

Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 29 (2024)

Heft: 1-2

Artikel: Modélisation géologique et hydrogéologique 3D dans le cadre du projet d'extension souterraine de la Gare CFF de Genève

Autor: Champod, Eric / Pittet, Xavier / Fasel, Jean-Marc

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1062148>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modélisation géologique et hydrogéologique 3D dans le cadre du projet d'extension souterraine de la Gare CFF de Genève

Eric Champod¹, Xavier Pittet¹, Jean-Marc Fasel¹

Résumé

Le projet d'extension de capacité de la gare Genève s'étend sur près de 6 kilomètres sous la ville et les installations ferroviaires existantes. Une nouvelle gare souterraine et deux tunnels d'accès seront réalisés dans un contexte géologique et hydrogéologique à la fois difficile et complexe. Le Maître d'Ouvrage (CFF SA) a dès lors commandé la réalisation de deux modèles 3D, l'un géologique et l'autre hydrogéologique (simulation des écoulements de la nappe du Rhône). La grande quantité de données à disposition (reconnaitances et archives), et l'approche tridimensionnelle, ont permis de garantir la qualité et la cohérence de ces modélisations, et donc des prévisions. Les auteurs de projet ont également bénéficié de ces modèles 3D pour la conception et l'optimisation de leurs ouvrages, assurant une maîtrise des situations de risques identifiées.

Zusammenfassung

Das Projekt zur Kapazitätserweiterung des Bahnhofs Genf erstreckt sich über fast 6 Kilometer unter der Stadt und den bestehenden Bahnanlagen. Ein neuer unterirdischer Bahnhof und zwei Zugangstunnel werden in einem schwierigen und komplexen geologischen und hydrogeologischen Zusammenhang gebaut. Die Bauherrin (SBB) gab daher die Erstellung von zwei 3D-Modellen in Auftrag, einem geologischen und einem hydrogeologischen (Simulation der Grundwasserströme der Rhone). Die große Menge an verfügbaren Daten (Erkundungen und Archive) und der dreidimensionale Ansatz ermöglichten es, die Qualität und Kohärenz dieser Modelle und damit der Prognosen zu gewährleisten. Auch die Projektverfasser profitierten von diesen 3D-Modellen bei der Planung und Optimierung ihrer Bauwerke, wodurch eine Beherrschung der identifizierten Risikosituationen gewährleistet wurde.

1 Introduction

1.1 Description du projet

Dans le cadre du projet Léman 2030 [1], une extension de capacité du nœud de Genève est prévue, afin de transporter plus de voyageurs grandes lignes et de faciliter le déplacement des usagers en gare. Pour cela, la gare existante sera étendue en souterrain, avec deux voies supplémentaires et un quai central. Deux tunnels double voie, côté Lausanne et Aéroport, permettront d'y accéder [2]. De près de 6 kilomètres au total, le projet a été divisé en 3 secteurs géographiques (lots), chacun attribué à un groupement d'ingénieurs (tableau 1 et figure 1).

¹ NORBERT SA Géologues-conseils, Rue Enning 6, 1003 Lausanne (VD)

SECTEURS	OUVRAGES
Lausanne	1 tunnel double voie de 922 m excavé en attaque ponctuelle (section 110 à 160 m ² , couverture max. 18 m) + 1 trémie d'accès, 2 sorties de secours, etc
Gare	1 gare souterraine de 854 m réalisée en tranchée couverte dans une enceinte de parois moulées (profondeur env. 25 m) + 2 nouveaux passages inférieurs et 1 passage existant élargi, 1 quai modernisé, etc
Aéroport	1 tunnel double voie de 2'689 m excavé au tunnelier (D 12.3 m, section 119 m ² , couverture max. 32 m), nécessitant un puits de lancement et une cellule de réception + 1 trémie d'accès, 4 sorties de secours, etc

Tab 1: Listes des ouvrages majeurs du projet, par secteurs, avec leurs principales caractéristiques.

Le financement, de l'ordre de 1.9 mia CHF à ce jour, est assuré conjointement par la confédération, le canton de Genève, et la ville de Genève. Après environ 6 ans d'Avant-projet (2016-2022), la phase 32 (Projet de construction) est en cours. La mise à l'enquête publique est planifiée à l'horizon fin 2027. Compte tenu de sa complexité et son ampleur, le chantier devrait durer environ 9 ans, mais des travaux anticipés sont déjà menés (2019-2027).

Ce projet comporte de nombreux enjeux, notamment du fait de la réalisation d'ouvrages souterrains à faible profondeur (couverture max. 20-30 m), sous le domaine ferroviaire en activité et sous le centre-ville, mais sans intercepter les ouvrages souterrains existants. La phase chantier est également à prendre en compte (emprise, logistique, impact sur l'exploitation ferroviaire, etc).

1.2 Mandat du groupement Géolosanne

A l'issue des études préliminaires (2014 – 2015), les CFF ont lancé un appel d'offres public en procédure ouverte, pour les prestations de géologue / hydrogéologue / géotechnicien. Celles-ci s'étendent des phases 31 (avant-projet), 32-33 (projet de

construction et dossier PAP), à 41 (appel d'offres). Ces études sont ainsi itératives (mises à jour au gré des campagnes de reconnaissances et avancées du projet) et transversales (pour tous les ouvrages en projet). Elles s'adressent avant tout aux mandataires chargés de la conception et de la réalisation des ouvrages (groupement d'ingénieurs). Il s'agit en particulier d'établir les modèles de terrain (prévisions) et déterminer les situations de risques (selon la norme SIA 199) autrement dit d'éviter les « surprises géologiques ». Précisons qu'aucune recommandation selon la norme SIA 118/198 n'est comprise dans notre mandat, le soutènement et son dimensionnement étant de la responsabilité des ingénieurs auteurs de projet.

Le mandat a été adjugé en avril 2016 au groupement Géolosanne, constitué des bureaux Norbert SA Géologues-conseils, De Cérenville Géotechnique SA et Karakas & Français SA. Le premier est en charge des aspects géologiques et hydrogéologiques, notamment tout ce qui concerne la modélisation et les plans. Le second traite en particulier le volet géotechnique (interprétation des essais). Le troisième gère spécialement l'organisation des campagnes de reconnaissances et les relevés.

2 Etablissement des prévisions

Le sous-sol Genevois est relativement bien connu, car densément construit, et bien documenté grâce au travail précurseur du Service Géologique Cantonal (GESDEC). Dans les années 80, ce dernier a établi des cartes géologiques et géotechniques à une échelle 1:5'000. Il tient surtout à jour un cadastre avec plus de 21'000 sondages sur le canton [3]. La zone du projet en compte près de 700 (Figure 1), mais de qualité variable et de profondeur souvent faible (45% < 15 m). Signalons également un système de standardisation des horizons géologiques en place depuis les années 70, la codification des sols genevois.

2.1 Campagnes de forages et essais

A ce jour, trois campagnes de sondages ont été menées, deux durant l'Avant-projet (22 sondages en 2016 et 57 sondages en

2018), et la dernière au début du Projet de construction (65 sondages en 2022-2023). Dans ce milieu urbain et ferroviaire, elles ont été particulièrement complexes à implanter, organiser et réaliser (rues, places de parc, sur wagon ou à proximité des voies en exploitation).

Au total, nous disposons de près de 150 sondages (Figure 1), d'une profondeur jusqu'à 62 m (moyenne 22 m), et de tous types (53% carottés, 16% destructifs, 31% pénétrométriques). En outre, plus de 60 piézomètres ont été posés, couvrant presque toutes les formations géologiques. Une multitude d'essais in-situ et en laboratoire ont ainsi pu être réalisés, sur les sols, les roches et les eaux souterraines (pénétr. dynamique, CPTU, pressiomètre, dilatomètre, oedomètre, granulométrie, identification, cisaillement, compression, traction, gonflement, RX, abrasivité, pompage, Lefranc, hydrochimie, etc).

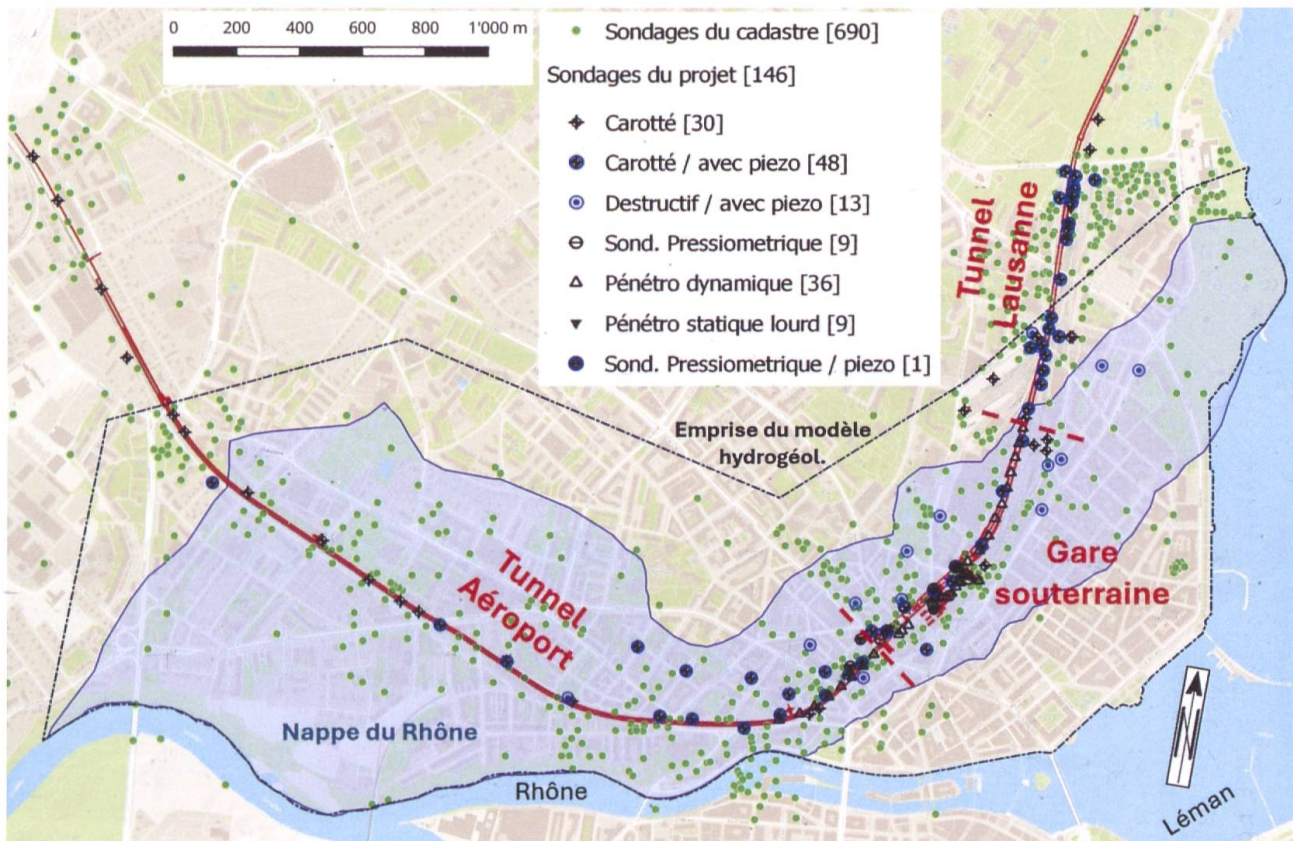


Fig. 1: Situation générale du projet, de la Nappe du Rhône, et des sondages à disposition.

Ces reconnaissances conséquentes, mais proportionnelles aux enjeux, ont permis d'acquérir une grande quantité de données et d'ainsi fiabiliser les prévisions d'ordre :

- Géologiques: Définir la nature des terrains, les limites de formations, et lever les incertitudes au droit du tracé.
- Hydrogéologiques: Comprendre le fonctionnement des aquifères, et évaluer leurs différents paramètres.
- Géotechniques: Déterminer des valeurs géomécaniques estimées probables, moyennant une approche statistique ciblée.

2.2 Modèle géologique 3D

Le cahier des charges du mandataire exigeait « l'élaboration d'un modèle informatisé 3D de la géologie de la zone du projet, en incluant les sondages déjà réalisés dans le secteur et tous les nouveaux sondages (niveau de détail : principales unités de la géologie genevoise, niveaux piézométriques des différents aquifères) ».

Le logiciel utilisé (MOVE©) permet la modélisation de surfaces 3D (pas de volumes), avec de multiples interpolateurs et la possibilité de les retoucher manuellement. Il a également été choisi pour ses capacités en adéquation avec nos besoins:

- Compilation / interprétation de tous types de données (cartes, sondages, profils, etc)
- Etablissement facilité des profils géologiques (et export vers DAO)
- Intégration des ouvrages du projet, et de certains ouvrages existants (importés ou modélisés)
- Export des couches 3D pour les auteurs de projet

Le modèle réalisé comprend 9 formations géologiques (terrains meubles + toit de la roche en place) et 2 surfaces piézométriques. Le nombre exceptionnellement élevé de forages (150 du projet et 700 du cadastre) a permis d'établir un modèle fiable, mais a nécessité un gros travail de contrôle ou réinterprétation des unités géologiques. Contrairement aux classiques profils 2D, l'approche tridimensionnelle

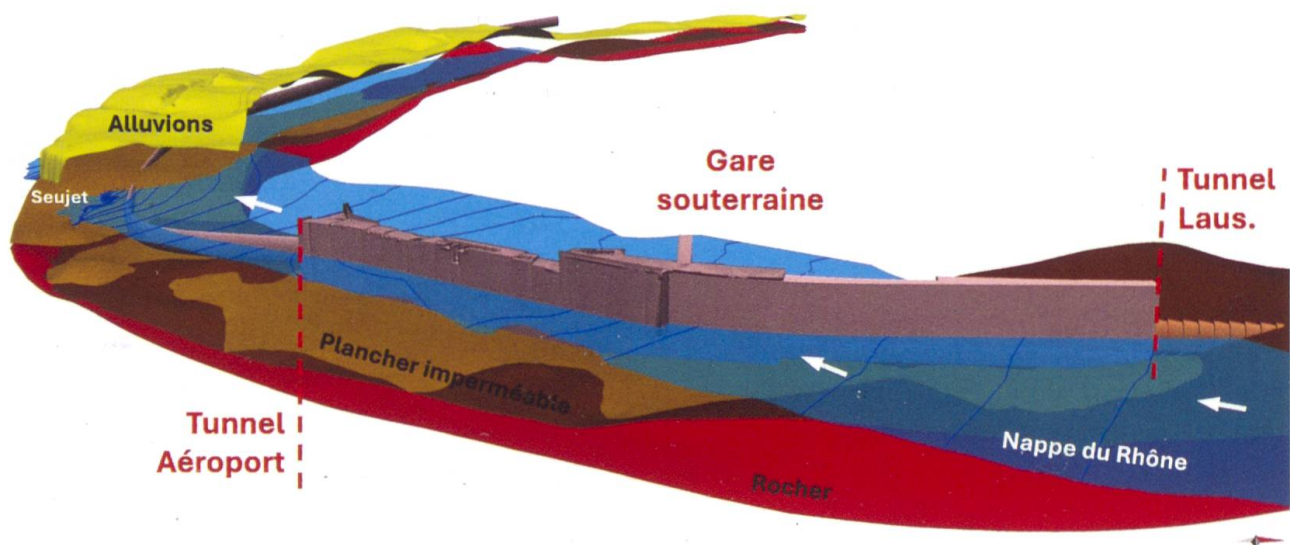
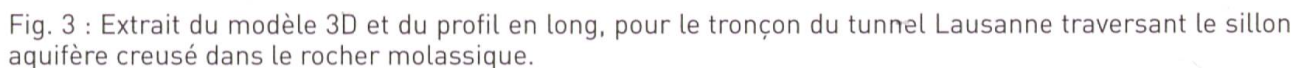


Fig. 2 : Extrait du modèle géologique 3D, avec les ouvrages du projet situés dans la Nappe du Rhône.

trémie et tunnel). Il est recouvert d'une grande épaisseur de terrains meubles, essentiellement d'origine glaciaire (deux phases de moraines et de retrait glaciola-custre, entrecoupées par des alluvions) et anthropique (remblais). La géométrie des couches y est complexe, avec de grandes variations d'épaisseur et de lithologies. La majorité des ouvrages sont implantés dans les terrains meubles, en particulier dans l'«alluvion ancienne», une formation grave-lo-sableuse très compacte et aquifère.

3.1 Cadre général

Cinq nappes d'eaux souterraines sont connues dans les terrains meubles à proximité du projet, dont deux relativement profondes et concernées par les ouvrages. Dans le secteur Lausanne, le tunnel pénètre sur environ 150 m dans une petite nappe à faible débit (dans un sillon molassique).



Pour sa part, la Nappe du Rhône, un aquifère important dans les alluvions, est traversée (d'un bord à l'autre) sur plus de 1400 m par le tracé (Figure 2). Les ouvrages (Gare souterraine et tunnel Aéroport essentiellement) y pénètrent profondément et interceptent largement le plancher imperméable. Bien que des espaces résiduels subsistent pour les écoulements, surtout sous les ouvrages (localement au-dessus pour le tunnel Aéroport), un risque d'effet barrage par le projet est à prendre en compte.

3.2 Exemples de la plus-value du modèle 3D

3.2.1 Tunnel Lausanne – Traversée d'un sillon aquifère (Km 58.8)

Le tunnel côté Lausanne est largement implanté dans le substratum molassique, mais traverse perpendiculairement sur plus de 100 mètres un sillon rempli de matériaux meubles et aquifères (figure 3). Le modèle 3D y a mis en évidence des niveaux piézométriques en charge sous une moraine wurmienne peu perméable, et une possible alimentation par une faille régionale importante. Il a également permis à l'auteur de projet de développer un système de by-pass hydraulique pour rétablir les écoulements, et ainsi limiter les risques de tassement en surface.

3.2.2 Tunnel Lausanne – Evitement d'une cuvette glacio-lacustre (Km 59.3)

Plus au sud, le modèle 3D a permis de préciser la géométrie d'une profonde cuvette (>15 m) remplie de sols fins glacio-lacustres, au droit du tracé du tunnel Lausanne. Cela a permis à l'auteur de projet d'abaisser le profil pour éviter d'intercepter ces argiles plastiques en calotte du tunnel.

3.2.3 Tunnel Lausanne – Entrée dans la nappe du Rhône

Proche de son extrémité, le tunnel traverse une épaisse moraine rissienne, dont la morphologie 3D évoque un cordon morainique. Sur les 50 derniers mètres avant la gare, il passera de ce terrain dur et sec, aux alluvions peu cohésives et aquifères de la nappe du Rhône. L'auteur de projet a ainsi dû prévoir localement un dispositif pour empêcher de grandes venues d'eau dans l'ouvrage.

3.2.4 Gare souterraine – Tranchée dans la Nappe du Rhône

La réalisation de la gare souterraine sera confrontée à la présence des ouvrages existants (gare actuelle) et des remblais parfois épais (5 à 10 mètres). Le fond de fouille sera profondément implanté dans l'Alluvion ancienne, avec un radier situé quelques mètres sous le niveau piézométrique de la nappe du Rhône (figure 2). La base de l'aquifère modélisée en 3D a permis à l'auteur de projet d'optimiser la profondeur des parois moulées, nécessaires pour prévenir les fortes venues d'eau et le renard hydraulique.

3.2.5 Tunnel Aéroport – Tunnelier sous le niveau de la Nappe

A la sortie de la gare, le tracé de ce tunnel devait s'approfondir pour éviter des galeries techniques existantes. La modélisation 3D a montré la présence de l'Alluvion ancienne, et un niveau piézométrique de la nappe au-dessus de la calotte de l'ouvrage (figure 2). L'auteur de projet a dès lors retenu une excavation au tunnelier, et optimisé le profil du tracé pour limiter les changements lithologiques.

4 Modèle hydrogéologique 3D de la nappe du Rhône

4.1 Nécessité et objectifs

Les ouvrages souterrains en projet étant clairement concernés par la Nappe du Rhône, ce sont les restrictions du secteur Au de protection des eaux souterraines qui s'appliquent. Ceci implique des conditions relativement contraignantes [4], notamment sur :

- Les travaux d'injections (réserve sur les types de coulis)
- Le rabattement de la nappe (possible sur dérogation si temporaire)
- La réduction par l'ouvrage de la capacité d'écoulement (qui ne doit pas dépasser 10%) = Effet barrage

Après discussion avec les autorités (GES-DEC), il est apparu que cette limite en pourcent n'est pas l'unique critère de dérogation pour construire dans la nappe. Un autre critère important est que les perturbations piézométriques provoquées par l'ouvrage (mise en charge et/ou rabattement) soient limitées.

Il est dès lors devenu nécessaire d'évaluer précisément l'interaction entre les ouvrages et la nappe du Rhône, par des simulations de son écoulement. Au vu de la géométrie complexe, tant des corps géologiques que des ouvrages (existants et

projetés), Géolosanne a préconisé l'établissement d'un modèle hydrogéologique 3D par éléments finis (logiciel FEFLOW®). Ce travail a été initié au printemps 2022 (fin de l'Avant-Projet), et il est toujours en cours (nombreuses itérations).

Pour quantifier les écoulements (débits) et leurs réductions en % (effet barrage), le principe de base repose sur la simulation et la comparaison des deux états actuel et perturbé (figure 4).

4.2 Modèle conceptuel de la nappe

La Nappe du Rhône s'écoule en direction du Sud-Ouest, depuis le bord du Lac Léman (Sécheron), jusqu'au Rhône (à l'aval du Barrage du Seujet). Elle est majoritairement alimentée par le lac, comme l'indique sa piézométrie qui suit le niveau régulé de ce dernier, et se décharge vraisemblablement dans le Rhône.

Les alluvions gravelo-sableuses constituent la principale formation aquifère, avec localement les matériaux de retrait sous-jacent (peu épais). Finalement, la moraine rissienne ou le rocher forment le plancher imperméable.

Pour établir le modèle, ces connaissances générales sur le fonctionnement de la nappe n'étaient pas suffisantes. Existe-t-il d'autres alimentations ou points de dé-

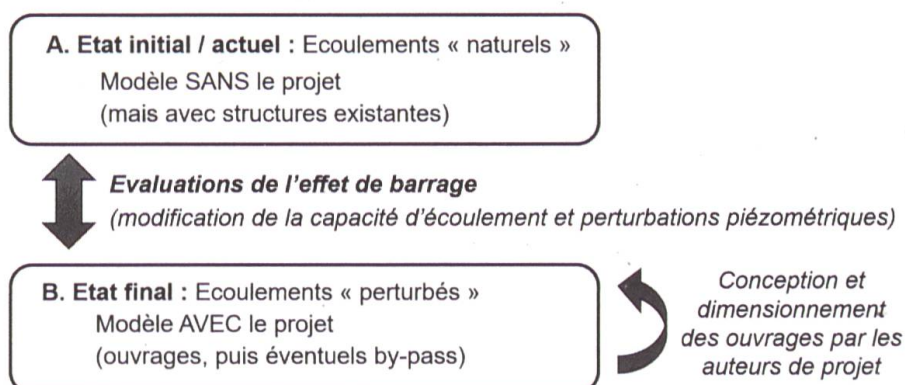


Fig. 4 : Principe de l'évaluation de l'effet barrage des ouvrages sur la nappe du Rhône, par simulations des écoulements actuel et perturbé.

charge? Quelles sont les valeurs des paramètres-clé (perméabilité, débits, gradients, etc)? En parallèle de l'établissement du modèle, nous avons dès lors travaillé sur deux axes complémentaires:

➤ Les reconnaissances

De nouveaux piézomètres ont été implantés au large du tracé (portant à une quarantaine leur nombre dans la Nappe du Rhône), et une quinzaine de piézomètres existants ont été intégrés. Ceci a permis de compléter le dispositif de suivi piézométrique (mesures manuelles synchrones et sondes en continu), afin d'établir des cartes piézo-

métriques Basses-eaux et Hautes-eaux.

Pour les valeurs de perméabilités, de nombreux essais in-situ (Lefranc, pompage courts et longs), et des essais en laboratoire (approche Slichter selon courbes granulométriques), ont été menés. Signalons en particulier la réalisation de deux puits 8" pour y mener deux essais de pompages de longue durée (> 1 mois) et à fort débit. Toutes ces valeurs (compilées avec d'autres issues de la littérature, de chantier, du cadastre) ont été analysées statistiquement par formations, types d'essais, et secteurs. Ainsi, la perméabilité «en

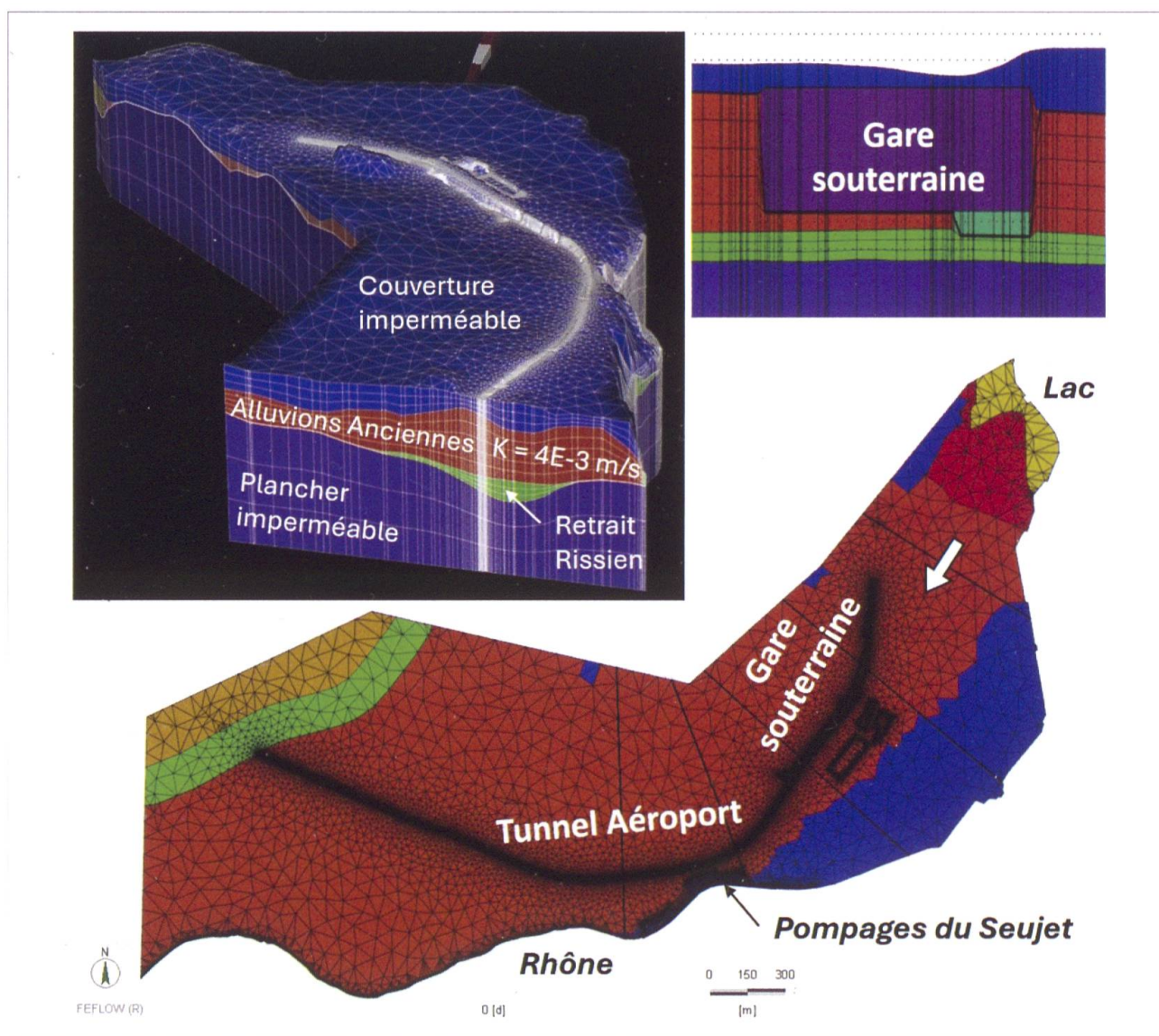


Fig. 5: Vues en 3D, en situation, et en profil en travers, du maillage et des champs de perméabilités définis pour la modélisation hydrogéologique par éléments finis.

grand» a pu être distinguée de celle «en petit», et son anisotropie mieux appréhendée.

➤ Les recherches en archives

La consultation des différents cadastres cantonaux, des archives du GESDEC, des services Industriels Genevois, et surtout du bureau GADZ SA, a apporté de nombreux documents intéressants : Rapports sur d'anciennes constructions (suivi de chantier, plans après exécution, etc), études géothermiques, chroniques piézométriques, etc. Parmi les révélations capitales (et parfois inattendues) pour le modèle conceptuel de la nappe, citons:

- Des recharges latérales par deux autres nappes (celle de Montfleury et une à Sécheron)
- Des structures existantes faisant déjà obstacles aux écoulements (bâtiments fondés profondément)
- Des parois moulées semi-perméables au bord du Rhône vers le barrage du Seujet
- Des fosses de pompage (permanent et à fort débit) dans le parking du Seujet

Ces informations ont conduit à plusieurs révisions successives du modèle en éléments finis, améliorant continuellement la qualité des simulations et des résultats.

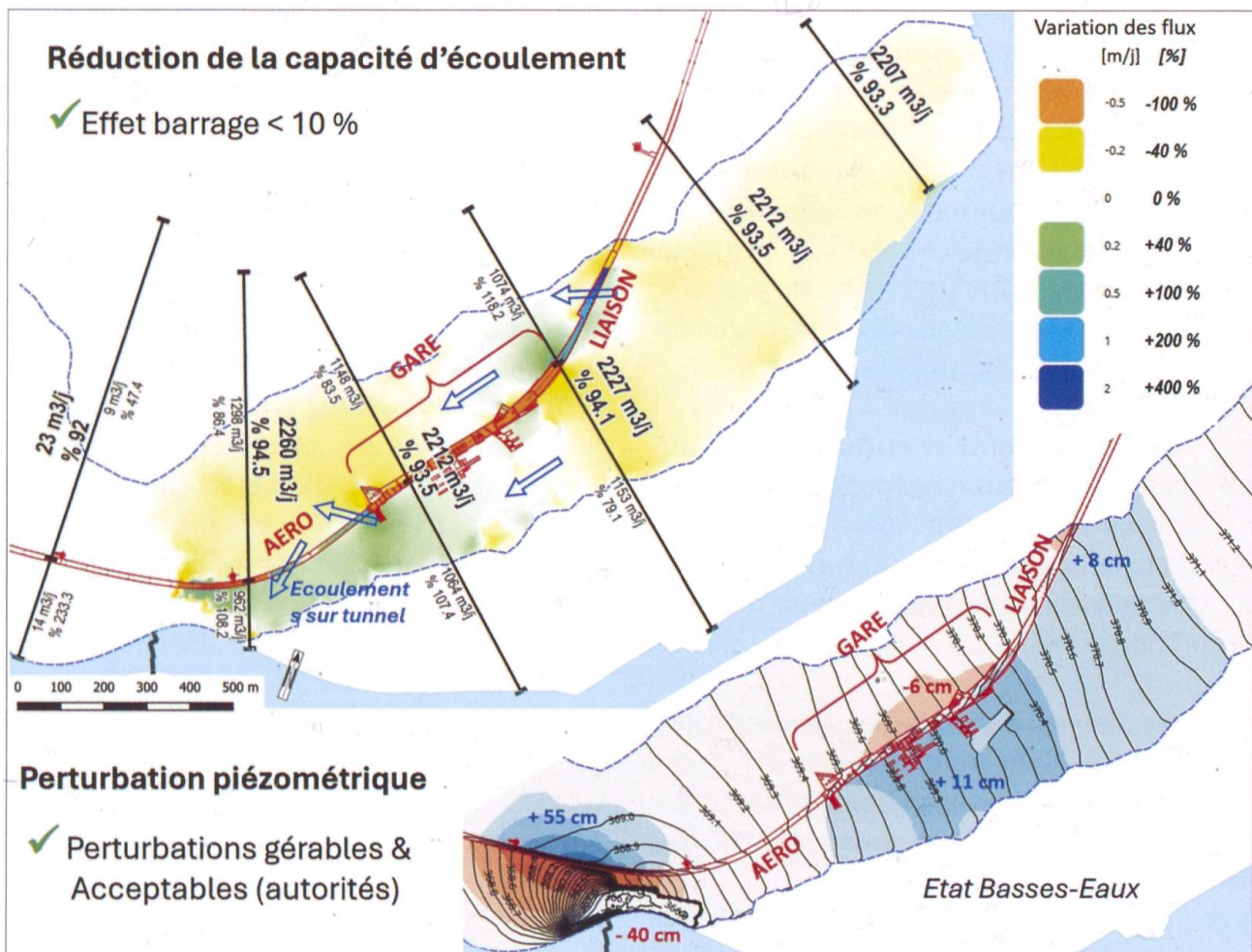


Fig. 6: Cartes de la variation des flux et des perturbations piézométriques, pour l'analyse de l'effet barrage.

4.3 Maillage, paramètres, et calibration

Pour construire le maillage en éléments finis dans FEFLOW®, les surfaces nécessaires ont été importées depuis le modèle géologique 3D (MOVE®), en particulier : les limites hydrogéologiques (plancher imperméable, formations aquifères, couverture étanche), les structures du projet (tunnels, gare, fiches hydrauliques, etc), et certains ouvrages existants (parking du Seujet, parois moulées, bâtiments profonds, etc).

Le maillage complet compte 16 couches et ~ 1'400'000 éléments (Figure 5), auxquels les valeurs de perméabilité ont été données en fonction du type de structure (p.ex. radier, paroi moulée, voile d'injection), des formations géologiques (aquifère, aquiclude) et de « zones » particulières (p.ex. colmatage local).

Les différentes simulations sont réalisées en mode pseudo-permanent (mode transitoire, avec une durée suffisamment longue pour atteindre un nouvel état permanent, principalement pour des raisons de meilleure convergence). Le résultat principal de chacune est donc un champ de pression hydrostatique stabilisé, dont la transmission aux auteurs de projet est nécessaire :

- Pour la conception et le dimensionnement des ouvrages (p.ex. contraintes sur les structures)
- Pour la phase chantier (p.ex. dispositif constructif type rabattement ou étanchéification)

En plus des modèles initial (sans projet) et perturbé (avec ouvrages), il est prévu de simuler des situations exceptionnelles, type crues ou arrêt des pompes au parking du Seujet.

4.4 Evaluation de l'effet barrage

La capacité d'écoulement, autrement dit le débit total de la nappe en m³/jour, a été évaluée dans le modèle sur 6 profils (avant les ouvrages, au droit de ceux-ci, et après), perpendiculaires aux écoulements (Figure 6). Pour chacun, le rapport en pourcent du débit sans et avec ouvrages a permis de quantifier la réduction de la capacité d'écoulement.

Afin de bien visualiser la modification des flux (Figure 6), les champs de vitesse avec et sans ouvrages ont été retraités pour obtenir des cartes de variation des flux (en m/jour et en %). Il en est de même pour l'évaluation des perturbations piézométriques, un retraitement des champs de pression avec et sans ouvrages a permis de cartographier les changements attendus (mise en charge à l'amont hydraulique, rabattement à l'aval).

Au gré de l'avancement des auteurs de projet, de nombreuses variantes ont été simulées, avec des configurations d'ouvrages différentes (géométrie des structures, types et profondeur des fiches, etc.).

Nos modèles montrent que la variante finale de l'Avant-projet n'entraîne pas d'effet de barrage supérieur à 10%. En outre, les perturbations piézométriques sont faibles (centimétriques à décimétriques), donc gérables par les structures des auteurs de projet, et acceptables du point de vue des autorités.

5 Conclusion

La situation en plein cœur de la ville de Genève de ce projet d'extension de la gare en souterrain implique des risques, mais aussi des opportunités.

Il est réalisé au droit d'ouvrages sensibles (voies en activité, bâti existant, etc.), et dans un contexte géologique et hydrogéologique relativement complexe et difficile. Il en résulte des situations de risques (selon la norme SIA 199), liées aux excavations (instabilité du front, venues d'eau, érosion internes, etc), aux nuisances et dégâts potentiels (tassements, vibrations, etc), et à la protection des eaux souterraines (pollution, effet barrage, etc.).

Proportionnellement à ces enjeux, les campagnes de reconnaissances ont été importantes, améliorant significativement la maîtrise des incertitudes et des risques. Elles ont été complétées par de nombreuses données d'archives (en particulier les forages), un avantage de ce milieu densément construit. Ceci a constitué une opportunité essentielle pour l'élaboration de deux modèles 3D, l'un géologique et l'autre hydrogéologique. Complémentaires, ils ont permis de fiabiliser nos prévisions, d'analyser efficacement les conditions et les interactions avec les ouvrages en projet, et de faciliter la compréhension des autres intervenants.

En définitive, les auteurs de projet ont également bénéficié de ces modèles 3D, qui leur ont été transmis (format compatible BIM). Ils ont ainsi pu concevoir et dimensionner des structures aptes à maîtriser les risques identifiés, notamment celui de l'effet barrage.

Références

- [1] CFF - Léman 2030: Site WEB du projet: www.leman2030.ch
- [2] Avant-projet de l'extension de la gare de Genève, 2022: Rapports et plans des 3 groupements d'ingénieurs auteur de projet : Lot Aéroport (G+A), lot Gare (INTERFACE), et lot Lausanne (G3)
- [3] Service Géologique Cantonal (GESDEC - OCEV). Géodonnées du guichet cartographique SITG: <https://ge.ch/sitg/carte/geologie>
- [4] Ordonnance sur la protection des eaux (OE-aux, 2021) et Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP, 2004)

