

Pieux forés : une technique pour deux ouvrages

GÉNIE CIVIL

Le tronçon du m2 reliant le carrefour de Mon Repos au CHUV comprend quatre ouvrages, à savoir la tranchée du Tribunal Fédéral, le tunnel Perdonnet, la station Ours et le tunnel du Bugnon (tabl. A et fig. 1). Ils se trouvent à une profondeur variant entre 11 et 20 m dans des terrains constitués de remblais, de moraine et de molasse avec des lentilles de marne gonflante. Deux de ces quatre ouvrages, la tranchée du Tribunal Fédéral et le puits de la station Ours, utilisent des pieux forés et sont déjà en cours d'exécution.

Géologie et hydrogéologie

Du point de vue géologique, le tracé parcourt le flanc sud d'une colline molassique. Profondément entaillés par l'ancienne gorge du Flon, des bancs épais d'une molasse essentiellement gréseuse (« Molasse grise de Lausanne », d'âge aquitainien) affleurent vers l'avenue de la Sallaz, au nord-ouest du projet. Les dépôts molassiques sont essentiellement constitués d'une alternance de bancs gréseux (grès à grains grossiers, moyens et fins) et de bancs marneux (silt plus ou

moins gréseux, localement argileux à très argileux). Des essais réalisés sur des échantillons de silt argileux à très argileux ont montré que ces couches étaient sujettes au gonflement.

À l'exception d'une couche de marne à la hauteur de la station CHUV, les variations latérales sont fréquentes et il est difficile de suivre un banc précis d'un forage à l'autre. Les profils en long établis pour le tracé font ressortir le toit molassique en marches d'escaliers très prononcées.

Généralement, la molasse est couverte par une moraine de fond sablo-limoneuse - moraine rhodanienne - présentant des variations relativement importantes le long du tracé. La moraine molassique - ou « matelas » - s'intercale entre la surface molassique et la moraine de fond alpine. Bien que cette couche ait été rencontrée dans différents forages, son épaisseur reste faible. Ces terrains sont finalement recouverts par des remblais artificiels.

Les mesures piézométriques dans les forages et les mesures de pressions interstitielles dans la zone du passage Perdonnet à la Place de l'Ours ont révélé l'existence de deux réseaux hydrogéologiques plus ou moins indépendants.

Dans les couches de couverture, les mesures ont mis en évidence une nappe dont les niveaux n'ont que très peu varié pendant la période de mesure (juin 1999 à janvier 2001). Il s'agit généralement d'eau d'infiltration et d'accumulation circulant à la base des remblais, dans les passes les plus perméables de la moraine, sur le toit et dans les parties altérées de la molasse.

Dans cette dernière, les pressions mesurées sont nettement inférieures à celles dans les couches de couverture et il s'agit d'une nappe fissurale. Ces pressions sont de l'ordre de 2 m par rapport au niveau de référence du profil en long, et il a été décidé de drainer tous les ouvrages, même ceux situés entièrement dans la molasse. Des essais de pompage ont montré que les sols sont peu perméables - ordre de grandeur de $k=0,8 \cdot 10^{-6}$ à $1,0 \cdot 10^{-6}$ m/s - et que les débits devraient rester limités.

Les analyses d'échantillons d'eau prélevés dans les forages montrent que l'eau est à considérer comme peu agressive vis-à-vis du béton.

Ouvrages	Longueur [m]	Pentes	Section
Tranchée du Tribunal-Fédéral	161.5	7,0 %	Dalle encastrée élastiquement sur paroi de pieux, radier engravé dans paroi de pieux
Tunnel Perdonnet	63.2	7,0 puis 2,5 %	Fer à cheval avec radier voûté
Station Ours	33	2,5 %	Puits central : - Murs d'enceinte en parois de pieux avec doublage en éléments préfabriqués en béton armé. Extensions en souterrain : - Anneau intérieur en béton avec radier contre voûté
Tunnel du Bugnon	461	2,5 puis 11,3 %	Fer à cheval avec radier voûté

Tabl. A : Caractéristiques principales des ouvrages

Fig. 1 : Plan de situation des ouvrages

Fig. 2 : Photomontage pour l'implantation en surface de la station Ours

Fig. 3 : Volumétrie souterraine de la station Ours

Station de l'Ours

Implantation et architecture

Toutes les fonctions - accès par escaliers et ascenseurs, sorties de secours et exutoire de désenfumage - sont rassemblées en un seul endroit, le puits d'accès de la place de l'Ours. L'ensemble du dispositif débouche en surface à l'est du passage Perdonnet, sur la placette élargissant le bas de l'avenue de Béthusy. Cette implantation implique la démolition de l'immeuble « Perret », au numéro six de cette avenue, en offrant dès lors une meilleure relation piétonne avec le collège voisin et des espaces mieux dimensionnés pour organiser l'interface m2 - lignes TL du nord-est (fig. 2).

Cette situation permet de regrouper sous une seule marquise vitrée les deux paires d'ascenseurs d'accès direct aux quais, l'escalier principal et l'abri d'attente pour l'arrêt des bus TL. Compte tenu de la grande profondeur de la station, le projet exploite autant que possible l'espace du puits d'accès et la possibilité d'y introduire une source de lumière zénithale naturelle. Les trémies vitrées des ascenseurs et le jeu visible de leurs courses alternées animeront l'ensemble et amélioreront le sentiment de sécurité des usagers.

La volumétrie de la station est générée par l'intersection d'un prisme vertical (le puits d'accès) et de la voûte de la station. Le puits vertical (10 x 30 m pour 22 m de profondeur) est subdivisé en trois volumes : les volumes est et ouest, où seront réalisés les escaliers, et la partie centrale qui recevra les ascenseurs pour accéder aux quais de la station. Une passerelle permettra le passage des usagers d'un quai à l'autre (fig. 3).

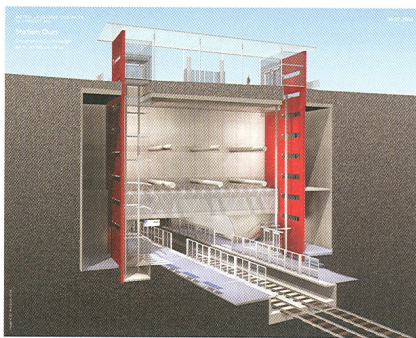
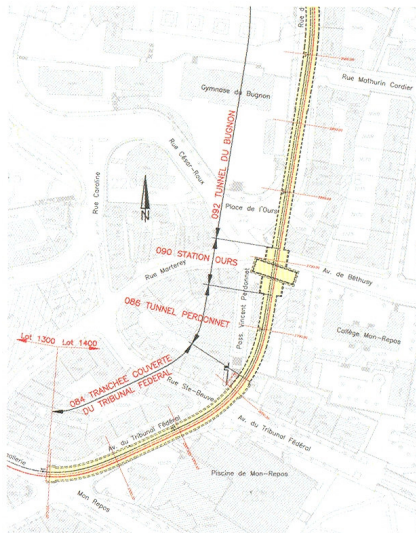
Structures porteuses et exécution

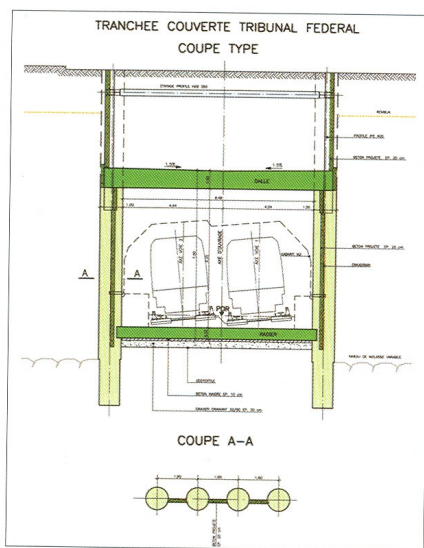
Les contraintes d'exécution et les critères de conception de l'ouvrage considérés pour le projet définitif sont les suivants :

- proximité de mitoyens en plan avec le puits central et en altitude au-dessus de la partie construite en souterrain,
- entaille de la molasse, localement gréseuse et dure, sur 9 m d'épaisseur environ,
- existence d'un niveau piézométrique dans la moraine (situé jusqu'à 4 m de profondeur environ) et de circulations d'eau dans la molasse.

Puits central

C'est à partir de ce puits central que les deux galeries constituant la station seront excavées à l'abri de voûtes parapluies. La galerie nord servira de front d'attaque pour le tunnel du Bugnon.





4



5

Les murs de ce puits sont constitués de parois de pieux jointifs d'un mètre de diamètre. Le puits est fondé sur un radier de 80 cm d'épaisseur encastré dans les pieux. La dalle de couverture est également encastrée dans les pieux. Deux niveaux d'étaillage avec butons préfabriqués en béton armé complètent la structure du puits.

La réalisation du puits a nécessité le forage de nonante pieux d'une longueur moyenne de 22 m (fig. 6). Les pieux sont fichés dans la molasse, à l'exception de ceux situés au droit des prolongements souterrains de la station où ils sont arrêtés au-dessus des ouvertures. Ces pieux constituent le blindage du puits à l'abri duquel s'effectuèrent les terrassements jusqu'au niveau des quais. Le terrassement s'effectue par étapes de 5 m de hauteur. Un étaillage en profilés métalliques et butons en béton armé est mis en place à chaque étape.

L'étanchéité de la dalle est constituée de lés au bitume-polymère collés avec une protection du type BEKA. Une retombée est prévue pour assurer le recouvrement du joint

entre le sommier et la dalle. Les parois latérales de l'ouvrage n'étant pas parfaitement étanches, un doublage en béton préfabriqué est prévu pour cacher les éventuelles infiltrations d'eau. Les eaux d'infiltrations seront récoltées dans des rigoles disposées entre la paroi et le doublage et seront évacuées par un collecteur placé sous les quais.

Extensions souterraines

Il s'agit de deux amorces exécutées en souterrain sur 18,25 m de longueur de part et d'autre du puits central. Côté sud, vers le tunnel de Perdonnet, l'amorce a une longueur à l'axe de 7,25 m. Elle est située sous le bâtiment de la poste du Passage Perdonnet, avec une couverture de 7,0 m environ. Côté nord, vers le tunnel du Bugnon, l'amorce a une longueur à l'axe de 11,00 m environ.

Le profil normal a une géométrie quasi-elliptique, en voûte, avec un demi-axe horizontal de 7,00 m et un demi-axe vertical de 5,12 m. Un radier contre-voûte - 18,50 m de rayon - reprend les pressions de gonflement de la molasse. En service, l'anneau porteur de l'ouvrage sera constitué de 28 cm de béton projeté, revêtu de béton coffré d'épaisseur variable : 50 cm en voûte, 50 à 80 cm en piédroits et 80 cm en radier.

La section excavée de 140 m² environ a une hauteur maximale de 10,45 m pour 17,00 m de largeur. Les attaques seront faites à partir du puits, à l'abri d'une prévoûte en calotte, constituée par des tubes métalliques injectés. Le terrassement de la section et la réalisation de la structure seront divisés en plusieurs phases :

- excavation de la calotte en deux étapes :
 - a) réalisation de deux galeries de pieds de section ovale, excavées à l'abri d'un soutènement provisoire par étape de un mètre,
 - b) pose du soutènement, excavation de la partie centrale de la calotte et mise en place du complément du soutènement de la calotte,
- excavation du stross en laissant deux bermes latérales,
- excavation des pieds droits par étape, bétonnage des fondations et des naissances de la voûte,
- bétonnage de la voûte.

L'étanchéité sera constituée par une feuille de polyéthylène en voûte et en piédroits, protégée par un feutre à l'extrados côté soutènement et à l'intrados pour éviter le poinçonnement par les armatures. Les eaux de ruissellement seront recueillies par un drain collecteur disposé de chaque côté à l'extrados du revêtement. Les eaux seront évacuées gravitairement vers la station Ours d'un côté, et vers le tunnel Perdonnet de l'autre.

Tranchée du Tribunal Fédéral

La profondeur du fond de forme pour la pose des voies est comprise entre 9,2 et 13,4 m. La base de l'ouvrage entaille la molasse sur la majeure partie du tracé. Dans la partie sud, sur une longueur d'environ 55 m, l'ouvrage repose sur une couche de moraine d'une épaisseur maximale de l'ordre de 7 m. Les contraintes d'exécution et les critères de conception de l'ouvrage pris en compte au stade du projet définitif sont les suivants :

- respect des gabarits,
- proximité de mitoyens,
- présence à faible profondeur de molasse, localement gréseuse et dure,
- existence d'un niveau piézométrique dans la moraine, situé jusqu'à 4 m de profondeur environ, et de circulations d'eau dans la molasse.

Profils normaux et structure porteuse

Le tracé est rectiligne dans sa partie centrale et en arc de cercle à ses deux extrémités, avec des rayons de 81,33 m au sud et 90,00 m au nord. La largeur et de la tranchée varie entre 7,35 à 8,40 m et la hauteur est de 6,10 m selon l'exigence du gabarit et du mode d'exécution (fig. 4 et 5).

L'ouvrage est constitué de deux parois de pieux d'un diamètre de 900 mm équidistants de 1,80 m, d'une dalle de couverture de 0,8 m d'épaisseur appuyée sur les pieux et d'un radier de 0,5 m d'épaisseur engravé dans les pieux.

La fiche des pieux, à partir de la base du radier, est de 3,0 m lorsque le radier repose sur la moraine et de 2,0 m s'il repose sur la molasse. Cette paroi de pieux, qui sert de soutènement pendant la construction, est étayée en tête pour limiter les déplacements. L'excavation se fait en taupé après le bétonnage contre terre de la dalle de couverture.

Drainage et étanchéité

Il n'est pas prévu d'étanchéité pour la dalle : si des venues d'eau ponctuelles sont possibles entre les pieux tangents, les plus importantes seront traitées si nécessaire avec du béton projeté. Une rigole de collecte des eaux percolant au travers des parois de pieux est prévue.

Compte tenu de la pente longitudinale de l'ouvrage, il n'est pas prévu de drainage au niveau de la dalle de couverture : le béton projeté des parois est perforé lors du remblayage au-dessus de la dalle, afin de permettre une circulation des eaux superficielles.

Un collecteur d'un diamètre de 300 mm est disposé sous l'ouvrage pour assurer :

- le transit des eaux en provenance de l'amont,

Fig. 4 : Coupe type de la tranchée du Tribunal Fédéral

Fig. 5 : Terrassement de la tranchée du Tribunal Fédéral

Fig. 6 : Exécution d'un pieu pour la station Ours

Fig. 7 : Terrassement du puits de la station Ours



Fig. 8 : Mise en place d'un pont provisoire sur la tranchée du Tribunal Fédéral
(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

- la collecte des eaux de lavage et autres en provenance de l'intérieur de la tranchée couverte,
- la collecte des eaux de drainage latérales.

Ces eaux sont récupérées par pompage depuis le fond de la tranchée et passent ensuite par un décanteur et un déshuileur situés sur la tranchée, avant de rejoindre la canalisation de la rue Langallerie.

Méthode d'exécution

Les pieux sont exécutés depuis le niveau actuel de la route. Ils sont bétonnés jusqu'à la dalle de couverture de la tranchée, le solde étant rempli de graves stabilisées. Un IPE 400 prolonge chaque pieu dans la partie non bétonnée (fig. 5).

D'abord exécuté jusqu'à une profondeur de 1,5 m avec la mise en place d'un étayage à un mètre, le terrassement se poursuit ensuite jusqu'au niveau inférieur de la dalle de couverture, un voile de gunite étant mis en place entre les IPE 400 pour former une paroi berlinoise.

La dalle de couverture est ensuite bétonnée, après recépage des pieux qui lui servent d'appui. Le terrassement est alors poursuivi en taupé jusqu'au niveau inférieur du radier, lequel est encastré dans les pieux (fig. 4).

Travaux à ce jour

Le secteur Tribunal Fédéral - Place de l'Ours se caractérise par une forte densité urbaine en surface, de nombreux réseaux souterrains (PT, SEL, GAZ, eau, chauffage urbain, etc.) et un important trafic automobile. Tous les réseaux se trouvant dans l'emprise des ouvrages ont dû être déviés avant le début du forage des pieux. Ces travaux devaient tenir compte de nombreuses contraintes imposées par le milieu urbain :

- garder libres les accès aux entrées d'immeubles,
- permettre aux véhicules d'urgences (pompiers et ambulances) de circuler,
- nombreuses déviations des trafics véhicules et piétons par la mise en place de ponts provisoires (fig. 8).

Pendant ces travaux de déviation, il a fallu en permanence assurer la sécurité des piétons et des véhicules en mettant en place des protections et une signalisation différente pour chaque phase. Ces mesures ont nécessité un phasage très complexe des travaux.

Les travaux dans ce secteur ont commencé fin mars 2004 et la situation actuelle des travaux est la suivante :

- travaux de déviations des réseaux terminés,
- travaux de forages des pieux terminés,
- terrassement du puits de la station Ours en cours,
- bétonnage de deux étapes de dalle de la tranchée du Tribunal Fédéral.

Malgré les difficultés dues à l'environnement du chantier, aucun incident grave n'est à signaler à ce jour. Limiter les nuisances au voisinage et garantir la sécurité des piétons et véhicules tout en respectant le programme des travaux est le défi permanent de l'entreprise et de la direction des travaux.

Les mois qui viennent verront le commencement de l'excavation en taupé de la tranchée ainsi que l'attaque du tunnel Perdonnet.

Chabane Larbi, ing. civil EPF
Emch+Berger SA, succursale de Lausanne
Chemin d'Entre-Bois 29, CH - 1000 Lausanne 8



Groupe d'étude Emch+Berger

Bureaux d'ingénieurs :
Emch+Berger SA, Lausanne, pilote
Géos SA, Carouge
DIC SA, Aigle

Bureaux d'architectes :
Architram HS, Renens
Ferrari SA, Lausanne

Bureau de géologie et de géotechnique :
Institut géotechnique, Berne