

Géologie et hydrogéologie de la colline de Sainte-Foy-Ménival (Lyon) - Apport des campagnes de reconnaissances des projets TEOL et Metro E

Geology and Hydrogeology of the Sainte-Foy-Ménival Hill (Lyon) – Contribution of the Survey Campaigns from the TEOL and Metro E Projects

Léo-Paul BINEAU¹, Melvin RIMAUX², Lionel DEMONGODIN¹, Emmanuel EGAL², François PHILIP¹

1 EGIS Tunnels, Pringy, France

2 EGIS Géotechnique, Lyon, France

RESUME : Depuis 2019, plusieurs campagnes de reconnaissances géotechniques ont été réalisées dans le cadre des projets du Métro E de la ville de Lyon et de TEOL (Tramway Express de l'Ouest Lyonnais). Les études des différents tracés de ces deux projets dont la dernière version (TEOL) traverse la colline de Sainte-Foy – Ménival (prolongation de la colline de Fourvière au Sud) ont permis de recueillir des données précieuses sur la géologie et l'hydrogéologie grâce à des sondages semi-profonds et à l'installation de nombreux piézomètres. L'analyse de ces sondages permet d'avoir une image relativement détaillée en profondeur de la géologie de la colline au droit des tracés, ce qui a permis notamment d'identifier en profondeur une formation particulière, la Formation sablo-conglomératique des Etroits, peu connue et peu identifiée dans le sous-sol lyonnais. Le projet de tunnel traverse également les terrains du Miocène et du Pliocène principalement sableux à très graveleux dans une matrice fine, tout en restant au-dessus du socle ancien métamorphique.

L'analyse des piézomètres a révélé la présence de nappe phréatique sur le plateau potentiellement liée aux nombreuses sources observées, notamment sur le versant Est côté Saône. L'origine de la nappe profonde observée sur le plateau reste toutefois mal comprise et pourrait ne pas être due uniquement aux sources d'alimentation internes.

Cet article a pour objectif de fournir un aperçu détaillé de la géologie et des conditions hydrogéologiques sur le site du projet TEOL, en s'appuyant sur les résultats des récentes campagnes de reconnaissance. Des données géotechniques de sondages pressiométriques sont également présentées.

ABSTRACT: Since 2019, several geotechnical survey campaigns have been carried out as part of the Lyon Metro E project and the TEOL (Tramway Express of Western Lyon) project. Studies of the various routes for these two projects—including the latest version (TEOL), which crosses the Sainte-Foy – Ménival hill (the southern extension of the Fourvière hill)—have made it possible to collect valuable data on geology and hydrogeology through semi-deep boreholes and the installation of numerous piezometers. Analysis of these boreholes has provided a relatively detailed subsurface image of the hill's geology along the planned routes, which has notably enabled the identification at depth of a particular formation, the Sandy-Conglomeratic Formation of Etroits, which is little known and rarely identified in the Lyon subsurface. The tunnel project also crosses Miocene and Pliocene terrains, mainly sandy to very gravelly within a fine-grained matrix, while remaining above the ancient metamorphic basement. Analysis of the piezometers revealed the presence of a groundwater table on the plateau, which may be linked with the numerous springs observed, particularly on the eastern slope facing the Saône. However, the origin of the deep aquifer observed on the plateau remains poorly understood and may not be solely to external recharge sources.

The aim of this article is to provide a detailed overview of the geology and hydrogeological conditions at the TEOL project site, based on the results of recent survey campaigns. Geotechnical data from pressuremeter drillings are also presented.

Mots-clés: Géologie ; hydrogéologie ; Lyon ; Balmes ; TEOL.

1 INTRODUCTION

Le projet de tram express TEOL a succédé au projet Métro E pour relier l'Ouest de Lyon à son centre-ville. La ligne TEOL est composée d'une section principale souterraine en tunnel permettant de franchir le relief formé par la prolongation au Sud

de la colline de Fourvière et deux tronçons en surface, de part et d'autre du tunnel.

Cet article se focalise sur la partie souterraine du projet TEOL. La construction d'un nouveau tunnel profond et des ouvrages ponctuels associés au sein de la colline de Fourvière nécessite d'appréhender un contexte géologique et hydrogéologique atypique

tant par son organisation lithologique que par son mode de fonctionnement hydrogéologique.

De nombreux mouvements de terrain, ayant parfois causé des dégâts importants, ont été observés sur le versant Est de la colline aussi appelé « balmes ». Les spécialistes ont pu observer une concomitance des événements les plus tragiques avec une pluviométrie exceptionnelle. Ces pentes recèlent d'ailleurs un grand nombre de galeries drainantes au moins pour partie d'époque romaine, formant de véritables réseaux de captage.

Les études des projets Métro E et TEOL se sont respectivement déroulées entre 2018 et 2020 puis à partir de 2023. Pour ces études, plusieurs campagnes de reconnaissances profondes des terrains ont été menées dans un contexte urbain dense. Une campagne est en cours pour TEOL.

2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE LOCAL

La ville de Lyon et sa proche banlieue s'étendent largement dans sa partie est sur la plaine alluviale de la Saône et du Rhône, et de manière moins étendue sur les premiers reliefs du Massif central, dans sa partie ouest.

Le tracé du projet TEOL s'étend du 2ème arrondissement de Lyon dans la plaine alluviale, jusqu'à la commune de Tassin-la-Demi-Lune (Étoile d'Alaï) sur le plateau bordier du Massif central, en passant par un tunnel d'environ 3 km.

La plaine alluviale (un peu plus de 160 m d'altitude à l'Est) est bordée en rive droite de la Saône par un haut talus à pente raide culminant à 305 m (dénivelé de 145 m, pente moyenne >25%). Un tel versant raide est typique de la géomorphologie lyonnaise et se retrouve régulièrement au niveau des collines de La Croix-Rousse et de Fourvière et de leurs prolongements. Ces versants raides sont appelés « balmes » selon la terminologie lyonnaise.

Au-delà vers l'Ouest du sommet des balmes, l'altitude du terrain naturel décroît légèrement au droit du projet TEOL puis on passe à un plateau à peu près plat puis descendant légèrement vers l'Ouest.

Jusqu'ici, la prolongation au Sud de la colline de Fourvière était encore géologiquement et hydrogéologiquement peu connue en dehors des manifestations et phénomènes visibles sur le secteur des balmes : les sources qui jalonnent le versant et les instabilités de pente à l'origine de nombreux glissements de terrains et éboulements recensés depuis le XIXème siècle (Mongereau, 1985). Aucun projet n'a motivé d'investigations au cœur de la prolongation au Sud de la colline de Fourvière.

De plus, bien qu'une nappe pérenne soit identifiée en profondeur, la faible perméabilité d'ensemble des terrains fait que ce réservoir présente peu d'intérêt hydrogéologique et n'a donc pas ou peu fait l'objet de travaux de reconnaissance ou d'exploitation par forage.

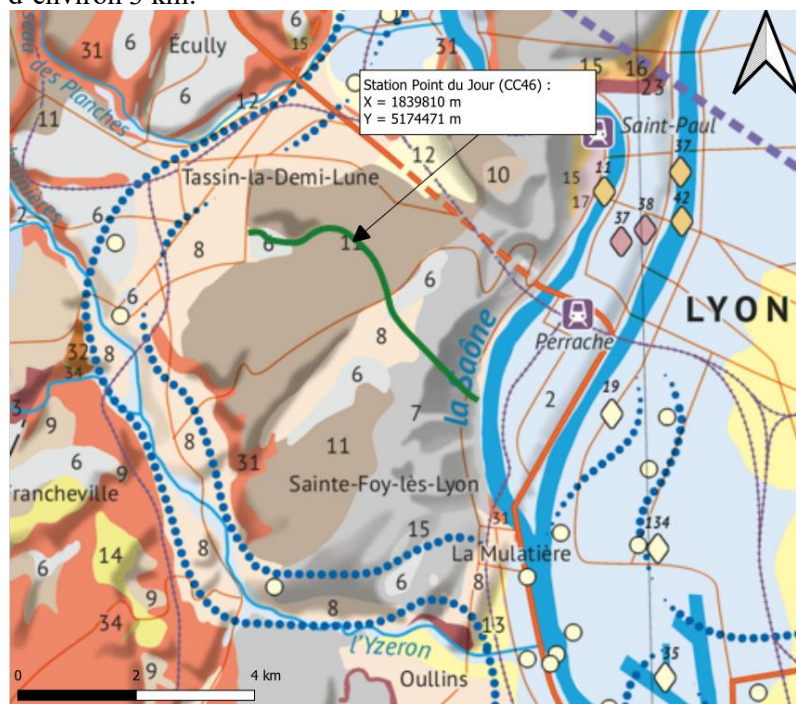


Figure 1 . Cadre géologique simplifiée de Lyon à 1/80 000 (2021)– Tracé tunnel TEOL en vert
Légende des formations concernant le tunnel (tracé vert) : 7 : moraines rissiennes, 8 : alluvions fluvio-glaciaires rissiennes, 11 : Alluvions jaunes villafranchiennes du Pliocène, 6 : limons rissiens (loess), 31 : socle varisque.

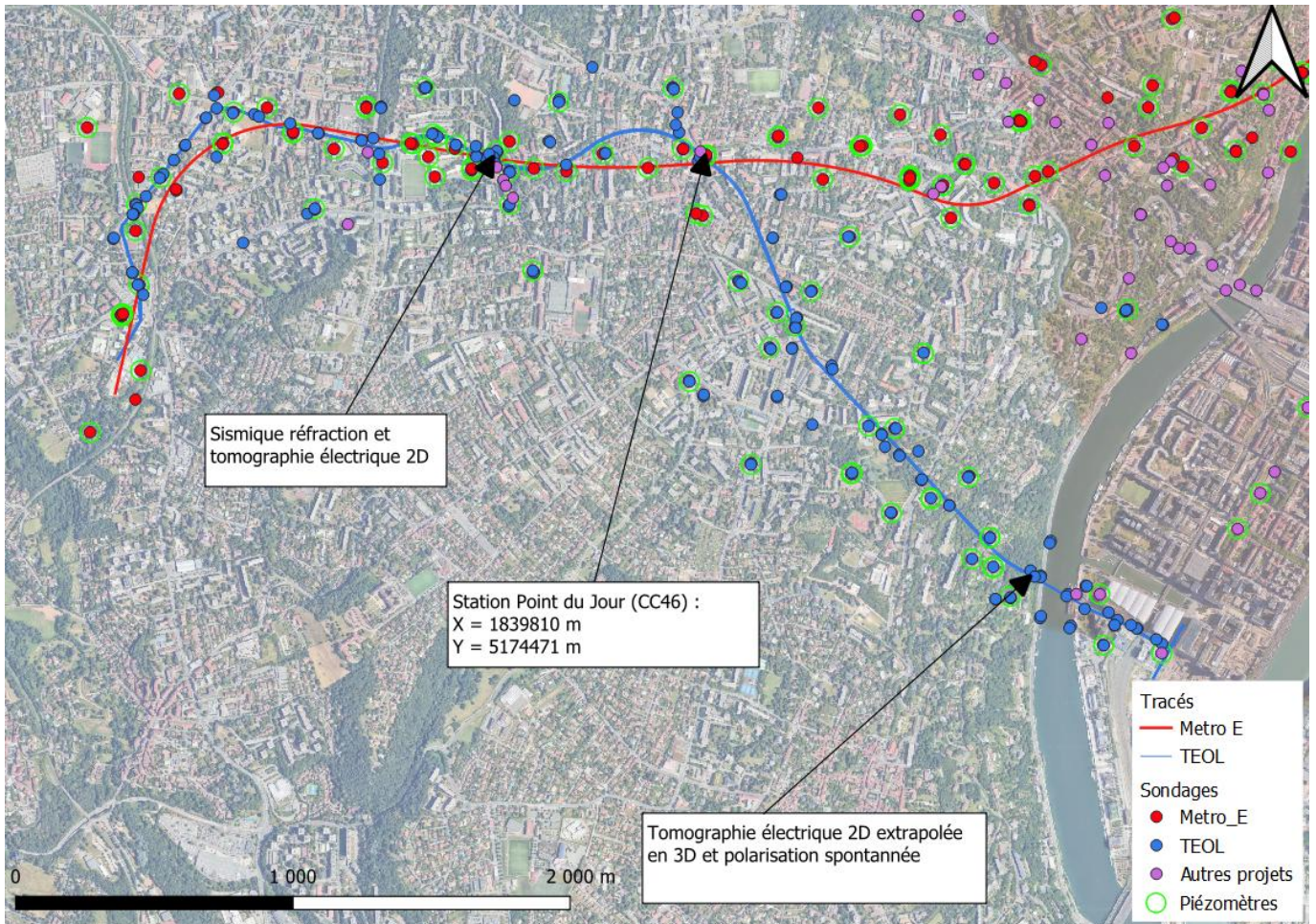


Figure 2 . Localisation des sondages par projet et des campagnes géophysiques

La colline traversée par le projet TEOL est constituée principalement de formations sédimentaires néogènes surmontant le socle hercynien et surmontées en partie par des dépôts glaciaires quaternaires (moraines - Figure 1). Une entité particulière encore méconnue ou mal identifiée, la Formation des Etroits, s'intercale entre le socle et le Miocène (voir plus loin la description du profil en long géologique).

3 DESCRIPTION DES RECONNAISSANCES

De nombreux sondages carottés (SC), destructifs (FD), pressiométriques (PR), parfois équipés de piézomètres (PZ), ont été réalisés à l'axe des tracés (Figure 2). Les sondages les plus longs atteignent plus de 100 m de profondeur au sommet local du versant des balmes où le tunnel est le plus couvert. Le Tableau 1 récapitule le nombre de sondages réalisés.

Campagne	Nb SC	Nb FD	Nb PR	Nb PZ
Métro E	88	15	28	32
TEOL	75	35	59	38

Tableau 1 – Nombre de sondages réalisés

Les campagnes TEOL ont permis de récolter des données dans le secteur Sud-Est du tracé du projet où les données bibliographiques étaient relativement inexistantes et où l'espace public est très limité; rendant la réalisation de sondage en espace privé nécessaire. Le secteur Ouest du tracé profite des investigations réalisées pour métro E (Figure 2).

Deux campagnes géophysiques ont également été réalisées au niveau des ouvrages d'entrée et de sortie du tunnelier. Outre l'apport d'informations vis-à-vis de la stratigraphie, l'objectif de ces campagnes a été d'identifier des écoulements préférentiels dans des zones de pied de versant.

4 PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE DU TUNNEL DE TEOL

Les reconnaissances ont permis d'établir un profil en long géologique et d'identifier les formations géologiques suivantes (de « bas en haut », c'est-à-dire du plus vieux au plus récent) :

- Le socle hercynien essentiellement gneissique (numéro ① sur la Figure 3)
- La Formation des Etroits ②
- La formation du Miocène supérieur ③
- Les Alluvions jaunes ④
- Les dépôts de loëss ou assimilés. ⑤
- Les dépôts morainiques. ⑥

Dans la partie Ouest du profil en long, le socle métamorphique hercynien ou varisque (gneiss migmatitique principalement) constitue le substratum géologique du projet, à plus grande profondeur que le tunnel (il ne sera pas recoupé par celui-ci) ; il forme un dôme irrégulier dont l'extrémité Est s'approfondit à mesure que l'on s'en éloigne.

Dans la partie Est du profil, c'est la Formation des Etroits qui constitue le substratum géologique du projet. Sa base n'est pas recoupée en sondage et n'est pas connue ici. Elle est représentée par un faciès largement dominant de sable compact mais des faciès limono-argileux, conglomératiques, ou de sable lâche sont distingués en sondage (Figure 4A et Figure 4B).

Cette formation résulte du démantèlement du socle, elle correspond au « Conglomérat des Etroits ou Cailloutis des Etroits » décrit très localement par F. Roman en 1931, à partir d'affleurements en bordure du quai des Etroits (Mongereau, 1985). Initialement rapportée à l'Oligocène, elle représenterait plutôt le Carbonifère (Gilles Dromart, comm. Écrite et orale).

Le Miocène supérieur recouvre le conglomérat des Etroits à l'Est et une partie du socle à l'Ouest. Il est essentiellement sableux (sable généralement compacts - (Figure 4C) à l'Ouest mais à l'Est, au niveau de la pente marquée du tunnel, les intercalations limono-argileuses sont régulièrement recoupées en sondage. Ces intercalations sont de forme et d'extension indéterminées dans le détail.

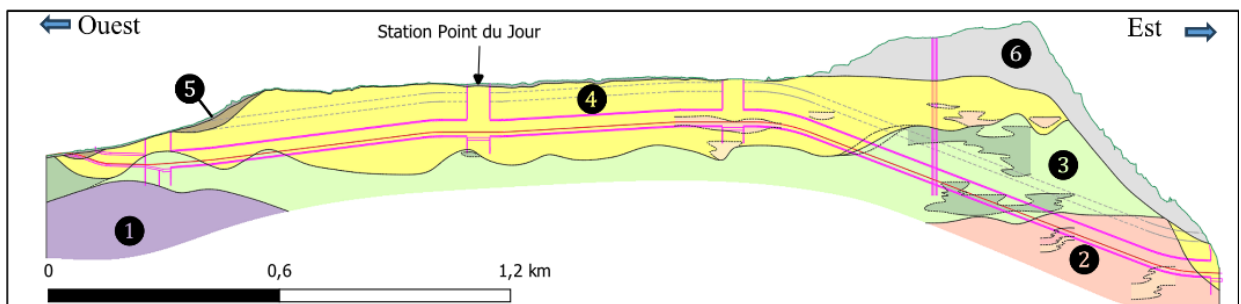


Figure 3 . Profil en long géologique. Voir texte pour légende des formations représentées



Figure 4 – Carottes de la formation des Etroits (A et B), de Miocène Supérieur (C) et d'Alluvions jaunes (D)

Sur l'essentiel du profil, sous le plateau, les Alluvions jaunes recouvrent régulièrement le Miocène supérieur et constituent la formation la plus représentée au niveau du tunnel. Il s'agit de matériaux majoritairement graveleux dans une matrice limono-argileuse à sableuse (Figure 4D) et présentant des intercalation non graveleuses argilo-limoneuse à sableuse. Des Alluvions jaunes sont également présentes à la base du versant des balmes.

Au-dessus des Alluvions jaunes et sur les pentes des Balmes, les moraines forment une masse au niveau du rebord est du plateau à l'aplomb des balmes mais elles ne se prolongent pas au-delà de ce rebord. Comme les poches de loess superficiels et sporadiques, le tunnel ne les traversera pas.

5 HYDROGÉOLOGIE DE LA COLLINE ET DES BALMES

Les campagnes de reconnaissance successives engagées dans le cadre des études préliminaires du projet de Métro E puis de TEOL permettent de disposer d'éléments nouveaux sur l'organisation de cet objet géologique complexe comme sur l'hydrosystème qu'il héberge, tout au moins à l'échelle du tracé.

Conceptuellement, la colline de Fourvière forme un microsystème hydrogéologiquement isolé de son environnement par des vallées et des paléo-vallées : Saône, Yzeron, ... (Figure 1). En première approche la nappe qu'elle abrite ne peut donc s'alimenter que par la recharge naturelle, autrement dit par l'infiltration de la pluie qui s'abat à l'échelle de son impluvium et qui n'est généralement opérante qu'en période hivernale. Une recharge artificielle passive est également possible à travers la fuite des réseaux de surface. Cet apport complémentaire à caractère permanent est relativement courant en milieu urbain et peut représenter dans les cas extrêmes l'équivalent de la recharge naturelle (Casanova et al., 2012).

Ce contexte d'ensemble conduit à imaginer que les écoulements ont macroscopiquement une structure radiale depuis les points haut et la zone de plateau vers les points bas que sont les exutoires des vallées environnantes. En d'autres termes, les écoulements sont pilotés par la topographie selon le principe du « topography driven flow » applicable à la plupart des nappes de subsurface.

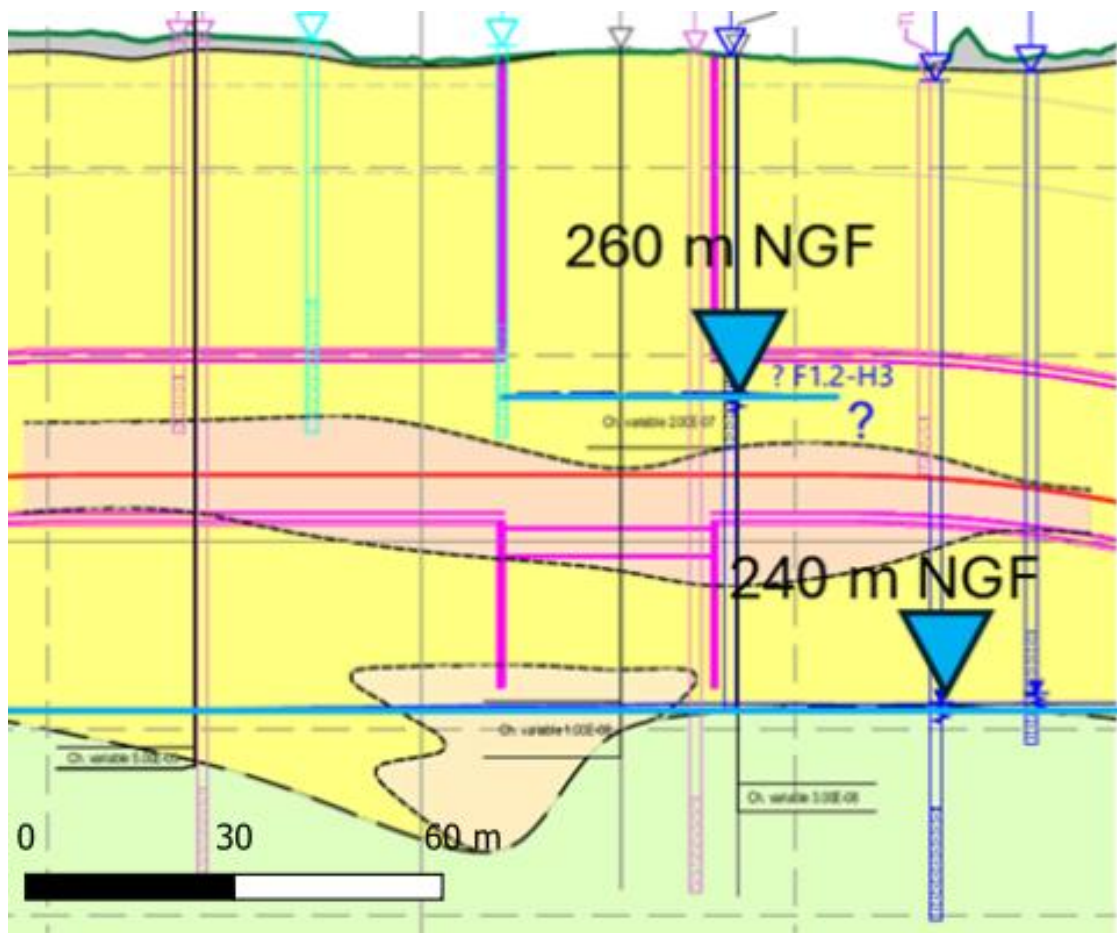


Figure 5 –Nappe perchée au niveau du plateau vers 260 m NGF au-dessus de la nappe profonde vers 240 m NGF

Les données piézométriques disponibles décrivent un système hydrogéologique dominé par une nappe profonde établie vers 240 m NGF, à l'interface des Alluvions Jaunes et du Miocène. Des nappes perchées de faible extension peuvent également exister à la faveur d'hétérogénéités locales (Figure 5). La glacière de Fourvière (niveau d'eau observé vers 250-260 m NGF) en est un exemple historiquement connu et corroboré par les nouvelles investigations qui mettent sporadiquement en évidence des systèmes perchés.

A l'échelle du projet la nappe de base suit effectivement un écoulement radial depuis le sommet de la colline vers le flanc Ouest de Ménival et le flanc Est de la balme (Figure 6). Selon les données du suivi piézométrique elle se distingue par une faible amplitude de variation (de l'ordre du mètre) qui tient à deux facteurs conjoints :

- La forte épaisseur de la zone non saturée (20 à 80 m) qui introduit d'une part un déphasage temporel entre le signal de recharge en surface et l'arrivée du front hydrique au toit de la nappe et, d'autre part, un effet de lissage signal par convolution du signal. En d'autres termes, le caractère cyclique de la recharge tend à se décaler dans le temps et à s'atténuer en profondeur pour devenir beaucoup plus uniforme,
- Les sources et galeries qui agissent comme des seuils de drainage et tendent à stabiliser les niveaux. Cet effet est possiblement réel et devrait être plus sensible à l'approche de la balme. Mais les observations sont encore insuffisantes pour le vérifier.

Les perméabilités déterminées à partir d'essais ponctuels (Lefranc, slug-test, Lugeon) s'échelonnent :

- De $2E-5$ à $5E-8$ m/s pour les Alluvions jaunes,
- De $7E-6$ à $3E-9$ m/s pour le Miocène supérieur,
- De $5E-6$ à $1E-9$ m/s pour la Formation des Etroits

Elles sont faibles et plutôt caractéristiques de milieux semi-perméables (aquitard) voire imperméables (aquiclude). Ces résultats confirment et illustrent le faible potentiel du réservoir et son peu d'intérêt hydrogéologique à des fins d'exploitation.

Si le fonctionnement macroscopique de cette nappe paraît assez simple, il se complexifie sensiblement dans à l'approche de la balme où se concentrent les sources et les phénomènes de glissement de terrain.

6 DONNÉES GÉOTECHNIQUES

Les terrains traversés par le projet de tunnel sont principalement sableux à très graveleux dans une matrice fine, limono-argileuse. Les échantillons récoltés ont systématiquement été analysés granulométriquement. De par sa faible extension au niveau du projet et son contexte difficilement accessible, la Formation des Etroits dispose de moins de données que les autres formations.

Les Alluvions jaunes majoritairement graveleuses présentent, en moyenne, 20% d'éléments de dimensions inférieures à $80 \mu\text{m}$. La Formation des Etroits présente une teneur en fine similaire. Le Miocène supérieur présente 2 à 3 fois plus d'éléments fins.



Figure 6 – Extrait de la carte hydrogéologique issue des piézomètres environnants, au niveau du plateau

Les terrains rencontrés sont majoritairement sur-consolidés. En effet, la sonde pressiométrique atteint souvent son plafond de pression, sur la Figure 7 :

- Presque systématiquement au sein de la formation des Etroits (FE - 69 valeurs)
- En grande majorité au sein du Miocène Supérieur (MS - 264 valeurs)
- De façon moins marquée au sein des Alluvions Jaunes (AJ - 349 valeurs).

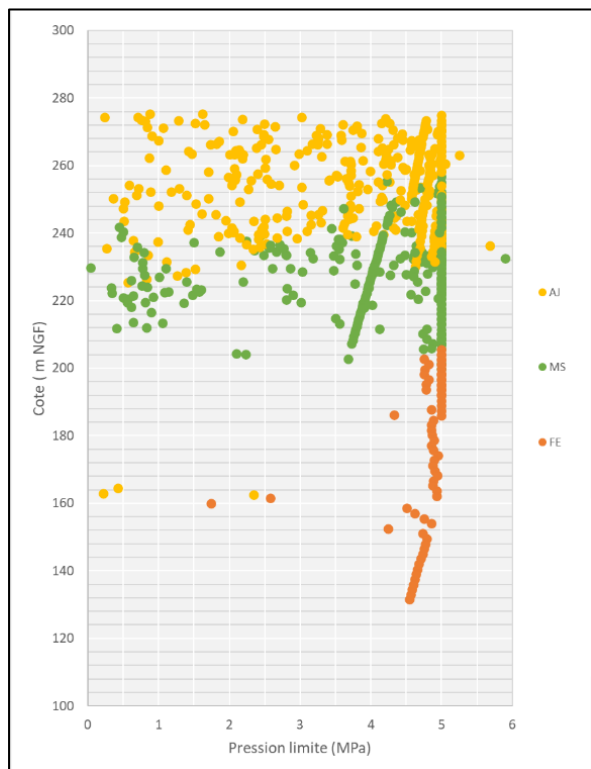


Figure 7. Valeurs de pression limite des différentes formations

7 ENTRÉE DU TUNNELIER AU PIED DES BALMES

L'ouvrage d'entrée du tunnelier à l'Est, nommé tête Saône, est localisé au pied de balmes, dans un contexte privé, à la fois fortement penté et arboré. Sur ce versant Est, la couverture morainique puis alluvionnaire variablement épaisse interagit successivement avec les formations de base (Alluvions Jaunes, Miocène supérieur, formation des Etroits) via des écoulements. En effet, le secteur des balmes recèle un grand nombre de galeries drainantes et on y observe l'émergence de nombreuses sources et de zones de suintement à des altitudes comprise entre 170 et 240 m NGF. Celles-ci sont donc possiblement en lien avec la présence de la nappe de base. S'agissant de terrain à perméabilité d'interstices et non de fractures, les sources qui sont par définition des écoulements concentrés et non diffus (cas des suintements) ne peuvent apparaître qu'à la faveur d'hétérogénéités locales de perméabilité (lentilles, paléochenaux, ...). Pour autant, ce schéma n'est qu'une interprétation possible.

En effet, aucun sondage profond ni piézomètre n'a pu être réalisé sur la parcelle de la tête Saône, celle-ci étant, à ce stade, inaccessible aux foreuses. Des profils de tomographie électrique ont toutefois été réalisés en long et en travers de la parcelle. La méthode consiste à injecter un courant électrique dans le sol et à mesurer la différence de potentiel entre électrodes disposées en surface. Les profils ont été corrélés avec les sondages profonds réalisés sur la parcelle adjacente à la tête Saône, à une centaine de mètre (Figure 8).

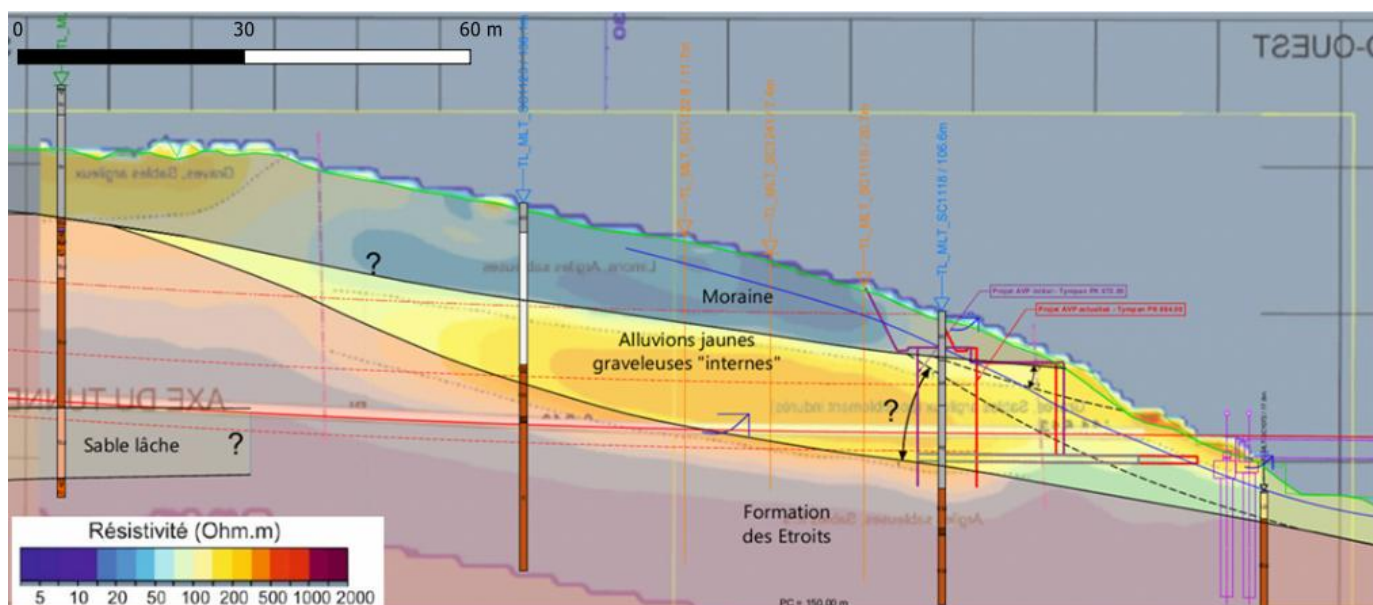


Figure 8. Profil de résistivité électrique avec interprétation lithologique

La résistivité électrique apparente calculée par inversion dépend notamment de la nature, de la porosité et de la teneur en eau des terrains traversés par le courant électrique. Des mesures de polarisation spontanée ont été couplées avec les profils électriques.

Les sondages réalisés sur la parcelle adjacente, à 100 m des profils de tomographie électrique présentent des matériaux résistifs qui sont associés à des formations sablo-graveleuses et/ou plus sèches, potentiellement indurées par endroit, à des alluvions jaunes locales. Tandis que les faibles résistivités sont associées à des terrains plus limoneux, argileux, et/ou plus humides : à des Moraines en surface et à la Formation des Etroits en profondeur.

Les mesures de polarisation spontanée révèlent des axes d'écoulement préférentiels qui restent à lier avec des hétérogénéités lithologiques locales. En effet, les difficultés d'intervention ne permettent pas à ce jour de disposer de données suffisantes pour dégager une vision claire du fonctionnement hydrogéologique local. A ce jour, plusieurs solutions sont toujours étudiées pour permettre la réalisation de sondages au droit de la parcelle de la tête Saône.

Pour mieux comprendre l'origine et le fonctionnement réel de ces sources un programme dédié a été lancé à l'automne 2025. Ce programme basé sur un recensement et une description préalable des sources (état des lieux) dans un périmètre de quelques centaines de mètres autour du secteur de la tête Saône porte sur le suivi débitmétrique des points d'émergence ainsi que des analyses physico-chimiques. Il est complété en parallèle d'un programme d'analyse physico-chimique sur une sélection de piézomètres captant la nappe de base. L'hydrochimie conjointement au débit est en effet apparue comme un indicateur pertinent de l'origine de l'eau et donc des interactions nappe-émergences.

8 CONCLUSION

Depuis 2023, un nombre conséquent de sondages profonds a été réalisé pour le projet du tunnel de TEOL sur la colline de Fourvière, dans un environnement densément urbanisé. Sur certaines portions du tracé, les études géologiques, hydrogéologiques et géotechniques menées pour TEOL ont bénéficié des reconnaissances antérieures effectuées dans le cadre du projet Métro E. Les sondages ont ponctuellement été corrélés à des profils de mesures géophysiques et ont fréquemment été équipés de piézomètre.

Un volume significatif de données lithostratigraphiques a pu être récoltées au niveau du plateau ainsi qu'au droit du versant Ouest. Le versant Est, secteur des balmes, demeure moins documenté en raison de conditions peu favorables à la réalisation de forages.

Les matériaux traversés par le tracé du tunnel une forte hétérogénéité liée à leur mode de dépôt. Ils partagent toutefois des caractéristiques communes, notamment une proportion importante de fines et des résistances mécaniques élevées.

La colline de Fourvière constitue un système hydrogéologiquement isolé. En première approche, la nappe pérenne qu'elle abrite ne peut être alimentée que par la recharge naturelle via un impluvium relativement restreint en raison du contexte fortement urbanisé. Néanmoins, cette nappe se maintient malgré l'existence de galeries drainantes anthropiques et d'émergences observées dans le secteur des balmes.

Le secteur de la tête Saône constitue un enjeu majeur, tant pour la conception de l'ouvrage d'attaque du tunnelier que pour la maîtrise des impacts potentiels du projet sur les sources. Mais le niveau de compréhension de ce secteur reste à ce stade partiel ; il tend à s'améliorer significativement grâce aux investigations déjà réalisées (géophysique notamment) mais des données de forage restent à acquérir précisément dans ce secteur pour une bonne compréhension du contexte géologique et hydrogéologique.

9 REMERCIEMENTS

Nous remercions Gilles Dromart (ENS Lyon) pour les nombreux échanges et notes fournies.

10 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Casanova J., Cagnimel M., Devau N., Pettani M., Stollsteiner Ph. (2012), *Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives*, Rapport final, BRGM, France, 99p.
- Le Bayon B., Dromart G., Egal E. (2021), Carte géologique simplifiée à 1/80 000 de Lyon et ses environs, BRGM.
- Mongereau N. (1985), *Mouvements de terrain en zone urbaine, exemple de Lyon*, Bulletin de l'Association internationale de Géologie de l'Ingénieur, vol. 31.