

SOLUTION RESILIENTE DE SECURISATION D'UN SITE CONTRAINT SOUMIS A UN ALEA NATUREL MULTI-PHENOMENES

RESILIENT SOLUTION FOR SECURING A CONSTRAINED SITE SUBJECT TO MULTI-PHENOMENAL NATURAL HAZARDS

Gaëtan MARTINEAU¹, Agathe FURET¹, Camille HALBWACHS¹, Jean-Baptiste SERRE²

¹ GEOLITHE, Crolles, France

² TEKALP, La Chapelle Blanche, France

RÉSUMÉ – Au travers d'un cas d'étude est présentée la sécurisation d'une infrastructure routière de montagne soumise à un double aléa naturel gravitaire dans un contexte contraint. Au moyen d'une démarche novatrice, basée sur l'association de parades linéaires à capacité dynamique, le niveau d'aléa rémanent au droit de l'enjeu a été amélioré, ainsi que la pérennité et la résilience des ouvrages de protection face au changement climatique.

ABSTRACT – A case study is presented of the securing of a mountain road infrastructure subject to two natural gravitational hazards in a constrained context. Using an innovative approach based on a combination of linear and dynamic parades, the level of remanent hazard at the site was improved, as was the durability and resilience of the protective structures in the face of climate change.

1. Introduction

La route départementale 120, située sur la commune de Culoz (Ain), constitue l'un des quatre itinéraires routiers donnant accès au col du Grand Colombier (1498 m) par le versant Sud-Est du massif du même nom. Cette infrastructure routière, parcourant le versant selon une succession de lacets et de sections étagées en balcon, à gabarit restreint et à fort enjeu touristique pour le Département de l'Ain, est empruntée par un nombre important de cyclistes amateurs, ainsi que par des épreuves renommées telles que le Tour de France, le Critérium du Dauphiné ou le Tour de l'Ain.

Une section de la RD120, au droit des falaises dites de Milvendre, est affectée sur un linéaire d'une centaine de mètres par un double aléa naturel gravitaire mettant en jeu des éboulements rocheux et des coulées de matériaux, en particulier depuis un effondrement en grande masse survenu en 2017.

Compte tenu de l'évolution et de l'activité du site post-événement, plusieurs séries de travaux de sécurisation se sont succédées. Une opération menée en 2021 a consisté en la réalisation de lignes de fascines en partie sommitale de couloir, en pied de falaises, ainsi que la mise en place d'un écran de filet pare-blocs à haute capacité énergétique en partie inférieure. Plusieurs coulées de matériaux successives survenues au premier semestre 2022 ont provoqué la ruine de l'écran existant et d'un merlon en gabions en accotement amont de chaussée, conduisant à la fermeture de la route, qui devait accueillir une étape de l'édition 2023 du Tour de France.

Le contexte de sécurisation du site très particulier, dans un contexte de changement climatique favorisant la fréquence et l'intensité d'épisodes pluvio-orageux à l'origine des phénomènes naturels gravitaires affectant la RD120, a conduit à proposer une démarche novatrice pour la sécurisation du site, de par l'association et la configuration d'ouvrages de protection capables de résister à des sollicitations dynamiques notamment.

2. Contexte

2.1. Géologie, géomorphologie

D'après la carte géologique à l'échelle 1/50 000^{ème} éditée par le BRGM (n°701, feuille de Rumilly), la RD120 s'inscrit dans des formations calcaires et marno-calcaires datant du Jurassique moyen (Dogger : J₁ à J₆) et supérieur (Malm : J₇ à J₁₀, voir Figure 1).

Au droit de la section de route affectée par des phénomènes naturels gravitaires, le versant est caractérisé, d'amont en aval, par :

- Des calcaires massifs du Kimméridgien supérieur (J_{8b}), constituant une grande falaise verticale supérieure persistante, de hauteur variable entre 50 et 150 m et qui s'établit suivant une altimétrie décroissante d'Ouest en Est ;
- Des calcaires du Séquanien et du Kimméridgien inférieur (J_{8a-7}), hétérogènes, constituant une falaise intermédiaire qui présente des bancs marqués à l'Est, des bancs plus fins plissés à intercalation marneuse au droit du couloir et une vire marneuse marquée à l'Ouest ;
- Des calcaires pseudo-lithographiques à grains fins de l'Oxfordien supérieur (J_6), caractérisés par des bancs minces bien réglés avec inter-lits marneux formant une falaise inférieure bien marquée à l'affleurement à l'Ouest ;
- Des éboulis de pente (E) en pied de la série de falaises sus-jacentes, constitutifs de la partie inférieure de versant et recouvrant des formations à dominante calcaire et marneuse.

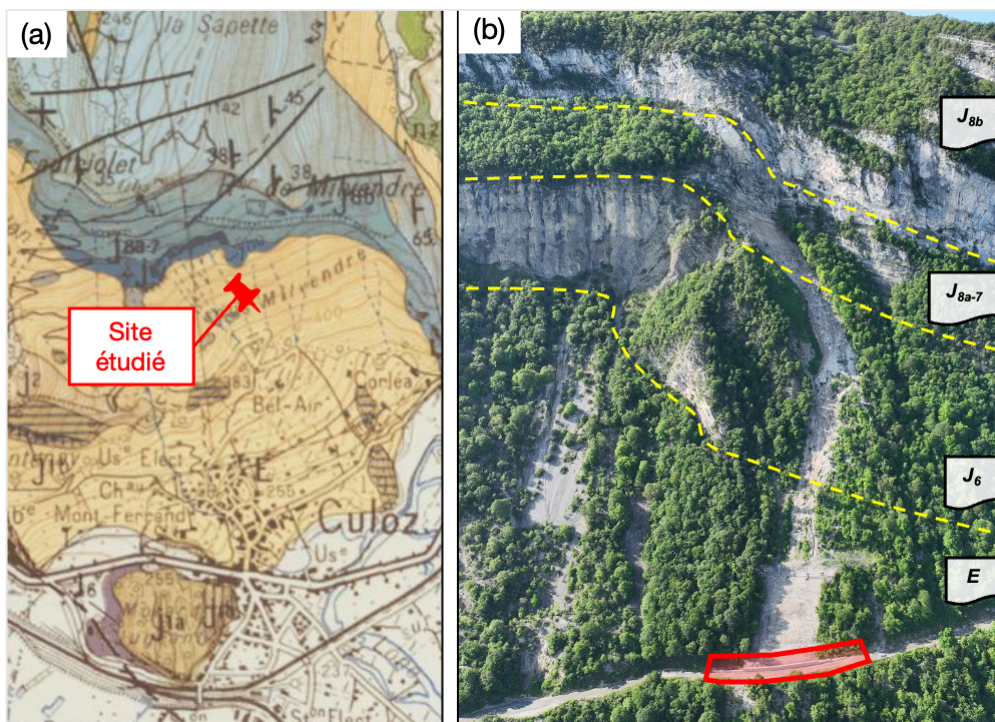


Figure 1. a) Extrait de la carte géologique de la France au 1/50 000^e, feuille de Rumilly (n°701).
b) Coupe géologique interprétative sur prise de vue aérienne (Géolithe, 22/05/2023)

2.1. Diagnostic, phénomènes naturels en jeu

2.1.1. Eboulement en masse (2017)

La RD120, et plus largement la commune de Culoz, ont été affectés par un éboulement massif survenu en mars 2017, qui a ouvert et fragilisé un couloir de propagation d'une trentaine de mètres de large au sein du versant à l'aplomb direct des premiers lacets de l'infrastructure routière, et en particulier au niveau d'une section de route traversant le versant en balcon.

Le diagnostic et l'expertise réalisés par le BRGM (Equilbey, 2017) dans le cadre des missions d'Appui aux Administrations suite à l'activation du Plan Communal de Sauvegarde a mis en avant un volume rocheux éboulé important, évalué entre plusieurs centaines de mètres cubes à plus de 1200 m³, constitué de compartiments rocheux pouvant présenter un volume unitaire supérieur à 10 m³.

La cicatrice de l'évènement présente une largeur de vingt mètres et une hauteur variable entre 5 à 10 mètres, associée à une surface de 150 m² environ. Le volume décroché s'est propagé sur plus de 700 mètres de distance, et sur une largeur d'environ 400 m, traduisant la divagation des trajectoires dont certaines ont atteint le lieu-dit Bel-Air au Nord du village. Quatre sections de la RD120 à l'aval du versant, dont la section supérieure objet du présent cas d'étude, ont été impactés massivement par l'évènement. La survenance en mai 1999 d'un premier éboulement en masse recensé et ayant mobilisé 1000 m³ de roche témoigne également d'une activité élevée du versant.

2.1.2. Laves torrentielles (2022)

Deux coulées de matériaux, assimilées à des laves torrentielles compte tenu des caractéristiques des matériaux charriés, avec une propagation libre au vu des nombreux chenaux d'écoulement ayant incisé le versant, ont affecté le couloir à l'hiver et au printemps 2022, peu après une nouvelle phase de sécurisation entreprise par le Département de l'Ain. Ces évènements ont engendré la ruine d'un écran de filet pare-blocs de haute capacité énergétique (ETAG 027, classe 8) en partie inférieure de versant (Figure 2) et d'un ouvrage poids en gabions en accotement direct à l'amont de la RD120.

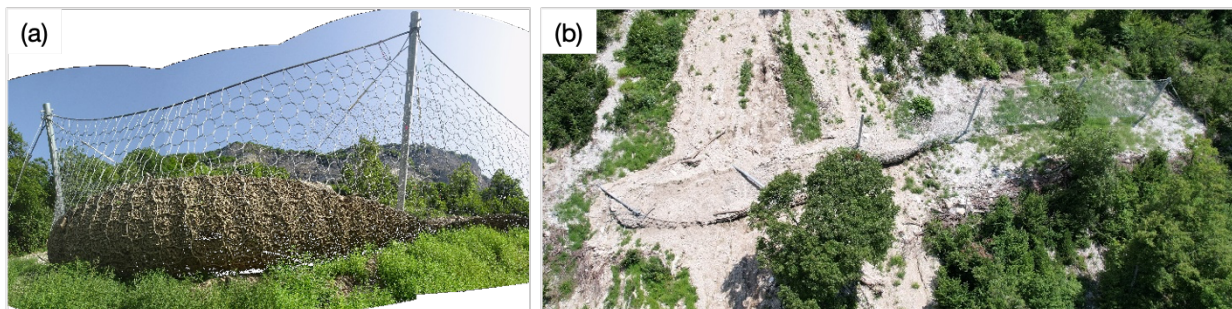


Figure 2. a) Poche de matériaux de 60 m³ arrêtés dans le module Ouest de l'écran existant (Géolithe, 17/06/2022). b) Vue aérienne suite à la ruine de l'ouvrage (Géolithe, 29/06/2022).

Les coulées, de volumes unitaires évalués entre 150 et 200 m³, ont trouvé leur départ au niveau du changement d'orientation et du rétrécissement du couloir, correspondant également à un grand secteur d'accumulation et de dépôt au sein des éboulis de pente. Ce secteur du versant, présentant une couverture d'éboulis fins, un calcaire sub-affleurant et un horizon marno-calcaire affleurant marqué en rive droite notamment, constitue très probablement une zone de concentration et d'accélération d'écoulements superficiels contribuant à de l'érosion et un ravinement au sein des éboulis.

3. Solution hybride de sécurisation

3.1. Approche, principe de parades

En plus des phénomènes naturels gravitaires affectant l'infrastructure routière et l'historique des évènements associés, l'historique des aménagements et les contraintes de site ont été considérés, à savoir :

- Le retour d'expérience relatif au fonctionnement des ouvrages de protection existants, qui a notamment mis en évidence une compatibilité limitée et une vulnérabilité de l'écran de filet pare-blocs vis-à-vis de phénomènes de type lave torrentielle ;

- Des contraintes environnementales et réglementaires fortes, un arrêté préfectoral portant création d'une zone de protection des biotopes d'oiseaux nichant dans les falaises, zones rocheuses et forêts voisines s'appliquant aux falaises du Grand Colombier, limitant les interventions en technique alpine et les survols par aéronef du versant. Aussi, ces contraintes conditionnent les modalités d'exécution de travaux, ainsi que l'entretien et la maintenance des ouvrages ;
- Des contraintes d'exécution de travaux, tant en termes de délai que de période d'intervention autorisée, en lien avec les enjeux environnementaux ;
- Un gabarit routier restreint, avec une largeur réduite minimale de 3.5 m, et contraint par le relief, au droit de la section affectée.

Compte tenu de ces contraintes, une solution de sécurisation hybride et innovante a été proposée, s'appuyant sur la combinaison de deux parades linéaires : un écran de filet pare-blocs réhaussé à haute capacité énergétique en versant, associé à un ouvrage poids à capacité dynamique en blocs béton liaisonnés.

Fonctionnant de manière complémentaire, les deux ouvrages superposés ont été pensés pour répondre au double aléa naturel gravitaire en jeu :

- L'écran de filet pare-blocs en versant a été conçu sur réhausse, permettant d'intercepter les trajectoires aériennes et énergétiques des compartiments rocheux instables, tout en étant franchissable par des laves torrentielles grâce à la « lame d'air » créée par la réhausse ;
- L'ouvrage poids en blocs béton liaisonnés, implanté en pied de versant, au plus proche de l'enjeu, et à déplacement libre, permet l'interception et le stockage des compartiments rocheux moins volumineux et énergétiques qui traversent la réhausse de l'écran de filet supérieur d'une part, et des coulées de matériaux, en totalité ou en partie selon les caractéristiques de ces dernières, d'autre part.

Les ouvrages de sécurisation ont été réalisés et mis en service pour le compte du Département de l'Ain et sous supervision géotechnique assurée par Géolithe, par les Entreprises CAN et FONTAINE TP en février et mai 2023, respectivement pour les ouvrages en versant et en accotement de la RD120.

3.2. Ecran de filet pare-blocs réhaussé

3.2.1. Dimensionnement de l'ouvrage sous impact

L'écran de filet pare-blocs a été dimensionné au moyen d'une étude trajectographique 2D réalisée à l'aide du logiciel Silex2000® (logiciel de simulation trajectographique développé par Géolithe), sur la base du diagnostic du phénomène d'éboulement rocheux actualisé au droit du couloir.

Celui-ci a conduit à retenir des compartiments rocheux potentiellement instables présentant un volume résiduel compris entre 2 et 5 m³ dans le cadre d'un cas exceptionnel d'éboulement. Les principaux résultats des simulations trajectographiques au droit de la parade sont présentés ci-après (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des trajectoires au droit de l'écran de filet pare-blocs réhaussé

Cas simulé	Hauteur de passage ⁽¹⁾ (m)		Energie cinétique (kJ)		Vitesse (m/s)	
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.
Compartiments rocheux - 2 à 5 m ³	1.7	6.8	302	3985	6.8	27.6

⁽¹⁾ Hauteur du centre de gravité des blocs simulés

Sur la base des résultats trajectographiques, un écran de filet pare-blocs de longueur 40.0 m, de hauteur utile (hors hauteur de réhausse) 6.0 m et de capacité énergétique MEL (Maximum Energy Level) 5000 kJ (ouvrage Maccaferri, EPFM 5000) a été retenu.

3.2.2. Massifs de réhausse

L'écran de filet pare-blocs a été réalisé sur des massifs de réhausse, exécutés selon les spécificités principales suivantes :

- Cinq massifs de réhausse, positionnés en pied de chaque poteau d'écran, permettent de créer une « lame d'air » de hauteur 0.8 m sous l'écran, qui favorise le passage de coulées tout en réduisant le risque de mise en charge de l'ouvrage ;
- Chaque massif est fondé sur un micropieu ancré dans les éboulis de pente sur une longueur de 3.7 m, la partie supérieure du micropieu étant noyée dans le massif et sa tête équipée d'une double clavette assurant la liaison mécanique avec les poteaux de l'écran ;
- Des ancrages inclinés à l'amont de chaque massif ont été exécutés, de manière à reprendre des efforts de poussée induite par des coulées de matériaux ;
- Un élément en gabion, agissant comme un élément « fusible » en cas d'impact, a été installé à l'amont de chaque massif, afin de préserver et protéger les massifs de réhausse.

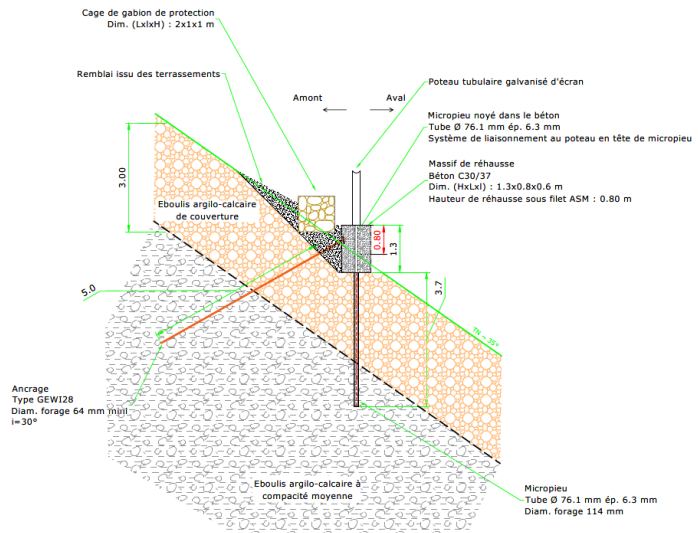


Figure 3. Coupe type – Massif de réhausse

3.3. Ouvrage poids à capacité dynamique en blocs liaisonnés

3.3.1. Technologie retenue

La technologie Bloc Armé®, retenue par le Maître d'Ouvrage et commercialisée par la société TEKALP, est basée sur des éléments oblongs préfabriqués en béton armé, assemblés en quinconce et liaisonnés entre eux par des tubes métalliques (Figure 4, et éventuellement par des élingues et un câble longitudinal de tête.

Les armatures structurales internes et le système de chaînage articulé, qui assurent une continuité mécanique horizontale et verticale de la structure, permettent d'augmenter le poids d'ouvrage associé à la réponse à l'impact, tout en limitant le développement de forces d'impact élevées en favorisant la répartition des efforts au sein de la structure. Ainsi, l'ouvrage Bloc Armé® offre une haute capacité d'absorption et de dissipation d'énergie, ainsi que des déformations maîtrisées sous impact.

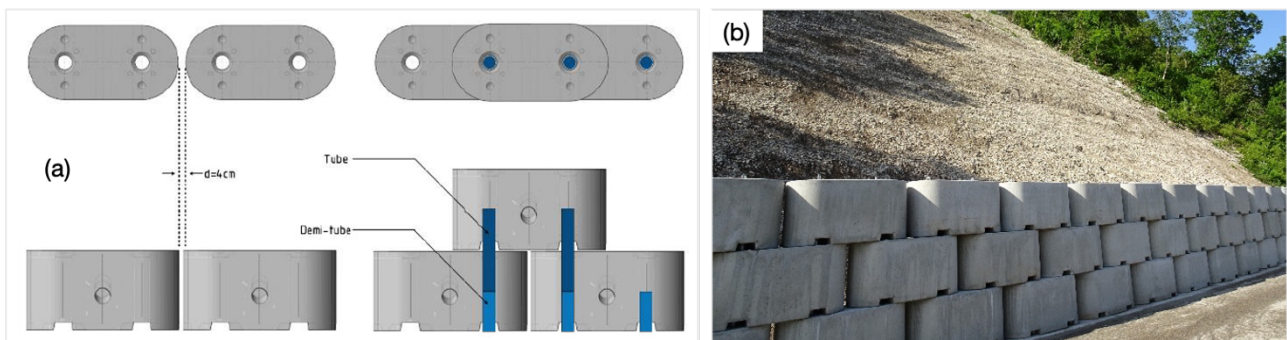


Figure 4. a) Extrait de la procédure de montage Bloc Armé® (Tekalp). b) Ouvrage poids Bloc Armé® réalisé en accotement amont de la RD120 (Géolithe, 22/05/2023)

De nombreuses campagnes expérimentales ont permis de caractériser le produit et de développer un modèle numérique de la structure aux différences finies à l'aide du logiciel Flac3D. Une campagne expérimentale d'essais d'impact à haute énergie (plusieurs milliers de kJ) sur des ouvrages à échelle réelle ont permis de valider la résistance des ouvrages constitués de Bloc Armé® et la compréhension de son comportement dynamique (Furet et al., 2022b).

3.3.2. Dimensionnement de l'ouvrage sous impact

La conception de l'ouvrage d'interception en blocs béton liaisonnés en pied de versant, dans une configuration rectiligne et une hauteur de 2.4 m, a été validée au moyen de simulations numériques réalisées à l'aide du modèle développé sous le logiciel Flac3D. Afin de caractériser les impacts attendus au niveau de l'ouvrage d'interception en blocs béton liaisonnés, deux cas de trajectoires ont été étudiés :

- Des trajectoires dites « freinées », correspondant à des blocs arrêtés par l'écran de filet pare-blocs en versant (trajectoires aériennes), mais dont le volume permet une remobilisation et un passage à travers la réhausse de l'écran ;
- Des trajectoires dites « roulantes », correspondant à des blocs traversant la réhausse de l'écran de filet pare-blocs (trajectoires « rasantes »).

Les résultats des simulations trajectographiques ont montré que les trajectoires roulantes constituent le cas le plus défavorable vis-à-vis des caractéristiques des impacts au niveau de l'ouvrage d'interception en blocs béton liaisonnés (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques des trajectoires atteignant l'ouvrage d'interception

Cas modélisé	Hauteur moyenne de passage ⁽²⁾ (m)	Energie cinétique (kJ)		Vitesse (m/s)	
		Moy.	Max.	Moy.	Max.
Trajectoires « freinées » - 0.3 à 1 m ³	1.2	48.5	379.3	6.4	17.0
Trajectoires « roulantes » - 0.3 à 1 m ³	1.2	66.7	503.7	7.3	19.3

(2) Hauteur du centre de gravité des blocs modélisés

Sur la base de ces résultats, trois paramétrages conservatifs de l'impactant ont été retenus pour analyser la réponse de l'ouvrage Bloc Armé® en contraintes-déformations sous impact de blocs. Les principaux résultats de simulations, présentés ci-après (Figure 5, Tableau 3), ont permis de valider la conception de l'ouvrage ; notamment par l'estimation de déplacements maximaux compatibles avec le contexte (ouvrage en bord de route).

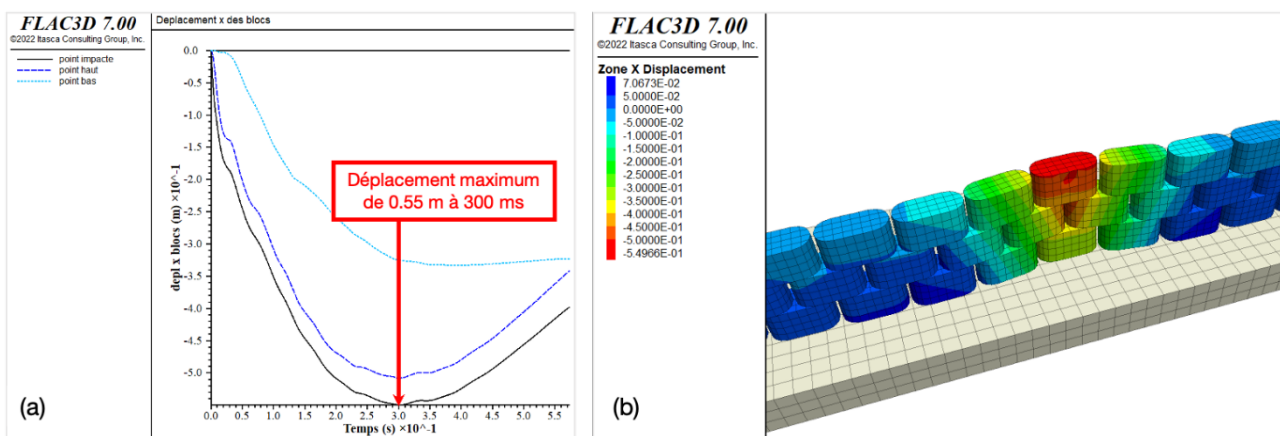


Figure 5. Exemples de résultats - déplacements horizontaux - de simulations sous impact pour la géométrie d'ouvrage retenue – Cas 300 kJ / 0.5 m³ / 2.2 m : (a) réponse temporelle des déplacements, (b) déplacements maximaux enregistrés à 300 ms après impact.

Tableau 3. Résultats principaux des simulations numériques sous Flac3D

Caractéristiques de l'impactant modélisé (énergie / volume / hauteur d'impact)	Déplacement horizontal maximal à hauteur d'impact (m)	Déplacement horizontal résiduel (m)	Déplacement vertical maximal (m)	Durée de stabilisation des déformations (ms)
300 kJ / 0.5 m ³ / 2.2 m	0.55	0.40	0.065	> 550
300 kJ / 1 m ³ / 2.0 m	0.48	0.481	-	> 400
700 kJ / 1 m ³ / 1.7 m	1.09	1.091	0.086	> 450

4. Exploitation, entretien, maintenance

4.1. Eboulement rocheux (2023)

Les ouvrages de protection nouvellement créés ont été atteints et sollicités par deux éboulements rocheux successifs survenus en novembre et décembre 2023, lors d'épisodes pluvieux de forte intensité ayant touché la région. Le diagnostic de ces événements, réalisé par Géolithe, a mis en évidence un volume total de roches évalué entre 3 et 4 m³ interceptés par les ouvrages de protection, dont un bloc de volume 1 m³ arrêté dans un module de l'écran (Figure 5). Ce bloc est associé à une trajectoire aérienne et énergétique (capacité SEL (Service Energy Level) 1500 kJ de l'écran très probablement dépassée), ainsi que trois blocs de volume compris entre 0.5 et 0.8 m³ arrêtés par l'ouvrage poids en blocs béton liaisonnés, lequel présente un déplacement horizontal maximal de l'ordre de 40 cm au niveau de deux points d'impact (Figure 6).



Figure 6. a) Vue aérienne des deux écrans de filet pare-blocs en versant, avec bloc de 1 m³ arrêté dans un module de l'écran sur réhausse (Géolithe, 15/12/2023). b) Vue aérienne de l'ouvrage poids en blocs béton liaisonnés, avec déplacement horizontal suite à impact (Géolithe, 15/12/2023)

Les déplacements horizontaux maximaux observés sur l'ouvrage apparaissent cohérents avec les résultats des simulations numériques 3D.

4.2. Limites, adaptabilité, modularité

La solution de sécurisation proposée apporte une souplesse dans la gestion et l'exploitation des ouvrages de protection. Ceux-ci présentent l'avantage de pouvoir recevoir des modifications et/ou adaptations afin d'améliorer leur efficacité et le niveau d'aléa rémanent au niveau de l'enjeu. Des évolutions pourraient être envisagées selon l'activité du site :

- *Au niveau de l'écran de filet pare-blocs sur réhausse en versant* : en cas d'atteinte trop fréquente de la RD120 par des blocs de petit volume à travers la lame d'air de l'ouvrage, la réhausse pourra être équipée d'une bavette « fusible » ;
- *Au niveau de l'ouvrage poids en blocs béton liaisonnés en pied de versant* : selon la fréquence et l'intensité du phénomènes de coulées de matériaux affectant le couloir notamment :
 - o L'ajout de « crayons d'ancrage » (tubes de micropieux) afin de limiter les déplacements, et un éventuel basculement de l'ouvrage ;
 - o Le confortement de l'ouvrage par ancrages et haubanage amont afin de limiter les déplacements et l'engagement du gabarit routier ;
 - o La création d'une fosse de stockage de plus grande capacité à l'amont de l'ouvrage, au moyen de terrassements.

5. Conclusions

Le cas présenté relatif à une section de la RD120 dans le massif du Grand Colombier met en avant une approche novatrice pour la sécurisation d'un site soumis à un double aléa naturel de type éboulement rocheux et laves torrentielles.

La combinaison innovante de deux parades linéaires à capacité dynamique, mises en œuvre dans des configurations singulières et dans un contexte contraint - écran de filet pare-blocs sur massifs de réhausse et ouvrage poids en blocs béton liaisonnés (technologie Bloc Armé®) en alignement et sur une hauteur limitée -, permet d'améliorer la résilience du dispositif par : de hautes capacités énergétiques, une adaptabilité accrue des ouvrages vis-à-vis des phénomènes en jeu, un objectif de pérennisation et d'allongement de la durée de vie de ces derniers, ainsi qu'une modularité accrue en fonction de l'activité du site.

Les premières sollicitations suite à un éboulement rocheux, de volume limité mais énergétique, ont mis en évidence l'efficacité des parades, avec la préservation de ces derniers et de l'enjeu ; et ont permis de valider la conception par confrontation aux résultats des simulations numériques 2D et 3D effectuées pour leur dimensionnement.

6. Références bibliographiques

Equilbey E. (2017). Situation de gestion de crise suite à l'éboulement en masse du 08 mars 2017 en amont immédiat du bourg de la commune de Culoz (01). Rapport BRGM/RP-66875-FR., 33 p., 22 ill., 2 ann.

Furet A, Lambert S, Villard P, Jarrin JP. (2022b). Experimental and numerical impact responses of an innovative rockfall protection structure made of articulated concrete blocks . Rock Mech Rock Eng. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-022-02957-x>