



Modélisations comparées d'un ouvrage de protection pare-blocs soumis à un impact

Franck Bourrier, P. Gotteland, A. Breugnot, P. Villard, Stéphane Lambert

► To cite this version:

Franck Bourrier, P. Gotteland, A. Breugnot, P. Villard, Stéphane Lambert. Modélisations comparées d'un ouvrage de protection pare-blocs soumis à un impact. 28èmes rencontres AUGCS, Jun 2009, Saint Malo, France. 8 p. <hal-00468745>

HAL Id: hal-00468745

<https://hal.science/hal-00468745v1>

Submitted on 31 Mar 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.



HAL Authorization

Modélisations comparées d'un ouvrage de protection pare-blocs soumis à un impact

**Franck Bourrier¹ — Philippe Gotteland¹ — Antonin Breugnot¹⁻²
— Pascal Villard¹ — Stéphane Lambert³**

¹ Laboratoire 3S-R, UMR 5521 CNRS-UJF-INP, BP 53 38041 Grenoble cedex 9

² EGIS Geotechnique, Grenoble, France

³ Cemagref, UR ETGR, 38002 St Martin d'Hères, France

franck.bourrier@hmg.inpg.fr, philippe.gotteland@ujf-grenoble.fr,

antonin.breugnot@egis.fr, pascal.villard@ujf-grenoble.fr,

stephane.lambert@cemagref.fr

RÉSUMÉ. Les ouvrages de protection contre les chutes de blocs à technologie cellulaire sont des assemblages de composants élémentaires fonctionnels. L'intérêt de ces structures réside dans leur emprise au sol réduite et leur réparabilité. Deux approches de modélisation du comportement de ces ouvrages pare-blocs sous impact sont comparées : une modélisation continue et une modélisation discrète. Les paramètres de deux modèles sont calibrés par comparaison à des résultats d'essais statiques et dynamiques sur composants. La comparaison des résultats de simulations d'impact sur ouvrage ne permet pas de statuer sur les avantages d'une approche en particulier. Néanmoins, la prise en compte des interfaces par l'approche discrète semble à privilégier malgré les difficultés d'identification des paramètres agissant. Les modélisations d'un ouvrage type fournissent des informations essentielles pour optimiser la conception de ces ouvrages pare-blocs innovant.

ABSTRACT. Cellular rockfall protection structures consist of assemblies of elementary functional components. Such structures allow reducing the overall structure size and improving its repairing capability. Continuous and discrete approaches for the modelling of such rockfall protection structures are compared. The parameters of both model parameters are calibrated using static and dynamic experimental results. The results from impact simulations on protection structures are compared. This comparison does not allow identifying the most relevant approach. Accounting for the interface by using a discrete model seems however to be necessary despite difficulties in correctly identifying the model parameters. These approaches finally provide useful information for the optimized design of such innovative cellular rockfall protection structures.

MOTS-CLÉS : Modélisation numérique, Impact dynamique, Technique de gabion.

KEYWORDS: Numerical simulation, Dynamic impact, Gabion technic.

1. Introduction

L'expansion des zones urbaines en site de montagne conduit à une demande croissante d'évaluation des possibilités de construction et de développement de solutions protectrices dans des zones soumises à un aléa de chute de bloc, en particulier. Les solutions constructives traditionnelles, telles que les merlons de protection, ont l'inconvénient d'une forte emprise au sol pour satisfaire la stabilité statique, ce qui représente un coût foncier important. De nouvelles techniques à emprise réduite s'avèrent intéressantes, particulièrement lorsque des critères de réparation possible sont associés à la modularité du système constructif.

Un développement innovant investigué dans le cadre du programme de recherche ANR REMPARe, copiloté par l'entreprise Razel et 3S-R, regroupant 12 partenaires (www.rempare.fr) réside dans la possibilité de construire le parement amont et un noyau interne de l'ouvrage par assemblage de composants élémentaires fonctionnels (Figure 1). L'utilisation d'une telle technique doit permettre la réparation locale de l'ouvrage après un impact de bloc grâce à la localisation de la dégradation et à la modularité du système.

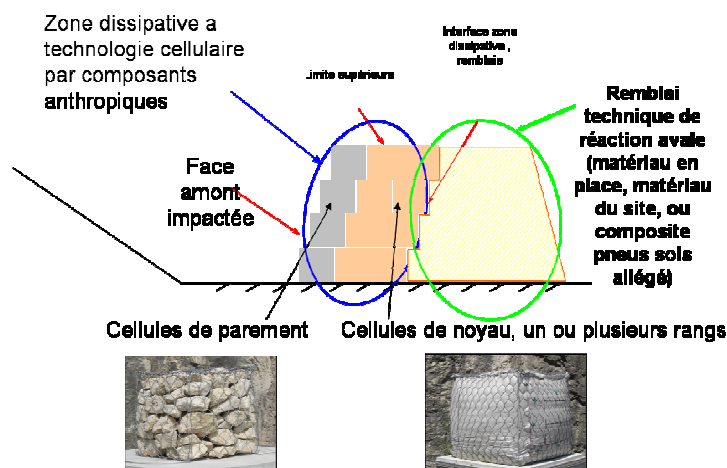


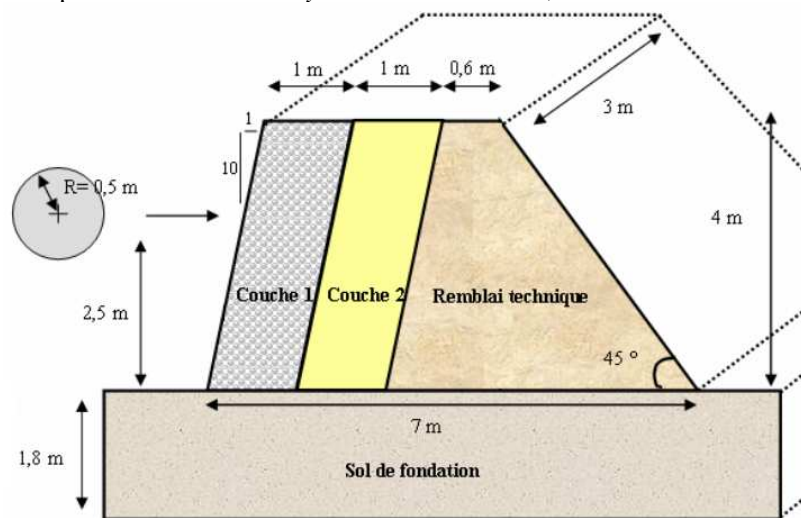
Figure 1. Le concept du merlon cellulaire dissipatif, projet ANR REMPARe.

Une modélisation de l'ouvrage permettant de traduire de façon précise à la fois le comportement du matériau de chacune des cellules et des interfaces est présentée. Dans cette optique, deux modélisations d'un ouvrage type sont développées : une modélisation continue et une modélisation discrète. Après une première phase de calibration des paramètres numériques par rapport à des résultats d'essais statiques et dynamiques sur les cellules élémentaires, les deux modèles sont utilisés pour calibrer des expérimentations sur ouvrage en vraie grandeur. Les résultats obtenus sont comparés. Le modèle discret est ensuite utilisé afin d'évaluer divers solutions constructives alternatives avec pour objectif d'orienter les choix des expérimentations.

2. Modélisation de l'ouvrage

2.1. Géométrie de l'ouvrage

L'ouvrage type est un merlon de taille moyenne reposant sur le sol de fondation, composé de deux « couches » fonctionnelles au niveau du parement amont et d'un remblai technique à l'aval. Le parement amont est composé de deux couches de composants élémentaires de type Gabions de 1000 mm de côté. Les Gabions de la couche 1 sont composés de matériau grossier et ceux de la couche 2 de sable faiblement compacté. Les dimensions générales du tronçon de merlon étudié sont décrites dans la Figure 2. L'ouvrage est impacté avec une vitesse d'impact horizontale de $V=15\text{ m/s}$ par un impactant de 11 t. Le point d'impact se situe au milieu du parement suivant l'axe y et à une hauteur de 2,5 m.



2.3. Modélisations de l'ouvrage

La modélisation continue de l'ouvrage est réalisée à l'aide du logiciel FLAC3D (Itasca, 2003a) basé sur une méthode de type différences finies bien adaptée à la modélisation du comportement de géomatériaux.

La modélisation discrète de l'ouvrage est réalisée à l'aide du logiciel 3DEC (Itasca, 2003b). Ce logiciel, basé sur la Méthode des Eléments Discrets (Cundall et Strack, 1979), permet de combiner une modélisation discrète de particules polygonales avec une modélisation continue de chacune des particules considérée déformable. Le comportement de chaque particule est caractérisé à l'aide d'une méthode de type différences finies similaire à celle implémentée dans le logiciel

Flac3D. Toutes les particules interagissent les unes avec les autres au niveau de leurs interfaces.

La géométrie des modèles est simplifiée par rapport à la géométrie réelle des ouvrages. Dans la modélisation continue (Figure 3b), un maillage de l'ouvrage est réalisé. La taille des mailles est définie de manière à assurer une représentation satisfaisante des transferts énergétiques et à permettre l'attribution des propriétés des matériaux en tout point de l'ouvrage. Il est important de noter que seule l'interface entre le bloc et l'ouvrage est modélisée ; aucune autre interface n'est introduite au sein de l'ouvrage dans le modèle continu.

Dans la modélisation discrète (Figure 3a), le parement aval est modélisé par un plan composé de douze cellules déformables ; la couche meuble et le remblai sont modélisés par deux blocs déformables ; le sol de fondation est composé d'un seul bloc. Le comportement aux interfaces est piloté par une loi de contact élastique-frictionnelle caractérisée par les raideurs de contact et l'angle local de frottement. Les raideurs d'interface sont de l'ordre de 10^8 kN/m et les angles de frottement aux interfaces sont égaux au plus faible angle de frottement des matériaux en contact.

Dans les deux modèles, le contact entre l'impactant et l'ouvrage est piloté par une loi de contact élastique-frictionnelle caractérisée par les raideurs de contact et l'angle local de frottement identique à la modélisation discrète. Les raideurs de l'interface entre le bloc et le parement amont sont, dans les deux modélisations, de l'ordre de 10^9 kN/m. Dans la modélisation discrète, l'impactant est un projectile de forme normalisé, modélisé par un bloc élastique alors que, par simplification, dans la modélisation continue, l'impactant est une sphère de 1 m de diamètre. La taille des mailles utilisée dans les différentes zones est identique dans les deux modèles et un amortissement visqueux égal à 5% de l'amortissement critique est introduit.

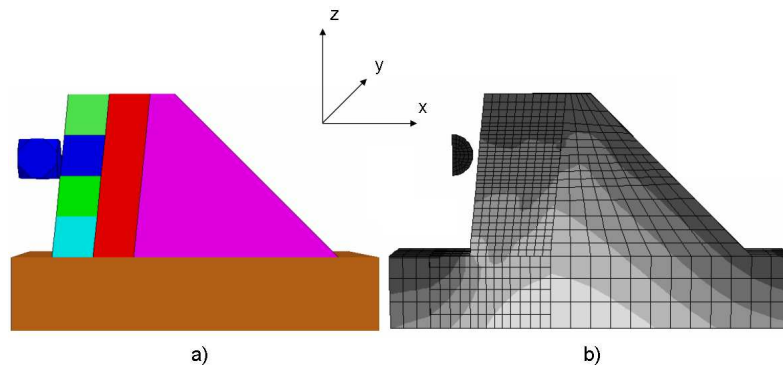


Figure 3. Géométrie des modélisations discrète (a) et continue (b) de l'ouvrage.

Dans les simulations, chaque cellule est modélisée comme un milieu continu et homogène. La loi de comportement des cellules est définie par un critère de plasticité de Mohr-Coulomb associé à une règle d'écoulement non associée. Les paramètres à définir sont le module d'Young E , le coefficient de poisson ν , l'angle de frottement φ et la cohésion c . La phase de calibration consiste, pour les cellules de la couche 1, à définir les paramètres de la loi de comportement des cellules par

comparaison entre les résultats de simulations d'essais de compression sous Flac3D et les résultats d'essais expérimentaux de compression quasi-statique (Lambert et al., 2007) (Table 1).

Couche	E (MPa)	ν	c (kPa)	φ (°)
Couche n° 1 : Parement amont	28,5	0,35	23,5	45
Couche n° 2 : noyau meuble	50	0,3	5	40
Remblai technique	100	0,3	5	40
Sol de fondation	150	0,3	10	40

Table 1. Valeurs des paramètres associés au critère de Mohr-Coulomb.

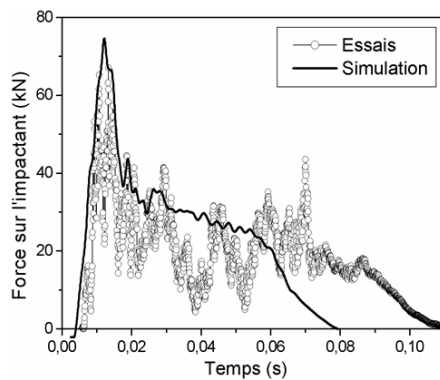


Figure 4. Résultats d'essais et de simulation d'impacts sur les cellules du parement amont.

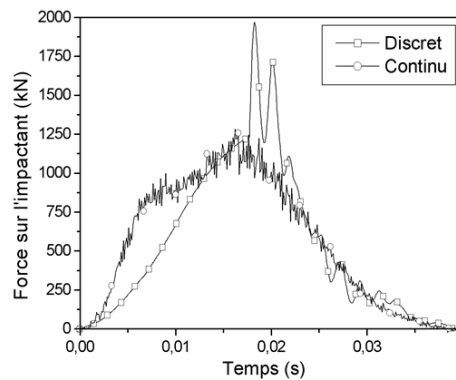


Figure 5. Evolution temporelle de la force appliquée sur l'impactant dans les simulations discrète et continue.

Les résultats de cette calibration sont validés par comparaison de résultats d'essais d'impact (Lambert et al., 2009) d'un bloc sphérique sur une cellule réalisés dans la même configuration (Figure 4). Pour les cellules de la couche 2, le remblai technique et le sol de fondation, les paramètres des lois de comportement (Table 1) sont fixés à des valeurs classiques issues de la littérature.

3. Analyse comparative des résultats des simulations

Les résultats obtenus à l'aide des deux modèles sont comparés sur la base de l'évolution temporelle de la force appliquée sur l'impactant et des contraintes maximales appliquées au niveau altimétrique du centre de gravité de l'impactant en divers points de l'ouvrage selon la direction normale (x variable) et transversale (y variable) de l'impact.

L'évolution de la force appliquée sur l'impactant est du même ordre de grandeur dans les deux modèles (Figure 5), même si cette valeur est plus importante dans la modélisation discrète en raison de l'apparition de phénomènes vibratoires au cours de la phase de restitution d'énergie à l'impactant. Une étude paramétrique a pu

montrer que l'intensité de ces phénomènes vibratoires est fortement liée à la raideur des interfaces. Cela étaye la pertinence d'une modélisation fine des interfaces mais rend nécessaire le développement d'une procédure d'identification des paramètres des lois d'interface. Il est également intéressant de noter que, bien que les temps d'impact soient identiques dans les deux modèles, la dynamique d'impact est différente.

Les contraintes maximales obtenues (x et y variables) sont fortement similaires pour les deux modèles (Figure 6). La dissipation/diffusion d'énergie au niveau des interfaces n'est donc a priori pas un élément de modélisation déterminant. Les contraintes se répartissent de manière homogène sur la zone du gabion impacté et chutent dès le franchissement de l'interface dans la modélisation discrète alors que les contraintes sont plus fortes au droit de l'impact avec décroissance rapide dans la modélisation continue. Cette différence est attribuée à la différence de forme de l'impactant entre les deux modélisations.

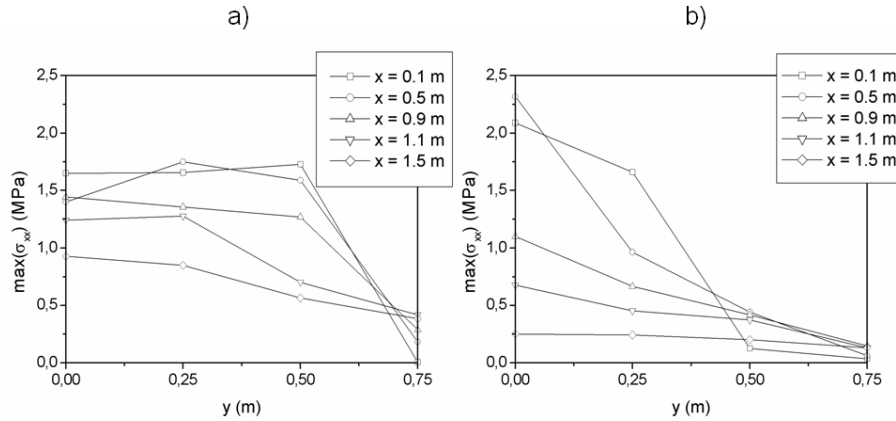


Figure 6. Contraintes maximales σ_{xx} dans l'ouvrage pour les modélisations discrète (a) et continue (b). L'origine du repère se situe à l'intersection entre la surface impactée et une droite parallèle à l'axe x passant par le centre de gravité de l'impactant.

4. Evaluation de solutions constructives

Les modèles développés sont modifiés afin d'évaluer deux alternatives de solutions constructives. Alternative 1, des simulations d'impact sur un ouvrage ayant une couche « meuble » (couche 2) d'épaisseur 2 m sont réalisées (Figure 7). Alternative 2, une couche « rigide » est introduite entre la couche 1 et la couche 2 de manière à contenir une partie de l'énergie au niveau du parement et faciliter la dissipation par fragmentation et/ou friction. Afin de conserver l'emprise au sol de l'ouvrage, l'épaisseur de la couche 2 est réduite à 50 cm et une couche rigide de 50

cm d'épaisseur est insérée avec des propriétés mécaniques du matériau constitutif identiques à celles du remblai technique (Figure 7).

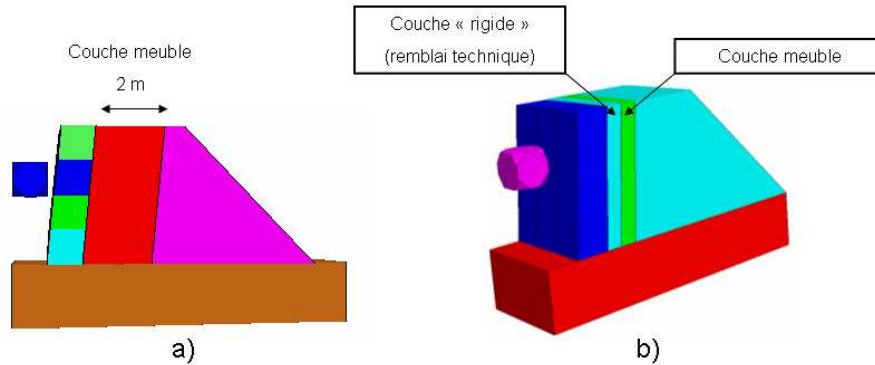


Figure 7. Modification de la géométrie du modèle discret d'ouvrage : a) épaisseur 2 m de la couche 2 ; b) insertion d'une couche rigide entre les couches 1 et 2.

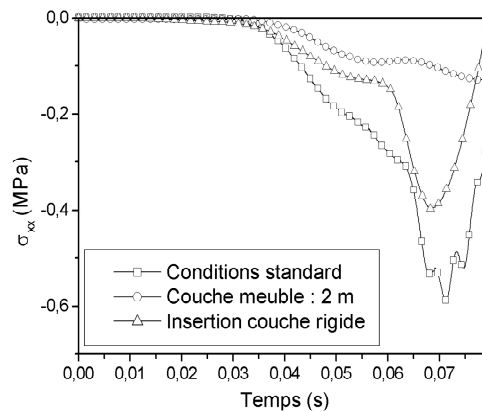


Figure 8. Evolution temporelle de la valeur maximale de la contrainte normale (σ_{xx}) à l'interface couche meuble/remblai technique au droit de l'impact.

Les résultats mettent en évidence une réduction de l'intensité maximale de la contrainte normale transmise au niveau de l'interface avec le remblai technique (Figure 8): l'augmentation de l'épaisseur de la couche meuble étant plus efficace que l'introduction de la couche rigide. Pour une emprise équivalente à la solution de base, cette variante 2 apporte un gain important. L'intérêt d'une telle solution constructive semble donc d'assurer une concentration des zones de dissipation « endommagées » au niveau du parement amont, ce qui permet de localiser les zones à réparer en cas d'impact fort avéré.

5. Conclusion

Les modélisations d'ouvrages pare-blocs présentées, simplifiées notamment en terme de loi de comportement des matériaux constitutifs de l'ouvrage, permettent de fournir des informations intéressantes pour la conception des ouvrages pare-blocs à technologie cellulaire. La bonne concordance obtenue à l'aide des deux approches choisies ne permet pas de statuer sur les avantages d'une approche en particulier. Néanmoins, la prise en compte des interfaces par l'approche discrète semble à privilégier bien que la calibration des paramètres associés à la modélisation des interfaces s'avère en pratique complexe et nécessite la mise en place d'une procédure objective de calibration.

Ces modélisations de l'ouvrage, en complément de celles déjà développées (Bertrand et al, 2006 ; Nicot et al, 2007), permettent de fournir des éléments de pré dimensionnement de ce type d'ouvrages et d'orienter les choix structurels et de mise en œuvre pour une optimisation des capacités des ouvrages vraie grandeur qui doivent être testés dans le cadre du projet ANR REMPARe (www.rempare.fr) .

7. Bibliographie

Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., and Lambert, S. 2006. Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. *Computers and Geotechnics*, 32, 564–577.

Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, Vol. 29, pp. 47-65.

Itasca consulting group, Inc. 2003a. FLAC3D - version 3.0, User's guide, FISH in FLAC3D and Theory and Background, Minneapolis : Itasca

Itasca consulting group, Inc. 2003b. 3DEC - version 3.0, User's guide, FISH in 3DEC and Theory and Background, Minneapolis : Itasca.

Lambert S., Gotteland P., Bertrand D., Nicot F. 2007. Comportement dynamique de géo-cellules sous impact – application aux ouvrages pare-blocs. *Revue Française de Géotechnique*, Vol. 119, pp. 51-63.

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 Systems Sciences*, 9, 459-467.

Nicot, F., Gotteland, P., Bertrand, D., and Lambert, S. 2007. Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to impact. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 1477–1515.