

ÉTUDE D'IMPACTS SUR LES MASSIFS RENFORCÉS PAR GÉOTEXTILE ALVÉOLAIRE

STUDY OF IMPACTS ON SOIL STRUCTURES REINFORCED BY GEOCELLS

Maxime SOUDÉ^{1,2}, Roland GOURVÈS¹, Michel GRÉDIAC², Younes HADDANI¹, Aurélie TALON²

¹ Sol Solution Géotechnique Réseaux – 63204 Riom Cedex, FRANCE

² LaMI – 63175 Aubière ; Université Blaise Pascal – 63006 Clermont Ferrand, FRANCE

RÉSUMÉ - Depuis 2007, la société Sol Solution avec le partenariat du laboratoire LAMI de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand a entrepris des recherches pour étudier le comportement mécanique d'un ouvrage en sol renforcé par une structure alvéolaire M3S® et soumis à une sollicitation dynamique, plus particulièrement de type choc. Des simulations numériques par modélisation discrète ont ainsi permis de mieux comprendre les mécanismes de déformation et d'absorption de l'énergie d'impact. Deux massifs à échelle réduite ont été percutés par des véhicules modèles réduits et des caméras rapides ont enregistré l'ensemble des essais. La confrontation des résultats a permis d'évaluer la pertinence des hypothèses régissant les simulations.

Mots-clés : structure géocellulaire, géotextile, modélisation discrète, impact, modèle réduit.

ABSTRACT – Since 2007, Sol Solution and the LaMI research group of Blaise Pascal University in Clermont-Ferrand perform a study on the mechanical behaviour under dynamic load of a structure reinforced by the M3S(c) geocell system. It mainly deals with the response of such structures under impact. The complex deformation mechanisms as well as the impact energy dissipation within the structure were thoroughly studied with numerical simulations. Two small-scale structures were also impacted with small radio-controlled cars. The pictures of both structures were captured by two high-speed video cameras during the tests. Experimental results were compared with numerical expectations to check the relevancy of the numerical models.

Keywords: geocell structure, geotextile, discrete modelling, impact load, small-scale model.

1. Introduction

En partenariat avec le laboratoire LERMES de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, les travaux de recherches de Reiffsteck (1996) et de Racana (2002) ont permis d'affiner les connaissances du comportement mécanique d'ouvrages renforcés par matériaux géocellulaires jusqu'à la mise en place de notes de calcul utilisées pour leur dimensionnement.

À ce jour, près de 100 ouvrages ont été construits avec ce procédé pour de multiples applications (raidissement de talus, murs de soutènement, élargissement de route, lutte contre l'érosion, paroi de centre de stockage de déchets ...).

L'une des caractéristiques des ouvrages en sol renforcé par matériaux géocellulaires est qu'ils s'inscrivent dans la catégorie des ouvrages « souples ». Sous sollicitation, ils permettent ainsi des déformations importantes avant rupture ainsi qu'un comportement élastoplastique en grandes déformations, d'où une capacité a priori significative à absorber de l'énergie. Si jusqu'à présent les différents travaux ont concerné des sollicitations statiques, une telle observation a soulevé la question du comportement de ces ouvrages sous sollicitations dynamiques.

C'est pour répondre à cette question que depuis 2007 a été lancée une étude afin d'élargir les applications de ces ouvrages aux zones concernées par trois types de sollicitations : le séisme, le choc et l'explosion.

Un état de l'art (Soudé, 2008) concernant les sollicitations dynamiques précédemment citées et leur application à des structures de soutènement en sol renforcé a conduit à écarter l'étude des sollicitations de type sismique et de type explosion. En effet, la sollicitation sismique fait déjà l'objet de nombreux travaux numériques ou expérimentaux et est déjà prise en compte sur le plan normatif par le biais de méthodes pseudo-statiques comme celle de Mononobe-Okabe (Eurocode 8-5, 2005). Quant aux explosions, si des outils numériques existent pour étudier ces phénomènes, les études expérimentales sont rares et complexes. Les essais à échelle 1 (Reid, 1995, Chew et al., 2003 ; Terre armée, 2005) ou en centrifugeuse (Olen et al., 1993) sont coûteux et demandent des moyens techniques importants surtout au niveau de la manipulation des explosifs. De ce fait, peu de travaux ont été publiés à ce sujet car relevant souvent de projets militaires. En revanche, les sollicitations de type choc continuent de faire

l'objet de plusieurs études, que ce soit sur le plan expérimental ou sur le plan numérique, notamment dans le cadre des merlons de protection contre les éboulements rocheux (Bertrand, 2006 ; Bourrier, 2008). De plus, on observe un cadre normatif très limité pour ce type de sollicitation puisque seules les capacités de déformations de l'impactant (véhicule ou autre) sont prises en compte et pas celles de l'ouvrage impacté. Les massifs en sol renforcé par structure alvéolaire pouvant s'inscrire dans ce contexte, la sollicitation de type choc a été retenue.

Aujourd'hui, ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE menée en partenariat avec le laboratoire LaMI de Clermont-Ferrand.

2. Démarche et objectifs du présent article

La démarche envisagée pour répondre à la problématique a consisté en :

- une approche numérique via des modèles utilisant la méthode des éléments discrets avec le logiciel PFC2D d'Itasca (Itasca, 1999),
- une approche expérimentale étudiant une série de deux essais d'impacts sur des massifs à échelle réduite.

L'objectif de cet article est tout d'abord de présenter les modèles numériques développés en cherchant à concilier « une rapidité d'exécution et de résolution » avec « l'obtention de résultats cohérents ». On présente ensuite les caractéristiques de deux essais d'impact sur des massifs à échelle réduite. Enfin, les résultats issus de l'approche numérique et expérimentale sont comparés, afin d'évaluer la pertinence des hypothèses retenues dans les simulations numériques.

3. Approche numérique

3.1. Contexte de la modélisation

Une modélisation numérique d'un tel problème peut s'envisager avec deux méthodes fréquemment utilisées en génie civil, celle des éléments finis (MEF) ou des différences finies, plutôt adaptées aux milieux continus et celle des éléments discrets (MED).

Dans notre cas, le choix a été d'écarter les méthodes des milieux continus pour plusieurs raisons. Tout d'abord à cause de l'hétérogénéité d'un sol qui le rapproche difficilement d'un milieu continu. Ensuite en raison du maillage en éléments finis peu adapté à de grandes déformations et à la gestion de la propagation de fissures. Bien que des solutions existent pour régler ces problèmes (comme un remaillage en continu, par exemple), ces méthodes se révèlent souvent délicates et sophistiquées en termes de programmation (Dragon et al., 2000).

La MED s'est révélée être une solution d'étude numérique très intéressante pour l'étude des matériaux granulaires soumis à des impacts (Bertrand, 2006 ; Bourrier, 2008), tolérant justement les grandes déformations, les ruptures par fissuration ou cisaillement. Ces propriétés sont dues au fonctionnement même de la méthode, qui repose sur la définition de paramètres géométriques et micromécaniques des particules constituant les modèles (taille, forme, lois de contact interparticulaires...).

L'objectif de l'approche numérique est de développer des modèles reposant sur des hypothèses simples de comportement et qui soient rapides en termes de temps de calcul. Aucun amortissement numérique ou visqueux (par le biais des contacts) n'a été retenu. Seules les capacités de frottement des particules permettent une dissipation des ondes mécaniques se propageant dans le système. L'objectif n'est pas d'élaborer un outil conduisant à une prédiction quantitativement exacte de la réponse mécanique, mais un outil d'investigation permettant d'appréhender la cinématique et les mécanismes de ruines de l'ouvrage. Un tel outil permet d'évaluer l'influence d'un grand nombre de paramètres sur la réponse, donnant ainsi des résultats cohérents avec la réalité et ce, en un temps raisonnable. Pour l'ensemble de ces raisons, il a été décidé de travailler avec le logiciel commercial PFC2D d'Itasca (Itasca, 1999).

Les détails concernant les lois de comportement, les différents paramètres micromécaniques des matériaux testés (sol ou renforcement) ainsi que le fonctionnement de la méthode des éléments discrets ne sont pas rappelés dans le présent article. Seule la présentation des modèles numériques et les observations qui en découlent seront données. Pour plus d'informations concernant la MED, le lecteur pourra consulter par exemple les références suivantes (Bourrier, 2008 ; Bertrand, 2006).

3.2. Modèles numériques

Deux modèles numériques ont été développés et sont tous deux composés d'un matériau de remplissage des alvéoles et d'éléments de renforcement. Ces deux matériaux sont modélisés par un ensemble de particules cylindriques dont les propriétés micromécaniques (taille, granulométrie, densité du milieu, frottement interparticulaire...) ont fait l'objet de variations. Les conditions aux limites sont définies par des parois élastiques-frottantes et de raideur très élevée devant celles des différents matériaux.

Le premier modèle étudie l'impact d'un cylindre selon un plan parallèle à un lit d'alvéoles, comme le montre la figure 1. Le matériau de remplissage des alvéoles est défini par un ensemble de particules de forme cylindrique et d'une loi de contact entre particules de type élastique-frottant. Le matériau « renforcement alvéolaire » présente deux zones caractéristiques. La première correspond à la bande de renforcement qui est modélisée par une chaîne de particules cylindriques présentant non seulement une loi de contact de type élastique-frottant mais aussi une cohésion interparticulaire afin de simuler une résistance purement élastique à la traction le long de la chaîne. La seconde zone correspond aux endroits où la bande est repliée sur elle-même puis liaisonnée, conduisant à la formation de liaisons dites « intercellulaires ». Les liaisons intercellulaires sont modélisées avec une loi de contact de type élastique-frottant et une cohésion interparticulaire, dont la valeur de résistance ultime à la traction est plus faible que celle d'une bande. En faisant varier les paramètres micromécaniques du matériau de remplissage, du renforcement, des liaisons intercellulaires ou du projectile impactant, on peut ainsi évaluer l'influence sur la réponse dans son plan d'une nappe alvéolaire soumise à un impact.

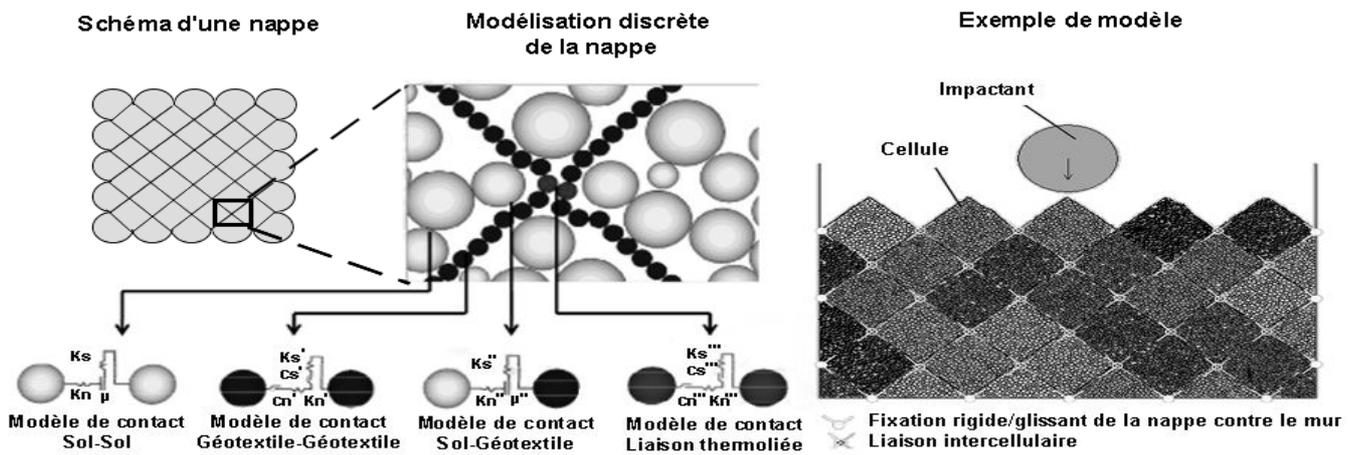


Figure 1 : Schéma de principe de la MED appliquée à une nappe alvéolaire

Le second modèle numérique s'intéresse à un impact selon une vue en profil, comme le montre la figure 2. Les lois de contact entre particules régissant le comportement des matériaux sol, renforcement et impactant sont les mêmes que pour le premier modèle. La seule différence réside dans l'intégration d'une loi d'interaction purement élastique entre les bords d'une même alvéole, ceci afin de reproduire de manière fictive l'effet de confinement qu'elle induit sur le matériau de remplissage (figure 2). La valeur du paramètre de raideur équivalente de cette loi a été estimée sur la base d'autres modèles numériques en vue en plan. L'intérêt d'un tel modèle est qu'il permet d'observer la réponse mécanique à l'impact d'un ouvrage constitué de plusieurs lits d'alvéoles disposés les uns sur les autres.

3.3. Résultats et observations

Concernant le modèle numérique développé dans le plan d'une nappe, des simulations d'impact ont surtout permis de mettre en avant l'influence des liaisons intercellulaires dans la réponse mécanique d'un lit d'alvéoles soumis à un impact. Il ressort de ces simulations deux résultats importants. D'une part, à mesure que l'impactant s'enfonce dans la nappe, celle-ci se déforme de manière homogène et continue comme le ferait une membrane soumise à une pression. Des efforts de traction apparaissent alors au sein du renforcement alvéolaire, selon des lignes concentriques au point d'impact (figure 3 - gauche) et passant par les liaisons intercellulaires. D'autre part, des modèles ont montré que si ces efforts dépassent la valeur de résistance ultime en traction des liaisons, ces dernières se « cassent » et

la résistance qu'oppose le renforcement à l'enfoncement de l'impactant disparaît, permettant ainsi à celui-ci de prolonger sa course au sein du lit d'alvéoles. Ce phénomène de rupture des liaisons est fonction de la vitesse d'impact et de l'état de densité du matériau. Les liaisons intercellulaires jouent alors le rôle de fusibles au sein du lit d'alvéoles.

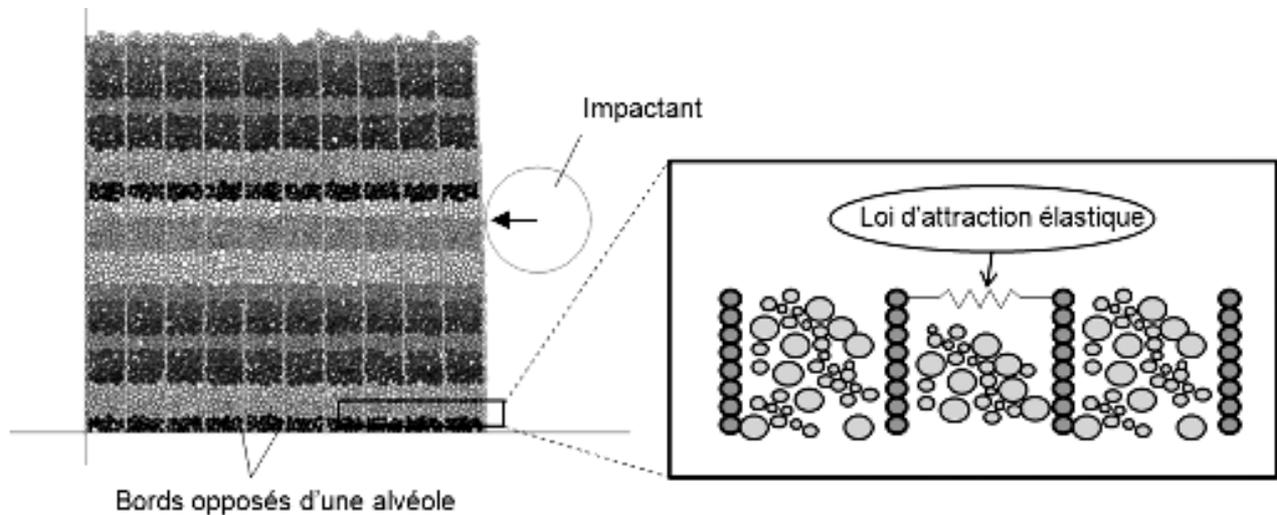


Figure 2 : MED appliquée à un ouvrage en sol renforcé constitué de plusieurs lits d'alvéoles

Pour le second modèle numérique (figure 3 droite), les simulations ont permis de déterminer la cinématique de l'impact. Deux zones de l'ouvrage sont alors à noter, séparées par la ligne en pointillés de la figure 3 droite. La première, située au dessus de la ligne, correspond à la mobilisation d'un coin de Coulomb au niveau de l'impactant qui se soulève puis revient presque à sa position d'origine. La seconde zone située en dessous de la ligne concerne toute la partie « passive » de l'ouvrage qui reste quasiment immobile lors de l'impact.

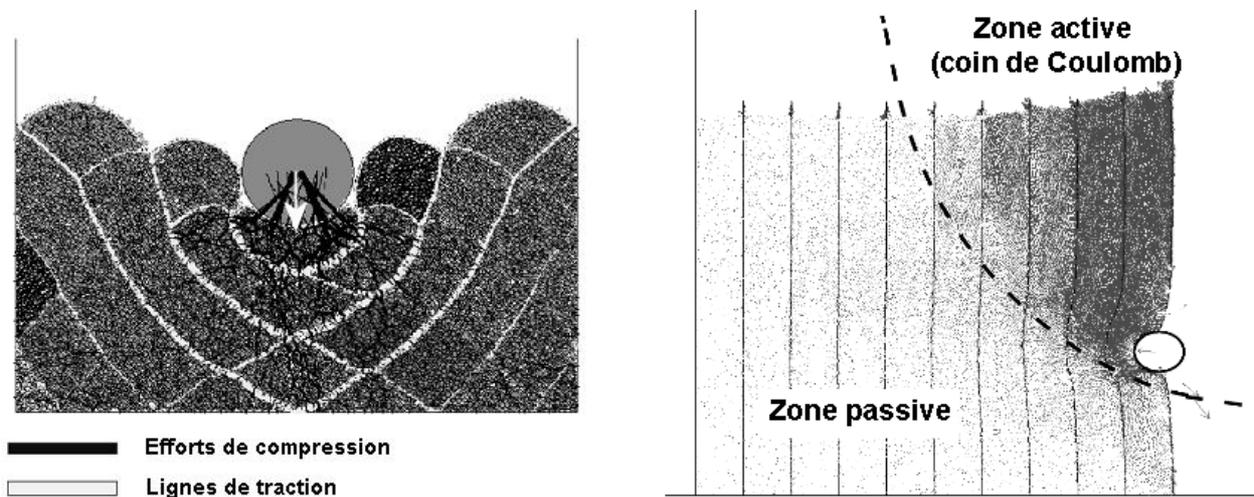


Figure 3 : (gauche) Vue de dessus, observation de l'effet membrane et de la propagation des lignes de traction le long du renforcement. (droite) Vue de profil, observation du coin de Coulomb (zone mobile située au dessus de la ligne en pointillés) à partir du champ de déplacements

4. Etude expérimentale

4.1. Contexte de l'expérimentation

L'étude expérimentale d'un impact sur un ouvrage en sol renforcé par une structure géocellulaire s'avérait indispensable pour juger de la pertinence des observations déduites des résultats des simulations numériques. La réalisation d'une expérience à échelle réelle a été écartée pour plusieurs

raisons. Réaliser un ouvrage en vraie grandeur, instrumenter ce mur ainsi que le véhicule afin de contrôler l'impact et, surtout, disposer d'une zone d'essai sécurisée et adaptée à une telle expérience nécessitait des moyens techniques et financiers importants. Des essais sur modèles réduits se sont avérés intéressants, d'une part en raison de l'échelle permettant une réalisation plus rapide et de disposer d'une zone d'essai adaptée et maîtrisée, d'autre part, parce que, dans les travaux précédemment menés par Reiffsteck puis Racana, des essais sur modèles réduits s'étaient avérés très pertinents pour décrire la cinématique ainsi que le mode de ruine d'un ouvrage soumis à une sollicitation statique.

Nous avons ainsi choisi de réaliser deux expériences d'impact sur un massif alvéolaire à échelle 1/10^e mettant en œuvre deux matériaux différents pour les renforcements alvéolaires. Deux caméras rapides ont ainsi enregistré les impacts et un démontage lit par lit de chaque ouvrage a été réalisé afin d'en étudier des éléments de comportement lors de l'impact. Les modèles numériques vus précédemment ont permis d'orienter nos choix concernant cette expérimentation, que ce soit en termes d'énergie d'impact ou du choix des matériaux.

L'objectif d'une telle expérience était d'analyser la réponse cinématique de l'ouvrage impacté, d'évaluer son état de déformation, d'identifier les zones mobilisées par l'impact ainsi que les éventuelles ruptures survenues dans les renforcements.

4.2. Présentation de l'expérimentation

4.2.1. Caractéristiques des deux ouvrages

Chaque ouvrage a une longueur de 1,20 m, une hauteur totale d'environ 47 cm (40 cm hors sol et 7 cm d'ancrage) et une profondeur de 60 cm (figure 4 droite). Ils ont été construits au sein d'un coffrage bois en forme de « U ». Pour éviter tout mouvement de celui-ci lors de l'impact, des blocs de béton ainsi qu'un remblai en terre ont été disposés contre chaque paroi. Des fiches métalliques ont aussi été plantées dans le sol pour stabiliser la paroi arrière et une liaison a été réalisée entre les 2 parois latérales (figure 4 gauche).

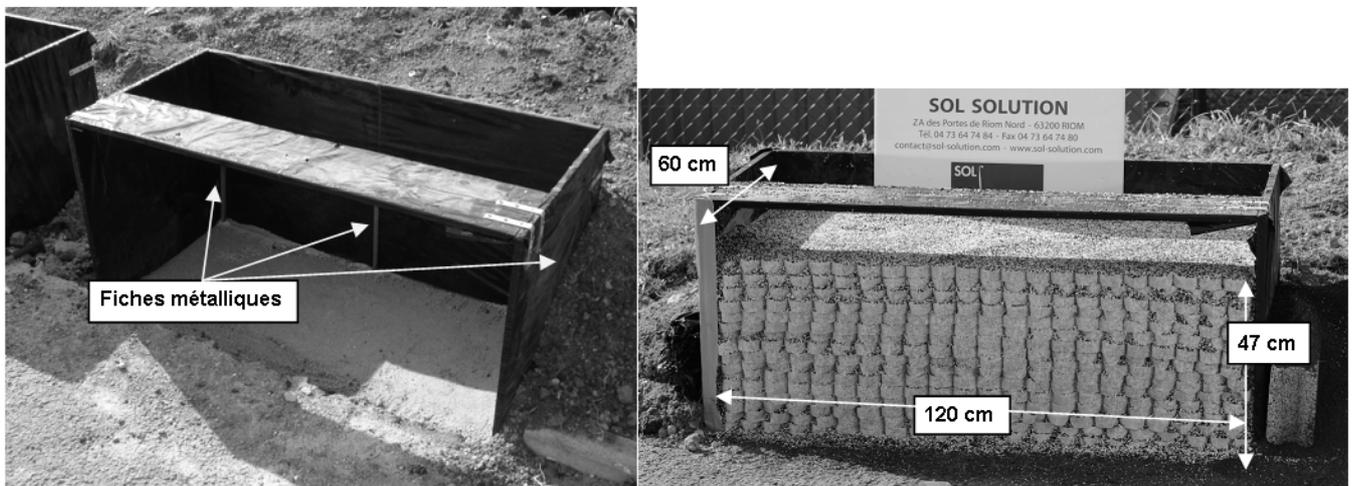


Figure 4. (gauche) Coffrage utilisé. (droite) Vue de l'ouvrage avec renforcement papier avant impact

4.2.2. Caractéristiques du matériau de remplissage

Le matériau de remplissage des alvéoles est constitué d'un mélange à volume égal d'argile expansée de granulométrie 0,5-2,5 mm et de microbilles de polystyrène de granulométrie 0,9-1,5 mm. Les phénomènes de ségrégation ont été évités grâce à l'ajout d'une très faible quantité de glycérine, permettant un mélange quasi-homogène des deux matériaux. Ce matériau modèle comporte des particules de petite taille et présente ainsi la caractéristique d'être frottant, léger et compressible. Ce choix résulte d'une comparaison entre différents matériaux et de plusieurs observations :

Dans un souci d'échelle géométrique, il fallait disposer d'un matériau de granulométrie fine afin que chaque alvéole puisse contenir un nombre suffisant de particules sur sa hauteur (2,5 cm).

Ensuite, le bon fonctionnement des nappes alvéolaires implique que les alvéoles restent en tension après leur mise en place. Ce phénomène n'est possible que si le matériau constitutif des alvéoles est

frottant (ce qui avait été présenté par Racana dans ses travaux (Racana, 2002) comme « l'effet Cabestan »).

Par la suite, l'obtention d'un enfoncement significatif de l'impactant dans l'ouvrage (au moins 10 cm) dépendait de sa faculté à dissiper peu d'énergie. Outre le frottement interparticulaire, une faible masse volumique des particules diminue cette dissipation en intervenant dans le poids du coin de Coulomb soulevé par l'impactant lors du choc.

Enfin, les expressions des lois de similitude pour un modèle à échelle 1/10^e orientent vers une division par 10 du module d'Young du matériau utilisé en modèle réduit par rapport à un matériau réel, d'où ce choix d'ajouter du polystyrène pour diminuer le module d'élasticité E du matériau.

4.2.3. Caractéristiques des deux types de renforcement alvéolaire

La réalisation de deux ouvrages avait pour but d'évaluer l'influence du renforcement alvéolaire sur la réponse globale à l'impact. Pour cela, deux matériaux différents ont été utilisés en cherchant à étudier deux comportements mécaniques extrêmes. Le premier mur est constitué de renforcements en plastique qui présente en traction une forte capacité de déformation avant rupture. Le matériau des renforcements du second mur est du papier sulfurisé dont le comportement mécanique est de type rigide-fragile. Par ailleurs, ce matériau présente aussi l'avantage d'être assez résistant à l'humidité. Le système de liaison entre alvéoles a été réalisé par la pose de 2 agrafes sur la hauteur des bandes constituant le renforcement. Chaque lit a ainsi une taille de 1,20 m de long, 55 cm de large et 2,5 cm de hauteur. Enfin, le diamètre de chaque alvéole est de 5,5 cm.

4.2.4. Caractéristiques de l'impactant

L'impactant est un bélier monté sur un véhicule radiocommandé. Ce bélier en acier a la forme d'un cylindre de 5 cm de diamètre et de 18 cm de longueur (figure 10). Afin de le fixer au véhicule, une plaque en acier a été soudée au cylindre puis vissée sur le châssis acier du véhicule. Afin de garantir la stabilité des ouvrages lors de leur démontage, à chaque mur était associé un véhicule présentant les mêmes caractéristiques. Ce véhicule était laissé enfoncé dans l'ouvrage après l'impact. Chaque véhicule avait une masse de 5 kg. La vitesse d'impact était d'environ 10 m.s⁻¹ et a été estimée sur la base d'observations issues de modèles numériques.

4.2.5. Caractéristiques des caméras rapides

Deux caméras rapides ont été utilisées pour chaque impact. L'une d'entre elles était dirigée vers le point d'impact selon une vue en plongée, disposée à 2,5 m de hauteur et filmait l'ensemble de la scène d'impact à une fréquence de 1600 images par secondes. L'autre caméra était disposée à la quasi-perpendiculaire de la trajectoire d'impact, ceci afin d'enregistrer la position de cibles disposées sur le véhicule en fonction du temps. Cette information a permis la détermination de l'enfoncement, de la vitesse et de la décélération du véhicule au cours du choc. Pour effectuer cette mesure, il a été fait le choix d'utiliser la caméra avec la plus haute fréquence d'acquisition (4000 images par seconde) que nous avons à disposition. La disposition des caméras et des exemples de vues enregistrées sont présentés sur la figure 5.

4.3. Résultats et observations

4.3.1. Analyse de la cinématique extérieure

Les deux vidéos enregistrées ont permis d'observer le déroulement de chaque impact. Le bélier pénètre tout d'abord dans l'ouvrage sur plusieurs centimètres, ensuite on observe une déformation de l'ouvrage liée à sa réponse mécanique. Cette déformation se propage depuis le bélier vers la face supérieure de l'ouvrage. Elle se diffuse selon un cône. Après avoir atteint son enfoncement maximal, le véhicule recule légèrement, d'une part sous l'effet du rebond et d'autre part en raison du volume d'ouvrage soulevé qui le repousse en retombant. On constate alors que, malgré la présence d'un renforcement dans l'ouvrage de plusieurs centimètres dans la zone d'impact, l'ensemble des nappes est resté en place et l'ouvrage ne s'est pas effondré vers l'avant.

Une autre observation porte sur les limites qui paraissaient suffisamment éloignées du point d'impact puisque les bords de l'ouvrage sont restés immobiles lors de l'impact.

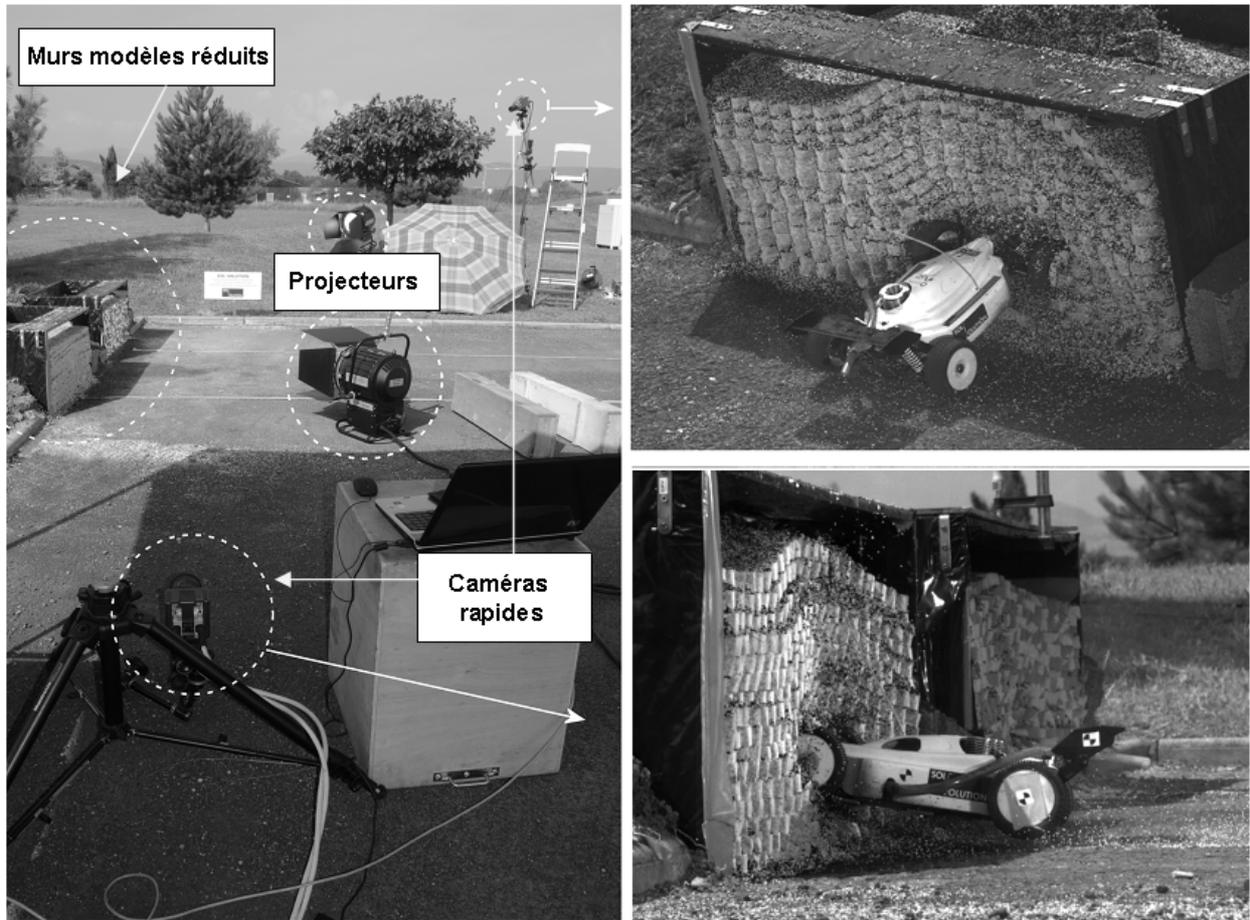


Figure 5. (gauche) Vue générale de l'expérimentation, (droite) exemples de vues prises par les deux caméras rapides

4.3.2. Courbes enfoncement-vitesse-accélération

En comparant les deux essais d'impacts, on observe que l'enfoncement maximal de l'impactant est plus important pour l'ouvrage avec renforcement papier que pour l'ouvrage avec renforcements plastique (resp. 180 mm et 140 mm). Concernant les vitesses des impactants, on peut observer que la même vitesse initiale avant impact a pu être garantie pour les deux essais. Lors de l'impact, la vitesse décroît rapidement au cours du temps : le phénomène d'impact ne dure qu'environ 45 ms pour l'ouvrage avec renforcements plastique et 63 ms pour l'ouvrage avec renforcements papier. Cette observation se retrouve dans les courbes de décélération avec, respectivement, pour chaque essai, des valeurs pics de 400 m.s^{-2} et 700 m.s^{-2} .

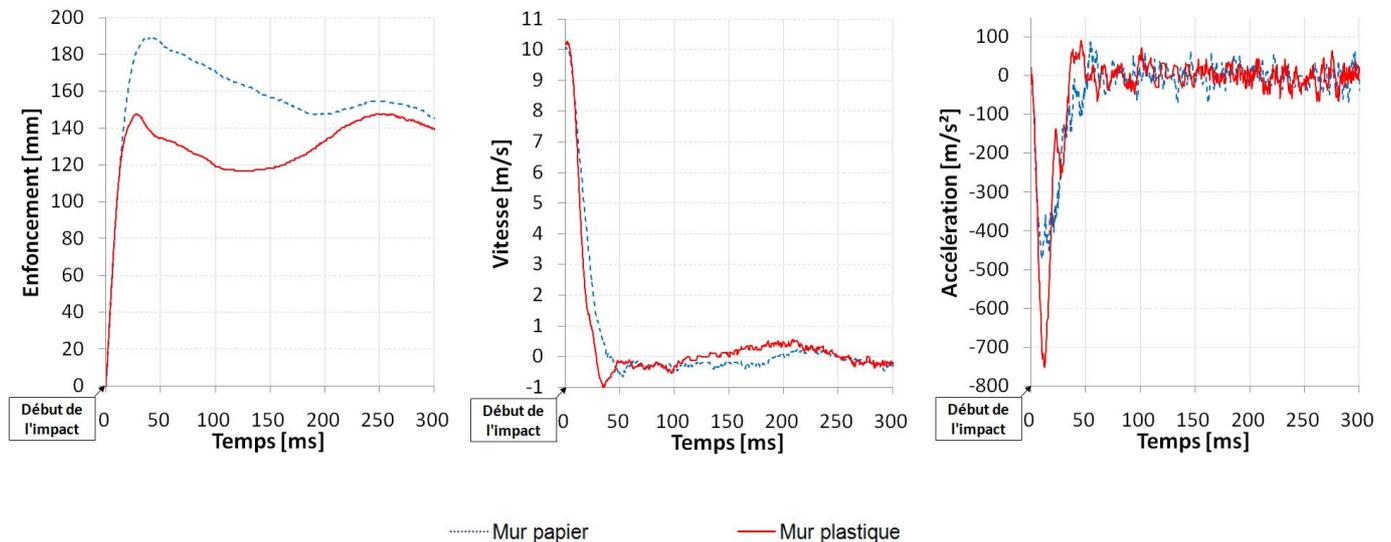


Figure 6. (de gauche à droite) Enfoncement, vitesse et accélération des véhicules au cours du temps

4.3.3. Démontage des deux ouvrages

Après impact, les ouvrages ont été démontés lit après lit tout en mesurant l'altitude de la surface supérieure de chaque lit selon un maillage 5 cm x 5 cm. Le repérage des points a permis de réaliser une série de coupes en profils et en long permettant de reconstituer l'état de déformation interne après impact. Les zones de l'ouvrage ayant été mobilisées lors de la réponse mécanique ont été identifiées à partir de ces coupes, mettant ainsi en valeur la présence d'un coin de Coulomb au-dessus du plan horizontal passant par le bélier impactant. La ligne en pointillés de la figure 7 sépare la zone en dessous très peu sollicitée de la zone au-dessus correspondant au coin de Coulomb.

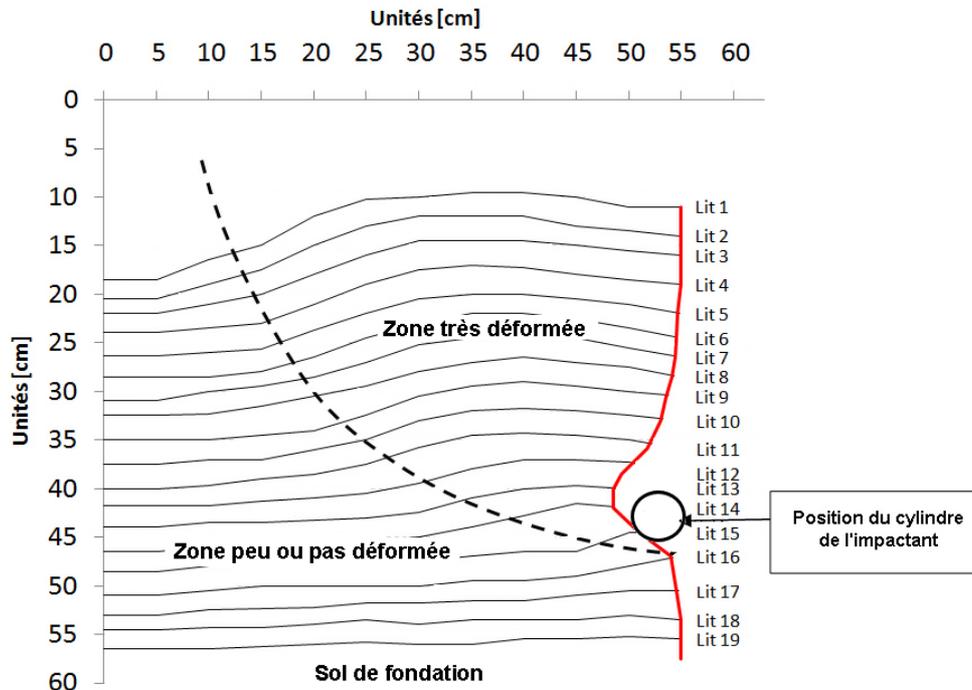


Figure 7. Exemple de profil reconstitué après impact au milieu de l'ouvrage avec renforcement plastique

Le démontage a aussi permis d'identifier une déformation homogène (effet membrane) de la face avant des lits d'alvéoles, cette déformation étant plus importante pour ceux situés au niveau du plan d'impact (figure 8). Cette déformation est de moins en moins importante à mesure que l'on considère les lits situés au-dessus ou en dessous de ce plan.

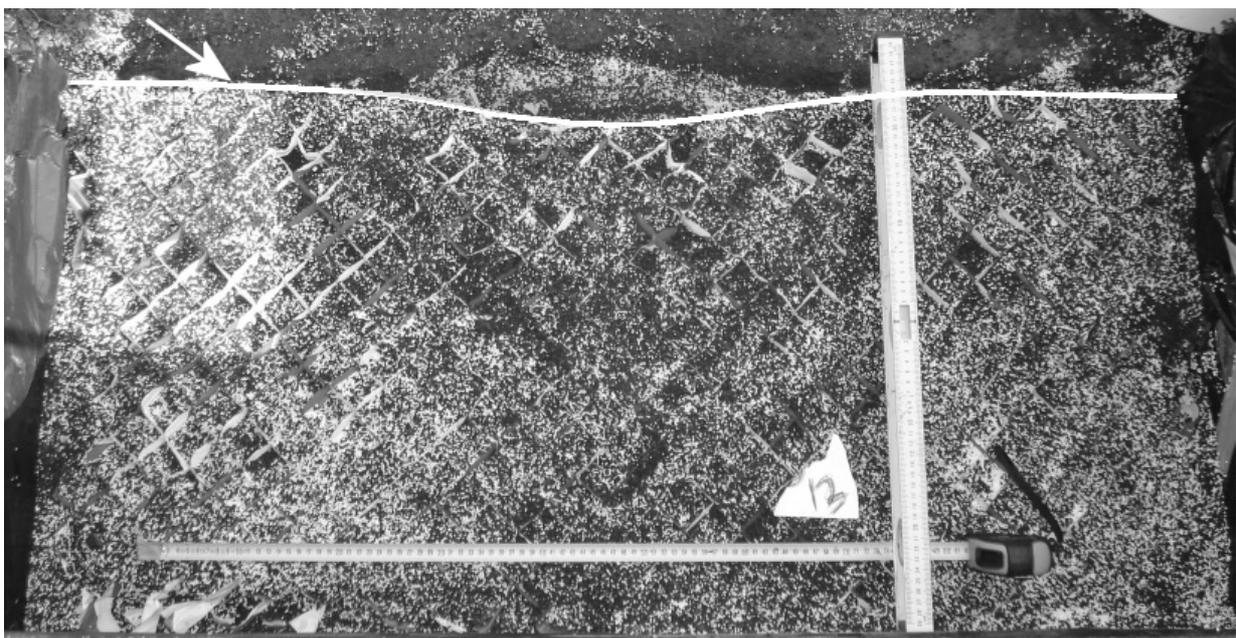


Figure 8. Effet de membrane d'un lit d'alvéoles situé dans le plan horizontal d'impact (ouvrage plastique)

L'ouvrage avec renforcement papier compte un grand nombre de ruptures, notamment dans la direction d'impact, contrairement à l'ouvrage avec renforcement plastique, qui n'en compte que quelques unes.

Dans l'ensemble, il ressort de l'étape de démontage des murs l'observation d'une forte homogénéité dans le comportement de chaque ouvrage, que ce soit en termes de déformations (figure 9) ou en termes de symétrie des ruptures de liaisons intercellulaires (figure 10).

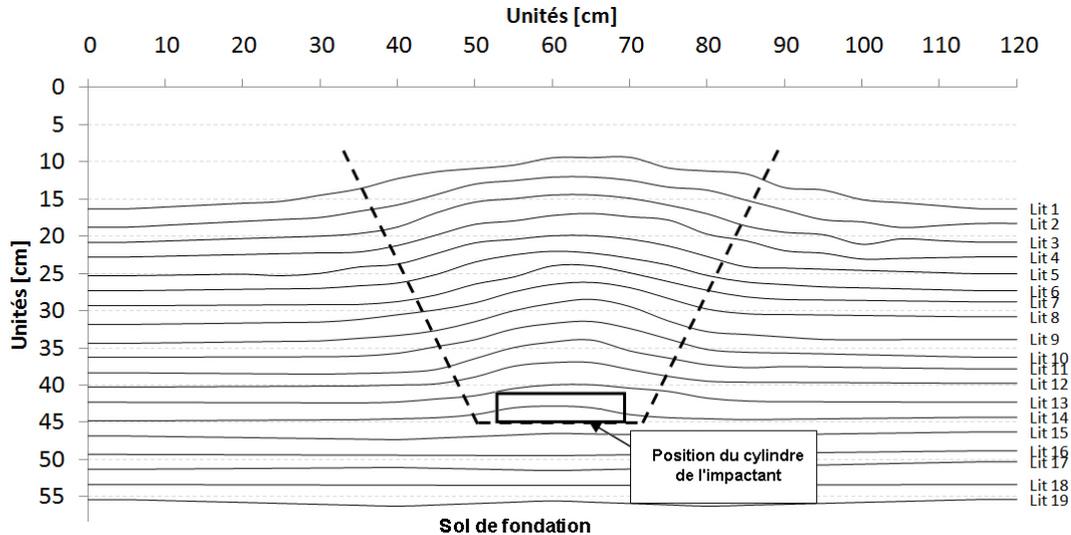


Figure 9. Exemple de profil en long en vue de face et reconstitué après impact, à 15 cm derrière la face avant de l'ouvrage

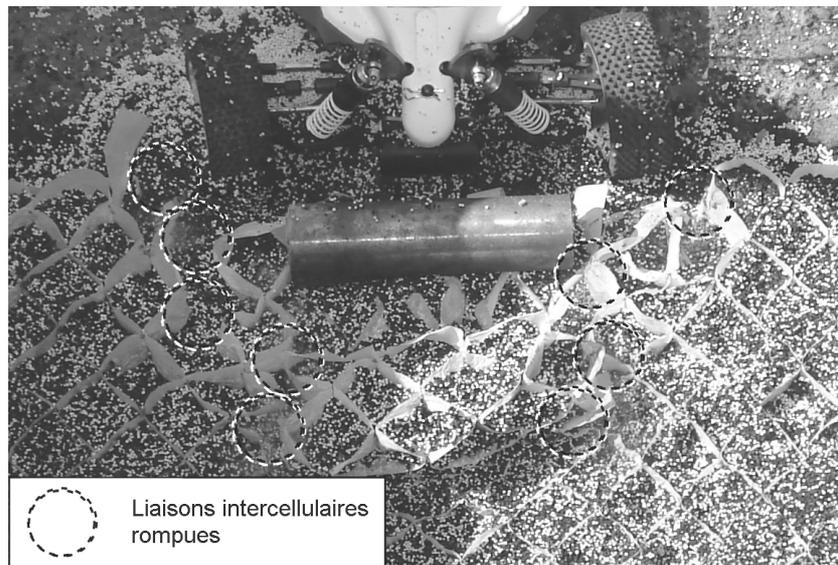


Figure 10 : Exemple de répartition symétrique des ruptures de liaisons sur un des lits situés au même niveau que le bélière impactant (ouvrage papier)

5. Conclusions et perspectives

La réalisation d'une expérience à échelle réduite a eu pour but d'évaluer la pertinence du modèle numérique. Deux aspects issus de la comparaison entre modèles numériques et essais d'impacts méritent d'être soulignés.

Sur le plan qualitatif, les résultats des simulations numériques en vue de profil ou dans le plan coïncident avec les observations issues des essais d'impact sur les ouvrages. En vue de profil, nous avons confirmé la mobilisation d'un coin de Coulomb par le bélière impactant ainsi que l'identification de zones restées immobiles lors de l'impact, que ce soit en dehors du coin ou en dessous du point d'impact. Quant à la réponse mécanique en vue dans le plan, nous avons confirmé l'homogénéité de la déformation d'un lit alvéolaire lors de l'impact jusqu'à rupture des liaisons intercellulaires.

Sur le plan quantitatif, de nouvelles simulations effectuées à ce jour ont montré que les résultats issus de l'approche numérique restent éloignés de l'approche expérimentale. Ainsi, les modèles numériques actuels ont tendance à surévaluer l'ampleur des déformations de l'ouvrage lorsque celui-ci est soumis à un impact, que ce soit en vue de profil ou en vue en plan. Parmi les hypothèses pouvant expliquer cet écart, on en retient deux principales :

- tout d'abord, la modélisation 2D d'une réponse mécanique de l'ouvrage manifestement tridimensionnelle illustrée entre autre par le coin de Coulomb selon un plan vertical et l'effet membrane selon un plan horizontal,
- ensuite, le choix d'utiliser des lois de contact simples entre particules (absence de prise en compte d'un amortissement visqueux, pas de plasticité, dissipation d'énergie uniquement par frottements...).

L'une des perspectives des travaux à venir porte sur le développement du modèle numérique en vue de profil afin de tenir compte partiellement de l'effet membrane des lits d'alvéoles. Cela se traduit ainsi par la programmation d'une loi de comportement dans le modèle numérique actuel permettant l'augmentation de la résistance apparente du procédé alvéolaire lors de l'enfoncement de l'impactant. Par conséquent, une diminution significative des déformations de l'ouvrage soumis à un impact est à prévoir.

Pour ce faire, une série d'expérimentations sera conduite pour mieux les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs des ouvrages à échelle réduite (comportement en traction des différents renforcements et des liaisons agrafées, caractéristiques micromécaniques du matériau de remplissage des alvéoles...) afin de considérer des valeurs plus réalistes dans les simulations numériques. Ensuite, de nouvelles simulations seront réalisées afin d'intégrer le comportement mécanique dans le plan aux modèles vus de profil.

L'ensemble de ces travaux sera validé par une expérimentation à échelle ½ ou 1. Une perspective intéressante de ces travaux est l'étude d'applications en merlons de protection ou en tant qu'amortisseur de chocs dans le domaine routier.

6. Références bibliographiques

- Bourrier F. (2008). *Modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel – Application à la trajectographie des chutes de blocs*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 245 pages.
- Bertrand D. (2006). *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, Université Joseph Fourier, 197 pages.
- Chew S.H., Tan S.A., Karunratne G.P., Chiew Chiat Ng (2003). Performance of geosynthetic reinforced soil wall subject to blast loading: Experimental and numerical study. *Reinforced soil engineering, advances in research and practice, Marcel Dekker*, pp. 363-393.
- Dragon A., Hild F., Rota L., Trumel H. (2000). Modélisation du comportement et de la rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques. *Mec. Ind 1*, pp. 521-537.
- Eurocode 8-5 (2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*, p 32-35.
- Itasca, PFC2D (1999). Theory and background. *Itasca Eds*,
- Olen K.L., Fragaszy R. J., Cargill K.W. Purcell M.R. (1993). Dynamic response of reinforced soil systems, Phase 2. *Flight dynamics directorate, Wright Laboratory, 249 pages*.
- Racana N. (2002) *Étude du comportement mécanique d'un massif de sol renforcé par géotextile cellulaire*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II, 158 pages.
- Reid R. (1995). *Conventional weapons effects on reinforced soil walls*. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 390 pages.
- Reiffsteck Ph. (1996). *Étude du comportement mécanique du géotextile tridimensionnel alvéolaire ARMATER – Analyse numérique et expérimentale*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II, 190 pages.
- Soudé M. (2008). *Étude du comportement dynamique d'un massif en sol renforcé par géotextile M3S®*. Mémoire d'ingénieur Polytech'Clermont, Université Blaise Pascal Clermont II, 117 pages.
- Terre Armée (2005). *Les ouvrages de protection civils et militaires en terre armée*. Documentation commerciale, 12 pages.