

COMPARAISON EXPERIMENTALE SEMI-VRAIE GRANDEUR DU COMPORTEMENT DE TROIS STRUCTURES PARE-BLOCS

HALF SCALE EXPERIMENTAL COMPARISON OF THREE ROCKFALL PROTECTION STRUCTURES

Stéphane LAMBERT¹, Adeline HEYMANN^{1,2,3}, Philippe GOTTELAND², Maurice DOUAILLAT³, Elizabeth HAZA-ROZIER⁴, Gratien VINCESLAS⁴

1 Cemagref, Saint Martin d'hères, France

2 L3SR, Grenoble, France

3 Razel, Christ de Saclay, France

4 CER, Rouen, France

RÉSUMÉ – On s'intéresse ici au comportement sous impact de structures sandwichs, alternant des matériaux de granulométries et densités différentes. L'objectif est d'optimiser l'efficacité des ouvrages de protections contre les chutes de blocs rocheux. Les résultats expérimentaux sur trois ouvrages de taille semi-vraie grandeur et soumis à impacts d'énergie croissante sont présentés et discutés.

ABSTRACT – This paper deals with the mechanical response of sandwich structures, alternating materials differing by both their grain size and densities. The aim is to improve the efficiency of rockfall protection structures. The experimental results obtained on three half-scale structures subjected to increasing energies impacts are presented and discussed.

1. Contexte et objectifs

La protection passive contre les chutes de blocs rocheux et pierres s'appuie notamment sur des ouvrages construits pour tout ou partie de matériaux granulaires naturels. C'est le cas des merlons, ouvrages en remblais, utilisés en pied de versants pour intercepter ou détourner les blocs d'énergie moyenne à élevée (2 à 50 MJ). Bien que certaines études expérimentales et numériques aient été conduites (Yoshida, 1999; Hearn et al., 1995; Peila et al., 2007; Aminata et al., 2008), le dimensionnement de ces ouvrages s'appuie le plus souvent sur une approche empirique. L'amélioration de l'efficacité de ces géo-ouvrages en élévation passe par une analyse approfondie de leur réponse mécanique, sous sollicitation dynamique.

Reprenant le principe de la structure sandwich, introduite dans le domaine des ouvrages de protection pare-blocs par Yoshida (Yoshida, 1999), une étude a été engagée pour développer le recours à la technologie cellulaire pour la construction de ces ouvrages (Projet ANR REMPARe, www.rempare.fr). Dans ce cadre d'étude, les cellules sont des cages de grillage métallique que l'on peut remplir de différents types de matériaux granulaires pour construire un ouvrage sandwich, c'est-à-dire constitué de couches aux caractéristiques mécaniques différentes. L'objectif de ce sandwich est de réduire les efforts transmis vers l'aval de l'ouvrage, en favorisant la diffusion et la dissipation de l'énergie transmise à l'ouvrage lors de l'impact.

Dans cette démarche, l'étude expérimentale du comportement des cellules sous impact a tout d'abord été menée (Lambert et al., 2006, 2009) avant de s'intéresser à

la réponse sous impact d'ouvrages semi-vraie vraie grandeur, puis vraie grandeur (Heymann et al., 2010). Cette communication s'intéresse à l'échelle de l'ouvrage semi-vraie-grandeur en s'attachant particulièrement à la transmission des efforts au droit de l'impact, sur trois ouvrages de constitutions différentes.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Ouvrage impacté

Les ouvrages étudiés sont constitués d'un sandwich à deux couches de 1,5 m de haut, 2,5 m de long et 1 m de profondeur (Fig. 1).

La première couche de l'ouvrage, ou couche de parement, est constituée de 15 gabions remplis de matériaux grossiers. Ces cages sont cubiques et de 500 mm d'arête et constituées de grillage à maille hexagonale, dit double-torsion. Le matériau de remplissage est un concassé de carrière issu de calcaire, ayant une granulométrie de 80 à 150 mm et provenant de la carrière du Bar sur Loup (06).

Les trois ouvrages se différencient par le matériau de remplissage de la couche de noyau de l'ouvrage (Tab. I). Ce matériau est versé à l'arrière du parement, avec une contention par géotextile. Cette couche est continue (pas de gabion).

Cet ouvrage est construit devant un mur en béton armé, appuyé sur un remblai compacté (Fig. 1). Compte-tenu du principe technologique, l'objectif de la structure sandwich est de minimiser la sollicitation sur ce mur.

Tableau I. Matériaux constitutifs du noyau des 3 ouvrages

| Ouvrage | Matériau du noyau |
|---------|---|
| N°1 | Sable de Seine, granulométrie 0,2-5 mm |
| N°2 | Mélange 70% Sable de Seine / 30% pneus déchiqués tés (massique) |
| N°3 | Ballast ferroviaire |

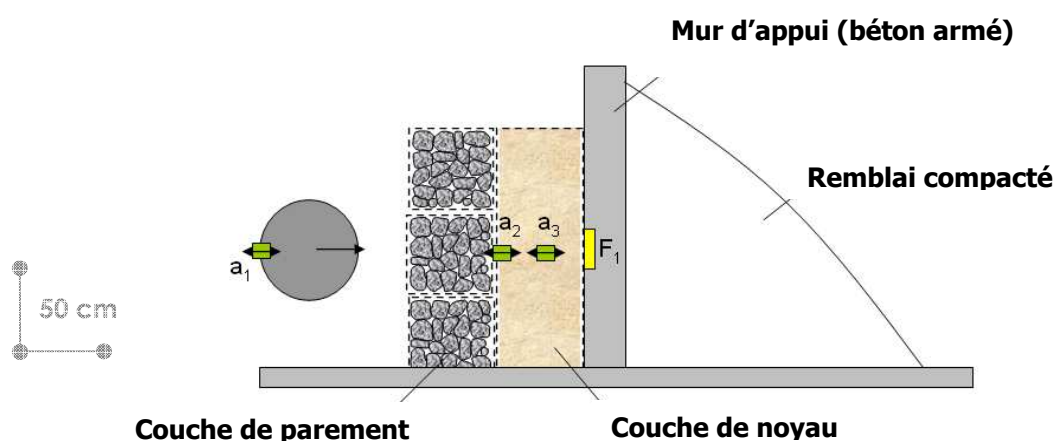


Figure 1. Structure impactée et instrumentation mise en œuvre

2.2 Expérimentations

Les expérimentations, conduites au CER de Rouen, consistaient en l'impact pendulaire de l'ouvrage par un projectile.

Le projectile est constitué d'une coque sphérique en acier de 54 cm de diamètre extérieur. Il est rempli de béton et a une masse de 260 kg (Lambert et al., 2006, 2009).

Le système pendulaire est constitué de deux poutrelles métalliques de 7 m. de haut, reliées par une poutrelle transversale, et sur lesquelles sont fixées deux chaînes métalliques, supportant la sphère (Fig. 2). La sphère est remontée à l'aide d'un câble, jusqu'à une hauteur maximale de 4,75 m au dessus du sol. Au début de l'impact, la trajectoire de la sphère est normale au parement. L'énergie maximale développée avec ce dispositif est de 10 kJ.

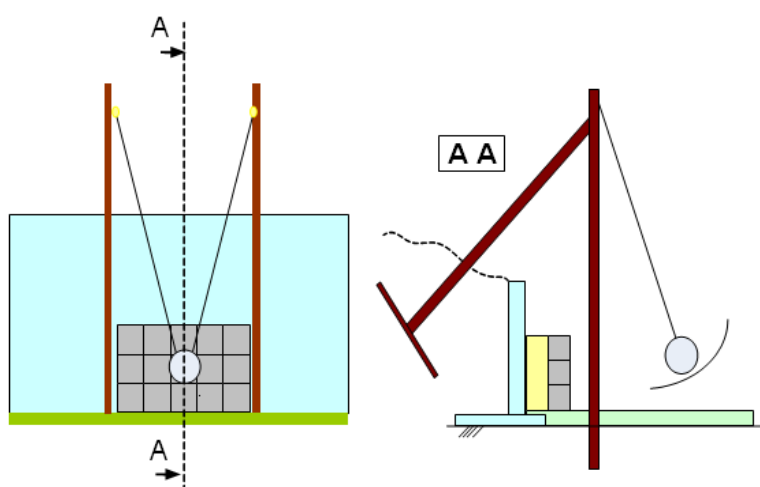


Figure 2. Schéma du dispositif expérimental

Les mesures faites en continu lors de ces essais concernaient:

- l'accélération du projectile : accéléromètre piézorésistif triaxial fixé sur la coque, à l'opposé du point d'impact (Fig. 3). On en déduit la force d'impact, F_{imp} , comme étant le produit de l'accélération par la masse du projectile, ainsi que la durée de l'impact, d_{imp} . Le début de l'impact est défini à partir de cette mesure.
- l'accélération dans l'ouvrage, en différents points et en particulier dans l'axe de l'impact, à l'interface entre le parement et le noyau et au milieu du noyau (resp. a_2 et a_3 sur Fig. 1). Ces accéléromètres uni-axiaux piézorésistifs sont fixés sur des supports (Fig. 3). Ils permettent de déterminer les temps d'arrivée de l'onde de compression ainsi que l'amplitude de l'accélération.
- la force transmise au mur d'appui, en différents points et en particulier dans l'axe de l'impact, lieu présumé du maximum (F_1 sur Fig. 1). On en déduit la contrainte à l'interface entre le noyau et le mur, ou contrainte transmise σ_{tran} , sachant que le diamètre de la surface sensible du capteur est 0,1 m.

Les capteurs a_2 , a_3 et F_1 sont placés à la même hauteur que le point d'impact. L'acquisition a été faite à une fréquence de 40 kHz. Pour réduire le bruit sur certains signaux, dus à des phénomènes haute fréquence, un filtre passe-bas de type Butterworth a été utilisé (fréquence de coupure de 1000 Hz). Tous les signaux ont subi ce même traitement pour éviter un biais lié au décalage temporel qu'il induit.



Figure 3. Accéléromètres a_1 (à gauche) et a_2 (à droite)

La norme de la décélération subie par le projectile a été calculée à partir des 3 composantes filtrées de l'accélération.

Toutes les courbes présentées par la suite sont recalées temporellement par rapport au début de l'impact. Elles donnent la variation de la grandeur lors de l'impact.

D'autres capteurs (force et accélération) ont également été positionnés hors de l'axe d'impact. Les déformations du parement de l'ouvrage ont également été mesurées. Les données recueillies ne sont pas présentées ici.

L'évaluation de la réponse de la structure s'appuie en premier lieu sur les efforts transmis au mur d'appui, valeur que le sandwich doit minimiser. Les autres données visent à caractériser l'impact et également à appréhender les phénomènes expliquant les différences de réponse observées entre les 3 ouvrages et aux différentes énergies (dissipation d'énergie, diffusion des efforts).

Quatre essais successifs, à énergie d'impact croissante (2, 4, 8 et 10kJ) ont été réalisés sur un même parement, sans réparation. Le dernier impact a été répété une fois.

3. Résultats

Dans un premier temps, on présente les données relatives à l'ouvrage 1 lorsque soumis à l'impact de 8 kJ, dans le but d'illustrer les informations tirées des capteurs positionnés dans l'axe de l'impact et de détailler la réponse de l'ouvrage. Dans un deuxième temps, on s'intéresse à l'évolution de la contrainte transmise au mur d'appui au cours de la série d'essai, et ainsi aux conséquences de la répétition des impacts. Enfin, on compare la réponse des 3 ouvrages lorsque soumis à l'impact à 8 kJ en termes de contrainte au mur d'appui.

3.1. Impact à 8 kJ sur l'ouvrage 1

La figure 4 montre les mesures faites par les accéléromètres a_1 , a_2 et a_3 et le capteur de force F1.

La propagation de l'onde de compression est clairement mise en évidence par le décalage entre les courbes. Les vitesses de propagation que l'on peut déduire sont de 120m/s et 66m/s dans les cellules de parement et dans le noyau, respectivement. Ces valeurs sont relativement faibles. De plus, le calcul les surestime car il considère pour trajet parcouru les dimensions initiales de l'ouvrage,

faute d'avoir une valeur précise des distances effectives entre les différents points concernés, après plusieurs impacts successifs.

Cette figure montre également la réduction de l'amplitude de l'accélération subie aux différents points de mesure. L'interaction entre le parement et l'impactant conduit à une décélération maximale de celle-ci de l'ordre de 170 m.s^{-2} . A l'interface entre parement et noyau, la valeur maximale chute à 430 m.s^{-2} , pour atteindre 330 m.s^{-2} au milieu du noyau. On souligne par ailleurs que le pic d'accélération en milieu de noyau (a_3) est atteint au moment où le mur d'appui est sollicité, donc avant que l'onde de compression n'ait été réfléchi. Les pics observés sur les courbes issues des accéléromètres ne sont donc pas affectés par la présence du mur.

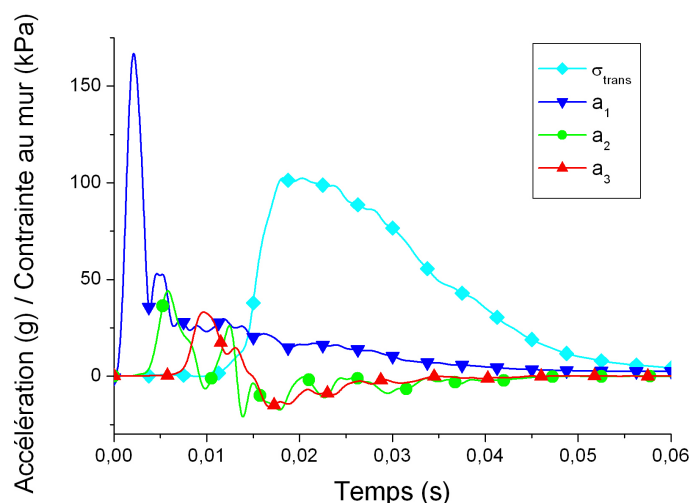


Figure 4. Données issues des différents capteurs dans l'axe de l'impact, pour l'impact à 8 kJ sur l'ouvrage 1.

3.2. Réponse de l'ouvrage 1 sous impacts successifs

Les courbes en figure 5 illustrent l'évolution de la réponse de la structure en termes de force d'impact et de contrainte transmise au cours des cinq impacts successifs.

Quelle que soit l'énergie, la durée de l'impact, d_{imp} , est d'environ 40 ms.

L'évolution de forme de courbe la plus marquée est celle de la contrainte au mur. Du premier au cinquième impact, le pic est de plus en plus marqué, avec une montée au pic de plus en plus rapide. La durée de la sollicitation diminue sensiblement au cours de la série, pour s'approcher de la durée d'impact. Le temps de montée au pic diminue très fortement et l'onde de compression arrive plus rapidement. Un rapport de huit sur la valeur maximale de contrainte au mur est observé entre l'essai à 2 kJ et le premier essai à 10 kJ.

L'évolution de la forme de la courbe donnant la force d'impact se traduit principalement par un allongement de la durée du premier pic. La pente de montée au pic augmente sensiblement jusqu'à l'essai à 8 kJ. Un rapport de cinq sur la valeur maximale de force d'impact est observé entre l'essai à 2 kJ et le premier essai à 10 kJ. La force au quasi plateau observé après ce pic augmente sensiblement durant la série.

Concernant l'effet de la répétition de l'impact à 10 kJ, on note que les conséquences sont plus importantes pour la contrainte au mur que pour la force d'impact. Pour

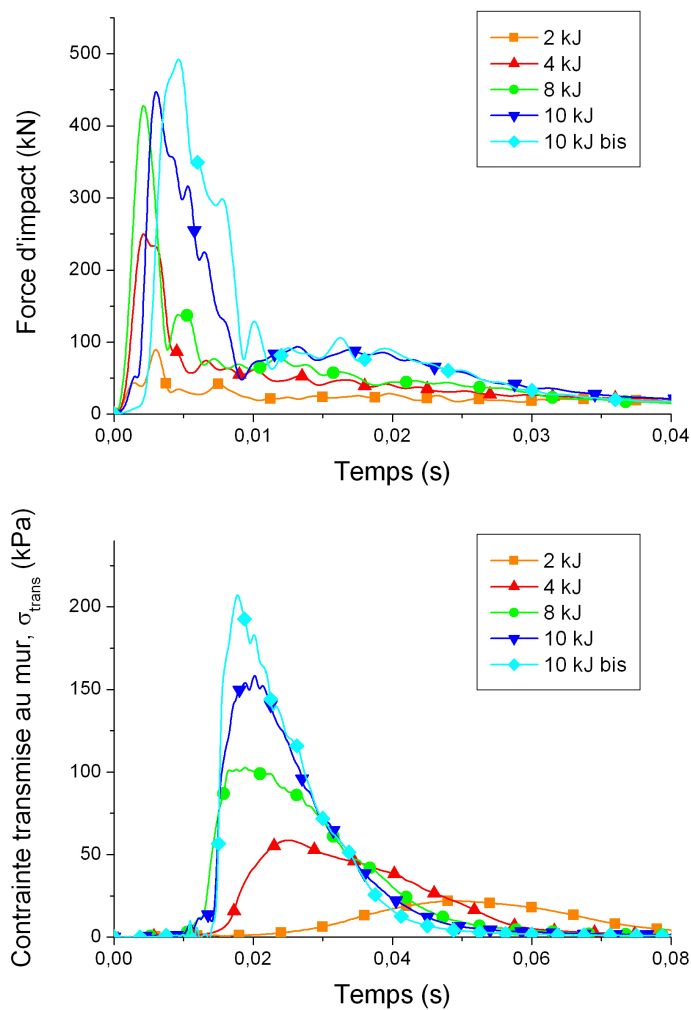


Figure 5. Réponse de la structure pour différentes énergies, en termes de force d'impact (haut) et de contrainte transmise au mur d'appui (bas).

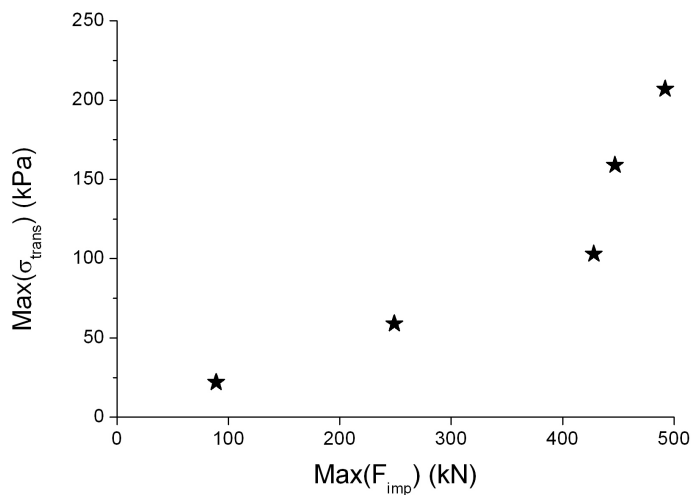


Figure 6. Contrainte au mur en fonction de la force d'impact pour les différents essais (2, 4, 8, 10, et 10 kJ)

cette dernière, la valeur maximale comme la valeur au plateau sont très proches entre les deux essais.

L'évolution des valeurs maximales évoquée précédemment est présentée en figure 6. Les points concernent des structures différentes, en ce sens que les impacts successifs ont eu des conséquences sur les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles de l'ouvrage (compactage ou fissuration des matériaux, déformation de la structure). Jusqu'à l'impact à 8 kJ, l'évolution semble suivre une loi linéaire. Cette tendance est clairement rompue avec le premier essai à 10 kJ.

La cause de cette évolution est difficile à appréhender dans la mesure où celle-ci résulte de deux paramètres : la répétition des impacts et l'augmentation de l'énergie d'impact. Néanmoins, on peut postuler que le compactage progressif du sable, au cours de la série, explique en grande partie l'évolution en termes de contrainte transmise au mur et en particulier la réduction du temps de montée au pic et l'augmentation de la valeur maximale de contrainte.

3.3. Comparaison des trois ouvrages

Le principal critère de comparaison des trois ouvrages impactés (Tab. I) est la contrainte appliquée sur le mur d'appui : le sandwich vise à réduire celle-ci en favorisant la dissipation d'énergie et la diffusion des contraintes. La figure 7 présente cette valeur pour les trois ouvrages dans le cas d'un impact à 8 kJ.

La contrainte la plus forte est obtenue avec l'ouvrage dont le noyau est constitué de ballast (n°3). La plus faible est obtenue avec l'ouvrage dont le noyau est constitué de sable (n°1), avec un maximum deux fois plus faible que pour l'ouvrage précédent.

La vitesse de montée au pic est différente d'un ouvrage à l'autre, avec en particulier une montée plus lente dans le cas d'un noyau constitué de mélange sable-pneu (n°2). Ce constat est à mettre en lien avec le module du matériau du noyau, et à l'influence sur celui-ci des impacts successifs. Le mélange sable-pneu présente en effet un module d'Young plus faible et, d'autre part, il semble que l'impact se traduise par un moindre compactage du fait de la relative souplesse du squelette en pneus déchiquetés (Lambert et al., 2007).

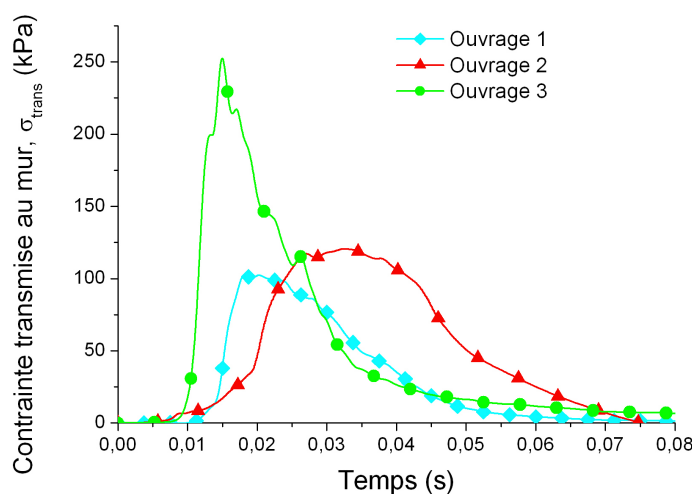


Figure 7. Contraintes sur le mur d'appui lors d'un impact à 8 kJ sur les 3 ouvrages.

4. Conclusions et perspectives

Dans le but d'améliorer la compréhension du comportement des structures sandwichs à vocation pare-blocs, des essais d'impact ont été conduits sur ouvrage. Les résultats ont montré l'évolution de la réponse d'un tel ouvrage lorsque soumis à impacts successifs et d'énergie croissante. La contrainte transmise au mur sur lequel s'appuie le sandwich est très dépendante de l'énergie d'impact. De plus, un impact à 10 kJ modifie très significativement les propriétés de l'ouvrage, sa réponse à un nouvel impact à 10 kJ étant fortement modifiée. Les résultats présentés ont également mis en évidence la très forte dépendance de la réponse de la structure au matériau utilisé dans le noyau du sandwich, avec un rapport de deux sur la contrainte transmise au droit de l'impact entre les deux réponses extrêmes.

Pour compléter ces observations, les mêmes analyses doivent être conduites sur l'ensemble des mesures effectuées, pour les différents essais de l'étude. En effet, les résultats présentés ici concernaient principalement un ouvrage et une énergie, et n'incluaient pas les mesures des autres capteurs. L'analyse globale des résultats doit permettre d'évaluer l'influence des phénomènes diffusifs et dissipatifs (compactage, fracturation...) expliquant les différences de réponse des ouvrages en fonction de l'énergie d'impact et du matériau utilisé pour le noyau du sandwich.

Enfin, ces données vont être utilisées pour accompagner le développement de modèles numériques, comme amorcé par Bourrier et al. (2010).

5. Références bibliographiques

- Aminata D., Yashima A. Sawada K., Sung E. (2008). New Protection Wall Against Rockfall Using a Ductile Cast Iron Panel. *Journal of Natural Disaster Science* 30(1). pp 25-33.
- Bourrier F., Gotteland P., Nicot F., Lambert S. (2010). A model for rockfall protection structures based on a multi-scale approach. *Conference Proceedings, Geoflora, West Palm Beach, Florida*, 6 pages.
- Hearn G., Barrett R., Henson H. (1995). Development of effective rockfall barriers. *Journal of transportation engineering* 121(6). pp 507-516.
- Heymann A., Lambert S., Gotteland P., Collombet M., Douaillat M. (2010). Expérimentations grandeur réelle sur merlons de protection contre les chutes de blocs rocheux. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie, Grenoble, Juillet 2010*.
- Lambert S., Gotteland P., Bertrand D., Nicot F. (2006) Comportement mécanique de géo-cellules impactées – application aux ouvrages pare-blocs. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie, Lyon, 27-29 JUIN*.
- Lambert, S. (2007). Comportement mécanique de géocellules – application aux constituants de merlons pare-blocs cellulaires, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 237 p.
- Lambert S., Gotteland P., Nicot F. (2009). Experimental study of the impact response of geocells as components of rockfall protection embankments. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9. pp 459-467.
- Peila D., Oggeri C., Castiglia C. (2007). Ground reinforced embankments for rockfall protection : design and evaluation of full scale tests. *Landslides* 4. pp 255-265.
- 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.