



HAL
open science

Expérimentations grandeur réelle sur merlons de protection contre les chutes de blocs rocheux

A. Heymann, Stéphane Lambert, P. Gotteland, M. Collombet, M. Douaillat

► To cite this version:

A. Heymann, Stéphane Lambert, P. Gotteland, M. Collombet, M. Douaillat. Expérimentations grandeur réelle sur merlons de protection contre les chutes de blocs rocheux. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2010, Jul 2010, Grenoble, France. p. 665 - p. 672. hal-00517143

HAL Id: hal-00517143

<https://hal.science/hal-00517143>

Submitted on 13 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EXPERIMENTATIONS GRANDEUR REELLE SUR MERLONS DE PROTECTION CONTRE LES CHUTES DE BLOCS ROCHEUX

REAL SCALE EXPERIMENTS ON ROCKFALL PROTECTION CELLULAR EMBANKMENTS

Adeline HEYMANN¹, Stéphane LAMBERT², Philippe GOTTELAND³, Marielle COLLOMBET⁴, Maurice DOUAILLAT⁵

1 Cemagref – L3SR – Razel, Grenoble, France

2 Cemagref, Saint Martin d'Hères, France

3 L3SR, Grenoble, France

4 Géolithe, Crolles, France

5 Razel, Christ de Saclay, France

RÉSUMÉ – Pour comprendre le comportement mécanique des structures de protection contre les chutes de pierres sous sollicitation dynamique, des expérimentations d'impact sur des ouvrages pare-blocs grandeur réelle ont été réalisées. Après avoir précisé les objectifs du projet, l'article décrit les structures impactées, l'instrumentation mise en œuvre, et quelques premiers résultats.

ABSTRACT – In order to explore the mechanical behaviour of rockfall protection structures under dynamic loading, real scale impact experiments are performed. After the presentation of the objectives of the project, the article describes the three impacted structures, the instrumentation and the first results.

1. Introduction

Les changements climatiques peuvent conduire à une augmentation de l'occurrence des risques naturels, justifiant des recherches pour l'amélioration des techniques de protection. En effet, les chutes fréquentes de blocs rocheux ont mené au développement et à l'amélioration de méthodes de protection passive comme les galeries, les filets, et les merlons renforcés.

Alors que plusieurs études ont été menées pour améliorer la conception des galeries et des filets d'un point de vue expérimental et numérique, la conception des merlons en remblai renforcé repose généralement sur une approche empirique. Dimensionner ce type d'ouvrages en prenant en compte les mécanismes mis en jeu lors d'un impact est très complexe car l'impact d'un bloc ayant une grande vitesse induit de grandes déformations dans le remblai. Un certain nombre de méthodes analytiques ont été élaborées mais restent relativement approximatives (Subrin, 2006; Tissières, 1999). Avec l'évolution des méthodes et des moyens de calcul, les simulations numériques apparaissent comme étant plus appropriées et satisfaisantes pour tenter de prendre en compte la complexité des impacts sur merlons (Hearn et al., 1995; Nicot et al., 2007; Peila et al., 2007). Malgré leur complexité, les résultats de calcul par ces approches sont en accord avec les données issues des quelques expérimentations à échelle réelle (Hearn et al., 1995; Peila et al., 2007). Néanmoins, le dimensionnement des remblais de protection ne tient généralement pas compte de la réponse dynamique des structures impactées

de façon satisfaisante. L'analyse approfondie de la réponse mécanique de ces structures soumises à des impacts de blocs rocheux reste à entreprendre afin de pouvoir considérer de manière efficace les aspects dynamiques dans la conception et le dimensionnement des ouvrages.

2. Objectifs du projet de recherche REMPARE

Les structures sandwichs s'avèrent pertinentes à des fins de protection contre les impacts dans de nombreux domaines, et notamment pour les merlons de protection pare-blocs (Yoshida, 1999). Reprenant ce principe, d'importants travaux de recherche ont été initiés dans le cadre du projet ANR REMPARE (www.rempare.fr) avec pour objectif de proposer des ouvrages de protection sandwichs à technologie cellulaire : l'ouvrage est construit à partir de géocellules qui, remplies de différents matériaux, permettent de construire un ouvrage sandwich.

Les géocellules sont des structures composites, combinant une enveloppe et un matériau de remplissage. En fonction de la position de la cellule dans l'ouvrage, on adapte ce matériau pour conférer à la cellule des caractéristiques particulières. L'objectif de ces structures est de réduire fortement les contraintes transmises à l'arrière de la structure, en concentrant les contraintes et déformations, c'est-à-dire la dissipation de l'énergie, dans le parement et le noyau (Fig. 1). La nature cellulaire de ce type de structure doit faciliter la maintenance et les réparations, consistant seulement en la réparation du grillage ou le remplacement des cellules endommagées.

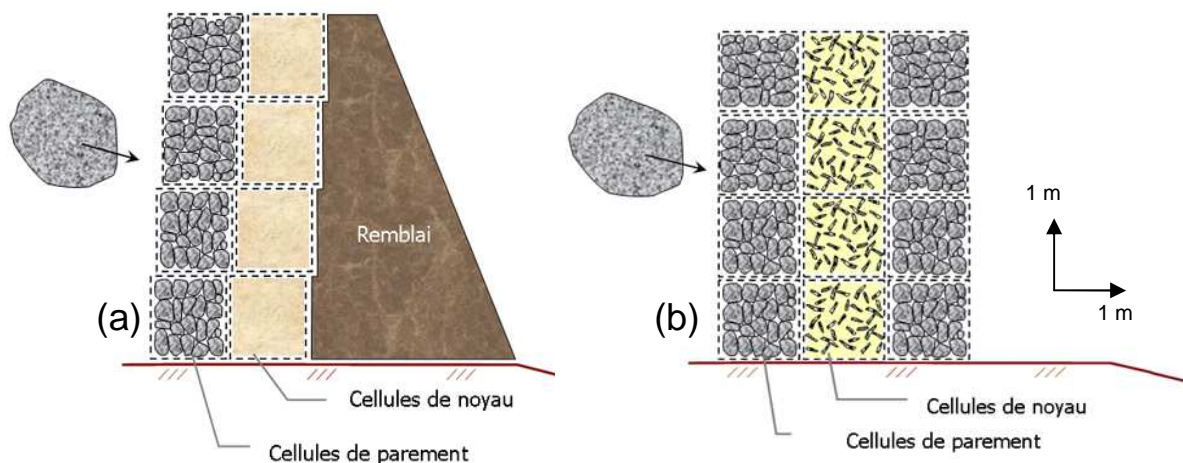


Figure 1. Structures testées (a) type 1 : un parement cellulaire appuyé contre un remblai, (b) type 2 : un mur sandwich cellulaire.

Les travaux de recherche menés pour développer cette technologie cellulaire, combinent expérimentations et modélisations numériques selon l'approche multi-échelle : des matériaux constitutifs aux ouvrages vraie grandeur. Les expérimentations et modélisations à l'échelle de la cellule ont été menées (Lambert et al., 2009; Nicot et al., 2007) et différentes méthodes de modélisations numériques à l'échelle de la structure sont en cours (méthode des éléments discrets, méthode des différences finies, couplage discret/continu)(Bourrier et al., 2010; Breugnot et

al., 2010). Le but du projet REMPARE est de fournir des solutions opérationnelles pour la conception de ces ouvrages pour des énergies d'impact petites à moyennes (< 5000 kJ), en incluant l'utilisation de matériaux recyclés tels que les pneus usagés. Dans ce cadre, des essais à échelle réelle ont été réalisés fin 2009. Le but de cet article est de présenter les structures testées et les systèmes de mesure mis en oeuvre.

3. Description des expérimentations

3.1. Structures testées

Deux types de structure ont été testés : le premier consiste en un parement cellulaire appuyé contre un remblai (Fig. 1a). Le deuxième type consiste en un mur sandwich cellulaire (Fig. 1b) ; pour celui-ci différents matériaux sont utilisés pour le noyau.

Les géocellules considérées dans cette étude sont des gabions, formés à partir d'une enveloppe faite d'un grillage à maille hexagonale. Les cages de gabion sont de forme parallélépipédique, de 1 m. de hauteur et divisées en deux ou trois géocellules cubiques par des diaphragmes. En fonction de leur position dans la structure, elles sont remplies de calcaire concassé, de ballast, ou d'un mélange de sable et de pneus déchiquetés (Tableau I). Les matériaux fins sont contenus dans un géotextile non tissé en complément du grillage. Des tirants sont placés en travers des cellules pendant le remplissage pour éviter la déformation des cellules sous leur propre poids. Ces dispositions concernent également les cellules de noyau en vue de réparation de l'ouvrage par remplacement des cellules de parement.

Les structures ont une hauteur de 4 m et une longueur de 8 m. Le tableau I résume les matériaux employés dans chaque partie des trois structures testées. La masse volumique des différents types de gabions a été déterminée par pesée.

3.2. Dispositif expérimental

Les structures testées ont été soumises à l'impact d'une sphère de 6500 kg et de 1,60 m de diamètre, faite d'une coque d'acier remplie de béton.

L'impactant était suspendu par l'intermédiaire d'une élingue à une poulie se déplaçant sur un câble porteur. Il pouvait ainsi être remonté à différentes hauteurs en fonction de l'énergie d'impact à atteindre. L'énergie maximum d'impact était 2000 kJ, ce qui correspond à une hauteur de chute d'environ 30 m (Fig. 2).

Tableau I. Matériaux de remplissage utilisés.

Structure	Cellules de parement amont	Cellules de noyau	Partie arrière (parement à l'aval)
Type 1 – structure n°1	Pierres calcaires	Mélange sable-pneus	Remblai
Type 2 – structure n°2	Pierres calcaires	Ballast	Pierres calcaires
Type 2 – structure n°3	Pierres calcaires	Mélange sable-pneus	Pierres calcaires

Ce dispositif permet un bon contrôle des paramètres cinématiques avant impact : position de l'impact et vitesse incidente. Ce système de tyrolienne a également été retenu pour des raisons de sécurité : il n'était pas envisageable de larguer l'impactant et de lui laisser une phase de vol libre avant l'impact. Avant chaque essai, la tension dans le câble porteur était mesurée pour palier à d'éventuels effets thermiques (dilatation, extension thermique du câble).

Pour chaque structure, trois niveaux d'énergie ont été testés : 200 kJ, 500 kJ et 2000 kJ. Après l'essai à 500 kJ, les parements étaient réparés à l'aide d'une rustine de grillage, avec remplissage par des pierres, pour restaurer la planéité du parement.

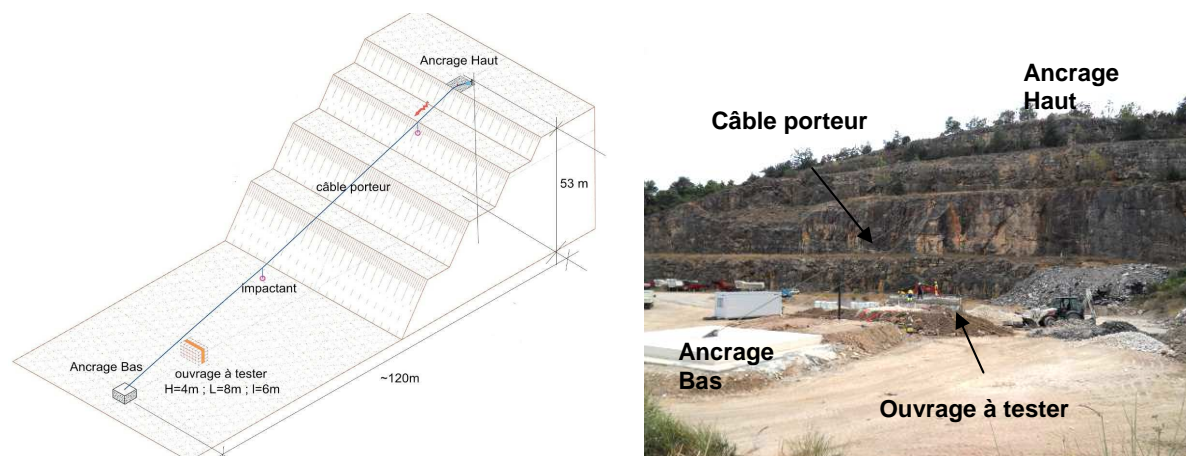


Figure 2. Schéma du système de lancement (à gauche), photo du système de lancement pendant la construction de l'ouvrage de type 1.

3.3. Instrumentation et mesures

Pour comprendre le comportement mécanique de ce type de structure sous sollicitation dynamique, des appareils de mesure nombreux et variés ont été utilisés (Fig. 3 et 4).

L'impactant était équipé de deux accéléromètres triaxiaux placés à son centre de gravité. Deux systèmes d'acquisition ont été utilisés pour éviter un éventuel dysfonctionnement de l'un d'eux. Un des accéléromètres était relié par câble à une centrale d'acquisition terrestre, l'autre était relié à un système innovant d'acquisition embarqué.

L'instrumentation mise en œuvre dans les structures (Fig. 3) visait à évaluer (i) les déplacements, (ii) les transferts d'énergie et (iii) leur endommagement. La Figure 4 présente les différents types de capteurs utilisés dans ces expérimentations.

Les déplacements à l'intérieur de l'ouvrage étaient estimés grâce à des capteurs de déplacement à tige reliés à six points différents de l'ouvrage. Deux inclinomètres, l'un automatique et l'autre classique, étaient également placés dans le remblai (structure de type 1). L'inclinomètre automatique était scellé dans un tube PVC, l'inclinomètre classique était mis en œuvre par tronçon de 1 m. à l'avancement. De plus, un levé topographique permettait un relevé des déplacements des faces visibles de la structure (avant, arrière, dessus) après chaque impact, pour en déduire les déformations.

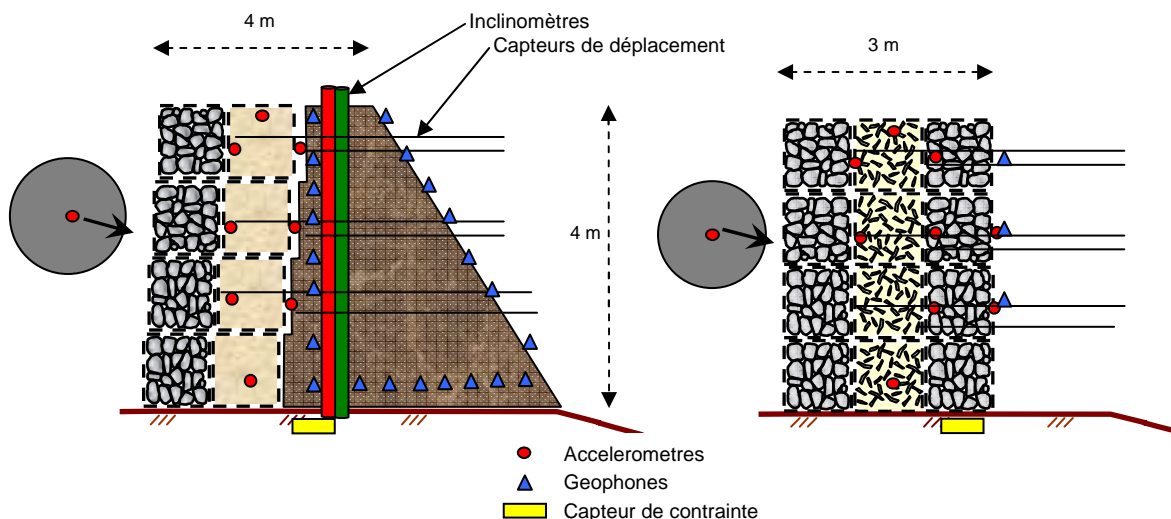


Figure 3. Systèmes de mesure dans le plan d'impact pour les deux types de structures (type 1 à gauche : 11 accéléromètres uniaxiaux, 24 géophones horizontaux et 24 géophones verticaux ; type 2 à droite : 11 accéléromètres uniaxiaux, 3 géophones).

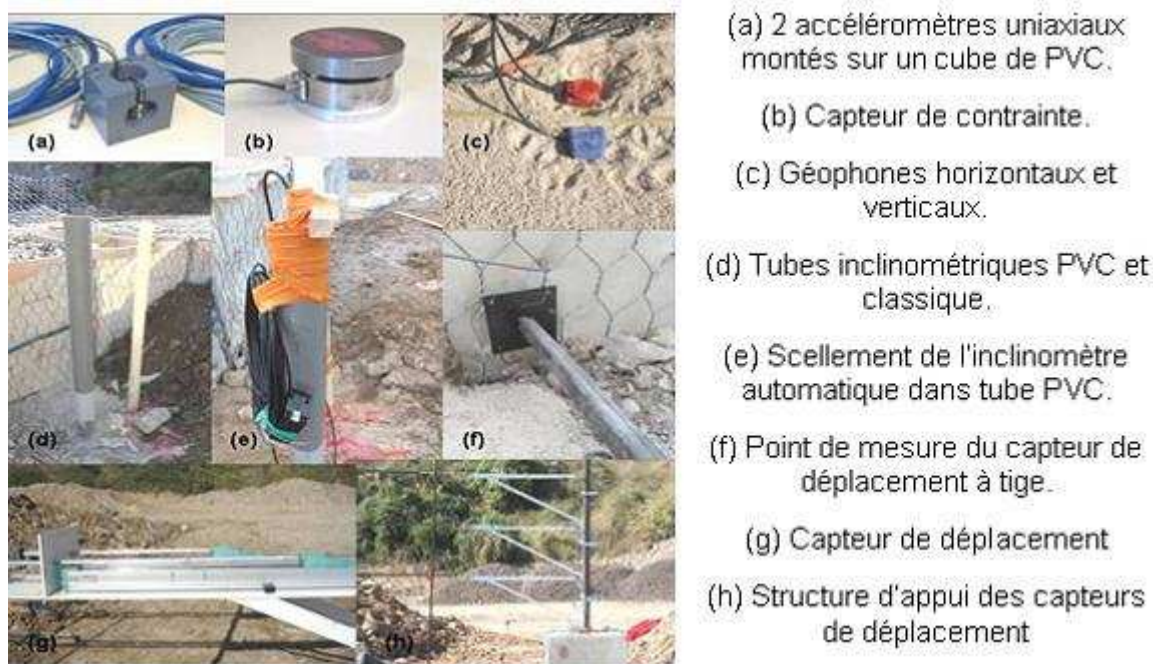


Figure 4. Présentation des différents capteurs mis en oeuvre dans les expérimentations.

En l'absence de points immobiles dans la structure, il a été choisi de ne pas mesurer la variation de contrainte dans l'ouvrage mais l'accélération subie par les particules de sol, lors du passage de l'onde de compression. A cette fin, des accéléromètres triaxiaux et uniaxiaux, fixés sur support en PVC (Fig. 4a), avaient été placés en 11 points de mesure différents. Les données recueillies permettront

d'estimer le temps d'arrivée de l'onde de compression ainsi que son amplitude. Cette amplitude peut être utilisée pour estimer les transferts d'énergie. Un capteur de contrainte placé sous la structure, donnait l'augmentation du chargement du sol d'assise due à l'impact.

L'endommagement de la structure était quantifié par des levés géophysiques. Des géophones étaient placés dans le remblai (structure de type 1) et à la surface de la structure. Les variations observées dans les vitesses des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) après chaque tir permettent de révéler des changements dans l'état de compaction du matériau. L'analyse des vitesses P et S dans les différents matériaux du parement et du noyau permet également d'obtenir un ordre de grandeur des paramètres élastiques des différents matériaux. La détermination de ces paramètres est en effet essentielle pour rendre compte de manière satisfaisante des propriétés mécaniques et donc du comportement des ouvrages dans le travail de simulation numérique.

Les principales zones instrumentées étaient l'interface entre le parement amont et le noyau, et l'interface entre le noyau et le remblai (Fig. 3). Les capteurs étaient placés dans un plan vertical selon la direction de l'impact, et dans un plan parallèle décalé de 2m par rapport au plan d'impact.

L'utilisation de tels appareils dans ce contexte était inhabituelle et innovante. Certaines de ces mesures étaient redondantes, comme par exemple les inclinomètres certains accéléromètres et les capteurs de déplacement, ainsi une même mesure était obtenue par différents types de capteurs. Les comparaisons issues de l'analyse de ces capteurs permettront de valider les données obtenues et les principes de mesure.

Comme présenté Figure 3, les types de capteurs et les positions étaient différents suivant le type de structure. Par exemple, les inclinomètres n'ont pas été installés dans les structures de type 2, compte tenu de la nature granulaire grossière des matériaux de remplissage de la partie arrière.

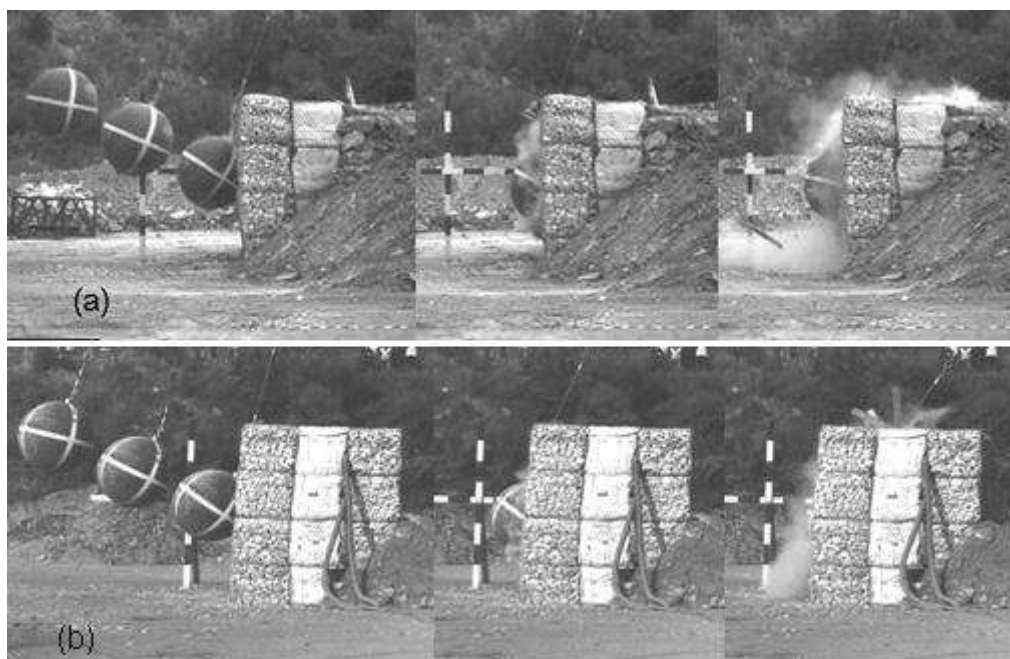


Figure 5. Images issues de la caméra rapide pour un impact à 2000 kJ sur une structure de type 1-structure 1 (a) et de type 2-structure 3 (b).

Chaque impact était filmé par une caméra rapide (250 images par seconde) dans le plan d'impact. L'analyse des films permet de calculer la vitesse incidente de l'impactant, et de décrire qualitativement la déformation de la structure (Fig. 5)

4. Premiers résultats

Les données issues des essais réalisés fin 2009 sont en cours de traitement et d'analyse. La Figure 6 montre le type de résultats obtenus à partir de l'accéléromètre 'filaire' de l'impactant pour un essai à 200kJ et à 500 kJ sur la structure 1 et sur la structure 3.

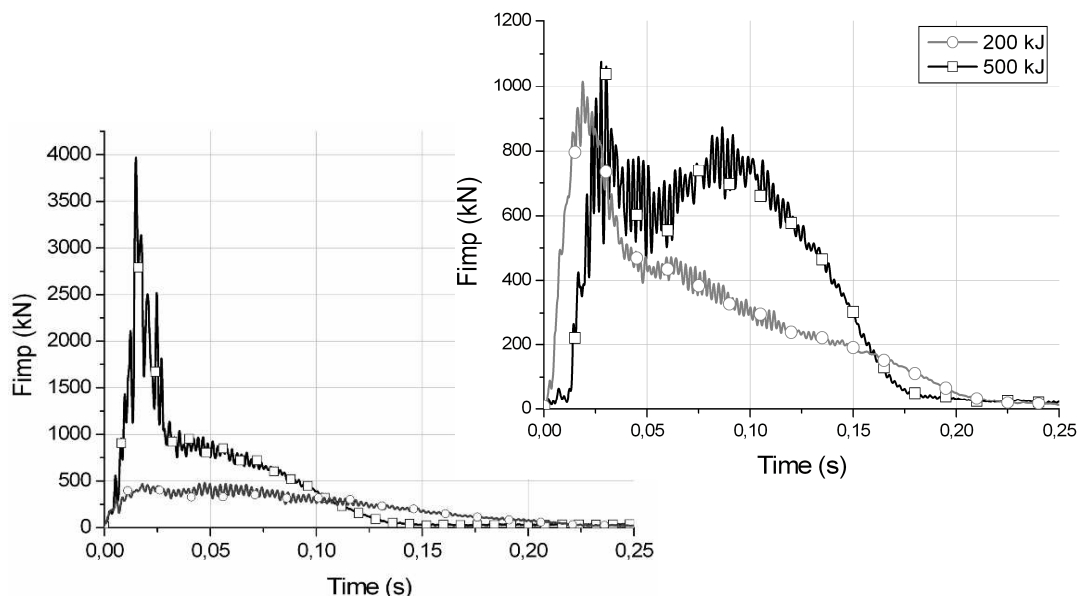


Figure 6. Force d'impact pour des impacts à 200kJ et 500 kJ sur un ouvrage de type 1-structure 1 (à droite), et de type2-structure 3 (à gauche).

La principale observation que l'on peut faire est l'apparition d'un pic dynamique très marqué pour l'essai à 500 kJ sur la structure 3 (à gauche sur la Fig 6). Ce pic se manifeste à un temps très court (autour de 20 ms) : il est donc caractéristique des matériaux à proximité de l'impact, les zones plus éloignées n'étant pas encore mobilisées. La différence de courbe entre les deux ouvrages révèle donc une différence de caractéristiques mécaniques au parement, voire dans le noyau.

5. Conclusions

Pour comprendre le comportement mécanique des structures de protection contre les chutes de blocs sous sollicitation dynamique, une campagne d'expérimentations sur ouvrage de taille réelle a été réalisée à la suite d'essais sur ouvrages de taille semi-vraie grandeur (Lambert al., 2010). La nature cellulaire des structures permettait d'adapter les caractéristiques des matériaux de remplissage des

géocellules en fonction de leur position dans la structure. Le principe technologique s'avère pertinent, toutes les structures ayant arrêté la sphère sans que leur ruine ne soit atteinte, pour l'énergie maximale testée de 2000kJ.

L'instrumentation mise en œuvre permettra d'évaluer les transferts d'énergies et l'endommagement des structures pour améliorer leur conception et leur dimensionnement. Les données acquises seront analysées aux fins de comparaison des trois structures, en termes de comportement mécanique et d'efficacité. Ces données permettront également de valider les modèles numériques en cours de développement.

De plus, ces expérimentations ont permis de confirmer la pertinence du principe technologique : toutes les structures ont arrêté la sphère sans atteindre la ruine totale de l'ouvrage et les parements sont effectivement rapidement réparables, par mise en œuvre de rustine ou remplacement des cellules de parement concernées.

6. Remerciements

Les expérimentations présentées dans cet article ont été réalisées dans le cadre du projet de recherche ANR REMPARE. Les auteurs remercient tous les partenaires du projet : Razel, Geolithe, L-3SR, Cemagref, Egis, Sage, CER-Rouen, France Maccaferri, SNCF, Eurec, Ineris, LCPC.

7. Références bibliographiques

- Bourrier F., Lambert S., Heymann A., and Gotteland P. (2010) Evaluation of the efficiency of a model of rockfall protection structures based on real-scale experiments. 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering.
- Breugnot A., Gotteland P., Villard P., Allagnat D., and Garcin P. (2010) Impact de blocs rocheux : modélisation par une approche couplée continue-discontinue. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur JNGG 2010.
- Hearn G., Barrett R., and Henson H. (1995) Development of effective rockfall barriers. *Journal of transportation engineering*, 121(6), 507-516.
- Lambert S., Gotteland P., and Nicot F. (2009) Experimental study of the impact response of geocells as components of rockfall protection embankments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 459-467.
- Lambert S. Heymann A., Gotteland P. Douaillat M., Haza-Rozier E., Vincelas G. (2010). Comparaison du comportement de trois structures cellulaires pare-blocs; approche expérimentale semi-vraie grandeur. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Grenoble, Juillet 2010.
- Nicot F., Gotteland P., Bertrand D., and Lambert S. (2007) Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to rock impacts. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 31, 1477-1515.
- Peila D., Oggeri C., and Castiglia C. (2007) Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests. *Landslides*, 4, 255-265.
- Subrin D. (2006) Modélisation analytique et numérique pseudo-statique des merlons de protection contre les chutes de blocs rocheux. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur-JNGG', 145-148.
- Tissières P. (1999) Ditches and reinforced ditches against falling rocks. Joint Japan-Swiss scientific seminar on impact load by rock falls and design of protection structures, 65-68.
- Yoshida H. (1999). Recent experimental studies on rockfall control in Japan. Conference Proceedings, Joint Japan-Swiss scientific seminar on impact by rock falls and design of protection structures, Kanazawa, Japan, pp 69-78