

MODELISATION GEOMECHANIQUE DE MERLONS PARE-BLOCS SOUMIS A UN IMPACT DYNAMIQUE

GEOMECHANICAL MODELING OF ROCKFALL PROTECTION BUNDS SUBMITTED TO A DYNAMICAL IMPACT

Jean-Philippe JARRIN⁽¹⁾, Lucas MEIGNAN⁽¹⁾
1 GEOLITHE, Crolles, FRANCE

RÉSUMÉ – Des modélisations géomécaniques, en dynamique et en trois dimensions, de l'impact de blocs rocheux sur des merlons pare-blocs ont été réalisées. L'article propose une démarche de dimensionnement des ouvrages, identifie les paramètres clés conditionnant le comportement de l'ouvrage et montre l'intérêt d'un renforcement des ouvrages par dispositif de diffusion des contraintes.

ABSTRACT – Dynamical and three-dimensional geomechanical modeling of rock blocks impact on rockfall protection bunds has been carried out. The article introduces a protection bund sizing method, identifies the key parameters conditioning dike behavior, and shows the benefit of reinforcing bunds with stress diffusion devices.

1. Introduction

Le dimensionnement des merlons pare-blocs est généralement basé uniquement sur la géométrie des trajectoires des blocs. Dans ces conditions, la stabilité de l'ouvrage sous sollicitations dynamiques dues à un impact pouvant être très énergétique n'est pas vérifiée, la masse de l'ouvrage étant considérée de manière empirique comme suffisante pour l'arrêt des blocs. De plus, aucune méthode réglementaire ou normative de dimensionnement des ouvrages sous impact n'existe.

Dans le cadre d'une étude de protection contre les éboulements rocheux de la RD1091, réalisée pour le compte du Conseil Général des Hautes-Alpes, nous avons été amenés à concevoir des ouvrages destinés à intercepter des blocs de dimensions importantes (10 à 15 m³), impactant l'ouvrage avec une vitesse élevée (jusqu'à 24 m/s, soit 11 000 kJ). De plus, l'emprise au sol disponible était limitée, et ne permettait donc pas de réaliser un ouvrage opposant une masse importante.

L'optimisation de l'emprise au sol des ouvrages nécessitait alors de vérifier le dimensionnement des ouvrages sous impact. Ceci a été réalisé par des modélisations géomécaniques de l'impact des blocs rocheux sur les ouvrages. Ces modélisations dynamiques ont été réalisées en trois dimensions, avec le logiciel FLAC3D.

Le présent article traite du dimensionnement des merlons par modélisation géomécanique, dynamique. Il s'appuie sur le cas extrême de l'étude : énergie d'impact maximum, emprise au sol la plus limitée.

Peu d'études sur le sujet (modélisation géomécanique dynamique) ont fait l'objet de publications (Peila et al., 2002 ; Plassiard et al., 2006 ; Sung et al., 2008).

2. Méthode

2.1 Méthode de dimensionnement des ouvrages

Le dimensionnement des merlons présenté dans cet article concerne uniquement la stabilité interne des ouvrages sous sollicitations dynamiques (impacts).

De ce point de vue, aucun critère normatif ou réglementaire ne définit les conditions de service limites des ouvrages. Il a par conséquent été nécessaire d'établir des critères permettant d'accepter ou non le dimensionnement proposé.

Une hiérarchisation des niveaux d'endommagement a été définie :

- Endommagement faible :
 - ⇒ capacité d'interception rémanente (après impact) faiblement dégradée par rapport à la capacité initiale (en termes d'énergie) ;
- Endommagement important mais acceptable :
 - ⇒ capacité d'interception rémanente dégradée ;
- Endommagement inacceptable :
 - ⇒ capacité d'interception rémanente non acceptée par le maître d'ouvrage,
 - ⇒ ou déformations ou contraintes de l'ouvrage au cours de l'impact susceptibles de mettre en danger les enjeux protégés, par l'instabilité intrinsèque de l'ouvrage.

Pour cette étude en particulier, il a de plus été arrêté que :

- les impacts nominaux génèrent sur l'ouvrage un niveau d'endommagement important, sans capacité d'interception rémanente particulière demandée ;
- ce niveau d'endommagement important ne nécessite pas d'interruption totale de la circulation avant et lors de la réhabilitation de l'ouvrage.

2.2 Méthode de modélisation

2.2.1 Choix de l'outil de calcul

Le logiciel de calcul FLAC3D a été retenu : logiciel tridimensionnel, basé sur la méthode des différences finies explicites. Les principaux avantages de ce logiciel pour la problématique étudiée étaient la possibilité d'un calcul dynamique, la modélisation idéale des grandes déformations et la possibilité de modélisation d'interfaces (interaction bloc / merlon).

2.2.2 Démarche de la modélisation

La démarche de dimensionnement sous impact dynamique élaborée dans le cadre de cette étude est la suivante :

- modélisation du merlon (corps de l'ouvrage, renforcements) ;
- initialisation des contraintes (poids propre du merlon) ;
- modélisation de l'impact : position, vitesse, angle d'incidence, masse ;
- calcul de l'évolution des contraintes et des déformations au sein du merlon ;
- analyse des résultats :
 - vérification géométrique de la capacité rémanente (pas pour cette étude, au vu des critères définis précédemment),
 - vérification des conditions de déformations ou de contraintes en certains points mettant en jeu la stabilité globale de l'ouvrage

3. Hypothèses de dimensionnement des ouvrages

3.1 Constitution et géométrie des ouvrages

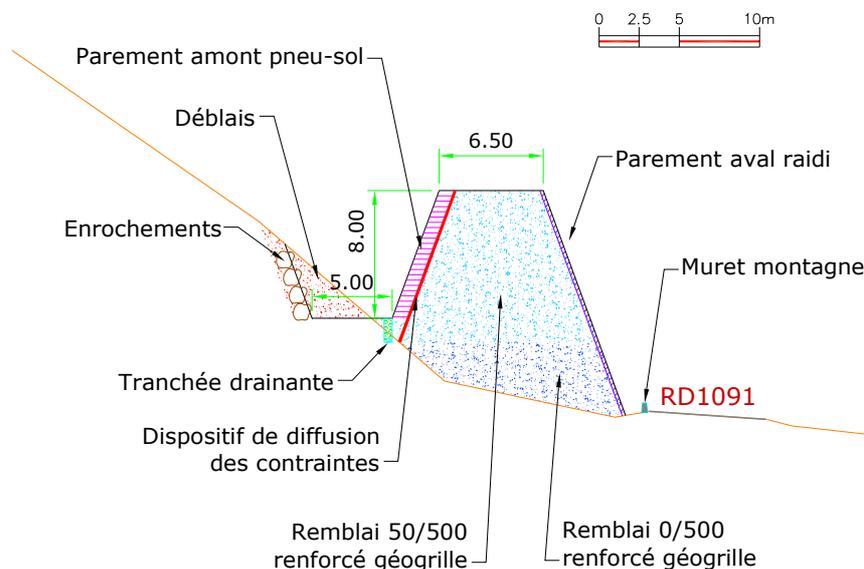


Figure 1. Coupe schématique de l'ouvrage

L'ouvrage merlon modélisé est constitué (figure 1) :

- d'une fosse d'interception de largeur 5 mètres, pour stockage des matériaux éboulés et servant d'accès amont de maintenance ;
- d'un parement amont raidi à 70°, de hauteur 8 mètres, en pneusol (pneus PL liaisonnés, remplis de matériaux 0/50 issus du site : éboulis criblés et concassés) ;
- du corps du merlon en remblais criblés 50 / 500 (issus du site), compactés et renforcés par géogrilles permettant la continuité du frottement interne et de la dilatance des matériaux (maille 100 mm x 100 mm) ;
- du parement aval constitué d'un parement raidi à 70° (objectif de réduction de l'emprise au sol de l'ouvrage), réalisé par un procédé d'armatures fixées aux géogrilles internes, avec un aspect paysager minéral

La valeur de l'épaisseur en crête de l'ouvrage n'est pas précisée dans ce paragraphe d'hypothèses, car c'est un paramètre déterminé à l'issue des résultats de modélisations préalables.

3.2 Hypothèses d'impact

Les impacts étudiés sont basés sur les hypothèses suivantes, résultant des simulations trajectographiques (tableau I).

Notons que le volume d'un bloc de 37.5 t est de 15 m³ (densité du rocher considérée de 2.5), ce qui correspond à une sphère de diamètre 3.06 m, ou un cube de côté 2.47 m. De manière à prendre en compte l'élanement potentiel des blocs impactants, pouvant générer des contraintes plus importantes par réduction de la surface d'impact, le calcul considère des blocs impactants sphériques, de diamètre réduit à 2 m (la densité étant alors surévaluée pour conserver la masse).

Tableau I. Hypothèses d'impact

Masse du bloc impactant	Energie cinétique	Vitesse	Hauteur d'impact	Incidence d'impact
37.5 t	11 000 kJ	24 m/s	6 m	32°

3.3 Hypothèses géotechniques

Pour cette étude, il est prévu que les matériaux de remblais utilisés pour la constitution des ouvrages proviennent des déblais issus du site (éboulis vifs), permettant ainsi une réduction de l'impact environnemental et du coût par optimisation des mouvements de terre. Les caractéristiques mécaniques des matériaux retenues pour les calculs sont donc estimées en fonction des résultats de reconnaissances préalables réalisées sur le site : profils sismique réfraction, sondages pressiométriques, sismique avec inversion d'ondes de surface...

Le modèle géotechnique utilisé pour les matériaux constitutifs de l'ouvrage est le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb, pour lequel les paramètres définissant la loi de comportement sont les plus accessibles par le biais de reconnaissances géotechniques usuelles.

Une dilatance des matériaux de remblai de 30° a été prise en compte, pour représenter un matériau de remblai réalisé avec des matériaux issus de l'éboulis criblés (50-500), et donc présentant une granulométrie homogène et serrée et des éléments anguleux. Les renforcements internes à la structure des merlons (géogrilles) n'ont pas été modélisés individuellement (difficulté de maillage), d'autant plus que leur résistance à la traction n'est que peu mobilisée en cas d'impact. Néanmoins, l'angle de frottement interne des remblais renforcés (45°) a été augmenté à 60° pour tenir compte de la répartition latérale des efforts due à l'interaction géogrille / sol.

Les caractéristiques mécaniques concernant le matériau pneusol sont issues des publications concernant ce matériau (Long, 1993 ; Abdurahman et al, 1995). Une résistance à la traction et une cohésion ont été considérées, sur la base de la résistance à la traction des pneus et de leur espacement vertical, les agrafes liaisonnant les pneus devant ainsi être au moins aussi résistantes que les pneus.

Tableau II. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Sol	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	Dilatance (°)	Résistance en traction (kPa)	E (Mpa)	ν
Remblais renforcés	19	60	0	30	0	510	0.42
Pneu sol renforcés	15	80	600	0	600	100	0.10
Parement raidi aval	20	80	100	0	0	1000	0.45

3.4 Hypothèses propres à la modélisation numérique

Dans un objectif double de fiabilité des résultats et d'optimisation du temps de calcul, le maillage du merlon au droit de l'impact a été adapté : orientation des mailles similaire à celle de l'impact, maillage plus fin, mailles peu élancées.

La modélisation dynamique a été réalisée avec un pas de temps variable, et multiple selon les zones, de manière à optimiser les temps de calcul. Une loi d'amortissement de Rayleigh a été considérée, calée par le biais d'une modélisation reproduisant les résultats d'expérimentations de lâchers de blocs sur une dalle en

béton armé recouverte de remblai réalisées par l'EPFL (Montani Stoffel, 1998).

Le merlon étant de grande longueur (plusieurs centaines de mètres), et réalisé avec des matériaux du site de nature et de compacité similaires à ceux de la fondation, les extrémités de la « tranche » de merlon modélisée et la sous-face du merlon doivent assurer l'absence de réflexion des ondes. Pour cela une limite spécifique dite « absorbante » a été utilisée. Les autres faces du merlon sont libres.

La largeur de la « tranche » de merlon modélisée est de 12 m.

L'interaction entre le bloc et le merlon est gérée par une interface frottante, dont les paramètres élastiques sont du même ordre de grandeur que ceux du merlon.

Le critère d'arrêt de la modélisation est double, en fonction du bon dimensionnement de l'ouvrage ou non :

- stabilisation des déformations sur la crête côté aval de l'ouvrage ;
- obtention de déformations de l'ouvrage mettant en jeu sa stabilité.

4. Résultats de la modélisation et du dimensionnement des ouvrages

4.1 Géométrie de l'ouvrage obtenue

L'ouvrage initialement envisagé de façon empirique présentait une épaisseur en crête de 5 m. La modélisation de cette géométrie a alors aboutit à des déplacements dont la répartition géométrique et l'amplitude (métrique sur le parement aval de l'ouvrage) indiquaient une déstabilisation de la partie impactée du merlon, et donc un endommagement inacceptable : risque de glissement sur la RD1091 (figure 2).

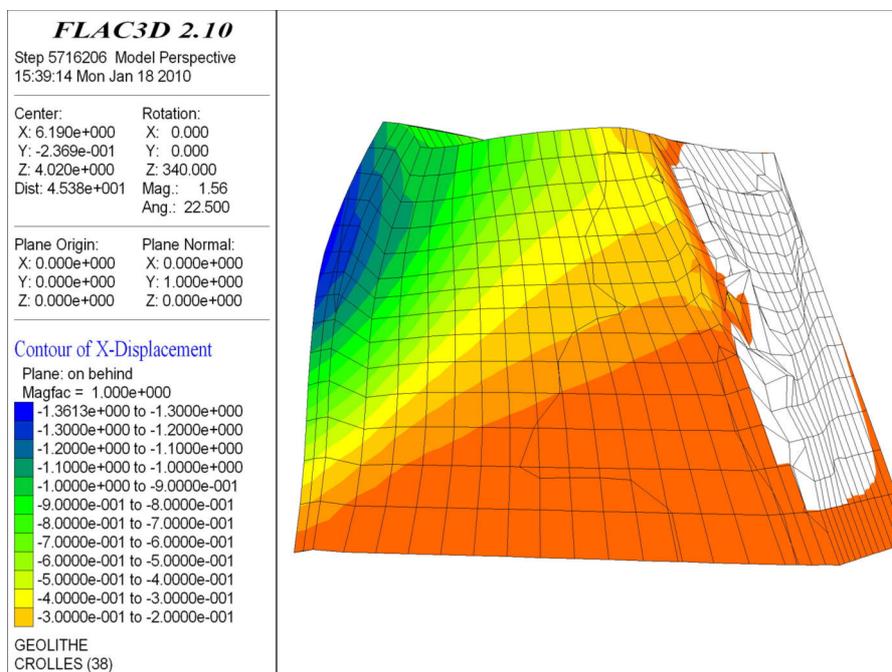


Figure 2. Déplacements horizontaux non stabilisés après impact (largeur en crête 5 m) – Instabilité de l'ouvrage

Il a donc été proposé d'épaissir le merlon à 7 m en crête. La modélisation aboutit alors à des déplacements au sein de l'ouvrage importants mais en adéquation avec le fonctionnement défini auparavant (endommagement important, réparable sans

interruption totale de la circulation): déplacements maximaux ~ 28 cm sur le parement aval raidi (figure 3), soit 3.5% de la hauteur, affectant une zone d'environ 3 m de largeur. Ces déplacements sont localisés mais progressifs, ce qui permet d'assurer la stabilité du parement jusqu'aux opérations de maintenance. En revanche, le merlon n'est plus en état de résister à un nouvel impact similaire. Ces déplacements au niveau du parement aval se stabilisent au bout de 0.5 s (figure 4). Le parement amont est fortement endommagé (figure 3).

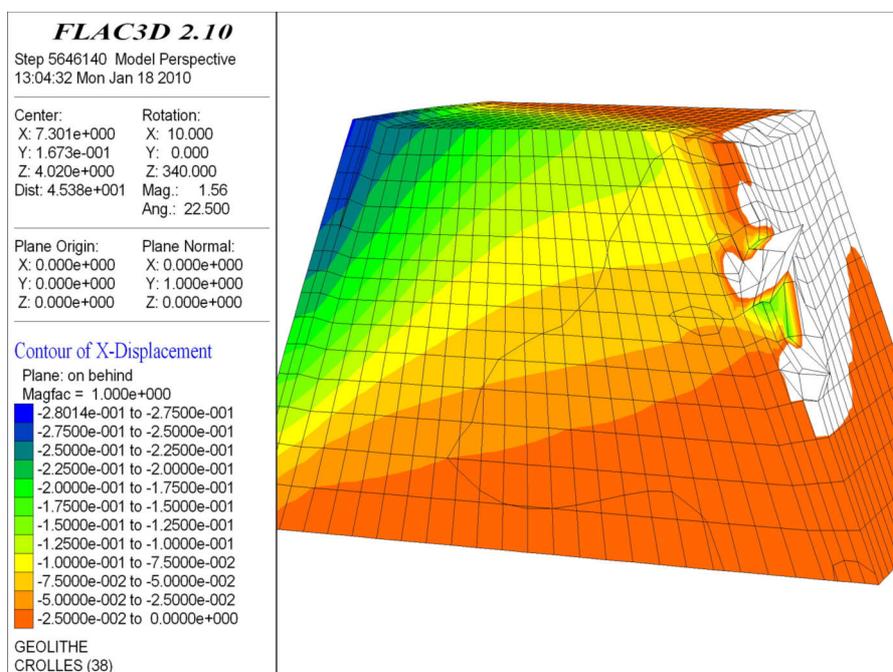


Figure 3. Déplacements horizontaux stabilisés après impact (largeur en crête 7 m)

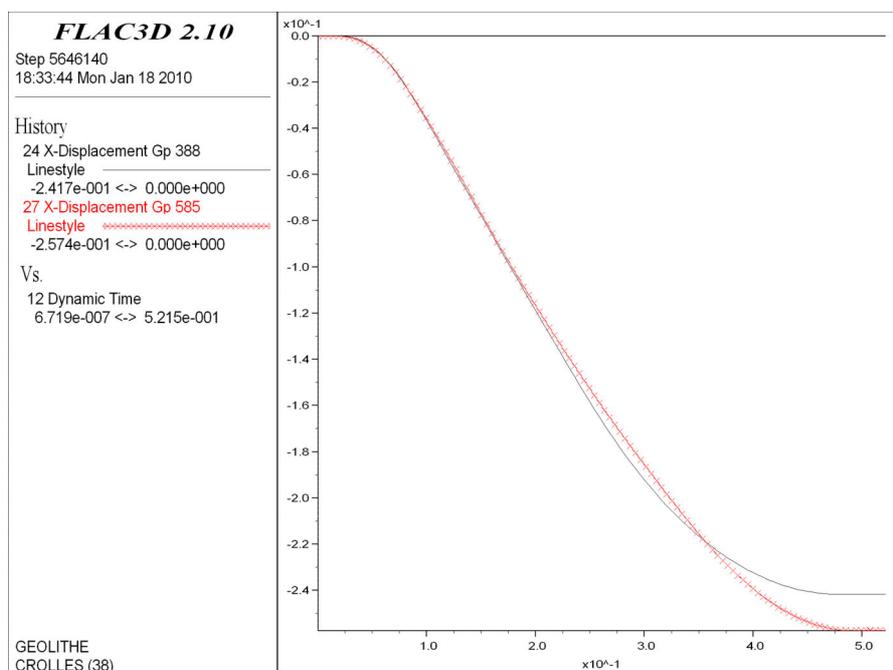


Figure 4. Déplacements horizontaux du parement aval en fonction du temps (largeur en crête 7 m) : ligne noire = hauteur de l'impact, croix rouges = crête

4.2 Intérêt d'un dispositif de diffusion des contraintes

Un dispositif de diffusion des contraintes disposé entre le parement amont pneus et le corps de remblais a été modélisé dans le but d'augmenter les capacités énergétiques de l'ouvrage. Pour être efficace, un tel dispositif doit présenter une rigidité et une résistance à la traction importantes.

Le dispositif modélisé dans l'étude est un dispositif modulaire (et donc facilement réparable), en nappe, constitué de bandes de pneus juxtaposées, liaisonnées et renforcées par des armatures métalliques (brevet déposé).

Ce dispositif permet de réduire la largeur en crête de l'ouvrage à 6.5 m (soit -6 % par rapport à l'épaisseur de 7 m), avec des déplacements encore réduits par rapport au merlon d'épaisseur 7 m (figure 5) :

- déplacements maximaux ~ 24 cm sur le parement aval raidi, soit 3% de la hauteur, affectant une zone d'environ 3 m de largeur ;
- stabilisation des déplacements sur le parement aval plus courte (0.45 s).

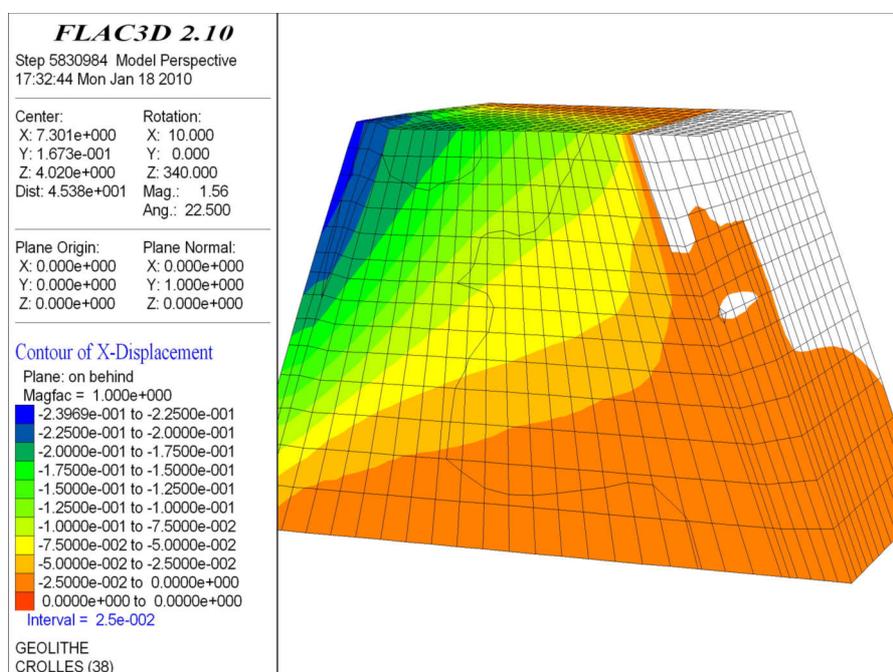


Figure 5. Déplacements horizontaux stabilisés après impact (largeur en crête 6.5 m – Dispositif de diffusion des contraintes)

4.3 Paramètres clés

Les paramètres clés permettant une modélisation réaliste sont les suivants :

- dilataance des matériaux (sans laquelle on obtient un effet de cisaillement des matériaux à hauteur de l'impact, donnant des résultats aberrants) ;
- caractéristiques élastiques des matériaux pour obtention de déformations réalistes (domaine plastique peu mobilisé, sauf au droit de l'impact) ;
- longueur d'ouvrage modélisé suffisante (les zones de fortes déformations sont limitées à une largeur de 3 m de part et d'autre du point d'impact).

Le principal paramètre clé identifié pour l'optimisation du dimensionnement est la présence d'une rigidité forte côté amont de l'ouvrage, permettant une diffusion latérale maximale des contraintes.

5. Conclusions

Le travail présenté ici a permis de proposer une méthode de dimensionnement des merlons pare-blocs sous impact dynamique. Les résultats obtenus ont conduit à des ouvrages plus larges qu'approché initialement de manière empirique. Les paramètres clés identifiés pour le réalisme des modélisations sont la dilatance des matériaux, les caractéristiques élastiques des matériaux, la longueur d'ouvrage modélisé. Le principal paramètre clé pour l'optimisation du dimensionnement est la présence d'une rigidité forte côté amont de l'ouvrage (diffusion latérale maximale des contraintes). Ainsi, la modélisation d'un dispositif de diffusion des contraintes a permis de limiter l'emprise au sol des ouvrages sans réduire leur capacité.

Des incertitudes subsistent au niveau de la diminution de capacité des ouvrages aux extrémités, et pourraient être levées par des modélisations complémentaires. La solution actuellement retenue est de prolonger largement l'ouvrage aux extrémités des zones à protéger, pour approcher le comportement d'un ouvrage infini.

6. Références bibliographiques

- Abdurahman M., Bouzidi R., Jouve P., Laréal P. et Long N.T. (1995) Modélisation du pneusol - Application aux murs de soutènement; Conférence Internationale sur les problèmes mécaniques, Actuels de l'ingénieur, Hanoi.
- Long N.T. (1993) Le Pneusol : Recherches – Réalisations – Perspectives. Thèse INSA de Lyon
- Montani Stoffel S. (1998) Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors de chutes de blocs. Thèse EPFL, Lausanne, Suisse.
- Peila D., Castiglia C., Oggeri C., Guasti G., Recalcati P., Rimoldi, P. (2002) Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impacts. 7th International conference on geosynthetics. Nice.
- Plassiard J.P., Donzé F., Plotto P. (2006) Modélisation par la méthode des éléments discrets d'impacts rocheux sur une structure de protection de type merlon. Journées nationales de géotechnique et de géologie. Lyon.
- Sung E, Yashima A., Aminata D. Sugimori K., Sawada K., Inoue S., Nishida Y. Numerical assessment of the performance of protecting wall against rockfall New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds)