

Chantier acrobatique de remise en état du portail d'un tunnel

Tunnel de Serguignier sur la voie du Train de La Mure



Christophe BAUDIN



Alain BOCHON



Vincent COSTE



Franck SANGLERAT

SNCF, Ingénierie Sud-Est



Figure 1 - Des paysages superbes à découvrir depuis le train touristique.

Résumé

La tête sud du tunnel de Serguignier, réhabilitée avec sept autres ouvrages d'art du « Chemin de fer de La Mure », a donné lieu à un chantier particulier de par sa situation au pied d'une falaise, dans un grand éboulis descendant jusqu'au lac de Monteynard. L'ouvrage construit à la fin du 19^{ème} siècle constitue un obstacle à la course des blocs qui se détachent fréquemment de la falaise par un phénomène de dégradation naturelle. Les aménagements successifs de la tête du tunnel ne l'ont pas empêchée de subir les chocs des blocs et la poussée de l'éboulis. Il était donc nécessaire de restaurer sa stabilité structurelle tout en évitant dans la mesure du possible de lui faire subir de nouveau les mêmes agressions. Ce chantier, utilisant des techniques courantes mais dans une situation particulièrement exposée, a pu être mené à bonne fin grâce à la compétence du personnel des entreprises et à l'utilisation de matériel adapté.

Principaux intervenants

- Propriétaire : Conseil général de l'Isère.
- Exploitant : CFTA, filiale de Veolia Transport.
- Maître d'œuvre : SNCF Ingénierie Sud-Est.
- OPC : EUTEXY.
- Groupement d'entreprise : STPL (mandataire), GTS (cotraitant).

1 - Introduction

La gestion et l'exploitation du « Chemin de fer de La Mure », ligne touristique qui relie Saint-Georges-de-Commiers à La Mure, propriété de l'état, ont été confiées au Conseil Général de l'Isère en 1989. Depuis 1997, une délégation d'exploitation a été confiée à CFTA, filiale de Veolia transport. Le Département de l'Isère assure les travaux de gros entretien des infrastructures. D'importants investissements sont réalisés pour pérenniser la ligne. Ils concernent la voie, les ouvrages d'art et l'alimentation électrique. Dans ce cadre, une mission de maîtrise d'œuvre a été confiée à l'ingénierie SNCF pour la réhabilitation de sept petits ouvrages d'art et de la tête sud du tunnel de Serguignier.

2 - Historique de la ligne

Après la déclaration d'utilité publique de la ligne en 1881, pour acheminer le charbon des mines de La Mure à Grenoble, les travaux de construction sont entrepris en 1882 et achevés en 1885. L'inauguration a lieu en 1888. Grâce à sa voie métrique, ce chemin de fer épouse le relief de la montagne en suivant la vallée du Drac sur un parcours pittoresque de 600 mètres de dénivelé, du plateau de la Mathéysine à la vallée de l'Isère. Sur les 30 kilomètres de la ligne, on compte 122 courbes, 143 ouvrages d'art, 190 murs de soutènement, 18 tunnels, 6 viaducs et 3 grands ponts. Parmi les 18 tunnels, de longueur totale 4 257 m, 7 dépassent 250 m dont le tunnel de la Festinière, le plus long, avec 1071 m.

Chantier acrobatique de remise en état du portail d'un tunnel - Tunnel de Serguignier sur la voie du Train de La Mure

Tous les tunnels sont en courbe, certains à 100 m de rayon, leur déclivité varie de 22,5 à 27,5 pour mille. La vitesse de la ligne est de 30 km/h.

Une technique originale de terrassement

Pour la réalisation de la plateforme de voie sous la côte de Crozet, le terrassement dans la falaise fut réalisé le 23 mai 1885 par un bombardement au canon depuis la rive opposée du Drac. 103 obus furent nécessaires pour dessiner dans la montagne une entaille suffisante pour commencer les travaux.

Après avoir été exploitée plusieurs années en traction vapeur, la ligne est électrifiée en 1903 en courant continu haute tension (1200 puis 2400 Volt) à partir de l'usine hydroélectrique d'Avignonet sur le Drac, ce qui constitue une première mondiale. Elle transporte jusqu'à 621 000 tonnes de charbon en 1955 et 458 000 voyageurs en 1945. Le transport de charbon cesse complètement en 1988 pour être remplacé par les visites touristiques à partir de 1997, année de fermeture du dernier puits des Houillères du Bassin du Dauphiné. Ce train touristique transporte chaque année environ 80 000 passagers d'avril à octobre.



Figure 2 - Situation du tunnel de Serguignier (cercle bleu) sur la ligne de Saint-Georges-de-Commiers à La Mure.

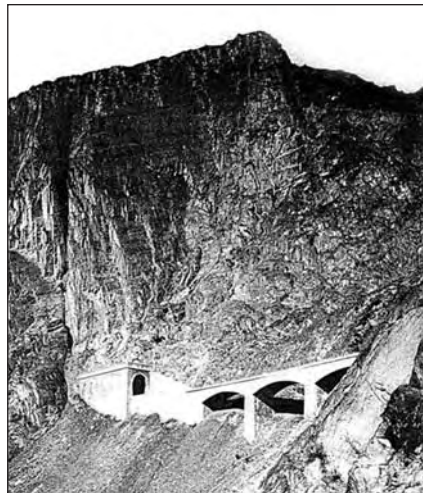


Figure 3 - La tête sud du tunnel et le viaduc entre 1894 et 1921.

2.1 - Le tunnel de Serguignier

Le tronçon de ligne sur lequel se situe le tunnel de Serguignier domine la vallée du Drac et le barrage

de Monteynard - Avignonet. La vitesse de la ligne est de 30 km/h. Ce tunnel de 310m de longueur a été mis en service en 1884. Son tracé est en courbe de rayon 100 mètres et le profil en long en rampe de 25 pour mille. Son ouverture est de 4 mètres en pied pour une hauteur de 6 mètres. La tête sud ainsi que le viaduc de La Clapisse qui lui fait suite sont situés au pied d'une falaise de 150 mètres de hauteur (figure 3), dans le grand cône d'éboullis alimenté par cette falaise (figure 4), et dominant de 200 m le lac de Monteynard (figure 5). La structure qui prolonge le tunnel en dehors du rocher est constituée de différentes parties en maçonnerie : appareillage en opus incertum pour le mur support de la plateforme et le piédroit côté aval (figure 11) ainsi que pour le tympan, moellons assisés pour le parement intérieur du tunnel. A l'origine, des murs bahuts surmontaient les piédroits et le tympan pour constituer une chambre d'éboullis garnie d'une épaisseur de matériau afin de protéger la tête du tunnel vis à vis des impacts des blocs.

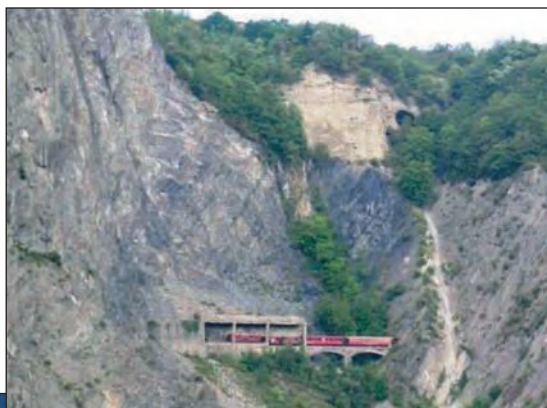


Figure 4 - Vue de la tête du tunnel, de la galerie de protection et du viaduc de la Clapisse depuis la rive opposée du Drac.



Figure 5 - Vue plongeante sur le barrage de Monteynard depuis la plateforme ferroviaire.

2.2 - La galerie de protection

L'ouvrage de la tête sud du tunnel était sensé protéger la plateforme ferroviaire, mais cette disposition s'est révélée rapidement insuffisante à cause de l'activité de l'éboulis. L'effet de barrage a provoqué une accumulation des blocs derrière le piédroit amont, modifiant peu à peu les trajectoires, et la plateforme ne se trouvait plus protégée. L'exploitant a donc prolongé cet ouvrage en 1894 par un mur triangulaire dans l'alignement du piédroit amont, puis une seconde fois en 1921 par une galerie de protection en béton armé. Cette galerie est constituée d'un mur amont et d'une couverture appuyée à l'aval sur une série de poteaux (figure 6). Le phénomène d'accumulation de blocs s'est poursuivi à l'arrière de chacun de ces deux ouvrages.



Figure 6 - La galerie de protection de 1921 et au fond le tunnel.

2.3 - Etat de la tête du tunnel

Une chambre d'éboulis représente une forte sujétion car elle doit être vidée périodiquement pour continuer à jouer son rôle de protection. La chambre d'éboulis située sur la tête du tunnel n'a pas été vidée pendant une longue période. L'accumulation et les chocs des blocs, ainsi que probablement les cycles gel-dégel en affaiblissant le matériau des joints de la maçonnerie, ont conduit à la destruction des murs bahuts sur une partie de leur hauteur, voire même sur la totalité dans certaines zones. La tête du tunnel se trouve ainsi surmontée d'une épaisseur d'éboulis dont la forme est donnée par la pente naturelle du matériau. Dans cette

configuration, l'ouvrage est protégé des chocs car les blocs peuvent continuer leur course vers le bas sans obstacle, et les murs bahuts surmontant le tympan et le piédroit n'ont plus d'utilité. Par contre, l'ouvrage supporte une charge importante et dissymétrique pour laquelle il n'a pas été conçu. De plus, les barbacanes assurant à l'origine l'évacuation de l'eau de la chambre d'éboulis ont été bouchées par des matériaux fins et la végétation s'y est installée.

Le rapport de l'inspection détaillée initiale d'octobre 2007 réalisé par la société Géolithe fait apparaître les avaries suivantes :

- Pierres de couronnement détruites et manquantes.
- Absence de terrain de couverture au droit de la voûte.
- Impacts de blocs rocheux provenant des falaises supérieures.
- Infiltrations d'eau de ruissellement dans l'ouvrage.
- Maçonneries éboulées ponctuellement.
- Déjointoiement des maçonneries.
- Dégradation ponctuelle des maçonneries (exfoliation).
- Fissuration transversale et oblique.
- Zone sonnante creux en tête d'ouvrage.

2.4 - Etat de la galerie de protection

Cette galerie de protection constitue, comme la tête du tunnel, un obstacle derrière lequel les éboulis se sont accumulés à l'arrière du mur amont et au-dessus de sa couverture sur une partie de sa longueur (figure 7). Cette charge a probablement provoqué un déversement de la structure vers l'aval, les têtes de poteaux semblant en léger surplomb par rapport à leur base. Les différentes parties de la galerie souffrent d'avaries dues aux infiltrations d'eau à travers sa couverture, particulièrement côté amont du fait de l'obturation des barbacanes : concrétions sur la face inférieure de la couverture et sur les différentes pièces de charpente, corrosion des aciers d'armature, éclatements du béton, fissures, etc.

3 - Les travaux de remise en état

Les études se sont déroulées de février à mai 2008 et les travaux de septembre à février 2009, avec des contraintes de coordination avec les travaux de régénération de la voie et de remplacement de la ligne aérienne de contact. Ils ont été réalisés par les entreprises STPL-ADS de Pontcharra-sur-Bréda,

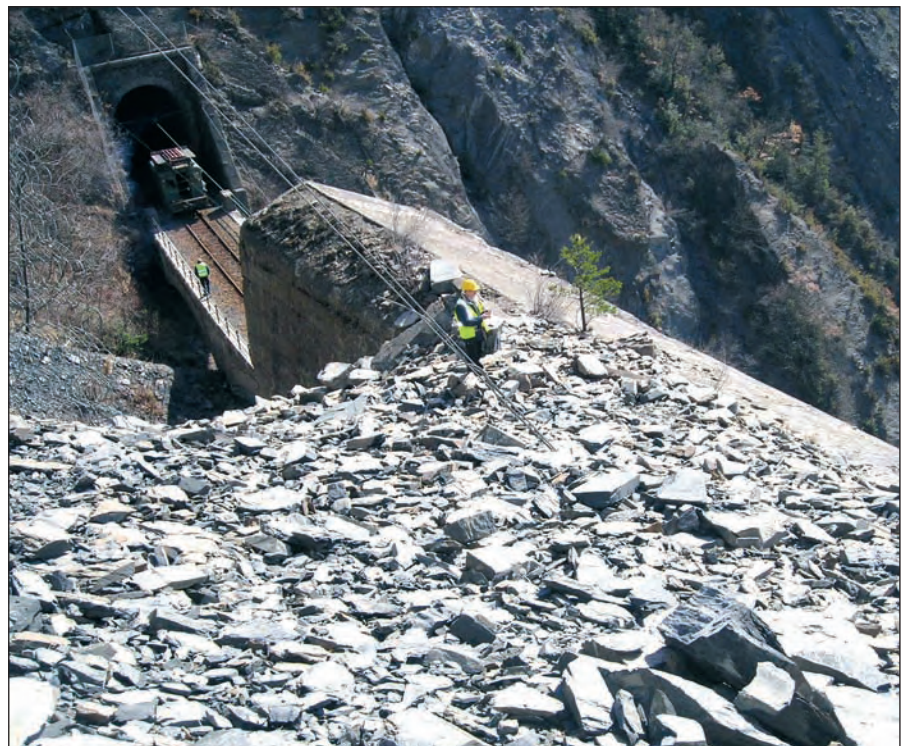


Figure 7 - Accumulation de blocs derrière la galerie de protection.



Figure 8 - Approvisionnement du chantier par train, mise en place par hélicoptère.

mandataire, et GTS de Saint-Priest, entreprise spécialisée en travaux géotechniques spéciaux et acrobatiques.

La circulation des trains ainsi que l'alimentation électrique de la ligne aérienne de contact sont interrompues pendant la durée du chantier. Celle-ci est déposée à terre et protégée par un fourreau. Tous les matériels, les matériaux, ainsi que tous les personnels sont acheminés par trains travaux depuis l'installation de chantier en gare de La Motte-Saint-Martin (figure 8).

3.1 - Mise en sécurité

La première phase de travaux a consisté à mettre le chantier en sécurité vis-à-vis des chutes de blocs. La falaise et l'éboulis ont été purgés. Un filet de protection de type avaloir en câbles métalliques avec des ancrages dans la falaise a été disposé au-dessus du chantier. L'accès et le travail sur l'éboulis sont difficiles et dangereux, y compris pour une pelle araignée (figure 9), et la purge de l'éboulis a été limitée au strict minimum permettant d'assurer la suite des travaux.



Figure 9 - Travail sur l'éboulis à la pelle araignée.

3.2 - Traitement de la chambre d'éboulis

La sécurité étant assurée, le chantier de régénération de la structure a pu être entrepris. Lors de l'étude d'avant-projet s'était présentée l'alternative suivante :

- soit tenter de restaurer une configuration de la tête du tunnel proche de l'origine, ce qui supposait de retirer une importante quantité de matériaux d'éboulis en situation instable, de mettre en place un complexe d'étanchéité recouvert d'une couche de matériaux de protection contre les chutes de blocs, et de reconstruire les murs bahuts ;
- soit réaliser le minimum de travaux au dessus de la tête du tunnel avec pour seul objectif la protection des maçonneries vis-à-vis des agressions mécaniques et des infiltrations d'eau.

La seconde solution a été retenue, considérant que la reconstruction des murs bahuts, outre les difficultés de réalisation, ne présentait aucune garantie de pérennité aux chocs, et aurait inévitablement provoqué une accumulation supplémentaire au-dessus de la structure. A l'inverse, en l'absence d'obstacle, il n'y a ni impact ni accumulation sur la structure, l'éboulis constituant une protection naturelle pour l'ouvrage.

Il était toutefois nécessaire de préserver les maçonneries structurelles du piédroit et du tympan en protégeant leur partie supérieure. Pour cela, après avoir dégagé la largeur nécessaire, un couronnement en béton projeté a été réalisé, épinglé dans la maçonnerie sous-jacente après qu'elle ait été purgée. La surface de ce couronnement a été réglée plane, parallèle à la plateforme ferroviaire et pentée vers l'aval pour l'évacuation de l'eau. Ce couronnement a ensuite été recouvert de matériaux d'éboulis jusqu'à proximité du bord de manière à assurer la continuité géométrique de la pente de l'éboulis, et ainsi éviter les chocs.



Figure 10 - Des conditions de travail particulières sur la tête du tunnel (injection d'étanchéité).

Restait à régler le problème des dégradations dues aux infiltrations d'eau depuis l'extrados. Afin d'étancher mais aussi de consolider la maçonnerie, des forages ont été réalisés depuis la surface, à travers l'éboulis, pour l'injection du terrain de couverture au dessus de la voûte avec du coulis de ciment (figure 10).

3.3 - Régénération de la structure de la tête du tunnel

Le mur support de la plateforme ferroviaire, côté aval, qui supporte également le piédroit de la tête du tunnel, devait être consolidé. Une ligne d'ancrages a été implantée à travers la partie basse de la maçonnerie saine et à travers le remblai soutenant la plateforme ferroviaire, avec scellement dans le rocher (figure 12).

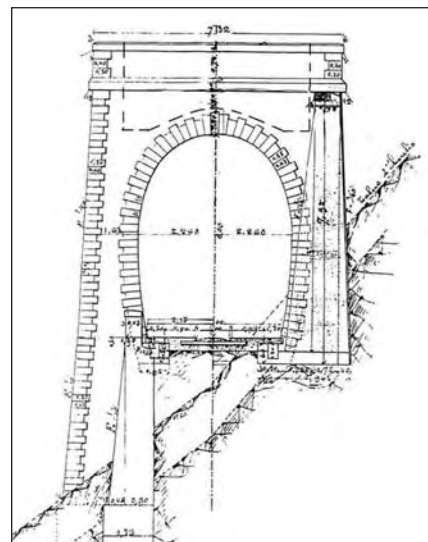


Figure 11 - Coupe transversale de la tête sud du tunnel.

Il était également nécessaire de reconstituer le monolithisme du piédroit et de la voûte dont les maçonneries étaient partiellement détériorées. Pour la consolidation du parement extérieur, il a été nécessaire de procéder à son débroussaillage et à

la dévitalisation des arbustes qui y avaient pris racine avant de rejointoyer la maçonnerie. Une longrine de pied a été réalisée pour permettre l'assise du revêtement en deux couches de béton projeté fibré épinglé à la maçonnerie sur l'ensemble du piédroit avec retour sur le dessus de la partie injectée de la voûte. Des barbacanes ont ensuite été mises en place, notamment en tête pour le drainage du remblai sur la voûte du tunnel. A l'intrados, après piquage et rejointoiment des maçonneries, une coque en béton projeté fibré a été constituée sur la voûte et les deux piédroits. Les tirants d'enserrement ont été mis en place dans des forages réalisés à travers le parement aval depuis l'intérieur du tunnel. Les croix de Saint-André situées à l'extérieur, exposées aux chutes de blocs depuis le dessus de la tête, ont ensuite été protégées par une couche de béton projeté (figure 12).

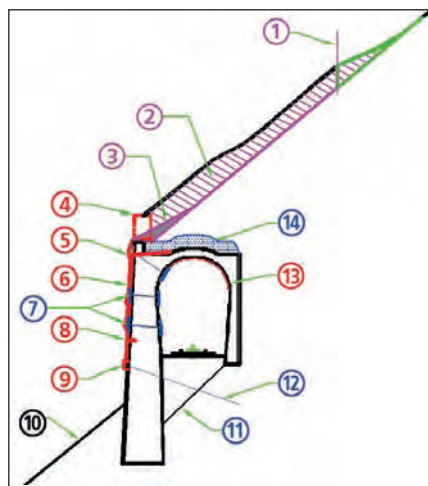


Figure 12 - Coupe schématique des travaux de la tête du tunnel : 1 Filet de protection - 2 Eboulis à purger - 3 Talus de protection - 4 Mur d'origine partiellement existant, à démolir - 5 Barbacanes - 6 Béton projeté fibré - 7 Tirants et croix de Saint-André - 8 Barbacanes - 9 Longrine de pied - 10 Talus - 11 Limite du substratum rocheux - 12 Ancrage de confortement - 13 Béton projeté fibré - 14 Zone injectée.

3.4 - Régénération de la galerie de protection

En l'état, le mur amont de la galerie considéré seul sous la poussée des éboulis accumulés à l'arrière semblait s'approcher de ses conditions limites de stabilité. Il a donc été nécessaire de l'ancrer dans le rocher, avec la difficulté du forage au travers des éboulis.

Après déblaiement des éboulis se trouvant sur la couverture, celle-ci a reçu une nouvelle étanchéité,



Figure 13 - Confortement du piédroit aval.

mise en place par l'extérieur, constituée d'une membrane étanche surmontée d'une protection mécanique (figure 14). Comme sur la tête du tunnel, les éboulis ont été remis en place au-dessus de la couverture pour lui restituer sa protection naturelle contre les blocs. Les avaries de la structure en béton armé ont ensuite fait l'objet d'un traitement approprié.

La nature retrouvant ses droits, l'éboulis a rapidement retrouvé sa pente naturelle après la fin du chantier (figure 15). Le chantier s'est déroulé sur six mois de début septembre 2008 à fin février 2009. Aucun accident n'a été à déplorer malgré les



Figure 14 - Application de la protection d'étanchéité sur la couverture de la galerie.

conditions de travail difficiles pour le personnel et pour l'utilisation du matériel. Les travaux ont permis de conforter la tête du tunnel et la galerie de protection pour leur permettre de soutenir la masse de l'éboulis que le temps et l'érosion naturelle avaient fait évoluer contre cet obstacle construit par l'homme. Le choix de ne pas modifier le profil dessiné naturellement par l'éboulis et de ne pas revenir à la structure d'origine, et donc d'intégrer géométriquement la tête du tunnel à l'intérieur de l'éboulis, garantit sa protection vis-à-vis des chutes de blocs. Ainsi remis en état, l'ouvrage est reparti pour plusieurs décennies de bons et loyaux services. ♦



Figure 15 - Confortement de l'ouvrage terminé, l'éboulis a repris son profil naturel.

Acrobatic work to restore a tunnel portal

Serguignier tunnel on the Train de La Mure line



Christophe BAUDIN



Alain BOCHON



Vincent COSTE



Franck SANGLERAT

SNCF, Ingénierie Sud-Est



Figure 1 - The tourist train offers some outstanding views.

Summary

The southern head of the Serguignier tunnel, renovated along with seven other infrastructures on the La Mure Railway Line, gave rise to an unusual worksite due to its location at the foot of a cliff, amidst talus descending to Lake Monteynard. The infrastructure, built at the end of the nineteenth century, represents an obstacle for rocks which frequently become detached from the cliff face due to natural erosion. Successive works on the tunnel head have not protected it from the impact of such blocks or the progress of talus. It was therefore necessary to restore its structural stability whilst also doing as much as possible to avoid it being subject to further phenomena of this type. This worksite, which used standard techniques in a particularly exposed situation, was successfully completed thanks to the skill of the contractors involved and the use of appropriate equipment.

Principal stakeholders

- Owner: **Isère Conseil général**
- Operator: **CFTA**, a subsidiary of **Veolia Transport**.
- Engineers: **SNCF Ingénierie Sud-Est**.
- Scheduling, management and coordination: **EUTEXY**.
- Contractor consortium: **STPL** (lead contractor) **GTS** (co-contractor).

1 - Introduction

Management and operation of the "Chemin de fer de La Mure", a state-owned tourist railway running between Saint-Georges-de-Commiers and La Mure, was entrusted to the Isère Conseil Général in 1989. It has been operated under contract by CFTA, a subsidiary of Veolia Transport, since 1997. The Isère Department is responsible for major infrastructure maintenance work. Extensive investments have been made to secure the line's long-term future. These relate to the track, infrastructures and electrification. As part of this, SNCF's engineering division was given responsibility for prime contracting relating to the renovation of seven small infrastructures and the southern head of the Serguignier tunnel.

2 - History of the line

The line was declared to be in the public interest in 1881 and was originally designed to carry coal from the mines of La Mure to Grenoble. Construction began in 1882 and was completed in 1885. The official opening took place in 1888. The line's one-metre gauge follows the lie of the mountain above the Drac valley along a picturesque route with a total altitude difference of 600m between the Matheysine plateau and the Isère valley. The 30km stretch of track includes 122 curves, 143 structures, 190 retaining walls, 18 tunnels, 6 viaducts and 3 large bridges. The 18 tunnels have a total length of 4,257m; 7 are over 250m long. The Festinière tunnel is the longest at 1,071m.

All the tunnels are curved, some with a radius of 100m and gradients of between 2.25 and 2.75%. The line speed is 30km/h.

An unusual earthworks technique

To construct the track bed beneath the Crozet escarpment, earthworks were carried out on May 23, 1885 by bombarding the cliff with artillery fire from the opposite bank of the Drac. 103 shells were required to cut out a large enough notch to commence works.

After having been operated under steam power for a number of years, the line underwent high-voltage DC electrification in 1903 (1200V, subsequently 2400V), powered by the Avignonet hydroelectric power station on the Drac - a world first. It carried as much as 621,000 tonnes of coal in 1955 and as many as 458,000 passengers in 1945. Coal transport finally came to an end in 1988 and was replaced by tourist traffic from 1997 onwards - the year the last mine operated by Houillères du Bassin du Dauphiné closed. Each year, the tourist train carries some 80,000 passengers between April and October.



Figure 2 - Location of the Serguignier tunnel (blue circle) on the line between Saint-Georges-de-Commiers and La Mure.



Figure 3 - Southern tunnel head and the viaduct as they were between 1894 and 1921.

2.1 - The Serguignier tunnel

The section of line on which the Serguignier tunnel is located overlooks the Drac valley and the Monteynard - Avignonet dam. The line speed is 30km/h. The 310m-long tunnel was commissioned in 1884. The tunnel has a 100-metre radius curve and a profile with a 2.5% incline. It is 4 metres wide at the base and 6 metres high. The southern head of the tunnel and the Clapisse viaduct immediately following are located at the foot of a 150m-high cliff (figure 3) amid a large fan-talus fed by the cliff (figure 4), 200m above Lake Monteynard (figure 5). The structure extending the tunnel beyond the rock is made of various masonry sections: opus incertum bonding for the track bed support wall and the downside side wall (figure 11) as well as the spandrel, with bedded stone lining the inside of the tunnel. Originally, coped walls stood above the side walls and spandrel to form a scree chamber, with a layer of material to protect the tunnel head from the impact of falling rocks.



Figure 4 - View of the tunnel head, the protective gallery and the Clapisse viaduct from the opposite bank of the Drac.



Figure 5 - Overview of the Monteynard dam from the railway platform.

Acrobatic work to restore a tunnel portal - Serguignier tunnel on the Train de La Mure line

2.2 - The protective gallery

The southern tunnel head infrastructure was designed to protect the track bed, but rapidly proved inadequate due to the amount of talus activity. A damming effect led to a buildup of rocks behind the upside side wall, gradually changing the route of falls, as a result of which the track bed was no longer protected.

Consequently, in 1894 the operator added to the infrastructure, with a triangular wall extending from the upside side wall, then again in 1921 with a reinforced concrete protective gallery. This gallery consists of an upside wall and a roof supported on the lower side by a series of pillars (figure 6). However, rockfalls continued to build up to the rear of each of these two structures.



Figure 6 - The 1921 protective gallery with the tunnel in the background.

2.3 - State of the tunnel head

A scree chamber involves considerable additional work, since it must be cleared from time to time if it is to continue to offer protection. The scree chamber located at the tunnel head had not been cleared for some time. The buildup of rocks and their impact, probably exacerbated by freeze-thaw cycles weakening masonry jointwork, had led to the partial collapse of the coped walls or even their total collapse in some places.

This led to a layer of talus, shaped by the natural incline, building up above the tunnel head. This state of affairs meant the infrastructure was protected from impacts, since the rocks could continue to fall without meeting any obstructions, while the coped walls above the spandrel and the side wall no longer served any purpose. However, the structure was bearing a considerable, skewed load for which it was not designed. Moreover, the weep holes which originally ensured water drainage from the scree chamber had been blocked by fine materials and vegetation.

In October 2007, the detailed initial inspection report carried out by Géolithe revealed the following damage:

- Destroyed and missing coping stones.
- Absence of cover material above the arch
- Impacts of rocks falling from the cliffs above.
- Runoff water ingress into the structure.
- Collapsed masonry in places.
- Disjointed masonry.
- Damaged masonry in places (flaking).
- Transverse and oblique cracking.
- Hollow-sounding area at the tunnel head.

2.4 - State of the protective gallery

Like the tunnel head, this protective gallery represents an obstacle behind which scree had built up behind the upside wall and above its roof for part of its length (figure 7). This load probably caused downward lateral buckling of the structure; the tops of the pillars appeared to be leaning forwards slightly compared to their base. Various parts of the gallery had suffered damage due to water ingress through the roof, especially on the upper side due to blockage of the weep holes: concretions on the inside of the roof and various frame components, corrosion of steel reinforcements, concrete spalling and cracking, etc.

3 - Repair works

Studies were conducted between February and May 2008 and work itself between September and February 2009, with coordination issues relating to track renovation and overhead line replacement. Work was carried out by STPL-ADS from Pontcharra-sur-Bréda, lead contractor, and GTS

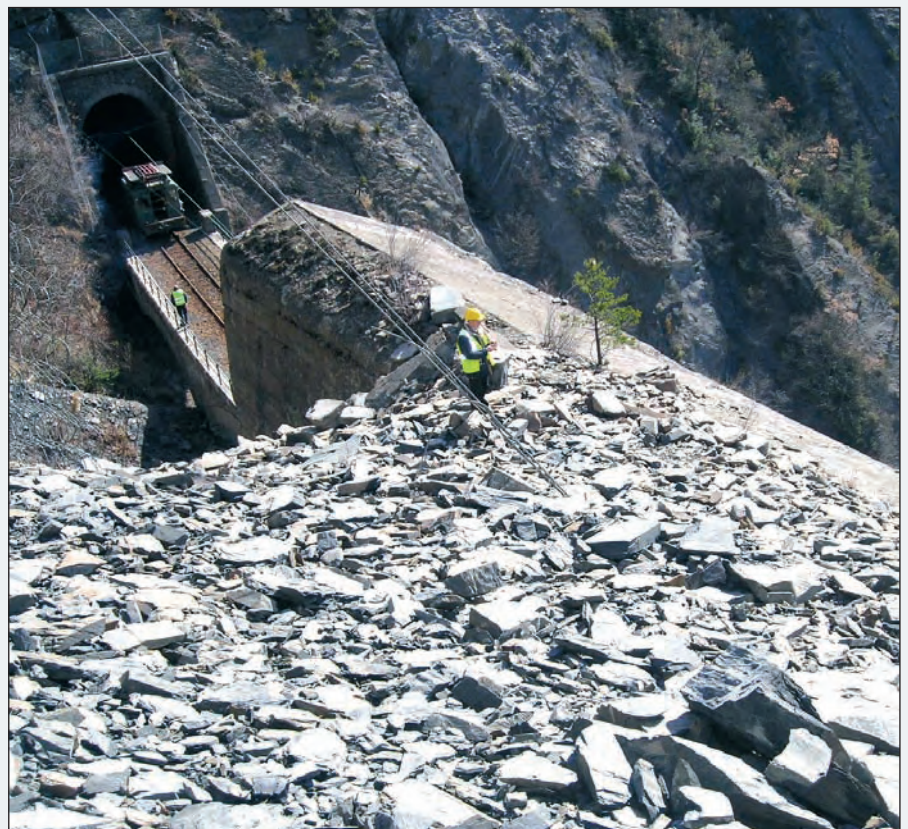


Figure 7 - Buildup up of rocks behind the protective gallery.



Figure 8 - Supply of the worksite by train and installation by helicopter.

from Saint-Priest, a contractor specialising in special geotechnical and rope works. Rail traffic and the overhead electrical power supply were halted throughout the duration of works. The worksite was placed on the ground and protected by a sheath. All equipment, materials and personnel were transported by works trains from the worksite installation at La Motte-Saint-Martin station (figure 8).

3.1 - Making the site safe

The first phase of works involved making the site safe from falling rocks. The cliff and talus were cleared. A funnel-type protective net of steel cables anchored to the cliff was installed above the worksite. Access and works on the talus were difficult and dangerous - including for a walking excavator (figure 9); clearance of the talus was kept to the minimum required to allow further works.



Figure 9 - Work on scree using walking excavator.

3.2 - Scree chamber works

Once the site had been made safe, restoration work on the structure could begin. The preliminary design study had offered two alternatives:

- either attempting to restore a tunnel head layout similar to the original, which would have involved removing a considerable amount of unstable talus, installing a waterproofing complex covered with a layer of material to protect against falling rocks, and rebuilding the coped walls;
- or carrying out minimal work above the tunnel head with the sole aim of protecting blockwork from mechanical attack and water ingress.

The second solution was adopted on the basis that aside from the construction difficulties involved, rebuilding the coped walls offered no guarantee of long-term effectiveness against impacts and would inevitably have caused additional buildup above the structure. Conversely, in the absence of any obstacles, the structure would not be exposed to buildup or impacts, since the talus forms a natural protection.

However, it was necessary to preserve the structural blockwork of the side wall and spandrel by protecting the top part of these components. This was achieved by clearing the required length and then installing a shotcrete coping, pinned to the adjacent masonry once this had been cleaned. The coping surface was finished flat, parallel to the track bed and inclined downwards to allow water drainage. This coping was then covered with talus material up to its edge, in order to maintain the geometric continuity of the talus slope and thus prevent impacts.

The problem of damage due to water ingress from the upper surface then had to be addressed. In



Figure 10 - Exceptional working conditions at the tunnel head (waterproofing injection).

order to waterproof and consolidate the masonry, boreholes were sunk from the surface, through the talus, to inject the cover material above the arch, along with cement grouting (figure 10).

3.3 - Renovating the tunnel head structure

The supporting wall of the track bed on the downward side, which also supported the tunnel head side wall, required reinforcement. An anchor line was installed across the bottom of the sound blockwork and across the backfill supporting the track bed, and sealed into the rock (figure 12).

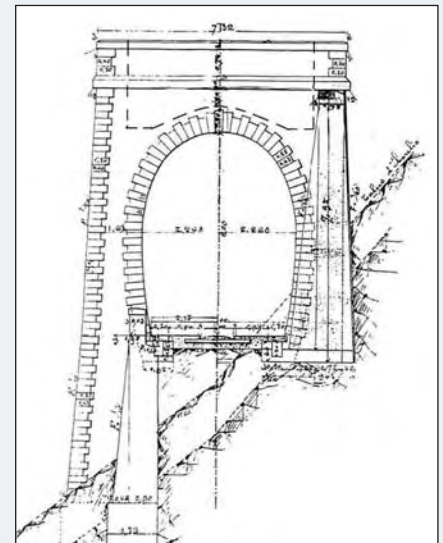


Figure 11 - Cross-section of the southern tunnel head.

It was also necessary to consolidate the side wall and arch, of which the blockwork was partially damaged. To consolidate the external lining, it first needed to be cleared; the bushes which had taken root

Acrobatic work to restore a tunnel portal - Serguignier tunnel on the Train de La Mure line

also had to be devitalised prior to repointing the masonry. A bottom beam was built to provide a base for the two-layer fibre-reinforced shotcrete pinned to the masonry across the whole of the side wall, overlapping with the top of the injected section of arch. Weep holes were then installed, particularly at the head for drainage of the backfill above the tunnel arch. On the inner side, after tapping and pointing of blockwork, a fibre-reinforced shotcrete shell was formed to cover the arch and side walls. The clamping ties were installed in the boreholes drilled through the downside lining from within the tunnel. The diagonal cross pieces located on the outside, exposed to rocks falling from above the tunnel head, were then protected by a layer of shotcrete (figure 12).

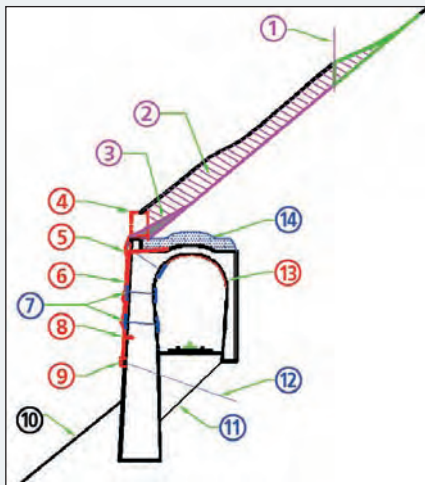


Figure 12 - Cross-sectional diagram of tunnel head works: 1 Protective netting - 2 Scree to be cleared - 3 Protective talus - 4 Remains of original wall, to be demolished - 5 Weep holes - 6 Fibre-reinforced shotcrete - 7 Ties and cross pieces - 8 Weep holes - 9 Bottom beam - 10 Talus - 11 Limit of rock substrate - 12 Supporting anchor - 13 Fibre-reinforced shotcrete - 14 Injected area.

3.4 - Restoring the protective gallery

In its existing condition and viewed in isolation, the upside wall of the gallery appeared to be reaching the limits of its stability, due to the weight of the buildup of scree behind it. It was therefore necessary to anchor it in the rock, with the difficulty of drilling through the scree.

After removing the talus on top of the roof, the latter received new waterproofing, applied from the outside, consisting of a waterproof membrane beneath mechanical protection (figure 14). As for the tunnel



Figure 13 - Strengthening the downside side wall.

head, the scree was replaced above the roof in order to provide natural protection against falling rocks. Damage to the reinforced concrete structure was then repaired as appropriate.

As nature took its course, the scree quickly recovered its natural incline after the end of works (figure 15). Work was conducted over a six-month period, from the start of September 2008 to the end of February 2009. Despite difficult working conditions for personnel and for using the equipment, there were no accidents. These works made it possible to strengthen the tunnel head and protective gallery,

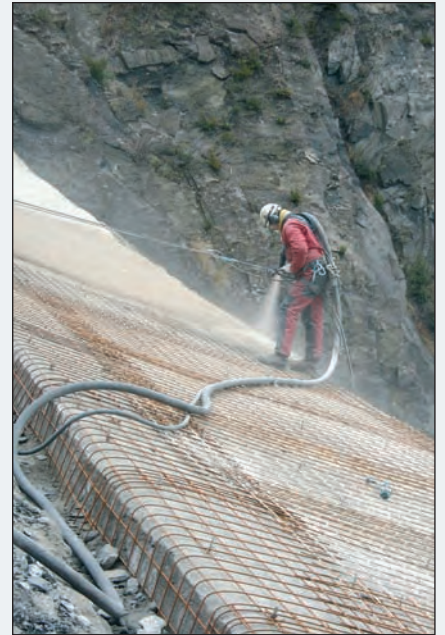


Figure 14 - Applying waterproofing protection to the gallery roof.

allowing them to support the mass of talus which time and natural erosion had brought to bear on this man-made obstacle. The decision not to alter the natural profile of the scree and not to revert to the original structure, choosing rather to incorporate the tunnel head geometrically within the talus, ensured that it would be protected from rockfalls. Thus restored, the structure is once again fit for service for several decades to come. ♦



Figure 15 - After the structure had been strengthened, the talus recovered its original form.