

## Modélisation numérique par éléments discrets de géo-cellules soumises à impact

Philippe Gotteland<sup>1</sup>, David Bertrand<sup>2</sup>, Stéphane Lambert<sup>1-2</sup> & François Nicot<sup>2</sup>

(1) Laboratoire 3S-R, UMR 5521 CNRS-UJF-INP- (2) Cemagref ETNA  
(1), Domaine Universitaire BP53, 38041 Grenoble cedex 9 - (2) BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères  
[philippe.gotteland@hmg.inpg.fr](mailto:philippe.gotteland@hmg.inpg.fr)

### Résumé :

*Un développement innovant des structures de protection contre les éboulements rocheux soumises à un impact est de les concevoir à partir d'un assemblage cellulaire. Les géo-cellules sont des éléments géocomposites (géomatériau entouré de grillage). La modélisation de ces structures se fonde sur une approche multi-échelles. A l'échelle locale, la cellule est modélisée en trois dimensions grâce à la méthode numérique aux éléments discrets. La réponse mécanique à différentes sollicitations quasi-statique et dynamique permet de déterminer un modèle constitutif de la cellule. Les développements et le calibrage des paramètres numériques se basent sur des modèles physiques. Les résultats obtenus à l'échelle de la cellule sont utilisés pour la modélisation de l'ouvrage.*

### Abstract :

*An innovation for rockfall protection barrier structures subjected to an impact is to build the structure with cells assembly. Geocells are geocomposite elements build with wire netting cages filled with coarse granular materials. The proposed modelling is based on a multi scale study of the structure. The local scale focuses on the geocell scale, modelling the constitutive behavior of a single cell. The mechanical response of the cell is studied under quasi-static and dynamical loading. Experiments consisted in uniaxial compression tests and impact tests by a boulder were used to calibrate the model parameters. Thereafter, at the structure scale, each cell is modeled thanks to the constitutive model.*

**Mots-clefs : modélisation ; éléments discrets ; gabion ; milieu granulaire.**

### 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 telles que les merlons de protection renforcés ou non renforcés, dissipent l'énergie d'impact des blocs principalement par leur masse importante. De tels ouvrages 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 pour les systèmes modulaires réside dans la possibilité de construire le parement amont, le corps de l'ouvrage, et le parement aval par assemblage de géo-cellules élémentaires fonctionnelles (Figure 1). Dans le cas présenté, une géo-cellule est constituée d'une enveloppe grillagée remplie de matériaux (graviers, blocs, sables, en incluant une chaussette géosynthétique, ou de matériaux adaptés comme des composites anthropiques pneus-sol par exemple). La géo-cellule peut être remplie manuellement ou mécaniquement. Les

déplacements entre cellules peuvent être bloqués ou non, laissant possible des grands déplacements ou de grandes déformations locales, afin de diffuser ou augmenter localement la dissipation d'énergie par frottement. Les géo-cellules envisagées sont communément appelées Gabions et cette technique est largement utilisée pour la construction d'ouvrages. Le travail de recherche entrepris porte sur l'analyse du comportement d'une telle structure lorsque soumise à une sollicitation de type impact. L'approche mise en oeuvre est une approche dite "multi-échelle". L'échelle abordée dans cet article est la géo-cellule. Pour appréhender le comportement des géo-cellules, des essais statiques et dynamiques ont été réalisés, en condition confinée et non confinée (Lambert *et al.* (2007)). On se focalise sur le travail de modélisation réalisé sur géo-cellules remplies de blocs granulaires (Figure 1).



FIG. 1 – Ouvrages géocomposites cellulaires renforcés utilisés pour les ouvrages de protection, GEO-Cellule Géocomposite remplie de blocs calcaires.

## 2 La modélisation par Eléments Discrets

La méthode des éléments discrets est une méthode numérique développée par Cundall (Cundall & Strack (1979) pour modéliser à l'origine l'assemblage d'éléments granulaires. Cette méthode largement utilisée de nos jours, est utilisée dans un spectre plus large pour des études locales (approche très physique): écoulements granulaires, structures cohérentes, béton, propagation d'ondes, ou pour des études plus globales : ouverture de cavités, ouvrages géotechniques dans leur environnement (approche plus ingénierie). Les simulations présentées sont développées dans l'environnement PFC<sup>3D</sup> en trois dimensions ((Itasca Consulting Groupe).

La méthode des éléments discrets modélise les interactions entre éléments particuliers. 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 (Figure 2). 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 normale  $k_n$ , et la raideur tangentielle,  $k_s$ . La force tangentielle maximum dépend de l'angle de friction défini par la loi de Coulomb. Le coefficient de friction  $f$  (Figure 2) est défini comme  $f = \tan \Phi$ , où  $\Phi$  est l'angle de friction entre les éléments en contact. 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.

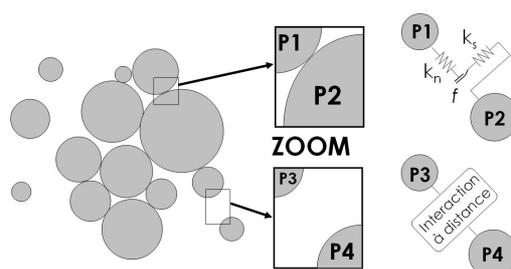


FIG. 2 – Interactions entre éléments par la méthode des éléments discrets, ( $k_n$ , raideur normale,  $k_s$  raideur tangentielle,  $f$  coefficient de friction).

### 3 Modélisation du matériau composite

La géo-cellule gabion est une cage composée de deux systèmes constitutifs: les blocs de remplissage et l'enveloppe grillagée pour le cas présenté. L'enveloppe constitue des conditions aux limites particulières qui influencent le comportement de l'assemblée granulaire de remplissage. Ses fonctions sont doubles : maintenir l'assemblée de blocs durant la réalisation des cellules (rôle de coffrage), appliquer un confinement latéral durant la sollicitation. Les expérimentations sont réalisées sur des cellules modèles cubiques de 500 mm de côté (Lambert *et al.* (2007)), représentant le volume élémentaire de gabion (Figure 4).

#### 3.1 Modélisation du matériau de remplissage

Pour modéliser numériquement le matériau de remplissage, 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.* (2006)). Les blocs numériques sont réalisés par assemblage permanent de petites particules sphériques élémentaires «clumps» pour obtenir des formes angulaires et représentatives. En effet des études préliminaires ont montré que la forme des blocs joue un rôle très important dans le comportement mécanique à l'échelle de la cellule (Bertrand *et al.* (2005)). Les blocs sont de forme initiale parallélépipédique, les blocs sont tournés et les angles vifs sont coupés aléatoirement afin d'obtenir une assemblée numérique de blocs non identiques (Figure 3). Les interactions entre les blocs sont gérées par les lois de contact direct.

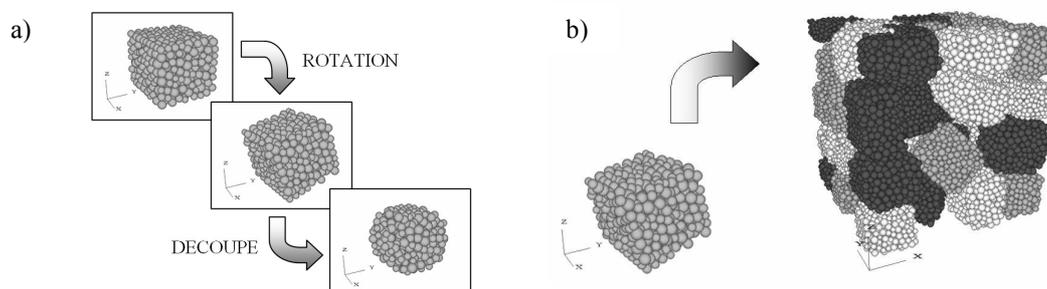


FIG. 3 – Modélisation d'un bloc a) génération d'un cube par assemblage de particules sphériques élémentaires, rotation aléatoire, découpe des angles vifs ; b) assemblée numérique.

### 3.2 Modélisation de l'enveloppe grillagée

Le grillage à maille hexagonale est modélisé par des particules placées aux nœuds de la maille (Figure 4a). Chaque brin entre chaque nœud est modélisé par une force agissant à distance. Cette force dépend de la distance entre deux particules et des caractéristiques rhéologiques du brin (Bertrand *et al.* (2005)). Les paramètres du modèles de grillage ont été calés et validés à partir d'essais expérimentaux de traction effectués à l'échelle d'une nappe de grillage (Figure 4b).

### 3.3 Constitution de la géo-cellule numérique

Les deux systèmes : assemblée de blocs et enveloppe grillagée, sont ensuite assemblés (Figure 5) pour modéliser la géo-cellule complète.

## 4 Essais mécaniques

Afin de pouvoir disposer d'essais permettant le calage des paramètres du modèle et d'essais de validation adaptés à la problématique traitée, deux types d'essais de chargement en quasi-statique et dynamique ont été réalisés en configuration confinée avec blocage des déplacements latéraux, en configuration non confinée ou les déplacements latéraux sont libres (Lambert *et al.* (2006)).

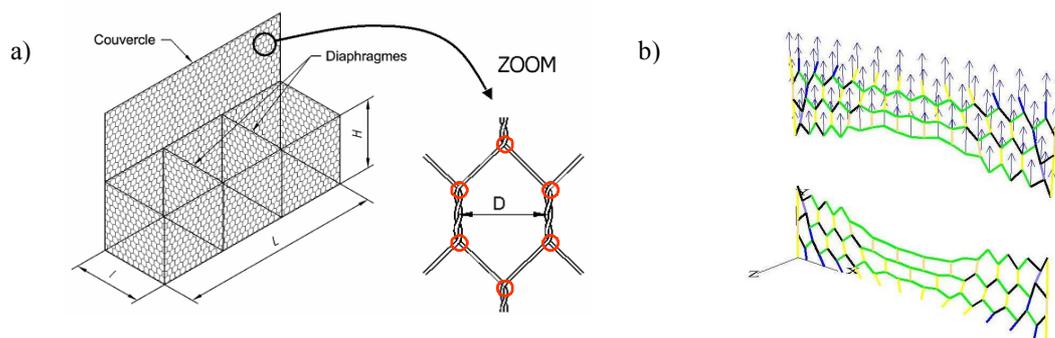


FIG. 4 – a) Modélisation de l'enveloppe de grillage, b) calage des paramètres micro à partir d'essais de traction.

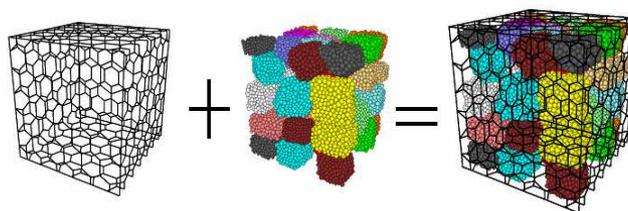


FIG. 5 – Modélisation de la géo-cellule : assemblage enveloppe et matériau de remplissage.

### 4.1 Compression quasi statique

En quasi statique, les essais sont des essais de compression, avec enregistrement de la force axiale en fonction du déplacement vertical. Les résultats d'essais confinés sont utilisés pour alimenter le modèle numérique; les essais non confinés permettent de le valider.

D'un point de vu qualitatif, la réponse numérique du modèle est en accord avec les données expérimentales. Les phénomènes physiques sont bien reproduits par le modèle numérique (Figure 6). Les valeurs des microparamètres introduits pour définir l'interaction entre les blocs, ainsi que la compacité initiale de l'assemblée numérique et le positionnement des blocs ont une influence importante sur le comportement de la cellule (Bertrand *et al.* (2005)).

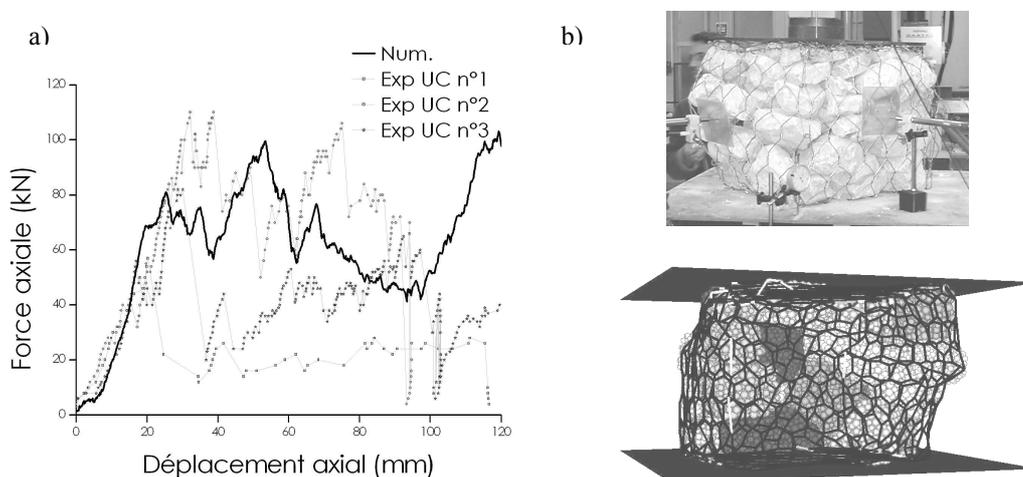


FIG. 6 – a) Comparaison des modèles expérimentaux et numériques essais non confinés UC, b) Num et Exp UC n°1.

## 4.2 Essais d'impact dynamique

Les essais expérimentaux d'impact (Lambert *et al.* (2006)) ont été simulés numériquement (Bertrand, (2006)). Les résultats sont en bonne correspondance conduisant à la validation du modèle numérique (Figure 7).

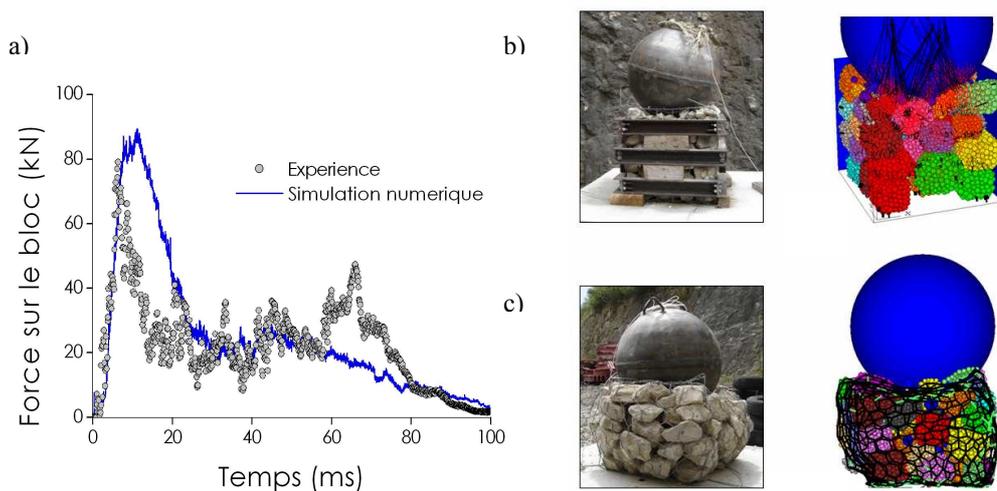


FIG. 7 – a) Courbe moyenne numérique comparée avec une courbe expérimentale d'un essai impact Non Confiné, Comparaison essai/simulation, b) impact Confiné, c) impact Non Confiné.

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) sont en accord avec les données expérimentales. Bien que le comportement mécanique d'assemblage de blocs soit dépendant de la déformation, le jeu de micro paramètres calibrés avec les simulations quasi statiques permet de décrire le comportement macroscopique de la cellule en condition dynamique (Figure 7a). 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.

Les résultats obtenus à l'échelle de la géo-cellule sont extrapolés au comportement des cellules dans l'ouvrage. Une modélisation du comportement d'un ouvrage type est proposée (Bertrand *et al.* (2007)) et permettra la définition d'essais sur ouvrage en semi vraie grandeur dans le cadre du programme de recherche REMPARE soutenu par l'ANR RGCU 2006.

## 5 Conclusions

Compte tenu de l'aspect modulaire des structures envisagées et du type de matériau granulaire utilisé, une modélisation par éléments discrets des géo-cellules constitutives a pu être adoptée. L'assemblage de blocs rocheux et l'enveloppe de grillage sont décrits dans le même environnement. Des formes réalistes de blocs numériques sont obtenues par fabrication de « clumps ». Les paramètres de la simulation sont issus de la calibration le long de chemins de sollicitation spécifiques par confrontation des modèles physiques et numériques. Le comportement mécanique des géo-cellules numériques est alors analysé afin de fournir des lois constitutives.

## 6 Remerciements

Les auteurs remercient France Maccaferri SA, la fédération de recherche VOR-RNVO, et le Pôle Grenoblois des Risques Naturels du Conseil Général de l'Isère (CGI38-PGRN), sans le soutien desquels ces travaux n'auraient pu être menés.

## Références

- 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., Nicot F., Lambert S., Gras V. 2007 Structures géocomposites cellulaires, modélisation de la réponse à un impact localisé. Congrès Français de Mécanique, Grenoble (France), 6p
- Cundall, P.A., and Strack, O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, Vol. 29, pp. 47-65
- 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), p. 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