Les travaux souterrains du tunnel de Vernier

Autor(en): **Odier, Michel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **119 (1993)**

Heft 14

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-78057

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

Les travaux souterrains du tunnel de Vernier

Par Michel Odier, ingénieur civil EPFZ-SIA, géotechnique appliquée P. & C. Dériaz & Cie SA, rue Blavignac 10, 1227 Carouge

1. Situation et tracé

La construction du tunnel de Vernier (OA 501) s'inscrit dans la réalisation de l'autoroute de contournement de Genève. Dès la route de Meyrin, et en direction de la frontière française, la nouvelle autoroute chemine dans le vallon du Nant d'Avanchet, ruisseau dont le cours a été préalablement dévié dans une galerie creusée sur sa rive gauche. Elle disparaît ensuite sous le coteau de Vernier et réapparaît au lieu-dit «Le Canada», d'où elle franchit le Rhône par le pont d'Aigues-Vertes.

L'ouvrage, dont la longueur est de 1900 m, est composé de deux tubes assurant chacun le passage de deux voies de circulation, soit une chaussée d'une largeur de 7,75 m. A l'approche du portail Avanchet, un élargissement du tube Rhône est nécessaire sur une longueur de 175 m pour permettre la création d'une piste de décélération liée à la toute proche demi-jonction avec la route de Vernier.

Le tracé est rectiligne sur environ deux tiers de sa longueur et décrit une courbe d'un rayon de 750 m à l'approche du portail Canada. Ici, les tronçons réalisés à ciel ouvert représentent environ 120 m de chaque tube, pour 30 à 50 m seulement au portail Avanchet. La longueur cumulée des tunnels exécutés en souterrain est donc proche de 3500 m.

La ventilation, de type longitudinal, est assurée par des ventilateurs de jet fixés en calotte, l'air vicié étant diffusé dans les zones des portails. Ce mode de ventilation a pour conséquence une répartition des puissances électriques installées sur toute la longueur de l'ouvrage. L'alimentation des équipements est assurée par l'intermédiaire de quatre locaux techniques, dont deux sont situés dans les zones de portails et les deux autres dans des galeries transversales.

2. Géologie et hydrogéologie

La figure 1 donne le profil en long de l'ouvrage ainsi que la répartition des formations géologiques rencontrées. On constate que la hauteur de couverture varie généralement entre 20 et 35 m au-dessus de la calotte.

Le choix du profil en long est dicté, dans les zones de portails, par des impératifs d'intégration de l'autoroute dans le site, et, en souterrain, par les avantages constructifs d'une attaque montante plutôt que d'une attaque descendante, conduisant ainsi à la création d'un point haut à mi-longueur du tunnel.

Le portail Canada correspond à un point bas. Il a également été nécessaire de créer un point bas à 300 m du portail Avanchet, au droit de l'ancien Nant de Poussy, l'écoulement des eaux étant, depuis cet endroit, assuré par gravité vers le Rhône au moyen d'une galerie d'une centaine de mètres de longueur.

L'ouvrage traverse principalement deux types de terrain:

- la molasse, roche généralement tendre, d'origine tertiaire, constituée d'une alternance de marnes et de grès et, dans sa partie supérieure, la plus récente, de petits bancs de calcaires alternant avec des marnes à gypse;
- une moraine graveleuse répondant à l'appellation locale d'«alluvions anciennes».

La molasse est caractérisée dans ce secteur par plusieurs zones fracturées, liées à des failles importantes qui traversent la cuvette genevoise. Dans ces zones, un soutènement doit être mis en place dès le front de taille. Les calcaires et les bancs de gypse sont susceptibles d'être localement dissous par les infiltrations de fracture. Ils présentent alors des zones d'altération ou des vides de type karstique. Ces phénomènes ont été rencontrés en plusieurs endroits entre le portail Avanchet et le point bas du profil en long.

La limite entre les formations tertiaires (molasse) et le quaternaire est marquée par des sillons d'érosion plus ou moins profonds.

Dans l'ensemble, et à l'exception de zones fracturées, voire karstifiées, la molasse constitue un substratum relativement imperméable, alors que la moraine graveleuse est perméable. Sous le village de Vernier, une nappe s'écoule dans les graviers au toit de la molasse. Celle-ci n'est pas exploitée et trouve son exutoire dans les rives du Rhône. Il a dès lors été admis qu'elle pouvait être rabattue au niveau des fondations du tunnel, ce qui correspond à un rabattement maximal d'environ 6 m.

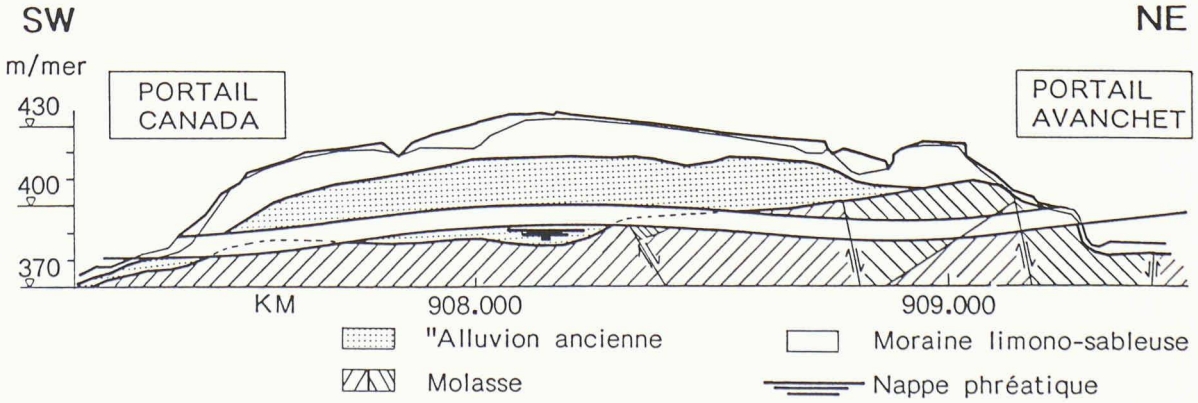

Fig. 1. – Tunnel de Vernier: profil en long géologique

3. Méthodes de construction

L'examen du profil en long géologique montre que les conditions sont bien différentes entre la partie sud-ouest du tunnel (côté Canada), exécutée principalement dans les graviers et localement en profil mixte graviers/molasse, et la partie nord-est (côté Avanchet), où l'ouvrage est entièrement en molasse. Ces considérations ont conduit:

- à exclure l'utilisation d'un bouclier à pleine section, particulièrement mal adapté à l'avancement en profil mixte;
- à prévoir l'attaque simultanée de l'ouvrage par les deux extrémités, le tronçon en molasse étant excavé depuis le portail Avanchet et le tronçon en gravier et profil mixte l'étant depuis le portail Canada.

De plus, compte tenu des cadences envisageables dans de tels terrains, l'avancement a été prévu simultanément dans les deux tubes.

Tant les graviers que la molasse, en tout cas dans les zones fracturées, nécessitent la mise en place d'un soutènement au front de taille. L'attaque des travaux a dès lors été envisagée en demi-section de calotte. La figure 2 donne la succession des étapes d'excavation et de construction dans les tronçons en molasse.

3.1 Avancement en calotte

Du côté Canada, la calotte est exécutée dans la moraine graveleuse. On rencontre localement le substratum molassique au niveau des naissances de la voûte.

L'excavation a été réalisée à l'abri de boucliers à lances. D'une longueur d'environ 10 m, ceux-ci permettaient l'avancement par étapes de 1,50 m et le bétonnage de la voûte, à l'abri de la jupe du bouclier, par étapes de 3,00 m.

Le remplissage du vide annulaire subsistant lors de l'avancement des lances était assuré par une injection de mortier exécutée au travers de l'anneau de béton, immédiatement derrière le bouclier.

L'abattage intervenait au moyen d'une pelle hydraulique. Dans les tronçons en profil mixte, lorsque la molasse apparaissait au niveau des naissances, celle-ci nécessitait l'intervention d'une machine à attaque ponctuelle. Le gabarit disponible dans le bouclier et particulièrement l'exiguïté de l'accès à la zone des naissances ne permettaient cependant pas la mise en œuvre de machines lourdes qui auraient été capables d'excaver la totalité du front. L'abattage dans ces zones de profil mixte nécessitait donc la mise en œuvre successive de deux machines (fig. 3).

Il convient de rappeler que l'attaque en calotte pénétrait progressivement dans la nappe circulant au toit de la molasse.

Compte tenu de la vitesse d'avancement relativement modeste (de l'ordre de 3 m/jour soit 3,5 x 10^{-5} m/s) par rapport à la perméabilité d'ensemble des graviers (de l'ordre de 10^{-3} m/s), l'option a été prise de réaliser le rabattement de la nappe directement au

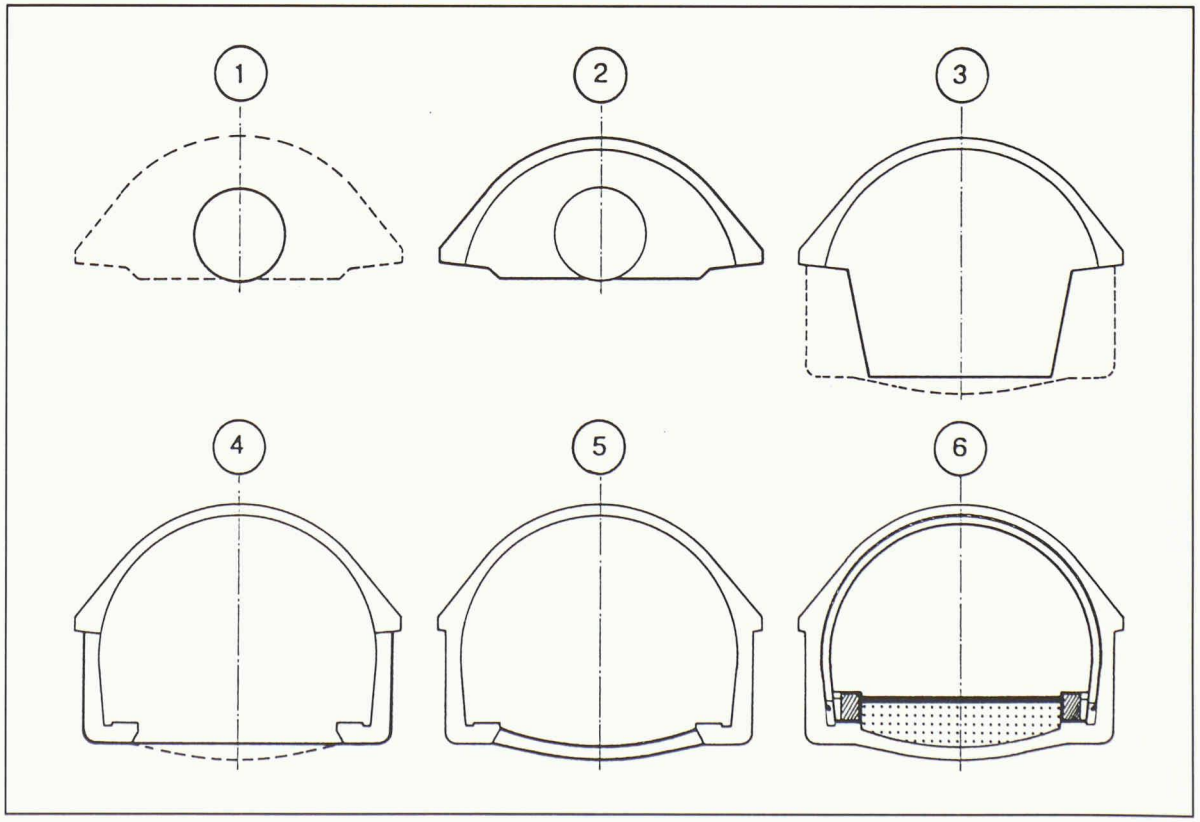

Fig. 2. – Succession des étapes d'excavation et de construction dans les tronçons en molasse: 1: galerie pilote, 2: calotte, 3: noyau, 4: piédroits, 5: radier voûté, 6: étanchéité, anneau intérieur et aménagement

Fig. 3. – Avancement en calotte du côté Canada, attente de la pelle hydraulique pendant l'abattage à la machine à attaque ponctuelle

front de taille, sans autres mesures préalables. Ce mode de rabattement a permis d'obtenir les résultats escomptés, soit un rabattement d'une hauteur maximale d'environ 6 m, sans jamais provoquer de phénomènes d'instabilité ou d'érosion dans la zone du front. Le débit maximal cumulé sur les deux attaques a été de l'ordre de 400 l/min, l'influence du front de taille étant sensible jusqu'à une distance d'environ 280 m de celui-ci.

Ces valeurs correspondent remarquablement bien aux prévisions qui avaient été établies sur la base d'un essai de pompage dans le cadre de la campagne de sondages de reconnaissance.

Après une période d'installation et de rodage de plusieurs mois, les avancements ont finalement atteint des cadences de 40 à 45 m par mois, les équipes travaillant à raison de deux postes quotidiens, cinq jours par semaine.

Du côté Avanchet, c'est un avancement à la machine à attaque ponctuelle qui a été réalisé, le soutènement étant généralement constitué de boulons, de béton projeté et de cintres légers (TH 21). Dans les zones particulièrement altérées ou fracturées, des cintres lourds (HEB 200) ont été mis en place, permettant ainsi la mise en œuvre de planchettes métalliques ou de marchavants. Ce soutènement était ensuite complété par un anneau en béton coffré.

Préalablement à l'avancement de la calotte en molasse, une galerie pilote d'un diamètre de 3,60 m avait été forée au tunnelier dans le profil de chacun des tunnels.

Une liaison avait également été réalisée dans le profil des futures galeries transversales et l'ensemble de ce réseau était raccordé à la galerie d'évacuation des eaux au point bas (galerie de Poussy). L'excavation de cette dernière a été entreprise dès l'ouverture du chantier, depuis les rives du Rhône.

La réalisation des galeries pilotes répondait aux trois principaux objectifs suivants:

- vérifier le comportement du massif dans les zones fracturées mises en évidence par les investigations préalables;
- assurer l'évacuation des eaux d'infiltration vers le point bas, en attaque descendante;
- permettre l'aspiration de l'air vicié en avant du front de taille, lors de l'excavation de la calotte à la machine ponctuelle, et permettre son dépoussiérage de manière centralisée et efficace.

Une centrale d'aspiration et de dépoussiérage de l'air en provenance du chantier a donc été aménagée à l'extrémité de la galerie de Poussy. C'est par cette station que la ventilation a été assurée pour la quasi-totalité des travaux de creusement en molasse.

Un tronçon de transition assure la liaison entre l'avancement en gravier au bouclier à lances et l'avancement de la calotte en molasse.

Sur une longueur d'environ 200 m, le niveau du toit de la molasse s'abaisse en effet lentement pour passer du niveau de la calotte à celui des naissances de voûte. Dans ce tronçon, il est donc nécessaire d'allier des dispositions de soutènement, permettant de faire face à d'éventuels graviers boulants en calotte, et un matériel de creusement performant dans la molasse. Diverses méthodes ont successivement été envisagées.

Un soutènement par cintres lourds et planchettes métalliques, proposé dans l'appel d'offres, a été jugé trop lourd et d'une mise en œuvre trop laborieuse par l'entrepreneur. La variante proposée, et retenue, pour l'élaboration du contrat d'entreprise, consistait à réaliser un tronçon d'environ 300 m dans chaque tube à l'abri d'un bouclier à lances. Celui-ci progressait dans le sens Avanchet-Canada. Son montage et son démontage en fin de parcours intervenaient dans des chambres souterraines. Utilisé d'abord dans le tube Jura, il était ensuite transféré au tube Rhône.

Les difficultés rencontrées lors du montage et du démarrage des boucliers au portail Canada ont cependant conduit l'entrepreneur, en cours de travaux, à renoncer à cette méthode et à proposer l'avancement en alternance dans les deux tubes, par étapes de 14 m, à l'abri d'une voûte constituée de pieux de *jet-grouting*. Cette variante aurait dû permettre d'éviter le bétonnage ultérieur d'un anneau porteur, les pieux jointifs et un béton projeté de réglage étant censés assurer ce rôle porteur dans les graviers.

Cette solution a certes permis d'assu-

rer une amélioration de la tenue des graviers à l'avancement; néanmoins, il convient de signaler qu'elle n'a pas répondu à toutes les attentes et que des surépaisseurs importantes de béton projeté ont dû être réalisées pour garantir le rôle porteur escompté. Sans vouloir mettre en cause une technique qui a fait ses preuves sur certains autres chantiers, il nous paraît utile de mentionner ici que, en l'occurrence, de grandes difficultés ont été rencontrées en ce qui concerne la précision des forages. Par ailleurs, les diamètres de pieux n'ont pratiquement jamais atteint les 50 à 60 cm admis initialement. Ces raisons incitent à penser que les conditions locales, et en particulier l'extrême compacité du terrain, sont à la limite de l'application du procédé du *jet-grouting* horizontal.

3.2 Stross et radier

Le percement préalable de galeries transversales reliant les deux tubes permettait de dévier le trafic de chantier pour l'excavation du stross et de réaliser les piédroits, puis le radier voûté, sur des tronçons de 300 m libres du trafic d'accès au front de taille.

L'excavation du noyau s'est faite à la pelle hydraulique dans les graviers et au moyen d'une pelle lourde équipée d'une dent de ripper en molasse. Localement, et pour des raisons d'organisation du chantier, l'excavation du noyau en molasse est également intervenue à la machine à attaque ponctuelle.

Les piédroits ont été réalisés par plots de 7,50 m, la planification des étapes d'exécution différant selon la nature des terrains et les zones. D'une manière générale, on peut distinguer l'exécution par plots isolés ou alternés de l'exécution «en avançant».

Dans les tronçons en gravier et dans ceux de profil mixte proches du portail Canada, c'est une exécution par plots alternés qui a été choisie. Avec cette méthode, seule la longueur nécessaire à l'excavation d'un plot est excavée. La naissance de voûte prend alors appui de part et d'autre de ce plot sur un merlon de terrain en place ou sur un élément préalablement bétonné. L'excavation des graviers est réalisée à la pelle hydraulique, la partie en molasse est disloquée au marteau brise-béton. La longueur réduite du tronçon excavé et la durée limitée de cette ouverture ont généralement permis de renoncer à la mise en œuvre d'un soutènement ou à limiter celui-ci à quelques centimètres de béton projeté dans les niveaux instables des graviers ou dans les niveaux altérés de la molasse.

Pour les tronçons en molasse exécutés depuis le portail Avanchet, c'est, par contre, une méthode «en avançant» qui a été retenue.

L'excavation s'effectue à la machine à attaque ponctuelle par étapes de 7,50 m, suivie immédiatement par la mise en œuvre d'un soutènement en béton projeté armé et boulonné, assurant le confinement du terrain dans les zones d'appui des naissances de la voûte. L'excavation progresse ainsi, sur une certaine longueur, sous l'un des appuis de la voûte, et ce n'est qu'à une distance de 20 à 50 m de la zone d'excavation que l'on procède au bétonnage du piédroit.

Contrairement à la méthode précédente, dans laquelle les ateliers d'excavation et de bétonnage se succèdent en divers points du tronçon de 300 m en cours de réalisation, la méthode «en avançant» permet aux ateliers d'excavation, de soutènement et de bétonnage de progresser parallèlement. Cette progression systématique est particulièrement avantageuse en ce qui concerne les dispositions de ventilation de chantier et de dépoussiérage de l'air en provenance des zones de travail de la machine à attaque ponctuelle.

Dans les zones intermédiaires et dans les zones fracturées de la molasse, les schémas de travail ont été adaptés aux conditions rencontrées.

A l'exception des points singuliers, la cadence de réalisation des piédroits a été d'environ 30 plots de 7,50 m par mois, ce qui correspond donc à une durée de deux mois et demi pour chaque tronçon de 300 m du tunnel.

Dans les tronçons en molasse, compte tenu de la tendance au gonflement des marnes, le profil est complété par un radier voûté. La réalisation de celui-ci est généralement intervenue «en avançant» par tronçons de 300 m, la longueur des étapes de bétonnage étant d'environ 50 m.

3.3 Anneau intérieur et aménagements

Après réalisation de l'anneau porteur, et pour garantir à l'ouvrage un aspect conforme aux exigences de l'exploitation, une nappe drainante et une feuille d'étanchéité ont été mises en place jusqu'à un niveau proche de celui de la chaussée, permettant ainsi le bétonnage de l'anneau intérieur non armé d'une épaisseur de 30 cm.

Les trottoirs ou passe-pied, disposés de part et d'autre de la chaussée, accueillent, d'une part, les batteries de tubes destinés aux câbles et conduites des équipements électromécaniques et de sécurité et, d'autre part, les collecteurs d'eaux de drainage et d'eaux de chaussée. On rappellera que, pour des raisons de sécurité incendie, les réseaux d'eaux de drainage et les réseaux d'eaux de chaussée sont conduits séparément jusqu'à l'extérieur du tunnel et que les eaux de chaussée sont récoltées par un caniveau fendu à fente continue, raccordé tous les 50 m à un collecteur étanche, par l'intermédiaire de siphons avec paroi coupe-vent.

4. L'effondrement du 10 avril 1990

Outre les aspects évoqués précédemment, la réalisation de cet ouvrage a été marquée par l'effondrement brutal d'un tronçon d'environ 50 m du tube Rhône, lors des travaux de reprise en sous-œuvre des piédroits.

Le tronçon concerné se situe dans la partie centrale du tunnel, en profil mixte. La calotte avait été excavée dans les graviers à l'abri d'un bouclier à lances et les naissances de voûte reposaient approximativement au toit de la molasse, dans une zone passablement fracturée et dont les événements ont montré qu'elle était fortement altérée localement.

Pour des raisons d'organisation de chantier, un noyau de largeur réduite avait été excavé quelques mois après le percement du tunnel en calotte, de manière à assurer une liaison de chantier jusqu'au moment de la réali-

sation des piédroits dans ce secteur. Compte tenu de la fracturation observée, les talus avaient fait l'objet de mesures de protection et d'une surveillance particulières durant la phase d'attente de plusieurs mois précédant l'exécution des piédroits.

C'est lors de l'excavation des premiers éléments de piédroit dans ce secteur que des phénomènes d'instabilité se sont manifestés dans la zone des travaux et se sont rapidement amplifiés jusqu'à une rupture de la molasse sous la naissance de la voûte et l'effondrement brutal de celle-ci sur une longueur de près de 50 m. Malgré une hauteur de couverture en calotte de 32 m, un fontis s'est propagé jusqu'en surface.

Fort heureusement, les équipes occupées aux travaux de piédroit ont pris conscience à temps du caractère irréversible des phénomènes d'instabilité qui se développaient. Grâce à leur présence d'esprit, on ne déplore donc aucune victime. Par bonheur aussi, le fontis s'est créé dans une zone non bâtie, limitant ainsi l'ampleur des dégâts matériels en surface.

Pour la reconstruction du tronçon effondré, plusieurs méthodes furent envisagées. Une étude comparative des coûts, des délais et de l'impact des travaux en surface a conduit au choix d'un traitement du terrain dans la zone effondrée par des injections effectuées depuis une plate-forme aménagée en surface.

Il s'agissait de consolider un volume de terrain d'environ 18 000 m³ pour permettre ensuite la réexcavation du tronçon effondré.

La figure 4 montre de façon schématique, sur une coupe transversale, les zones traitées et la nature des coulis utilisés. Le principe du traitement consiste tout d'abord à remplir au mortier les vides francs et à «serrer» le massif à traiter par des injections de bentonite-ciment. On crée ensuite, par injection de gel de silice, une voûte capable de supporter la charge des terrains remaniés sus-jacents, lors de l'excavation du tunnel.

Pour garantir la stabilité du front de taille, la section du tunnel a été injectée au moyen d'un coulis minéral très fluide, le «Micron S», dont la pénétration approche celle du gel de silice mais dont le caractère minéral et inerte permet la réutilisation en remblai des matériaux traités ou leur évacuation en décharge sans risque de pollution.

Le traitement a nécessité l'exécution de 574 forages, totalisant plus de 18 km, et l'injection d'environ 5500 m³ de coulis.

Les travaux de forage et d'injection se sont étendus sur près de six mois, d'octobre 1990 à avril 1991, et le creusement du tunnel, en section divisée avec attaque par des galeries latérales, a permis de constater l'excellente tenue du terrain et l'efficacité du traitement effectué.

5. Durée et coût des travaux

Ouvert en juillet 1986, le chantier des travaux souterrains s'est terminé au début 1992 et s'est donc étendu sur cinq ans et demi.

Les 3500 m de tunnels, que comporte la partie réalisée en souterrain, représentent un volume excavé de plus de 360 000 m³. Une grande partie des déblais graveleux a été réutilisée en

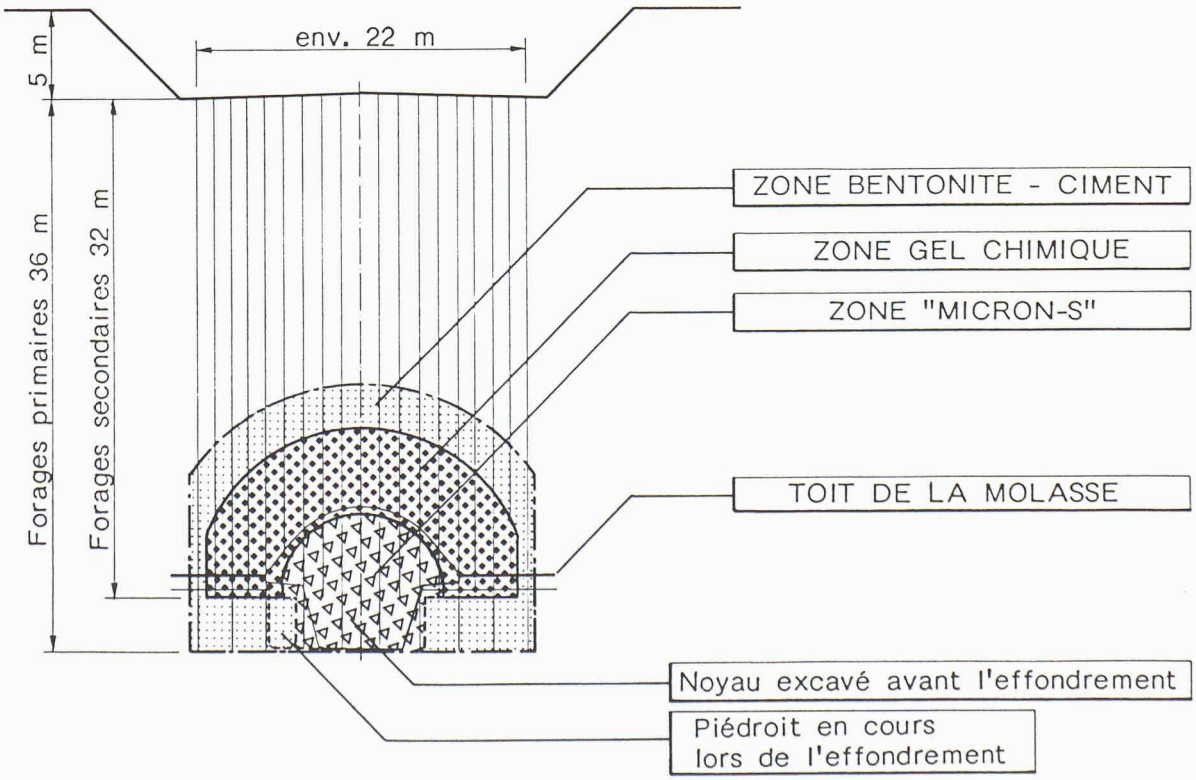

Fig. 4. – Coupe transversale dans la zone de reprise du tronçon effondré

grave de fondation. Les déblais molassiques, quant à eux, ont été utilisés pour la plupart en remblai, pour le comblement du vallon du Nant d'Avanchet.

Le montant final des travaux de génie civil du tronçon en souterrain, à l'exception des travaux de superstructure routière, s'élève à 143 millions de francs environ. Cette somme inclut les galeries transversales, les travaux de reprise de la zone effondrée, ainsi que le renchérissement. Converti en prix 1991, le coût moyen du mètre de tunnel est de 45 000 francs.

6. Considérations finales

Dans le choix des méthodes de construction comme dans la réalisation de l'ouvrage, les travaux du tunnel de Vernier ont nécessité une vigilance constante de la part de tous les responsables, qu'ils interviennent comme maître de l'ouvrage ou dans le cadre des bureaux d'étude ou de l'entreprise. L'avancement en profil mixte, en roche fracturée et altérée ou en terrain meuble, en présence d'une nappe, exige, en effet, une grande faculté d'adaptation aux conditions rencontrées et aux aléas qui en découlent.

Principaux intervenants

Maître de l'ouvrage:	République et Canton de Genève, Département des travaux publics, Service des routes nationales
Projet et direction des travaux souterrains:	Association d'ingénieurs GTS: Géotechnique appliquée P. & C. Dériaz & Cie SA et P. Amsler, géotechnique, fondations
Entreprise (lot «travaux souterrains»):	Association Tunnel de Vernier (ATV): SA Conrad Zschokke, Losinger SA, Prader SA, Murer SA, Rothpletz, Lienhard & Cie AG, H.R. Schmalz SA, Jean Spinedi SA
Travaux d'injections de consolidation (en sous-traitance):	Association: SIF-Groutbor et Swissboring SA
Projet et direction des travaux des zones de portails	
Portail Canada:	Bureau d'ingénieurs Sumi-Babel
Portail Avanchet:	S.G.I.

Il convient de relever ici que l'esprit de collaboration qui a présidé aux relations entre tous les intervenants, malgré certaines dissensions passagères inévitables dans la réalisation d'un ouvrage de cette importance, a permis de faire face à tous les imponderables et ce, dans le cadre des prévisions financières. Que chacun trouve ici l'expression de notre gratitude.

Bibliographie

Odier Michel: «Le tunnel de Vernier», in *Route et trafic* 74 (1988) 5, pp. 335-338

Hambach Peter et Odier Michel: «Der Vernier-Tunnel in Genf/Ch», in *Tunnel,* 8 (1988) 3, pp. 114-122

Crobet Denis et Odier Michel: «Aspects hydrogéologiques des travaux du tunnel de Vernier (Genève)», in *Water resources in mountainous regions, Internat. Assoc. of Hydrogeologists, Memoires, vol. 22, part. 2.* Lausanne, EPFL, 1990, pp. 1278-1285

Odier Michel, Hotellier J.-F. et Détraz H.: «Consolidation par injection d'une zone d'effondrement», communication à *Infrastructures souterraines de transports;* Journées d'études internationales de Toulon, 19-21 octobre 1993, (en préparation)

Pont d'Aigues-Vertes: vue aérienne