

GRAND DEBLAI EN VERSANT INSTABLE – RECONSTRUCTION DU VIADUC DU CHARMAIX (73 MODANE)

HIGH EXCAVATION IN AN UNSTABLE SITE – THE NEW CHARMAIX VIADUCT (SAVOIE, FRANCE)

Bruno MAZARÉ¹, Nicolas MICHÉ² Jérôme PALISSE¹, Magali FRAYSSINES³

¹EGIS GEOTECHNIQUE (STRUCTURE & ENVIRONNEMENT), Seyssins, France

²SFTRF, Modane, France

³Ex- EGIS GEOTECHNIQUE, Grenoble, France

RÉSUMÉ – Le viaduc du Charmaix subit des efforts parasites liés à sa construction sur un versant instable. Ses fondations ayant fait l'objet d'une reprise en sous œuvre d'efficacité limitée dans le temps, SFTRF a engagé les études et travaux de construction d'un nouveau viaduc. L'article présente le contexte géotechnique du site, la conception des fondations et murs de soutènement, les difficultés rencontrées lors des travaux et les moyens mis en œuvre pour les surmonter.

ABSTRACT – The Charmaix Viaduct suffered parasitic stresses due to the movement of a mountain's slide slope. This viaduct underwent a partial recovery of its foundation through the nineties. SFTRF launched studies and works to rebuild a new viaduct at the uphill proximity of the actual one. This paper presents the particular conditions of the site, the design for high excavation and open cut for foundation, difficulties that underwent during construction and the means used to overcome them.

1. Contexte : historique et principes de conception

L'accès côté France au tunnel du Fréjus (France-Italie) est relié à l'A43 par une route de 4,5 km à flanc de montagne mise en service en 1980. Cette route franchit le ravin du torrent du Charmaix par un viaduc VIPP de 346m en 9 travées (Figure 1).

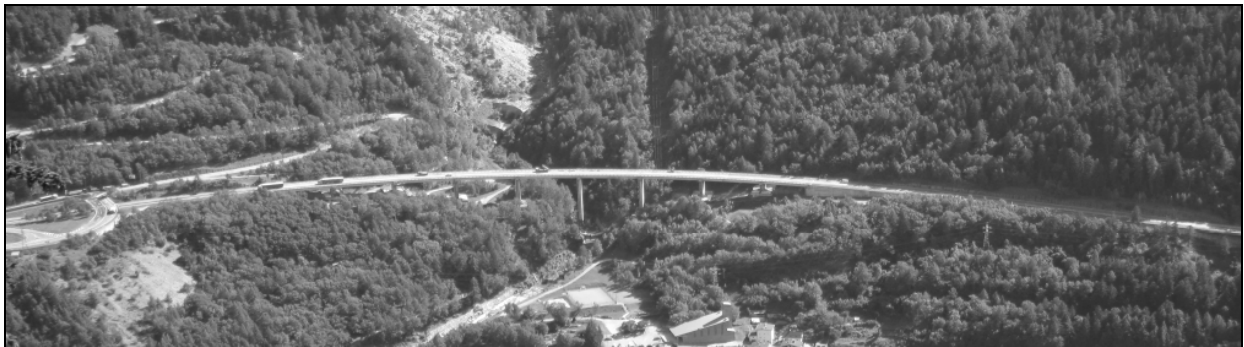


Figure 1 : Vue de l'ancien Viaduc du Charmaix

Depuis sa construction l'ouvrage subit des efforts parasites liés à sa construction dans un glissement de versant.

La Société Française du Tunnel Routier du Fréjus (SFTRF), propriétaire de l'ouvrage, a engagé entre 1986 et 1990 des études et des travaux pour prolonger la vie du viaduc. Une solution a été proposée par J. Tonello en 1985 puis mise en œuvre : création d'une interface au niveau des pieds de piles pour permettre leur recalage. Ces manœuvres ont ensuite eu lieu à intervalles réguliers jusqu'en 2003. Mais ce dispositif n'étant conçu pour compenser le mouvement de versant que sur une quarantaine d'années, après 3 opérations de recalage entre 1986 et 2003, SFTRF a lancé sans plus attendre les études pour la reconstruction d'un nouveau Viaduc du Charmaix sur la base d'un EPOA.

Le principe de construction du nouveau viaduc est le suivant :

- Construction du nouveau viaduc à l'amont de l'ancien pour permettre une exploitation de ce dernier jusqu'à mise en service du nouvel ouvrage dont l'exploitation est prévue pour 100 ans,
- Reprise du principe de réparation engagé, à savoir construction d'appuis dérivant avec le mouvement du versant mais présentant des sur-largeurs pour permettre un recalage du tablier, à l'exception de la pile P2 en rive gauche.

SFTRF a lancé sur ce principe une consultation de Maîtrise d'Œuvre, confiée à Egis en 2013. Les études géotechniques qui restaient à mener étaient les suivantes :

- Reconnaissances nécessaires à la conception des fondations et murs de soutènement de grande hauteur en site instable,
- Instrumentation en vue de l'appréciation des mouvements prévisibles à 100 ans et conception des appuis du viaduc en conséquence,
- Conception et dimensionnement des soutènements de grande hauteur en versant instable et suivi,
- Rédaction du marché de travaux et suivi des travaux de terrassement et de fondation dans ce site instable.

2. Contexte géologique et géotechnique

La zone du projet (encadré Figure 2) se situe à l'amont de Modane dans la zone Houillère briançonnaise (zone briançonnaise externe). Le torrent du Charmaix a inscrit son lit dans cette formation (Houiller et quartzites Triasiques). Ce versant est aussi recouvert par d'importants dépôts (éboulis, moraines).

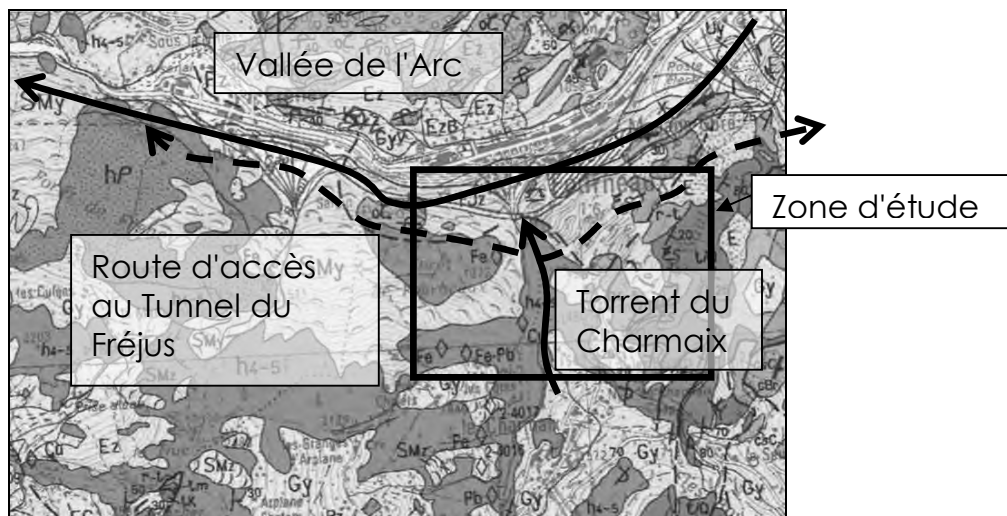


Figure 2. Carte géologique Névache-Bardonecchia-Modane à 1/50 000 du BRGM

Les reconnaissances ont mis en évidence les terrains suivants (voir Figure 3) :

- De 0 à 12/20m : des remblais, *éboulis et moraines peu compactes à moyennement compactes*,
- De 12/20m à 20 m (rive gauche), 40 / 50 m (rive droite) : *moraines sur-consolidées*. Sable limoneux riche en cailloux et blocs rocheux,
- Au-delà : *rocher altéré à fracturé*. Le substratum (schistes anthraciteux du Houiller) très tectonisé est surmonté par une frange d'altération silteuse gris-noir plastique.

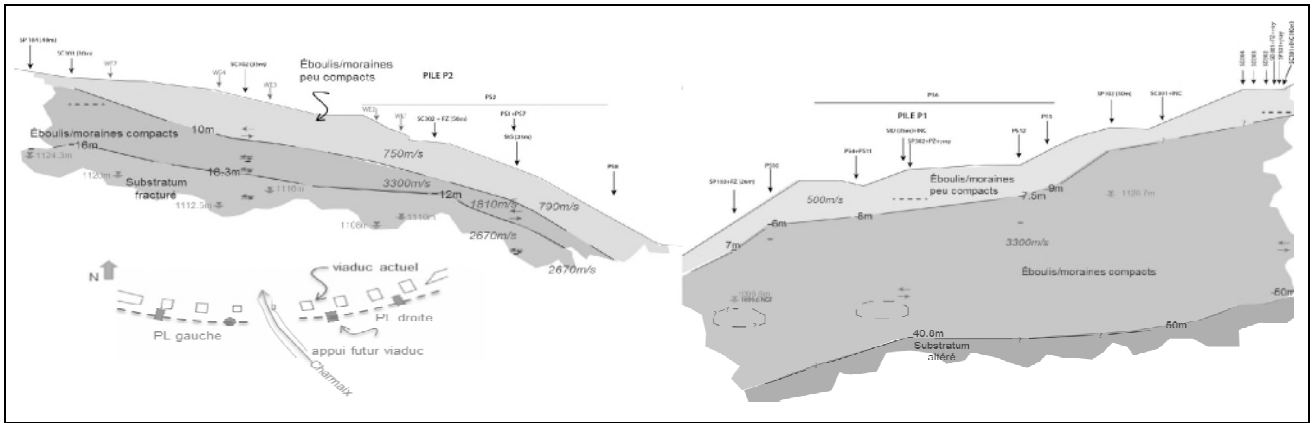


Figure 3 : Profil en long géotechnique schématisé rive gauche et rive droite

Les piézomètres ont montré la présence d'une nappe aquifère d'écoulement au sein de moraine et éboulis, au toit des schistes altérés. Par contre, les piézomètres sélectifs mise en œuvre n'ont pas mis en évidence de nappe en charge dans le rocher fracturé. La période de fonte des neiges marque une remontée des niveaux d'eau entre avril et juin environ.

Au stade étude, une analyse géomorphologique du site réalisée à partir d'un lever LIDAR et des observations de terrains a permis de préciser la géométrie des grandes instabilités affectant ce versant ; instabilités concomitantes à la fonte du glacier de l'Arc. Par perte de butée, rocher altéré, moraines et éboulis ont subi un mouvement de glissement généralisé, pour retrouver ensuite un état d'équilibre précaire.

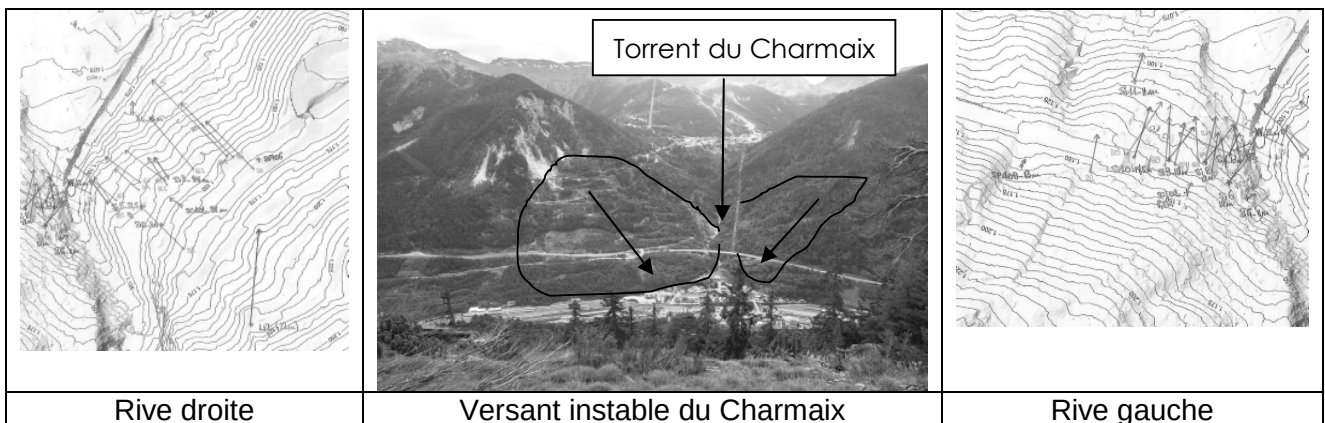


Figure 4 : Vue du versant et vecteurs déplacement

Des inclinomètres ont permis de repérer des surfaces de glissement à l'interface moraine/rocher altéré et au sein des moraines et éboulis avec des vitesses de déplacement similaires. La rive gauche s'est avérée plus délicate à traiter en raison d'une surface de glissement à plus faible profondeur associée à des déblais de grand hauteur. Inclinomètres et mesures topographiques disponibles depuis 1980, ont permis d'évaluer la vitesse de glissement au droit des futurs appuis à 4mm/an en rive gauche (figure 4).

3. Conception des grands déblais et fouilles d'appuis en rive gauche

Le projet en rive gauche cumulait les principales difficultés géotechniques suivantes :

- Pente moyenne du versant de 30°, voire plus en berges du torrent,
- Toit du rocher et surface de glissement à faible profondeur sous les niveaux de terrassement prévus,
- Nappe d'écoulement au sein des moraines et éboulis, au toit des schistes altérés.

Il nécessitait des travaux de terrassement en déblai importants :

- Fosse d'assise de la culée rive gauche (radier),
- Pile P2 conçue comme fixe et donc fondée au rocher à grande profondeur (figure 5),
- Déblai de raccordement entre route existante et nouveau viaduc conduisant à un soutènement de plus de 15 m de hauteur (mur du Freney – figure 5).

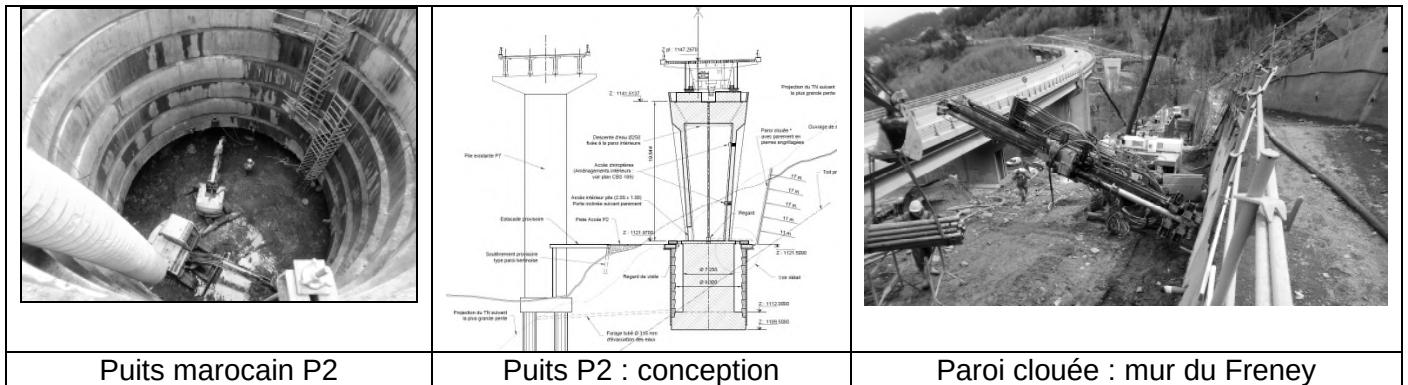


Figure 5 : puits et virolles de l'appui P2 "fixe" et paroi clouée du Freney

Le principe constructif retenu a été le suivant :

- Réalisation de murs cloués excavés par passes verticales de 1.8 m et par plots pour éviter de déstabiliser le versant en phase travaux : Clous HA 40 mm de 26 ml maximum ; forage à l'eau ; scellement IGU (la réalisation de tirants d'ancrage n'a pas été retenue, ceux-ci risquant à terme de se mettre en surtension sous l'effet du mouvement de versant) ; renforcement local du pied de mur le plus haut par des inclusions rigides métalliques verticales,
- Réalisation de réseaux de drains subhorizontaux de grande longueur (> 30m) réalisés en cours de construction pour rabattre le niveau d'eau au fur et à mesure des terrassements,
- Appui fixe du viaduc réalisé à l'abri d'un puits marocain circulaire servant de virole protectrice au fut du viaduc (espace calculé pour une durée d'exploitation de 100 ans, basé sur l'exploitation du suivi topographique sur 35 ans ; déplacement horizontal retenu de 40 cm environ),
- Renforcement de la portance du sol de fondation sous la partie aval du radier de la culée par un réseau de colonnes de jet grouting, en raison de la forte pente aval.

4. Méthodologie de calculs des murs

Il est exceptionnel de construire un ouvrage neuf dans un site instable. La méthodologie de calcul en vue de la conception de ces ouvrages a donc dû être adaptée.

Les conditions géotechniques du site étant reconnues (lithologie, extensions

amont et aval des surfaces de glissement, profondeur et niveau de la nappe), les paramètres géo-mécaniques ont été calés par les « calculs en retour » caractérisés par des coefficients partiels unitaire proche de 1 en statique. A partir de cet état de référence, les phases travaux et définitive ne devaient pas dégrader ce coefficient de sécurité d'ensemble aux coefficients partiels unitaires. Cette analyse a été complétée par la justification normative (NF P 94-270) en statique et au séisme mais limitée à des ruptures « locales » dites aux « 3H » (H étant la hauteur du déblai ou du remblai créé). Pour cela, le nombre et la longueur des clous ont été calculés et la longueur des drains subhorizontaux adaptée au rabattement escompté de la nappe. Cette analyse a conduit à

renforcer le pied du soutènement le plus haut par des inclusions rigides verticales (justification au séisme).

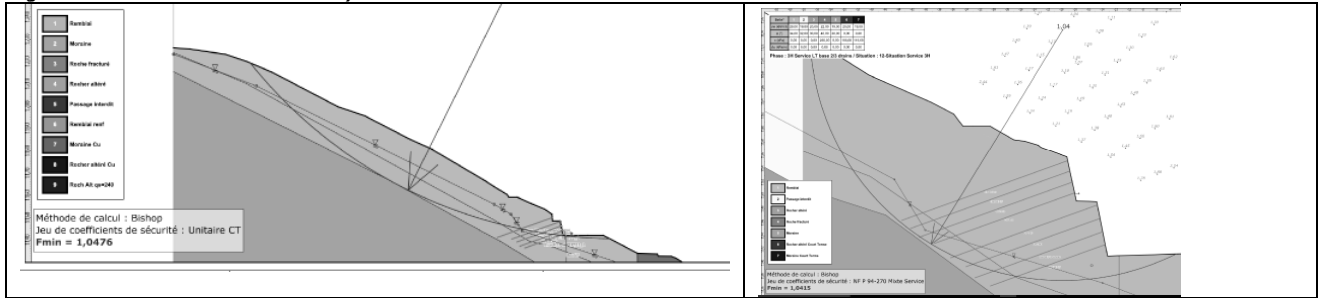


Figure 6 : Analyse de stabilité : versant et zones dite des « 3H »

5. La phase travaux

L'appel d'offre travaux a été remporté par Bouygues associé pour les travaux de clouage et terrassement à Benedetti-Guelpa. Bouygues s'est adjoint, pour ses études d'exécution géotechniques les BE Sage et SAS.

5.1 Surveillance en phase travaux

A vu des enjeux importants en terme de stabilité, un dispositif d'auscultation a été mis en place au démarrage des travaux et suivi de façon hebdomadaire en cours de travaux :

- Pluviométrie et température (Bouygues),
- Tiltmètres sur les différents murs en phase de construction (Bouygues),
- Prismes de longue portée (visés depuis le versant opposé) disposés sur l'ensemble du terrain, viaduc, et murs de soutènement ; relevés en X, Y, Z (Mesures Alpes pour Bouygues) ; suivi automatique local depuis le viaduc existant pour les phases d'excavation les plus sensibles,
- Piézomètres relevés en automatique (Sage pour Bouygues),
- Inclinomètres relevés manuellement et relevé en automatique pour 3 d'entre eux situés en amont du mur le plus haut, (Sage pour Bouygues),
- Extensomètres à bagues multipoints implantés de façon subhorizontale au droit des murs en construction et scellés au rocher (Egis pour SFTRF),
- Clous extensométriques (procédé Egis) constitués de barre creuses Ischebek munies de jauges de déformation (Egis pour SFTRF),

Lors du premier arrêt hivernal un suivi interférométrique a été mis en place pour surveiller le site à partir du versant opposé (Egis pour SFTRF),

Le suivi de ces instruments s'est fait en continu, les mesures étant comparées aux seuils de vigilance et d'alerte préalablement définis, afin d'adapter en permanence la cadence des travaux aux réactions du versant.

5.2 Difficultés rencontrées

Les principales difficultés ont été rencontrées lors du forage des clous et des drains subhorizontaux : forage de grande longueur, dans des terrains difficiles (moraine à blocs de roches cristallines, passées pulvérulentes, contraste de compacité avec les silts plastiques du Houiller altéré, présence d'une nappe de versant).

La technique du forage à l'air au marteau fond de trou avec tubage partiel s'est avérée très préjudiciable à la stabilité des terrains dominant le mur et cela plus particulièrement en rive gauche où la surface de glissement de versant se situe à plus faible profondeur. Ce phénomène a pu être constaté lors d'autres interventions sur sites en stabilité

précaire. A plusieurs reprises le chantier a dû être arrêté en raison d'une accélération dangereuse des terrains en glissement.

En cours de chantier, un panel d'expert a été consulté pour une planche d'essai afin d'arrêter la méthode de forage la mieux appropriée vis-à-vis des mouvements de terrain. Le consensus qui en est ressorti était le suivant :

- Forage à l'eau avec tubage à l'avancement dans les terrains meubles ; marteau fond de trou hydraulique (ODEX) ; la solution d'un forage poussé hors trou avec excentrique s'est avérée non suffisamment performante (refus prématuré sur des blocs),
- Mise en place de l'armature et première injection de gaine sous tubage (pression 1MPa),
- Scellement IGU réalisé 12 h plus tard,
- Pianotage entre forages pour éviter des mises en communication de coulis entre forages,
- Suivi en continu des déplacements,

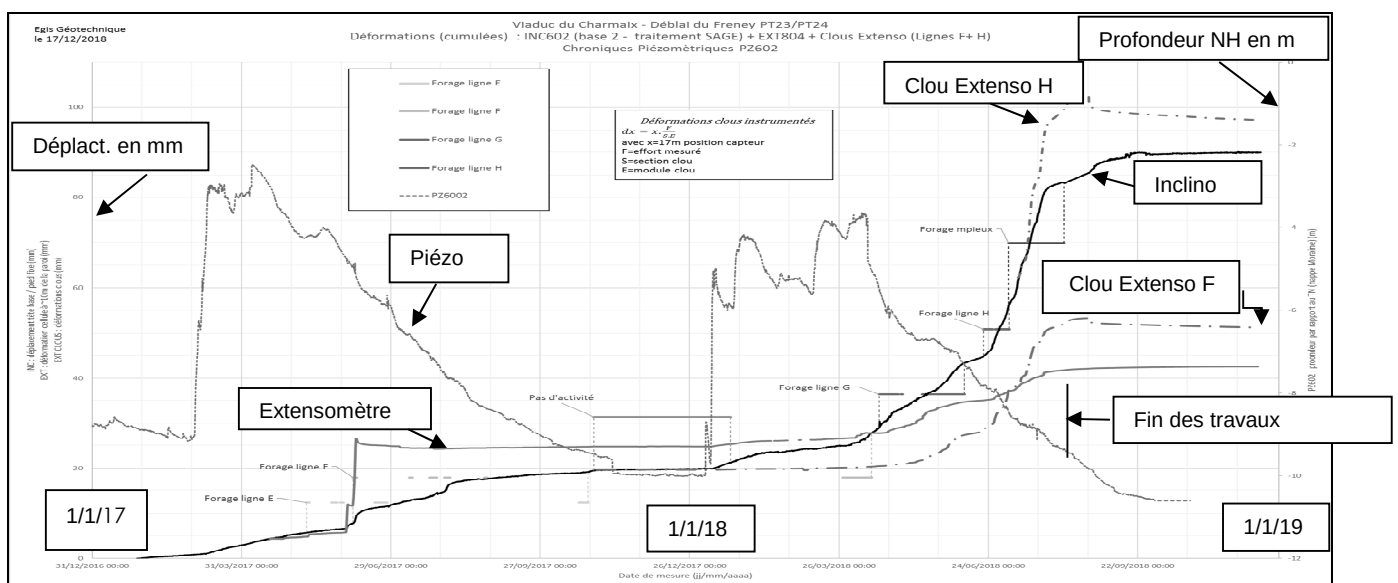
Le chantier s'est poursuivi selon cette technique ; le tubage toute longueur dans les terrains morainiques s'est avéré nécessaire pour maîtriser les déplacements. La totalité des murs a été réalisée sans avoir à déplorer une réactivation locale du versant, comme cela avait été le cas en 1980 lors de la construction du viaduc de Fourneau.

5.3 Synthèse de l'auscultation après la fonte de neige 2019

Les travaux de réalisation des terrassements et murs cloués en rive gauche se sont terminés en fin d'été 2018. Quelques mouvements inquiétants, liés aux forages, ont eu lieu jusqu'à la fin des travaux, ce qui a conduit à ne pas réaliser la totalité des inclusions rigides verticales prévues en pied de mur le plus haut.

Depuis cette date le chantier est toujours sous surveillance. Le dispositif d'auscultation (inclinomètres et extensomètres) a montré que malgré des épisodes pluvio-neigeux importants soulignés par des remontées temporaires des niveaux d'eau, les soutènements ainsi construits se sont comportés comme escompté, notamment lors de la fonte des neiges : décélération des mouvements à l'issue des travaux de forage et retour à la vitesse de glissement moyenne du versant avant travaux.

Figure 7 : Synthèse piézométrie – inclinométrie de 2016 à fin 2018 – Mur du Freney



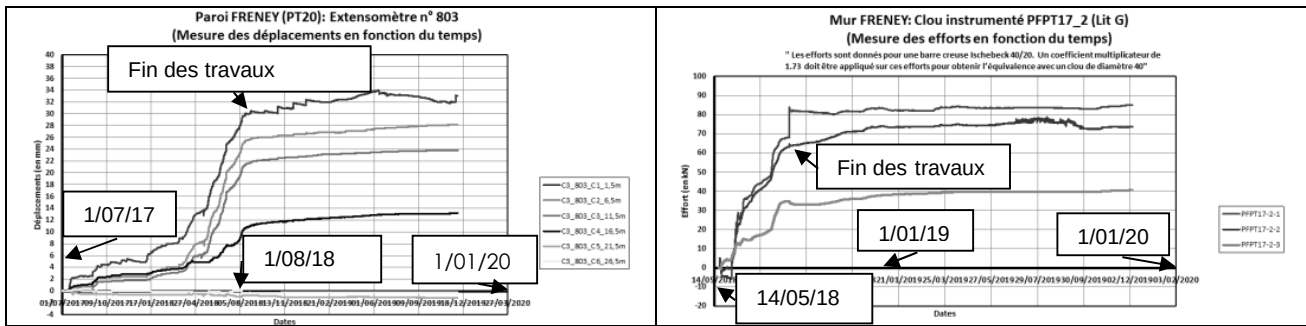


Figure 8 : Suivi 2018 -2019 Extensomètre et clou extensométrique

6. Conclusion

Le chantier de reconstruction du viaduc du Charmaix s'est avéré exceptionnel dans la mesure où il a conduit à réaliser des déblais de grande hauteur (15 m maximum) dans un versant soumis depuis des décennies à un mouvement de versant d'activité annuelle centimétrique.

La conception des murs de soutènement a été faite de manière à ne pas s'opposer aux mouvements naturels tout en restant stable localement (zone dite des 3H). Les murs ancrés mis en œuvre lors de la construction de l'autoroute en 1980 ont fait place à des murs cloués. D'importants travaux de drainage par drains subhorizontaux ont été associés à ces murs ; de fortes circulations d'eau au sein de la moraine ont ainsi été interceptées ce qui a renforcé la stabilité locale des soutènements.

La méthode de forage a dû également être adaptée afin de maîtriser les mouvements engendrés par la phase de forage. On retiendra que dans cette moraine granulaire à matrice silto sableuse, sous nappe, l'air a un effet déstabilisateur important en cas de terrains proches de la limite de stabilité. Le forage à l'eau s'est avéré nettement moins perturbateur, même si des volumes d'eau importants ont dû être injectés.

Enfin on notera le rôle déterminant de l'auscultation automatique (piézomètres, inclinomètres, topographie, extensomètres) pour piloter la réalisation des forages et terrassements provisoires sans déclenchement d'instabilité (plusieurs arrêts de chantier).

Les résultats de l'auscultation un an après la phase travaux et après un cycle de fonte des neiges, montrent que le comportement des ouvrages est conforme à ce qui avait été projeté en conception, à savoir un retour à la vitesse moyenne de glissement du versant avant réalisation des déblais de grande hauteur.

7. Références bibliographiques

- AFNOR (2009) – NF P94-270 Calculs Géotechnique – Ouvrages de soutènement – remblais renforcés et massifs de sols cloués
- Calgaro J-A (2000) – Projet et construction des ponts Généralités Fondations Appuis Ouvrages courants - Presses des Ponts et Chaussées, pp. 286-290
- Projet National Clouterre (1991 et 2002) – Recommandation Clouterre 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage
- SETRA (1991) Bulletin Ouvrages d'Art – Translation des piles du Viaduc du Charmaix - Savoie. pp. 12-13
- SFTRF (2003) Revue Travaux 902 – Le viaduc du Charmaix un ouvrage à géométrie variable. pp. 20-24
- SFTRF (2013) - Dossier de consultation - Mission de Maîtrise d'Œuvre pour la reconstruction du viaduc du Charmaix.
- SFTRF et EGIS (2015) - Dossier de consultation des Entreprises - Reconstruction du viaduc du Charmaix