

# Structures géocomposites cellulaires, modélisation de la réponse à un impact localisé

David Bertrand (1), Philippe Gotteland (2), François Nicot (1), Stéphane Lambert (1) & Vincent Gras (2)

(1) Cemagref ETNA - (2) Laboratoire 3S-R UMR 5521 CNRS-UJF-INP  
(1) BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères - (2) Domaine universitaire BP53, 38041 Grenoble cedex 9  
david.bertrand@grenoble.cemagref.fr

## Résumé :

*Dans le cadre de la protection des personnes et des enjeux exposés à des risques naturels de type chute de blocs, le développement de nouvelles technologies de structures protectrices est un sujet d'actualité. En effet, compte tenu de la forte urbanisation des milieux montagnards, il est aujourd'hui nécessaire d'apporter des réponses quant à l'optimisation de l'efficacité dissipative des structures dédiées à l'arrêt des blocs. Cet article s'intéresse à la modélisation numérique de structures de conception cellulaire particulièrement bien adaptées pour absorber l'énergie incidente d'un bloc impactant le parement à l'amont. Les composants cellulaires étudiés sont constitués d'une enveloppe grillagée remplie par des matériaux généralement granulaires (i.e. blocs de pierre, tout-venants, ou matériaux anthropiques). La déformabilité du matériau et les déplacements relatifs des cellules confèrent à la structure une importante capacité de dissipation énergétique. L'approche de modélisation mise en œuvre est dite multi-échelle. Elle consiste à étudier localement le comportement mécanique de la cellule pour ensuite passer à l'échelle de l'ouvrage en intégrant les résultats obtenus à l'échelle de la cellule. On présente ici une modélisation de la structure et les résultats concernant son comportement mécanique sous sollicitation d'impact dynamique.*

## Abstract :

*Today, within the framework of rockfall protection, the development of new technologies for designing protective structures is a very important issue. Indeed, the strong urbanization in mountainous areas involve to bring answers concerning the enhancement of such structures dedicated to stop the falling blocks. This article deals with the numerical modeling of cellular structures well suited to dissipate the incident energy of a block impacting the front face. Basic elements of the structure are cells made up of a wire mesh envelope filled by granular materials (i.e. stones blocks, sand or gravel...). The material deformability and the relative displacements between cells give the structure an important capacity of energy dissipation. The structure modelling is based on a multi-scale approach. It consists in studying first the mechanical behavior of the cell and then go up to the structure scale using the results obtained at the cell scale. This paper presents the structure numerical modelling and the results concerning the mechanical behaviour under dynamic impact.*

## Mots-clefs :

**Eboulements ; MED ; milieux granulaires ; ouvrages ; dynamique.**

## 1 Introduction

Parmi les mouvements de terrains les plus fréquents, on trouve les chutes de blocs et éboulements de petits volumes. Des structures issues du domaine du génie civil peuvent être utilisées comme parade de protection contre ces aléas naturels (LCPC (2001)). Ce travail s'intéresse aux structures de type merlon<sup>1</sup> dont la fonction est d'intercepter les blocs rocheux au cours de leur propagation. Un examen des travaux menés sur la conception et le calcul des merlons souligne

1. Ouvrages massifs (écrans ou barrages) situés à l'amont des infrastructures à protéger souvent construits à partir de géomatériaux.

le caractère empirique des connaissances et des méthodes utilisées pour le dimensionnement des ouvrages, en particulier d'un point de vue dynamique.

Cet article se focalise sur les structures de protection de type merlon à technologie cellulaire (Figure 1a) construites à partir de cellules grillagées remplies de pierres de nature calcaire (Figure 1b). La méthode aux éléments discrets (MED) est utilisée pour la modélisation. Après exposé du principe de la MED, les modélisations développées à différentes échelles de la structure sont présentées ainsi que des résultats relatifs au comportement sous impact dynamique localisé.

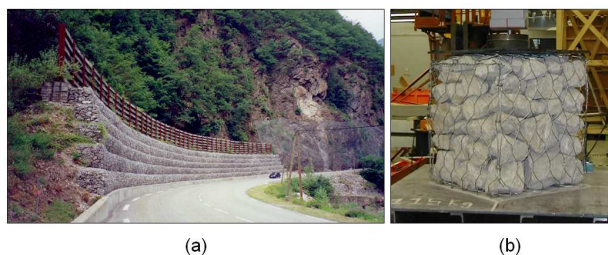


FIG. 1 – (a) Structure pare-bloc à technologie cellulaire, (b) Cellule constitutive de l'ouvrage.

## 2 L'approche numérique

### 2.1 La méthode aux éléments discrets

Aujourd'hui, les méthodes numériques discrètes sont largement utilisées pour la modélisation des milieux granulaires. La MED modélise les interactions entre éléments particulières. Dans notre cas, les éléments de base sont des particules sphériques considérées comme des corps solides rigides. Toutes les particules interagissent les unes avec les autres par l'intermédiaire de lois de contact direct ou des lois d'interaction à distance. Pour les lois de contact, l'approche adoptée est basée sur l'autorisation d'*interpénétration* d'éléments sphériques (Cundall and Strack (1979)). A l'échelle du grain, l'interpénétration traduit le fait que les surfaces de contact sont susceptibles de subir des déformations élastiques, voire plastiques, conduisant à des modifications de la géométrie des éléments. Pour les lois d'interaction à distance, elles sont introduites sous forme de macro fonction et représentent les comportements particuliers des éléments qui ne sont pas en contact direct. C'est ce type de lois qui sera utilisé à l'échelle de la structure. Les interactions entre les éléments sont gérées à partir de modèles qui permettent de décrire l'intensité de la force d'interaction en fonction de distance entre les centres des éléments. Une fois connues les forces appliquées à l'élément, la résolution des équations du mouvement est effectuée. Le calcul de l'évolution dynamique de l'assemblage se fait à chaque pas de temps par l'application alternative du Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) et de l'actualisation des forces appliquées sur chaque élément. L'intégration des équations est effectuée à partir d'un schéma aux différences finies centré d'ordre deux sur un pas de temps.

### 2.2 Le grillage, le matériau de remplissage, la cellule

La modélisation du grillage consiste à placer des éléments sphériques aux nœuds physiques de la nappe de grillage, c'est à dire à l'intersection des fils métalliques. Entre ces éléments est appliquée une force représentative de l'action du fil reliant physiquement les deux nœuds du grillage considérés. Cette force est fonction de la distance entre deux particules et des caracté-

ristiques rhéologiques du fil (Bertrand *et al.* (2005)).

Le matériau de remplissage a été généré en considérant la forme anguleuse des pierres qui joue un rôle majeur dans la réponse mécanique du système (Bertrand *et al.* (2005)). La génération des éléments anguleux, nommés macro-élément, et la mise en place dans la cellule respectent un protocole développé afin de se caler au mieux à la réalité (Bertrand *et al.* (2006)). La dernière étape consiste à coupler le grillage et les pierres pour obtenir des cellules prêtes à être sollicitées.

Les modèles proposés ont été calibrés et validés à partir de données expérimentales: essais de traction pour le grillage, essais de compression dans des conditions quasi-statiques pour la cellule (Lambert *et al.* (2006)). Les cellules étaient soit confinées soit non confinées, c'est à dire que les déformations des faces latérales étaient autorisées ou non. Les essais réalisés dans des conditions confinées ont permis de calibrer les paramètres du modèle de la cellule. La validation a été effectuée à partir des essais de compression non confinés (Bertrand *et al.* (2005)).

### 2.3 La structure

L'approche multi-échelle adoptée permet une caractérisation macroscopique simplifiée de l'ouvrage en prenant en compte le comportement local de la structure, *i.e.* au niveau de la cellule. L'exploration du comportement mécanique de la cellule suivant différents chemins de sollicitation permet de déduire un modèle de comportement constitutif de la cellule. A l'échelle de l'ouvrage chaque cellule est alors considérée comme constituant élémentaire de l'ouvrage.

Le passage à l'échelle de la structure consiste à remplacer chaque cellule par un élément placé en son centre. La structure est donc modélisée par une assemblée d'éléments élémentaires qui ne sont pas en contact (Figure 2). Le comportement mécanique de la structure ainsi décrite est induit par les interactions mécaniques à distance qui existent entre chaque paire d'éléments contigus; ces interactions décrivent les actions qui existent entre les cellules contiguës de l'ouvrage réel. Les éléments sont positionnés dans l'espace un à un pour obtenir la géométrie voulue de la structure (Nicot *et al.* (2007)).

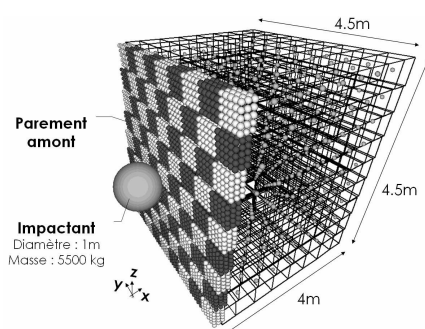


FIG. 2 – Modélisation d'un merlon à technologie cellulaire.

L'interaction entre les éléments, c'est à dire entre les cellules de la structure, est décrite à partir d'un modèle constitutif simple décrivant le comportement macroscopique de la cellule élémentaire (Gotteland *et al.* (2007)). Ainsi, la réponse en force d'une cellule en compression est décrite avec un modèle de comportement élastique parfaitement plastique. Les interactions tangentes aux faces de la cellule sont traitées à partir d'un modèle de frottement de Coulomb classique. Ces paramètres ont été calés à partir de l'étude locale (Bertrand *et al.* (2006)).

### 3 Résultats numériques

#### 3.1 Cellules sous impact

La capacité du modèle numérique à reproduire le comportement d'une cellule dans des conditions dynamiques d'impact a été confronté aux résultats d'essais d'impact expérimentaux (Lambert *et al.* (2006), Lambert *et al.* (2007)). Les caractéristiques physiques de l'impactant ainsi que la vitesse d'impact expérimentale ont été reproduites numériquement. La vitesse d'impact était de 8 m/s ce qui équivalait à une énergie cinétique de 8 kJ. Les mêmes paramètres que ceux calés dans le cas quasi-statique ont été employés lors des simulations. Au regard des résultats (Figures 3), le modèle reproduit correctement les essais d'impact expérimentaux et semble robuste vis-à-vis du changement de conditions aux limites. Les temps caractéristiques des phénomènes sont bien reproduits en termes de montée au pic et d'oscillation post pic (dans le cas non confiné) et également en terme d'évolution de l'intensité de la force sur l'impactant.

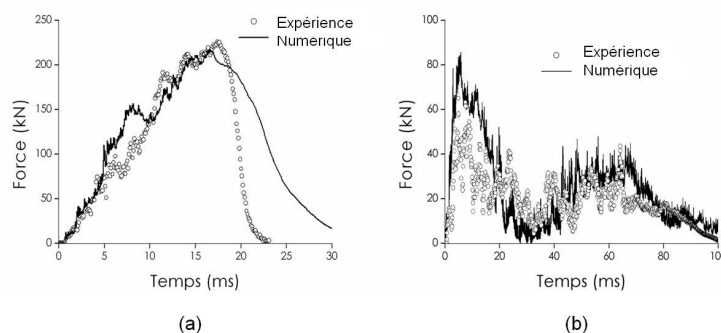


FIG. 3 – Force de réaction sur le bloc au cours du temps dans le cas d'un impact sur cellule 500 mm de 8kJ. (a) conditions confinées, (b) conditions non confinées.

Il est à noter que les essais dynamiques d'impact ont révélé que l'effet de vitesse sur le comportement de la cellule était dû principalement à l'inertie des éléments du système. En effet, aucune dépendance à la vitesse de sollicitation n'a été introduite lors de la modélisation de la cellule. Le passage de l'échelle de la cellule à celle de la structure consistant à remplacer chaque cellule de l'ouvrage par une particule de masse équivalente, permettra de prendre implicitement en compte l'effet inertiel développé par la cellule en sollicitation dynamique.

#### 3.2 Structure sous impact

Dans l'attente de données expérimentales à l'échelle d'une structure réelle (objectif du programme REMPARE soutenu par l'ANR-RGCU 2006), des simulations ont été réalisées sur structure modèle. Le parement de la structure (face impactée par l'impactant) est décrite en utilisant des *clumps* juxtaposés afin d'obtenir numériquement une surface continue à impacter. L'impactant numérique est une particule sphérique élémentaire de grosse taille. Les forces d'interaction se développent lorsque l'impactant pénètre dans les *clumps* frontaux et la résultante de ces forces constitue la force de réaction appliquée par la structure sur l'impactant. Le déplacement de chacune des particules peut être déterminé à chaque pas de temps de la méthode de résolution itérative en fonction de la pénétration de l'impactant, le tout en lien avec l'état de sollicitation de la structure. La masse de chacune des cellules, de 500mm de côté, est reportée au nœud la matérialisant et vaut 188 kg. Toutes les simulations sont menées avec le même impactant numérique de diamètre 1 m et de masse 1382 kg; l'impactant est placé au milieu du

parement, l'impact se fait au même point.

Ces simulations sont comparées au modèle des chocs élastiques, proposé initialement par Goldsmith (1960) et adapté aux chutes de blocs par Labiouse *et al.* (1994). Ce modèle, basé sur la théorie des contacts de Hertz, permet d'estimer la force maximale ( $F_{max}$ ) subie par l'impactant lors de sa collision avec un sol :

$$F_{max} = 1.765 M_E^{\frac{2}{5}} r^{\frac{1}{5}} \left( E_c^{(i)} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

où  $r$  est la rayon du bloc et  $E_c$  son énergie cinétique avant le choc. Ce modèle prend en compte la compressibilité du matériau impacté par l'intermédiaire du module de compressibilité  $M_E = 4E/(\pi(1 - \nu))$  où  $E$  est le module d'Young et  $\nu$  le coefficient de Poisson. Trois types de sols ont été considérés : lâche ( $M_E = 1000 \text{ kN/m}^2$ ), moyennement compacté ( $M_E = 5000 \text{ kN/m}^2$ ), compacté ( $M_E = 25000 \text{ kN/m}^2$ ).

Les forces maximales enregistrées sur l'impactant lors de nos simulations numériques développent des ordres de grandeur similaires aux prédictions du modèle analytique pour différentes valeurs d'énergie d'impact (Figure 4a).

Afin d'investiguer l'influence du niveau d'énergie cinétique de l'impactant sur la réponse de la structure, plusieurs impacts sont simulés en considérant différentes vitesses initiales. L'évolution de la force de réaction sur l'impactant montre deux pics de force (Figure 4b). Le premier semble naturel. Le second provient du fait que l'impactant de grande taille pénètre des *clumps* voisins et sollicite ainsi une zone plus large de la structure. Une question souvent posée sur le comportement des structures de protection porte sur leur capacité résiduelle après un ou plusieurs impacts effectifs. Pour apporter une réponse à cette question, notre modèle est soumis à plusieurs impacts successifs. Chaque nouvel impact est simulé en considérant l'état dégradé résultant de l'impact précédent. L'énergie cinétique est fixée à 150 kJ pour chaque impact. La structure reste capable de stopper l'impactant durant tous les impacts, mais la force augmente fortement au sein de la structure après encaissement d'un premier impact (Figure 4c). La capacité dissipative de l'ensemble de la structure provient de la possibilité de déplacement des cellules par rapport à ses voisines directes. Ce déplacement est fortement dissipé à proximité de la cellule subissant le premier impact, ce qui augmente la raideur globale de la structure et produit des changements importants sur le comportement résiduel. Les valeurs de pics et l'allure des courbes de réponse pour les impacts successifs suivant restent alors très similaires. Afin de limiter le risque résiduel lié à la perte de capacité dissipative entre les cellules, les capacités dissipatives internes de chaque cellule peuvent être améliorées en incorporant des matériaux anthropiques dissipatifs, tout particulièrement dans les cellules internes constituant le noyau.

## 4 Conclusions

L'étude sous impact d'une structure cellulaire de conception innovante s'articule autour d'une approche multi-échelle qui permet de décrire simplement et de manière pertinente la structure en prenant en compte sa technologie et le comportement des matériaux constitutifs. Une description soignée des caractéristiques physiques et mécaniques de chaque système a permis la validation des modèles numériques proposés: grillage double torsion à maille hexagonale entourant les cellules, modélisation d'une cellule remplie de pierres, et objet de ce papier, la modélisation de l'ouvrage complet.

En outre, ce type de structure cellulaire constitue une innovation technologique. Les cellules qui composent l'ouvrage sont des cages grillagées remplies d'un matériau, souvent de nature granulaire, qui possèdent de grandes capacités de déformation. Les réponses numériques observées à la sollicitation d'une structure modèle apparaissent pertinentes. Les résultats de futurs

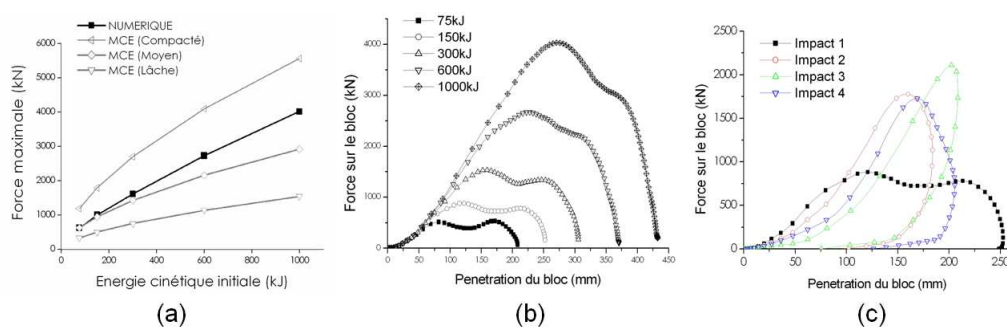


FIG. 4 – Forces maximales d'impact : (a) Comparaison avec le modèle des chocs élastiques (MCE). (b) fonction de sa pénétration pour énergies d'impact croissantes. (c) pour plusieurs impacts localisés successifs (Energie 150 kJ).

travaux devraient confirmer l'intérêt de modifier la constitution de l'ouvrage, en jouant sur la nature des matériaux de remplissage des cellules pour améliorer son efficacité dissipative face à l'aléa rocheux. L'utilisation de géocomposites sable - pneus déchiquetés est envisagée. Les auteurs remercient France Maccaferri SA, VOR-RNVO, et CGI38-PGRN pour leur soutien.

## Références

- Cundall, P., Strack, O. 1979 A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* **29** (1) 47-65
- Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., and Lambert, S. 2005 Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. *Computers and Geotechnics* **32** 564-577
- Bertrand, D., Gotteland, P., Lambert S., Nicot, F., Derache, F. 2006 Multi-scale modelling of cellular geo-composite structure under localized impact. *Revue Européenne de Génie Civil* (10) **3** 309-322
- Goldsmith, W. 1960 Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids *Dover Ed.*
- Gotteland, P., Bertrand, D., Lambert S., Nicot, F. 2007 Modélisation numérique par éléments discrets de géo-cellules soumises à impact. *Congrès Français de Mécanique, Grenoble, (France)* 6p
- Labiouse, V., Descoedres, F., Montani, S., Schmidhalter, C. 1994 Experimental study of rock blocks falling down on a reinforced concrete slab covered by absorbing cushions *Revue française de géotechnique* **69** 41-61
- 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 (France)* 121-128
- Lambert S., Gotteland, P., Bertrand, D., Nicot, F. 2007 Comportement mécanique de géo-cellules soumises à impact. *Congrès Français de Mécanique, Grenoble (France)* 6p
- LCPC 2001 Parades contre les instabilités rocheuses *Collection environnement - Les risques naturels - Editions LCPC* 144p
- Nicot, F., Gotteland, P., Bertrand, D., Lambert S. 2007 Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to rock impacts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (in press) 25p
- Tonello, J. 1998 Généralités et approche de modèles simples. Stage Ouvrage paravalanches *ENPC, Chambéry*