

Une moraine atypique du Plateau suisse : présence d'un aquifère continu entre la molasse grise aquitanaïenne de Lausanne et les dépôts quaternaires

An Atypical Moraine of the Swiss Plateau: Evidence of a Continuous Aquifer Between the Aquitanian Grey Molasse of Lausanne and Quaternary Deposits

Flavien CHAPUIS^{1,*}, Daniela ZAPATA FRANCO²

1 Lombardi SA Ingénieurs Conseils, Fribourg, Suisse

2 Lombardi Ingénierie SAS, Lyon, France

**flavien.chapuis@lombardi.group*

RESUME : La géologie de la Suisse se divise en trois grandes régions : les Alpes, le Plateau et le Jura, le Plateau jouant le rôle de piémont glaciaire entre les deux autres. La stratigraphie du Plateau se caractérise généralement par une molasse subhorizontale, recouverte de dépôts glaciaires ou périglaciaires quaternaires issus de la glaciation würmienne, la moraine de fond constituant le faciès morainique emblématique. Cette moraine, de faible perméabilité, sépare parfois les aquifères sous-jacents situés dans les discontinuités de la molasse de ceux présents dans les formations morainiques et périglaciaires superficielles. Cet article aborde cette problématique rencontrée au nord de Lausanne lors de la conception d'un tunnel ferroviaire peu profond, à l'interface entre la molasse et les dépôts quaternaires. Les valeurs de perméabilité in situ de la moraine, les essais de pompage et les relevés piézométriques y sont analysés, afin de déterminer si une séparation étanche existe effectivement entre la molasse grise aquitanaïenne de Lausanne et les dépôts quaternaires. Un calcul d'écoulement numérique a été réalisé et calé sur les essais de pompage afin de remonter à la perméabilité du massif conduisant aux abaissements observés. Un écart a été relevé entre la perméabilité tirée des essais et celle correspondant aux simulations. L'absence de certitude quant à la fonction d'étanchéité de la moraine dite « de fond » a amené l'ingénieur-conseil et le maître d'ouvrage à changer le concept de drainage de l'ouvrage, passant d'un tunnel drainé à non-drainé, en tenant compte de la législation suisse de protection des eaux (ici souterraines). Ce cas illustre la considérable hétérogénéité des formations glaciaires et périglaciaires, ainsi que l'importance d'une étude approfondie pour la conception des tunnels à faible profondeur et la maîtrise de leur impact environnemental et hydrogéologique.

ABSTRACT: The geology of Switzerland is divided into three main regions: the Alps, the Plateau, and the Jura, with the Plateau acting as a glacial foreland between the other two. The stratigraphy of the Plateau is generally characterized by subhorizontal molasse, overlain by Quaternary glacial or periglacial deposits from the Würm glaciation, with basal till representing the emblematic morainic facies. This till, which has low permeability, sometimes separates underlying aquifers located in the discontinuities of the molasse from those present in the superficial morainic and periglacial formations. This article addresses this issue encountered north of Lausanne during the design of a shallow railway tunnel at the interface between the molasse and Quaternary deposits. In situ permeability values of the till, pumping tests, and piezometric measurements are analyzed to determine whether an impermeable separation effectively exists between the Aquitanian grey molasse of Lausanne and the Quaternary deposits. A numerical flow calculation was performed and calibrated based on pumping tests to determine the permeability of the rock mass leading to the observed drawdowns. A discrepancy was noted between the permeability derived from the tests and that corresponding to the simulations. The uncertainty regarding the sealing function of the so-called "basal" till led the consulting engineer and the project owner to change the drainage concept of the structure, shifting from a drained to an undrained tunnel, in compliance with Swiss groundwater protection legislation. This case illustrates the considerable heterogeneity of glacial and periglacial formations, as well as the importance of thorough investigation for the design of shallow tunnels and the management of their environmental and hydrogeological impacts.

Mots-clés: Quaternaire ; hydrogéologie ; nappe ; moraine ; molasse.

Keywords: Quaternary ; hydrogeology ; groundwater ; moraine ; molasse.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'agglomération de Lausanne, dans le canton de Vaud, en Suisse, fait l'objet d'un dynamisme économique et démographique important depuis plusieurs années. Aussi, la fréquentation des transports publics s'en voit accrue. Dans ce cadre, plusieurs projets d'infrastructure sont en développement afin d'augmenter la capacité des différents transports publics régionaux. La présente communication s'intéresse plus particulièrement au cas d'un projet de mise en souterrain d'un chemin de fer existant à ses conditions géologiques et hydrogéologiques.

Le nouveau franchissement souterrain sera long de 1 km, comprenant 440 m de tunnel et 133 m de gare souterraine. Le tunnel se situe à faible profondeur (10 m) et intercepte les différentes formations géologiques rencontrées sur le Plateau suisse : la molasse aquitanaïenne et les dépôts glaciaires, périglaciaires et postglaciaires du Quaternaire. Dans le cadre de la conception du projet, des investigations géologiques et géotechniques ont été menées entre janvier et août

2023 pour caractériser les différents faciès rencontrés et les conditions hydrogéologiques.

Cet article présente ces essais, les résultats obtenus et l'interprétation faite, notamment en ce qui concerne la moraine « de fond » dont les particularités locales ont montré qu'elle n'est pas suffisamment étanche : ainsi, elle ne rend pas le toit du massif molassique imperméable. Cela conduit à une situation où une communication aquifère pourrait exister entre les dépôts quaternaires et le socle rocheux molassique, sans qu'il soit possible de distinguer des aquifères lenticulaires perchés présents dans les dépôts quaternaires d'un aquifère fissuré dans la molasse.

1.2 Campagne de reconnaissance géologiques

Au printemps 2023, 20 sondages carottés (notés S21 à S27, S29 à S41) ont été forés, complétant 14 autres forages réalisés en 2019 lors d'une première campagne de reconnaissance. 11 forages ont été équipés de piézomètres, crépinés soit dans le rocher (S22, S24, S26, S34 et S35), soit dans les terrains meubles (S27, S29 à S33). La Figure 1 présente un plan de situation des forages.

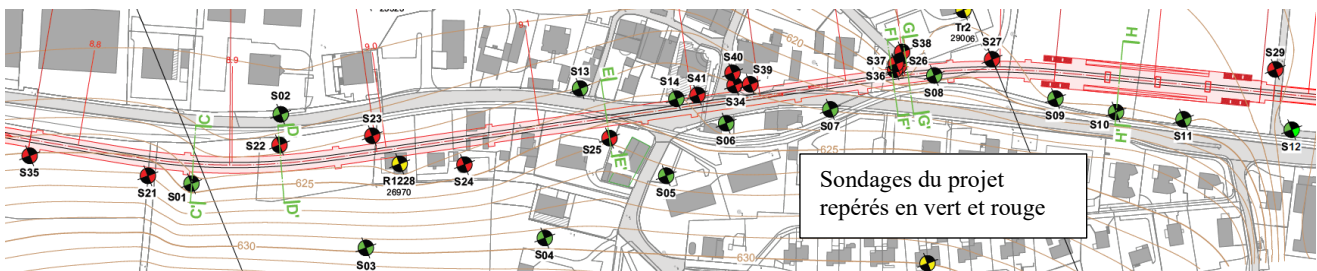


Figure 1. Vue en situation des sondages carottés exécutés en 2019 et 2023 lors des reconnaissances géologiques

2 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU PLATEAU SUISSE

2.1 Molasse aquitanaïenne

La Suisse est typiquement divisée en trois zones géographiques distinctes : le Jura, le Plateau et les Alpes. En ce qui concerne le Plateau suisse, le substratum est composé de molasse ; dans la région de Lausanne et du Gros-de-Vaud, la molasse est une molasse d'eau douce inférieure, datée de l'Aquitanién (Miocène inférieur), et localement appelée Molasse grise de Lausanne.

Cette molasse présente de manière caractéristique une alternance de bancs de grès et de marnes, parfois indissociables. Généralement, cette formation rocheuse consiste en une alternance de bancs de grès épais à ciment calcaire et de couches diverses avec une composante marno-argileuse plus ou moins importante, pouvant être de la marne, du grès marneux, de la marne limoneuse, des silts plus ou moins

marneux, et enfin des marnes plus ou moins argileuses (Gencer *et al.*, 2018).

Au droit du projet, la molasse grise présente une stratigraphie subhorizontale. Les forages ont montré que les faciès gréseux sont faiblement fracturés et que le massif rocheux peut être considéré globalement comme assez massif. Seules quelques fractures légèrement ouvertes (millimétriques), parfois oxydées, ont été rencontrées dans les niveaux gréseux. Les fractures peuvent ainsi être considérées comme très espacées (plus de 2 m) à localement moyennement espacées (de l'ordre du mètre). Leur extension linéaire est généralement de plusieurs mètres, parfois jusqu'à une douzaine de mètres. La fracturation est bien observée dans les niveaux gréseux. Dans les marnes, elle est marquée plutôt par une matrice tectonisée aux surfaces lustrées.

2.2 Dépôts quaternaires

La géologie quaternaire du Plateau suisse est dominée par les dépôts glaciaires et périglaciaires associés aux glaciations alpines, particulièrement la glaciation de Würm. Les dépôts morainiques sont les plus courants dans la région, avec d'autres dépôts périglaciaires ou postglaciaires interstratifiés en leur sein. Les formations rencontrées dans le projet sont énumérées ci-dessous :

- Dépôts de tourbe : trouvés dans le forage S26 avec une épaisseur de 2,35 m, ils consistent en des limons tourbeux et des limons argileux avec du sable et de la matière organique, et sont généralement très mous et compressibles. Ces dépôts palustres correspondent à la présence d'anciens marais et étangs, identifiés sur d'anciennes cartes de la localité.



Figure 2. Ancien marais : faciès tourbeux en haut à gauche (zone foncée) et faciès argileux sur le reste de la carotte (S26).

- Dépôts fluvioglaciers : ces faciès périglaciaires sont présents sous forme de lentilles de géométrie variable avec une épaisseur de 0,5 à 2,0 m au sein des dépôts morainiques. Ils consistent en des sables graveleux et des sables limoneux, parfois des graviers calcaires, et sont généralement modérément compacts. Ces matériaux fluvioglaciers sont généralement non cohérents à faiblement cohérents. Des venues d'eau ont été observées dans plusieurs forages.



Figure 3. Dépôts fluvioglaciers (S34).

- Dépôts glacio-lacustres : ce second type de dépôt périglaciaire est également présent en lentilles de géométrie variable et d'épaisseur métrique au sein

des dépôts morainiques. Ces matériaux sont fréquemment associés aux dépôts fluvioglaciers. Les dépôts glacio-lacustres sont généralement composés de silts argileux, varvés, compressibles, de consistance ferme à dure, devenant mous à très mous en présence d'eau (souvent présente dans les dépôts fluvioglaciers sus-jacents). Dans ce dernier cas, ces matériaux sont fluides.



Figure 4. Dépôts glacio-lacustres à partir de 4.50 m (S09).

- Moraine altérée : il s'agit de moraine sableuse ou limoneuse qui a été altérée et présente une consistance ferme à très ferme, parfois molle.
- Moraine sableuse : la moraine sableuse, plus fréquente dans la moitié sud du projet, est composée de sables souvent limoneux avec du gravier. Ces matériaux ont une certaine cohésion et leur consistance peut être décrite comme très ferme à dure. La présence de cailloux ou de blocs est possible. L'épaisseur de la moraine sableuse est généralement de 2 à 3 m.



Figure 5. Moraine sableuse (S25).

- Moraine limoneuse : la moraine limoneuse est présente principalement dans la moitié nord du projet, souvent juste au-dessus du rocher, avec une épaisseur d'environ 3 à 4 m. Elle est composée de limons généralement graveleux, parfois sableux, de consistance très ferme à très dure. Il ne s'agit pas d'une moraine de fond typique, c'est pourquoi elle n'a pas été nommée ainsi.



Figure 6. Moraine limoneuse (S25).

Le profil en long du projet de traversée souterraine est donné à la Figure 7.

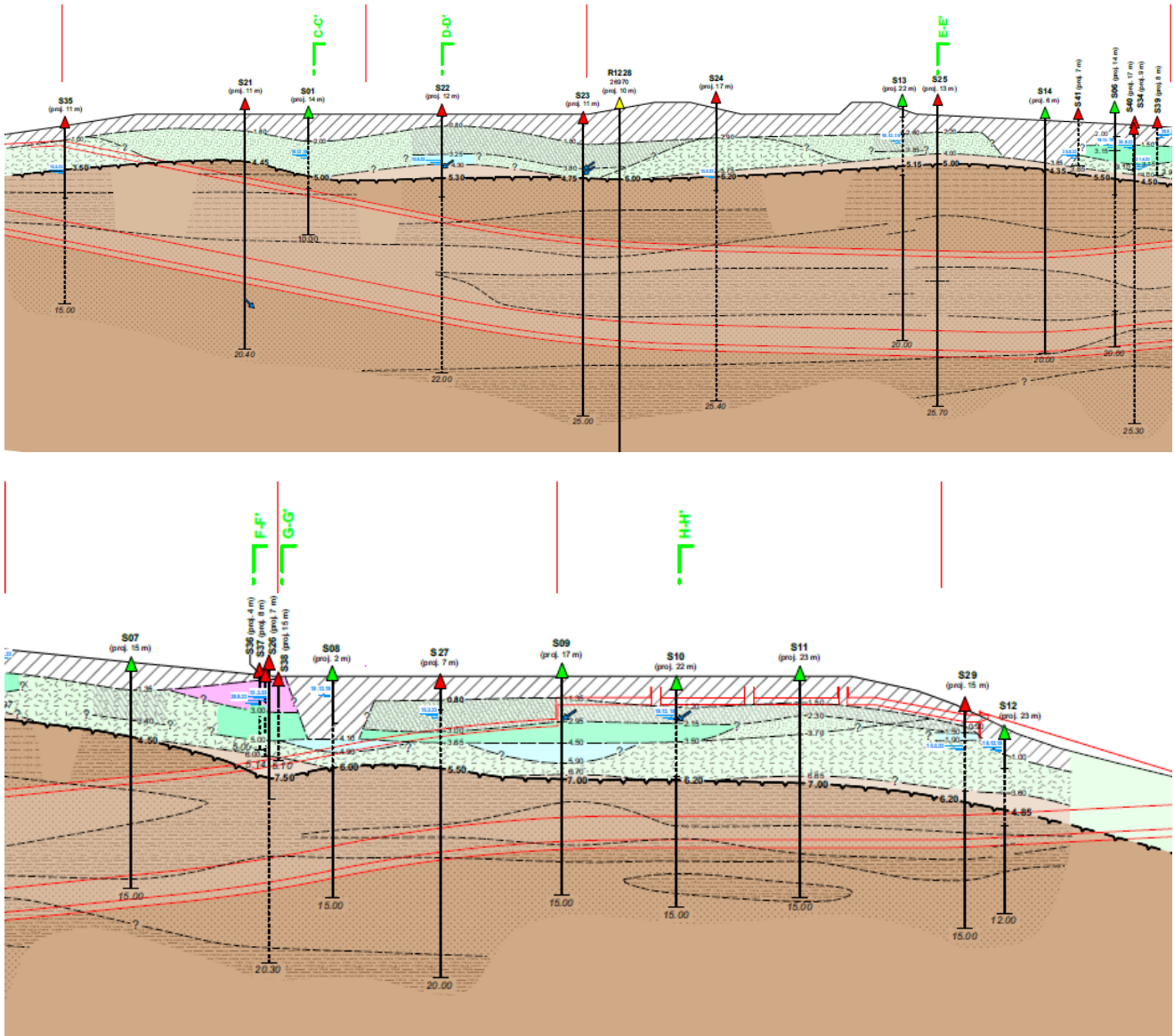


Figure 7. Profil en long géologique prévisionnel de la traversée souterraine.

2.3 Contexte hydrogéologique du Plateau suisse

Les faciès glaciaires et périglaciaires présentent des comportements hydrogéologiques assez différents. L'article de Parriaux et Nicoud (Parriaux et Nicoud, 1993) fournit une synthèse complète à ce sujet concernant les formations rencontrées dans les Alpes du Nord, basée sur de nombreuses observations de terrains glaciaires ou périglaciaires du Plateau suisse et des vallées alpines suisses et françaises.

La moraine de fond est généralement considérée comme ayant une faible perméabilité ($k < 10^{-6}$ m/s) dans son faciès typique. Selon Parriaux et Nicoud, dans certains cas rares, lorsque la perméabilité est suffisamment basse et que la moraine n'a pas été altérée, elle forme une couche imperméable entre la roche sous-jacente et les dépôts sus-jacents. Les dépôts

fluvio-glaciaires et glacio-lacustres ont, quant à eux, des perméabilités typiques plus élevées (respectivement de 10^{-2} à 10^{-4} m/s et de 10^{-3} à 10^{-4} m/s).

Plusieurs projets d'ingénierie ont fourni des retours sur l'hydrogéologie complexe à l'interface entre les formations molassiques et les dépôts quaternaires dans la région lausannoise au cours des 30 dernières années. Par exemple, lors de l'extension du LEB vers le centre de Lausanne (gare du Flon) en 1995, aucune circulation d'eau significative et permanente n'a été observée entre la molasse et la moraine de fond du glacier du Rhône (Tappy, 1995). Dans un autre projet adjacent pour l'enfouissement du LEB au cœur de Lausanne (Hey, 2020), il est relaté que les dépôts glaciaires et périglaciaires forment le plus souvent des lentilles aquifères, sans communication avec la roche molassique où seules des venues d'eau ponctuelles ont été observées. La même observation est également mentionnée (Risch, 2005) lors de la construction de la

deuxième ligne de métro de Lausanne : deux aquifères existent, l'un perché dans les sols de couverture quaternaires, l'autre dans les discontinuités de la molasse, sans qu'ils se rejoignent clairement.

2.4 Objectif

L'objectif de cette étude est de discuter de l'hydrogéologie des terrains présentés sur la base de divers essais in situ. D'un point de vue de la conception, pouvoir identifier une communication entre le socle rocheux et les sols sus-jacents est important pour déterminer si le tunnel doit être drainé ou non. La revue de la littérature suggère qu'une communication aquifère peut exister, selon les observations de Parriaux et Nicoud, car les cas où la moraine de fond agit comme une couche imperméable sont rares. Cependant, les retours d'expérience de projets antérieurs indiquent une tendance à la séparation entre l'aquifère fissural molassique et l'aquifère lenticulaire des dépôts quaternaires.

3 METHODES

Afin de clarifier les conditions hydrogéologiques de l'ensemble du massif composé de la masse rocheuse et des sols meubles, 10 essais de perméabilité in situ ont été réalisés : 3 essais de perméabilité par abaissement en cours de forage, et 7 essais de vidange-remontée dans les forages. Les essais ont été réalisés dans les sols meubles et dans la roche molassique.

Trois essais de pompage courts, d'une durée de 5 à 6 heures chacun, ont été réalisés au printemps 2023 dans les piézomètres S26, S24 puis S34, tous crépinés dans la molasse, afin d'évaluer le rabattement qui serait causé par un tunnel drainé, particulièrement dans les sols meubles. Lors de chaque essai, le débit de la pompe a été réglé (débit très faible entre 0,1 et 0,2 L/min) de manière que le niveau piézométrique (NP) soit progressivement abaissé de 1 à 2 m sous le niveau du radier du projet (3 paliers successifs de 1,5 à 2 h). Le NP dans les piézomètres à proximité a été mesuré toutes les 30 minutes.

Des essais de pompage complémentaires ont été réalisés en août 2023 pour infirmer ou confirmer l'hypothèse de la présence d'un aquifère unique et la perméabilité de la roche. Pour l'essai de pompage dans le piézomètre S26 (crépiné dans le rocher), des sondes de pression ont été installées dans les piézomètres d'observation S36, S37, S38 ainsi que S08 et S27 (tous crépinés dans les sols meubles). Elles ont mesuré les niveaux d'eau toutes les 5 minutes, pendant le pompage et pendant les 6 jours suivant l'arrêt de la pompe. Parallèlement, des mesures de contrôle manuelles ont été effectuées. Pour l'essai de pompage

dans S34 (crépiné dans le rocher), les sondes de pression ont été placées dans les piézomètres d'observation S39, S40, S41 et S05 (crépinés dans les sols meubles) ainsi que S26 (crépiné dans le rocher). Elles ont mesuré les niveaux d'eau toutes les 5 minutes, pendant les 3 jours précédant le pompage, pendant celui-ci et pendant les 3 jours suivant son arrêt.

4 RÉSULTATS

4.1 Essais de perméabilité

Les essais hydrauliques réalisés lors des forages, après la pose des piézomètres ou après les pompages ont permis d'évaluer la perméabilité des sols rencontrés. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 1.

Dans les sols meubles, les essais de rabattement réalisés dans la moraine limoneuse indiquent, comme attendu, des perméabilités faibles, de l'ordre de $5,5 \cdot 10^{-7}$ et $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s. L'essai mené dans les alluvions fluvioglaciaires (forage S27) et partiellement dans la moraine limoneuse révèle une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s, ce qui correspond en quelque sorte à une valeur moyenne entre les perméabilités caractéristiques des deux formations, notamment au regard des valeurs données par (Parriaux et Nicoud, 1993).

Concernant le substratum rocheux, les essais de vidange-remontée effectués après la pose des piézomètres ou après pompage indiquent des perméabilités du massif faibles, de l'ordre de 10^{-6} m/s (valeurs comprises entre $9,4 \cdot 10^{-7}$ et $2 \cdot 10^{-6}$ m/s). La circulation d'eau s'effectuera probablement principalement dans les niveaux gréseux et leur réseau de fractures (perméabilité fissurale).

4.2 Essais de pompage

Les résultats des essais de pompage sont présentés ci-dessous dans le Tableau 2. Il est à noter que certains piézomètres ont montré une augmentation du niveau d'eau lors des essais de pompage (S34, S22 et S24). Pour les piézomètres S34 et S22, ce phénomène peut s'expliquer par des niveaux d'eau en phase de remontée à la suite du drainage des piézomètres effectué quelques jours avant les essais de pompage. Concernant le piézomètre S24, le niveau d'eau était également en phase de remontée à la suite de l'essai de pompage réalisé la veille.

Les résultats des essais de pompage complémentaires réalisés en août 2023 sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 1. Résultats des essais de perméabilité in situ.

| | Forage | Formation rencontrée | Type d'essai | Perméabilité (m/s) |
|------------------|--------|--|--|---|
| Terrains meubles | S27 | Alluvions fluvio-glaciaires et moraine limoneuse | Abaissement Lefranc en cours de forage | $1.2 \cdot 10^{-5}$ |
| | S27 | Moraine sableuse, alluvions fluvio-glaciaires et moraine limoneuse | Vidange-remontée dans piézomètre | $3.5 \cdot 10^{-7} - 1.6 \cdot 10^{-6}$ |
| | S24 | Moraine limoneuse | Abaissement Lefranc en cours de forage | $1.4 \cdot 10^{-6}$ |
| | S34 | Moraine limoneuse | Abaissement Lefranc en cours de forage | $5.5 \cdot 10^{-7}$ |
| Rocher | S22 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $9.4 \cdot 10^{-7}$ |
| | S24 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $1.2 \cdot 10^{-6}$ |
| | S26 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $1.5 \cdot 10^{-6}$ |
| | S34 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $2.0 \cdot 10^{-6}$ |
| | S26 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $1.8 \cdot 10^{-6}$ |
| | S34 | Molasse | Vidange-remontée dans piézomètre | $1.8 \cdot 10^{-6}$ |

Tableau 2. Résultats des essais de pompage.

| Piézomètre d'observation | Formation géologique | Puits de pompage | | |
|--------------------------|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | S24 | S34 | S26 |
| S24 | Molasse | -15.4 (puis de pompage) | NP en cours de remontée | Non mesuré |
| S34 | Molasse | Non mesuré | -18.4 (puis de pompage) | NP en cours de remontée |
| S26 | Molasse | Non mesuré | NP en cours de remontée | -12 (puis de pompage) |
| S02 | Terrains meubles et toit de la molasse | 0 | Non mesuré | Non mesuré |
| S22 | Terrains meubles | 0 | Non mesuré | Non mesuré |
| S05 | Terrains meubles | NP en cours de remontée | 0 | 0 |
| S08 | Terrains meubles | Non mesuré | 0 | -0,08 m |
| S27 | Terrains meubles | Non mesuré | 0 | 0 |

Le suivi des niveaux d'eau dans les piézomètres d'observation, que ce soit à l'aide de sondes de pression ou par des mesures manuelles, ne montre aucune influence du pompage. Les variations des niveaux piézométriques sont uniquement liées aux précipitations. Dans le puits S26, selon le compteur d'eau, seulement 730 litres d'eau ont été pompés pendant les presque 8 jours de pompage (débits de pompe très faibles de 0,1 à 0,2 L/min). Cela indique que le rayon d'influence du pompage autour de S26 était probablement inférieur à 1 mètre et explique donc pourquoi aucune influence n'a été observée sur les piézomètres d'observation. Pour S34, le même constat

a été fait (faible volume d'eau pompé), bien que la valeur exacte n'ait pas pu être enregistrée.

4.3 Variabilité de la valeur de perméabilité dans la molasse

Nous avons souhaité simuler numériquement l'essai de pompage du forage S26 afin d'estimer les ordres de grandeur de la perméabilité de la molasse à l'aide d'un modèle 2D axisymétrique par éléments finis sur Plaxis. Le niveau piézométrique initial a été fixé à l'altitude de 624 m, ce qui correspond au niveau moyen mesuré par les piézomètres de la zone.

Tableau 3. Observations relevées lors des essais de pompage complémentaires.

| | Piézomètre d'observation | Puits de pompage Observations |
|------------------|--------------------------|---|
| Pompage dans S26 | S36 | Le niveau d'eau baisse régulièrement et lentement avant, pendant et après pompage en raison d'une période sèche. La remontée observée lors de la mesure du 05.09.23 est due aux pluies des 26, 27 et 28.08.23. L'arrêt du pompage le 18.08.23 n'induit aucun effet. |
| | S37 | Idem S36. Les mesures avec la sonde de pression montrent plusieurs "sauts" dus à un déplacement de la sonde dans le piézomètre lors des mesures manuelles. |
| | S38 | Le niveau piézométrique monte car son équilibrage avec la nappe a pris plusieurs semaines après exécution du forage, en raison d'une très faible perméabilité. L'arrêt du pompage le 18.08.23 n'induit aucun effet. |
| | S08 | Idem S36. |
| | S27 | Idem S36. La différence de niveau d'environ 20 cm entre les mesures manuelles et celles avec la sonde de pression est dues à un problème de référence du niveau 0 des mesures avec la sonde. Le pic du 12.08.23 est probablement lié aux pluies du jour. |
| Pompage dans S34 | S39 | Le niveau d'eau monte rapidement à la suite des pluies des 26, 27 et 28.08.23 puis baisse lentement durant environ 2 semaines. L'arrêt du pompage le 01.09.23 n'induit aucune remontée du niveau d'eau. |
| | S40 | Idem S39. |
| | S41 | Le niveau d'eau monte rapidement à la suite des pluies des 26, 27 et 28.08.23 puis baisse rapidement. Pas de variation significative du niveau durant et après le pompage. |
| | S05 | Le niveau d'eau monte à la suite des pluies des 26, 27 et 28.08.23 puis baisse lentement. L'arrêt du pompage le 01.09.23 n'induit aucune remontée du niveau d'eau. |
| | S26 | Idem S41. |

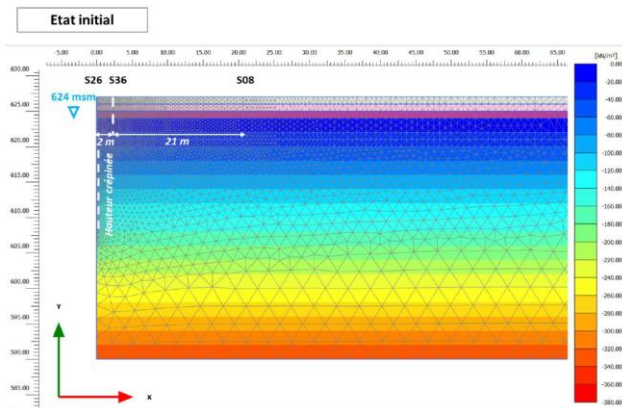


Figure 8. État initial dans la simulation de l'essai de pompage du forage S26.

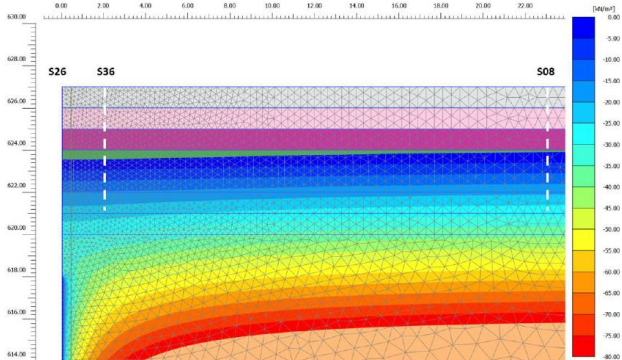


Figure 9. Simulation de l'essai de pompage réalisé dans le forage S26, après 8 jours, en faisant l'hypothèse d'une perméabilité $k = 10^{-6}$ m/s dans la molasse.

Nous avons simulé l'essai de pompage en vidant le piézomètre S26 et en observant le cône de rabattement après 8 jours (durée de l'essai). Cette simulation a été réalisée pour différentes valeurs de perméabilité de la molasse.

Pour une perméabilité $k = 10^{-6}$ m/s, les simulations dans les piézomètres S26 et S08 présentent une baisse de niveau de 50 cm et 10 cm respectivement. Cependant, aucun effet n'a été observé lors des essais de pompage réels. La perméabilité est donc inférieure à cette valeur.

Avec une perméabilité de $k = 10^{-7}$ m/s, selon les simulations, les piézomètres S36 et S08 auraient dû présenter une baisse de niveau de 10 cm et 1 cm respectivement. Pourtant, aucune baisse liée au pompage n'a été observée dans la simulation d'écoulement. La perméabilité est encore plus basse.

Dans une dernière simulation ($k = 10^{-8}$ m/s), aucun effet du pompage sur les niveaux piézométriques dans S36 et S08 n'est observée. La perméabilité de la molasse se situerait donc probablement entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s, soit une valeur inférieure à celle obtenue lors des essais de perméabilité réalisés in situ, qui était de l'ordre de 10^{-6} m/s.

4.4 Discussion

Des niveaux similaires ont été observés lors des mesures piézométriques réalisées en décembre 2019

(régime de hautes eaux) et en avril-septembre 2023 (eaux moyennes à basses). Ces mesures indiquent que les sols meubles et la masse rocheuse sous-jacente contiennent une nappe phréatique dont le niveau piézométrique est généralement situé entre 1 et 4 mètres de profondeur, localement jusqu'à environ 6 mètres (forage S24). Les variations de ces niveaux en fonction des précipitations sont prouvées par les mesures (particulièrement lors des essais de pompage d'août 2023) et confirment qu'il ne s'agit pas seulement de poches d'eau dans des lentilles isolées, mais plutôt d'un aquifère unique.

La possibilité d'aquifères distincts a été écartée, mais cela ne répond pas à la question de savoir si la roche molassique et les dépôts quaternaires communiquent réellement. La moraine limoneuse observée sur le site correspond, en termes de mode de dépôt et de perméabilité mesurée in situ, à la description d'une moraine de fond classique par (Parriaux et Nicoud, 1993). Cependant, son manque de continuité latérale (incursions de moraine sableuse, voire disparition de la moraine limoneuse dans la partie sud de la zone d'étude), ainsi que son caractère plus sableux par rapport à une moraine de fond typique, suggèrent qu'elle ne peut garantir une étanchéité complète du substratum. L'absence d'une couche épaisse et continue de dépôts de faible perméabilité (moraine de fond) au sommet de la roche molassique, ainsi que des niveaux piézométriques similaires dans les dépôts meubles et dans la molasse, indiquent la présence probable d'un aquifère unique pouvant être considéré comme continu. Pourtant, malgré cela, les essais de pompage dans les piézomètres crépinés dans la molasse n'ont pas révélé de rabattement dans les piézomètres des dépôts meubles, comme s'il y avait effectivement une séparation de la nappe en deux aquifères. On peut penser que les très faibles perméabilités en jeu ont été un obstacle à la visualisation des écoulements aquifères à l'aide du pompage.

5 CONCLUSION

Le présent article visait à mettre en évidence la difficulté, dans le cas discuté, de tirer une conclusion définitive, malgré plusieurs études géologiques, concernant la communication aquifère entre le substratum molassique et les dépôts quaternaires. La comparaison entre la synthèse géologique à l'échelle du versant nord des Alpes, les retours de projets de tunnels dans la région lausannoise, les mesures piézométriques continues et les essais de pompage n'a pas encore permis d'apporter une réponse définitive à la question de l'existence d'un aquifère continu le long

du nouveau franchissement souterrain étudié. Cette limitation pose un véritable problème d'ingénierie, et un choix a dû être fait. Il a été décidé, d'un commun accord entre le maître d'ouvrage, l'ingénieur-conseil et les experts vérifiant les calculs, de supposer qu'un aquifère unique et continu existe. Cette hypothèse permet de maîtriser les risques géologiques pour assurer la pérennité de l'ouvrage, et d'éviter un rabattement de la nappe avec des conséquences géotechniques (tassements) et environnementales significatives. La construction du tunnel permettra, par l'observation visuelle de la molasse et des sols meubles, de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse faite. Enfin, l'article a souligné la valeur parfois trop élevée des estimations directes de perméabilité issues des essais, qu'il est parfois utile de comparer à des simulations numériques, même si ces dernières ont également leurs biais.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gencer, M.; Mathier, J.-F.; Noverraz, F. et Français, O. (2018) Description des propriétés mécaniques de la Molasse aquitaine de Lausanne, *Revue française de géotechnique*, 154, 4, <https://doi.org/10.1051/geotech/2018004>
- Hey, O (2020). Nouveau tunnel LEB – Défis d'un chantier en plein cœur de Lausanne. *Swiss Tunnel Congress – Fachtagung für Untertagbau*, (conférence tenue en ligne), Suisse, Band 19, pp. 117–130. Disponible à l'adresse : [\[https://www.swisstunnel.ch/STC2020Band19pdf-c6463900?i=1&MasterId=g1_140\]](https://www.swisstunnel.ch/STC2020Band19pdf-c6463900?i=1&MasterId=g1_140), consulté le 11/01/2026.
- Parriaux, A., et Nicoud, G. (1993) De la montagne à la mer, les formations glaciaires et l'eau souterraine. Exemple du contexte Nord-alpin occidental. *Quaternaire*, 4 (2), pp. 61-67. <https://doi.org/10.3406/quate.1993.1993>
- Risch, C. (2005) Lots 1400/1500 : Partie souterraine de la station Ours et tunnels. *Mitteilungen der schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik / Publication de la Société suisse de mécanique des sols et des roches*, 150, pp. 43-52. Disponible à l'adresse : [\[https://geotechnikschweiz.ch/wp-content/uploads/2017/04/Heft150.pdf?bcs-agent-scanner=a38a5a71-3022-1540-a2f5-a2f7ce8b8f62\]](https://geotechnikschweiz.ch/wp-content/uploads/2017/04/Heft150.pdf?bcs-agent-scanner=a38a5a71-3022-1540-a2f5-a2f7ce8b8f62), consulté le 11/01/2026.
- Tappy, O. (1995) Prolongement en souterrain de la ligne du LEB : travaux de génie civil. *Ingénieurs et architectes suisses*, 121 (1-2), pp. 61-67. <https://doi.org/10.5169/seals-78580>