Prolongement en souterrain de la ligne du LEB: travaux de génie civil

Autor(en): **Tappy, Olivier**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **121 (1995)**

Heft 1/2

PDF erstellt am: **30.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-78580

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Prolongement en souterrain de la ligne du LEB: travaux de génie civil

Par Olivier Tappy, ing. civil dipl. EPFL/SIA, Groupement d'ingénieurs, p.a. Piguet et Associés ingénieurs-conseils SA, Av. de l'Université 24, 1000 Lausanne 17

Le prolongement en souterrain de la ligne du chemin de fer Lausanne-Echallens-Bercher (LEB), de Chauderon jusqu'au Flon, a été proposé par la direction du LEB à l'Office fédéral des transports (OFT) dans le cadre du projet *Rail 2000*. En effet, en reliant le LEB à la future gare du Flon, commune aux lignes de métro Lausanne-Ouchy (LO), Lausanne-Gare (LG), Métro Ouest (TSOL), puis plus tard Métro Nord (prolongement des lignes LO et LG vers le Nord de la ville) et Métro Est (prolongement du TSOL vers l'Est lausannois), et, par l'intermédiaire des métros LO et LG, à la gare CFF, le projet correspond aux objectifs de *Rail 2000* visant à améliorer les prestations des transports publics et à faciliter les transbordements entre les divers réseaux, notamment avec celui des CFF.

En octobre 1989, le Conseil fédéral a octroyé au LEB la nouvelle concession, et le projet de mise à l'enquête préparé par Gilbert Décoppet, ingénieur, a été déposé le mois suivant.

Ne pouvant attendre les décisions politiques et administratives concernant le plan partiel d'affectation de la vallée du Flon, dont dépend la future gare commune, le projet a été scindé en deux étapes:

1re étape: avenue d'Echallens gare de Chauderon

2e étape: gare de Chauderon-gare du Flon (fig. 1).

Entre-temps, la mise en site réservé de la ligne du LEB sur l'avenue d'Echallens a été réalisée jusqu'au droit de la rue de Strasbourg lors des travaux de réfection et d'élargissement de cette avenue, opération achevée à fin 1991.

De ce point, le nouveau tracé s'écarte de la voie actuelle pour s'enfoncer dans le terrain par une pente de 60‰, tout d'abord dans une trémie, puis dans une tranchée couverte et, enfin, dans un tunnel à simple voie, pour atteindre la nouvelle gare souterraine de Chauderon implantée au cœur de la place du même nom. La gare sera reliée à la surface par des escaliers mécaniques et par un passage inférieur pour piétons déjà existant. Cette première étape a une longueur de 710 m, dont 510 m réalisés en souterrain (fig. 2).

Rappelons que la place Chauderon est également traversée en souterrain dans le sens est-ouest par un passage routier avec des trémies d'accès sur la place et à l'avenue de Morges. Une bifurcation débouchant sur l'avenue d'Echallens, en attente depuis les années 60, sera réalisée par le LEB pour le compte de la Ville de Lausanne à la suite des travaux actuels. Cette trémie sera située à une dizaine de mètres au-dessus du tunnel LEB.

La deuxième étape comprendra un tunnel à double voie depuis la gare de Chauderon jusqu'au Flon ainsi que les dispositions nécessaires au prolongement prévu des lignes LO et LG en direction du nord de la ville. La longueur de la deuxième étape sera de 445 m.

Sur toute la longueur du prolongement correspondant aux deux étapes, le site est fortement urbanisé et se trouve sous le domaine public, à faible profondeur.

Géométrie ferroviaire

Les caractéristiques de géométrie ferroviaire ont été déterminées pour une vitesse de référence de 60 km/h, avec un rayon minimal de 180 m pour le tracé en plan et une pente maximale de 60‰ pour le profil en long, conformément aux normes et directives en vigueur. La gare de Chauderon aura deux voies séparées par un quai central d'une longueur de 105 m avec des pentes longitudinale de 4‰ et transversale de 5‰. La largeur maximale du quai est de 10,20 m au droit des escaliers mécaniques et la distance minimale entre le bord du quai et un équipement fixe ou une construction est de 2,60 m. La hauteur du quai sur le plan des rails est de 55 cm.

Géologie

Le substratum rocheux sur lequel est fondée Lausanne est constitué de molasse de l'aquitanien, formée pendant la période de miocène, il y a 30 millions d'années environ. Cette molasse d'eau douce inférieure a été modelée par l'érosion glaciaire et recouverte de moraines déposées par le glacier du Rhône. La molasse aquitanienne est caractérisée par une structure lenticulaire due à son principe de formation (dépôts d'origine fluviale) et par une grande variété lithologique: bancs de grès, grès

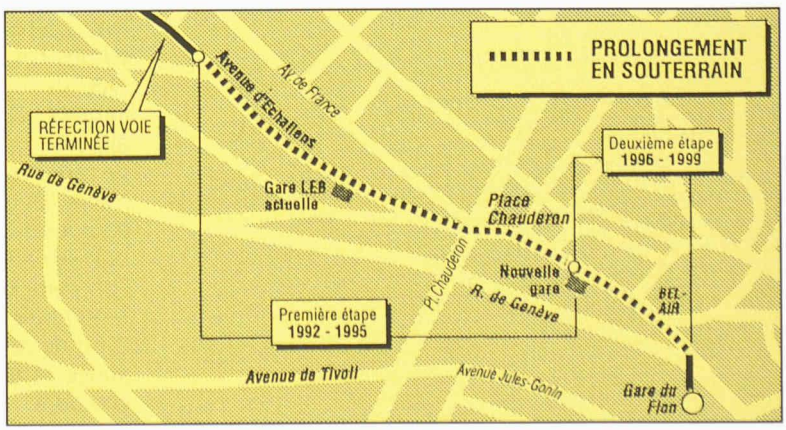


Fig. 1. – Prolongement de la ligne du LEB: plan de situation

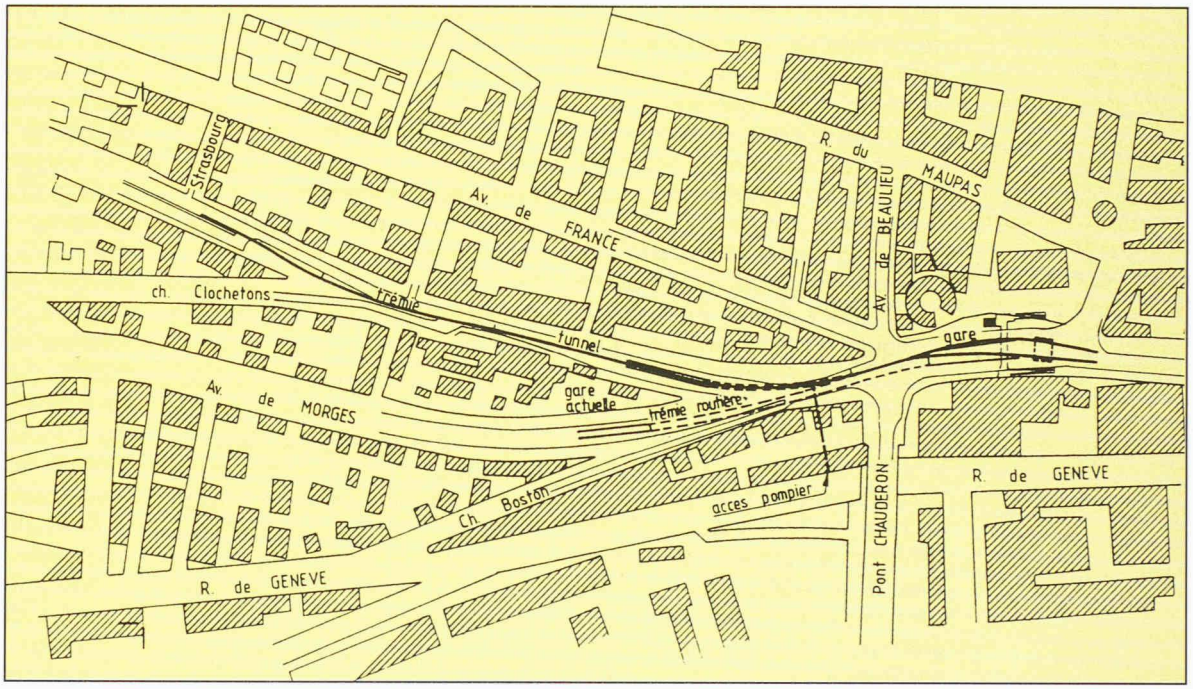


Fig. 2. – Première étape des travaux de prolongement de la ligne du LEB: ouvrages de génie civil

marneux, marnes gréseuses et marnes se succédant en alternance irrégulière. Les moraines, d'une épaisseur variant de 2 à 14 mètres, sont caractérisées par une granulométrie étendue à dominante limoneuse et sableuse. Leur compacité est élevée en raison de la consolidation – voire même de la surconsolidation provoquée par le glacier. Des alluvions lacustres sablo-limoneuses intercalées dans les moraines peuvent être présentes, mais leur extension reste faible (fig. 3).

Les reconnaissances géologiques et géotechniques ont été réalisées en deux phases. La première, entreprise pendant l'avant-projet, a comporté les éléments suivants:

- une recherche de documents existants
- 17 sondages carottés verticaux répartis le long du tracé, d'une longueur totale de 336 m
- des mesures de niveaux piézométriques (6 tubes)
- des essais *in situ:* SPT *(Standard Penetration Test),* essais pressiométriques, perméabilité selon Lugeon et selon Lefranc, compression ponctuelle
- des essais en laboratoire sur 40 échantillons de sols et de molasse (compression simple, cisaillement direct, essai brésilien, abrasion, gonflement, altérabilité, teneur en eau, granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en matières organiques, composition minéralogique).

La deuxième phase de reconnaissance a eu lieu lors de la

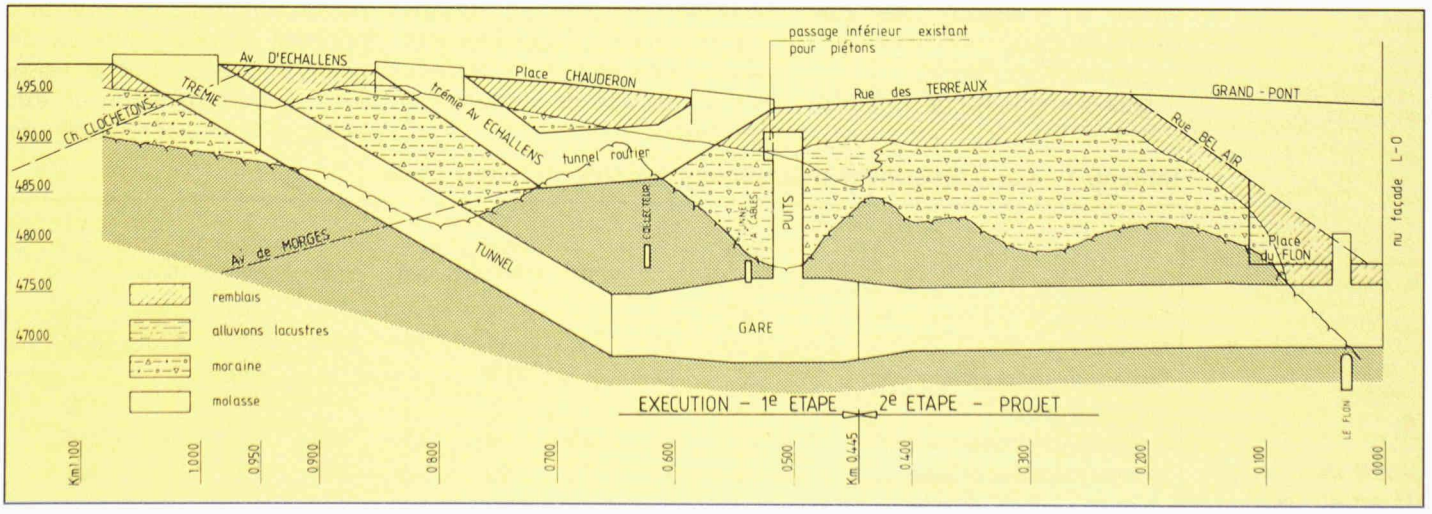


Fig. 3. – Prolongement de la ligne du LEB: profil en long géologique

mise en place des équipements de mesure des déplacements et déformations à proximité immédiate du futur ouvrage. Cette deuxième phase a comporté:

- 8 sondages carottés verticaux ou légèrement inclinés, d'une longueur totale de 182 m, dont la moitié en molasse
- des essais *in situ* et des essais d'identification et mécaniques en laboratoire comme dans la première phase.

Le pendage de la molasse est sub-horizontal. La formation de la vallée du Flon a permis une décompression latérale, ayant entraîné la formation de failles verticales à sub-verticales parallèles à la vallée. Ces fractures sont ouvertes dans les bancs gréseux, mais n'apparaissent pas dans les niveaux marneux. Il n'y a pas de nappe phréatique sur le site. Les quelques circulations d'eau rencontrées dans les fissures tarissent très rapidement.

Le tableau 1 indique les valeurs moyennes retenues, établies sur la base des sondages, des résultats des essais *in situ* et de ceux effectués en laboratoire, et tenant également compte de l'expérience de ces types de terrains, acquise par les concepteurs.

Ouvrages de génie civil

La première étape du prolongement de la ligne du LEB comprend la réalisation des ouvrages suivants:

- puits de Chauderon
- gare souterraine de Chauderon
- travaux à ciel ouvert à l'avenue d'Echallens: trémie et tranchée couverte
- tunnel à simple voie
- ouvrages annexes.

Puits de Chauderon

Fonctions et caractéristiques principales

En phase d'exploitation, le puits de Chauderon aura une double fonction:

- relier le quai de la gare souterraine au passage inférieur pour piétons déjà existant;
- fournir le volume nécessaire pour les locaux d'exploitation de la future gare (installations de sécurité, ventilation, chauffage, batteries, groupe électrogène de secours, etc.).

Pendant les travaux, le puits remplit une fonction complémentaire qui est de permettre la réalisation en souterrain de la gare proprement dite.

Le puits est composé de deux volumes:

- corps principal: 19,50 × 14,70 m, profondeur 25 m;
- liaison avec le passage pour piétons: largeur 13,80 m, longueur 21 m, hauteur 3,50 m.

Son implantation résulte de la prise en compte de diverses contraintes, dont l'utilisation du passage inférieur pour piétons comme accès et sortie de la nouvelle gare, le maintien de la circulation routière en surface avec déviations acceptables lors de toutes les phases des travaux et la disposition de l'installation de chantier.

Réalisation

Etant donné la place disponible et les exigences liées au trafic public et privé, il n'était pas envisageable de réaliser le puits de façon traditionnelle. En effet, dans chaque phase de travail, il fallait conserver une voie bus et une voie trafic privé dans chaque sens de circulation (sortie de ville – entrée de ville) ainsi que la circulation bi-directionnelle dans la trémie routière en direction de l'avenue de Morges.

Au vu de ces contraintes, les travaux se sont déroulés dans l'ordre suivant (fig. 4).

- Réalisation de la première moitié de l'ouvrage, côté nord, de la dalle de couverture (bétonnée sur terre) et des travaux spéciaux pour l'enceinte du puits, la circulation dans la trémie étant déviée côté sud.
- Réalisation de la deuxième moitié, côté sud, de la dalle de couverture et des travaux spéciaux pour fermer l'enceinte du puits, la circulation dans la trémie étant déviée côté nord sur la dalle de couverture construite lors de la première étape.
- Réalisation de l'enceinte de chantier avec circulation de part et d'autre d'un trou de 9 x 9 m conservé dans la dalle de couverture.

Les travaux spéciaux ont consisté en la réalisation des pieux des parois berlinoises pour le puits principal et des panneaux des parois moulées pour la liaison avec le passage inférieur existant. Les caractéristiques des

Tableau 1 – Caractéristiques mécaniques des sols au temps t = ∞

Sols	γ *kN/m³*	ϕ °	*C' kN/m²*			*E MN/m²*			ν
			min	*moyenne*	*max*	*min*	*moyenne*	*max*	
Remblais	19,5	25		0			10		0,33
Moraine	22,5	38	8	15	25	50	80	120	0,28
Moraine traitée par *jet-grouting*	23	32		200			570		
Molasse remaniée	23	22		0			50		0,32
Molasse à dominante marneuse	24	25	25	40	65	100	200	300	0,35
Molasse à dominante gréseuse	25	32	70	90	115	500	800	1050	0,3

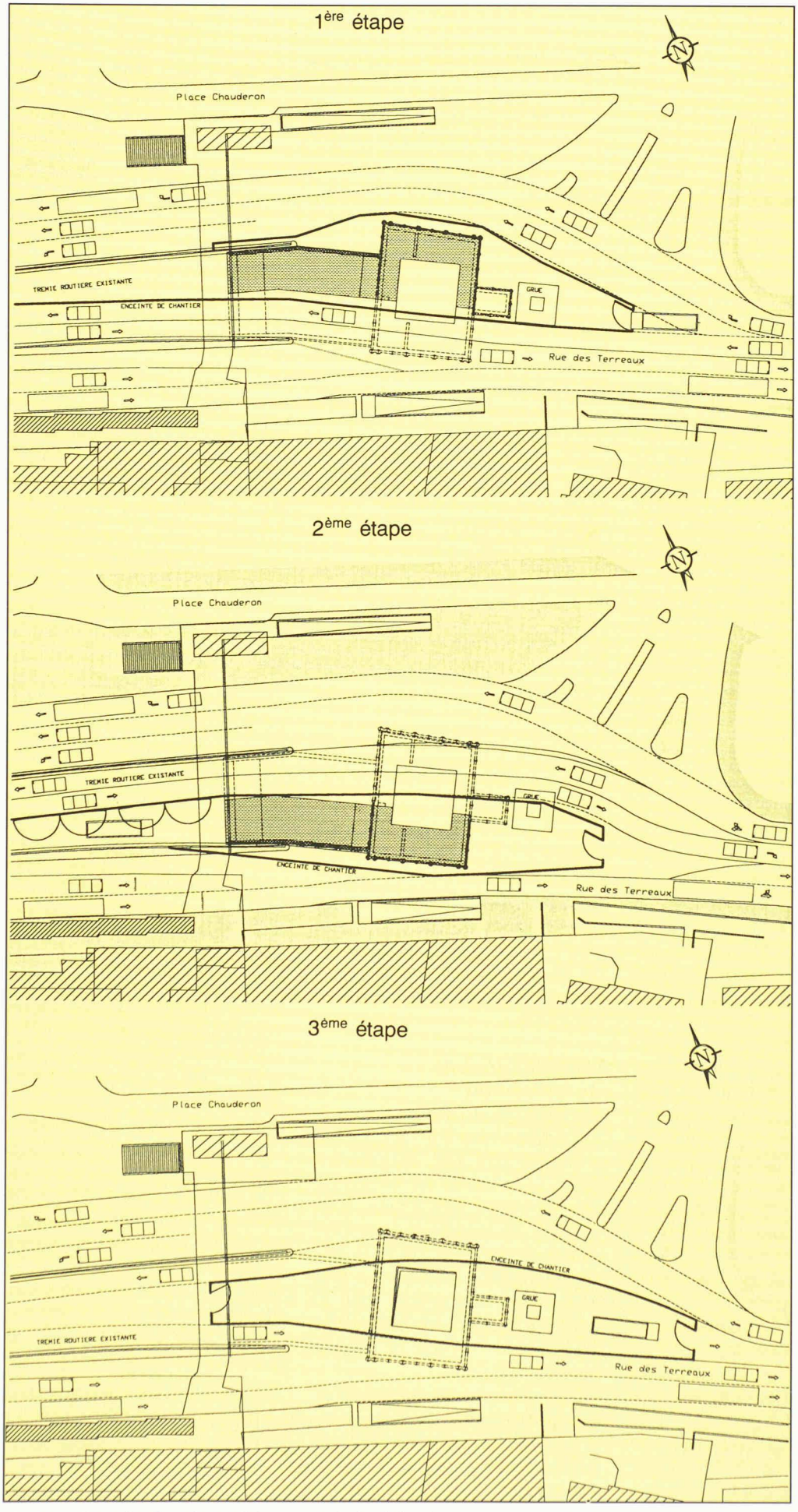


Fig. 4. – Gare de Chauderon: bétonnage de la dalle de couverture et de l'enceinte du puits en trois étapes

pieux (profilés HEB 340 et 450 en acier Fe E 235) des parois berlinoises sont données dans le tableau 2.

Les pieux situés aux quatre angles du puits ainsi qu'un pieu sur deux des parois nord et sud sont des profilés HEB 450. Ils pénètrent jusque sous le niveau du radier de la gare pour transmettre les charges verticales, alors que les autres pieux (profilés HEB 340) s'arrêtent sur le toit de la molasse. Les parois moulées, d'une épaisseur de 60 cm, ont permis d'encastrer la dalle de couverture. La profondeur des panneaux a été calculée de façon à mobiliser une butée suffisante lors des travaux de terrassement du radier. 192,7 m² de paroi ont été réalisés dans l'étape nord et 184,0 m² dans l'étape sud.

La dalle de couverture du puits est encastrée dans un sommier de 1,20 m de haut s'appuyant sur les profilés des parois berlinoises. L'épaisseur de cette dalle augmente de 55 cm sur les bords à 62 cm au centre, afin de permettre l'écoulement des eaux d'infiltration. La même variation d'épaisseur caractérise la dalle de couverture de la liaison avec le passage inférieur qui est encastrée directement dans les parois moulées. Pour limiter les déformations, cette dalle est précontrainte par 15 câbles de 19 torons de 100 mm² (P_0 = 2421 kN). Un ancrage fixe a été bétonné lors de la première étape, alors que l'ancrage mobile a permis la mise en tension des câbles après le bétonnage de la deuxième étape. Le béton exigé était un béton B 40/30 d'un rapport eau/ciment inférieur à 0,5.

L'étanchéité de la dalle de couverture est assurée par un système en deux couches auto-étanchéifiant à base de feuille de polyéthylène enduite de bentonite de sodium de la marque *Masterseal Dual*, de la société *Meynadier*. Cette étanchéité, posée

Tableau 2 – Caractéristiques des pieux des parois berlinoises du puits

	Etape nord			*Etape sud*			*Total général*
	HEB 450	HEB 340	Total	HEB 450	HEB 340	Total	
Nombre	6	22	28	6	8	14	42
Longueur (m)	26,15	11,9-15,3	-	25,75	14,00-16,75	-	-
Longueur totale (m)	157,1	303,8	460,9	154,5	123,4	277,9	738,8

deux jours après le bétonnage, présente le grand avantage de pouvoir être mise en place bien avant une étanchéité collée classique, qui n'aurait pu être appliquée avant que le béton n'ait fait sa cure.

Le terrassement sous la dalle de couverture a été réalisé en taupe à l'aide d'engins de terrassement classiques, l'évacuation des matériaux d'excavation est assurée par une grue équipée d'une benne de 4,5 m^3.

Les panneaux entre les pieux des parois berlinoises ont été réalisés par étapes de 1,60 m ou de 3,20 de hauteur, suivant la qualité du terrain. Ces panneaux, d'une épaisseur de 30 cm en terrain meuble et de 10 cm dans la molasse, sont constitués de béton projeté appliqué par voie humide et armés de treillis spéciaux faits sur mesure.

Le terrassement a été interrompu aux niveaux –1 et –2 pour permettre le bétonnage des dalles sur le terrain. Celles-ci sont appuyées sur des corbeaux métalliques soudés aux profilés des parois berlinoises. Un trou de 9 x 9 m^2 au centre des dalles est conservé pour permettre la suite du terrassement. Pour limiter les déformations des dalles au bord du trou, des tirants constitués par des barres *Swiss Gewi* de 50 mm de diamètre, reliés au sommier de la dalle de couverture, ont été mis en place (fig. 5).

Les dalles de la couverture et des niveaux –1 et –2 reprennent les poussées horizontales du terrain et assurent ainsi la stabilité générale de l'ouvrage.

Les profilés HEB 340 s'arrêtent sur le toit de la molasse et ont donc une longueur variable. Leur pied est ancré par deux boulons *Dywidag* de diamètre de 26,5 mm, précontraints à 20 tonnes.

Pour assurer la stabilité au flambage des profilés HEB 450, des ancrages du même type ont été mis en place dans la partie inférieure du puits sous la dalle du niveau –2.

Enfin, les parois est et ouest ont été interrompues au niveau de l'extrados de la future excavation de la cavité de la gare. Pour reprendre les charges verticales provenant des dalles supérieures et les transmettre dans les angles du puits, les murs voiles définitifs ont dû être bétonnés avant le début de l'excavation de la cavité, les parois berlinoises ne pouvant retransmettre ces efforts.

Gare souterraine de Chauderon

La gare souterraine de Chauderon est un ouvrage tout à fait particulier de par ses dimensions, sa forme et son implantation en site urbain, à faible profondeur. En courbe et de section variable, sa forme découle des contraintes du tracé – qui doit être situé entièrement sous le domaine public pour faciliter les procédures – et de la largeur nécessaire du quai.

Vu la proximité de la surface et la position du toit de la molasse, le volume d'excavation a été limité, notamment en hauteur, ce qui conduit à une caverne de forme ovoïde couchée, située presque entièrement dans la molasse, d'une longueur de 146 m et d'une largeur allant de 12,5 à 20,5 m, tandis que sa section varie de 73,4 à 200,5 m^2.

Réalisation: excavation et soutènement

Les conditions imposées par le site, la géologie, la grandeur et la forme variable continue de la section ont nécessité l'application de techniques particulières pour l'excavation et la mise en place du soutènement.

L'excavation est réalisée en section divisée avec mise en place, dans chaque section partielle et à une distance proche du front, du soutènement et du radier pour exploiter au mieux la résistance du massif en permettant une redistribution des efforts dans celui-ci. Ce travail par étapes de dimensions réduites permet de limiter la décompression des terrains et leurs déformations à des valeurs acceptables pour l'environnement construit.

L'excavation est effectuée à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle pesant pas moins de 100 tonnes (*Alpine Miner AM 100,* fig. 6), quant au radier, il est excavé à l'aide d'un marteau hydraulique de 2 t. Les travaux d'excavation, de mise en œuvre du soutènement et de bétonnage du radier ont été réalisés en quatre phases (fig. 7 et 8).

1) Réalisation des galeries latérales nord et sud:
   - excavation de la calotte et du stross par étapes de 3,6 à 7,2 m de longueur, mise en place du soutènement provisoire (treillis et béton projeté)

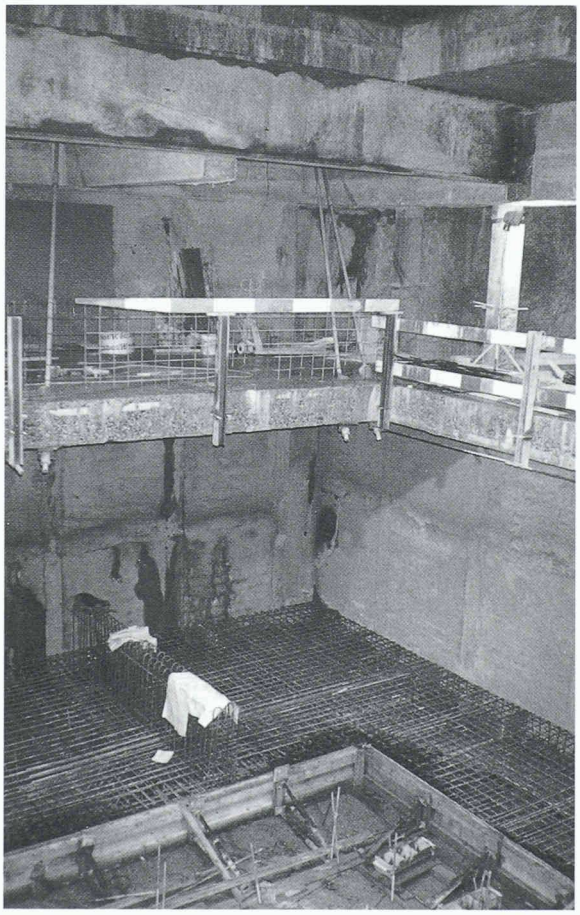


Fig. 5. – Puits de Chauderon: ferraillage de la dalle du niveau –2; on y distingue également les barres de suspension de la dalle du niveau –1.

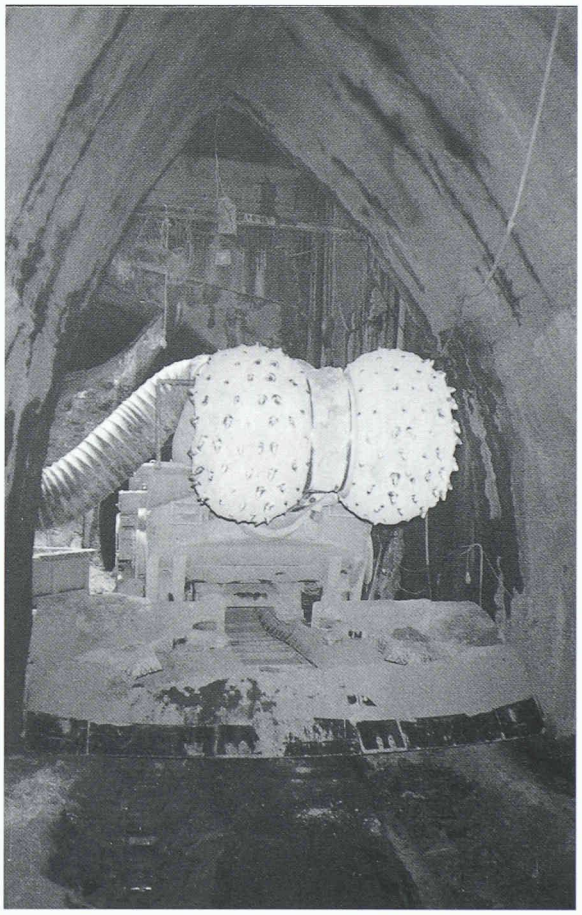


Fig. 6. – Haveuse Alpine Miner AM100 *prête à être engagée dans une des galeries latérales*

- excavation du radier par étapes correspondantes et bétonnage du radier
- mise en place de l'anneau extérieur définitif, cintres réticulés, treillis, armatures, béton projeté et voile provisoire.

Dans tous les cas, la fermeture de la section par l'anneau en béton projeté et le radier en béton a été réalisée à 7,20 m en arrière du front d'attaque.

2) Excavation de la calotte centrale par étapes de 1,8 à 3,6 m de longueur, suivant la portée et les conditions locales, et mise en place de l'anneau extérieur (cintres réticulés, treillis, béton projeté).
3) Excavation du noyau et du radier central par étapes de 3,6 m et bétonnage du radier.
4) Démolition des voiles provisoires.

Afin d'obtenir une rationalisation des travaux, que ce soit dans la définition de sections constantes d'excavation ou dans la géométrie des cintres réticulés et des treillis (nombre de pièces à stocker sur le site), la géométrie des galeries latérales nord et sud est identique et constante sur une longueur de 133 m pour la galerie nord, et de 115 m pour la galerie sud, la position de ces galeries par rapport à l'axe central de la gare définissant la forme et la section de la cavité. La variation continue de la géométrie de la section est alors obtenue par la forme (rayon) et la portée de la calotte et du radier centraux, qui diffèrent à chaque mètre.

L'assemblage des cintres en calotte a été conçu de façon à pouvoir absorber une différence de longueur de 80 cm et permettre ainsi l'utilisation du même cintre au minimum quatre fois (fig. 9). Il faut souligner ici la particularité de l'implantation des cintres. En effet, ceux mis en place dans les galeries latérales sont perpendiculaires à l'axe moyen de la cavité, mais non à l'axe des galeries latérales. En fait, ils sont implantés dans le plan moyen de la gare et non dans le plan moyen de la section partielle (fig. 10).

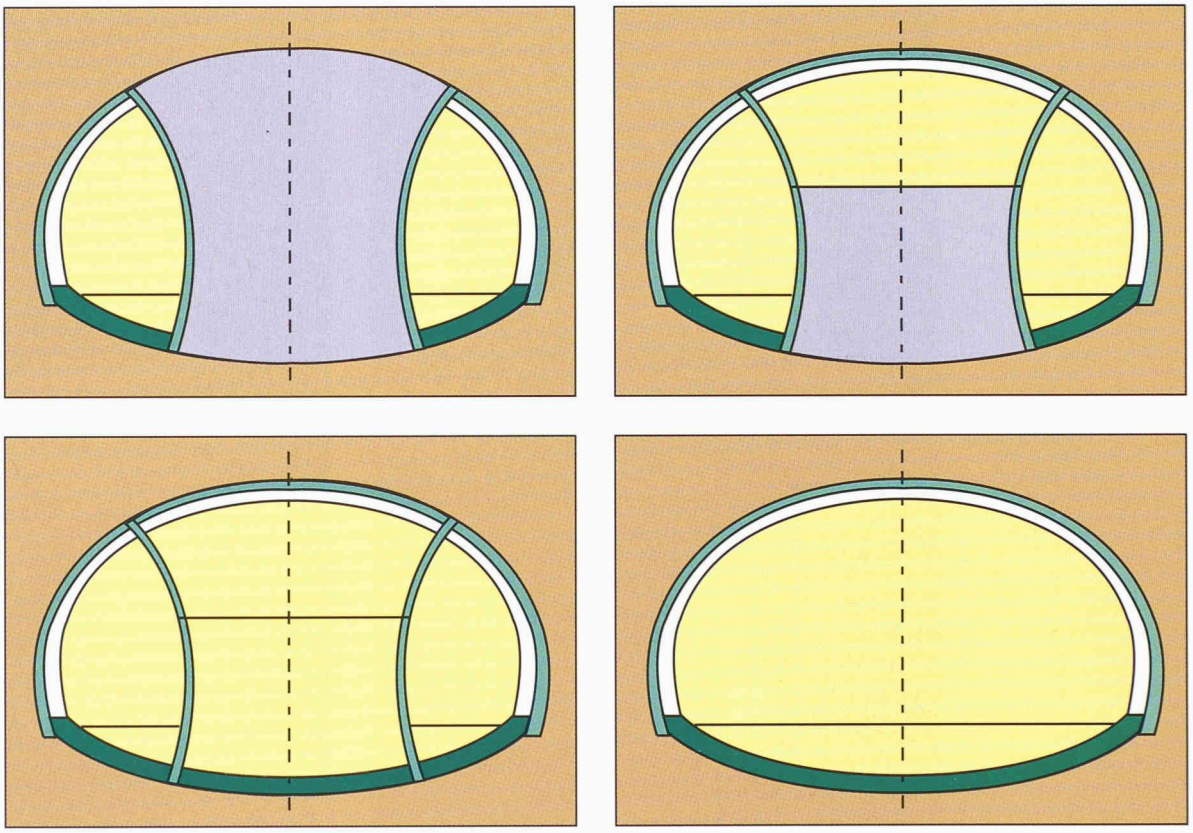


Fig. 7. – Gare de Chauderon: phases d'excavation et de soutènement

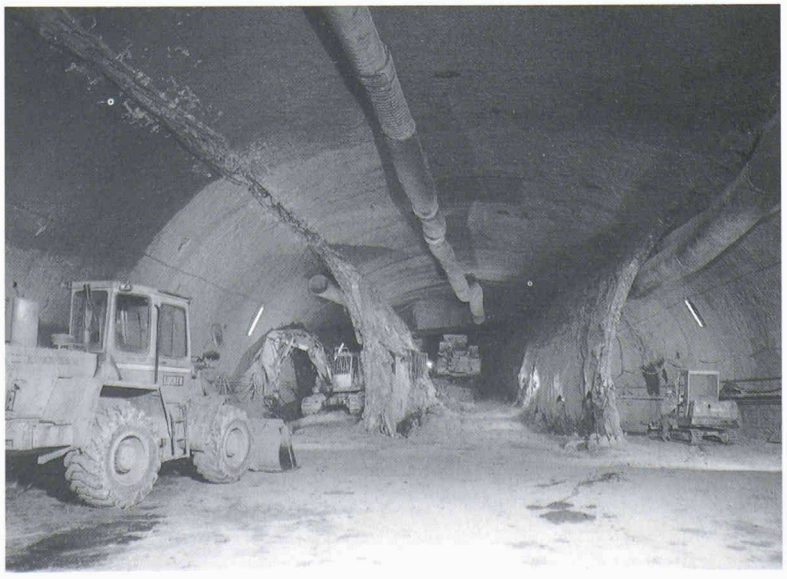


Fig. 8. – Gare de Chauderon: phase d'excavation et de soutènement

Les dimensions de l'anneau extérieur et des voiles provisoires sont données au tableau 3.

Au droit des voiles provisoires, la liaison entre les galeries latérales et la calotte centrale est renforcée par la mise en place de barres d'armatures *Swiss Gewi* espacées de 30 cm, la liaison étant assurée par un manchon. Cette armature est nécessaire pour couvrir la pointe des moments sur l'appui (fig. 11).

Sur un premier tronçon de 50 m (40 m vers l'est et 10 m vers l'ouest), l'excavation a été effectuée selon une variante d'entreprise motivée par le fait que la place nécessaire au fond du puits pour une excavation selon la méthode décrite plus haut était insuffisante par rapport aux dimensions des engins que le consortium souhaitait utiliser. On a donc réalisé tout d'abord la partie supérieure des galeries latérales et la calotte centrale avec le terrassement du puits arrêté à un niveau de 3,20 m au-

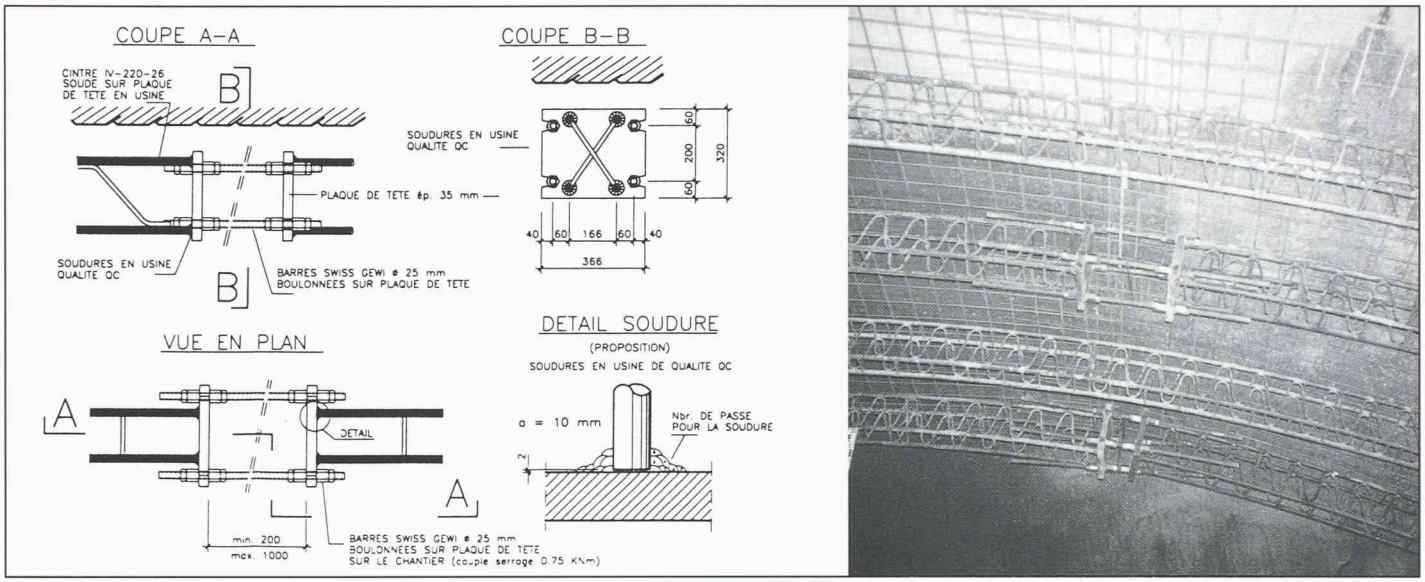


Fig. 9. – Gare de Chauderon: détail de l'assemblage des cintres en calotte

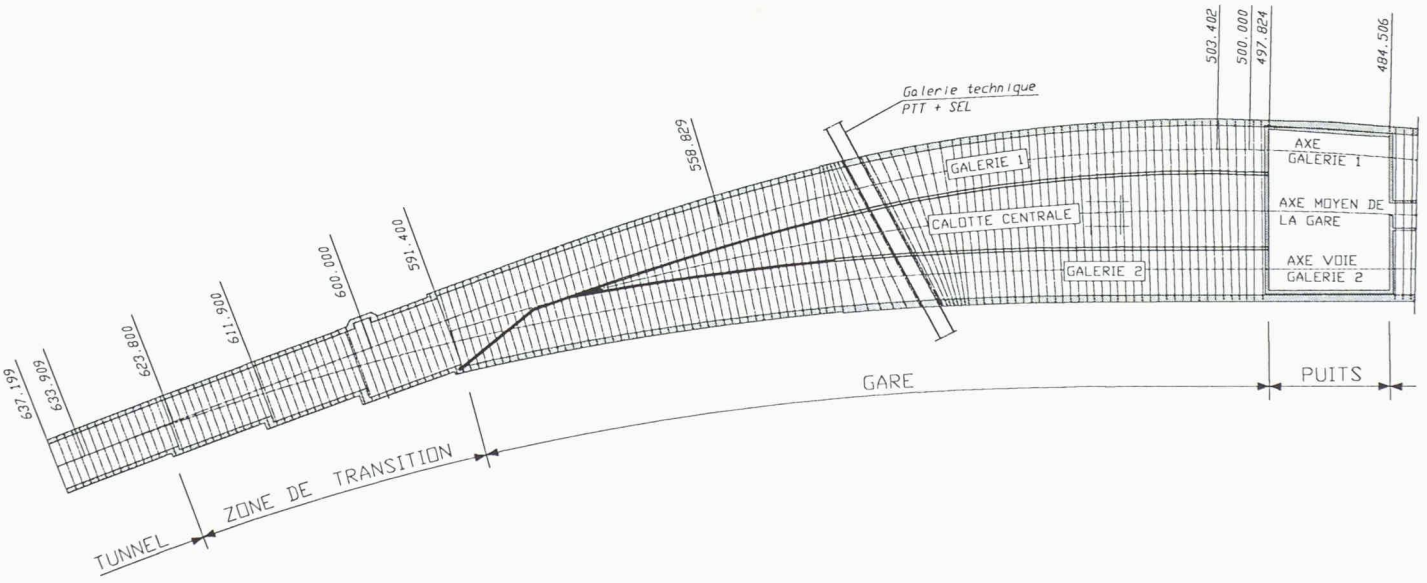


Fig. 10. – Gare de Chauderon: implantation des cintres

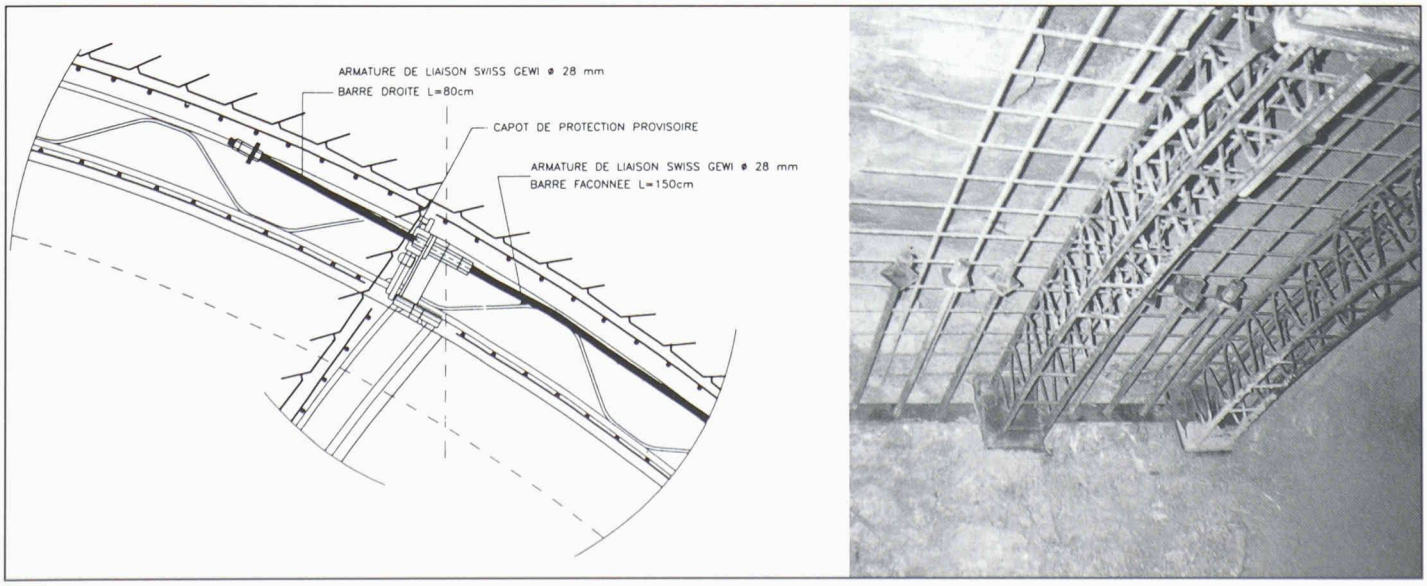


Fig. 11. – Gare de Chauderon: renforcement de la liaison entre galerie latérale et calotte à l'aide de barres Swiss Gewi

Tableau 3 – Dimensions de l'anneau extérieur et des voiles provisoires de la gare

	Section < 150 m²	*Section > 150 m²*
Anneau extérieur		
Epaisseur du béton projeté	35 cm	45 cm
Cintres réticulés	*Bernold IV-180-22*	*Bernold IV-220-26*
Espacement des cintres	90 cm	90 cm
Treillis minimal	Ø 8 mm, e = 15 cm	Ø 10 mm, e = 15 cm
maximal	Ø 12 mm, e = 15 cm	Ø 14 mm, e = 15 cm
Barres de renforcement au droit des voiles, entre les cintres	3 x Ø 20 mm	3 x Ø 28 mm
Voiles provisoires		
Epaisseur du béton projeté	20 cm	33 cm
Cintres réticulés	*Bernold III-120-30/20*	*Bernold III-160-34/26*
Espacement des cintres	90 cm	90 cm
Treillis minimal	Ø 8 mm, e = 15 cm	Ø10 mm, e = 15 cm
maximal	Ø 12 mm, e = 15 cm	Ø 12 mm, e = 15 cm

dessus du plan du rail. Ce niveau a été fixé en fonction de la hauteur maximale de havage de la machine à attaque ponctuelle *(Alpine Miner 50)*. Ensuite, le terrassement du puits a été achevé et la réalisation des parties inférieures des galeries latérales entreprise. Pour terminer, le noyau et le radier ont été excavés et le radier bétonné (fig. 12).

Cette variante, qui s'éloigne du concept de base par le fait que les sections partielles supérieures ne sont pas fermées, a été finalement acceptée. Pour cela, il a fallu procéder à de nouveaux calculs par éléments finis et prendre les dispositions nécessaires pour limiter les tassements et pour contrôler en tout temps les déformations de la cavité et les pressions sous les appuis provisoires de la calotte.

Etanchéité

Un système d'étanchéité intercalaire est prévu sur toute la surface de la cavité. Le drainage assurant la déviation latérale des eaux infiltrées entre le rocher et l'ouvrage, qui n'a pas été dimensionné pour supporter une pression d'eau, est assuré par une nappe tridimensionnelle en nylon *Enkamat 7020*. Les eaux sont récoltées dans les drains longitudinaux en PVC dur d'un diamètre de 125 mm, posés à la base des piédroits sur le radier. Des niches de curage et rinçage sont prévues tous les 50 m. L'étanchéité proprement dite est assurée par un lé en matière synthétique (PVC) de 2 mm d'épaisseur (*Sikaplan 14.6.V*) et la technique de la double soudure thermique sur une zone de recouvrement est utilisée pour faire la liaison entre les feuilles (fig. 13).

Sur les piédroits, une feuille de PVC recyclé est mise en place comme protection d'étanchéité avant la pose de l'armature de l'anneau intérieur.

Revêtement intérieur

Un revêtement d'anneau intérieur de 30 cm d'épaisseur est prévu sur toute la surface de la cavité: il sera réalisé en béton coffré B 40/30 contre les piédroits sur une hauteur de 5 m et en béton projeté par voie humide B 40/30 dans la partie centrale pour épouser la forme variable de celle-ci.

Pour garantir que le béton projeté réponde bien aux critères de la classe B 40/30, de nombreux essais ont été menés sur le chantier. Ils ont abouti au dosage suivant: 425 kg de ciment Portland à haute résistance (CPH), 1% de plastifiant *Sika Tard 902* et 4 à 5% d'accélérateur *Sigunit-49 AF*. Il est à relever que cet accélérateur non alcalin est utilisé sur un chantier pour la toute première fois. Le béton projeté fabriqué sur place par le consortium d'entreprises selon la recette ci-dessus a été testé en laboratoire et la résistance à la compression obtenue sur carottes s'élève à 58 N/mm² (à 28 jours), alors que le béton témoin a une résistence sur cube de 60 N/mm².

Cet anneau intérieur est armé par deux nappes de treillis dimensionnées pour pouvoir reprendre les efforts dus aux poussées extérieures, en cas d'une dégradation éventuelle de l'armature de l'anneau extérieur.

Travaux à ciel ouvert de l'avenue d'Echallens

Le projet initial prévoyait la réalisation de l'ouvrage à ciel ouvert sur une longueur de 360 m, soit jusqu'au droit de la trémie routière de l'avenue de Morges, à l'entrée ouest de la place Chauderon.

Cette solution, retenue pour permettre la réalisation de la sortie de la trémie routière sur l'avenue d'Echallens dans la même fouille que le LEB, a été abandonnée au profit d'une réalisation en souterrain dès le resserrement de l'avenue d'Echallens, au haut du chemin des Clochetons. En effet, en plus du déplacement des réseaux de conduite, les contraintes liées aux circulations imposées par les différents services de la Ville ainsi que la volonté de maintenir l'exploitation de l'ancienne gare terminale du LEB pendant toute la durée des

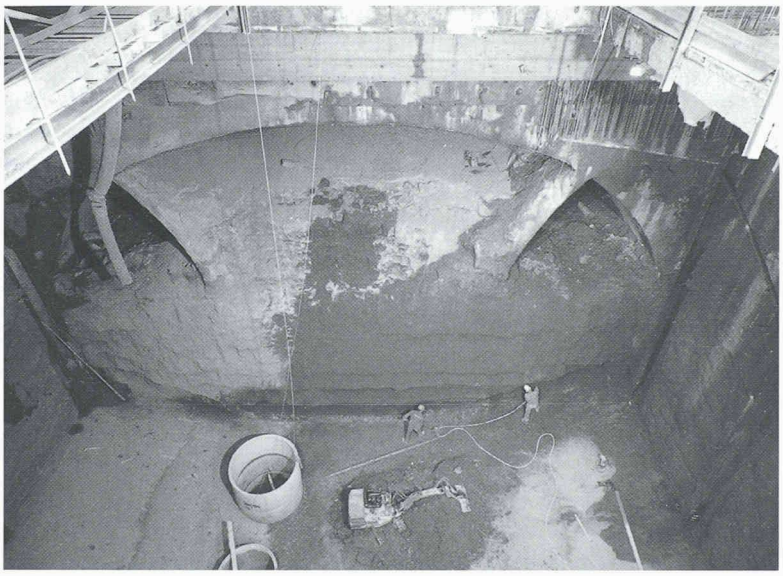


Fig. 12. – Puits de Chauderon: réglage du fond de fouille avant bétonnage du radier; parties supérieures des galeries latérales et de la calotte déjà excavées

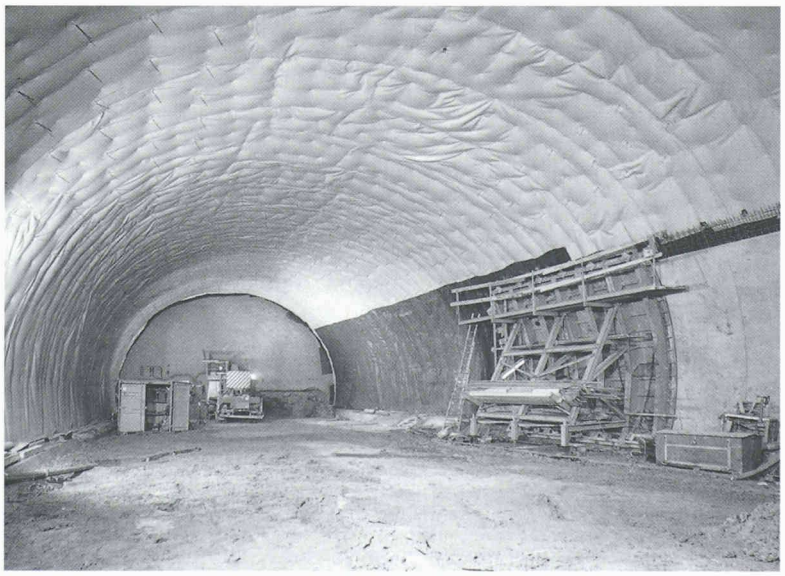


Fig. 13. – Gare de Chauderon: étanchéité en PVC avec ancrages pour la suspension du treillis d'armature du revêtement intérieur, protection par une couche de PVC recyclé sur les piédroits, coffrage pour le bétonnage de ces derniers

travaux, ont été déterminants dans le choix de la méthode de réalisation. L'importance des travaux d'aménagement qui auraient dû être réalisés, leurs coûts directs et indirects, ainsi que leur durée ont permis de justifier la faible différence de coût des travaux souterrains par rapport aux travaux à ciel ouvert, si l'on ne considère que les travaux de construction du nouvel ouvrage. Les travaux à ciel ouvert sur l'avenue d'Echallens concernent ainsi un tronçon de 200 m situé à l'ouest du haut du chemin des Clochetons.

Des travaux préparatoires ont été réalisés pour libérer l'emprise de la nouvelle ligne (aménagements routiers et piétonniers, déplacements des différents réseaux, déplacement de la voie du LEB) avant le début des travaux de l'ouvrage proprement dit.

Le tronçon réalisé à ciel ouvert comprend une trémie longue de 107 m et une tranchée couverte de 36 m de longueur, le raccordement à niveau à la voie existante se faisant sur une longueur de 60 m environ.

La trémie a été réalisée selon deux procédés de construction différents, suivant la profondeur à atteindre: tout d'abord, murs de soutènement classiques (coffrages sur deux faces), puis parois moulées de 60 cm d'épaisseur. La tranchée couverte a été réalisée de la façon suivante:

- parois moulées de 60 cm d'épaisseur
- dalle de couverture bétonnée après un pré-terrassement
- terrassement en taupe
- bétonnage du radier.

Le front d'attaque du tunnel se trouve à l'extrémité de la tranchée couverte.

Tunnel

Le tunnel est à simple voie et long de 364 m, pénétrant progressivement dans la molasse. Mis à part une zone de transition d'environ 50 m à l'approche de la gare, la section est constante, en forme de fer à cheval avec radier plat. Le gabarit d'espace libre a été établi conformément aux dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer. Des dégagements latéraux complémentaires ont en outre été intégrés au profil pour répondre à la demande du Service du feu de la Ville de Lausanne. Le profil d'excavation ainsi défini a une section de 40 m^2 environ.

La position du portail pour l'attaque en souterrain a été fixée juste avant le resserrement de l'avenue d'Echallens, au droit des immeubles numéros 13 et 15, ce qui a permis de conserver la circulation bidirectionnelle sur ladite avenue.

Renforcement du terrain

La couverture sur la clé de voûte du portail est de 1,50 m seule-

ment. Les conduites d'eau, gaz, et réseaux PTT sont situées perpendiculairement à l'ouvrage, à environ 5 m derrière le portail, la couverture entre ces conduites et le profil d'excavation de l'ouvrage étant de 50 cm.
Les solutions retenues pour renforcer le terrain en place avant l'excavation sont de deux types.

1) Sur les 18 premiers mètres, réalisation d'une voûte parapluie, comprenant 11 tubes d'acier à paroi épaisse, de 133 x 8,8 mm, équipés de manchettes d'injection. Construite entre les parements des parois moulées, cette voûte couvre un segment de 90°. L'extrémité des tubes en acier est noyée dans la dalle de couverture de la galerie. Quant aux appuis latéraux de cette voûte parapluie, ils sont constitués par des colonnes en *jet-grouting*, jouant également le rôle de renforcement des piédroits du tunnel. Le pied de ces colonnes est défini par le toit de la molasse sur lequel elles s'appuient.
2) Sur les 45 m suivants, où la couverture augmente progressivement de 2,65 m à 5,30 m, réalisation de colonnes en *jet-grouting* sur tout le pourtour de la section d'excavation pour créer un arc de terrain renforcé. La longueur des colonnes est définie par le profil d'excavation, les colonnes latérales s'arrêtant sur le toit de la molasse.

Les calculs ont montré que la stabilité du front était suffisante sans renforcement du terrain dans le front d'attaque.
Pour que les charges du terrain et les charges extérieures soient transmises par l'intermédiaire des colonnes centrales aux colonnes de bord fondées sur la molasse, il faut que dans le sens transversal, les colonnes soient sécantes. Dans le sens longitudinal, il a été admis que celles-ci soient tangentes.

La voie LEB, toujours en service lors des travaux de *jet-grouting* puis lors de l'excavation du tunnel, a défini en surface la limite nord de l'emprise disponible pour le *jet-grouting*. De par la géométrie de cette voie, l'emprise n'est pas centrée sur l'axe du tunnel, mais se décale progressivement vers le sud et se rétrécit en direction de Chauderon. Ainsi, les colonnes côté voie sont inclinées, ce qui a nécessité la mise en place d'une armature *Swiss Gewi* de 50 mm de diamètre dans ces colonnes (fig. 14).
Ces travaux de renforcement ont duré environ 5 mois pour réaliser 962 colonnes, dont 54 sont armées, totalisant 5955 mètres de forage, dont 4476 mètres injectés et 464 m armés. Douze colonnes d'essai réalisées à l'intérieur de l'enceinte définitive par les parois moulées ont permis d'optimiser les paramètres d'injection et de vérifier le diamètre moyen des colonnes. Les paramètres suivants ont été retenus:

- forage: à l'aide d'un tricône de 20 cm de diamètre
- injection: pression de 450 atm
- vitesse de remontée: 4 cm toutes les 9 secondes
- vitesse de rotation: 1 tour en 3 secondes.

Ces paramètres ont permis de réaliser, dans la moraine de fond rencontrée sur le site, des colonnes dont le diamètre moyen varie entre 50 et 60 cm.
L'enregistrement automatique et continu, en fonction de la profondeur, de la pression d'injection, du volume d'injection et de la densité du coulis injecté, a permis de contrôler la bienfacture des colonnes.
Quant aux résultats des essais en laboratoire effectués par le Laboratoire de mécanique des roches de l'EPFL sur des échantillons de terrains traités, ils ont confirmé l'amélioration réelle des propriétés mécaniques de ceux-ci (fig. 15).

Excavation et soutènement
L'excavation est réalisée à pleine section à l'aide d'une tête ponctuelle *Westfalia* avec alimentation électrique et d'un marteau hydraulique de 2 tonnes, l'un et l'autre montés sur des pelles mécaniques *Liebherr*.
Dans les terrains meubles, les travaux d'excavation ont été effectués par étapes de 0,9 à 1,80 m, avec mise en place, le cas échéant, de gunite en sac, prête à l'emploi. Le soutènement posé immédiatement après l'excavation a une épaisseur de 25 cm et est armé par des cintres réticulés *Bernold III-120-34/22,* espacés de 90 cm, et de deux nappes de treillis spéciaux, dont le poids varie de 4,39 à 6,07 kg/m^2. Le radier, d'une épaisseur de 42 cm, est bétonné en fin de semaine, sur toute la longueur réalisée.
Dans la molasse, la longueur des étapes d'excavation a été augmentée suivant la qualité des terrains rencontrés. Un soutènement«léger» est mis en place. D'une épaisseur de 18 cm, il comprend des cintres réticulés *Bernold III-70-26/18* espacés de 90 cm et deux nappes de treillis spéciaux (poids variant de 2,48 à 5,67 kg/m^2). Le radier de 35 cm d'épaisseur est bétonné périodiquement.
Un deuxième front d'attaque du tunnel a été ouvert depuis la limite ouest de la gare de Chauderon, soit à la fin de la galerie latérale nord. Les travaux d'excavation se sont poursuivis à l'aide des engins engagés pour la réalisation de la gare souterraine.
A partir de ce front, la zone de transition est réalisée selon les étapes définies ci-dessus pour le profil dans la molasse.

Etanchéité et revêtement intérieur
Un système d'étanchéité intercalaire identique à celui mis en œuvre dans la gare est prévu, ainsi qu'un revêtement d'anneau intérieur non armé, en bé-

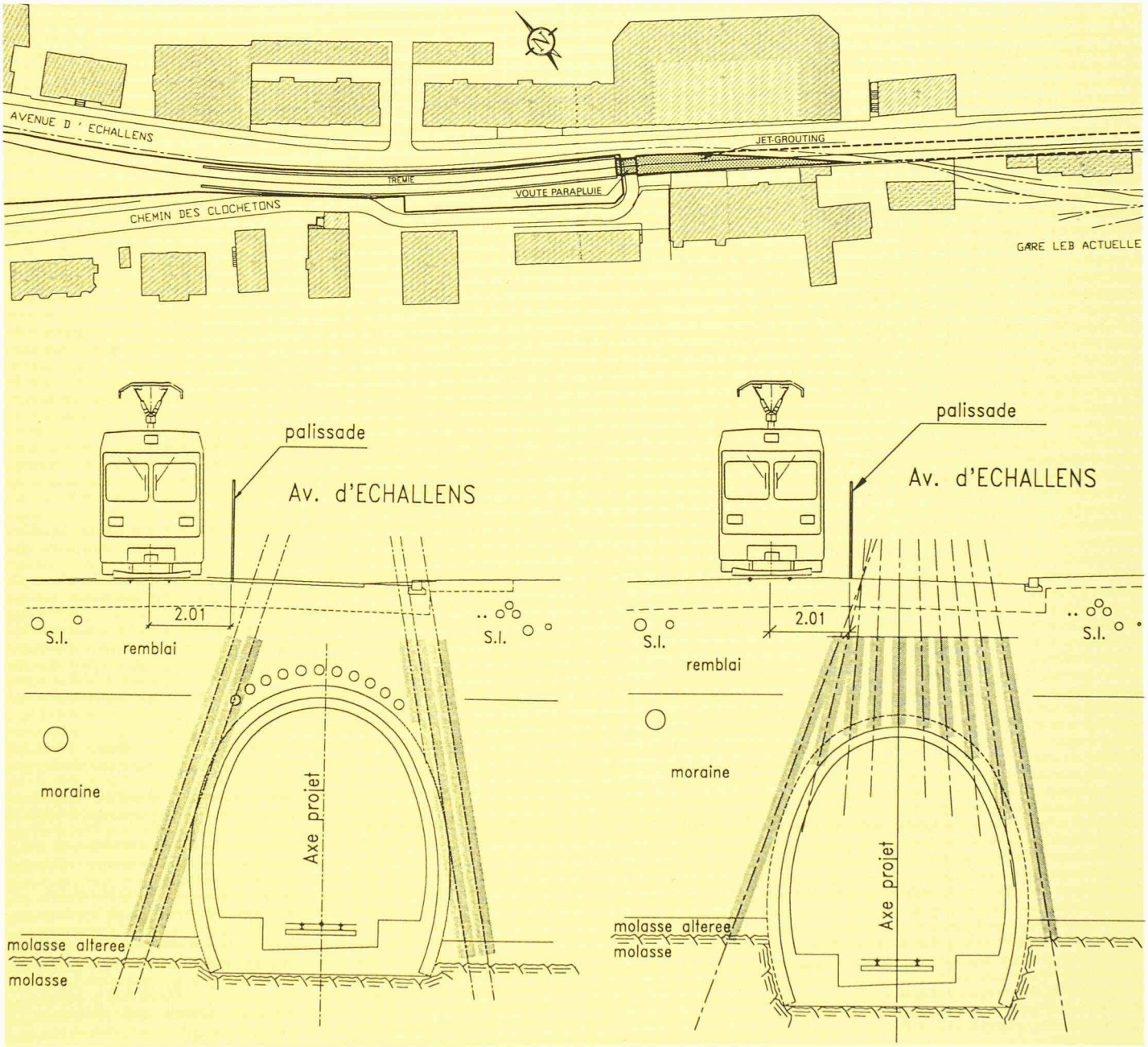


Fig. 14. – Tunnel de l'avenue d'Echallens: renforcement du terrain par voûte parapluie et par jet-grouting: *a) situation, b) coupe au droit du portail, c) coupe type*

ton coffré B 40/30 d'une épaisseur minimale de 25 cm sur toute la longueur du tunnel. Dans la zone de transition, il sera composé de béton projeté B 40/30.

Ouvrages annexes

Une sous-station électrique souterraine, située au fond du puits derrière le mur nord, redressera le courant fourni par les Services industriels de Lausanne pour l'alimentation de la ligne de contact en courant continu.
D'autre part, un accès pompiers reliera la route de Genève au tunnel par une galerie souterraine de 45 m de longueur.

Méthodes de calcul

La complexité de l'ouvrage a commandé l'utilisation de méthodes de calcul numériques performantes. Les progiciels suivants ont été utilisés.
MISES3 (TDV-Technische Datenverarbeitung, Graz, Autriche) est un programme de modélisation par éléments finis pour la simulation à la fois bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D), qui fait appel aux lois constitutives élasto-visco-plastiques et aux lois de la mécanique des milieux continus.

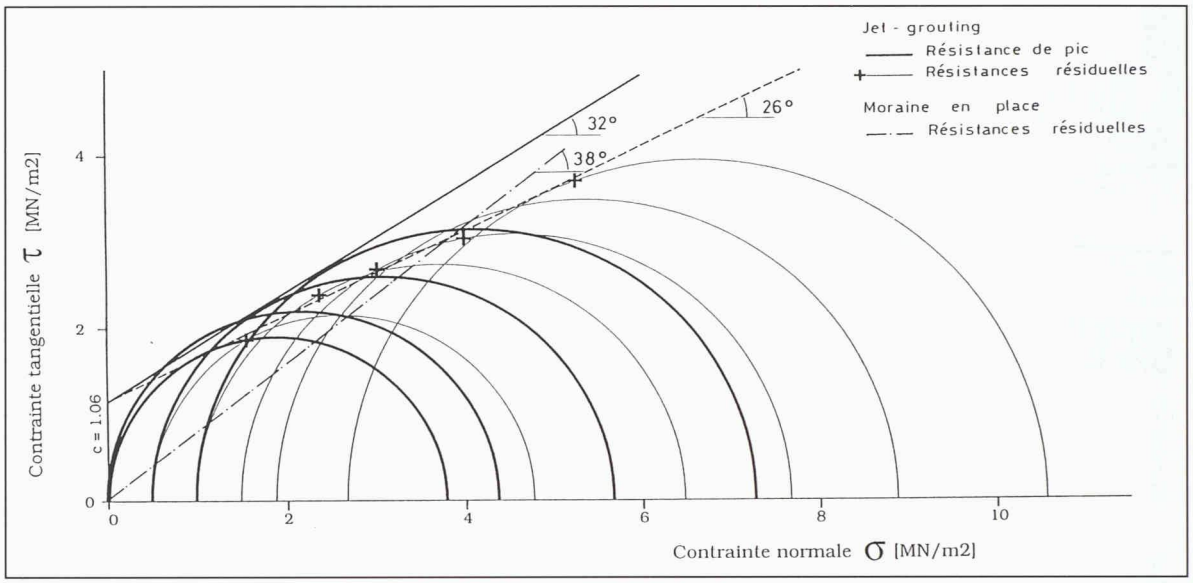


Fig. 15. – Amélioration des propriétés mécaniques (à 28 jours) de la moraine traitée par jet-grouting: *courbe intrinsèque*

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, USA) est un programme de calcul bidimensionnel aux différences finies.
La méthode des réactions hyperstatiques a également été utilisée par le biais du programme de calcul des structures à barres *Statik-2* (Cubus, Zurich).

Enfin, la détermination des sections à partir des efforts a fait appel au programme *Fagus-2* (Cubus, Zurich).

Auscultation

Les conditions liées au site urbain, à la faible profondeur et à la nature des terrains rencontrées, ainsi que les dimensions des ouvrages à réaliser ont nécessité la mise en place d'appareils de mesure pour suivre quantitativement l'incidence des phases de creusement et de construction sur l'évolution des déformations et des déplacements de l'ouvrage et du terrain l'encaissant, en fonction du temps écoulé.
L'interprétation des résultats des mesures a permis de suivre au cours de chaque étape de travail, le comportement réel du terrain et de l'ouvrage et de le comparer aux valeurs déduites des calculs. La définition des étapes de travail et des principales dimensions du soutènement peut ainsi être adaptée en cours de projet dans un double souci de sécurité et d'économie.

Coût des travaux de génie civil des principaux ouvrages (en millions de francs, base juin 1991)

Installations de chantier	5,2
Puits	5,1
Gare souterraine	8,3
Travaux à ciel ouvert à l'avenue d'Echallens (trémie et tranchée couverte)	2,5
Tunnel	8,1
Total	29,2

Intervenants

Maître de l'ouvrage	Compagnie du chemin de fer Lausanne-Echallens-Bercher (LEB)
Projet et direction des travaux	Groupement d'ingénieurs: Monod ing.-conseils SA, Epalinges Piguet et Associés ing.-conseils SA, Lausanne CSD ing.-conseils SA, Le Mont
Architectes	Atelier d'architecture Renato Morandi SA, Lausanne
Géomètre	J.-P. Ferrini, ing. géomètre officiel, Lausanne
Travaux souterrains et puits de Chauderon	Consortium Tunnel de Chauderon: Losinger SA Locher SA Dénériaz SA Reymond SA
Travaux à ciel ouvert à l'avenue d'Echallens	Consortium Bertholet+Mathis SA et Sotrag SA

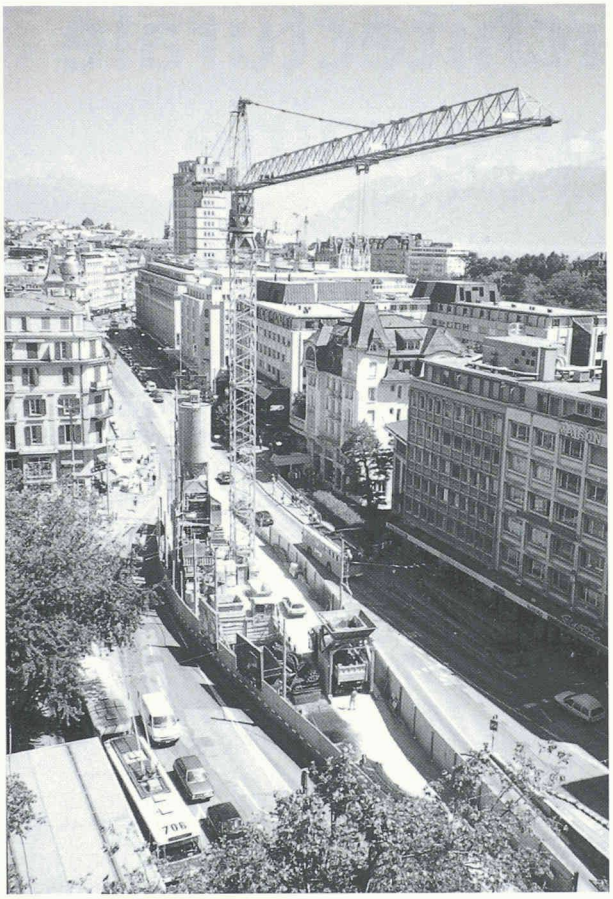


Fig. 16. – Place Chauderon: installations de chantier

La présentation de ces mesures, leur interprétation et la comparaison avec les valeurs déduites des calculs numériques feront l'objet d'une publication ultérieure.

Programme et avancement des travaux de gros œuvre

A la place Chauderon, les travaux ont débuté en mars 1992. La construction du puits a duré 12 mois environ et les travaux d'excavation de la gare 11 mois. Les travaux préparatoires à l'avenue d'Echallens ont débuté en février, ceux de gros œuvre de la trémie en mai 1993. Les travaux à ciel ouvert ont été terminés fin mars 1994, tandis que l'accès au front d'attaque du tunnel à l'avenue d'Echallens a été libéré en octobre 1993. Enfin, les travaux d'excavation du tunnel ont été achevés en août 1994, la mise en service de la nouvelle ligne jusqu'à la gare souterraine de Chauderon étant prévue pour fin mai 1995.

Conclusion

Des contraintes sévères, notamment la densité du site urbain construit, la faible profondeur d'implantation associée à la nature des terrains de couverture, ainsi que l'exiguïté de la place disponible pour les installations de chantier en raison des besoins d'un trafic intense (fig. 16), ont obligé les ingénieurs et les entrepreneurs à trouver des solutions originales pour réaliser cet important ensemble d'ouvrages.

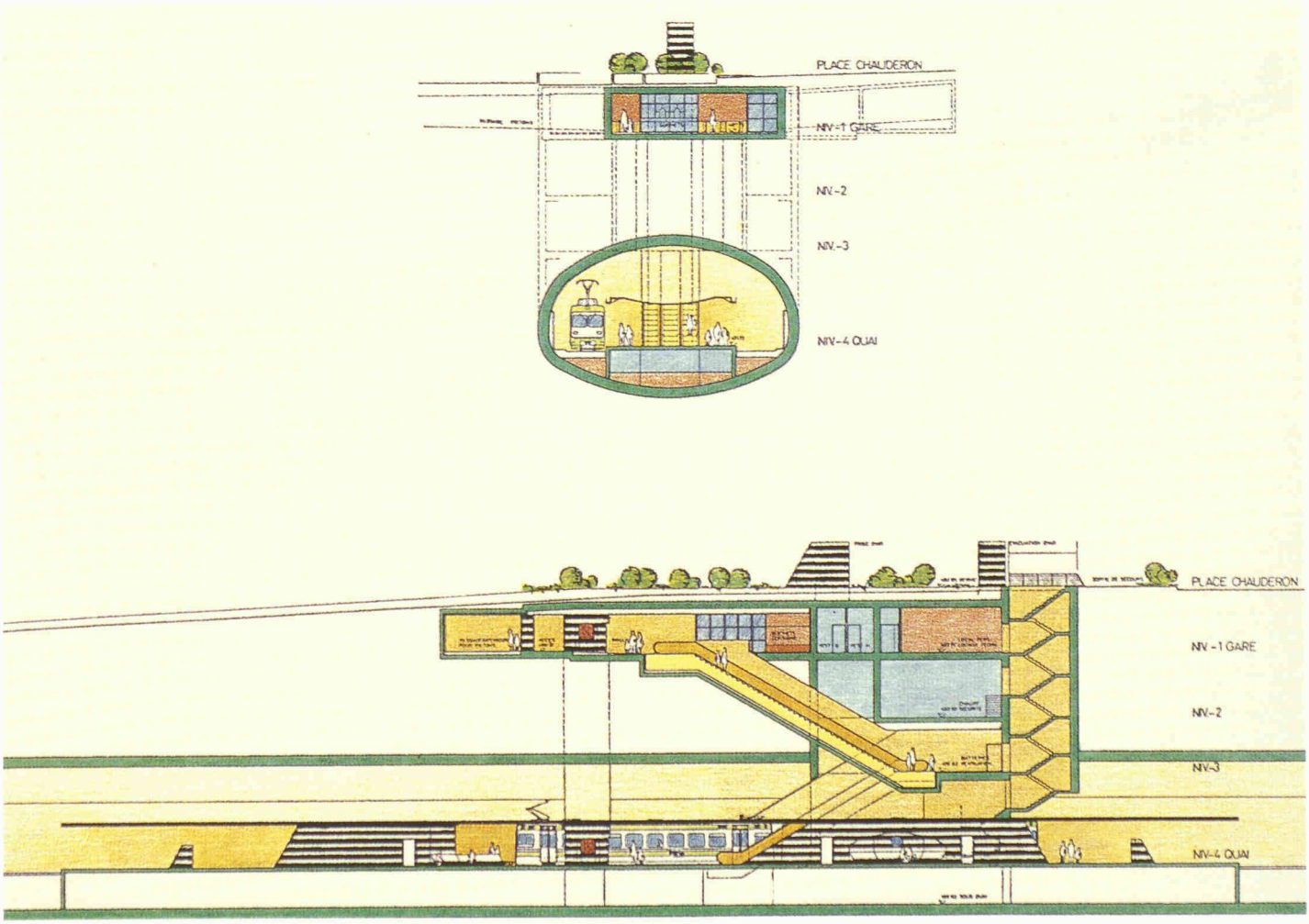


Fig. 17. – Gare souterraine de Chauderon: coupes longitudinale et transversale