

Eviter les tassements pendant les travaux du m2

Au centre ville, entre la place de l'Europe et le pont Bessières, le m2 passe à proximité immédiate de deux ouvrages emblématiques de la ville : le Grand Pont et la Cathédrale. Plusieurs mesures particulières doivent garantir que la réalisation du métro ne crée pas de dommage à ces deux constructions.

Renforcement du Grand Pont

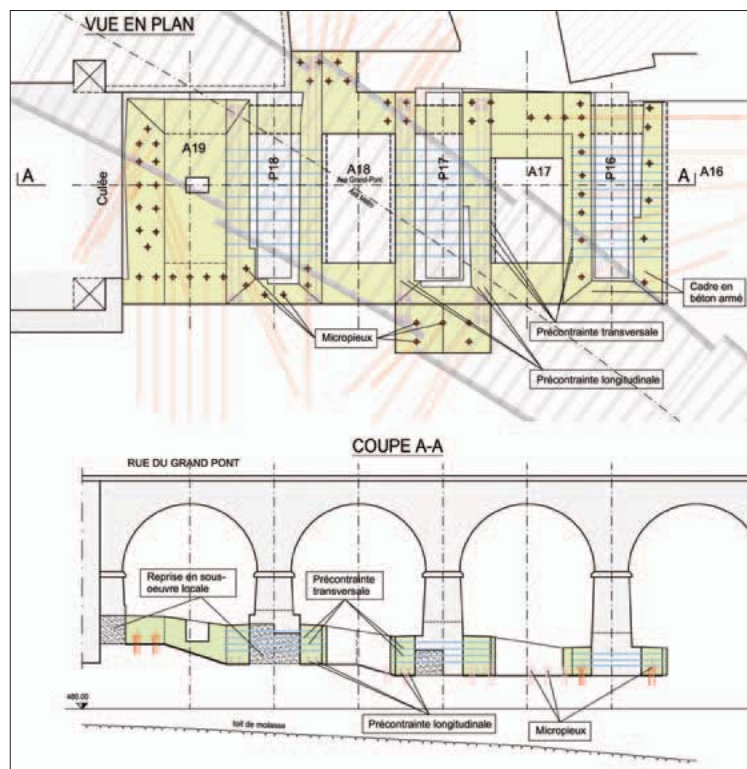
Le tunnel St-Laurent reliera la future station de la place de l'Europe à celle de la Riponne. Il est situé à faible profondeur, soit en section mixte, moraine en calotte et molasse en partie inférieure, soit entièrement en molasse. Le profil type comprend un soutènement en béton projeté fibré de 35 cm d'épaisseur, renforcé tous les mètres par des cintres réticulés à trois brins, et un radier de 35 cm d'épaisseur bétonné par étapes de huit mètres.

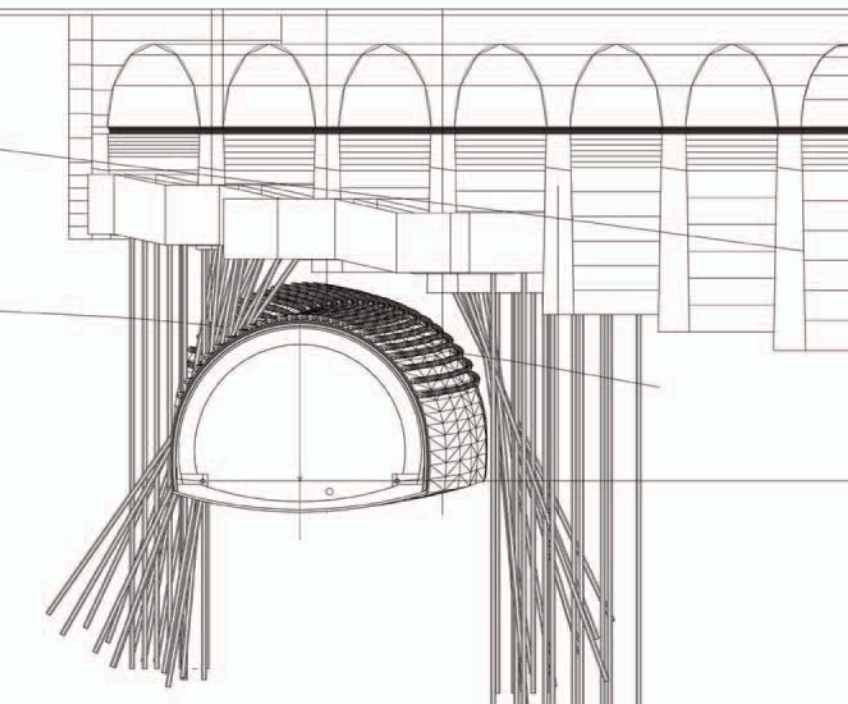
Le front d'attaque se trouve au droit du mur de soutènement de la route Bel-Air (fig. 1). Dans cette zone, le projet prévoit l'excavation à l'abri de quatre voûtes parapluies d'une longueur totale d'environ 40 m. A une quinzaine de mètres du portail sud, le tracé du tunnel croise le Grand Pont, passant sous la culée nord-ouest et les trois premières piles le long de la route Bel-Air (fig. 2). Les piles sont fondées dans la moraine, à une distance verticale d'environ 2,50 m par rapport au gabarit du tunnel.

La problématique

Des calculs par éléments finis ont confirmé que la sécurité structurale du tunnel au droit du passage sous le Grand Pont était garantie sans aucune mesure particulière concernant les fondations de celui-ci. Cependant, la vérification de l'aptitude au service a montré que les déformations du pont étaient importantes, avec notamment des tassements différentiels de l'ordre de 50 mm, ce qui est totalement inadmissible pour un ouvrage en maçonnerie de cette nature.

On a donc cherché à limiter les tassements différentiels à des valeurs minimales. Pour y parvenir, il a fallu concevoir un système permettant la transmission des charges du pont en profondeur, de part et d'autre du tunnel. Une fois réalisé, ce système devait également permettre d'intervenir pendant l'exécution du tunnel, pour remonter le pont en cas de tassements excessifs.





3



4

La solution

Le système choisi consiste à réaliser un ensemble de soixante micropieux autour des fondations des piles 16-17-18 et de la culée. Une fois mis en charge par des vérins, ces micropieux doivent reprendre le poids propre du pont ainsi que les poussées horizontales des remblais derrière la culée et l'arche 19.

Selon leur position et leur contribution à l'équilibre vertical et horizontal du pont, les micropieux ont été rassemblés en treize groupes pouvant être contrôlés séparément.

Les têtes des micropieux, équipés de vérins plats, ont été bétonnées dans un système de poutres autour des piles. Le report des charges du pont sur les micropieux se fait par frottement entre les poutres en béton et les parois des piles, frottement qui est assuré par la mise en place de barres précontraintes (fig. 2 et 4).

Pour éviter un fluage des matériaux de remplissage des piles - essentiellement composés de moellons non appareillés - qui aurait entraîné la détente des barres précontraintes, les vides éventuels ont été remplis par des injections de coulis de ciment.

Les poutres sont liées entre elles par des longrines en béton armé. Ce dispositif permet de créer un cadre pouvant assurer la transmission des efforts d'un groupe de micropieux au groupe voisin en cas de défaillance. La position relative des deux ouvrages (fig. 3) impose que l'espacement et l'inclinaison des micropieux soient variables. A titre d'exemple, on notera que les micropieux des piles 17 et 18 ont dû être concentrés aux extrémités de ces dernières, la transmission des efforts des piles aux micropieux étant assurée par la flexion des poutres de liaison.

En cours de réalisation, on a constaté que le niveau réel de fondation des piles était plus haut que celui figurant sur les plans de l'ouvrage existant, ce qui a rendu nécessaire une diminution de la hauteur statique des poutres en béton. Cette réduction a été compensée par la mise en place de câbles de précontrainte, pour éviter une reprise en sous-œuvre.

La mise en charge

Une première mise en charge des vérins a eu lieu en mai 2004, avant le début des travaux de creuse du tunnel. Elle s'est effectuée par étapes, en fonction de la charge de service estimée lors des calculs et de sorte que les composantes horizontales soient toujours en équilibre.

Chaque étape de mise en charge des vérins était accompagnée d'un nivellement du pont et de la structure en béton. vingt-trois points de contrôle ont été posés sur les parois des piles et la culée du Grand Pont (fig. 5). Pour pouvoir mettre en évidence un éventuel glissement entre le pont et la structure en béton armé lors de la mise en charge, vingt-trois points de contrôles supplémentaires ont été posés directement sur la structure en béton. Le but étant de décoller le pont du terrain de fondation, afin qu'il repose entièrement sur les micropieux, le critère fixé pour l'arrêt de la mise en charge de chaque groupe était un déplacement vertical positif (soulèvement) des points de contrôle situés sur le Grand Pont d'un minimum de 0,5 mm.

Cette première mise en charge a conduit à un soulèvement moyen du pont d'environ 1 mm. Elle a de plus permis de confirmer les hypothèses de calcul concernant les charges verticales et les poussées du remblai derrière le pont.

Suivi du comportement de l'ouvrage

Entre le mois de mai et le début des travaux d'excavation du tunnel en août 2004, la pression dans les vérins a diminué d'environ 30%. Cette diminution s'explique par la décompression élastique du terrain et la reprise d'une partie du poids du pont par ce dernier. Les déplacements sont toutefois demeurés positifs et aucune mise en charge supplémentaire n'a été réalisée pour remonter la pression dans les vérins avant l'excavation du tunnel.

Lorsque le front du tunnel s'est approché des piles 16 et 17, le pont a subi des tassements allant jusqu'à -4,1 mm (valeur maximale par rapport à l'état 0 du pont avant la mise en charge). Il a été décidé de réactiver les vérins pour

Fig. 1 : Tunnel St-Laurent, portail place de l'Europe

Fig. 2 : Vue en plan et coupe du système de reprise en sous-œuvre

Fig. 3 : Représentation 3D du système Grand Pont - tunnel St-Laurent - micropieux

Fig. 4 : Poutres autour des piles avec les barres de précontraintes

Fig. 5 : Evolution des déplacements verticaux du Grand Pont

compenser ces mouvements et de réaliser une seconde mise en pression qui a permis de remonter l'ouvrage de 3,5 mm en moyenne (tassement max réduit à -0,6 mm).

Alors que le front de taille se trouve actuellement derrière la culée - après avoir traversé les piles 16,17 et 18 -, les tassements totaux et différentiels du pont ne dépassent pas -2,1 mm, ceci sans aucune mise en tension supplémentaire. Par ailleurs, la présence de terrains de meilleure qualité ainsi que l'évolution du comportement du Grand Pont ont permis de ne pas réaliser deux des quatre voûtes parapluies prévues depuis le portail.

Les mouvements du Grand Pont ainsi que l'évolution des pressions dans les vérins seront suivis jusqu'à la fin de la creuse du tunnel St-Laurent. Après la pose du revêtement final du tunnel, les vérins seront injectés au ciment, bloquant ainsi définitivement la pression dans ces derniers.

Tassements éventuels de la Cathédrale

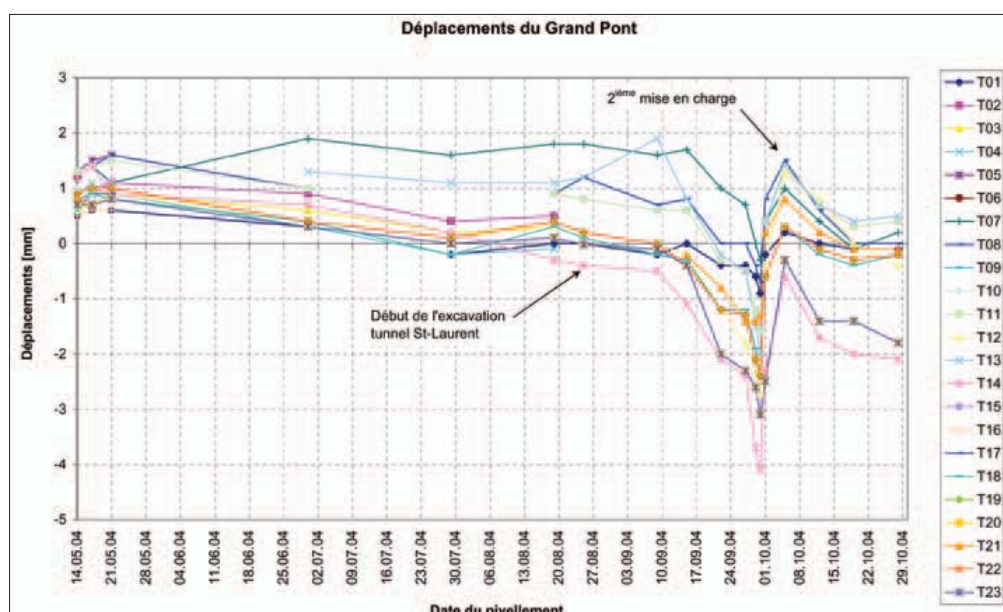
Les travaux de percement du tunnel Viret peuvent induire un drainage des eaux souterraines qui saturent les sédiments fins sur lesquels est fondée la Cathédrale de Lausanne (fig. 6). Un drainage - même partiel - de ces sédiments risque de créer des tassements importants de nature à affecter sévèrement la structure de l'édifice. Au stade final, le tunnel sera entièrement étanché (radier et voûte), le problème du drainage des eaux souterraines se pose donc uniquement en phase de construction.

Contexte hydrogéologique du tunnel Viret

La Cathédrale se situe à une altitude d'environ 525 m, à l'extrémité sud d'un long promontoire molassique de direction méridienne entre Le Mont et le Bois de Sauvabelin. Le toit de la molasse présente localement une dépression orientée nord-sud, en amont de la Cathédrale, puis tourne vers le sud-ouest, passant à proximité de la bordure est de cette dernière (fig. 7). Une couche de moraine peu perméable pouvant atteindre 6 m d'épaisseur repose sur la molasse. Elle présente également deux dépressions qui se rejoignent en aval de la Cathédrale. La moraine est finalement recouverte d'un dépôt glacio-lacustre complexe composé de sables et de limons, puis d'un remblai. Une partie importante de ce complexe glacio-lacustre est aquifère et repose parfois directement sur la molasse (fig. 6).

Le tracé du tunnel passe à faible distance au sud de la Cathédrale : dans ce secteur, il sera excavé dans la molasse. La longueur du tronçon où l'aquifère glacio-lacustre est en contact direct avec la molasse devrait être d'environ 50 m. L'épaisseur résiduelle entre cette dernière et le toit du tunnel devrait être de l'ordre de 3 m dans ce secteur. Cette épaisseur diminue d'ailleurs en direction du pont Bessières où la voûte du tunnel sera finalement taillée dans la moraine.

Si le battement naturel annuel de la nappe peut dépasser 2 m au nord de la Cathédrale, il se réduit à quelques dizaines de centimètres au sud de celle-ci. La faible amplitude des variations saisonnières dans ce secteur semble être due au



potentiel hydraulique constant, imposé par le drainage situé sous le gymnase de Viret. Au droit du tunnel, la charge hydraulique au-dessus de la molasse est comprise entre 8 et 9 m.

Dangers pour les bâtiments historiques

Les risques de drainage des eaux souterraines par le tunnel de Viret se situent essentiellement lors de son passage sous la nappe, là où la moraine imperméable disparaît et où l'épaisseur du rocher molassique au-dessus de la voûte se réduit à quelques mètres. Cette situation se présente sur une longueur de l'ordre de 100 m, avec une zone critique de 50 m. A cet endroit, les eaux souterraines pourraient être drainées dans le tunnel à la faveur des fissures et fractures qui affectent le rocher molassique.

Si la molasse devait être de mauvaise qualité ou si son épaisseur au-dessus du tunnel devait être faible, voire nulle, il existerait un risque majeur d'effondrement de la voûte. Indépendamment des conséquences sur la stabilité de la galerie, cette situation accentuerait les risques de tassement de la Cathédrale et des autres bâtiments historiques proches.

D'après des simulations mathématiques (avec Z-Soil, en régime transitoire selon l'équation de Theis), l'abaissement

de la nappe de 2 m au droit de la Cathédrale conduirait à des tassements compris entre 2 et 4 cm des terrains sur lesquels l'édifice est construit. Ceux-ci pourraient engendrer des tassements différentiels dommageables pour la structure en maçonnerie de la Cathédrale. Au droit du tunnel, l'amplitude des variations du niveau de la nappe en cas de drainage des eaux souterraines pourrait aller jusqu'à 8 m, engendrant des tassements en surface de l'ordre de 4 à 6 cm.

Injections de mousse depuis le tunnel...

Un suivi continu de l'ouvrage dans ce secteur à risque doit permettre de détecter les discontinuités de la molasse susceptibles d'entraîner des écoulements d'eau importants dans le tunnel, ceci afin de prévenir un drainage massif des eaux souterraines situées sous la Cathédrale. Des forages de reconnaissance seront systématiquement réalisés à l'avancement et les éventuelles venues d'eau seront traitées à l'intérieur de la galerie par des injections de mousse aqua-réactive.

... ou d'eau depuis des puits

Si les injections effectuées depuis le tunnel ne permettent pas de stopper les écoulements, il est prévu de réalimenter la nappe par injection d'eau à partir de puits. En cas de per-

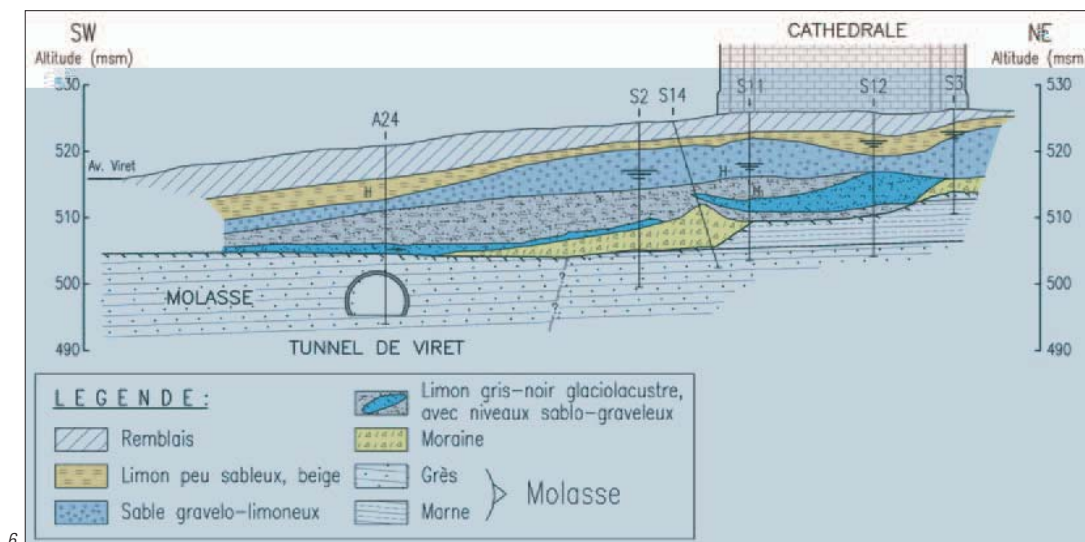


Fig. 6 : Profil hydrogéologique et situation du tunnel Viret par rapport à la Cathédrale

Fig. 7 : Extension des formations aquifères sous la Cathédrale et direction générale de l'écoulement des eaux souterraines

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

cement du plancher de la nappe lors des travaux d'excavation, le débit continu dans le tunnel Viret devrait s'approcher du débit naturel de la nappe, soit environ 2,5 l/s.

Après douze jours, le rabattement sous la Cathédrale pourrait atteindre, selon l'équation de Theis, entre 0,8 m au nord et 1,5 m au sud. Cinq puits d'injection - débit unitaire de 28 l/min - seraient nécessaires le long de la façade sud pour compenser ces rabattements. Pour les bâtiments situés au droit du tracé (le Musée de design et d'arts appliqués contemporains (mudac) et le Musée historique de Lausanne, ainsi que la salle de gymnastique accolée au premier musée), les rabattements dépasseraient quatre mètres avec une dépression maximale de huit mètres au droit de la perte. Pour compenser cette forte dépression, on a prévu sept autres puits d'injection de même débit unitaire.

Au total, ce sont donc douze puits d'injection d'eau qui sont nécessaires pour compenser une éventuelle baisse du niveau de la nappe lors de l'exécution du tunnel Viret. Le dispositif comprendra un système d'alarme automatique pour une mise en route manuelle des injections d'eau.

Une fois le voûtage du tunnel réalisé, les conditions hydrostatiques de la nappe retrouveront leur équilibre et les risques liés au m2 seront alors écartés.

Anticiper pour ne pas subir

Le contrôle des tassements différentiels des piles du Grand Pont à l'aide de soixante vérins posés sur des micropieux a permis d'excaver le tunnel St-Laurent sans créer de dommage à un ouvrage construit il y a plus de 150 ans. Le défi de creuser un tunnel dont la clé de voûte est située à moins de trois mètres sous les fondations du pont a pu être relevé grâce à l'ingéniosité et le savoir-faire des projeteurs et entrepreneurs.

La maîtrise des niveaux hydrostatiques de la nappe située sous la Cathédrale et les bâtiments situés à proximité reste la mesure la plus efficace pour assurer la pérennité d'importants édifices du patrimoine construit de la Ville. Selon les données hydrogéologiques à disposition, la mise en œuvre d'un dispositif de douze puits d'injection d'eau doit permettre de maîtriser ces risques durant toute la phase du percement du tunnel.

Olivier Tappy, ing. civil EPF/SIA

Joanna Goussi, ing. civil EPF

Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA
Av. du Temple 19, CH - 1000 Lausanne 12

Jean-François Brodbeck, hydrogéologue

Jean-Daniel Dubois, hydrogéologue, dr ès sc.

CSD Ingénieurs Conseils SA
Ch. de Montelly 78, CH - 1000 Lausanne 20

Groupement d'étude GIT-LEB

Bureaux d'ingénieurs :

Piguet + Associés Ingénieurs Conseils SA, Lausanne, pilote
CSD Ingénieurs Conseils SA, Lausanne

Bureau d'architectes :

TMV, tschumi-merlini-ventura, Lausanne

