# Modélisation numérique de cellules géocomposites pour la protection contre les éboulements rocheux.

## **Bertrand David**

## LIRIGM – Université Joseph Fourier – Maison des géosciences – 1381, rue de la piscine, Domaine universitaire 38041 BP 53 Grenoble cedex 9

RESUME. L'étude porte sur des structures de protection contre les chutes de bloc à technologie cellulaire. Ce type d'ouvrage fait l'objet d'une modélisation multi-échelles où on distingue l'échelle de la cellule de celle de l'ouvrage. Cet article présente la modélisation numérique de cellules remplies de pierres entourées par un grillage métallique à maille hexagonale. La description du matériau granulaire est réalisée à partir d'une approche numérique discrète adaptée pour simuler sa granularité. Le calage et la validation du modèle numérique sont effectués en comparant les résultats des simulations numériques à des essais expérimentaux réalisés sur des cellules cubiques de 500mm de côté dans des conditions quasi-statique et dynamique d'impact. Les résultats numériques sont en accord avec les expérimentations.

MOTS-CLÉS : Modélisation numérique, chutes de blocs, structure cellulaire.

ABSTRACT. The study is related to rockfall protection barrier built with cell assembly. This structure is model by a multiscales approach where one distinguishes the cell scale and the barrier scale. This paper is dedicated to the numerical modelling of cells filled with granular matter surrounded by a wire mesh. The medium is described by the discrete element method well suited to simulate it granular nature. The calibration and the validation of the numerical model are carried out by comparing simulation results to experimental data coming from mechanical tests carried out on cubic like cells of 500mm. These tests were performed in quasi-static condition and dynamic condition. Numerical results are in agreement with experiments.

KEYWORDS : Numerical simulation, rockfalls, cellular structure.

#### **1. INTRODUCTION**

Dans le domaine du génie civil, les gabions (Figure 1), dénommés « cellules » dans la suite, sont utilisés dans de nombreuses applications. Ils peuvent être employés pour la protection de berges de rivière contre l'érosion ou encore pour la construction de murs de soutènement. Les cellules constitutives des ouvrages sont apparentées à des matériaux composites. Une cellule est un assemblage de deux systèmes : un matériau de remplissage généralement de nature granulaire et une enveloppe grillagée. Pour des ouvrages géotechniques classiques, les cellules sont parallélépipédiques et ont des dimensions de l'ordre du mètre. Les matériaux utilisés pour leur remplissage doivent répondre aux exigences de la norme française sur les gabions (NFP94-325-1).

Les structures de protection contre les éboulements rocheux à technologie cellulaire constituent une technique et une approche innovantes pour se prémunir contre ce type d'aléa. Ces ouvrages sont apparentés à des merlons de protection qui sont des sortes de digues permettant l'arrêt des blocs. De profil linéaire, ils s'adaptent très bien à la configuration topographique des sites d'implantation.

L'aspect minéral du parement facilite l'intégration dans le paysage. Les cellules de l'ouvrage pourront être remplies d'un ou plusieurs types de géomatériaux qui peuvent être de différentes natures. Du sable ou des pierres peuvent être employés. Ces ouvrages sont aussi un moyen permettant la valorisation de déchets comme les pneus. L'association de ces matériaux devra conduire à l'optimisation de la capacité de dissipation d'énergie de la structure lors d'impacts (Gotteland, 2005 ; Bertrand, 2006b).



## Figure 1 : Cellule constituée d'une enveloppe grillagée et d'un matériau de remplissage.

Le comportement de ces structures cellulaires sous sollicitation dynamique reste aujourd'hui mal connu. Pour comprendre et analyser les différents phénomènes mis en jeu au sein de l'ouvrage lorsque celui-ci est soumis à un impact, une approche de modélisation de type *multi-échelles* a été retenue (Bertrand, 2006a). Le principe de cette approche est d'étudier de manière fine le comportement mécanique de la structure à une échelle locale, typiquement l'échelle de la cellule, puis de tirer profit des résultats obtenus à cette échelle pour modéliser l'ouvrage complet.

Dans cet article, l'échelle d'étude est celle de la cellule. On s'intéresse à la description de l'approche numérique adoptée pour modéliser sous le même environnement de calcul le grillage et le matériau de remplissage. Ensuite, le calage et la validation du modèle numérique de la cellule dans des conditions quasi-statique et dynamique sont effectués par comparaison avec des données expérimentales.

## 2. MODELISATION D'UNE CELLULE

## 2.1. METHODE NUMERIQUE UTILISEE

La nature des ouvrages étudiés ici a orienté le choix de la modélisation numérique vers une approche dite « méthode aux éléments distincts » (MED). La modélisation aux éléments distincts, qui s'appuie sur une technique de discrétisation temporelle par différences finies, a la particularité de traiter le milieu étudié comme un assemblage de corps indépendants. L'approche de modélisation discrète décrit le matériau à une échelle microscopique, c'est-à-dire une échelle liée à la taille de l'élément distinct, par opposition à une approche continue qui traite le matériau d'un point de vue macroscopique à travers des lois de comportement issues de la mécanique des milieux continus.

Les corps interagissent par l'intermédiaire de modèles d'interaction où apparaissent les paramètres de la MED (voir par exemple Cundall *et al.*, 1992). Les interactions entre éléments peuvent soit se faire par contact soit se faire à distance. Les déplacements et les rotations des éléments sont calculés à chaque pas de temps grâce au principe fondamental de la dynamique. Ainsi, à l'échelle de l'assemblage de grains, la simulation de grands déplacements dans le milieu ne pose pas de problème et se fait de manière simple.

## 2.2. LE MODELE DU GRILLAGE A MAILLE HEXAGONALE

Une cellule est constituée de deux systèmes particuliers qui sont le matériau de remplissage et le grillage. Le modèle numérique d'une cellule doit tenir compte de l'enveloppe grillagée. D'une part, le modèle proposé doit être représentatif du comportement mécanique du grillage seul (voir par exemple Nicot, 1999) et, d'autre part, la simulation des éléments de remplissage et du grillage doit pouvoir être réalisée sous le même environnement de calcul pour permettre l'interaction entre les deux systèmes.

Pour modéliser le grillage par la MED, on propose de le décrire par l'intermédiaire de particules placées aux nœuds physiques de la nappe (Figure 2a). Entre ces particules est appliquée une force représentative de l'action du fil reliant physiquement deux nœuds du grillage. Cette force est fonction de la distance entre deux particules et des caractéristiques rhéologiques du fil.

Le fil constitutif du grillage est un alliage d'acier et de zinc qui confère au matériau une grande déformabilité. Ce métal sous sollicitation de traction simple développe un comportement mécanique élasto-plastique avec écrouissage positif avant de se rompre. Ce comportement a pu être décrit à travers le formalisme élasto-plastique classique, en s'appuyant sur des essais expérimentaux de traction simple effectués sur des échantillons de fil, jusqu'à la rupture. Le modèle, qui prend en compte la rupture en traction des brins de métal, permet d'évaluer les forces d'interaction entre particules contigües. Une série d'essais de traction simple (Figure 2b) à l'échelle de la nappe de grillage a permis le calage et la validation du modèle numérique adopté (Figure 2c).



Figure 2 : (a) Modèle du grillage par une approche discrète. (b) Forme de la nappe numérique à la rupture lors d'un essai de traction. (c) Comparaison des réponses numérique et expérimentale.

#### 2.3. CONSTRUCTION DE LA CAGE GRILLAGEE

Le placement tridimensionnel des particules est réalisé particule par particule. Chaque cas d'étude, impliquant une géométrie de grillage différente, demande un algorithme approprié. Dans le cas d'une nappe de grillage bidimensionnelle, le positionnement des particules reste relativement aisé. Le schéma répétitif du motif « nid d'abeille » conduit au développement de routines assez courtes et faciles à utiliser. Dans le cas d'une cage de grillage, le processus de positionnement est plus compliqué. Il s'inspire du procédé de fabrication réel. Les particules sont d'abord positionnées en deux dimensions. Chaque nappe de grillage composant la cage est définie dans un seul et même plan, par exemple (xOy). Ensuite, la rotation et la translation de chaque panneau sont effectuées (Figure 3).



*Figure 3 : Positionnement des particules grillage de la cage du matériau de remplissage.* 

## 2.4. MODELISATION DU MATERIAU DE REMPLISSAGE

Des études préliminaires ont montré que la forme de l'élément a une influence significative sur le comportement macroscopique de la cellule (Bertrand, 2005a). Pour espérer reproduire les processus physiques se développant lors du chargement mécanique d'une cellule il est nécessaire de prendre en compte la forme de l'élément. La technique utilisée pour modéliser la forme de particule quelconque consiste à associer un ensemble de particules sphériques les unes aux autres. Pour des cellules remplies de matériaux concassés en carrière, les formes rencontrées sont anguleuses. La description des formes complexes des éléments nécessite deux étapes pour construire les assemblages de grains : la génération de l'élément et ensuite sa mise en place dans la cellule (Figure 4). Après avoir créé l'assemblée de particules de forme cubique, deux rotations dans l'espace suivant deux axes différents sont appliquées à l'ensemble et les particules se trouvant sur les arêtes de l'assemblage sont supprimées dans le but de réduire l'angularité de l'élément. L'ensemble des éléments est placé par pluviation, ce qui consiste à utiliser la gravité pour positionner les éléments dans l'espace souhaité. Dès qu'un état d'équilibre mécanique est atteint, une vibration des éléments est effectuée dans le but d'optimiser la compacité de l'assemblage.

Grâce à cette technique il est possible de reproduire fidèlement la granulométrie et la porosité des cellules réelles. Compte tenu de la variabilité des réponses mécaniques des cellules, inhérente à la nature granulaire du milieu, dix cellules ont été créées numériquement pour permettre une description moyenne du comportement mécanique de ce géo-composite.



Figure 4 : Création d'un élément et positionnement des éléments au sein de l'espace à remplir.

#### **3. RESULTATS EXPERIMENTAUX**

L'absence d'une base de données existante concernant le comportement de cellules sous sollicitation quasi-statique et dynamique a conduit à la mise en place d'essais expérimentaux. Deux types d'essais ont été réalisés en condition confinée et non confinée. Dans le premier cas, le confinement des cellules consistait à interdire les déformations des faces latérales lors de la sollicitation de la cellule alors que dans des conditions non confinées, les faces étaient libres de se déformer. Les cellules mesuraient 500 mm de côté.

Des essais de compression quasi-statique ont été réalisés. Les essais sont pilotés en déformation à vitesse de compression constante. Au cours de l'essai, la force axiale appliquée au plateau de chargement était enregistrée en fonction du déplacement axial associé. Quatre essais ont été exploités en condition non confinée et deux en condition confinée (Lambert *et al.*, 2004). Des essais d'impact ont également été effectués. Le dispositif expérimental était composé d'un impactant sphérique et d'un socle en béton sur lequel la cellule était positionnée avant le largage de la sphère sur la cellule. Le diamètre de la sphère était de 530 mm et son poids était de 250 kg. Au centre de la sphère un accéléromètre triaxial enregistrait les trois composantes de l'accélération que subissait la sphère, ce qui permettait d'évaluer la force appliquée au bloc au cours du choc (Lambert *et al.*, 2006).

## 4. **RESULTATS NUMERIQUES**

Tous ces essais expérimentaux ont été simulés numériquement. La fragmentation des éléments a été intégrée au modèle numérique par proposition d'un nouveau modèle de contact de type élastoplastique dans la direction normale (Bertrand *et al.*, 2005b).

Les résultats des simulations numériques sont exprimés en termes de courbes moyennes issues de dix essais effectués dans les mêmes conditions de chargement, mais en considérant à chaque fois un milieu granulaire (cellule) de texture différente. Seuls les essais de compression non confinée n'ont pas été moyennés car la variabilité des résultats était telle qu'il n'est pas possible d'identifier une tendance moyenne de comportement.



Figure 5 : Tendance moyenne des résultats de simulations des essais de compression confinée (10 essais numériques) et comparaison à l'expérience (Exp n° 1 et 2).

Une fois le calage des paramètres de contact effectué à partir des essais de compression confinée (Figure 5), le modèle numérique a été validé grâce aux essais de compression non confinée et d'impact (confiné et non confiné).



Figure 6 : Simulations des essais de compression non confinée (NUM n°1 à 10) et comparaison avec les résultats expérimentaux (Exp n° 1 à 4).

Dans le cas de compressions non confinées, les courbes présentent une croissance initiale régulière, puis la force chute brutalement après avoir atteint un maximum (Figure 6). Ensuite, la force fluctue. Ce mécanisme semble provenir de l'effondrement de chaînes de force au sein du squelette granulaire. Une succession de grains en contact par laquelle transitent d'importantes forces de contact s'effondre par mouvement ou rupture d'éléments ce qui provoque une chute brutale de la force appliquée sur le plateau de chargement. Pour chaque cellule, les ordres de grandeur sont les mêmes mais chaque cellule possède sa réponse propre. Le comportement d'une cellule est évidement fortement lié à l'arrangement initial des éléments. Ceci est d'autant plus marqué lorsque les éléments ont la possibilité de se mouvoir facilement (condition non confinée). La dispersion des résultats expérimentaux est bien reproduite par le modèle numérique ainsi que les ordres de grandeur et les tendances de comportement. De même que pour l'expérience, la déformation globale des cellules numériques est fortement influencée par la texture initiale de l'assemblage.



*Figure 7 : Simulations des essais d'impact en condition confinée (Courbe moyenne) et comparaison avec les résultats expérimentaux. Evolution de la force sur l'impactant en fonction du temps.* 

Les capacités du modèle numérique à reproduire le comportement d'une cellule dans des conditions dynamiques ont également été explorées. Les mêmes paramètres calés dans le cas quasi-statique ont

été employés lors des simulations. Les caractéristiques physiques de l'impactant ainsi que la vitesse d'impact expérimentale ont été reproduites. La vitesse d'impact était de 8 m/s ce qui équivalait à une énergie cinétique de 8 kJ.

Au regard des résultats (Figures 7 et 8), 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 terme de montée au pic et d'oscillation *post* pic (dans le cas non confiné) et également en termes d'évolution de l'intensité de la force sur l'impactant.



*Figure 8 : Simulations des essais d'impact en condition non confinée (Courbe moyenne) et comparaison avec les résultats expérimentaux. Force sur l'impactant en fonction du temps.* 

Bien que le comportement d'une roche soit dépendant de la vitesse de sollicitation, on remarque que le calage des paramètres effectué dans des conditions quasi statiques permet de décrire correctement le comportement macroscopique de la cellule en condition dynamique. Les vitesses d'impact des essais dynamiques ne sont vraisemblablement pas suffisantes pour que les pierres développent des comportements dépendant de la vitesse de chargement. En outre, l'effet de vitesse est principalement dû à l'inertie des éléments, naturellement prise en compte par le modèle.

## 5. CONCLUSION

On s'intéresse ici à la modélisation de structures composites cellulaires dédiées à la protection contre les chutes de blocs rocheux. Les cellules qui composent l'ouvrage sont des cages grillagées remplies d'un matériau, souvent de nature granulaire, qui possède de grandes capacités de déformation. Cet article se focalise sur la modélisation numérique d'une cellule et la validation des modèles proposés par comparaison avec des essais expérimentaux.

La modélisation du grillage à maille hexagonale double torsion a été entreprise à partir d'une discrétisation géométrique de la nappe de grillage. Les interactions entre les particules constitutives de la nappe ont été décrites de manière à reproduire le comportement du métal et se font à distance. La nature et les paramètres de cette loi ont été estimés grâce à des essais de traction simple sur fils. Le calage et la validation du modèle proposé pour le grillage ont été effectués en s'appuyant sur des résultats expérimentaux issus de tractions simples à l'échelle de la nappe de grillage.

Ensuite, la modélisation d'une cellule a été présentée. Les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau de remplissage ont été reproduites. Compte tenu de la forte variabilité des résultats obtenus expérimentalement d'une cellule à l'autre, dix cellules ont été créées numériquement afin de pouvoir dégager un comportement mécanique moyen. Le calage des paramètres de contact s'est avéré délicat compte tenu de cette variabilité, inhérente aux milieux granulaires. La validation du modèle de la cellule a été confirmée grâce à des essais mécaniques sur cellules réelles. Les résultats obtenus démontrent une bonne concordance avec l'expérience que ce soit en condition confinée ou non et pour des sollicitations quasi-statique et dynamique. Ceci permet de penser que le modèle de la cellule proposé est robuste vis-à-vis des changements de régime de sollicitation et des changements de conditions aux limites.

Dans un avenir proche, la simulation d'autres types d'essais mécaniques, difficiles à mettre en œuvre expérimentalement, est envisagée. Par exemple, des essais triaxiaux permettraient d'étudier l'effet du confinement sur la réponse de la cellule et de mieux décrire le comportement d'une cellule au sein d'une structure cellulaire. *In fine*, les résultats seront utilisés pour améliorer le modèle numérique de l'ouvrage déjà existant (Bertrand, 2006b).

## 6. **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier France Maccaferri qui a pris en charge le financement de ma thèse ainsi que les organismes qui ont participé au financement des travaux (RNVO : Risque Naturel et Vulnérabilité des Ouvrages, soutenue par le Ministère de la Recherche et le Pôle Grenoblois des Risques Naturels).

## 7. **BIBLIOGRAPHIE**

- Bertrand D., Gotteland P., Nicot F. (2005a) « D.E.M. modelling of natural stones assembly confined in wire mesh », *Powders & Grains 2005*, Stuttgart (Germany), p. 681-685.
- Bertrand D., Nicot F., Gotteland P., Lambert S. (2005b) « Modelling a geo-composite cell using discrete analysis » *Computer and Geotechnics*, vol. 32, n° 8, p. 564-577.
- Bertrand D. (2006a) « Modélisation du comportement mécanique d'une structure cellulaire de protection soumise à une sollicitation dynamique localisée Application aux structures de protection contre les éboulements rocheux », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.
- Bertrand D., Gotteland Ph., Lambert S., Nicot F., Derache F. (2006b) « Multi-scale modelling of cellular geo-composite structure under localized impact », *Revue Européenne de génie civil*, in press.
- Cundall P., Hart D. (1992) « Numerical modelling of discontinua » *Engineering Computations*, vol. 9, p. 101-113.
- Gotteland P., Bertrand D., S. Lambert, F. Nicot (2005) « Modelling an unusual geocomposite material barrier against a rockfall impact », *IACMAG 2005*, Turino (Italy), p. 529-536.
- 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), p.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).
- NFP94-325-1, Norme Française : Exécution des travaux géotechniques spéciaux ouvrages en gabion partie 1 : Hors sites aquatiques (2004), St Denis la plaine, AFNOR.
- Nicot F. (1999) « Etude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.