

EXPERIMENTATIONS D'IMPACT GRANDEUR REELLE SUR PAREMENT DE MERLON BLOC ARMÉ®

REAL SCALE IMPACT EXPERIMENTS ON BLOC ARMÉ® AS FACING OF ROCKFALL PROTECTION EMBANKMENT

Agathe FURET^{1,2,3}, Stéphane LAMBERT², Pascal VILLARD³, Jean-Philippe JARRIN¹, Julien LORENTZ⁴, Lucas MEIGNAN¹

¹ GEOLITHE, 181 rue des Bécasses, 38920 Crolles, France, agathe.furet@geolithe.com

² Univ. Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR, F-38402 St-Martin-d'Hères, France

³ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

⁴ GEOLITHE INNOV, 181, rue des Bécasses, 38920 Crolles, France

RÉSUMÉ – Des essais de lâcher de blocs sur une solution innovante de parement de merlon de protection contre les chutes de blocs rocheux ont été réalisés pour caractériser la réponse du parement sous impact et pour fournir une base de données pour la calibration de modèles numériques. L'article décrit la campagne expérimentale, l'instrumentation mise en place ainsi que la structure testée puis présente les premiers résultats obtenus.

ABSTRACT – Impact tests on innovative solution of rockfall protection embankment facing were achieved in order to characterize the dynamic response to impact of the structure and provide data for numerical models calibration. The article describes the experimental campaign, the instrumentation and the tested structure and introduces preliminary results.

1. Introduction

Les structures de protection de type merlons représentent une solution efficace pour protéger les hommes et les infrastructures contre le risque de chutes de blocs rocheux (Lambert and Bourrier, 2013).

Cette solution consiste en l'édification d'un ouvrage massif en surélévation par rapport au terrain naturel permettant l'arrêt ou la déviation des blocs rocheux dans leur course. Les structures érigées ont pour avantage de supporter des impacts à énergie cinétique élevée, mais présentent l'inconvénient d'une emprise au sol importante, paramètre qui se montre limitant dans un contexte d'aménagement de territoires souvent contraints par le relief. De plus, les méthodes de dimensionnement empiriques ou analytiques, qui permettent par exemple de calculer les déformations et forces d'impact sur merlon à l'aide d'une méthode d'équilibre statique équivalent (ex : Tissières, 1999), prennent peu en compte les mécanismes dynamiques développés dans les ouvrages impactés. Les approches numériques récentes permettent d'approcher le comportement d'ouvrages spécifiques soumis à des impacts (Lorentz, 2007 ; Breugnot, 2011). Cependant ces modèles se montrent souvent complexes d'utilisation et la connaissance de la réponse dynamique des différents constituants de la structure peut encore être améliorée.

Le développement de solutions de parement innovant permettant de réduire l'emprise des merlons de protection et l'amélioration des connaissances sur la réponse dynamique des structures soumises à des impacts passent par la réalisation d'expérimentations en vraie grandeur pour tenter de répondre à ces problématiques.

2. Projet national C2ROP

Les événements de chutes de blocs, les plus fréquents parmi les aléas naturels auxquels sont soumises les régions montagneuses, sont de plus en plus nombreux dans le contexte récent de changement climatique. De plus, l'essor économique et le développement d'infrastructures et de lieux de loisirs en montagne accroissent la vulnérabilité des personnes et des équipements.

Le projet national C2ROP (Chutes de blocs Risque Rocheux Ouvrage de Protection) fédère les principaux acteurs dans le domaine du risque rocheux pour collaborer sur les problématiques de l'aléa et des solutions de protection afin de proposer un ensemble coordonné d'outils et de méthodes pour la gestion du risque.

Les travaux de recherche engagés dans l'axe « parades » du projet national ont pour objectifs de développer des solutions de merlon à emprise au sol réduite et de proposer des méthodes de dimensionnement approfondies, passant notamment par de la modélisation numérique. Le développement de modèles numériques fiables nécessite de réaliser des essais instrumentés en vraie grandeur permettant de confronter les simulations numériques à la réalité. Le programme d'essais sur parements de merlon réalisé dans ce contexte doit alors permettre d'améliorer la connaissance de la réponse dynamique de solutions innovantes et de fournir une base de données expérimentales fiable pour le développement de modèles numériques. L'objectif de cet article est de présenter les essais, la structure de parement Bloc Armé® testée et l'instrumentation mise en œuvre avant d'introduire quelques-uns des principaux résultats obtenus.

3. Description des expérimentations

3.1. Principe des expérimentations et protocole d'essai

Les essais d'impacts, réalisés par des lâchers verticaux de bloc calibré, sont effectués à la station d'essai IFSTTAR à Montagnole (73). Ainsi les structures, sollicitées verticalement, doivent être disposées horizontalement. Les impactants utilisés sont des blocs en béton armé de type ETAG 27 ayant une masse comprise entre 2 580 kg et 12 490 kg et une largeur maximale comprise entre 1,12 m et 1,87 m. La géométrie de ces impactants est telle que la facette impactante est un carré dont le côté est égal à la moitié de la largeur maximale du bloc. Le système de largage permet de contrôler la hauteur de lâcher ainsi que la position d'impact avec une précision de l'ordre du centimètre.

Le parement impacté est placé sur une plateforme de matériau granulaire de 2 m d'épaisseur, autorisant une déformation (Figure 1). La grave roulée de granulométrie 20/40 mm choisie comme matériau constitutif dans cet objectif permet aussi d'obtenir une couche support dont les caractéristiques mécaniques sont relativement peu sensibles à des impacts successifs.

Le programme expérimental comprend trois phases d'essai distinctes, qui comprennent chacune une série d'impacts dont l'énergie varie entre 100 kJ et 2 000 kJ :

- Phase 1 : Essais sur le carreau de la carrière,
- Phase 2 : Essais sur la couche support,
- Phase 3 : Essais sur le parement Bloc Armé®

Les deux premières phases visent à caractériser le sol de la carrière et la couche support sous-jacents au parement sous sollicitations dynamiques. La dernière s'applique à caractériser la réponse dynamique du parement.



Figure 1. Dispositif d'essai avant lâcher sur couche support

3.2. Caractéristiques du parement testé

Le parement Bloc Arme® testé est composé de blocs en béton liés entre eux par des armatures métalliques. Ces armatures sont des éléments de types barres, plaques et tubes qui, assemblés entre eux, confèrent un renforcement (réseau) métallique continu à l'ouvrage.

Dans le cadre de l'expérimentation, 19 blocs sont assemblés en quinconce sur 5 rangées formant un parement bipyramidal de 4 m de large, 8 m de long et 0,8 m d'épaisseur disposé horizontalement sur la couche support (Figure 2).

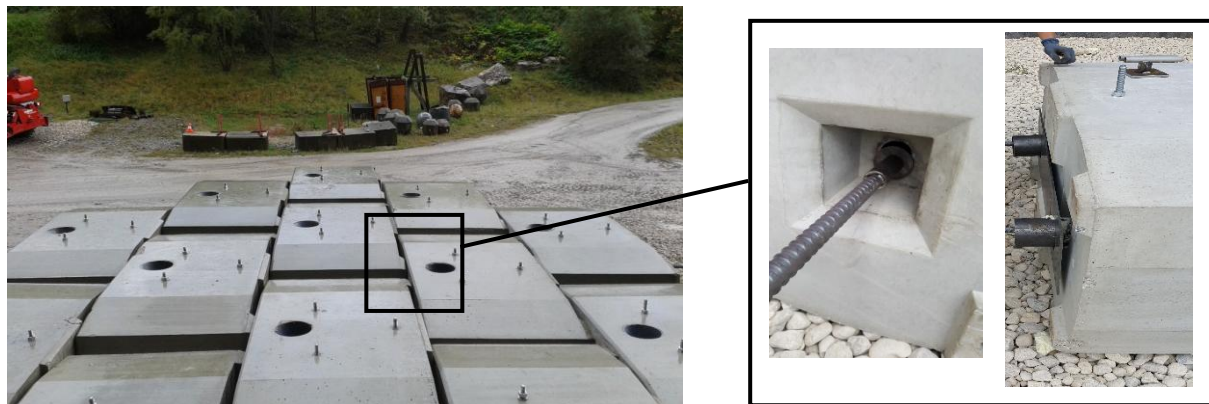


Figure 2. Parement Bloc armé ® disposé horizontalement

3.3. Instrumentation mise en œuvre

De nombreuses mesures sont réalisées pour comprendre la réponse dynamique des structures impactées au cours des différentes phases du programme expérimental.

Deux caméras rapides filment à une fréquence de 500 images par seconde à hauteur de l'impact selon deux axes perpendiculaires. Les images permettent, entre autres, de mesurer la pénétration de l'impactant et la décélération de celui-ci au cours de l'impact (Figure 3).

De plus, l'accélération de l'impactant est mesurée par un accéléromètre placé à son sommet.



Figure 3. Images de l'impact à 300 kJ sur la couche support seule, issues d'une caméra rapide

Trois accéléromètres capacitifs sont mis en place à mi-hauteur dans la couche support (Figure 4). Ils permettent de rendre compte des efforts transmis dans la couche et d'estimer les déplacements engendrés. Pour le point de mesure situé dans l'axe de l'impact, un accéléromètre uniaxial est mis en place et des accéléromètres triaxiaux sont utilisés pour les capteurs excentrés. Pour que les capteurs conservent leur horizontalité et ne se déplacent pas excessivement dans la matrice granulaire lors de la mise en œuvre les accéléromètres ont été placés sur des supports de type grille en polymère.

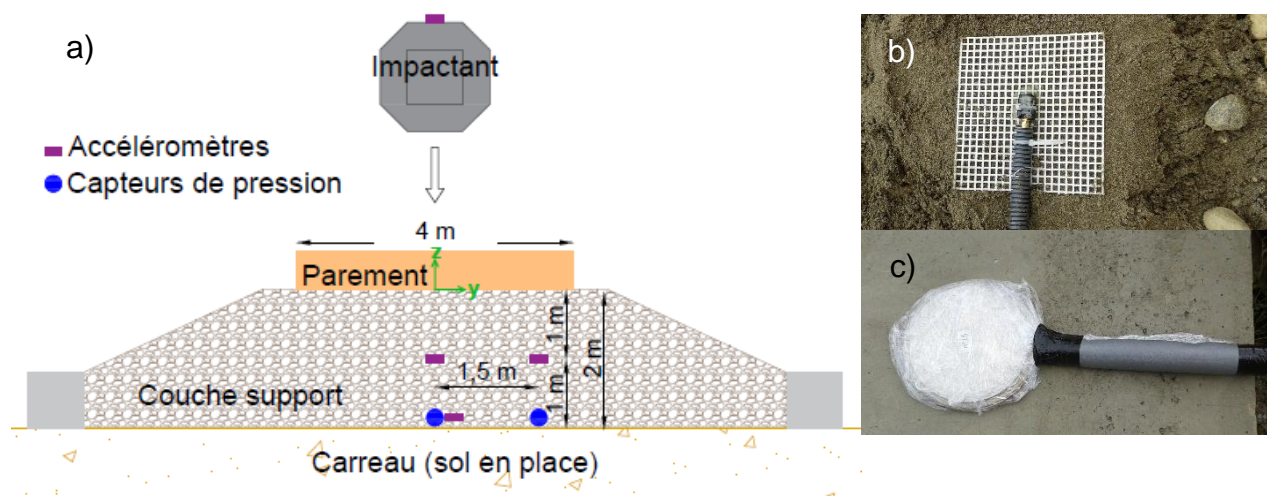


Figure 4. Instrumentation dans la couche support, a) dispositif expérimental et point de mesure, b) accéléromètre sur grille support, et c) capteur de pression

De plus, les transferts de charge sont mesurés à l'aide de capteurs de pressions placés à la base de la couche support. Des capteurs de pression totale, conçus pour des mesures dynamiques dans du ballast en application ferroviaire, ont été mis en œuvre.

Un suivi topographique est exécuté par photogrammétrie à l'aide d'un drone. Des séries de photographies réalisées avant et après les essais permettent de mesurer les déformations des structures sollicitées.

Deux systèmes de géophones sont utilisés pour mesurer les vibrations du sol dans le but d'estimer l'énergie transmise dans le carreau. Cinq géophones mesurant les vitesses de vibration sismique selon 3 directions sont disposés sur le carreau selon deux profils perpendiculaires autour de la couche support. Sont également déployés sur un profil de plus de 100 m, une dizaine de géophones qui mesurent les vitesses de vibration sismiques dans le sol suivant la verticale.

Une caméra thermique enregistrant les ondes de chaleur émises par les éléments en fonction de leur interaction (frottement, collision, déplacement, fracturation ou attrition) filme les essais en plongée.

4. Premiers résultats

Les données issues des expérimentations sont en cours d'analyse. Nous présentons les résultats issus des premiers traitements de mesures.

4.1. Accélération de l'impactant

Le signal de l'accélération de l'impactant, mesuré à haute fréquence (10 kHz), a été traité. Le second principe de Newton permet de calculer la force d'impact au cours du temps.

La courbe pour l'essai à 300 kJ dans la couche support seule (Figure 5) montre qu'au cours de l'impact, d'une durée de 200 ms, une décélération élevée entraîne un pic d'effort sur la toute première partie de l'impact (zone a). La force d'impact diminue rapidement lors de l'enfoncement du bloc dans la couche granulaire (phase b) puis se stabilise (phase c). On attribue cette phase au réarrangement des grains du matériau de la couche support lors de l'enfoncement de l'impactant qui se traduit notamment par la création d'un bourrelet autour de l'impactant (Figure 3). La phase d correspond à la phase de stabilisation de l'impactant jusqu'à son arrêt.

La courbe pour l'essai à 500 kJ sur le parement (Figure 6) montre un impact plus court, d'une durée inférieure à 100 ms, présentant des phases similaires. Le pic d'effort, augmentation de l'effort puis diminution de celui-ci (zones a et b), est ici plus rapide. Le comportement rigide du parement au début de l'impact entraîne un pic d'effort plus élevé comparativement à l'énergie d'impact. La stabilisation de l'effort (zone c) est due au fonctionnement du parement : enfoncement de plusieurs blocs dans la couche support granulaire et diffusion des efforts dans les éléments.

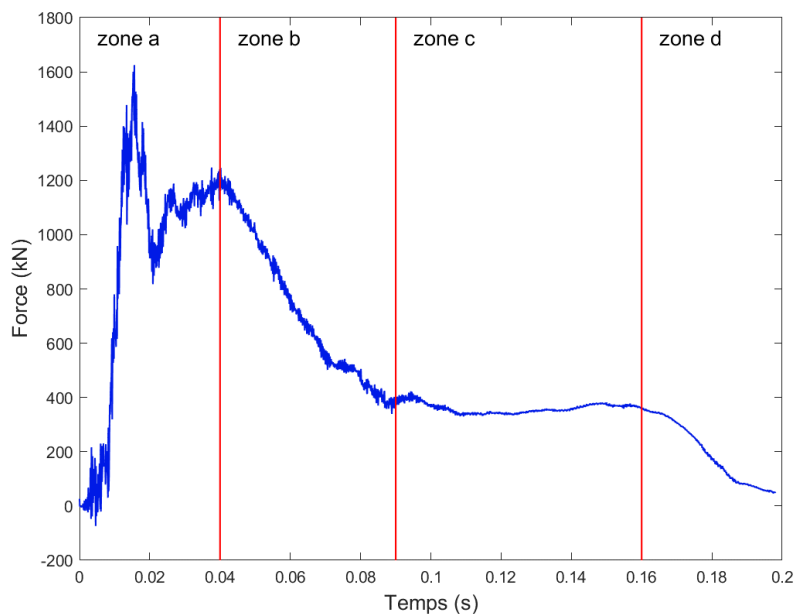


Figure 5. Force d'impact au cours du temps pour l'essai à 300 kJ sur couche support seule

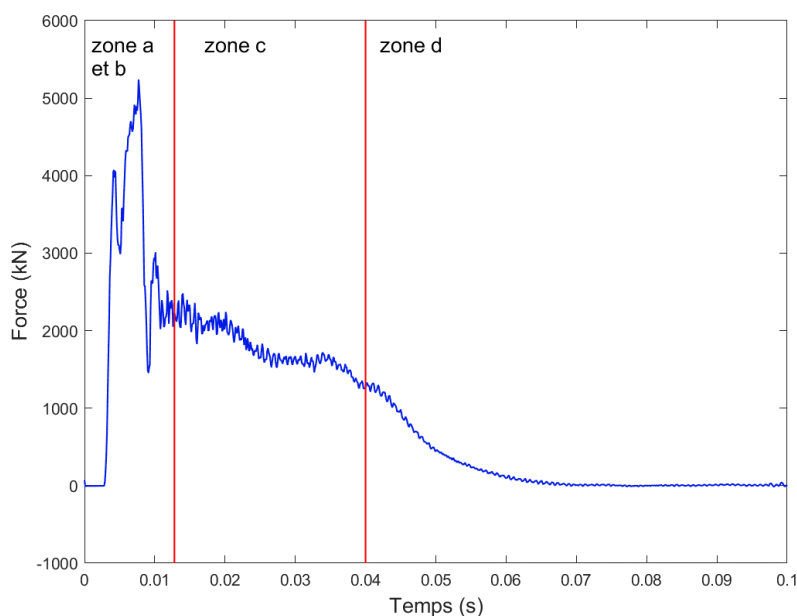


Figure 6. Force d'impact au cours du temps pour l'essai à 500 kJ sur le parement Bloc Armé®

4.2. Contraintes en fond de couche

L'instrumentation mise en œuvre a également permis de mesurer les contraintes transmises en fond de couche en trois points de mesure (Figure 4) pour les essais des différentes phases du programme expérimental.

Les contraintes pour l'essai à 300 kJ sur couche support seule forment un pic suivi d'un plateau de chargement (courbe similaire à celle présentée Figure 5). La valeur maximale des contraintes dans les capteurs excentrés à 1,5 m de l'axe d'impact est de l'ordre 50% de la valeur maximale des contraintes dans le capteur à l'axe (Figure 7).

Les contraintes pour l'essai à 500 kJ sur le parement Bloc Armé® forment un pic de chargement seul. La valeur maximale des contraintes dans les capteurs excentrés à 1,5 m atteint 80% de la valeur maximale des contraintes dans le capteur à l'axe (Figure 8). Cette proportion plus importante que celle obtenue pour l'impact sur couche support seule témoigne d'une diffusion latérale des contraintes via le parement. Le ratio des contraintes maximales comparativement à l'énergie d'impact initiale est assez similaire pour les deux essais présentés.

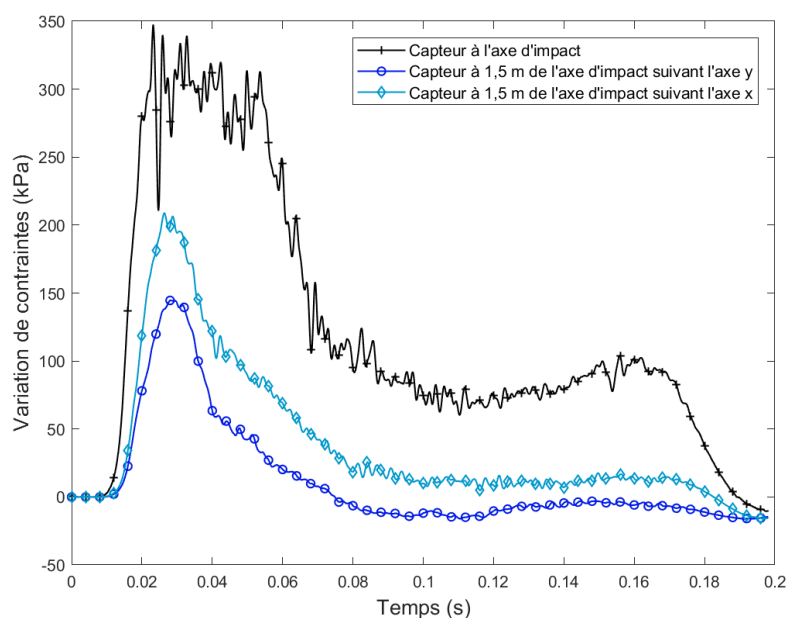


Figure 7. Variation de contrainte au fond de la couche pour l'essai à 300 kJ sur la couche support

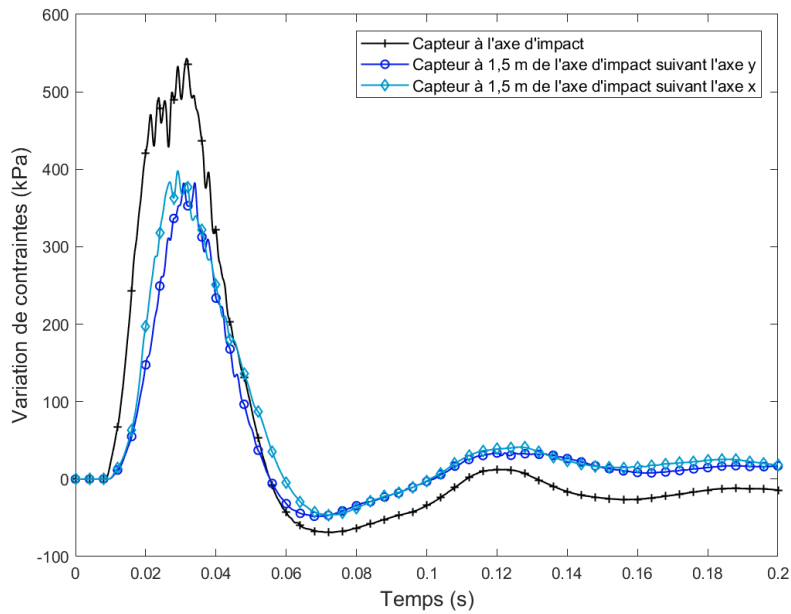


Figure 8. Variation de contrainte au fond de la couche pour l'essai à 500 kJ sur le parement Bloc Armé®

4.3. Déplacements par mesures topographiques différentielles

Un premier traitement des données issues de la photogrammétrie réalisée par drone a rendu possible la visualisation des déplacements engendrés par les impacts. La Figure 9 présente l'intensité des déplacements verticaux du parement après un impact à 500 kJ. On observe un maximum, conforme au déplacement mesuré au décimètre, de l'ordre de 15 cm au droit de l'impact. Une zone d'influence de 2,5m de rayon, soit trois largeurs de bloc, apparaît.

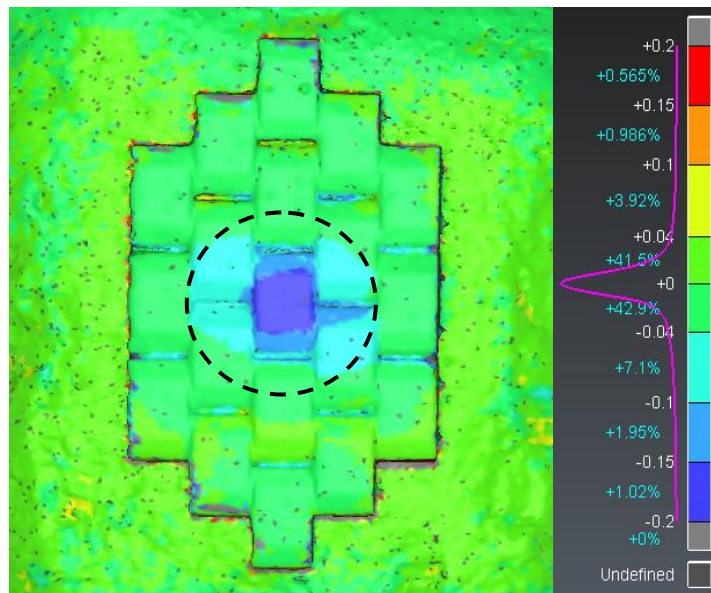


Figure 9. Déplacements verticaux et zone d'influence après un essai à 500 kJ sur parement Bloc Armé®

5. Conclusions

La campagne d'expérimentations, a permis d'observer le comportement du parement Bloc Armé® soumis à des impacts à énergie élevée. Malgré la complexité des essais, due notamment au caractère innovant du parement et d'un montage du parement à l'horizontale sur une couche support en matériau granulaire de granulométrie élevée, la campagne menée a fourni de nombreuses données de mesure.

Ces données dans leur ensemble, dont quelques-unes sont présentées ici, permettront de préciser la cinématique des différents éléments modulaires du parement ainsi que les transferts d'effort et d'énergie au sein de chaque composante. On pourra ainsi détailler le mode de fonctionnement du parement et en optimiser le dimensionnement.

De plus, les mesures réalisées lors d'essais sur le parement, complétées par celles des essais des phases 1 et 2 respectivement sur le carreau et la couche support seule, constituent une base de données complète nécessaire au calage et à la validation de modèles numériques. Les mesures permettront d'obtenir des grandeurs telles que l'enfoncement du bloc, les durées et les forces d'impact, les déplacements et les efforts dans la couche support et également d'estimer l'énergie transmise dans le carreau.

L'amélioration de la connaissance de la réponse dynamique du parement et la production de modèles numériques confrontés à des résultats d'essai en grandeur nature répondront aux objectifs du projet C2ROP en termes de parades, à savoir, améliorer la conception d'ouvrage de protection contre les chutes de blocs rocheux et fournir des outils d'ingénierie pour leur dimensionnement.

6. Remerciements

Les auteurs remercient l'Ifsttar et le Cerema pour le support matériel et l'aide apportés lors de la réalisation des expérimentations dans le cadre de leur participation au projet C2ROP.

7. Références bibliographiques

- Breugnot A. (2011). Approche numérique couplée discret-continu appliquée aux ouvrages cellulaires impactés. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Lambert, S, and Bourrier, F (2013): Design of rockfall protection embankments: a review. *Engineering geology* 154 (28), 77-88.
- Lorentz J. (2007). Étude de la capacité de dissipation sous impact d'une structure sandwich de protection contre les chutes de blocs rocheux. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Tissières J. (1999). Ditches and reinforced ditches against falling rocks. Japan-Swiss scientific.seminar. on impact load by rock falls and design of protection structures,65-68 Kanazawa, Japan.