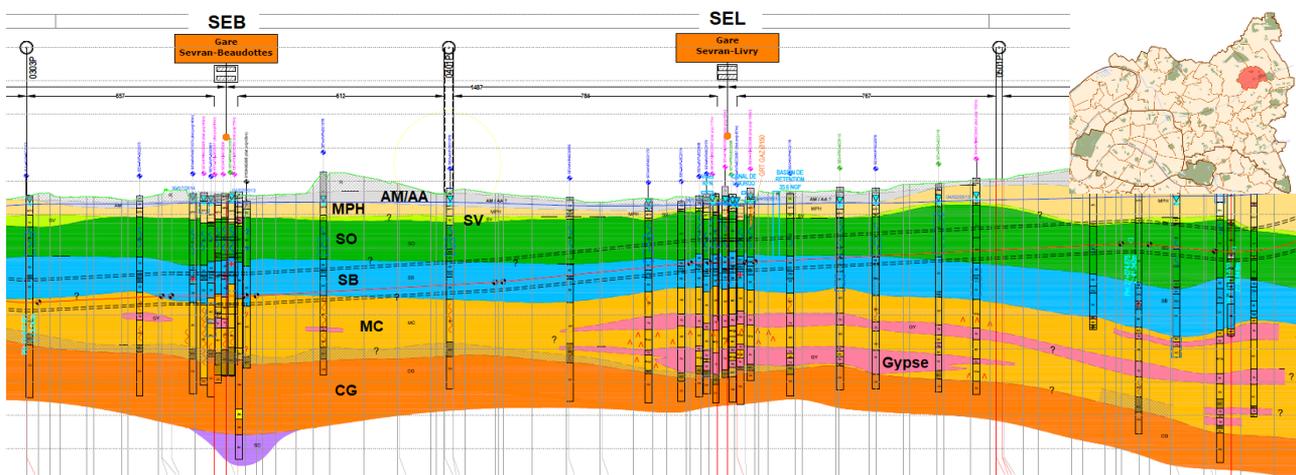


Figure 1 : Extrait du profil géologique en long de la future ligne 16 (étude Projet). En rose : bancs de lentilles de gypse massif au sein des Marnes et Caillasses

Sur le plan hydrogéologique, la superposition de formations géologiques plus ou moins perméables se traduit par la présence de plusieurs nappes, notamment la nappe superficielle, la nappe du Calcaire de Saint-Ouen et la nappe des Marnes-et-Caillasses, ces deux dernières étant séparées par la présence d'une couche argileuse au sein des Sables de Beauchamp. La relation entre la nappe du Saint-Ouen et la nappe des Marnes-et-Caillasses est complexe, avec des zones où ces deux nappes s'individualisent, et d'autres où des communications semblent exister. Ces deux nappes s'écoulent de l'Est vers l'Ouest, en direction de la Seine, et il existe encore de fortes interactions entre les anciens ruisseaux, actuellement canalisés, et les aquifères sous-jacents.

## 3. REX

### 3.1. REX Kodak

Construite en 1924 le long du canal de l'Ourcq à Sevrans, l'usine Kodak ferme définitivement en 1995. Durant ces 70 ans d'activité, plusieurs puits de pompages captant différentes nappes furent installés successivement, et des volumes très importants furent prélevés. Malgré des incertitudes sur l'évolution des débits de pompage, les informations

recueillies suggèrent que les volumes pompés annuellement étaient de l'ordre de 2 millions de m<sup>3</sup> dans les années 1960 (2 tiers provenant de la nappe du Lutétien et 1 tiers de la nappe de l'Yprésien), et qu'ils ont ensuite diminué progressivement jusque dans les années 1990. Dans le cadre du projet d'urbanisation des ZAC de Sevrans et de Villepinte, l'impact des pompages de l'usine Kodak sur le fonctionnement hydrogéologique de la nappe des Marnes-et-Caillasses fut étudié (LREP, 1971). Un essai de pompage, sollicitant la nappe des Marnes-et-Caillasses avec une intensité correspondant aux pompages des années 1960, avait permis d'estimer que le rayon d'action était de l'ordre de 2 kms, et le rabattement d'environ 4 m au droit de l'usine (Figure 2). A cette époque, les pompages s'interrompaient le week-end et, vraisemblablement, pendant la nuit. Cela se traduisait par une cyclicité journalière et hebdomadaire des fluctuations piézométriques, ainsi que par des variations brutales des gradients hydrauliques voire, localement, d'inversion des sens d'écoulement.

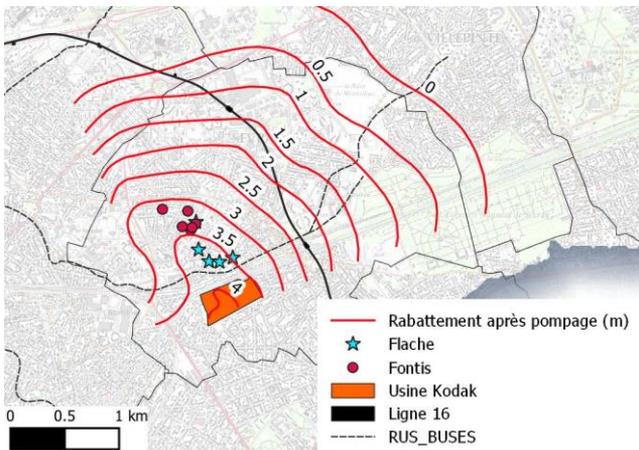


Figure n°2 : Courbes d'iso-rabattement pendant l'essai de pompage à 200 m<sup>3</sup>/h et localisation des désordres liés à la dissolution du gypse.

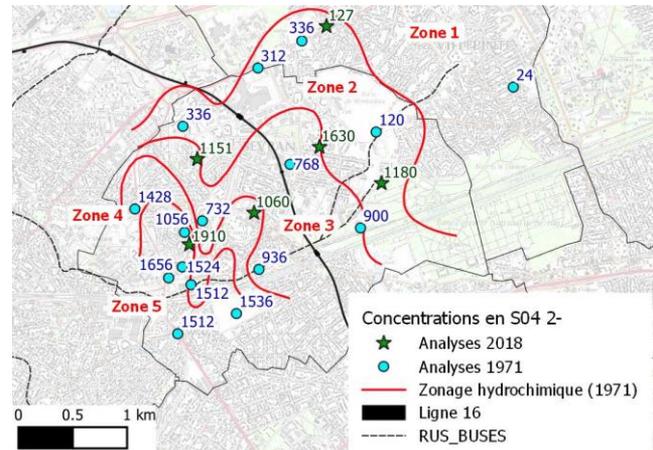


Figure n°3 : Comparaison des concentrations en sulfates dans la nappe des Marnes-et-Caillasses entre 1971 et 2018

Outre l'impact sur les niveaux de nappe, les pompages industriels avaient provoqué une modification des équilibres physico-chimiques. Une comparaison des analyses réalisées en 1971 et en 2018, par l'Ineris, montre que les concentrations en sulfates de la nappe des Marnes-et-Caillasses étaient nettement plus faibles en 1971 qu'en 2018 (Figure 3). En augmentant les vitesses d'écoulement, les pompages ont ainsi favorisé l'arrivée d'eau peu minéralisée dans les zones gypseuses, et provoqué une avancée du front de dissolution. Bien que le lien de causalité n'ait jamais été établi, plusieurs désordres sont survenus au nord de l'usine, dans la zone d'inversion des sens d'écoulement, dont certains lors des travaux du RER B.

### 3.2. REX RER B

Le RER B traverse Sevrans en tranchée couverte sur 2,6 kms. Pour s'affranchir des problèmes liés aux eaux souterraines lors de la construction, des tranchées drainantes et des puits crépinés dans le Saint-Ouen (41 puits, alignés d'un côté de la fouille, avec un espacement de 50 à 100 m) furent installés, afin de rabattre respectivement la nappe superficielle et la nappe du Saint-Ouen (Figure 4). Peu de temps après le début des travaux, en avril 1974, plusieurs désordres (affaissements, fissures sur pavillons, ...) survinrent. Des incertitudes demeurent sur les volumes pompés initialement, mais le rabattement de la nappe du Saint-Ouen aurait atteint 14 m et ainsi provoqué une déstabilisation d'anciennes zones de dissolution du gypse lutétien. Un programme de maîtrise des pompages fut alors défini : les pompages se poursuivirent avec un débit total de l'ordre de 350 m<sup>3</sup>/h jusqu'à la fin des travaux, et furent suivis d'une phase d'arrêt progressif des pompages (Figure 5),

permettant d'éviter que de brutales variations des gradients hydrauliques ne surviennent à nouveau. Les pompages à 350 m<sup>3</sup>/h occasionnèrent tout de même un fort rabattement des nappes (respectivement 6 et 4 m, à 200 m de la tranchée, pour les nappes du Saint-Ouen et des Marnes-et-Caillasses ; Figure 5), mais il n'y eut pas de nouveaux désordres à déplorer, jusqu'à la fin du suivi en juin 1975.

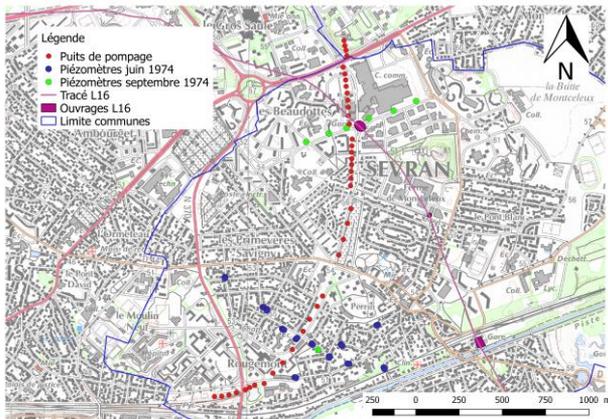


Figure 4 : Emplacements des puits de pompage et des piézomètres mis en place lors des travaux du RER B

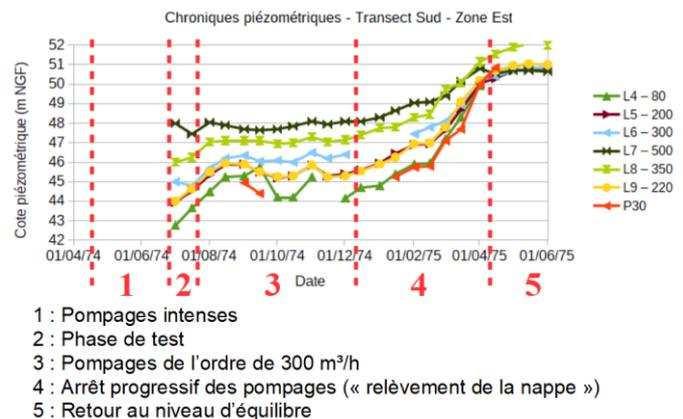


Figure 5 : Fluctuation des niveaux piézométriques lors des différentes phases de pompage des travaux du RER B (transect Sud, zone Est)

#### 4. Caractérisation des vitesses de dissolution du gypse

Les perturbations des vitesses d'écoulement induites par les travaux et sollicitation notamment hydrogéologiques du sous-sol, mentionnés dans le REX, peuvent accélérer la dissolution et être à l'origine du déclenchement de désordres. Il est donc important d'améliorer la caractérisation et la quantification des processus de dissolution naturelle dans le sous-sol du secteur d'étude pour une meilleure gestion des aléas.

Des protocoles expérimentaux ont été définis, validés et utilisés pour déterminer des lois cinétiques de dissolution adéquates vis-à-vis des conditions d'écoulement locales et les spécificités du gypse naturel présent dans le sous-sol. L'accès aux forages carottés réalisés lors de la campagne de reconnaissance a permis de constituer une collection de nombreux faciès de gypse avec des textures et des compositions minéralogiques différentes. Des prélèvements d'eau dans des piézomètres atteignant les Marnes et Caillasses ont également été effectués et les résultats des analyses physico-chimiques ont permis de calculer les indices de saturation vis-à-vis du gypse sur l'ensemble de la commune de Sevran et d'évaluer pour chaque point un indice de récession permettant de quantifier l'avancée de la dissolution naturelle en fonction du faciès de gypse potentiellement présent.

La détermination expérimentale des paramètres de la loi cinétique repose sur le suivi en continu de la conductivité électrique d'une solution où est immergé un disque de gypse tournant jusqu'à atteindre la saturation. Les valeurs du coefficient de dissolution,  $k$ , sont comprises entre 2 et 10 mg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> et les valeurs de l'ordre de la cinétique,  $n$ , sont proches de l'unité avec une dispersion autour d'une valeur moyenne égale à 1,1. Ces valeurs varient avec les conditions expérimentales et la texture du faciès, notamment la teneur en insoluble et leur répartition (Zaier et al., 2021). Le taux de dissolution effectif,  $\tau$ , peut être évalué directement en fonction de l'indice de saturation,  $IS$ , en considérant la loi cinétique exprimée en fonction du produit d'activité ionique,  $Q$ , et de la constante de solubilité du gypse,  $K_s$ , comme suit :

$$\tau = k \left(1 - \frac{Q}{K_s}\right)^n = k(1 - 10^{IS})^n$$

Ce coefficient de dissolution peut être converti en taux de récession, exprimé en unité de vitesse, corrigé de la porosité. Ce taux de récession représente ainsi une estimation de l'évolution temporelle de déplacement de la surface d'une cavité de dissolution ou d'une lentille gypseuse au contact d'une nappe souterraine. Une autre phase d'expérimentations en laboratoire a permis de corriger les taux de récession avec prise en compte de la teneur en insolubles présents dans le gypse,  $t_i$  (%), suivant leur résistance à l'érosion.

En introduisant des données d'entrée acquises in situ, en laboratoire et issus de modélisation des interactions eau-roche, les taux de récession permettent d'obtenir un indice de récession « in situ » dans la gamme des vitesses d'écoulement estimées par des simulations numériques et par des mesures sur le terrain.

Les résultats des analyses chimiques dans les Marnes et Caillasses mettent en évidence une variabilité de leur état de saturation vis-à-vis du gypse (Figure 3). Elles sont soit en quasi équilibre avec le gypse (IS entre -0,06 et 0,004) soit en sous saturation (IS entre -1,4 et -0,13). Pour l'évaluation des indices de récession in situ de la commune de Sevrans, il a été considéré les paramètres cinétiques des deux faciès de gypse les plus répandus dans les horizons des marnes et caillasses: un faciès gypseux albaströïde non poreux de faible teneur en insolubles ( $t_i \approx 3\%$ ) et un faciès gypseux albaströïde impur de porosité entre 1 et 3% et de forte teneurs en insolubles ( $t_i \approx 15\%$ ).

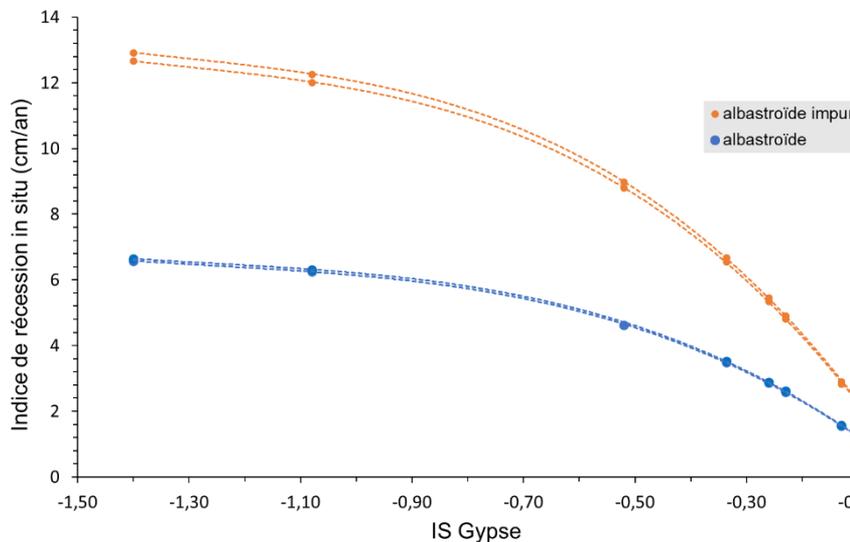


Figure 6 : Evolution de l'indice de récession in situ en fonction de l'état de saturation du système étudié pour chacun des faciès de gypse présents dans les marnes et caillasses

La figure 6 montre que l'évolution globale du taux de récession est inversement proportionnelle à l'état de saturation du système vis-à-vis du gypse. L'ensemble des points présenté pour un IS donné caractérise la variation de la valeur de l'indice de récession en fonction de la porosité et de la teneur en insolubles. Pour le gypse albaströïde impur, la limite supérieure désigne la valeur obtenue pour une porosité de 3% et la limite inférieure pour une porosité de 1%. Les insolubles présents sont sensibles à l'érosion et créent des reliefs macroscopiques au cours de la dissolution, qui perturbent l'écoulement et amplifient localement la récession de la surface. Ce faciès pourrait donc présenter des indices de récession deux fois plus importantes que celles du gypse albaströïde pur non poreux selon l'état de saturation du système et de la surface exposée à la dissolution.

Le potentiel de dissolution des eaux circulant au sein des Marnes et Caillasses quantifié par les indices de récession varient de 0 à 13  $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ , sous condition de la présence de gypse et de ses caractéristiques pétrophysiques. Cet intervalle de valeurs concorde bien avec les travaux de modélisation des processus de dissolution des lentilles gypseuses à l'échelle

kilométrique déjà réalisés dans le projet (Charmoille et al., 2021). Les indices de récession les plus faibles, de 0 à 1,3 cm.an<sup>-1</sup>, représentent les points situés au sud de la commune où des bancs de gypse d'épaisseur significative sont encore présents.

## 5. Adaptation des dispositions constructives

### 5.1. Conception des ouvrages

Les deux gares dans la zone à risque élevé de dissolution du gypse sont constituées d'une boîte principale profonde et deux excroissances (Figure 7). Pour chaque site, une excroissance a un rôle de connexion avec les gares déjà existantes (RER B) et l'autre sert de local technique. En règle générale, pour les excroissances, la conception est limitée à la justification de la stabilité mécanique au travers de la définition de la fiche de paroi moulée ancrée dans les Calcaires de Saint Ouen ou dans les Sables de Beauchamp. Pour les boîtes profondes, la conception est faite en deux étapes. Après la définition de la fiche mécanique en parois moulées ancrée dans les Marnes et Caillasses ou le Calcaire Grossier, une fiche hydraulique est recherchée au travers d'un rideau de terrain traité peu perméable appelé jupe injectée. L'objectif principal de la jupe injectée est de limiter les débits exhaures et conjointement abaisser le risque de dissolution du gypse lutétien et limiter les rabattements extérieurs qui pourraient réactiver d'anciens fontis. Pour ce faire, elle est ancrée dans un horizon peu perméable en dessous de la fiche mécanique, à 3m dans le Calcaire Grossier sain dans le cas de nos deux ouvrages.

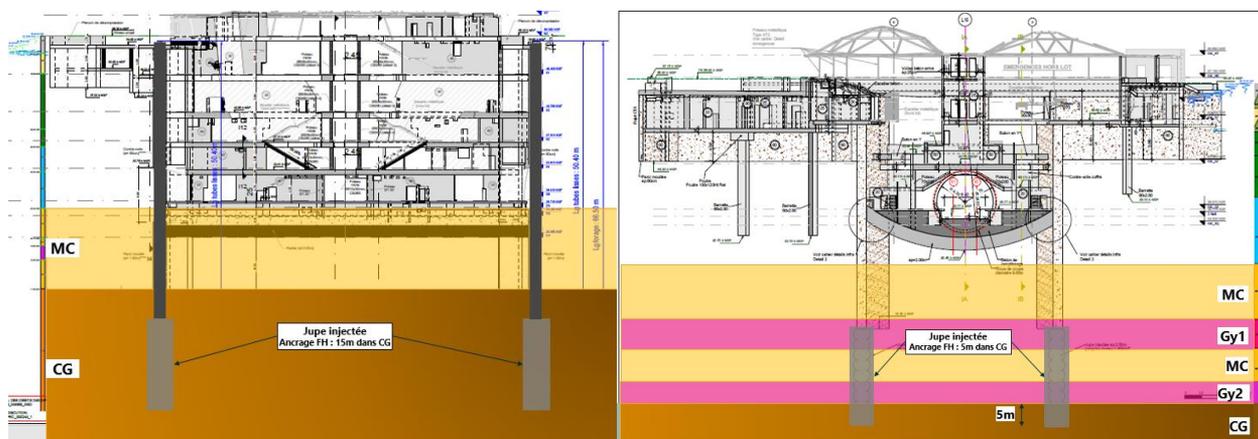


Figure n°7 : vues en coupe des gares de SEB et SEL

Afin de lever les incertitudes, identifiées lors de la conception, un essai de pompage a été réalisé lors des études d'exécution (reconnaitances de niveau G3). L'essai a montré une déstructuration des niveaux supérieurs du Calcaire Grossier nécessitant un approfondissement de la jupe hydraulique (fiche de 4m) au droit de la gare de Sevrans-Livry, alors que la fiche hydraulique retenue en conception sur la gare de Sevrans-Beaudottes a été conservée.

### 5.2. Définition du dispositif de pompage

Le dispositif d'exhaure adopté pour le rabattement des nappes est constitué des puits de rabattement équipés de pompes électriques. Le nombre de puits et leur répartition dans la boîte dépend de la géométrie de la boîte et de la profondeur d'ancrage des puits. Par retour d'expérience sur la Plaine de France, l'ancrage des puits nécessaire pour la réalisation d'un rabattement efficace est situé à environ 7m en dessous du niveau du fond de fouille. Toutefois, sur la gare de Sevrans-Livry, il a été convenu de limiter la profondeur des puits de rabattement au-dessus du premier banc de gypse pour limiter les débits

pompés (Figure 8). Cette disposition constructive a été arrêtée à l'issue de l'examen des bancs de gypse considérés comme sains au droit du site et donc peu perméables ainsi qu'après une modélisation fine de l'impact potentiel des travaux sur le processus de dissolution des bancs de gypse.

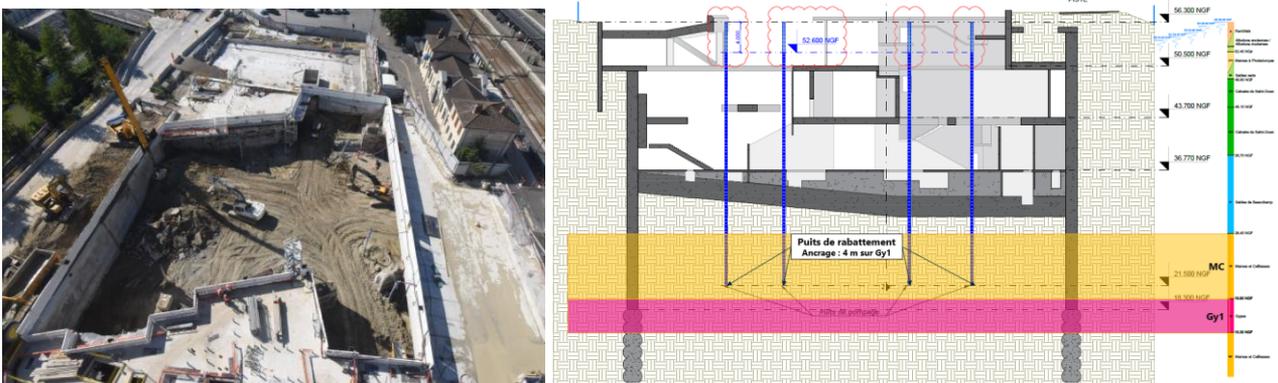


Figure n°8 : Vue aérienne des travaux de la gare de SEL et vue en coupe du dispositif de pompage

### 5.3. Suivi piézo et physico-chimique en phase exécution

Le réseau piézométrique existant autour des emprises des chantiers a été complété dès le démarrage de travaux afin d'obtenir des informations suffisantes sur les niveaux et la chimie des eaux de toutes les nappes. Les réseaux définitifs sur un rayon d'environ 150 m autour des ouvrages respectifs sont constitués de 9 piézomètres proche de la gare de Sevran Beaudottes et 11 à proximité de la gare de Sevran Livry. Pour chacun de ces ouvrages, quatre piézomètres (1 dans le Bartonien et 3 dans le Lutétien) sont utilisés pour le suivi des concentrations en calcium et en sulfate (dénommés marqueurs « gypse »).

Durant toute la période précédant les pompages, les relevés de niveau d'eau sont réalisés de façon hebdomadaire et les prélèvements pour dosage des marqueurs « gypse » selon une fréquence mensuelle. Au démarrage des pompages, un état zéro des niveaux d'eau, des marqueurs « gypse », de la conductivité et du pH est réalisé.

Pendant la phase de pompage, des mesures automatiques sont réalisées pour visualiser le niveau de chaque nappe en temps réel. Le suivi des marqueurs gypses passe à une fréquence bimensuelle dans les piézomètres et dans les eaux d'exhaure. À noter qu'une différenciation est faite lors des prélèvements entre les eaux pompées dans les excroissances (nappe du Bartonien) et dans les boîtes profondes (nappe du Lutétien). Les données suivies (conductivité, concentration en  $\text{SO}_4^{2-}$  et progressivement d'autres paramètres) sont expertisées à fréquence bimensuelle pour estimer l'indice de récession décrit au paragraphe 4. Des valeurs seuil de vigilance et d'alerte ont été définies pour permettre de limiter l'impact du pompage d'exhaure sur les processus de dissolution naturelle du gypse.

### 5.4. Premiers retours sur le déroulement des pompages d'exhaure

À ce jour, les dispositions prises lors de la conception et pendant la réalisation des travaux, semblent être efficaces. Lors des rabattements dans les ouvrages profonds les débits constatés restent faibles et les rabattements extérieurs peu importants (Tableau 1). Les variations des marqueurs « gypse » restent faibles et leur impact sur l'évolution des indices de récession est limité et jugé peu préjudiciable.

Tableau 1. Rabattements occasionnés par les pompages dans les ouvrages profonds

Ouvrages	Débits	Nappes	Piezomètres	Distances à l'ouvrage	Rabattements
Boite SEB	25 m <sup>3</sup> /h	Bartonien	SEV-FAI-FD02138	120 m	0 cm
			SEV-FAI-FD00862	40 m	20 cm
		Lutétien	SEV-EXE-SC06586	25 m	50 cm
			SEV-EXE-PZ07480	10 m	120 cm
Boite SEL	<10 m <sup>3</sup> /h	Bartonien	SEV-EXE-FD06593	55 m	0 cm
			SEV-EXE-PZ07587	25 m	20 cm
		Lutétien	SEV-EXE-PZ06946	75 m	0 cm
			SEV-EXE-PZ07660	20 m	15 cm

## 6. Conclusions

Des pompages intenses et prolongées, comme ceux de l'ancienne usine Kodak, peuvent modifier les équilibres physico-chimiques dans la nappe des Marnes-et-Caillasses, et ainsi accélérer les phénomènes de dissolution du gypse lutétien. Les expertises en cours et les retours d'expérience indiquent par ailleurs une forte sensibilité des zones dissoutes antérieurement. En effet, la déstructuration des formations sus-jacentes par la dissolution des lentilles gypseuses (colonnes de fontis) leur confère une forte susceptibilité aux mouvements de terrain (affaissement, effondrement, ...) sous l'effet de modifications hydrodynamiques du milieu.

Les mesures réalisées in situ, les expériences en laboratoire et les travaux de modélisation montrent quant à eux que la cinétique de dissolution et l'évolution des fronts de dissolution sont relativement « lents », tout du moins dans le contexte géologique local. Une méthode a été développée pour estimer le taux de récession du gypse en fonction du niveau de saturation de la nappe, et cela pour différents faciès de gypse.

Ces enseignements ont permis d'orienter le choix des dispositions constructives et des dispositifs d'épuisement des ouvrages de la Ligne 16 à Sevran. La maîtrise des risques est notamment assurée par une recherche de limitation des débits sur les différentes parties des ouvrages, un suivi en continu des niveaux d'eau à l'extérieur des ouvrages et des concentrations en sulfate et calcium ainsi que la vérification de l'absence de mouvements sur les avoisinants. Le suivi des concentrations en sulfate et calcium permet le calcul d'un taux de récession qui contribue au pilotage des travaux.

Outre les applications à d'autres chantiers réalisés dans des contextes similaires, la principale perspective reste maintenant de développer des outils permettant d'intégrer ces connaissances aux politiques de gestion du territoire, notamment pour la cartographie de l'aléa dissolution du gypse, ou encore pour l'évaluation de la faisabilité de l'infiltration des eaux pluviales en zone de gypse.

## 7. Références bibliographiques

Charmoille A., Dumont E., Egal E., Massad P. Miszlay I. Kreziak C. (2021). Adaptation des dispositions constructives des ouvrages de la Ligne 16 du Grand Paris Express en zone de dissolution du Gypse Lutétien. Actes du 16<sup>ème</sup> Congrès international AFTES "Le souterrain, espace d'innovations".

Laboratoire Régional de l'Équipement (LREP), 1971. SAES – Zones d'aménagement concertées de Sevran et de Villepinte – Étude géologique.

Zaier I., Billiotte J., Charmoille A., Laouafa F. (2021). The dissolution kinetics of natural gypsum: a case study of Eocene facies in the north-eastern suburbs of Paris. *Environmental Earth Sciences*, 80(8), pp. 1-16.