

# CONFORTEMENT D'UN TALUS ROCHEUX LORS DU CHANTIER DE L'AUTOROUTE « BOGOTA-GIRARDOT » EN COLOMBIE

## REINFORCEMENT OF A ROCK SLOPE FOR THE HIGHWAY PROJECT « BOGOTA-GIRARDOT » IN COLOMBIA

José MUNOZ-CASTELBLANCO<sup>1</sup>, Jérôme VARILLON<sup>2</sup>, Zoubaïda GILBERT<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Vinci Construction Grands Projets, Nanterre, France

<sup>2</sup> Vinci Construction Geolnfrastructure, Nanterre, France

**RÉSUMÉ** – Vinci Construction Geolnfrastructure réalise actuellement les travaux d'élargissement de l'autoroute Bogota-Girardot en Colombie, sur une portion de 70 km. Cet article expose les analyses géologiques et géotechniques menées pour la définition des techniques de confortement pour le talus rocheux nommé « Talud Melgar », dans un contexte des fortes pluies, un climat tropical et des instabilités du rocher altéré.

**ABSTRACT** – Vinci Construction Geolnfrastructure is currently executing the works for enlargement of the highway between Bogota and Girardot in Colombia, 70km along. This paper presents the geological and geotechnical analyses carried out for the definition of the reinforcement techniques for the rock slope called "Talud Melgar", in a context of high rainfall intensity, tropical climate and instabilities due to the degree of weathering of the rock.

### 1. Introduction

L'autoroute Bogota-Girardot, Colombie, fait partie de l'axe majeur autoroutier entre la capitale du pays, Bogota, et le port maritime de Buenaventura, situé sur la côte Colombienne de l'Océan Pacifique.

Vinci Construction Géolnfrastructure réalise actuellement les travaux d'élargissement de la section entre Bogota et la ville de Girardot, sur une portion de 70 km. Le projet consiste à passer d'une deux fois deux voies à une deux fois trois voies.

Le tracé présente un dénivelé de 2100 m avec une topographie très accidentée. Le projet est dans un contexte de climat tropical avec des températures variant entre +5°C à Bogota et +40°C à Girardot. La zone est aussi caractérisée par de très fortes précipitations pendant toute l'année. Ces conditions météorologiques accélèrent l'altération des massifs rocheux, constitués principalement d'une série de roches sédimentaires du Crétacé Supérieur au Paléogène.

Cet article expose les analyses géologiques et géotechniques réalisées pour la définition des techniques de confortement d'un talus rocheux sur le site nommé « Talud Melgar », situé 20 km avant la ville de Girardot. Le talus s'étend sur 3,2 km, avec une hauteur maximale de 70 m. Le profil litostratigraphique est composé par une alternance de grès, conglomérats et argilites, avec une couche de pélites entre 2 m et 10 m d'épaisseur, située à la base du talus.

Lors de l'auscultation initiale, le massif présentait une forte altération : des fissures ouvertes, des décrochements de dièdres, et des négatifs, entre autres. L'élargissement nécessitait l'excavation du talus sur à peu près 10 m à l'horizontale. L'intervention a été réalisée principalement par du terrassement mécanique, avec des bermes tous les 10 m de hauteur et une pente variable entre 1H / 3V et 5H / 4V.

La face exposée du talus a été protégée par différentes techniques. Sur le tronçon le plus altéré de 450 m de longueur (secteurs 2 et 3), une paroi clouée a été réalisée en utilisant du béton projeté renforcé, du treillis soudé, des drains subhorizontaux et un système de drainage des eaux de pluie. Sur les 2750 m restants, différentes actions ont été entreprises :

du remplissage des négatifs avec du béton cellulaire, du clouage ponctuel des dièdres instables, du béton projeté avec treillis, et une barrière dynamique en pied de talus afin de réduire le risque de chute des blocs.

Lors de la réalisation des travaux, ces techniques ont été adaptées en fonction de la condition réelle du massif. Cela a été possible grâce aux inspections et observations des géologues du chantier qui ont accompagné la mise en œuvre de la conception initiale.

Le projet est organisé en huit tronçons, nommés « unités fonctionnelles ». Le talus Melgar se trouve dans l'unité fonctionnelle 1 (UF1), voir la Figure 1.

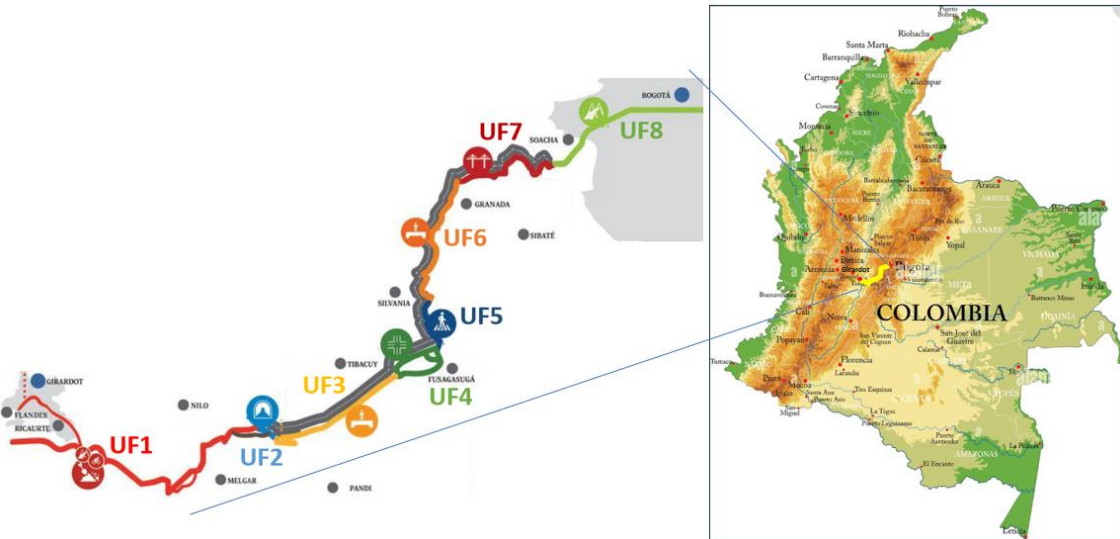


Figure 1. Localisation du projet

## 2. Contexte

### 2.1 Géologie régionale

L'autoroute traverse une série d'affleurements de roches sédimentaires du Mésozoïque Supérieur surmontés par des dépôts du Quaternaire. Ces formations affleurent grâce à un système de failles inverses et de chevauchement, qui agissent en direction préférentielle vers l'Est, et qui ont contribué au soulèvement de l'actuelle Cordillère Orientale de la Colombie.

Cette structure tectonique est représentée dans la section transversale O - E de la Figure 2, perpendiculaire à la Cordillère Orientale, entre la vallée du fleuve Magdalena à l'Ouest et la plaine orientale de la Colombie. Dans cette section, on identifie les plissements principaux d'orientation NNE - SSW.

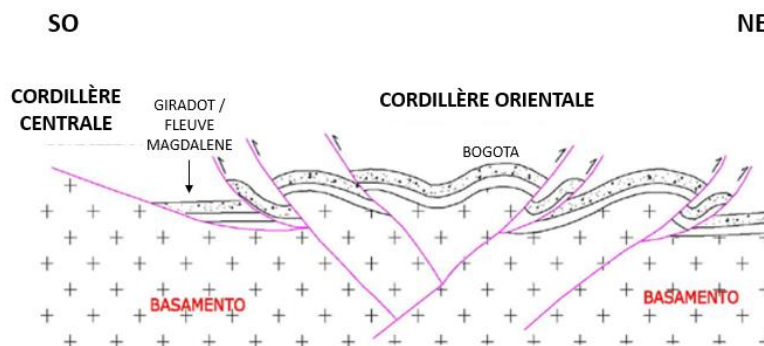


Figure 2. Evolution tectonique de la Cordillère Orientale

En général, on retrouve des anticlinaux assez étroits et inclinés, composés par des formations résistantes du Crétacé Supérieur et du Paléogène, générés par des failles de chevauchement. Les synclinaux sont plus amples que les anticlinaux, avec des dépôts sédimentaires épais d'origine lacustre, alluvial et fluvioglacière ; le meilleur exemple de ce type de dépôt est la plaine de Bogota.

## 2.2 Géologie locale

La zone du talus Melgar est caractérisée par la présence de formations Olini (Crétacé Supérieur), Fusagasugá et Carmen de Apicalá (Paléogène) et d'un dépôt colluvial en surface.

D'après les investigations géotechniques réalisées, la stratigraphie du talus Melgar est la suivante, du haut vers le bas :

- Dépôt colluvial en tête du talus, à 70 m au peu près du pied du talus, sur une épaisseur de 5 m maximum.
- Intercalation de Grès / Argilites-Siltites (formation Carmen de Apicalá) ; sur environ 30 m de hauteur.
- Intercalation de Grès / Conglomérats (formation Carmen de Apicalá) ; sur environ 30 m de hauteur.
- Pérites (formation Fusagasugá) sur environ 5 m de hauteur, en bas du talus ; la périte désigne le terme en anglais « Mudstone » ou « Lodolitas » en espagnol.

Le profil géologique typique est présenté dans la Figure 3.

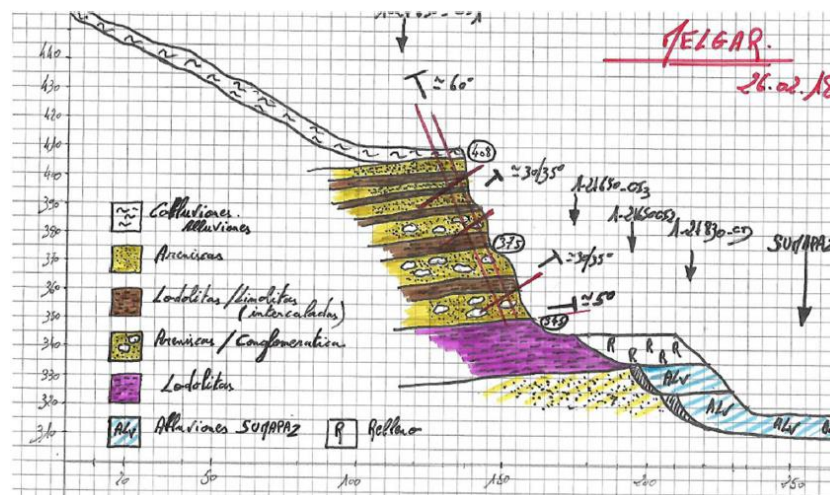


Figure 3. Stratigraphie présente dans la zone du talus Melgar (VCGP, 2018)

Les joints de stratification ont un pendage de 5° vers l'intérieur du massif, donc favorable. Il existe deux jeux de diaclases: le première avec des fissures subverticales et parallèles à la face du talus (pendage 60°), puis le deuxième avec pendage de 30 à 35° plongeant vers le massif.

## 2.3 Description du Talus Melgar

Le talus s'étend sur 3,2 km, avec une hauteur maximale de 70 m. Lors de la construction de la section d'autoroute dans les années 2010, les talus ont été excavés avec une pente de 1H / 3V, des terrasses tous les 20 m de hauteur, et des bermes de 5 m de large.

Selon les inspections préliminaires, il n'y avait pas d'évidence d'un soutènement spécifique, de type paroi clouée ou béton projeté, par exemple. Cela indique la bonne qualité du massif lors de la première excavation dans les années 2010.

Néanmoins, les inspections réalisées en 2018, ont montré une dégradation accentuée du massif rocheux, due à l'action des fortes températures et des pluies intenses. Cela est mis en évidence par des décrochements de blocs observés lors des inspections de 2018 ; voir les photographies de la Figure 4.

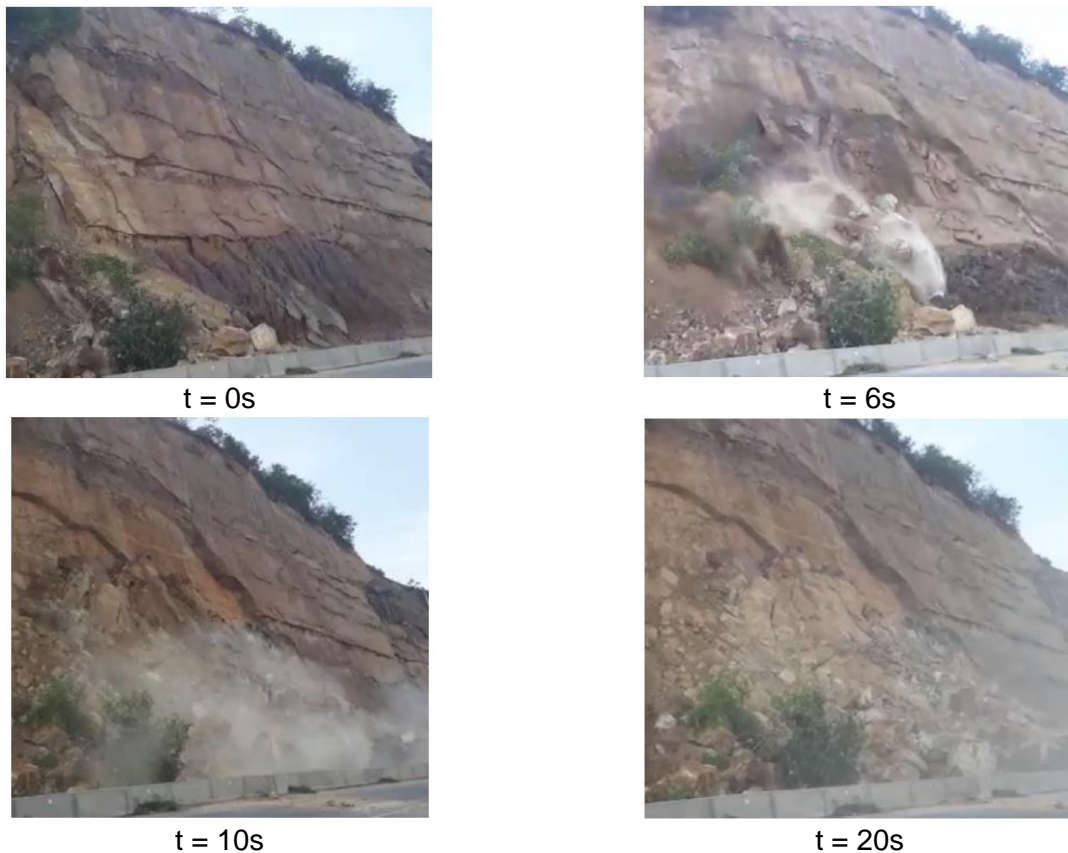


Figure 4. Cinématique du glissement observé le 8 avril 2018

Cette rupture a été générée par la dégradation des propriétés mécaniques des discontinuités dans le massif rocheux, due à l'infiltration des eaux de pluie et les fortes températures. Il s'agit d'une rupture plane reflétée par le décrochement des dièdres associés aux fractures subverticales présentées dans la Figure 3.

Le talus Melgar présentait les signes d'instabilité suivants :

- Altération des affleurements, avec réduction de la résistance au cisaillement, due aux eaux de pluie ;
- Dégradation et érosion des horizons moins résistants (argilites / siltites), créant des vides et des lits en porte-à-faux sur les unités plus indurées (grès / conglomérats) ;
- Fissuration du massif rocheux par des diaclases, avec un pendage de 60°, parallèles à la face du talus. Les joints de stratification ont un pendage de 30 / 35° vers l'intérieur du massif. Néanmoins, cela génère des dièdres instables.
- Altération de l'horizon inférieur des pélites, ce qui crée un déplacement latéral du massif vers l'extérieur, dû au déconfinement.
- Des chutes de blocs métriques et autres instabilités du massif rocheux ont été observées en 2021 ; ceci a accéléré le démarrage des travaux.



Figure 5. Chutes de blocs observées en mars 2021

## 2.4 Paramètres géotechniques

Sur la base des investigations géotechniques, tels que des sondages carottés et à la pelle (Ingetec, 2017, VCT, 2018) et des relevés géologiques (VIA 40, 2022), les paramètres géotechniques considérés pour les calculs sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres de calcul

Description	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$R_c$ (MPa)	GSI	$m_i$	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$q_s$ – clous (kPa)
Colluvions	20	-	-	-	5	31	50
Grès	23	6	55	16	150	37	450
Grès / Conglomérats	23	6	50	16	130	37	450
Argilites / Siltites	22	2	25	4	50	25	150
Pélites	22	2	25	4	50	25	150
Discontinuités	0	-	-	-	25	35	-

Les paramètres de résistance au cisaillement des massifs rocheux sont déterminés avec la méthode Hoek & Brown sur la base des résistances à la compression uniaxiale,  $R_c$ , et des valeurs GSI (Geological Strength Index). Ces dernières sont définies à partir des levées géologiques sur le front de taille.

Au vu des valeurs de  $R_c$  assez faibles pour les différentes unités rocheuses, on peut considérer qu'il s'agit des roches tendres.

Le frottement unitaire,  $q_s$ , le long de l'interface sol-ciment, pour la conception des clous, est défini à partir des recommandations Clouterre (1991) et des essais d'arrachement de clous réalisés en septembre 2022.

## 2.5 Hydrogéologie

Les sondages et investigations géotechniques n'ont pas indiqué la présence d'une nappe phréatique en surface, ni en profondeur.

Néanmoins, selon les observations pendant les travaux, des niveaux d'eau « perchée » peuvent se former dans le massif lors des événements de pluie intense ; ceci notamment dans les niveaux de colluvions, en tête du talus, mais aussi dans les grès / conglomérats fracturés, car ils sont séparés par des niveaux d'argilites et siltites peu perméables. Ces niveaux d'eau perchée peuvent générer des excès de pression interstitielle dans le massif.

## 2.6 Contexte sismique

Le projet est situé dans une région ayant une menace sismique haute. D'après les recommandations du code sismique colombien NSR-10 (AIS, 2010), et des données géotechniques disponibles, les hypothèses sismiques sont :

- Accélération maximale au sol :  $PGA = 0,20 \text{ g}$ .
- Magnitude :  $M_w$  entre 7,0 et 7,5.
- Coefficient d'amplification topographique :  $S_T = 1,2$ .

Sur cette base, le bureau d'études a défini les coefficients d'accélération suivants :

- Coefficient d'accélération horizontale :  $(50\% \times S_T \times PGA)$  :  $k_h = 0,12$ .
- Coefficient d'accélération verticale :  $(1/3 \times k_h)$  :  $k_v = 0,04$ .

## 3. Mesures de confortement

Les mesures de confortement du talus sont définies pour deux zones d'homogénéité :

- PD1-14, secteurs 2 et 3.
- PD1-14, secteurs 4 au 9.

### 3.1 Mesures de confortement – secteurs 2 et 3

Les inspections de 2018 ont montré un degré d'altération très important du rocher ; cela a conduit à la définition d'un confortement type paroi clouée.

Les travaux ont été réalisés par des terrasses de 10 m de hauteur et bermes de 3 m de largeur, sur une hauteur totale de 70 m. La Figure 6 montre la stratigraphie utilisée pour les analyses.

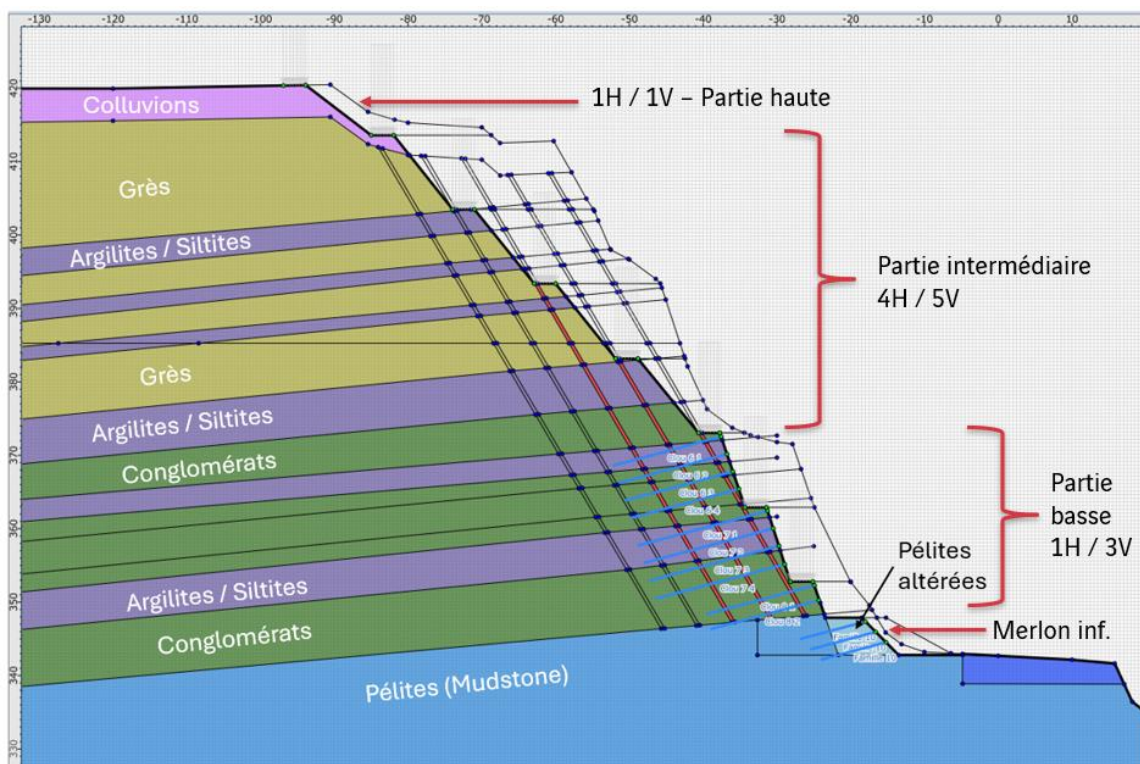


Figure 6. Stratigraphie – Secteur 2

Les travaux ont été réalisés du haut vers le bas avec la séquence suivante :

- Excavation avec une pente de 1H / 1V pour la terrasse supérieure dans les colluvions ; du béton projeté avec treillis a été installé en surface pour protéger la

face du talus. Le treillis a été épinglé au terrain avant la mise en place du béton projeté.

- Excavation avec une pente de 4H / 5V pour les 4 terrasses intermédiaires dans le grès / argilites / conglomérats. Du béton projeté avec treillis soudé a été installé dans la face du talus pour protéger le rocher.
- Excavation avec une pente de 1H / 3V, puis parois clouées, sur les trois terrasses inférieures dans les grès / conglomérats. Les clous ont été installés avec un maillage de 2.5m x 2.5m, et des longueurs entre 15m et 18m. Le diamètre des clous est de 32 mm, avec un diamètre de forage de 130 mm, en raison de la durabilité du coulis de ciment.
- Un merlon d'environ 3 m de large et 5 m de hauteur a été laissé en pied de talus, afin d'ajouter du confinement aux pélites et éviter le déchaussement du talus. Des clous de 9 m de longueur et 32 mm de diamètre ont été installés, avec une maille de 2 m x 2 m, dans le but de confiner les matériaux, fortement altérés en surface.
- Les bermes sont équipées des caniveaux, et d'un système de drainage superficiel, qui débouche dans des exutoires verticaux. Par endroits, des filtres EnkaDrain ont été installés derrière la paroi, afin de drainer les niveaux d'eau perchée potentiels.
- Une cunette de couronnement reçoit les eaux et les évacue vers des exutoires.
- Des drains subhorizontaux de 15 m de long ont été installés avec une pente descendante de 20° afin de percer les horizons moins perméables (siltites / argilites) et ainsi drainer les niveaux d'eau perchée dans les grès / conglomérats fracturés. Cela afin d'éviter une montée de la pression d'eau derrière les parois en béton projeté.

Ce concept a permis de remplir les critères de stabilité demandés par le projet, soit un facteur de sécurité supérieur à 1.5 en condition statique et 1.05 en condition sismique. Les calculs de stabilité ont été menés sans pondération des paramètres des sols.

Les analyses de stabilité ont été réalisées avec le logiciel TALREN. Deux types de surface de rupture ont été étudiées :

- Rupture plane par les diaclases de 60° (voir traits rouges dans la Figure 6).
- Rupture circulaire à travers le massif rocheux, afin de garantir la stabilité globale.

Des analyses ponctuelles de stabilité des dièdres ont été effectuées analytiquement.



Figure 7. Secteurs 2 et 3 – Travaux finalisés

### 3.2 Mesures de confortement – secteurs 4 à 9

Les talus dans ces secteurs montraient une altération moins importante en 2018 que les secteurs 2 et 3. Le confortement initial incluait la construction des barrières dynamiques en pied du talus et éventuels confortements ponctuels. Néanmoins, lors des inspections en 2021, l'état du massif était encore plus dégradé ; cela a conduit à un confortement plus robuste, avec parois clouées par endroits, béton projeté dans tous les secteurs et barrières dynamiques au pied du talus.

Les travaux de confortement ont inclus :

- Nettoyage des blocs et dièdres instables.
- Remplissage des vides avec du béton cellulaire ; des matériaux charpentés des glissements ont été utilisés comme base pour ces remplissages.
- Clouage ponctuel des dièdres pas encore tombés. La décision sur les blocs à clouer a été prise en fonction de la condition réelle du massif, avec l'aide des géologues et géotechniciens de chantier.
- Protection de toute la face du talus avec du béton projeté et treillis soudé.
- Le drainage est assuré par une cunette de couronnement qui reçoit les eaux superficielles et les évacue vers des exutoires. Dans certaines sections, des bermes ont été réalisées avec des cunettes longitudinales qui déchargent vers les exutoires.
- Construction d'une barrière dynamique au pied du talus. Cette structure est inclinée, ce qui permet une meilleure absorption de l'énergie de chute des blocs.



Figure 8. Secteurs 4 à 9 – Travaux terminés

## 4. Conclusions

Les travaux de confortement des talus Melgar ont été réalisés sur la base d'une collaboration étroite entre les bureaux d'études et les équipes de construction. Cela a été rendu possible grâce aux visites sur site des ingénieurs responsables des calculs, et la collaboration des géologues et géotechniciens de chantier. Le projet a été mené à bien grâce à plusieurs adaptations du concept initial.

Le drainage est fondamental pour la stabilité du talus. Un système composé par une cunette de couronnement, des cunettes longitudinales sur les bermes, des exutoires et des drains subhorizontaux a été installé pour assurer l'évacuation des eaux de pluie et ainsi éviter la création des excès de pression interstitielle derrière le béton projeté.

Les techniques de confortement (clouage, béton projeté, drainage, barrières dynamiques) ont été adaptées aux conditions réelles du massif, en densifiant par endroits les traitements, et en faisant des analyses plus détaillées lorsqu'il s'est avéré nécessaire.

## **5. Autorisation de publication**

Le Constructeur, Consorcio Ruta 40, a autorisé la publication des informations contenues dans cet article. Certaines photos ont été prises par J. Varillon, co-auteur de la publication.

## **6. Références bibliographiques**

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10.
- CLOUTERRE. (1991). Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols.
- INGEOMINAS. (2002). Memoria explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Cundinamarca.
- INGETEC. (2017). Informe geotécnico "Informe preliminar – Diseño fase III taludes UF1 a UF7" (), anexado D-TAL-VPP-GEN-XXXXX-A-INF-INGET-10400-A0.
- VIA 40. (2022). Levées géologiques du site PD1-14 secteurs 2 et 3.
- VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS, VCGP. (2018). Anexo 1.5 Nota Estudio Geotécnico, Taludes de Corte "Melgar Sector 2". D-TAL-VPP-UF1E-XXXXX-A-INF-INGET-14174-B0
- VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS, VCGP. (2018). Anexo 1.5 Nota Estudio Geotécnico, Taludes de Corte "Melgar Sector 3". D-TAL-VPP-UF1E-XXXXX-A-INF-INGET-14175-B0
- VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT, VCT. (2018). Informe geotécnico "UF1 – Talus MELGAR – Hypothèses et modèle géotechnique ».