

MODELISATION NUMERIQUE D'UN MERLON PARE-BLOCS EN SOL RENFORCE

NUMERICAL MODELING OF A REINFORCED SOIL BUND

Oltion KORINI¹, Marion BOST¹, Jean-Pierre RAJOT¹, Yassine BENNANI BRAOULI²,
Nicolas FREITAG²

¹IFSTTAR, Lyon, France

²Terre Armée SAS, Rueil Malmaison, France

RÉSUMÉ – La modélisation numérique des impacts sur les merlons en sol renforcé est complexe et nécessite la mise en œuvre de lois de comportement intégrant des paramètres dynamiques. Dans cet article, nous présentons un modèle qui inclut une loi d'érouissage fonction du taux de déformation pour le sol et un frottement dépendant du taux de glissement à l'interface sol-géogrid. Le modèle a été utilisé pour reproduire un essai d'impact horizontal réalisé sur un merlon.

ABSTRACT – The numerical modeling of the impacts on reinforced soil bunds is complex and requires the implementation of constitutive laws that include dynamic parameters. In this article, we present a model that includes a strain rate hardening for the soil and a slip rate dependent friction for the soil-geogrid interface. The model was used to reproduce a horizontal impact test that was performed on a bund.

1. Introduction

1.1 Contexte

En zone de montagne, la sécurisation optimale des usagers et la pérennité des infrastructures vis-à-vis des chutes de blocs jouant sur l'attractivité d'un territoire, sont des enjeux socio-économiques forts. Parmi les dispositifs de protection pare-blocs, les merlons en sol renforcé sont utilisés en protection depuis des décennies. Ce dispositif de protection qui s'apparente à des digues, est constitué de terrains meubles et donc déformables qui permettent d'arrêter les blocs rocheux lorsqu'ils se décrochent du massif. L'absence de théorie partagée sur le comportement des merlons en sol renforcé sous impact n'a pas permis jusqu'à présent l'établissement de référentiel technique et encore moins de norme pour la conception de ce type d'ouvrage.

La conception de ces structures est actuellement basée sur des résultats expérimentaux ou des calculs analytiques simplifiés (Brunet et al., 2009; Lambert and Bourrier, 2013; Subrin, 2006; Tissières, 1999). Les approches analytiques restent très conservatrices. De plus, la nature dynamique de l'impact et le rôle des géogrids ne sont généralement pas pris en compte. D'autre part, l'approche expérimentale reste une méthode de conception coûteuse. Par conséquent, le recours à une approche numérique s'avère nécessaire.

Différentes approches de modélisation numérique aux éléments finis (Maegawa et al., 2011; Murashev et al., 2013; Peila et al., 2007; Ronco et al., 2009) ou éléments discrets (Lorentz et al., 2010; Plassiard and Donzé, 2010) ont été développées pour simuler des impacts sur les merlons en sol renforcé. La calibration des modèles est faite sur la base de résultats expérimentaux en vraie grandeur en nombre limité et les critères de rupture des matériaux ne comportent aucune variable dynamique. En d'autres termes, si la vitesse de l'impacteur est modifiée par rapport aux essais utilisés pour la calibration, il n'y a aucune garantie que les résultats du modèle numérique correspondent à la réalité. Pour

modéliser le comportement sous impact d'un merlon en sol renforcé, il faut tenir compte du caractère dynamique de la sollicitation, ce qui pose la question du comportement des matériaux à considérer dans ces conditions.

1.2 Objectif

Cet article présente un nouveau modèle numérique des merlons en sol renforcé. Le comportement constitutif élasto-plastique classiquement utilisé pour le sol a été complété d'une loi d'érouissage fonction du taux de déformation. De plus, un mécanisme d'interaction à frottement variable est utilisé pour une représentation plus réaliste de l'interaction entre le sol et les géogrilles. Ce modèle a été calibré en utilisant un essai d'impact sur un merlon de protection.

2. Modélisation numérique

Pour établir le nouveau modèle numérique, le logiciel de calcul aux éléments finis Abaqus (Simulia, 2019) a été utilisé. Ce logiciel a déjà été utilisé dans plusieurs travaux pour simuler des impacts dynamiques sur les merlons des protection (Murashev et al., 2013; Peila et al., 2007; Ronco et al., 2009) ou sur des couches de sable (Oussalah, 2018). Compte tenu de la nature dynamique du problème, il existe une forte dépendance de la solution au pas de temps. L'analyse par intégration temporelle explicite a donc été choisie.

2.1 Géométrie du modèle

Le modèle se compose d'un massif de fondation, d'un merlon en sol renforcé et d'un bloc impacteur (Figure 1). La fondation est modélisée par un élément 3D solide de dimensions 6 m (l) x 6 m (L) x 1 m (h). Les dimensions du merlon testé ont été reproduites, soit un parallélépipède de longueur de 4 m, de largeur de 1,2 m et de hauteur de 2,4 m. Le merlon a été positionné au contact de l'élément de fondation sans espace entre les deux. Le bloc impacteur a été modélisé par un élément coque rigide et creux.

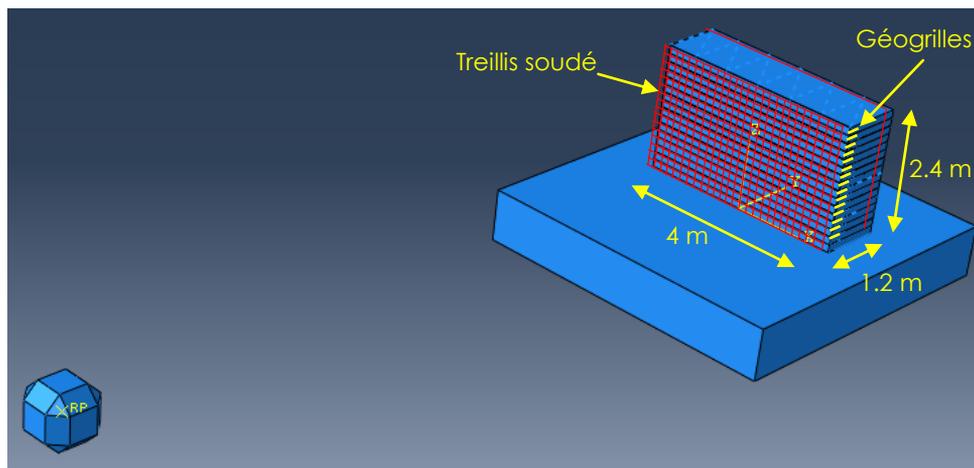


Figure 1. Géométrie de la modélisation 3D du merlon

Le merlon comporte également différents renforcements qui assurent sa stabilité lors des chargements statiques et dynamiques. Des éléments plans représentant le treillis en acier des parements du merlon ont été positionnés sur les faces avant et arrière du modèle. Les barres en acier du treillis ont été converties en une feuille d'épaisseur équivalente. Le treillis ainsi modélisé est maintenu en place par des connexions virtuelles horizontales entre les éléments avant et arrière. Ces éléments n'ont pas de rôle significatif lors de l'impact, mais ils servent à prévenir les instabilités du sol de remblaiement lors du

chargement statique par gravité. A l'intérieur du merlon, les géogrilles sont modélisées par des éléments plans avec des ouvertures de mêmes dimensions que dans le cas réel.

La taille du maillage est très importante dans la modélisation par éléments finis, car elle affecte la précision de la solution. Le maillage de la fondation est constitué d'éléments cubiques d'une taille de 20 cm. Le sol de remblaiement du merlon étant modélisé en couches horizontales de 15 cm d'épaisseur, la taille du maillage dans la direction verticale est de 15 cm, tandis que dans les autres directions, elle est de 10 cm. La taille maximale du maillage pour la géogrille et le treillis est choisie de 10 cm. Le bloc est maillé de façon similaire au treillis car ils interagissent ensemble par frottement pendant l'impact.

2.2 Choix des modèles constitutifs pour les matériaux

Les propriétés de chaque matériau sont choisies de manière à représenter au mieux le comportement réel. La fondation des merlons en sol renforcé est généralement représentée par des supports fixes (Murashev et al., 2013; Ronco et al., 2010). Dans notre cas, la fondation a été préparée en remblayant avec une couche d'épaisseur moyenne de 0.5 m, du même matériau qui a servi pour construire le merlon. Le rôle de la fondation n'étant pas principal dans ce cas, il est utilisé un comportement élastique pour la modéliser avec les mêmes paramètres que le sol de remblaiement du merlon. De cette façon, la concentration artificielle des contraintes générée numériquement par un support rigide est évitée. Pour représenter le sol du merlon et sa réponse en dynamique, il a été utilisé un comportement élasto-plastique avec un critère de rupture de Drücker-Prager complété d'une loi d'écroutissage. Les géogrilles et les treillis sont modélisés en utilisant un matériau au comportement élasto-plastique bilinéaire parfait avec le critère de rupture de Von-Mises.

Tableau 1. Propriétés des matériaux du modèle

Élément	Masse volumique (kg/m ³)	Module élastique (MPa)	Coefficient Poisson	Angle de frottement (°)	Cohésion initiale (kPa)	Angle de dilatance (°)	Résistance (MPa)
Sol de fondation	2 500	100	0.3	-	-	-	-
Sol du merlon	2 500	100	0.3	45	10	15	-
Géogrille (polyester)	1 380	5 200	0.3	-	-	-	728
Treillis (acier)	7 850	200 000	0.3	-	-	-	400
Bloc impacteur	1 639*	-	-	-	-	-	-

*Note. Masse totale du bloc en kg.

Le sol de remblaiement est un composant majeur du merlon. Une attention particulière a donc été portée au choix des paramètres du modèle (Tableau 1). La masse volumique du sol est déterminée à partir d'essais *in situ* et en laboratoire. D'autres paramètres sont repris de la littérature pour des matériaux similaires comme le module d'élasticité (Bowles, 1996), le coefficient de Poisson (Maher and Bennert, 2008), l'angle de frottement (Thompson and Smith, 1990), tandis que certains paramètres, comme la cohésion initiale, sont choisis pour assurer la stabilité numérique du modèle. Le critère de rupture de Drücker-Prager choisi est performant dans une analyse explicite dynamique en raison de sa surface lisse et de la possibilité d'avoir des paramètres dynamiques tels que l'écroutissage fonction du taux de déformation.

Les résultats d'un essai d'impact sur un merlon en sol renforcé ont été utilisés pour calibrer les paramètres dynamiques de ce modèle numérique. Dans un premier temps, les déplacements dans le merlon dans l'axe d'impact ont été considérés, puis des modifications mineures ont été apportées à ces mêmes paramètres pour reproduire correctement la décélération de l'impacteur. Différents paramètres du sol ont ainsi été adaptés. Pour la cohésion, il y avait trois options de valeur : i) constante, ii) variable selon une loi d'écroutissage fonction de la déformation et iii) variable selon une loi d'écroutissage

fonction du taux de déformation. Avec les deux premières options, il était seulement possible de faire correspondre les déplacements et non la décélération de l'impacteur. L'option de loi d'écroutissage fonction du taux de déformation permettait de reproduire les déplacements à l'avant dans le merlon et la décélération de l'impacteur; elle a donc été choisie. La deuxième étape consistait à caler les déplacements à l'arrière dans le merlon. Ces déplacements étant associés à la variation de volume due à la rupture par cisaillement, ils ont été reproduits en adaptant la valeur de la dilatance du sol.

Pour le comportement de la géogrille en polyester, les paramètres du modèle sont dérivés d'essais réalisés en laboratoire tandis que pour les treillis en acier, les paramètres de l'acier sont tirés de la littérature (CEN, 2005) (Tableau 1).

2.3 Interactions entre éléments et conditions limites

Dans le logiciel de calcul numérique, les différents éléments sont mis en interaction pour former le modèle 3D (Figure 1). La base du massif de fondation est fixée en bloquant tout déplacement. Le merlon est placé sur le massif de fondation et interagit avec lui par un mécanisme frottant. Les mouvements des côtés latéraux du merlon sont bloqués dans le sens longitudinal pour correspondre aux conditions réelles de l'essai. Afin de reproduire les contraintes et les déformations de manière continue dans le merlon, les couches de sol du merlon sont collées les unes aux autres par des liaisons fictives. Entre elles, sont placées les géogrilles. Elles interagissent avec le sol par frottement. Les faces avant et arrière en treillis sont placées à une petite distance (0.01 m) du sol pour des raisons de stabilité numérique. Cet espace est rempli dès que le sol commence à se déformer sous l'effet de la gravité. La position d'impact et la vitesse du bloc sont similaires à celles de l'essai d'impact. Le bloc impacteur a donc une vitesse initiale de 14.4 m/s dans la direction perpendiculaire au merlon et tous les autres degrés de liberté sont bloqués.

Deux types d'interactions entre les surfaces sont utilisés dans le modèle, un en statique et un en dynamique. L'interaction statique consiste en un frottement tangentiel simple de type Mohr-Coulomb et un contact dur dans la direction perpendiculaire, ce qui interdit la pénétration des surfaces les unes dans les autres. Ce type d'interaction est utilisé pour les contacts entre le sol du merlon et le sol de fondation, entre le treillis et le sol du merlon, et entre le treillis et le bloc. Le coefficient de frottement est pris dans ce cas égal à 1. L'interaction en dynamique consiste à considérer un coefficient de frottement variable selon une courbe de décroissance exponentielle statique-cinématique (Figure 2). Cette courbe est tracée en fonction du taux de glissement entre les deux surfaces en interaction. Sa formulation dépend des coefficients de frottement statique et cinématique et d'un coefficient de décroissance. Cette formulation est basée sur les recherches d'Oden et Martins, (1985). Dans notre modèle, les paramètres de cette courbe sont ajustés de sorte que les déformations des géogrilles correspondent à celles de l'essai d'impact.

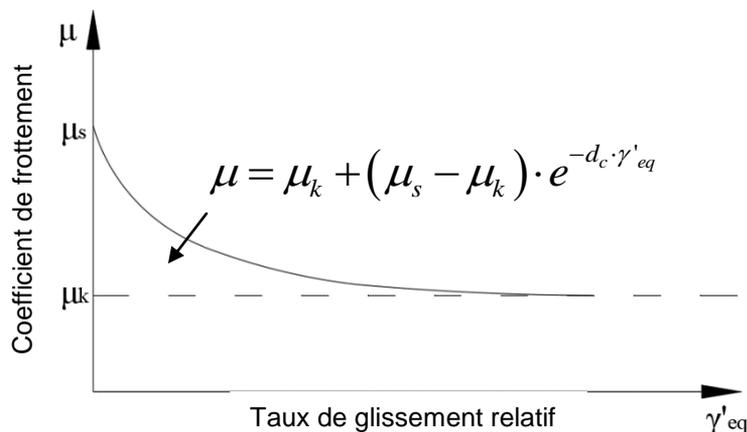


Figure 2. Coefficient de frottement dynamique, Abaqus documentation (Simulia, 2019)

2.4 Chargement et résultats de la modélisation numérique

Deux types de chargement sont appliqués sur le modèle, la gravité et l'impact. La charge de gravité est appliquée par étape successive selon chaque couche de sol de bas en haut, pour approcher au mieux la procédure de construction du merlon. Pendant le chargement par gravité, le bloc d'une masse de 1639 kg s'approche du merlon à une vitesse constante de 14.4 m/s ce qui correspond à une énergie cinétique de 170 kJ. Une fois le chargement par gravité terminé, le bloc impacte le merlon avec cette énergie, dans la direction perpendiculaire à la face avant du merlon à une hauteur de 1,5 m de sa base et au milieu de la direction longitudinale.

Les déplacements à l'avant et à l'arrière du merlon dans l'axe de l'impact sont respectivement de 0,31 m et 0,28 m (Figure 3). L'étape d'impact dure 1 seconde mais la déformée finale du merlon est atteinte après 0,3 seconde. A l'impact, le bloc pénètre dans le merlon en provoquant également une déformation en flexion de la partie supérieure, puis le merlon continue à se déformer en raison de son inertie.

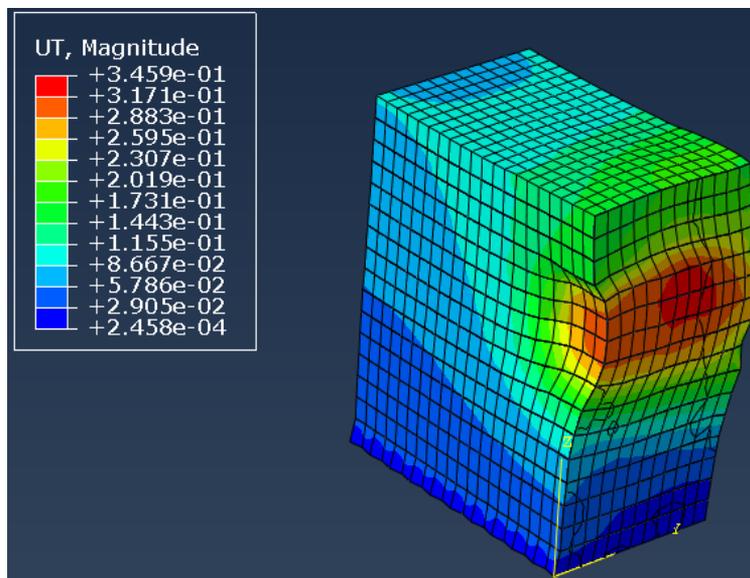


Figure 3. Déplacements 3D de la moitié du merlon (unité : m)

3. Comparaison des résultats expérimentaux à la modélisation numérique

3.1 Description de l'essai et des mesures effectuées

Lors des essais, 3 merlons avec une conception différente de leur renforcement interne, ont été impactés (Korini et al., 2019). Le merlon qui a montré la plus faible déformation pour la meilleure mobilisation des renforcements (Figure 4), a été choisi pour l'analyse numérique.



Figure 4. Déformées du merlon à l'avant (gauche) et à l'arrière (droite)

Différentes instrumentations ont été utilisées pour suivre la réponse du sol et des renforcements du merlon impacté. Afin de mesurer leur mobilisation, des jauges de déformation ont été collées sur les géogrilles, autour de la position d'impact. La déformée du merlon a été obtenue par numérisation avant et après l'impact à l'aide d'un dispositif laser 3D. Les pressions à la base du merlon ont été mesurées par deux capteurs de pression, placés dans l'axe d'impact, à proximité des faces avant et arrière. Enfin, pour connaître la force dynamique agissant sur le merlon, l'accélération du bloc a été enregistrée avec un accéléromètre 3D. L'instrumentation s'est avérée efficace et pertinente en termes de mesures.

3.2 Comparaison des résultats

L'accélération du bloc impacteur dans le modèle a un pic un peu plus élevé que celui de la modélisation numérique mais la forme de la courbe et les ordres de grandeur (maximum et largeur du pic) sont similaires (Figure 5). Le modèle de sol semble donc adapté pour reproduire le comportement sous impact.

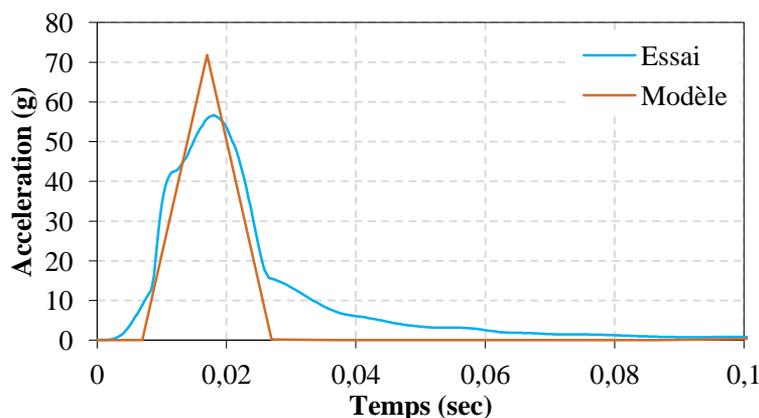


Figure 5. Accélération du bloc

Les mesures de cinq jauges de déformation sur la géogrille au niveau d'impact sont présentées (Figure 6). La forme et les ordres de grandeur sont également similaires entre les résultats expérimentaux et numériques. La loi d'interaction de frottement dynamique entre le sol et la géogrille (décroissance exponentielle statique-cinématique) semble donc adaptée pour reproduire les mécanismes de déformation dans le merlon sous l'impact.

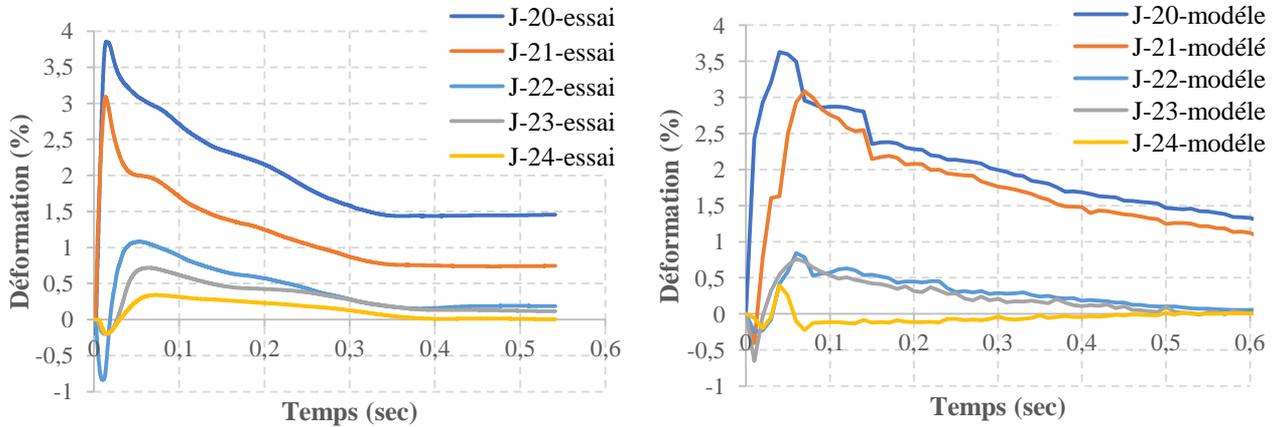


Figure 6. Mesures des déformations des géogrilles

Les pressions verticales à la base du merlon dans l'axe de l'impact présentent un pic puis se stabilisent à une valeur inférieure à la valeur initiale. Les pressions du modèle numérique sont très proches de celles qui sont mesurées dans le merlon réel (Figure 7).

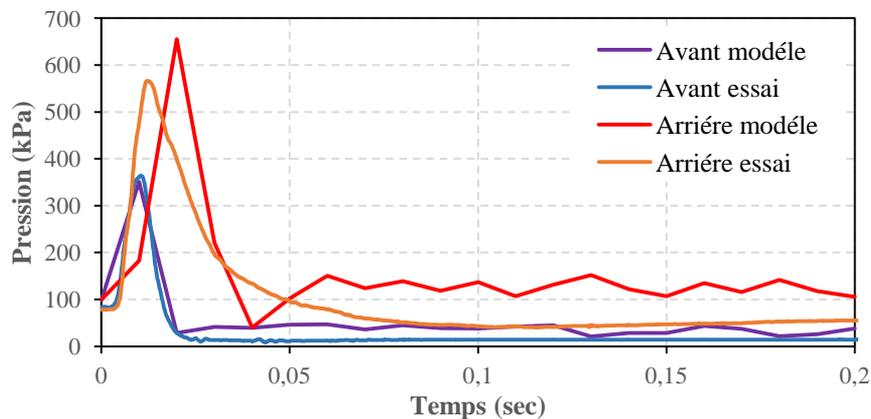


Figure 7. Mesures des pressions à la base du merlon

4. Conclusions

Un modèle numérique en éléments finis d'un merlon en sol renforcé tenant compte de la dépendance du comportement du sol et de l'interaction sol-renforcement à la vitesse de déformation a été développé. Pour modéliser le comportement du sol sous impact, le critère de rupture de Drücker-Prager a été complété d'une loi d'écroutissement fonction du taux de déformation. Afin de reproduire l'effet du chargement dynamique sur le comportement frottant entre le sol et les renforcements dans le merlon, l'interaction sol-renforcement a été modélisée par un coefficient de frottement fonction du taux de glissement relatif.

Le modèle numérique a été appliqué pour reproduire un essai d'impact réalisé en vraie grandeur sur un merlon en sol renforcé par des géogrilles. Le modèle numérique permet de reproduire la déformée du merlon, la décélération de l'impacteur, la déformation des renforcements et les pressions dans le sol à la base du merlon. La bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux confirme la pertinence du choix des mécanismes internes de rupture qu'il a été choisi de reproduire.

Ce modèle est à considérer comme une première étape pour l'analyse des merlons renforcés soumis à des impacts. Une étude plus approfondie du rôle des renforcements et de leur contribution à la stabilité de l'ouvrage devra être menée dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement des renforcements. Il faut cependant noter que cette étude a été

réalisée avec un matériau granulaire bien calibré. Afin de réaliser un guide de conception complet, il faudrait pouvoir compléter l'étude avec une plus large gamme de sol.

5. Références bibliographiques

- Bowles, J.E., 1996. *Foundation Analysis and Design*, By McGraw-Hill Book Companies. Inc.
- Brunet, G., Giacchetti, G., Bertolo, P., Peila, D., 2009. Protection from High Energy Rockfall Impacts using Terramesh Embankments: Design and Experiences, in: 60th Highway Geology Symposium, New York State Department of Transportation, New York State Museum.
- CEN, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings SS-EN 1993-1-1:2005.
- Korini, O., Bost, M., Rajot, J.-P., Braouli, Y.B., Freitag, N., 2019. Experimental study of reinforced soil bunds subjected to horizontal impact. Presented at the International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering ISRM, Iguassu, Brazil.
- Lambert, S., Bourrier, F., 2013. Design of rockfall protection embankments: a review. *Eng. Geol.* 154, 77–88.
- Lorentz, J., Muquet, L., Plassiard, J.-P., 2010. Nouvelle approche de dimensionnement d'un merlon: Protection d'un bâtiment à Val d'Isère. JNGG.
- Maegawa, K., Tajima, T., Yokota, T., Tohda, M., 2011. Experiments on rockfall protection embankments with geogrids and cushions. *Int J Geomate* 1, 19–24.
- Maher, A., Bennert, T.A., 2008. Evaluation of Poisson's ratio for use in the mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG).
- Murashev, A., Easton, M., Kathirgamanathan, P., 2013a. Advanced numerical modelling of geogrid-reinforced rockfall protection embankments. Presented at the 19th NZGS Geotechnical Symposium, Queenstown, New Zealand.
- Oussalah, T., 2018. Comportement des sables sous sollicitation d'impact à faible vitesse : application au dimensionnement de couches de sol protégeant les structures des impacts rocheux (phd thesis). Université de Lyon.
- Peila, D., Oggeri, C., Castiglia, C., 2007. Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests. *Landslides* 4, 255–265.
- Plassiard, J.-P., Donzé, F.-V., 2010. Optimizing the design of rockfall embankments with a discrete element method. *Eng. Struct.* 32, 3817–3826.
- Ronco, C., Oggeri, C., Peila, D., 2009. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1189–1199.
- Ronco, C., Oggeri, C., Peila, D., Bertolo, P., Ferraiolo, F., Giacchetti, G., 2010. Numerical modeling of ground reinforced embankments used for rockfall protection, in: *Proceedings of the 3rd Euro Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures-AGS*. pp. 269–276.
- Simulia, 2019. Abaqus software. Simulia Corp., Providence, USA.
- Subrin, D., 2006. Modélisation analytique et numérique pseudo-statique des merlons de protection contre les chutes de blocs rocheux. JNGG2006 JOURNEES Natl. Geotech. Geol. Ing. LYON Fr. 27-29 JUIN 2006.
- Thompson, M.R., Smith, K.L., 1990. Repeated triaxial characterization of granular bases. *Transp. Res. Rec.* 1278, 7–17.
- Tissières, P., 1999. Ditches and reinforced ditches against falling rocks, in: *Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures*, Kanazawa, Japan. pp. 4–7.