
Conception des ouvrages de protection par composants Cellulaires

**Philippe Gotteland — François Nicot — Stéphane Lambert —
David Bertrand — Vincent Gras**

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

² Cemagref, division ETNA, Grenoble, France

philippe.gotteland@ujf-grenoble.fr, francois.nicot@cemagref.fr,

stephane.lambert@cemagref.fr, david.bertrand@cemagref.fr,

vincent.gras@hmg.inpg.fr

RÉSUMÉ. Face à l'expansion croissante des zones urbaines en site de montagne, les demandes pour construire en sites « vulnérables » nécessitent de protéger les zones de construction en particulier contre les risques gravitaires de chute de blocs. Un développement innovant est de concevoir la structure de protection de manière cellulaire. La cellule élémentaire est constituée d'une cage grillagée métallique (Gabion) remplie de géomatériaux du site : blocs pour le parement, ou de matériaux anthropiques au comportement adapté pour le noyau dissipatif. L'objectif de la communication est de présenter l'analyse du comportement d'une telle structure renforcée soumise à une sollicitation de type impact. L'approche mise en œuvre est dite "multi-échelles".

ABSTRACT. Due to the increasing expansion of urban zones in mountain sites, it is often requested to build in "vulnerable" sites requiring protecting the construction zones against the risks of rockfall. One innovative development consists in building protection structure using cells assembly. A cell is a wire netting envelop cage (Gabion cell) filled with the site material (rocks, stones) or entropic material for dissipative purpose. The aim of the paper is to analyze the mechanical behaviour of such reinforced geocomposite cellular structures subjected to a local dynamic impact loading. The proposed approach is based on a multiscale modelling.

MOTS-CLÉS : analyse multiéchelles, technique de gabion, modélisation, élément discret, impact dynamique.

KEYWORDS: multiscale analysis, Gabion technique, modelling, discret elements, dynamic impact.

1. Introduction

Face à l'expansion croissante des zones urbaines en site de montagne, les demandes pour construire en sites "vulnérables" nécessitent de protéger les zones de construction en particulier contre les chutes de blocs. Les solutions constructives traditionnelles, merlons de protection renforcés ou non renforcés, ont l'inconvénient d'une forte emprise au sol pour satisfaire la stabilité statique, ce qui représente un coût foncier important. Pour les merlons renforcés : parement amont raidis et renforcés par des nappes bidimensionnelles : géotextiles, géogrilles, grillage, treillis métalliques, les pneus sont couramment utilisés en parement pour encaisser et amortir l'impact des blocs (procédés Pneutex ou Armapneusol (Figure 1)).

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 pour les systèmes modulaires réside dans la possibilité de construire le parement amont, un noyau interne de l'ouvrage, et éventuellement le parement aval par assemblage de composants élémentaires fonctionnels (Figure 2). Dans le cadre présenté, une cellule est constituée d'une enveloppe grillagée remplie de matériaux (blocs, sables ou composites anthropiques pneus-sol (Gotteland et *al.*, 2005), en incluant une chaussette géosynthétique).

L'utilisation d'une telle technique permet la réparation locale de l'ouvrage après un impact de bloc grâce à la localisation de la dégradation et la modularité du système constructif. Les cellules envisagées sont communément appelées Gabions et cette technique est largement utilisée pour la construction d'ouvrages. Le papier concerne uniquement le travail réalisé sur cellules remplies de blocs (Figure 2).



Gorges de l'Arly (73)



St Etienne de Cuynes (73)

Figure 1. Merlons renforcés avec utilisation de pneus entiers au parement

Le papier présente la démarche engagée pour la modélisation par une méthode multi-échelles de telles structures modulaires. Deux échelles d'étude sont traitées. Dans un premier temps, nous considérons l'échelle de la cellule élémentaire. Une cellule élémentaire modèle, de 500mm de côté, est sollicitée sous différentes charges en conditions quasi statiques et en conditions dynamiques d'impact. Les résultats fournissent des informations instructives sur le comportement mécanique de tels composites et permet de proposer un modèle de loi de comportement constitutive

macroscopique. Dans un second temps, l'échelle de la structure est considérée. Incluant les lois de comportements établies, un code numérique est développé pour modéliser l'impact d'un bloc sur une structure afin de mener l'analyse du comportement à l'échelle d'une structure modèle.

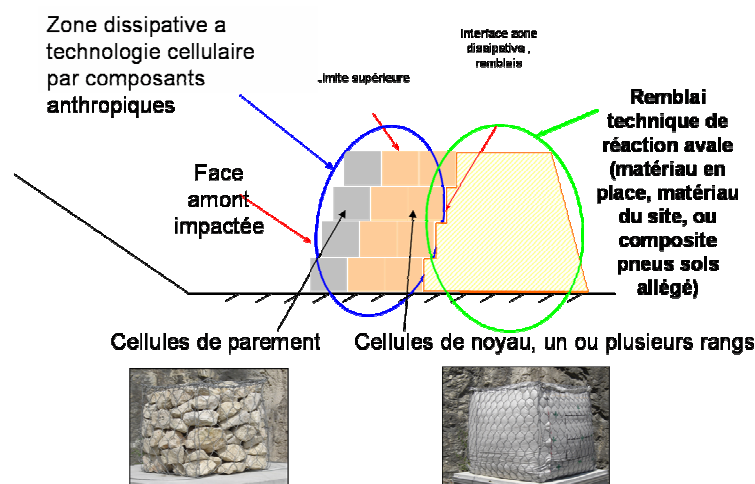


Figure 2. Le concept du merlon cellulaire dissipatif

2. Modélisation du matériau géocomposite

2.1. La méthode numérique par éléments discrets

La méthode des éléments discrets (Cundall et Strack, 1979) est utilisée pour les modélisations. 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 (Bertrand et *al.*, 2006). Le comportement au contact est piloté par une loi de comportement élastique linéaire dans la direction normale et par une loi élastique parfaitement plastique dans la direction tangente (Itasca Consulting Group 2003). Lorsqu'un contact existe, la force d'interaction s'exerce proportionnellement à la pénétration entre les éléments concernés, pénétration qui reste très limitée comparativement à la taille des éléments. La force et la pénétration sont pilotées par la raideur de contact. La force tangentielle maximum dépend du frottement défini par la loi de Coulomb. Des lois d'interaction à distance sont introduites par l'utilisateur et peuvent représenter des comportements particuliers pour des éléments qui ne sont pas en contact direct.

2.2. Modélisation des matériaux

La cellule gabion est une cage composée de deux systèmes constitutifs: le matériau de remplissage (blocs concassés de calcaire) et l'enveloppe grillagée pour le cas présenté. Les expérimentations sont réalisées sur des cellules modèles cubiques de 500mm de côté. Pour la modélisation numérique, nous avons tenu compte de la distribution granulométrique et de la forme des blocs de l'assemblée physique: les dimensions des blocs numériques se calent sur les dimensions des blocs réels utilisés pour les essais (Bertrand et al., 2004). Les blocs numériques sont réalisés par assemblage permanent de petites particules sphériques élémentaires pour obtenir des formes angulaires et représentatives, « clumps » (Bertrand et al, 2005).

2.3. Les essais quasi statiques sur cellules

Deux types d'essais de chargement ont été réalisés: en configuration confinée avec blocage des déplacements latéraux (essais C), en configuration non confinée ou les déplacements latéraux sont libres (essais UC). Les essais sont des essais de compression, avec enregistrement de la force axiale en fonction du déplacement vertical (Lambert et al, 2004). Les résultats d'essais C sont utilisés pour alimenter le modèle numérique; les essais UC permettent de le valider. La réponse numérique du modèle après calibrage des microparamètres introduits pour définir l'interaction entre les blocs, de la compacité (Bertrand et al. 2005), est en accord avec les données expérimentales (Figure 3).

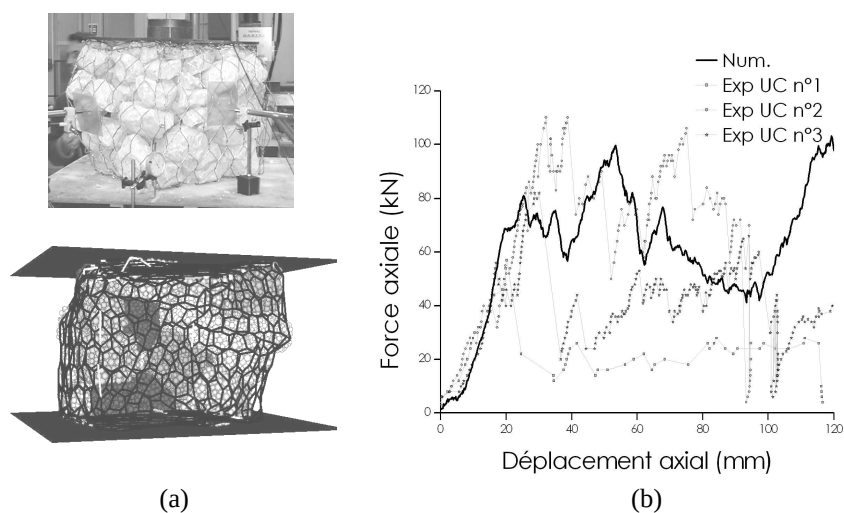


Figure 3. (a) Comparaison qualitative des modèles expérimental et numérique (essais UC) (Num and Exp UC n°1). (b) Comparaison entre données expérimentales et résultats numériques (essais UC).

2.3. Les essais d'impact sur cellules

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser les essais d'impact est composé d'un impactant sphérique et d'un socle en béton sur lequel repose la cellule devant subir l'impact. Un accéléromètre est placé au centre de la sphère et permet d'obtenir la force appliquée durant l'impact (Lambert et *al.*, 2006) (Lambert et *al.*, 2007).

Les essais expérimentaux d'impact sur cellule bloc ont été simulés numériquement et les résultats sont en bonne correspondance (Bertrand et *al.*, 2005 et Bertrand et *al.*, 2006) conduisant à la validation du modèle numérique. La figure 4a donne une comparaison qualitative entre expérimentation et modélisation numérique des essais d'impact. Le temps caractéristique du phénomène est bien reproduit. L'amplitude de la force agissant sur le bloc impactant, que ce soit la valeur au pic ou les oscillations post pic (en condition non confinée UC) sont en accord avec les données expérimentales. Le jeu de microparamètres calibrés avec les simulations quasi statiques permet de décrire le comportement macroscopique de la cellule en condition dynamique (Figure 4b). La réponse mécanique du système n'est pas directement influencée par un effet matériau associé aux propriétés mécaniques des blocs. A l'échelle de la cellule, l'effet induit par le niveau de déformation due à l'inertie des éléments, est considéré directement par le modèle.

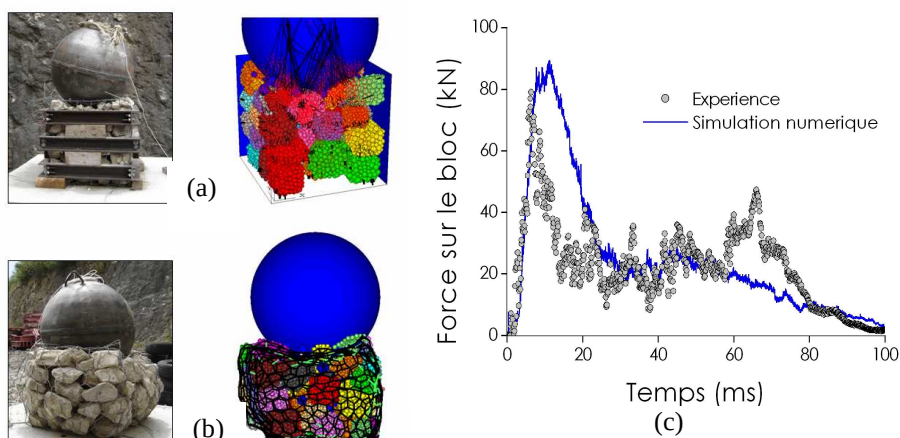


Figure 4. Comparaison expérimentation avec simulation (a) impact confiné C (b) impact non confiné UC, (c) Comparaison résultats numériques (courbe moyenne) avec une courbe expérimentale d'un essai impact UC.

Comparativement les cellules remplies de matériaux sable et composites pneus-sables montrent des comportements moins perturbés (Figure 5), du fait de l'importance de l'effondrement des chaînes de force pour la réponse des matériaux granulaires grossiers. Les courbes du sable et composite (S) et (M) montrent deux pics. Le premier pic correspond à la sollicitation du matériau. Le second pic illustre

la sollicitation effective de l'enveloppe (géotextile et grillage) qui n'est pas sollicitée dans le cas des blocs. Les remplissages de mélange et sable apparaissent efficaces en termes de réduction de la force mais surtout de durée de réaction allongée.

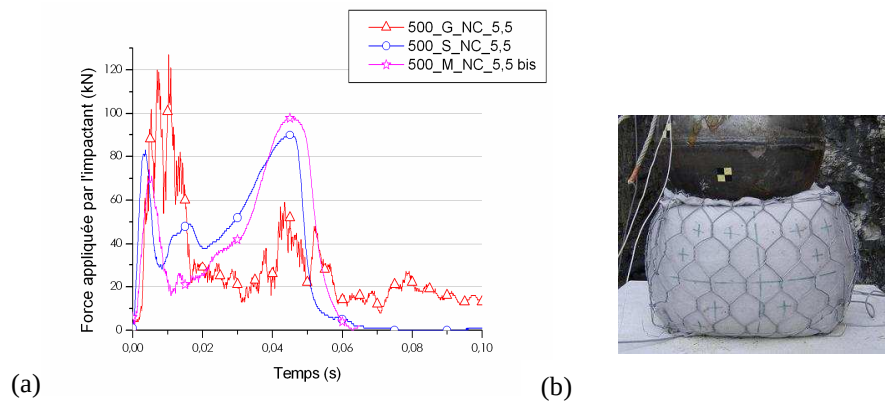


Figure 5. (a) Influence du type de matériau de remplissage (granulats /sable/mélange pneu-sables) sur la force appliquée par l'impactant pour 5,5m de hauteur de chute, (b) cellule pneu-sable impactée.

3. Modélisation de la structure

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. La structure est modélisée en substituant chaque composant géocomposite constitutif par une particule sphérique élémentaire placée au centre (Figure 6). Avec l'utilisation de la méthode des éléments discrets, les particules interagissent entre elles par l'intermédiaire d'action à distance. La modélisation discrète apparaît bien adaptée à la modélisation du comportement de la structure compte tenu des grands déplacements attendus et de l'aspect dynamique de la sollicitation (Nicot et *al.*, 2007). 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.

4. Conclusion

Une approche « multi-échelles » pour modéliser le comportement d'une structure renforcée par éléments cellulaires géocomposites soumise à des impacts localisés de blocs rocheux est utilisée. Une modélisation discrète pertinente des éléments constitutifs a pu être adoptée aux différentes échelles de description. Le comportement mécanique des cellules est analysé afin de fournir des lois

constitutives de description. L'assemblage de blocs rocheux ainsi que l'enveloppe de grillage sont décrits dans le même environnement par une méthode éléments discrets. Des formes réalistes obtenues par fabrication de « clumps » des blocs sont considérées. Les paramètres introduits dans la simulation sont issus de la calibration le long de chemins de sollicitation spécifiques par confrontation des modèles physiques et numériques. Pour simuler la réponse d'une structure globale, une modélisation à l'échelle d'une structure modèle est présentée. La structure est décrite par la méthode des éléments discrets, à l'aide de particules représentant chacune une cellule. Les forces d'interaction agissant entre les particules voisines résultent des lois de comportement identifiées à l'échelle de la cellule.

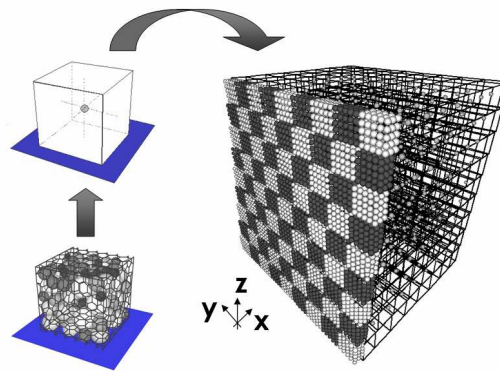


Figure 6. Description « multi-échelles » de la modélisation de la structure.

5. Remerciements

Cette recherche est réalisée au sein de la structure fédérative de recherche VOR: Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques, soutenue par le ministère de la recherche français. Le projet a été soutenu principalement par France Maccaferri SA, du groupe Maccaferri et a bénéficié du soutien financier du CGI38-PGRN (Pôle Grenoblois des Risques Naturels du conseil Général de l'Isère). Nous remercions tous ceux qui ont soutenu ce projet pour l'intérêt qu'ils ont montré à ce travail.

6. Bibliographie

Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F., Derache F. 2004. A multiscale mechanical modelling of unusual geocomposite material for rockfall impact. Proc. 9th Int. Congr. on NUMerical MOdel in Geomechanics Rock Mech, Ottawa (Canada), 709-716.

Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., and Lambert S., 2005. Modelling a geo-composite cell using discrete analysis. Computers & Geotechnics, vol. 32, n° 8, pp. 564-577.

Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F., Derache. 2006 Multi-scale modelling of cellular geo-composite structure under localized impact. *Revue Européenne de Génie Civil*, (10)3, p. 309-322.

Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F. 2006. D.E.M. modeling in impact condition of geocomposite cells dedicated to rockfall protection barrier. NUMGE, Graz (Austria), pp. 849-856

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

Gotteland P, Lambert S, Balachowski L, Strength characteristics of tyre chips-snad mixtures, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2005, Vol. XXVII, N°1-2, p. 55-66.

Itasca consulting group, Inc. 2003. Particles flow code in three dimensions - version 3.0, User's guide, FISH in PFC and Theory and Background, Minneapolis : Itasca

Lajtai, E., Duncan, E., Carter, B. 1991. The effect of strain rate on rock strength. *Rock mechanics and rock engineering*. 24 : 99-109.

Lambert S., Gotteland P., Ple O., Bertrand D., Nicot F., 2004. Modélisation du comportement mécanique de cellules de matériaux confinés, *Journée Nationale de Géotechnique et de Géologie*, Lille, France, pp. 219-226

Lambert, S., Gotteland, P., Bertrand, D., Nicot, F. 2006. Modélisation du comportement mécanique de cellules de matériaux confinés. *Journée Nationale de Géotechnique et de Géologie*, Lyon, France, pp. 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

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