

MODÉLISATION DISCRÈTE D'UNE STRUCTURE EN SOL RENFORCÉ PAR GÉOCELLULAIRE ET SOUMISE À UN IMPACT

Maxime SOUDÉ, Roland GOURVES, Michel GREDIAC, Younes HADDANI, Aurélie TALON

Sol Solution Géotechnique Réseaux – 63204 Riom Cedex
LaMI – 63175 Aubière ; Université Blaise Pascal – 63006 Clermont Ferrand
Clermont Universités – LaMI – Polytech' Clermont-Ferrand – 63174 Aubière

1. INTRODUCTION

Les ouvrages en sol renforcé sont formés d'un massif de sol dans lequel sont disposés des éléments de renfort et se caractérisent par leur grande souplesse. Parmi ces éléments de renforts, on trouve le géocellulaire, qui est une structure en géotextile tridimensionnelle mise au point par J.F. Vignon en 1978 afin de lutter contre les érosions. La société Sol Solution innove et développe ce procédé de structure alvéolaire sous le nom de M3S®, depuis plusieurs années.

Depuis 1996, en partenariat avec le laboratoire LERMES de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, des travaux de recherches, notamment ceux de Reiffsteck [REI 96] et ceux de Racana [RAC 02] ont été conduits afin d'affiner les connaissances du comportement mécanique d'un ouvrage en sol renforcé par géotextile M3S®, de faire évoluer le procédé et de mettre en place les notes de calcul utilisées par Sol Solution pour le dimensionnement.

A ce jour, près de 100 ouvrages ont été construits avec le procédé M3S® pour des applications diverses (raidissement de talus, murs de soutènement, élargissement de route, lutte contre l'érosion...) et parfois dans le cadre de projets aux exigences spécifiques (confinement de cuve, utilisation d'argile expansée en remplissage des alvéoles, ouvrage de 16 m de hauteur, paroi de centre de stockage de déchets...).

L'ensemble des travaux qui ont été menés ont ainsi permis de valider la réponse mécanique de tels ouvrages **sous sollicitations statiques** et ont dégagé une perspective intéressante. En effet, les ouvrages en sol renforcé de type M3S® s'inscrivent dans la catégorie des ouvrages « souples » et sont caractérisés par des déformations importantes avant rupture ainsi qu'un comportement élastique en grandes déformations. Ces ouvrages ont donc une capacité importante à absorber de l'énergie sous sollicitations.

De ce fait depuis 2007, Sol Solution a entrepris de lancer une étude de la réponse mécanique des murs M3S® sous sollicitation dynamique, et ce, afin d'en élargir les applications aux zones concernées par 3 types de sollicitation que sont le séisme, le choc et l'explosion.

Dans cet article, on présentera une synthèse des travaux de Soudé [SOU 08] concernant l'état de l'art sur les sollicitations dynamiques précédemment citées appliquées à des structures de soutènement en sol renforcé lorsque cela est possible. On expliquera ensuite les raisons ayant conduit au choix d'une modélisation numérique d'un impact sur une structure alvéolaire par la méthode des éléments discrets via le logiciel PFC2D d'Itasca [ITA 99]. Les hypothèses ainsi que la stratégie retenue lors de l'élaboration des différents modèles seront alors précisées. Enfin, on étudiera l'influence de la résistance ultime des liaisons intercellulaires sur la réponse mécanique du système.

2. IDENTIFICATION DES SOLLICITATIONS

Les travaux de Joulain [JOU 07] puis ceux de Soudé [SOU 08] ont permis d'établir l'état de l'art consacré à chacune des sollicitations dynamiques précédemment citées. La démarche suivie et les objectifs fixés pour mener cette étude ont été les mêmes pour chacune de ces sollicitations. D'une part, il s'agissait d'étudier les différentes approches permettant de modéliser le phénomène, à savoir une approche empirique, théorique, numérique et normative. D'autre part, la réponse dynamique d'ouvrages en sol renforcé soumis à un séisme, une explosion ou un choc a été étudiée.

2.1 Remarques concernant les différentes sollicitations

La sollicitation sismique est la mieux maîtrisée des trois, comme en témoigne l'ampleur de la littérature internationale [JOU 07], [SOU 08]. Elle a fait l'objet d'études analytiques poussées qui, lorsqu'elles se sont heurtées à la complexité du calcul mathématique, ont laissé place à la modélisation numérique. Aujourd'hui, la plupart des méthodes informatiques (essentiellement de type MEF) semblent donner des résultats suffisamment proches de la réalité et elles continuent de s'affiner par le biais des travaux de recherche en cours, notamment concernant l'étude plus poussée des modèles d'interaction sol-structure. D'un point de vue normatif, les règlements actuels [EC8-5] intègrent le paramètre sismique dans le dimensionnement d'ouvrages en sol renforcé, par la méthode de Mononobe-Okabe, domaine auquel le procédé M3S[®] appartient.

Concernant les sollicitations de type explosion, les travaux de recherche expérimentaux ont souvent nécessité des besoins financiers ou matériels importants, le plus souvent d'origine privée ou militaire (USAF) [OLE et al. 93], [REI 95]. En conséquence, les résultats de telles études ont rarement été rendus publics avant une certaine durée, ce qui ne permet pas de conclure aujourd'hui réellement quant à l'état des connaissances sur ce sujet. Dans le cadre militaire, il ressort de cette étude le recours à une formulation empirique dite de Drake-Little, permettant de relier les forces de pression maximales appliquées en tout point d'une structure et la distance séparant le point d'étude de la charge explosive. Des essais grandeur nature ainsi que sur des modèles réduits en centrifugeuse ont permis de valider, avec une bonne corrélation, les résultats analytiques et numériques. L'approche numérique d'un tel phénomène est aujourd'hui le sujet de nombreux travaux dont la plupart se penchent sur les problèmes de liquéfaction.

Enfin, les sollicitations de type choc trouvent plus d'applications dans le domaine civil, notamment pour les problèmes de structures de protection contre les éboulements rocheux, voire pour des structures de protection contre les impacts de véhicules ou les impacts balistiques. A l'heure actuelle, le problème des éboulements rocheux est le plus étudié. Ainsi, parmi les 3 grands types de structures utili-

sées pour parer à ce problème, les ouvrages de type merlons présentent le plus de similitudes avec notre cas d'étude de massif en sol renforcé par géotextile. Cette sollicitation dynamique type choc a ainsi fait l'objet d'une étude poussée, notamment sur d'éventuelles modélisations analytiques et numériques, où la méthode des éléments distincts s'est avérée très bien adaptée à l'étude de la réponse d'un matériau granulaire. Des essais grandeur nature effectués dans la région alpine, notamment dans le cadre du projet ANR REMPARE [GOT 06], ont pu ainsi confirmer avec plus ou moins de précision, les résultats obtenus de manière analytique ou numérique.

2.2 Restriction de l'étude à la sollicitation choc

Le choix a donc été fait d'étudier la sollicitation choc et d'écarter la sollicitation sismique compte tenu de l'aspect normatif déjà très développé à ce sujet. Il en va de même pour les explosions dont l'approche expérimentale s'avère trop fastidieuse et onéreuse à mettre en œuvre.

3. STRATÉGIES DE MODÉLISATION

L'approche numérique est couramment utilisée dans la résolution de problèmes analytiques complexes. Dans le cadre de l'étude de chocs, envisager une approche numérique repose sur un choix entre la méthode aux éléments finis (MEF) et la méthode aux éléments distincts (MED).

3.1 Choix de la méthode aux éléments discrets

En premier lieu, la MEF s'adapte tout particulièrement aux milieux continus. Cependant, elle présente des limites importantes dans notre cas de figure. Un impact est en effet considéré comme une sollicitation extrême au vu des efforts transmis en un temps de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes. Le maillage continu d'un modèle MEF peut alors ne pas être adapté à de si grandes déformations et rend de plus le traitement de la fissuration et de la fragmentation difficile. Certains auteurs, [DRA et al. 00], [MOU et al. 09], ont alors suggéré des procédures de remaillage au cours de la sollicitation mais ces méthodes sont souvent délicates et sophistiquées. Par ailleurs, Saussine [SAU 04] s'est interrogé sur la validité d'un modèle macroscopique équivalent d'un milieu constitués de particules de taille supérieure ou égale à celle de l'élément fini du maillage (par exemple le ballast des voies de chemins de fer).

La MED s'est révélé être une solution d'étude numérique très intéressante pour les matériaux granulaires, notamment de par le fait que son fonctionnement repose sur la simple implémentation d'une loi de contact entre les grains constitutifs du milieu. Bien que la taille de ce dernier soit plus limitée que pour un modèle de type MEF, il est possible d'approcher un comportement global de l'ouvrage en

n'étudiant qu'une partie de celui-ci, comme par exemple un seul lit de sol renforcé par géocellulaire. Selon la structure de l'ouvrage renforcé, la méthode d'homogénéisation peut s'appliquer à l'étude dynamique d'une sollicitation de type choc [BER 06]. Nous avons donc choisi le logiciel PFC2D d'Itasca [ITA 99].

3.2 Convergence de la solution et temps de calcul

Le niveau de précision d'une simulation numérique doit avant tout être adapté au niveau d'exigence requis dans les résultats attendus. L'objectif principal des simulations effectuées lors du travail de recherche actuel est d'aborder de manière globale les mécanismes et phénomènes physiques prenant part lors d'un impact sur un milieu composite {sol-géotextile}. Les modèles numériques alors retenus n'ont pas été développés dans le but d'une approche prévisionniste mais d'une approche qualitative et réaliste en termes d'ordres de grandeur. Afin de multiplier les observations, il était aussi indispensable de consacrer à l'élaboration des modèles, ainsi qu'à leur résolution, un temps optimal. En conséquence, de nombreuses hypothèses et approximations ont été faites pour trouver un équilibre entre précisions des modèles numériques et vitesse d'exécution et de résolution.

Lorsqu'une sollicitation est appliquée à un milieu, la configuration de celui-ci est évaluée au cours du temps de manière itérative. Par itérations de cycles de calcul reliant le déplacement des particules aux efforts qu'elles transmettent, le logiciel converge vers un état final. La vitesse de cette convergence dépend uniquement des capacités du milieu à amortir les efforts et les déplacements des particules le constituant. Si les modèles de contact établis entre les particules ne présentent aucune forme de dissipation (absence de frottement, d'amortissement visqueux...), le comportement du milieu est alors purement élastique et une simple sollicitation engendre une oscillation globale du système sans jamais converger vers un état d'équilibre.

Parmi différents amortissements par dissipation [FAL 97], nous avons fait le choix de ne considérer que le frottement interparticulaire comme source de dissipation d'énergie. Aucun amortissement numérique ou visqueux n'a donc été considéré dans nos modèles.

L'absence de prise en compte de dissipations non-frictionnelles s'explique par le souhait de tester différentes configurations de matériaux en un temps **raisonnable**. Considérer d'autres sources de dissipations requiert en effet un calage expérimental systématique pour chaque nouvelle configuration testée tout en utilisant les modèles rhéologiques simples proposés par le logiciel (amortisseurs visqueux disposés en série ou en parallèle de ressorts pour modéliser les contacts intergranulaires).

Les modèles se sont ainsi appuyés sur des paramètres micromécaniques dont les ordres de grandeurs étaient issus de diverses références bibliographiques [CHA 03], [DEL 04], [ITA 99] et [BOU 08]. On souligne cependant qu'à ce jour peu de travaux aux éléments discrets ont été observés dans le domaine de la dynamique rapide. En conséquence, les ordres de grandeur des paramètres micromécaniques utilisés sont issus de simulations dans le domaine statique ou quasi-statique.

Le choix d'une approche numérique a soulevé la perspective de simulations spatiales via PFC3D. Cependant, l'ajout d'une 3^e dimension spatiale conduisait à un temps d'exécution et de résolution beaucoup plus long dû au plus grand nombre de particules générées. Cette contrainte temporelle a été le principal argument nous ayant fait préférer le choix d'étudier des problèmes plans via PFC2D.

4. MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle (*figure 1 gauche*) se compose d'une nappe de géotextile constituée de plusieurs cellules et confinant chacune un même matériau granulaire. La nappe est ensuite impactée dans son plan par une sphère de diamètre égal à celui d'une cellule (55cm) et à une vitesse de 10m/s.

L'objectif de la simulation est d'évaluer l'influence de la

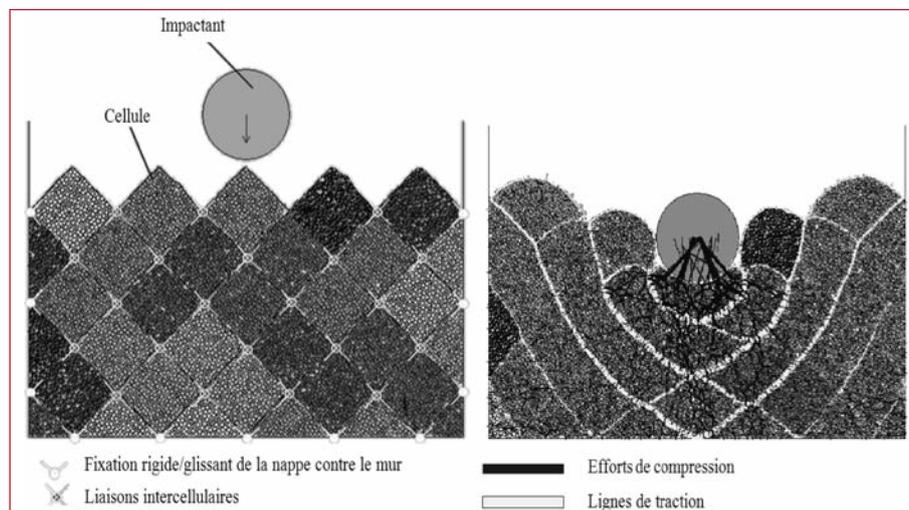


Figure 1. Modèle de nappe géocellulaire soumise à un impact (gauche). Mise en évidence des lignes de traction concentriques au point d'impact (droite)

résistance ultime des liaisons intercellulaires sur le comportement global de la structure. Sur la base de l'expérience de l'entreprise, une première valeur de 8 kN/m a été considérée comme correspondant à un ordre de grandeur réaliste. Ensuite, la valeur de 25 kN/m a été utilisée car étant la même que celle d'une bande de géotextile.

4.1 Paramètres mesurés

Les grandeurs mesurées en fonction du temps sont l'énergie cinétique résultant de la somme du mouvement translationnel et rotationnel de chaque particule, l'énergie potentielle élastique de déformation résultant de l'interpénétration des particules entre elles et de l'effort de traction du géotextile, l'énergie dissipée par frottements et la vitesse déduite de l'énergie cinétique de l'impactant.

4.2 Modélisation du matériau sol

Le matériau sol est constitué d'un ensemble de particules sphériques générées par la méthode d'expansion de rayon [ITA 99] et la taille de chacune d'entre elles est comprise entre 8 et 32 mm. Ces paramètres décrivent un sol de type gravier. Aucune fine (diamètre inférieur à 8 mm) n'a été considérée pour éviter la génération d'un trop grand nombre de particules et permettre un temps de simulation acceptable de seulement quelques jours.

Le sol est caractérisé par un modèle de contact élastique frottant. Il est composé d'un ressort dans les directions normale et tangentielle de contact dont les valeurs sont des ordres de grandeur rencontrés dans la littérature, soit respectivement $k_n = 10^8 \text{N/m}$ et $k_s = 0,5 \cdot 10^8 \text{N/m}$. Un paramètre de frottement interparticulaire μ_{SOL} relie l'effort tangentiel maximal $F_{s,\text{max}}$ admis pour un effort normal donné F_n selon la loi :

$$|F_{s,\text{max}}| \leq \mu_{\text{SOL}} \cdot F_n \quad [1]$$

A partir des ordres de grandeur observés dans la littérature, nous avons posé $\mu = 0,7$ ce qui correspond en première approximation, avec $\mu = \tan(\phi)$, à un matériau d'angle de frottement macroscopique ϕ d'environ 30° .

Des simulations d'essais biaxiaux ont ensuite été effectuées selon la méthode décrite par Itasca [ITA 99]. Avant d'appliquer la sollicitation axiale σ_y , une consolidation isotrope à différentes valeurs σ_x est appliquée. A partir de l'ensemble des graphes des différents déviateurs ($\sigma_y - \sigma_x$) ainsi que des déformations volumiques ε_v en fonction de la déformation axiale ε_y on peut alors déterminer les modules d'Young E, le coefficient de Poisson ν ainsi que l'angle de frottement macroscopique ϕ des différents sols testés. Les relations alors utilisées sont :

$$E = (1 - \nu^2) \frac{\Delta \sigma_y}{\Delta \varepsilon_y} \quad \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_y} = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \quad \sin \phi = \frac{(\sigma_y - \sigma_x)^{\text{max}}}{(\sigma_y + \sigma_x)^{\text{max}}} \quad [2]$$

Les valeurs obtenues sont $E = 38 \text{ MPa}$, $\nu = 0,214$ et $\phi = 28,9^\circ$.

4.3 Modélisation du géotextile

Le matériau géotextile est constitué d'une chaîne de particules sphériques dont le diamètre est $d_{\text{GEO}} = 7,8 \text{ mm}$, soit légèrement inférieur à la plus petite particule de sol. Ce choix s'explique par le fait que compte-tenu du modèle de contact utilisé pour le géotextile, lorsque celui-ci est mis en traction, les particules les constituant s'écartent les unes des autres permettant aux particules de sol les plus petites de passer par ces ouvertures.

Le géotextile est caractérisé par un modèle de contact élastique frottant et cohésif. Il est composé d'un ressort dans les directions normale k_n et tangentielle k_s de contact. Des paramètres de cohésion interparticulaire c_n et c_s sont définis afin de générer une résistance ultime en traction de la chaîne de particules de 25 kN/m. A partir des essais de traction effectués en laboratoire sur des bandes de géotextile M3S (figure 2), les paramètres de raideurs interparticulaires ont été fixés à $k_n = k_s = 2 \cdot 10^7 \text{N/m}$ afin d'observer 30% de déformation pour un effort de 25kN/m.

Le paramètre de frottement interparticulaire μ_{GEO} a été fixé à 0,7 afin de reproduire le même frottement interparticulaire que le sol. En posant $\mu_{\text{int}} = \min(\mu_{\text{SOL}}, \mu_{\text{GEO}})$, l'effort tangentiel maximal $F_{s,\text{int,max}}$ admis à l'interface pour un effort normal donné $F_{n,\text{int}}$ est défini par la loi :

$$|F_{s,\text{int,max}}| \leq \mu_{\text{int}} \cdot F_{n,\text{int}} \quad [3]$$

Des simulations numériques d'essais de cisaillement pour différentes contraintes verticales σ_N appliquées sur l'échantillon ont permis d'évaluer un frottement à l'interface $\phi_{\text{int}} = 23^\circ$, soit, inférieur au frottement macroscopique du sol. Le modèle de contact des liaisons intercellulaires est le même que celui présenté précédemment à l'exception de la valeur des cohésions interparticulaires fixée à 8kN (ordre de grandeur d'une liaison thermoliée) ou 25kN (résistance du géotextile).

Des essais de traction réalisés en laboratoire ultérieurement (figure 2) ont montré une résistance ultime en traction de 12 kN/m. Bien que la valeur de 8kN/m retenue pour les modèles soit inférieure à la valeur expérimentale, l'ordre de grandeur s'avérait néanmoins réaliste.

4.4 Modélisation de l'impactant

L'impactant est une sphère de 55 cm de diamètre et nous avons choisi les mêmes caractéristiques micromécaniques que celles du sol. Soit, une masse volumique de $2,0 \text{ t/m}^3$, ses raideurs interparticulaires normale et tangentielle ont respectivement été fixées à $k_n = 10^8 \text{N/m}$ et $k_s = 0,5 \cdot 10^8 \text{N/m}$ et le frottement interparticulaire a été fixé à $\mu = 0,7$.

5. INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE ULTIME EN TRACTION DES LIAISONS INTERCELLULAIRES

Lorsque la résistance ultime des liaisons intercellulaires est de 25 kN/m, on observe une élongation sans rupture du géotextile le long de lignes de traction concentriques au

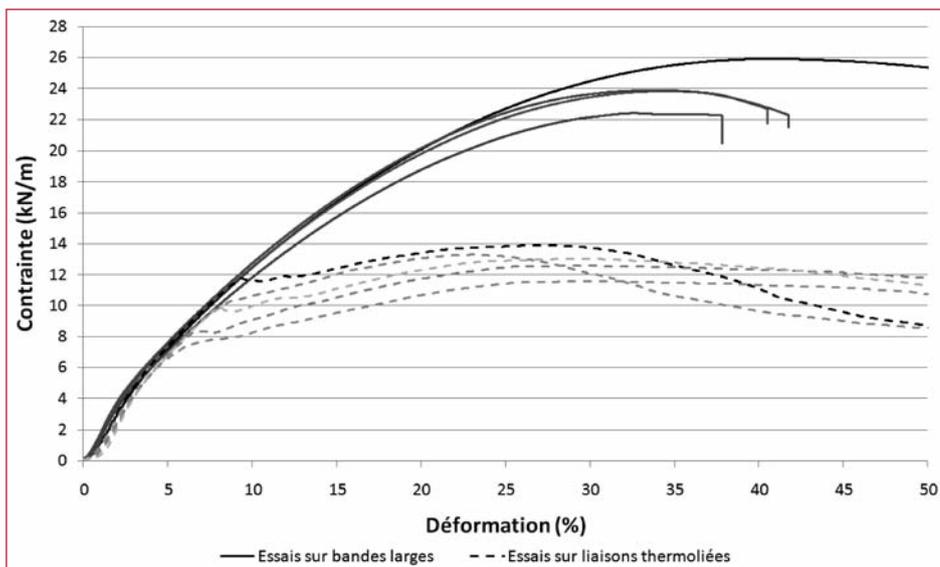


Figure 2. Essais de traction sur bandes larges et sur liaisons thermoliées pour un géotextile de 1,9 mm d'épaisseur.

point d'impact et qui interceptent les liaisons intercellulaires (figure 1 droite). Ces dernières jouent donc un rôle mécanique notable sous ce type de sollicitation dynamique.

Lorsque la valeur est fixée à 8kN/m, on observe des ruptures au niveau des liaisons intercellulaires plafonnant ainsi l'énergie potentielle de déformation élastique de la nappe (figure 3). De plus, à chacune d'entre elle est associé un changement de pente dans l'évolution de l'énergie cinétique, de celle dissipée par frottements (figure 3) et de la vitesse de l'impactant en fonction du temps (figure 4). La décélération de l'impactant est plus faible durant le phénomène d'impact. La vitesse finale après impact est d'ailleurs plus faible. Ceci s'explique par le rôle « fusible » des liaisons qui entraînent deux phénomènes. D'une part on observe une rétractation de la bande de

géotextile au sein du milieu granulaire induisant une dissipation de son énergie potentielle élastique de déformation par frottement avec le sol. D'autre part, ces ruptures permettent à l'impactant de s'enfoncer plus loin dans la structure et donc de dissiper davantage d'énergie cinétique par frottement.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette présente étude a permis d'exposer la démarche suivie quant à la volonté de Sol-Solution d'étudier le comportement dynamique de son procédé de renforcement de sol par géocellulaire M3S. Il a été décidé de concentrer notre étude sur le choc et ce au moyen de simulations numériques par la méthode des éléments discrets.

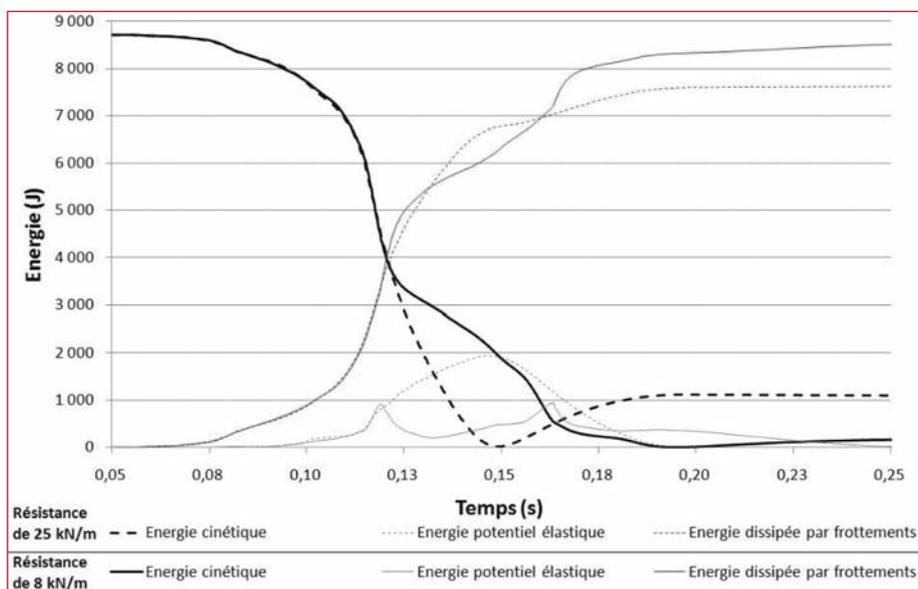


Figure 3. Bilan énergétique en fonction du temps et pour deux résistances de liaisons intercellulaires, 8kN/m et 25 kN/m.

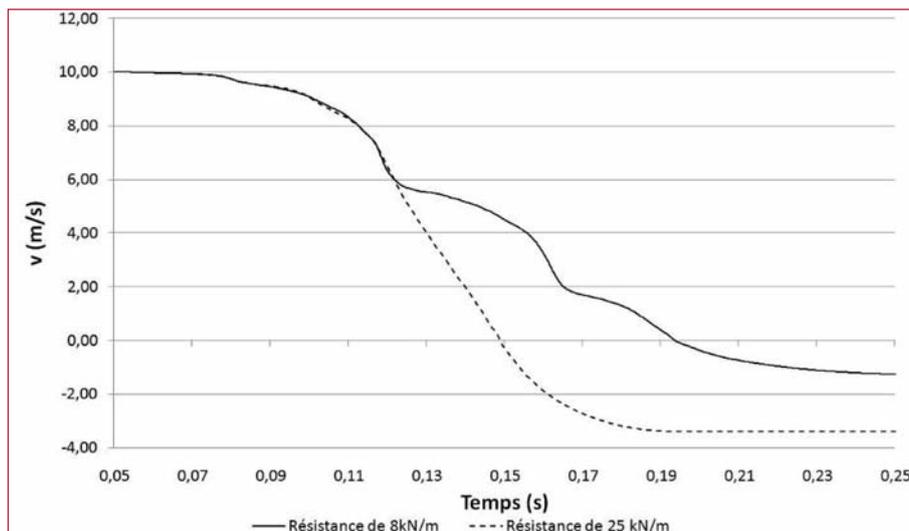


Figure 4. Vitesse de l'impactant en fonction du temps et pour deux résistances de liaisons intercellulaires, 8kN/m et 25 kN/m.

Les raisons de préférer cette méthode à celle des éléments finis ont été exposées, de même que les stratégies employées et les hypothèses retenues pour élaborer nos modèles. Des simulations d'essais biaxiaux ont été réalisées sur le matériau sol afin de caractériser macroscopiquement les paramètres retenus à l'échelle micromécanique. Le géotextile ainsi que les liaisons intercellulaires sont caractérisés par un modèle de contact cohésif dont les paramètres mécaniques sont issus d'essais de traction par la méthode des bandes larges réalisées en laboratoire.

Par la suite, une simulation d'impact sur une nappe de géotextile a été réalisée. L'analyse du phénomène au travers du bilan énergétique appliqué à la structure a ainsi permis d'évaluer l'influence de la résistance des liaisons intercellulaires sur le phénomène d'impact. Il ressort que ces dernières ont un rôle non négligeable lors d'un choc puisque leur capacité à se rompre influe sur la capacité du système à dissiper de l'énergie, de même qu'elle permet à l'impactant de subir une décélération plus modérée.

Enfin, un tel modèle numérique rend bien entendu possible l'étude de l'influence de nombreux autres paramètres mécaniques. La rigidité du matériau sol ou celle du géo-

textile, le mélange de plusieurs sols aux propriétés mécaniques différentes ou la capacité de fracturation du sol sont autant de paramètres pouvant avoir une influence sur la réponse globale de l'ouvrage ou sur la cinétique de l'impactant.

Une série d'expérimentations sur des modèles réduits a été réalisée en juin 2010 (figure 5) et consistait en l'étude de l'impact d'un véhicule à moteur thermique radiocommandé d'une masse de 5 kg sur deux massifs en sol renforcé à échelle 1/10^e. Les deux massifs se distinguaient par la nature du matériau utilisé dans la confection des nappes de renforcement alvéolaire afin d'étudier l'influence de celles-ci sur la réponse mécanique de l'ouvrage à un impact. En première approximation, une telle expérience correspondrait dans la réalité à l'impact d'un véhicule de 5 tonnes roulant à plus de 110 km/h et percutant un massif d'une hauteur d'environ 4 m et d'une longueur de 12 m.

D'autres expériences sont envisagées durant l'année 2011 et les résultats de l'ensemble de ces essais seront alors utilisés pour évaluer la pertinence des modèles retenus, concernant notamment l'absence de prise en compte de dissipations non-frictionnelles.



Figure 5. Expérience d'impact d'un véhicule sur un ouvrage en sol renforcé à échelle 1/10^e

7. BIBLIOGRAPHIE

- [BER 06] Bertrand D., *Modélisation du comportement mécanique d'une structure cellulaire soumise à une sollicitation dynamique localisée, application aux structures de protection contre les éboulements rocheux*, Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier, 2006.
- [BOU 08] Bourrier F., *Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel – Application à la trajectographie des chutes de blocs*, Thèse, Univ. Joseph Fourier, 2008.
- [CHA 03] Chareyre B., *Modélisation du comportement d'ouvrages composite sol-géosynthétique par éléments discrets, Application aux ancrages en tranchée en tête de talus*, Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier, 2003.
- [DEL 04] Deluzarche R., *Modélisation discrète des enrochements*, Thèse, Ecole Centrale, Lyon, 2004.
- [EC8-1] Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, 1998.
- [FAL 97] FALCON E., *Comportements dynamiques associés au contact de Hertz : processus collectifs de collision et propagation d'ondes solitaires dans les milieux granulaires*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1, 1997.
- [GOT 06] GOTTELAND P., *Actes de la Conférence finale – 5.3 Les ouvrages de protection en terre : innovations et re-ingenieries*, 24-26 oct. 2006.
- [ITA 99] Itasca, PFC2D - *Theory and background*, Itasca Eds, 1999.
- [JOU 07] Joulain C., *Etude du comportement dynamique d'un massif de sol renforcé par géocellulaire*, Rapport de fin d'étude, IFMA, 2006-2007.
- [OLE et al. 93] Olen K.L., Fragaszy R. J., Cargill K.W. Purcell M.R., *Dynamic response of reinforced soil systems, Phase 2 – Flight dynamics directorate*, Wright Laboratory, 1993.
- [RAC 02] Racana N., *Etude du comportement mécanique d'un massif de sol renforcé par géotextile cellulaire*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II, 2002.
- [REI 95] Reid R., *Conventional weapons effects on reinforced soil walls*, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 1995
- [REI 96] Reiffsteck Ph., *Etude du comportement mécanique du géotextile tridimensionnel alvéolaire ARMA-TER – Analyse numérique et expérimentale*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II, 1996
- [SAU 04] Saussine G., *Contribution à la modélisations de granulats tridimensionnels : Application au ballast*, Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques du Languedoc, 2004
- [SOU 08] Soudé M., *Etude du comportement dynamique d'un massif en sol renforcé par géotextile M3S®*, Mémoire d'ingénieur Polytech'Clermont, Université Blaise Pascal Clermont II, 2008.