

Lots 1400/1500 Partie souterraine de la station Ours et tunnels

1. Ouvrages des lots 1400 et 1500

Le tronçon du m2 reliant le carrefour Mon Repos (croisement des rues du Tribunal Fédéral et Langallerie) à la Sallaz se compose de 7 ouvrages (tableau 1), dont le niveau des rails (PDR) se trouve à une profondeur variant entre 11 et 20 m. La pente du tracé varie entre 2.5 et 11.3%. La géométrie en plan très sinueuse est composé essentiellement de courbes de 200m de rayon, avec une seule exception à 90m, et de très courts tronçons rectilignes.

Les caractéristiques principales des ouvrages sont résumés dans le tableau 1.

Ouvrages	Longueur [m]	Pentes	Section
Tranchée du Tribunal-Fédéral	162	7.0 %	Dalle de 80 cm d'épaisseur encastrée élastiquement sur paroi de pieux diam. 900 mm espacés tous les 1.8 m, 20 cm de béton projeté entre pieux, radier de 50 cm engravé dans paroi de pieux.
Tunnel Perdonnet	63	7.0 – 2.5%	Section en fer à cheval (60 m2), revêtement en béton projeté de 35 cm non étanché mais drainé, avec radier voûté de 35 cm en béton armé
Tunnel du Bugnon	486	2.5 – 11.2%	
Tunnel des Falaises	510	4.0 – 7.0 %	
Station OURS	33	2.5%	Puits central : <ul style="list-style-type: none">Murs d'enceinte en parois de pieux jointifs de 900 mm de diamètre, avec doublage en éléments préfabriqués en béton armé. Etayage de la fouille avec longrines en béton et butons préfabriqués en béton Extensions en souterrain : <ul style="list-style-type: none">Section en fer à cheval (140m2) avec étanchéité, anneau intérieur de 50 cm et radier contre voûté de 80 cm en béton armé
Tranchée Hôpitaux		11.2 - 4.0%	Cadre rectangulaire en béton armé
Station CHUV		4.0%	Station en tranchée ouverte

Tableau 1 : caractéristiques des ouvrages

2. Géologie

Du point de vue géologique, le tracé des lots 1400 et 1500 se trouve sous le flanc d'une colline molassique. 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 silts argileux à très argileux ont démontré que ces couches étaient sujettes au gonflement. A part la présence d'une couche de marais à la hauteur de la station CHUV, les variations latérales sont fréquentes et il est généralement difficile de suivre un banc précis d'un forage à l'autre. Les profils en long établis le long du tracé font ressortir le toit molassique en marches d'escaliers très prononcées.

Généralement, la molasse est couverte par une moraine de fond sablo-limoneuse appelée 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. Son épaisseur est très variable du décimètre au mètre. Bien que cette couche ait été rencontrée dans différents forages, son épaisseur reste généralement faible. Finalement, ces terrains sont surmontés de remblais artificiels.

Les mesures piézométriques effectuées dans les forages et les mesures de pression interstitielles effectuées dans la zone Passage Perdonnet – Place de l'OURS, ont permis de montrer la présence de deux réseaux hydrogéologiques plus ou moins indépendants. Dans les couches de couverture, les mesures ont mis en évidence la présence d'une nappe, dont les niveaux n'ont que très peu varié pendant la période de mesure (juin 1999 à janvier 2001). Généralement, il s'agit d'eau d'infiltration et d'accumulation qui circule à la base des remblais, dans les passes plus perméables de la moraine, sur le toit de la molasse et dans les parties altérées de la molasse. Dans la molasse, nous avons à faire à une nappe fissurale. Les pressions mesurées dans cette formation sont nettement inférieures à celles mesurées dans les couches de couverture. Elles sont de l'ordre de 2 m par rapport au niveau de référence du profil en long. Pour cette raison, il a été pris l'option de drainer tous les ouvrages, même ceux se situant entièrement en molasse.

Les essais de pompage réalisés ont montré que l'on est en présence de sols de faibles perméabilités de l'ordre de grandeur de $k=0.8 \cdot 10^{-6}$ à $1.0 \cdot 10^{-6}$. Ainsi les débits attendus devraient rester peu importants.

3. Contraintes dues au site urbain

Les principales contraintes d'exécution et critères de conception et de dimensionnement liés au site urbain sont les suivants:

a) Présence de conduites industrielles

D'importants travaux de déviation ont été nécessaires pour tous les ouvrages réalisés à ciel ouvert. P.ex. pour réalisation de la tranchée du Tribunal plus de 4500 m de conduites (électricité, TT, téléseu), 150 m de conduite de chauffage à distance et 50 m de collecteurs ont du être déviés.

b) Proximité de mitoyens

La présence de constructions existantes à proximité des ouvrages à réaliser entraînent des charges supplémentaires sur les soutènements des fouilles et tunnels et nécessitent des mesures pour limiter les tassements, afin d'éviter leur endommagement.

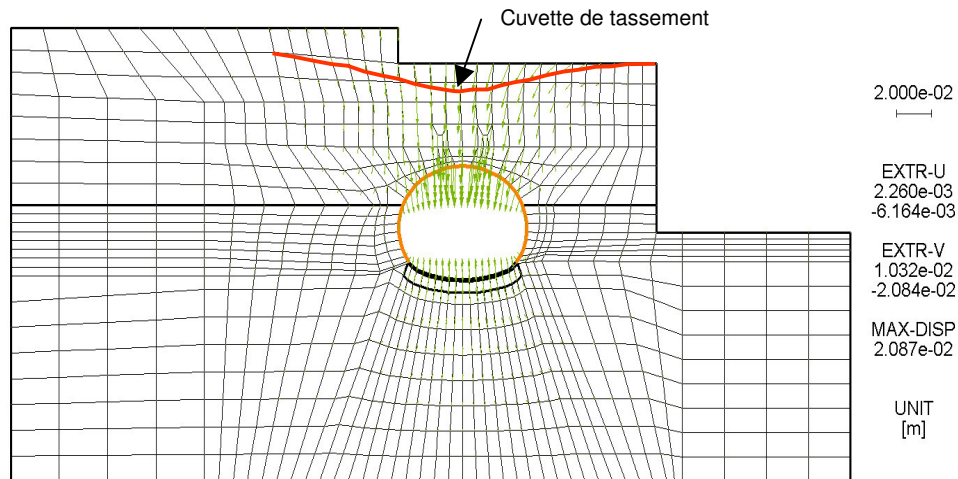


Figure 1: Calcul de la cuvette de tassement engendrée par l'excavation des tunnels

Il a bien entendu fallu en tenir compte dans le dimensionnement. Pour cette raison les méthodes de calcul par éléments finis ont été privilégiés. Ces méthodes permettent :

- La prise en compte des surcharges engendrées par les mitoyens
- l'appréciation des tassements prévisibles
- la modélisation des étapes de travaux et de l'apparition des charges successives sur les soutènements et revêtements.

c) Limitation des nuisances pour les riverains (bruit, vibrations, poussière, accès)

Tous les travaux doivent se faire sous de nombreuses contraintes dues au voisinage tel que :

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

Pendant les travaux il faut en permanence assurer la sécurité des usagers véhicules et piétons en mettant en place des protections et une signalisation différente à chaque phase. Les mesures ainsi prises pour tenir compte de ces contraintes ont nécessité un phasage des travaux très complexe pour la zone Tribunal Fédéral et place de l'Ours.

Pour le lot 1500 la contrainte principale est créée par la proximité de l'hôpital Cantonal (CHUV), qui implique des restrictions au niveau du bruit mais surtout de la poussière afin d'éviter des complications pulmonaires pour les malades venant se faire soigner au CHUV ainsi que des vibrations en raison de la proximité de laboratoires d'essais

4. Méthodes d'exécution des ouvrages réalisés en souterrain

4.1 Station Ours

4.1.1. Parties exécutées en souterrain

Il s'agit de deux amorces exécutées en souterrain de part et d'autre du puits central exécutée à ciel ouvert. 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 par rapport aux fondations. Côté Nord, vers le tunnel de Bugnon, l'amorce a une longueur à l'axe de 11.00 m environ.

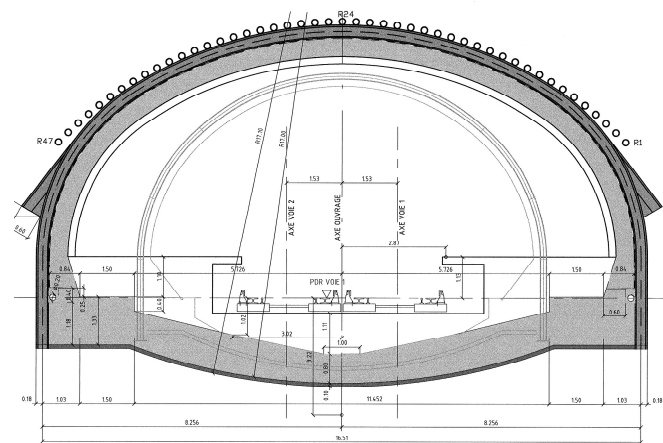
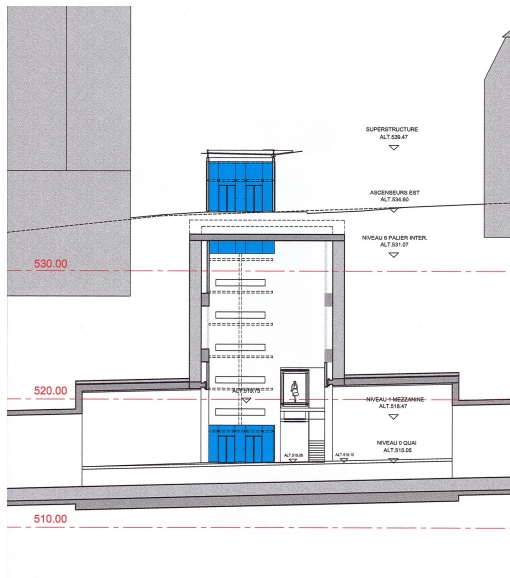


Figure 2: profil en long station Ours

Figure 3 : profil normal des amorces

La géométrie du profil normal est quasi-elliptique en voûte avec un demi-axe horizontal de 7.00 m et un demi-axe vertical de 5.12 m. En voûte l'anneau porteur de l'ouvrage en service est constitué en totalité par 28 cm de béton projeté et 50 cm de béton armé coffré en voûte. Un radier contre voûte en béton armé de 80 cm, avec un rayon de 18.50 m, permet de reprendre les pressions de gonflement de la molasse. L'étanchéité de l'ouvrage sera constituée par une feuille de polyéthylène en voûte et en piedsroits, protégée par un feutre à l'extrados et à l'intrados. Les eaux d'infiltration seront recueillies par un drain collecteur disposé de chaque côté en piedsroits, à l'extrados du revêtement. Les eaux seront évacuées gravitairement vers le collecteur principal.

La section excavée de 140 m² environ a une hauteur maximale de 10.45 m pour 17.00 m de largeur. Les amorces seront réalisées à l'abri d'une voûte parapluie constituée de 40 tubes ROR 177 x 12.5 mm disposés en calotte. L'excavation des amorces sera réalisée en section divisée (Figure 4) :

- Réalisation de deux galeries de parement, de section ogivale, excavées par étapes de 1.0 m à l'abri d'un soutènement provisoire.
- Excavation de la partie centrale de la calotte et mise en place du complément du soutènement de la calotte.
- Excavation de la partie centrale du stross en laissant deux bermes latérales
- Excavation des pieds droits par étape et bétonnage des fondation et des naissances de la voûte.
- Excavation et bétonnage de la partie centrale du radier
- Bétonnage voûte

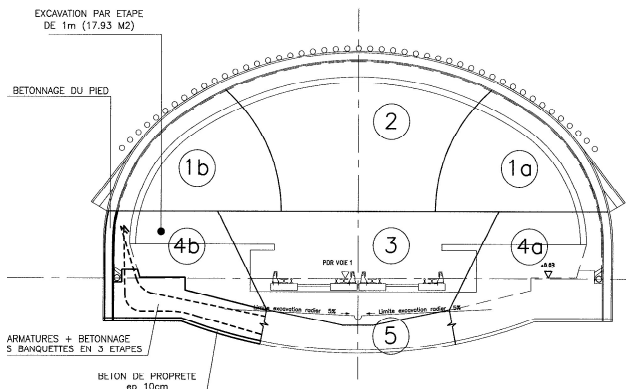


Figure 4: Etapes d'excavation amorces station Ours

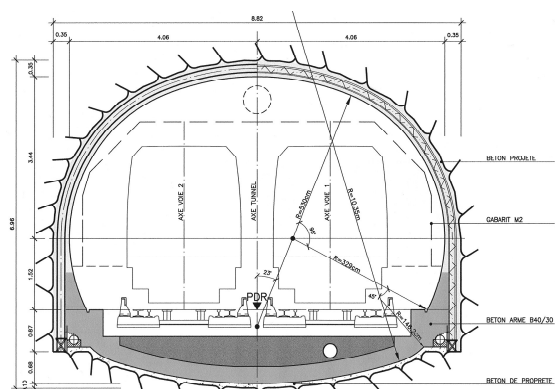


Figure 5 : Profil normal tunnels

4.2 Tunnels

4.2.1. Profil normal des tunnels

Le nombre de profils normaux pour les tunnels est de 6. Ils diffèrent entre eux par les gabarits d'espace libre, qui varient en fonction du rayon horizontal de la voie ($R = 90 \text{ m}$, 200 m et l'alignement) et des surlargeurs nécessaires dans les courbes, de la vitesse du véhicule (devers) et de l'entraxe variable des voies (3.0 , 3.12 et 3.16m).

Le revêtement de la voûte est constitué par une coque unique en béton projeté B 40/30 fibré, à l'exception de la couche de finition non fibrée. Son épaisseur minimale est de 35 cm . La voûte a été dimensionnée en tant que coque non armée. En absence d'indications contenues dans la norme sia pour le dimensionnement de béton non armé, la vérification de la section a été réalisé avec une méthode recommandée par l'AFTES. Il est à noter que l'épaisseur minimale du béton projeté provient du cas de charge gonflement.

Le radier est en béton armé B 40/30. Son épaisseur est également de 35 cm . Il est dimensionné pour reprendre les pressions de gonflement. Le modèle de calcul appliqué pour le radier est une structure en barres courbes sur sol élastique. Le sol est représenté par des ressorts de rigidité K_s . Le programme utilisé élimine automatiquement les ressorts tendus du sol. Il tient compte du fluage et de la fissuration des sections pour le calcul des déformations.

Le modèle est chargé par le poids propre de la structure, le béton de remplissage et différentes pressions de gonflement. La courbe caractéristique du radier est ainsi déterminée en reportant les déformations obtenues au centre du radier en fonction des pressions appliquées. Le point d'intersection de cette courbe avec la courbe caractéristique de gonflement issue des essais de laboratoire donne la pression à prendre en compte pour le dimensionnement (Figure 6). Pour tenir compte du gonflement qui se produit entre le moment de l'excavation et celui du bétonnage du radier, la courbe pression-déformation du radier est décalée d'une valeur initiale du gonflement.

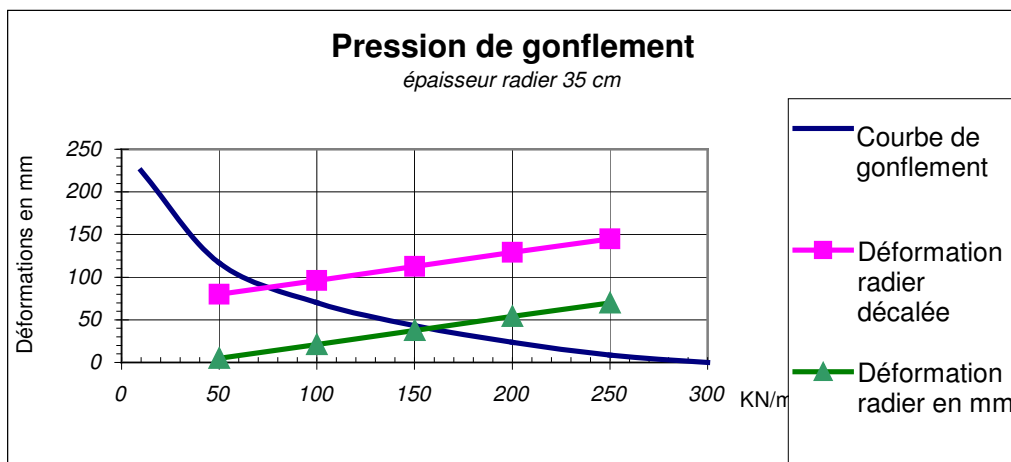


Figure 6 : Détermination de la pression de gonflement sur le radier

Le radier porteur est surmonté d'un béton de remplissage afin de restituer une surface plane pour la pose de la voie.

La voûte du tunnel n'est pas étanchée mais néanmoins systématiquement drainée par une couche drainante de type Delta MS-20 mm, disposée par bandes de 50 cm espacée tous les 2 m. Les bandes sont posées dans les creux des voûtelettes du soutènement primaire. Elles sont reliées aux drains latéraux (tuyaux perforés HDDE DN 200). L'enrobage des drains est composé de gravier rond lavé 16/32. Une bande horizontale de 1,0 m de largeur recouvre l'enrobage des drains sur toute leur longueur. Compte tenu des très faibles venues d'eau attendues, ces mesures devraient suffire pour garantir la classe d'étanchéité 3 exigée. Cas échéant les venues d'eau résiduelles seront déviées latéralement par des écrans fixés aux parements. L'espace nécessaire pour ces écrans est inclus dans le gabarit constructif.

Le radier est coulé directement sur le béton de propreté. Il n'est donc pas drainé et devra supporter une certaine pression d'eau.

4.2.2. Excavation et soutènement

Pour les sections courantes des tunnels, l'excavation se fait à la haveuse, en pleine section. Cette méthode d'abattage s'impose pour des questions d'ébranlements et de gêne des habitants. Elle permet en plus de réduire la dislocation du rocher ce qui se traduit favorablement sur la stabilité des excavations et la tendance au délitage de la molasse.

L'importance du soutènement varie selon la géologie, la couverture rocheuse et la proximité d'immeubles. Deux profils types sont prévus (Figures 7 et 8).

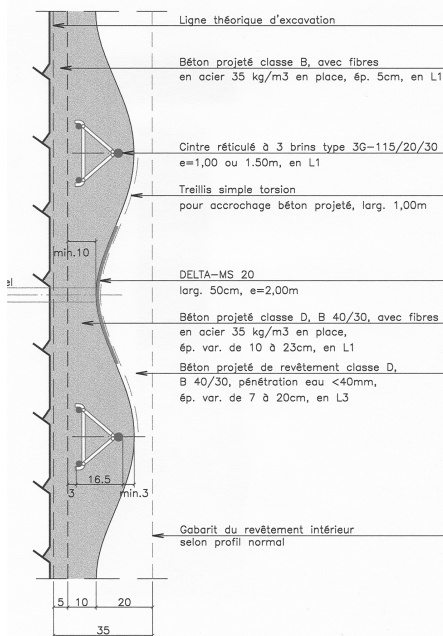


Figure 7 : Détail soutènement profil 3

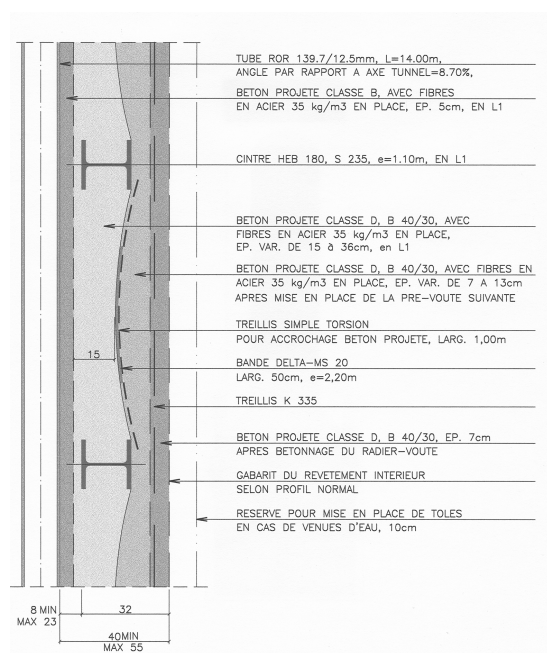


Figure 8 : Détail soutènement profil 5

En classe II la longueur de la passe d'avancement est limitée à 4.5 m au maximum. Les cintres sont posée en série de 3. Ce profil type est prévu pour les tronçons se trouvant en molasse essentiellement gréseuse avec couverture rocheuse supérieure à 8 m, sans immeubles à proximité.

En classe III la longueur d'abattage est limitée à 3.0 m, voir 1.5 à proximité de bâtiments. Ce profil est prévu pour les tronçons avec couverture rocheuse réduite (<4 m), les tronçons avec molasse à prédominance marneuse et des tronçons avec proximité de bâtiments.

Le profil type 5 est accompagné systématiquement d'une voûte parapluie. La longueur utile d'une étape de prévoûte est de 10.6 m pour des tubes de 14 m de long. Le rayon de la calotte est bien entendu croissant du premier au dernier cintre d'une étape, afin de permettre le forage de l'étape suivante. Le radier cependant garde une portée constante sur toute la longueur de l'étape ce qui permet une transmission correcte des efforts de gonflement à la voûte et facilite la pose du drainage des piédroits.

Ce profil type est prévu dans les tronçons où la calotte se trouve partiellement en moraine ou la couverture rocheuse est inférieure à 1m. Grâce à la mise en place des prévoûtes, associée éventuellement à un clouage de front, il est possible d'excaver ces tronçons en pleine section également.

Dans tous les profils la couche de béton projeté de finition est mise en place en L3

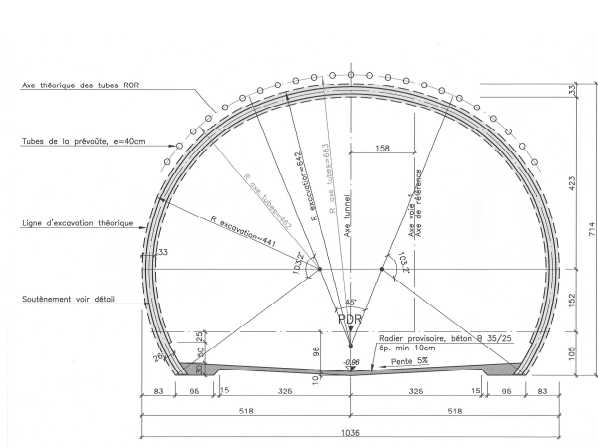


Figure 9: Profil type 5

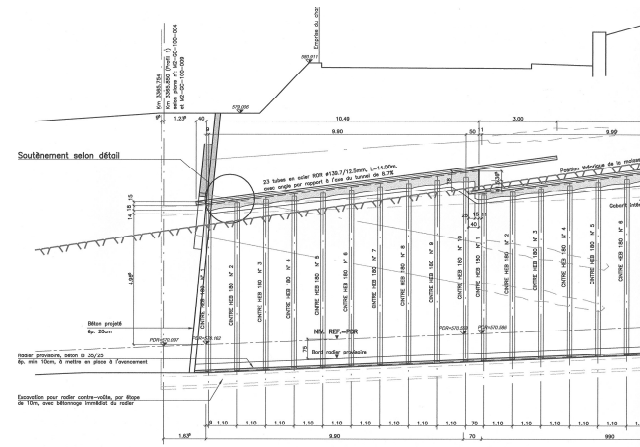


Figure 10: Coupe longitudinale voûte parapluie

5. Travaux souterrains effectués

5.1.1. Tunnel Perdonnet

Le tunnel Perdonnet a une longueur de 63 m. Il est situé entre la tranchée couverte du Tribunal au Sud et la station de l'OURS au Nord. Le profil en long est montant à 5% vers la station. L'attaque du tunnel a été réalisée à partir de la tranchée couverte du Tribunal.

L'ouvrage est situé en quasi-totalité sous des bâtiments, notamment celui de la Poste du Passage de Perdonnet. La couverture de terrain de la clé de l'ouvrage au sous-sol des bâtiments est de l'ordre de 9.00 m. De plus selon les reconnaissances géotechniques disponibles, le sommet de la calotte est très proche de l'interface moraine/molasse. Compte tenu de ces deux contraintes un profil-type de soutènement lourd a été prévu (profil type 5 avec voûtes parapluie).

Concernant la réalisation des voûtes parapluies, le faible rayon horizontal ($R=90$ m) de la géométrie nécessite l'adaptation de l'axe du forage des voûtes parapluies sur la demi section situé côté extérieur du virage et la limitation de la longueur de la glissière à maximum 15m.

Actuellement les deux premières étapes de prévoûtes ont été réalisées. Le forage de la troisième est en cours.

5.1.2. Tunnel des Falaises

Le tunnel des Falaises d'une longueur de 507 m fait suite à la station CHUV. Il est à très faible profondeur, la couverture sur calotte variant de 5 à 10 m. Mise à part le départ au portail CHUV, le profil se situe entièrement en molasse à prédominance gréseuse, soit dans des conditions géotechniques favorables.

Son tracé suit de plus ou moins près l'avenue de la Sallaz. Mis à part le passage à proximité de l'hôpital Nestlé (distance à l'axe env. 15 m) et le passage à 6 m sous le n° 6 de l'avenue de la Sallaz, qui abrite un restaurant dans un bâtiment à un seul étage sans sous-sol, il ne présente pas de problèmes d'interférences avec des bâtiments existants.

Au portail CHUV le profil s'est trouvé comme prévu en terrain mixte, molasse gréseuse en stross et moraine en calotte, ce qui a nécessité la mise en place du profil type 5 et de 3 étapes de voûtes parapluies, soit une de plus que prévue initialement.

Par la suite le tunnel s'est enfoncé dans la molasse gréseuse de bonne tenue avec de temps en temps des couches marneuses plus tendres mais généralement d'épaisseur réduite. Le passage à proximité ou sous des bâtiments s'est fait sans problèmes techniques particuliers. Des tassements en surface de 10 mm ont été mesurés pour les points situés à l'aplomb de la clé de voûte, ce qui correspond à la fourchette supérieure des prévisions. Les points situés à 10 m de l'axe du tunnel ont enregistré des tassement

inférieurs à 2 mm. Pour le passage à 6 m sous le restaurant des restrictions d'horaires ont dû être instaurées en fonction des heures de repas de ce dernier.

Le front est actuellement au TM 250, ce qui correspond au 50% du linéaire à réaliser.

Des forages de reconnaissance systématiques sont prévus à l'avancement entre le TM 300 et 400 où les campagnes de reconnaissances ont montré un infléchissement du niveau du toit de la molasse. Selon les forages complémentaires réalisés dernièrement, le profil du tunnel devrait rester entièrement en molasse, avec une couverture minimale de 3 m.



image 1 : Front tunnel des Falaises



Image 2 : Portail CHUV du tunnel des Falaises

6. Instrumentation

Compte tenu du cumul des difficultés d'ordre géologique et d'environnement posées à la réalisation des tunnels (site urbain, faible profondeur des tunnels et ouvrages partiellement en terrain meuble), une instrumentation conséquente a été mise en place pour le pilotage et le suivi des excavations.

Les instrumentation suivantes ont été mises en place pour le suivi du bâtis existant et des ouvrages du m2 réalisés.

- Inclinomètres verticaux (stabilité parois de fouilles) et horizontaux (suivi des déformations aux portails)
- Inclinomètres/micromètres verticaux
- Points de nivellement sur les bâtiments mitoyens
- Electronivelles à mesure continue afin de détecter en temps réel des tassements différentiels des bâtiments mitoyens.
- Mesures de convergences
- Jauges de contraintes sur le butons des fouilles
- Capteurs de vibrations.

Mise à part deux exceptions pour la fouille du CHUV, où les parois clouées ont du être renforcées avec des ancrages précontraints sur la base des résultats des mesures inclinométriques, les résultats enregistrés à ce jour montrent un comportement des ouvrages conforme aux prévisions des calculs.

Claude Risch
Emch+Berger AG Bern
Succursale de Lausanne
Case postale 5, 1000 Lausanne 8