



Modélisation du comportement mécanique de merlons protecteurs soumis à l'impact de blocs rocheux

Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche
pour la Prévention des Risques Naturels

Coordonnateurs :

Philippe GOTTELAND

François NICOT (responsable, francois.nicot@grenoble.cemagref.fr)

Participants :

David BERTRAND

Stéphane LAMBERT

Philippe GOTTELAND

François NICOT

Francis DERACHE

Michel GOUEFFON

Programme de recherche 2003 financé par le Conseil Général de l'Isère.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Approche numérique : La méthode aux éléments discrets	4
2.1	Principe	4
2.2	Modèles d'interaction	5
3	Modélisation 3D du grillage	6
3.1	Principe	6
3.2	Essai mécanique sur nappe de grillage	7
4	Modélisation du matériau de remplissage en 3D	9
5	Modélisation de la cellule	10
5.1	Essai de compression en condition quasi-statique	10
5.1.1	Essai de compression confiné	11
5.1.2	Essai de compression non confiné	12
5.2	Essai dynamique : impact	12
6	Modélisation de l'ouvrage	14
6.1	Principe	14
6.2	Impact sur la structure	14
7	Conclusion - Perspectives	14

1 Introduction

Le travail de recherche proposé a pour but d'améliorer la conception et le calcul de structures composites visant à réduire les risques de dommages liés aux phénomènes d'éboulements rocheux. Ce travail s'inscrit dans le cadre des travaux du GIS RNVO. Un premier examen des travaux menés sur ce thème souligne le caractère empirique des connaissances et des méthodes utilisées pour le dimensionnement des ouvrages, en particulier d'un point de vue dynamique [28]. En effet, les réponses des matériaux constitutifs de ce type d'ouvrage, sous sollicitation dynamique localisée, sont encore très mal connues.

Il existe un réel besoin pour avancer dans la prédiction de la réponse de l'ouvrage lorsqu'il est impacté. En particulier, il semble nécessaire d'apporter des éléments afin de préciser quelle est la capacité de réponse mécanique d'un ouvrage en fonction des conditions d'impact, d'évaluer la capacité résiduelle d'un ouvrage après plusieurs impacts, de pouvoir disposer à terme d'un outil informatique d'aide à la conception.

La technologie cellulaire de la structure de protection sera issue des procédés de l'entreprise France Gabion. Le parement amont (exposé aux chutes de bloc) sera constitué d'un assemblage de Gabions, dénommés "cellules" dans la suite de l'étude, prolongé ou non de nappes de grillage dans la structure (cf. figure 1) visant à renforcer le remblai aval le cas échéant. Des cellules, constituant un noyau dissipatif, peuvent s'intercaler entre le parement et le remblai aval.

La méthodologie adoptée s'inscrit dans une approche *multi-échelles*. **L'approche locale** a pour but d'étudier le comportement d'une cellule soumise à différents chemins de sollicitation (essai de compression confiné, non confiné et impact d'un projectile). Le modèle constitutif de la cellule sera obtenu grâce à la caractérisation de la réponse mécanique de la cellule. **L'approche globale** consiste à intégrer le modèle constitutif local à l'ensemble de la structure en remplaçant les cellules, grâce à des hypothèses cinématiques complémentaires, par une particule. Les déplacements relatifs entre particules seront commandés par ce modèle. Le passage à l'échelle de l'ouvrage conduira au développement d'un logiciel de calcul basé sur une approche numérique discrète.

L'intérêt de cette approche est de permettre une caractérisation macroscopique simple de l'ouvrage en prenant en compte la micromécanique à l'échelle de la cellule par l'intermédiaire des modèles constitutifs.

Le travail de recherche s'articule autour des axes suivants :

1. Modélisation du comportement mécanique d'un élément cellulaire par la méthode des éléments discrets : modélisation de l'enveloppe (grillage), modélisation du matériau de remplissage, assemblage des deux.
2. Construction d'un modèle constitutif d'un élément cellulaire.
3. Campagnes d'expérimentations de laboratoire nécessaires aux investigations et calages des paramètres issus du code de calcul.
4. Développement d'un outil de calcul à destination du partenaire industriel (France Gabion) afin de simuler l'impact d'un bloc sur un ouvrage.

Bien entendu, cette description simpliste de la structure reste à un stade de projet. Les résultats des travaux de recherches conduiront certainement à modifier la constitution de la structure pour améliorer son efficacité face à l'aléa rocheux.

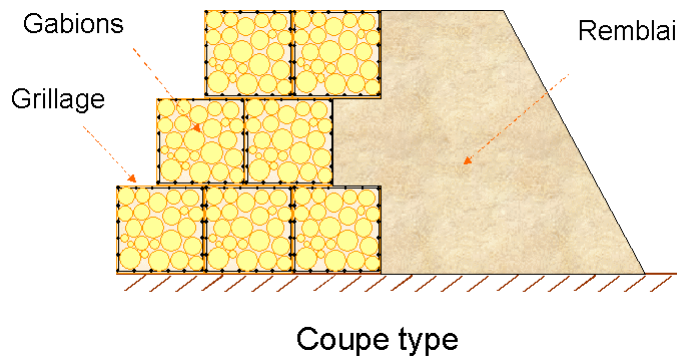


FIG. 1 – Schéma de principe d’une structure cellulaire de protection contre un aléa naturel de type chute de bloc. Le parement face à la falaise est constitué de gabions (cellules grillagées remplies d’un géomatériau) ayant un rôle de dissipation d’énergie. Le remblai pourra être renforcé ou non en fonction de l’emprise allouée à l’ouvrage.

2 Approche numérique : La méthode aux éléments discrets

L’étude des milieux granulaires est largement abordée avec des approches numériques. Ici, le logiciel utilisé pour la modélisation numérique à été développé par l’entreprise ITASCA et utilise une méthode numérique dénommée ”Méthode aux Eléments Discrets” (MED) [12] [23]. Ce code de calcul se nomme Particle Flow Code (PFC). Nous utilisons la version 3.0 de PFC^{3D}.

Grâce à la MED, la modélisation statique et dynamique du comportement d’un milieu granulaire peut être réalisée. Les champs d’application sont très larges. En effet, il est possible de modéliser le matériau sous ses trois formes (solide, liquide, gaz). On utilise la MED pour la simulation du comportement des sols, d’écoulements granulaires (dans des silos, sur des plans inclinés), de mécanismes d’endommagement et de rupture sur des matériaux de type béton ou roche, etc . . .

2.1 Principe

Le calcul de l’évolution dynamique se fait tous les pas de temps par l’application alternative du Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) sur chaque particule et de l’actualisation des forces de contact appliquées également sur chaque particule.

Le principe est le suivant. Considérons une particule au sein d’une assemblée. A l’instant t , cette particule se trouve sollicitée par ses proches voisins. En fonction de l’intensité et de la direction des forces de contact qui lui sont appliquées, la particule est amenée à se mouvoir. Sur un pas de temps Δt , le déplacement est calculé grâce à l’application du PFD ceci permet ainsi de connaître la nouvelle position de la particule à l’instant $t + \Delta t$. A l’issue du déplacement (donc à l’instant $t + \Delta t$), un nouvel état mécanique, dû aux nouvelles forces de contact sur la particule, est généré.

Cette procédure est appliquée à chaque particule sur le pas de temps Δt . On construit ainsi le nouvel état mécanique de l’assemblée à l’instant $t + \Delta t$. Il ne reste plus qu’à répéter l’application du PFD à l’ensemble de l’assemblée pour obtenir l’état de l’assemblée au pas de temps suivant (ici $t + 2\Delta t$).

La MED est une méthode de calcul explicite qui possède deux principales caractéristiques. D’une part, il est possible de modéliser des comportements non linéaires de type grandes déformations et considérer la rupture d’un matériau.

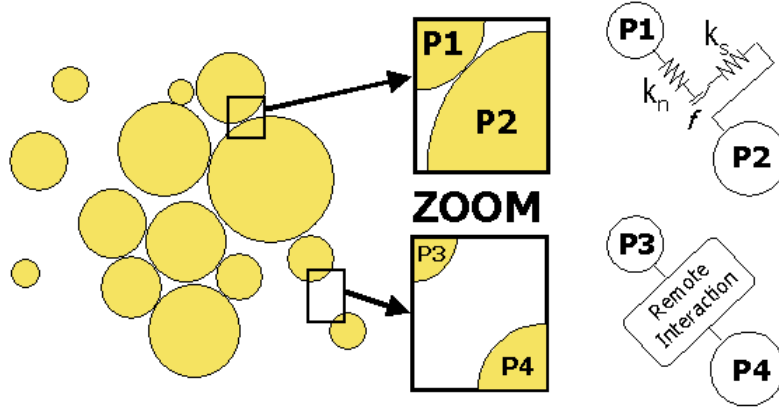


FIG. 2 – Principe des interactions entre particules.

D'autre part, du fait de la nature de l'algorithme de résolution, la convergence de la MED est conditionnelle. Une condition nécessaire sur le pas de temps Δt est que la vitesse de propagation de l'onde numérique soit supérieure à celle de l'onde réelle, c'est à dire que le pas de temps soit suffisamment petit pour que les perturbations dues au mouvement d'une particule restent locales (seules les particules voisines sont affectées par le mouvement de la particule) et qu'elles ne se transmettent pas à l'ensemble de l'assemblée. Le pas de temps critique dépend des propriétés micromécaniques des particules de l'agrégat (masse, m , et raideur de contact, k - cf. équation 1). Avec PFC, la valeur critique du pas de temps est calculée pour chaque particule. Le pas de temps retenu est une fraction du plus petit pas de temps obtenu.

$$\Delta t \propto \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

Il est important, lors de la réalisation d'une simulation numérique, de prendre en compte cet aspect pratique. En effet, cette condition de convergence imposée peut conduire à des temps de calcul réhibitoire.

2.2 Modèles d'interaction

Les formes de base des particules simulées avec PFC sont des sphères. Les forces entre particules sont générées par leurs interactions mutuelles soit lorsqu'elles se touchent (contact) soit par interaction à distance. Dans le cas du modèle d'interaction de contact (cf. figure 2) la force est proportionnelle à l'interpénétration entre les deux particules. Dans le cas d'interaction à distance, c'est l'utilisateur qui définit lui même quelle particule agit avec quelle autre particule et avec quelle loi d'interaction.

Amortissement numérique : L'amortissement du système peut être réalisé grâce à l'ajout d'une force opposée à la résultante des forces s'appliquant sur chaque une des particules. Cet amortissement dit "non visqueux" ne représente pas une grandeur physique du système mais permet au système atteindre l'état d'équilibre désiré [18] en un nombre de cycles réduit. Le formalisme de l'amortissement non visqueux est le suivant :

$$F_{(i)} + F_{(i)}^d = ma_{(i)} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (2)$$

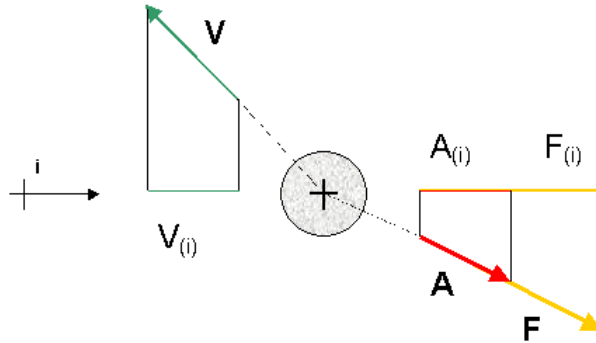


FIG. 3 – Notations pour la définition de l’amortissement (α) sur une particule suivant la direction i . $F_{(i)}$ est la résultante des forces agissant sur la particule, $A_{(i)}$ est l’accélération de la particule et $V_{(i)}$ sa vitesse, toutes ces grandeurs étant les projections suivant i des vecteurs respectifs (\mathbf{F} , \mathbf{A} et \mathbf{V}).

où $F_{(i)}$ (resp. $a_{(i)}$) est la composante suivant i de la résultante des forces (resp. de l’accélération) agissant sur la particule considérée. m est la masse de la particule. L’expression de la force d’amortissement s’écrit :

$$F_{(i)}^d = -\alpha |F_{(i)}| \text{sign}(v_{(i)}) \quad \text{avec} \quad \text{sign}(v_{(i)}) = \begin{cases} +1 & \text{si } v_{(i)} > 0 \\ -1 & \text{si } v_{(i)} < 0 \\ 0 & \text{si } v_{(i)} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Cette force additionnelle réduit donc d’un coefficient α la résultante des forces s’exerçant à l’instant t sur la particule. α est un coefficient non dimensionnel qui par défaut est pris égal à 0.7 pour les études en condition quasi-statique. Il est toutes fois possible de choisir une valeur d’amortissement donnée sur chaque particule.

En règles générales, il est utile de faire appel à cet artifice de calcul pour deux raisons. Tout d’abord, ce type d’amortissement est introduit pour assurer la stabilité numérique du schéma d’intégration [6] [7], et d’autre part, lorsque l’origine de la dissipation d’énergie au sein du système n’est pas entièrement représentée par les frictions interparticulaires. En effet, on citera par exemple la perte d’énergie par collision intergranulaire [10].

3 Modélisation 3D du grillage

Le comportement d’une cellule est lié, en partie, au comportement du grillage permettant de contenir le géomatériau. Celui-ci doit être bien entendu considéré lors des simulations numériques d’une cellule. Le principe adopté pour la prise en compte du grillage grâce à la MED repose sur la définition d’interaction à distance entre particules représentant le grillage.

Ensuite, on s’intéresse à la définition et la formulation des forces s’exerçant au sein du grillage en intégrant la loi de comportement des brins de métal du grillage.

3.1 Principe

Pour modéliser le grillage sous l’environnement PFC, on propose de caractériser celui-ci par l’intermédiaire de particules placées aux nœuds physique du grillage (cf. figure 4). On nomme ces parti-

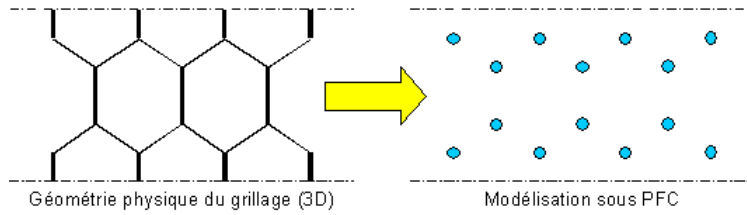


FIG. 4 – Schéma de principe de la modélisation du grillage. A chaque point de rencontre des fils d’acier, on place une particule grillage sur laquelle est appliqué les forces dues à la tension des fils qui lui sont issus.

cules les ”particules grillage”.

Entre les particules grillage est appliqué une force représentative de l’action du fil d’acier reliant physiquement deux nœuds du grillage. Cette force est fonction de la distance entre deux particules et des caractéristiques mécaniques du fil d’acier.

A l’instant t , les forces s’exerçant sur la particule i sont dues à ses voisines. L’intensité de ces forces s’exprime de la manière suivante :

$$\|\vec{F}_{ij}\| = \tilde{f}(\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \quad (4)$$

$\|\vec{F}_{ij}\|$ est la force de la particule j sur la particule i et $\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$ est la distance séparant les deux particules (\vec{x}_i et \vec{x}_j étant les vecteurs position des particules i et j). \tilde{f} désigne la fonctionnelle associée au comportement supposé du matériau.

La direction des forces dues au fil d’acier est imposée par les centres de gravité respectifs des particules grillage. On a ainsi l’expression :

$$\vec{F}_{ij} = \|\vec{F}_{ij}\| \vec{n}_{ij} \quad \text{avec} \quad \vec{n}_{ij} = \frac{\vec{x}_i - \vec{x}_j}{\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|} \quad (5)$$

\vec{n}_{ij} est le vecteur unitaire portant la force \vec{F}_{ij} . Le bilan des forces dues aux particules voisines est alors effectué sur la particule considérée et la résultante des forces est appliquée à la particule.

Pour la gestion des interactions entre les particules grillage, on propose de considérer la loi de comportement du métal. La loi élasto-plastique avec rupture est implémentée sur la base de données expérimentales (essai de traction sur fil d’acier - cf. figure 5).

3.2 Essai mécanique sur nappe de grillage

Compte tenu du caractère innovant de l’approche concernant les interactions à distance entre particules, des simulations numériques d’essais mécaniques sur nappe de grillage ont été réalisés dans le but de tester la modélisation numérique adoptée et de donner un ordre d’idée des potentialités que présente cette approche. La figure 6 illustre les conditions d’essai et l’évolution de la forme géométrique du grillage durant l’essai de traction simple.

Les résultats des simulations ont été comparés à des données expérimentales. Une bonne correspondance est constatée. Pour une description plus détaillée des simulations qui ont été réalisées, se référer à [2] [3] [22].

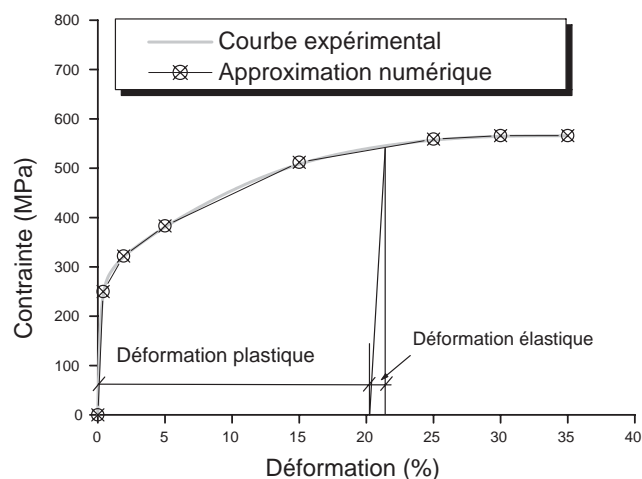


FIG. 5 – Loi de comportement du métal composant le grillage : loi élasto-plastique avec rupture. Un cycle de charge et décharge lors de la traction du fil est représenté sur la courbe (droite centrale quasi verticale).

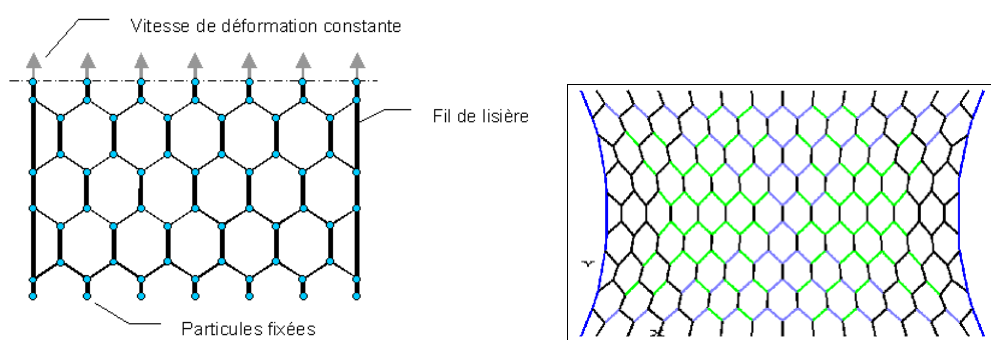


FIG. 6 – Photo gauche : Schéma descriptif de la simulation d'un essai de traction sur nappe de grillage double torsion à maille hexagonale. L'essai mécanique est piloté en déformation en imposant une vitesse constante aux particules supérieures de la nappe et en fixant les particules inférieures (Les particules latérales sont libres). Photo droite : Visualisation des contraintes au sein du grillage pendant l'essai de traction. Cette illustration permet de mettre en lumière le phénomène de striction expérimentalement observé.

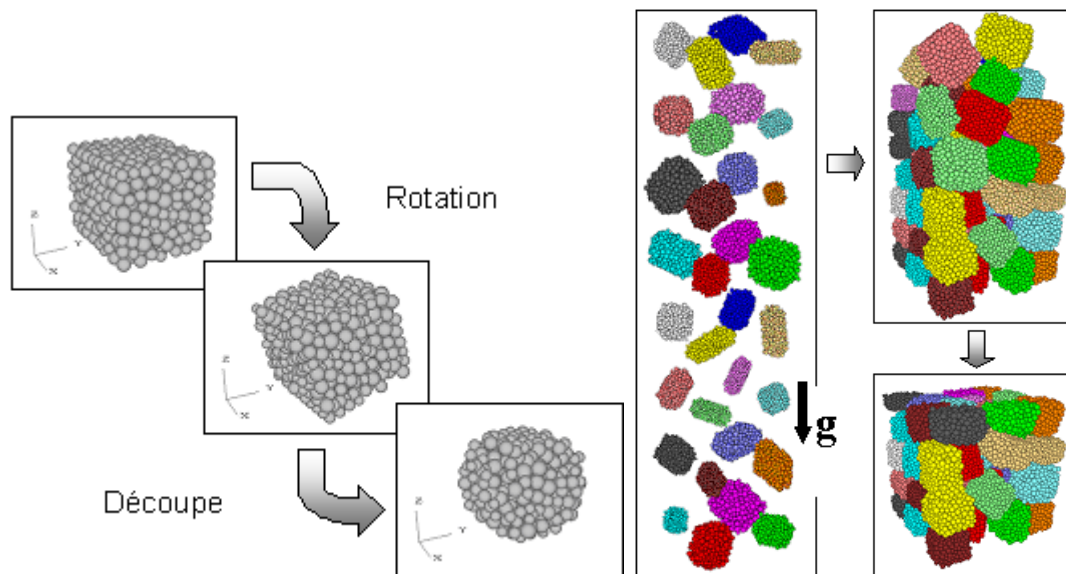


FIG. 7 – A gauche : Etapes pour la génération d’un élément de remplissage de forme parallélépipédique. On génère tout d’abord une assemblée de particules cubique que l’on fait tourné et dont on réduit l’angularité en découpant les arêtes. A droite : Principe de remplissage d’une cellule par la méthode de mise en place sous gravité. Génération de colonnes d’éléments au dessus de la cellule \Rightarrow application de la gravité \Rightarrow suppression des particules supérieures.

4 Modélisation du matériau de remplissage en 3D

Les éléments de remplissage d’une cellule sont caractérisés, d’une part, par des paramètres physiques comme leur taille, leur forme, leur masse volumique et d’autre part d’un point de vue mécanique par leur rhéologie.

Dans le but de se rapprocher de la réalité physique, on propose, lors de la modélisation numérique, de considérer des éléments de remplissage de forme représentative de la réalité. Pour générer ces formes, il est possible de joindre des particules sphériques les unes aux autres. Une fois jointes, les particules restent solidaires. On s’intéresse à la génération de formes parallélépipédiques.

Pour la création de ce type d’élément, on génère une assemblée de particules de la forme souhaitée à laquelle on fait subir deux rotations et dont on découpe les arêtes pour réduire son angularité (cf. figure 7). Les dimensions des éléments sont tirées de manière aléatoire mais de façon à respecter la granulométrie imposée par la norme sur les matériaux de remplissage utilisés pour les gabions. Les éléments sont placés au sein de la cellule initialement sous forme de colonnes (cf. figure 7). L’application de la gravité provoque l’effondrement des colonnes entraînant le remplissage de la cellule. Les deux rotations des éléments permettent d’éviter que des colonnes ”trop stable” se forment lors du remplissage.

D’un point de vue mécanique, les paramètres de la MED sont issus des modèles de contact (cf. §2.2) qui gèrent les interactions à l’échelle du grain. Ce sont les micro-paramètres¹. Ils représentent les seuls paramètres auxquels le scientifique ait accès pour la caractérisation mécanique du système étudié. La question du rôle des micro-paramètres sur le comportement macroscopique reste très ouverte et représente un vaste champ d’investigations [5, 10, 17].

¹Micro désignant l’échelle du grain.

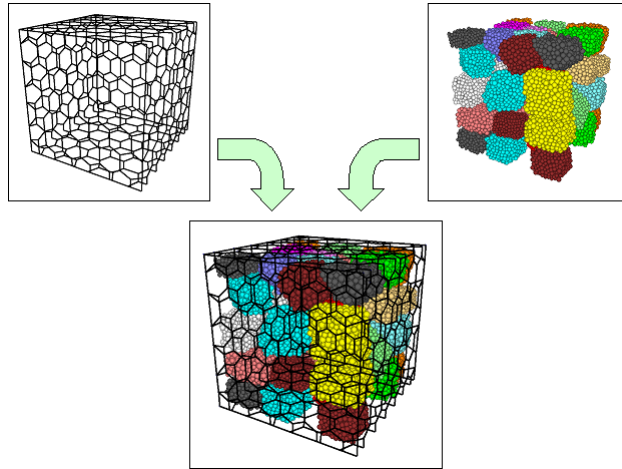


FIG. 8 – Modélisation d’une cellule : assemblage du grillage et du matériau de remplissage.

Les relations existantes entre micro-paramètres du modèle et les propriétés macroscopiques du matériau sont connues uniquement *a priori* pour certains types d’arrangements simples de particules. Il existe des formules analytiques uniquement dans le cas d’assemblées hexagonales non cohésives [5, 7, 17]. En règles générales, la relation micro-macro est obtenue par un *protocole de calibrage* particulier qui consiste à simuler des d’essais mécaniques sur le matériau. Les micro-paramètres du modèle sont alors choisis pour reproduire les propriétés macroscopiques du matériau. Cet aspect de la calibration des simulation numériques est abordé au paragraphe 5.

5 Modélisation de la cellule

Après le positionnement du matériau de remplissage au sein de la cellule, on procède au placement du grillage autour des éléments. A ce stade de la modélisation, la cellule est prête à subir une sollicitation. Dans un premier temps, la caractérisation mécanique dans des conditions quasi-statiques est réalisé. Des essais de compression confinés sont effectués pour le calibrage des microparamètres de raideur (k_n et k_s). A l’instar des études sur les milieux granulaires qui utilisent des procédures de calibrage pour l’obtention des microparamètres (on citera pour l’exemple [11, 20, 17, 19, 31]), on se propose d’effectuer la simulation numérique d’une compression confinée sur une cellule. On s’intéresse au calage des raideurs de contact inter-particules. Ensuite, un essai de compression en conditions non confinée est réalisé. Les résultats numériques sont comparés aux valeurs expérimentales obtenues dans des conditions similaires de sollicitation. Enfin, la réponse mécanique de la cellule face à une sollicitation dynamique de type impact est explorée.

5.1 Essai de compression en condition quasi-statique

Pour respecter des conditions de sollicitation statique, on cherche à ce que le système sollicité soit à chaque instant dans un état d’équilibre mécanique. L’énergie cinétique de l’assemblée d’agrégat doit être faible pour limiter au maximum les effets inertiels dû aux mouvements des particules [16, 6, 10]. Lors de la simulation numérique, les conditions limites en déplacement peuvent être reproduites aisément (plateaux rigides indéformables). A contrario, les vitesses de déformation rencontrées du-

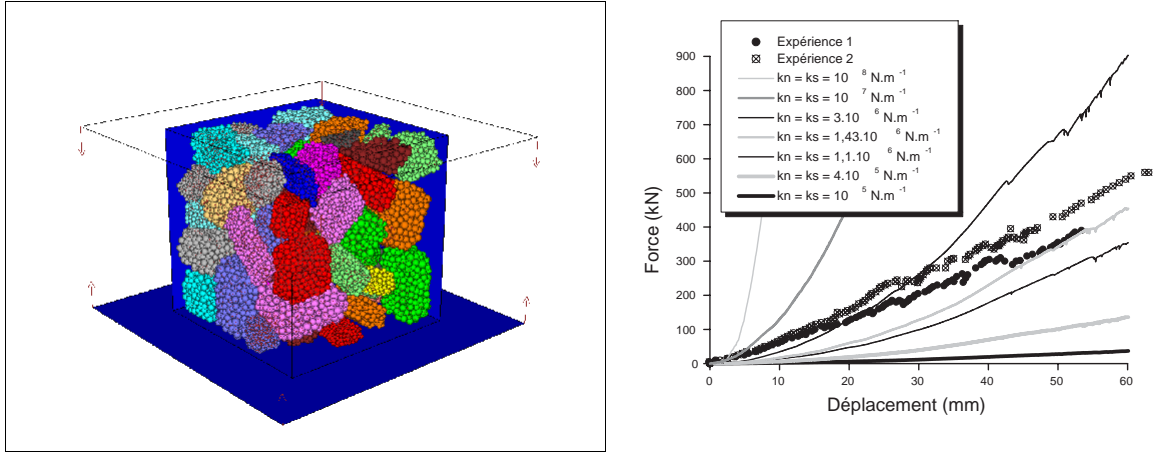


FIG. 9 – A gauche : Visualisation d’une compression confinée réalisée sur une cellule cubique de 50cm de côté. A droite : Etude paramétrique de l’influence des raideurs de contact sur le comportement macroscopique de la cellule et comparaison à des données expérimentales.

rant une expérience seront trop faibles pour permettre une simulation dont le temps de calcul CPU serait raisonnable. Pratiquement, il est nécessaire de réaliser des simulations numériques avec des vitesses de déformation beaucoup plus importantes (10000 à 100000 fois supérieures dans le cas de [10]). Pour réduire les effets inertiels se produisant au sein de l’assemblée de particules, on se rapproche des conditions quasi statiques en faisant intervenir le coefficient d’amortissement non visqueux (cf. §2.2). Ce dernier permet de contrecarrer les accélérations trop grandes des particules. Ce coefficient n’est en général jamais relié à une propriété physique connue. On le considéra comme un artifice de calcul.

Les essais quasi-statiques sont pilotés en déformation en imposant une vitesse de compression constante. On mesure la réponse en force de la cellule en moyennant la somme des forces de contact, dues aux agrégats, s’appliquant sur les plateaux entourant la cellule.

5.1.1 Essai de compression confiné

On propose d’estimer les raideurs de contact des microparamètres par l’intermédiaire d’une compression confinée sur une cellule. Pour ceci, on génère six parois définissant les conditions aux limites de la cellule (cf. figure 9). La cellule est une cellule cubique de 50cm de coté remplie avec des éléments parallélépipédiques. Sa porosité est de 51%. D’un point de vue qualitatif, on observe sur les courbes de résultats (cf. figure 9) que les concavités des courbes numériques et expérimentales ne sont pas similaires. La réponse mécanique expérimentale tend à développer une évolution linéaire (entre la force et le déplacement associé) alors que la simulation numérique décrit une évolution plutôt parabolique. Cette divergence est probablement due à la forte fracturation des roches constatée expérimentalement. En effet, pour de faibles taux de déformation, les roches se fracturent. Or, pour l’heure la fracturation des granulats de roches n’est pas prise en compte numériquement. La fragmentation des roches conduit à la diminution de la résistance de la cellule au cours de la sollicitation mécanique.

Pour le calage des microparamètres, les courbes numériques les plus pertinentes sont celles qui reproduisent les données expérimentales pour de faible taux de déformation (i.e. avant le développement de fracturation) et donc qui possèdent des valeurs de raideur de contact élevées (i.e. $k_n = k_s = 10^7$ ou 10^8 N.m^{-1}).

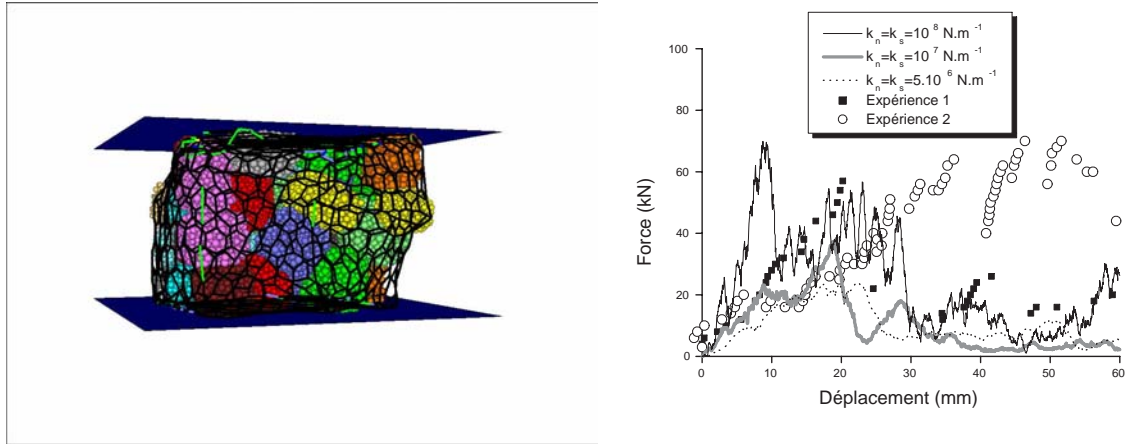


FIG. 10 – A gauche : Visualisation d’une compression non confinée réalisée sur une cellule cubique de 50cm de côté. A droite : Evolution de la réponse mécanique de la cellule et comparaison à des résultats expérimentaux réalisés dans les mêmes conditions.

5.1.2 Essai de compression non confiné

Après avoir estimé l’ordre de grandeur des raideurs de contact, on procède à la compression non confinée d’une cellule cubique de 50cm de côté. Les résultats des simulations sont présentés et comparés à des données expérimentales (cf. figure 10). Il apparaît que les simulations numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux. Les différences observées entre deux essais expérimentaux sont dues, en partie, à l’agencement aléatoire des éléments. En effet, d’un essai à l’autre, le positionnement des pierres, donc la structure interne de la cellule, n’est pas la même. Par conséquent celle-ci développe des comportements comparables mais pas rigoureusement identiques. Une bonne reproductibilité est donc difficile à obtenir d’un essai à l’autre. Cependant, ces données expérimentales permettent d’avoir des ordres de grandeurs de résistance de la cellule pour vérifier la pertinence de la simulation numérique.

5.2 Essai dynamique : impact

Lors de ce type de sollicitation, le comportement de la cellule est principalement dicté par les effets inertiels dus aux réarrangements brusques des éléments de remplissage entre eux. Une caractérisation dynamique de la cellule est réalisée dans le but de montrer les potentialités de la modélisation numérique. On évalue la réponse en force de la cellule sur l’impactant dans deux types de conditions : confinée et non confinée. Comme les essais précédents, la cellule est de forme cubique de 50cm de côté. Celle-ci est impactée par une sphère d’environ 50cm de diamètre ayant une vitesse initiale de 8m.s^{-1} ce qui correspond à une énergie d’environ 5kJ. Sur la figure 11 sont visualisées les deux conditions dans lesquelles la cellule a été sollicitée. Les courbes représentées sur la figure 11 font partie des premiers résultats obtenus concernant le comportement mécanique d’une cellule sous impact. Ils permettent de mettre en lumière la phénoménologie d’une cellule sous sollicitation dynamique.

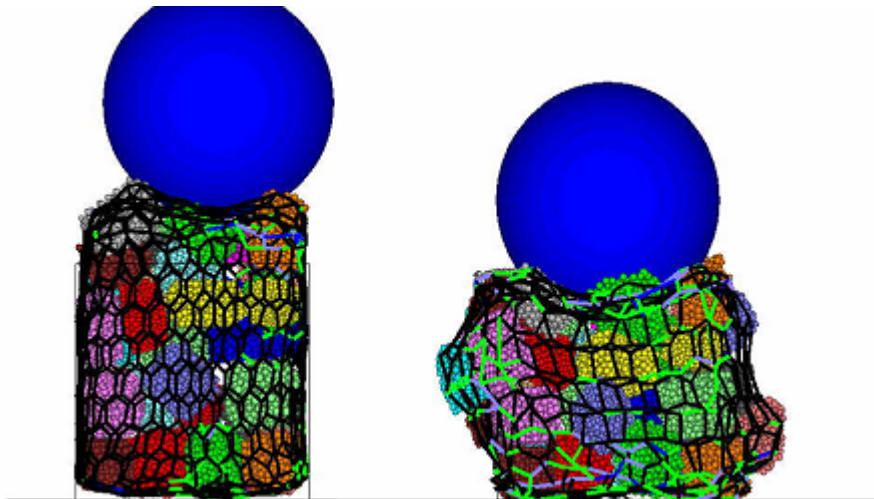
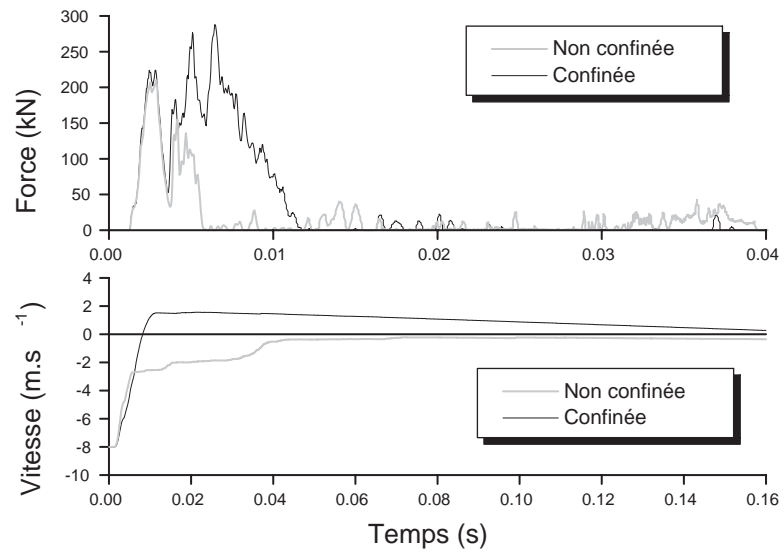


FIG. 11 – En haut : Comparaison des réponses mécaniques entre une cellule confinée et une cellule non confinée. Evolution de la vitesse et de la force agissant sur l'impactant durant l'impact. En bas : Visualisation des cellules au cours de l'impact.

6 Modélisation de l'ouvrage

6.1 Principe

Le passage de l'échelle locale (échelle de la cellule) à l'échelle globale (échelle de la structure) consiste à remplacer la cellule par une particule (cf. figure 12). La structure dans son ensemble (ou la zone de la structure localisée proche de l'impact) est modélisée par une assemblée de particules qui interagissent les unes avec les autres par actions à distance. Le parement amont subissant l'impact, est modélisé par l'intermédiaire d'éléments cubiques dont la fonction est de gérer l'interaction entre le bloc impactant et le corps composé de l'assemblée de particules. L'inclinaison du parement peut être modifiée. Les lois d'interactions à distance sont déduites des lois constitutives des cellules obtenues à l'échelle locale. Les lois constitutives n'étant encore pas formalisées, dans le but de valider l'approche de cette modélisation à l'échelle globale, les forces normales entre cellules sont supposées être de type elasto-plastiques parfaites et les forces tangentielles associées au mouvement relatif de deux cellules adjacentes dues à une friction de type coulombienne.

Des hypothèses cinématiques sont posées concernant les déplacements des particules. On fait l'hypothèse simplificatrice que les déplacements ne se font que suivant la direction x (cf. figure 12) ce qui suppose que les déformations physiques au cours de l'impact se font principalement suivant cette direction.

6.2 Impact sur la structure

Des essais numériques d'impact ont été réalisés. Deux blocs de même diamètre (1m) ont été projetés de manière normale suivant la direction x . L'énergie cinétique initiale des blocs était de 14kJ et de 69kJ. La zone étudiée de la structure était de taille réduite. On suppose dans un premier temps que la zone affectée par l'impact est réduite. Elle possédait les caractéristiques géométriques suivantes : hauteur (z) 2.5m, Largeur (y) 2.5m et profondeur (x) 2m. Elle était composée de cellules de 50cm de côté. Les mouvements des particules placées sur la face aval de la structure étaient interdits.

La réponse mécanique est présentée figure 12. Les différences sont dues au nombre de cellules sollicitées lors de l'impact, le nombre de cellules étant plus important dans le cas d'un impact à forte énergie.

À l'heure actuelle, le code de calcul reste en développement. *In fine*, lorsque les lois constitutives des cellules seront implémentées dans le code, des études paramétriques permettront d'identifier l'effet de paramètres comme la friction entre cellules, leur taille, le nombre dans la profondeur, etc... L'endommagement de la structure après plusieurs impacts pourra également être évalué en terme de déformations résiduelles ainsi que l'effet de l'inclinaison du parement sur la trajectoire du bloc.

7 Conclusion - Perspectives

Dans le cadre de ce projet portant sur la modélisation du comportement de structures cellulaires de protection contre les chutes de blocs, nous avons entrepris une modélisation à partir d'une méthode par éléments discrets en 3D. La structure est composée de cellules (cages grillagées remplies de matériaux de remplissage) juxtaposées et assemblées donnant une possibilité dissipative à la structure. La structure est étudiée à partir d'une approche multi-échelle : l'étude du comportement locale à l'échelle de

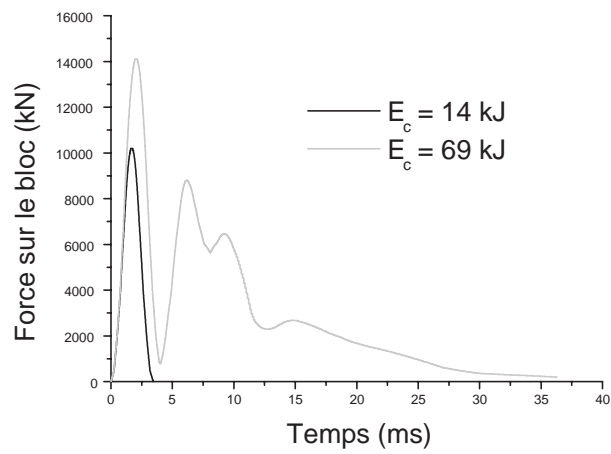
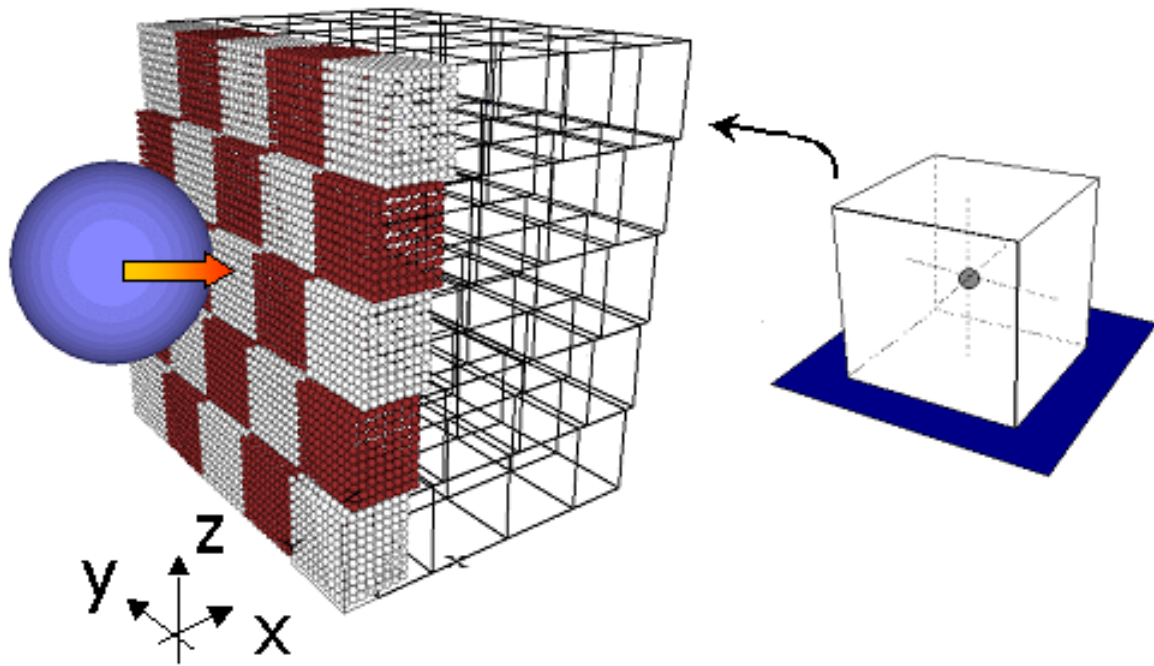


FIG. 12 – Modélisation global de la structure. Principe du passage micro-macro.

la cellule est traitée de manière fine, les résultats sont ensuite transportés à l'échelle de l'ouvrage à partir d'une modélisation du comportement global de la structure.

La modélisation de la cellule nécessite la modélisation de ces deux composants : dans notre cas, l'enveloppe constituée d'un grillage métallique et le matériau de remplissage constitué d'un assemblage de pierres.

La structure géométrique du grillage métallique double torsion de maille hexagonale a été modélisée. Une loi de comportement élasto-plastique avec rupture de l'acier et une loi de comportement des brins double torsion ont été implémentées dans le code de calcul pour une meilleure description de la réalité physique. Une étude de sensibilité aux paramètres tels que la vitesse de sollicitation ou le coefficient d'amortissement a été réalisée pour mettre en évidence les potentialités et les limites de la simulation numérique. La comparaison des simulations numériques à des données expérimentales a été effectuée et donne des résultats prometteurs.

Concernant le matériau de remplissage, un travail sur les formes des éléments a été mené. Les résultats obtenus sur des formes parallélépipédiques utilisées pour décrire géométriquement le matériau sont présentés. Les résultats sont satisfaisants mais d'autres pistes sont étudiées en parallèle afin de mieux contrôler la porosité du remplissage et améliorer les temps de calcul.

Des essais mécaniques de compression sur cellule cubique de 500 mm de côté sous sollicitation quasi-statique et dynamique ont été réalisés avec un matériau de remplissage de type concassé. Deux types d'essais ont été effectués : en conditions confinée et non confinée. La première étude, réalisée dans des conditions quasi-statiques, a permis le calibrage des microparamètres de contact et de comparer les résultats obtenus numériquement aux données expérimentales à disposition. Un premier constat fait état de résultats encourageants. En effet, le calibrage effectué sur des essais de compression confinée a permis de déterminer des raideurs de contact utilisées dans le cas des essais de compression non confinée. Les résultats sont en accord avec les observations expérimentales.

Les premiers résultats obtenus sur des essais numériques d'impact sont présentés. Les observations qualitatives sont intéressantes, mais l'exploitation quantitative des résultats reste à réaliser (forces de réaction, dissipation d'énergie, transferts, ...). La perspective de réalisation d'essais expérimentaux d'impact à l'échelle d'une cellule dans l'année à venir permettra de mieux exploiter l'approche. Des études paramétriques dans des conditions de sollicitation dynamique, pour connaître l'influence de paramètres particuliers de la cellule, sont envisagées pour mieux comprendre le comportement à l'échelle locale.

L'approche retenue pour la modélisation du comportement à l'échelle de l'ouvrage est basée sur la discrétisation de l'ouvrage. On assimile chaque cellule à une particule interagissant avec ses voisines dans une modélisation par éléments discrets. Les calculs se font dans le même environnement (Logiciel PFC^{3D}). Afin de valider cette approche, des premiers calculs ont été menés à partir de lois d'interaction simplifiées (en attendant d'obtenir les lois obtenues à l'échelle locale). Les résultats apparaissent prometteurs : une diffusion est observée, la réponse est liée au niveau d'énergie d'impact. Des études paramétriques permettant de faire varier les types de matériaux de remplissage, le type de liaison entre les cellules, conduiront à mieux appréhender le comportement de ces structures et de montrer leurs potentialités.

La réalisation d'un ouvrage de référence à taille réelle construit sur la plateforme d'essais de Rovon reste un élément essentiel à la validation de l'approche. L'exploitation de ces essais différés dans le temps confirmera la pertinence de l'étude. Les perspectives permettent d'envisager à moyen terme le développement d'un outil d'aide à la décision pour la conception de telles structures cellulaires dissipatives.

Références

- [1] ANTOINE P., FABRE D., Géologie appliquée au génie civil, Edition MASSON, 1980
- [2] BERTRAND D., GOTTELAND P., LAMBERT S., NICOT F., DERACHE F. 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, 2004
- [3] BERTRAND D., NICOT F., GOTTELAND P. 2004. D.E.M. modelling of soil geocomposite material for rockfall impact. Proc. Of the second International PFC Symposium : Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods Kyoto (Japan), in press.
- [4] BILLAUX D., CUNDALL P., Simulation des géomatériaux par la méthode des éléments Lagrangiens, Rev. Franc. Géotech. n°63 pp 9-21, 1993
- [5] CHAREYRE B., Application de la méthode des éléments distincts à des problèmes géotechniques - caractérisation des paramètres, Mémoire de DEA MMGE, 2000
- [6] CHAREYRE B., Modélisation du comportement d'ouvrages composites sol-geosynthétique par éléments discrets - Application aux ancrages en tranchées en tête de talus, thèse de doctorat, UJF - Université Grenoble I Joseph Fourier, Grenoble, 2003
- [7] CAMBOU B., JEAN M., Micromécanique des milieux granulaires, HERMES Science Europe Ltd, 2000
- [8] CAROTTI A., PEILA D., CASTIGLIA C., RIMOLDI P., Mathematical modeling of geogrid reinforced embankments subject to high energy rock impact, Eurogeo, 2 European geosynthetics conference and exhibition, Parton bologna : 305-310, 2000
- [9] CHAU K.T., WONG R.H.C., WU J.J., Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 (2002) 69-77, 2002
- [10] COMBE G., Mécanique des matériaux granulaires et origines macroscopiques de la déformation, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Sciences pour le génie civil SI 8, 2002
- [11] CAMBORDE F., MARIOTTI C., DONZE F.V., Numerical study of rock and concrete behaviour by discrete element modelling, Computers and Geotechnics 27 225 - 247, 2000
- [12] CUNDALL P.A., STARCK O.D.L., A discrete numerical modelling method for granular assemblies, In Géotechnique, 29, 47-65, 1979
- [13] CUNDALL P., HART R., Numerical modelling of discontinua, Pineridge press Ltd, 1992
- [14] DONZE F. V., MAGNIER S.A., MONTANI S., DESCOEUDRES F., Numerical study of rock block impacts on soil-covered sheds by a discrete element method, 5 conférence nationale en génie civil parasismique, 1999
- [15] HABIB P., GENIE GEOTECHNIQUE Applications de la mécanique des sols et des roches, Ellipses Aupelf/Uref, 1997
- [16] HENTZ S., Modélisation d'une Structure en Béton Armé Soumise à un Choc par la Méthode des Eléments Discrets, thèse de doctorat, UJF - Université Grenoble I Joseph Fourier, Grenoble, 2003
- [17] ITASCA CONSULTING GROUP, PFC^{2D} - FISH in PFC, 1999
- [18] ITASCA CONSULTING GROUP, PFC^{2D} - Theory and Background, 1999
- [19] ITASCA CONSULTING GROUP, PFC^{2D} - User's Guide, 1999
- [20] IVERSON S.R., Investigation of bulk solids engineering properties and application of PFC^{2D} to ore pass flow problems, Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods - Konietzky (ed.), 2003
- [21] LABIOUSE V., DESCOEUDRES F., MONTANI S., Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks, vol 6 p 171-176, 1996
- [22] LAMBERT S., GOTTELAND P., PLE O., BERTRAND D., NICOT F. Modélisation du comportement mécanique de cellules de matériaux confinés in Journée Nationale de Géotechnique et de Géologie. Lille (France), 2004

- [23] MAHBOUBI A., GHAOUTI A., CAMBOU B., La simulation numérique discrète du comportement des matériaux granulaires, revue française de géotechnique N° 76, 1996
- [24] MAGNIER S.A., DONZE F.V., Numerical simulations of impacts using a discrete element method, *Mech. ches-friict. Mater*, 3, pp 257-276, 1996
- [25] MUSTOE G.G.W., HUTTELMAIER H.P., Dynamic simulation of a rockfall fence by the discrete element method, *Microcomputers in civil engineering*, Elsevier Science Publishers Ltd, 1993
- [26] PEILA D., CASTIGLIA C., OGGERI C., GUSATI C., RECALCATI P., Full scale tests on geogrid reinforced embankments for rockfall protection, *Eurogeo*, 2 European geosynthetics conference and exhibition, Parton bologna : 317-322, 2000
- [27] PEILA D., OGGERI C., CASTIGLIA C., RECALCATI P., RIMOLDI P., Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impact, *Geosynthetics - 7th ICG - Delmas, Gourc & Girard (eds)*, 2002
- [28] SCHREFLER B., DELAGE P., Géomécanique environnementale risques naturels et patrimoine, HERMES Science Europe Ltd, 2001
- [29] TANAKA K., NISHIDA M., KUNIMUCHI T., TAKAGI T., Discrete element simulation and experiment for dynamic response of two-dimensional granular matter to the impact of a spherical projectile, *Powder Technologic (Elsevier Science Publishers)*, 2001
- [30] TISSIERES P., Ditches and reinforced ditches against falling rocks, *Japan-Swiss seminar on impact load by rock falls and design of protection structures*, Kanazawa (Japan), oct. 1999
- [31] YOSHIKAZU S., HARUJI T., YOSHIYUKI K., NORIHIDE K., HIROSHI M., Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method, *Nuclear Engineering and Design* 179 157-177, 1998