

INVESTIGATION DES INTERACTIONS A L'ECHELLE LOCALE ENTRE UN MILIEU GRANULAIRE ET UNE GEOGRILLE – DEM 3D

INVESTIGATION OF INTERACTIONS BETWEEN A GRANULAR MEDIUM AND A GEOGRID AT LOCAL SCALE - 3D DEM

Ahmad EL AYOUBI¹, Fabrice EMERIAULT¹, Pascal VILLARD¹, Luc SIBILLE¹

¹ Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, Grenoble, France

RÉSUMÉ – Les mécanismes impliqués dans l'interaction sol-géogridde sont encore mal identifiés, notamment à l'échelle locale. Cette étude vise à développer une compréhension de ces mécanismes et à identifier les paramètres clés à l'échelle locale, afin de fournir des éléments objectifs pour la conception des géogrilles de renforcement et de tester la capacité et l'aptitude des méthodes numériques existantes à décrire le comportement et le rôle des renforcements.

ABSTRACT – The mechanisms involved in soil-geogrid interaction are still poorly identified, particularly at the local scale. This study aims to develop an understanding of these mechanisms and identify the key parameters, in order to provide objective elements for the design of reinforcement geogrids and to test the capacity and possibilities of existing numerical methods to describe the behavior and role of reinforcements.

1. Introduction

Le renforcement des sols est utilisé pour améliorer la performance du sol lorsque celui-ci est sollicité par des charges extérieures, i.e. pour limiter le tassement différentiel, améliorer la stabilité et augmenter la capacité portante et la durabilité de l'ouvrage. Parmi les différentes méthodes de renforcement actuelles, le renforcement par géosynthétique des sols est largement utilisé dans de nombreuses applications géotechniques, en particulier dans le domaine des transports comme les voies ferrées (Yaba, 2022), en tant qu'alternative économique et écologique aux méthodes traditionnelles. Cette méthode consiste à renforcer le sol avec des éléments de renforcement qui fonctionnent essentiellement en tension.

Les géogrilles font partie des matériaux géosynthétiques à base de polymères, très populaires dans l'ingénierie géotechnique, constituées de mailles ouvertes comportant des nervures (travaillant en traction) reliées entre elles par des jonctions plus ou moins rigides. La présence de mailles ouvertes favorise le mécanisme d'imbrication, autrement dit interlocking, entre les particules de sol et la grille, ainsi que d'autres mécanismes d'interaction complexes encore mal identifiés, en particulier à l'échelle locale. Ces mécanismes d'interaction sont influencés par une combinaison des propriétés mécaniques et physiques des matériaux granulaires utilisés (distribution granulométrique, forme), du renforcement (rigidité, épaisseur, taille et forme de l'ouverture de la maille), par l'arrangement granulaire au voisinage de l'inclusion et par le mode de chargement de la structure.

Perkins (1999) a identifié plusieurs mécanismes de renforcement : le confinement latéral du sol, également connu comme le mécanisme d'interlocking, qui contribue à l'augmentation de la capacité portante du sol et l'effet membrane qui permet, lorsque la géogridde s'incurve, de mobiliser par traction des efforts initialement orientés perpendiculairement à son plan. Ceci a également été mis en évidence par Palmeira et Góngora (2015) à l'aide d'expérimentations à grande échelle.

Pour certaines applications tel que le renforcement des voies de circulation, le mécanisme d'interlocking est considéré comme prédominant (Mulabdic et al., 2018). Son

efficacité dépend du rapport entre la taille de l'ouverture de la géogrille et la granulométrie du sol dans lequel la géogrille est insérée.

D'autres études ont également été menées pour mettre en évidence l'influence de la position de la géogrille dans la couche de sol à renforcer. En termes de réduction des déformations permanentes, certains auteurs ont montré, pour des applications de renforcement des voies de circulation, que des géogrilles situées dans le tiers supérieur du remblai étaient les plus efficaces (Abu-Farsakh & Chen, 2011 ; Nazzal, 2007) alors que d'autres auteurs ont montré qu'il était préférable de positionner la géogrille à mi-hauteur du remblai (Gu, 2015). L'épaisseur du sol concerné par l'installation d'un renforcement géosynthétique est considérée comme un facteur important dans la phase de conception. Des recherches ont donc été menées pour évaluer la zone d'influence de la géogrille dans les matériaux granulaires. Il a été montré que cette zone d'influence varie entre 30 mm et 100 mm de part et d'autre de la grille (Hussaini, 2013 ; Schuettpelz et al., 2009 ; Steven et al., 2004).

La modélisation par éléments discrets (DEM) a connu des avancées significatives au cours des dernières décennies, principalement en raison de sa capacité à fournir des informations sur les comportements à l'échelle des particules. La précision et la fiabilité des modèles DEM nécessitent trois étapes clés de modélisation : la représentation de la géométrie de l'élément (forme et taille), le choix d'une loi de contact appropriée (prenant en compte tous les mécanismes physiques pertinents) et la calibration rigoureuse des paramètres de la loi de contact.

Le comportement 3D d'échantillons de sol renforcé a été étudié numériquement grâce à l'outil DEM Yade (Šmilauer et al., 2021) en simulant des essais triaxiaux sur un matériau granulaire renforcé par plusieurs couches de géogrilles. Ces essais sont basés sur des expérimentations de laboratoire qui ont fait par ailleurs l'objet d'une analyse par tomographie à rayons X. La géogrille modélisée est une géogrille biaxiale comportant des ouvertures carrées. Le sol est un matériau granulaire anguleux modélisé par des agrégats de sphères « clumps » constitués d'assemblage de sphères imbriquées les unes dans les autres.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériau granulaire

Le matériau granulaire utilisé pour cette étude est composé de granulats anguleux en calcaire d'une taille 4/20 mm (Figure 1gauche).

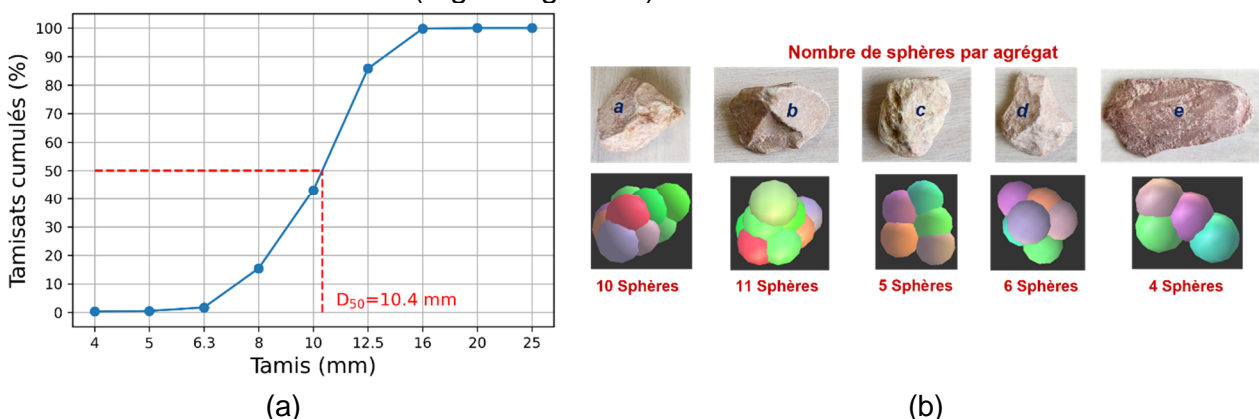


Figure 1. (a) Granulométrie du matériau granulaire sélectionné et (b) Clumps simulés basés sur la reproduction géométrique des agrégats réels

La caractérisation de la forme des agrégats est étudiée dans divers travaux scientifiques. Pour notre application, les paramètres de forme ont été déterminés à l'aide de la méthode du diagramme de Zingg proposée dans la thèse de Quintanilla (2018). Cette méthode

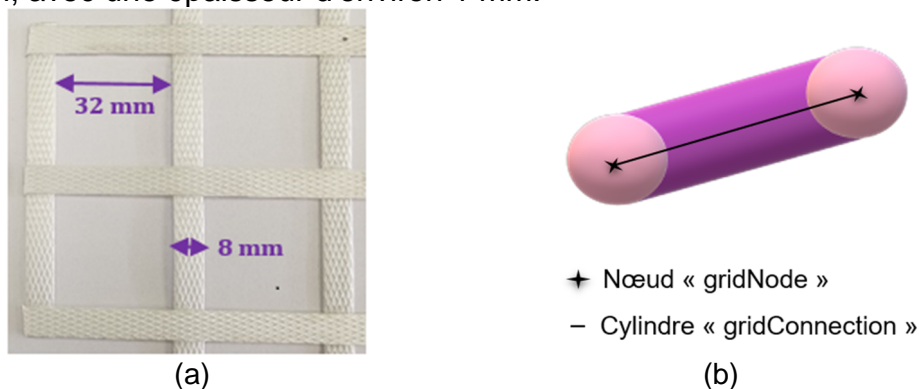
consiste à inscrire le grain dans un prisme rectangulaire afin de déterminer ses trois longueurs caractéristiques : épaisseur S , largeur I et longueur L . Par la suite, le rapport d'élongation $ER = I/L$ et le rapport de planéité $FR = S/I$ ont été calculés en catégorisant les agrégats en quatre groupes (lames, tiges, disques et sphéroïdes) sur la base de seuils fixes. Pour reproduire l'échantillon numérique, nous nous sommes basés sur cinq formes différentes caractéristiques des grains réels notées de "a" à "e" (Figure 1b) sur la base des paramètres de forme définis précédemment.

Généralement, les clumps de forme élaborée sont composés d'un grand nombre de sphères imbriquées les unes dans les autres. Le temps de calcul requis pour ces modèles complexes augmente non seulement avec le nombre de sphères mais également avec la diminution du diamètre des sphères, nécessaire pour représenter correctement des particules anguleuses. Pour notre étude, des clumps composés de 4 à 11 sphères ont été utilisés (Figure 1b). Les agrégats sont considérés comme un matériau frottant caractérisé par la densité, l'angle de frottement entre particules, le module de contact et un coefficient de rigidité tangentiel adimensionnel. Ces paramètres décrivent le comportement des agrégats lors des interactions de contact en utilisant le modèle élastoplastique linéaire classique de Cundall et Strack (1979).

Le comportement du matériau granulaire numérique a été évalué grâce à une série d'essais triaxiaux réalisée sur des échantillons soumis à trois pressions de confinement différentes 10 kPa, 50 kPa, et 100 kPa. La procédure de préparation des échantillons est décrite dans la section 2.3 ci-après. L'utilisation des clumps permet d'obtenir un angle de frottement important (37°) car la forme angulaire des éléments permet de développer de la résistance au roulement.

2.2. Géogrille

La géogrille sélectionnée pour les essais expérimentaux et les modélisations numériques est l'une de celles étudiées par Yaba (2022) appelée Naue Secugrid® 40/40 Q1 (Figure 2a) avec une maille carrée de 32 mm, un module de traction de 800 kN/m à 1% d'élongation, et une résistance à la traction ultime de 40 kN/m à 8% d'élongation. La largeur des nervures est de 8 mm, avec une épaisseur d'environ 1 mm.



Cette géogrille biaxiale est modélisée avec des nœuds interconnectés par des cylindres (Figures 2b et 3a). Selon Effeindzourou et al. (2016), l'utilisation d'éléments cylindriques interconnectés permet de modéliser des éléments dont le comportement est linéaire élastique parfaitement plastique. Ceci implique que les rigidités normales k_n , de cisaillement k_s et de flexion k_r des nervures de la géogrille sont déterminées à l'aide des formules suivantes : $k_n = EA/L$; $k_s = 12 EI/L^3$; $k_r = EI/L$ où E est le module de Young de la géogrille, A la section transversale de la nervure, L la longueur de la nervure et I le moment d'inertie. Compte tenu du fait que les brins ne sont pas cylindriques dans la réalité et que la largeur est beaucoup plus grande que l'épaisseur, les rigidités normales et de cisaillement sont imposées comme étant égales. Une condition de rupture est également établie en

spécifiant des limites élastiques pour les forces internes. Ces valeurs maximales sont liées à des valeurs d'adhésion spécifiques. Ainsi, si la force de traction ou de cisaillement maximale est atteinte, les liens cohésifs se cassent et l'interaction interne est rompue.

Pour vérifier et tester le modèle, un essai de traction sur une géogrille modèle a été simulé (Figures 3a et 3b). Le résultat numérique a ensuite été comparé à la fiche technique du fabricant (Figure 3c).

Comme attendu pour un modèle numérique avec une loi linéaire, les résultats montrent que le modèle de géogrille est capable, pour de faibles valeurs de déformation (1-2 %), de reproduire les caractéristiques de déformation et de résistance observées dans la géogrille réelle, conduisant au même module de traction initial.

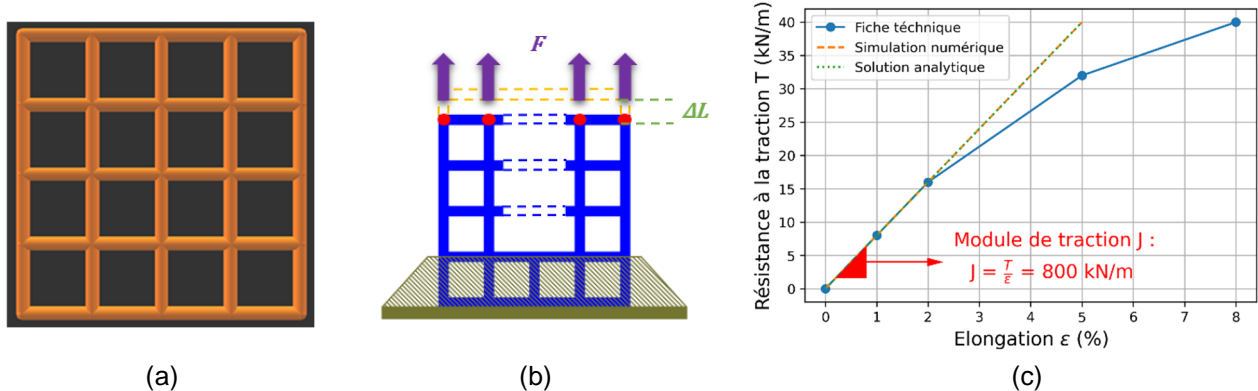


Figure 3. (a) Géogrille simulée, (b) Schéma de l'essai de traction de la géogrille, et (c) Résultats de l'essai de calibration en traction du modèle de géogrille

2.3. Préparation de l'échantillon numérique

Ce modèle est considéré pour simuler des essais triaxiaux, sur un échantillon cubique de 200 mm de largeur (Figure 4). L'idée générale est de préparer l'échantillon numériquement en suivant la procédure expérimentale. L'échantillon a donc été préparé par dépôt gravitaire en quatre couches égales.

Une couche est composée d'un ensemble lâche de 2600 particules (soit environ 16000 sphères) dont la taille suit la distribution granulométrique expérimentale. Les particules sont déposées par gravité sans frottement initialement pour générer un échantillon dense. Une plaque mobile positionnée au-dessus de l'échantillon et qui se déplace vers le bas à une vitesse constante permet de compacter la couche granulaire pour atteindre une porosité de 0,43. Dans le cas d'un échantillon renforcé, la géogrille est insérée à la position souhaitée après que la couche de sol correspondante ait été compactée.

Une fois la dernière couche compactée, les contraintes de confinement sont appliquées par les murs latéraux. La stabilisation de l'échantillon est vérifiée puis un déviateur sera appliqué par déplacements simultanés des murs horizontaux.

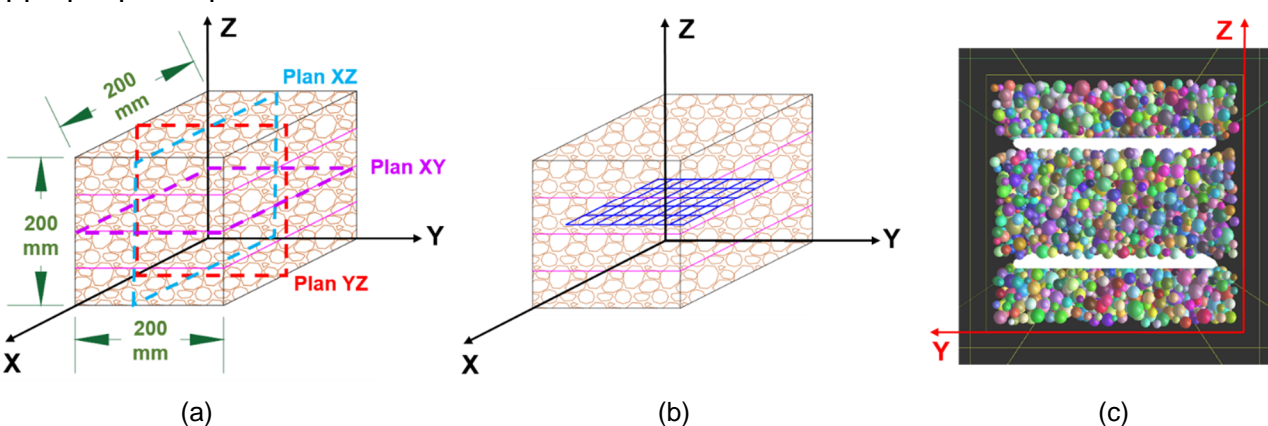


Figure 4. Vue schématique de l'échantillon préparé (a) non renforcé, (b) renforcé, et (c) Echantillon simulé avec deux géogrilles de renforcement

3. Résultats et discussion

3.1. Effet du nombre et de la position de la géogrille sur le comportement

Pour évaluer l'efficacité des géogrilles, quatre configurations différentes ont été testées sous un confinement de 100 kPa : (1) sans géogrille, (2) une géogrille placée à un quart de la hauteur de l'échantillon, (3) une géogrille placée à mi-hauteur de l'échantillon, (4) deux géogrilles symétriques.

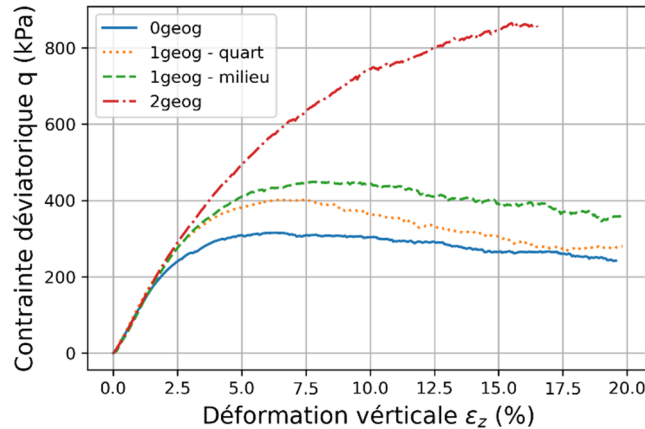


Figure 5. Courbe contrainte-déformation des différentes configurations testées

Comme attendu, les résultats des essais de compression triaxiale (Figure 5) montrent que l'installation de la géogrille dans le milieu de l'échantillon améliore le comportement du système, entraînant une plus grande résistance au cisaillement que dans le cas sans géogrille.

La déformation de l'échantillon est influencée par la position et le nombre de géogrilles dans l'échantillon. En comparant les résultats des tests obtenus avec la géogrille installée à mi-hauteur de l'échantillon et la géogrille installée dans le quart inférieur de la hauteur de l'échantillon, il a été établi que les deux géogrilles contribuaient à la réduction de la déformation, mais que de meilleurs résultats étaient obtenus pour les géogrilles situées à mi-hauteur de l'échantillon.

En outre, la comparaison des résultats des tests obtenus avec une seule géogrille ou plusieurs géogrilles a montré que, pour une charge donnée, la déformation de l'échantillon était davantage réduite lorsque l'on utilisait deux couches de géogrilles.

3.2. Zone d'influence de la géogrille

Lorsqu'une géogrille est insérée dans un matériau granulaire, elle engendre des modifications notables dans les propriétés mécaniques du milieu, impactant la contrainte subie par les particules sur une certaine étendue autour d'elle. L'étude et l'analyse de la zone d'influence s'attache à délimiter spatialement ces variations induites par la présence de la géogrille et fournir des informations importantes sur son efficacité.

Dans le contexte des essais triaxiaux menés à faible confinement, il devient particulièrement pertinent de comparer les résultats obtenus avec et sans l'utilisation de la géogrille, en mettant l'accent sur la contrainte moyenne par particule. Ces contraintes sont calculées à l'aide de l'équation classique de Love-Weber, puis projetées sur un plan vertical ou horizontal (comme illustré à la figure 4a). Les cartes de la moyenne de ces contraintes permettent d'organiser et d'analyser les données de manière plus détaillée.

La figure 6 présente, pour une contrainte isotrope initiale de 10 kPa, les champs moyennés de la contrainte moyenne (Figure 6a) et de la contrainte horizontale (Figure 6b) dans le plan vertical YZ ; les positions des géogrilles sont indiquées par les traits en tiretés rouges. On observe que la partie centrale de l'échantillon est sujette, grâce à l'action de la géogrille, à un accroissement important de la contrainte moyenne, jusqu'à 400kPa, lié à une

augmentation du confinement du milieu granulaire et de sa résistance au cisaillement. La distribution des contraintes horizontales (Figure 6b), montre également que l'effet de confinement des géogrilles décroît graduellement dans la direction verticale jusqu'à environ 40 mm de part et d'autre de chaque géogrille. Ceci s'inscrit dans la plage de variation (30-100 mm) de cette zone d'influence indiquée dans la littérature.

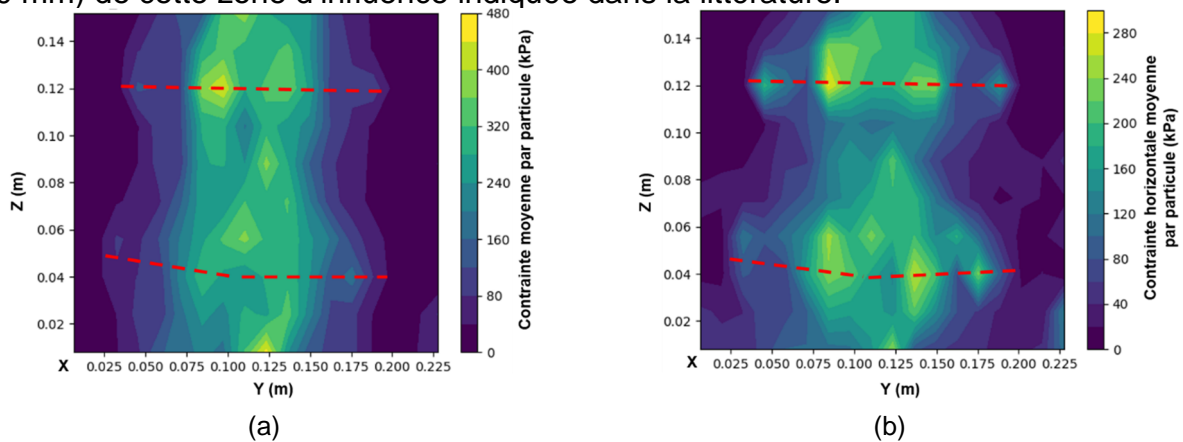


Figure 6. Distribution de la contrainte moyenne (a) et horizontale (b) des particules dans le plan YZ – Cas avec deux géogrilles, confinement 10 kPa, pour un déviateur de contrainte de 125 kPa (voir figure 10a)

3.3. Interlocking des agrégats pendant les essais triaxiaux

Lors de la mise en place et du compactage d'une couche granulaire sur une géogrille, les agrégats pénètrent partiellement dans les ouvertures. Lorsque la charge est appliquée, les grains sont bloqués dans l'ouverture et les forces de butée deviennent effectives (Figure 7). La zone de particules autour de la géogrille se rigidifie et les déplacements latéraux sont réduits.

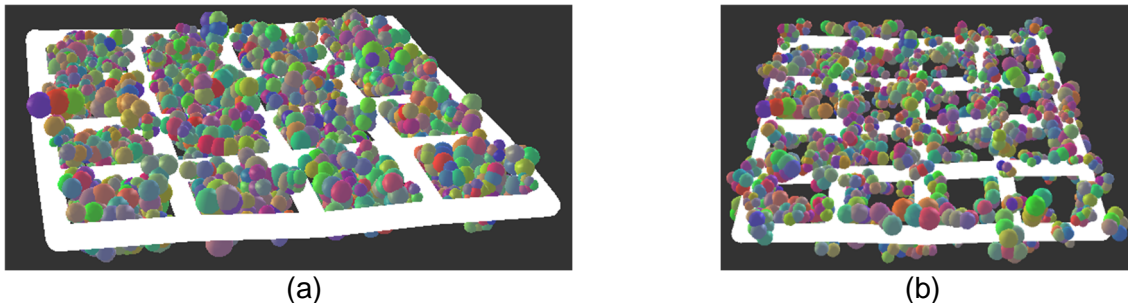


Figure 7. (a) Imbrication des grains dans les ouvertures de la géogrille et (b) Grains reposant sur les nervures de la géogrille au cours de la simulation

Les distributions d'orientation de contact sont largement utilisées pour décrire la microstructure des milieux granulaires à l'échelle du grain. Dans une analyse 2D, l'orientation des normales aux contacts grains/géogrille, obtenus directement à partir de simulations numériques discrètes, sont projetés sur un plan et l'orientation du contact est décrite par une seule composante, généralement l'angle dans ce plan.

Les résultats (Figure 8) correspondent au cas d'un échantillon renforcé par deux géogrilles, sous une pression de confinement de 10 kPa. Autour de la géogrille, la distribution des contacts est uniforme, avec une concentration le long des axes horizontaux x et y . Ce résultat confirme l'imbrication des grains dans les mailles de la géogrille (Figure 7a). La concentration de l'orientation des contacts le long de l'axe z peut être liée à la manière dont les grains interagissent avec les brins de la géogrille (Figure 7b), ainsi qu'aux contacts grain-grain dans cette zone.

Le nombre de contacts entre les grains diminue lors du passage de la phase de compactage à la phase de chargement. Ceci est mis en évidence par le nombre de coordination (nombre de contacts moyen par particules), qui passe de 7,4 (compacté) à 4,6

(chargé). Dans la phase de compactage, le processus consiste à appliquer une pression sur le matériau afin de réduire les vides et d'augmenter les contacts entre les grains. En conséquence, le nombre de contacts entre les grains augmente et le matériau devient plus dense. Au cours de la phase de chargement de l'essai triaxial, le matériau est soumis à des charges externes qui induisent du cisaillement et une déformation volumique de l'échantillon correspondant ici à ce de la dilatance, qui se traduit nécessairement par une réduction du nombre de contacts entre gains.

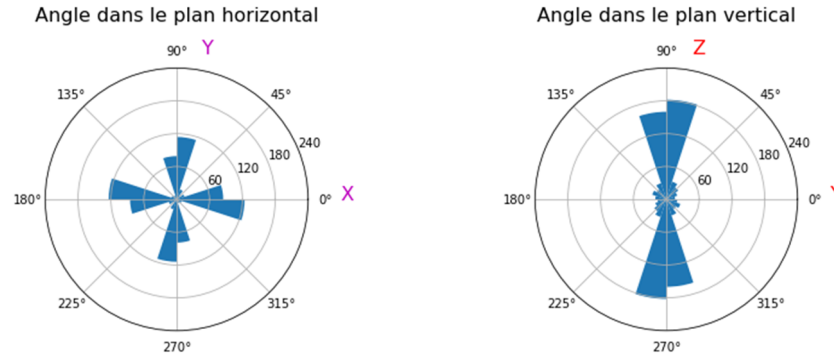


Figure 8. Orientations des contacts locaux entre les grains et la géogrille dans les plans XY et YZ (voir figure 4a)

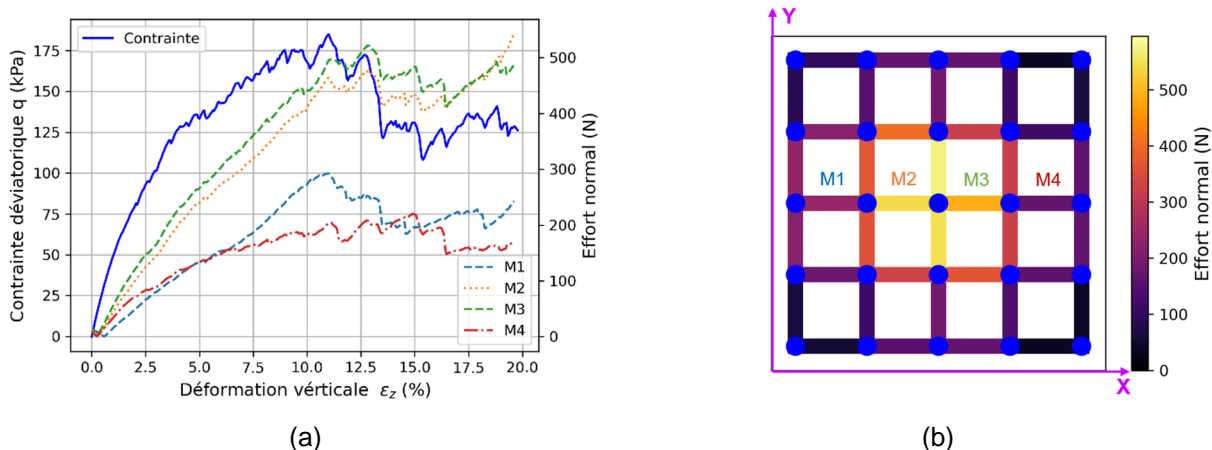


Figure 9. (a) Courbe contrainte-déformation et variation des efforts normaux de la géogrille en fonction de la déformation ; (b) Efforts mobilisés dans la géogrille à la fin de la sollicitation

Les efforts internes des membrures de la géogrille ont également été analysés. La figure 9a illustre la variation de la contrainte déviatorique du milieu (en bleu continu) tracée conjointement avec celle des efforts normaux (colorés et tiretés) des nervures centrales en fonction de la déformation verticale. La figure 9b montre bien que le développement d'efforts dans les membrures se fait essentiellement dans la zone centrale de la géogrille et de manière cohérente avec les observations de la figure 6. En examinant la figure 9a, il est clair qu'une fois l'échantillon soumis à la charge, des efforts de traction sont mobilisés de manière proportionnelle à l'élévation du déviateur, i.e. à la déformation de l'échantillon. Il a également été observé que les forces de contact normales mobilisées (~ 500 N) sont significativement plus élevées que les forces de frottement (~ 70 N), confirmant que les grains sont verrouillés à l'intérieur des ouvertures et induisent des forces de traction dans la géogrille. Ceci est cohérent avec les résultats de Mulabdic et al. (2018) selon lesquels les géogrilles interagissent avec le sol principalement par l'imbrication des particules dans les ouvertures de la géogrille, et moins par le frottement le long de la surface des nervures.

4. Conclusions

Une approche de modélisation discrète de la géogrille en 3D a été fournie pour étudier les mécanismes d'interface géogrille-matériaux granulaires. Les principales caractéristiques de

déformation et de résistance, telles que la résistance à la traction, au cisaillement et en rotation de la géogrille, ont été reproduites par des nœuds et des connexions définis dans le logiciel YADE. Une série d'essais triaxiaux a fourni des résultats intéressants concernant certains aspects importants du renforcement. L'impact de la position et du nombre de géogrilles est examiné, révélant une réduction de la déformation plus marquée lorsque la géogrille est située à mi-hauteur de l'échantillon et encore plus réduits avec deux couches de géogrille. L'analyse de la zone d'influence de la géogrille démontre une redistribution avec augmentation de la contrainte moyenne à proximité de la géogrille. En particulier, la distribution de la contrainte horizontale est concentrée autour des géogrilles et diminue progressivement jusqu'à environ 40 mm de part et d'autre de celles-ci. Par ailleurs, l'analyse des contacts entre les grains révèle une diminution du nombre de contacts pendant le chargement, confirmant la réorganisation du matériau sous contrainte. Autour de la géogrille, la distribution des contacts est concentrée le long des axes x et y, indiquant une imbrication des grains dans les mailles de la géogrille. Ainsi, les efforts internes des nervures de la géogrille confirment que les grains sont verrouillés dans les ouvertures, mobilisant des forces de traction significativement plus élevées que les forces de frottement.

5. Références bibliographiques

- Abu-Farsakh, M. Y., & Chen, Q. (2011). Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(3), 275-288. <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.549565>
- Quintanilla, I. (2018). Multi-scale study of the degradation of railway ballast [These de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <http://www.theses.fr/2018GREAI025>
- Effeindzourou, A., et al. (2016). Modelling of deformable structures in the general framework of the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 143-156.
- Gu, F. (2015). Characterization and performance prediction of unbound granular bases with and without geogrids in flexible pavements (Doctoral dissertation).
- Hussaini, S. (2013). An experimental study on the deformation behaviour of geosynthetically reinforced ballast. University of Wollongong Thesis Collection 1954-2016.
- Mulabdic, M., Minažek, K., & Kaluđer, J. (2018). Geogrids-what is important. In Proc., International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA, Zadar, Croatia.
- Nazzal, M. D. (2007). Laboratory characterization and numerical modeling of geogrid reinforced bases in flexible pavements. 335.
- Palmeira, E. M., & Góngora, I. A. G. (2015). Assessing the influence of some soil–reinforcement interaction parameters on the performance of a low fill on compressible subgrade. Part I : fill performance and relevance of interaction parameters. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1), 1.
- Perkins, S. W. (1999). Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory based pavement test sections (No. FHWA/MT-99-001/8138). Department of Transportation.
- Schuettpelz, C. et al. (2009). Evaluation of the zone of influence and stiffness improvement from geogrid reinforcement in granular materials. *Transportation research record*, 2116(1), 76-84. <https://doi.org/10.3141/2116-11>
- Perkins, S. W. et al. (2004). Development of design methods for geosynthetic reinforced flexible pavements. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA Report Reference Number DTFH61-01-X-00068, 263p.
- V. Šmilauer et al. (2021), Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project. DOI:10.5281/zenodo.5705394 (<http://yade-dem.org/doc/>)
- Yaba, O. (2022). Amélioration des plateformes ferroviaires par géogrilles—Analyse du fonctionnement, de la limitation des déformations et du gain de portance [These de doctorat, Université Grenoble Alpes]. <https://www.theses.fr/2022GRALI050>