

# Confrontation numérique–expérimentale d’un modèle DEM de sol stabilisé par géogridle : essais triaxiaux et tomographie 3D

## Numerical–experimental comparison of a DEM model of geogrid-stabilised soil: triaxial tests and 3D tomography

Ahmad EL AYOUBI<sup>1\*</sup>, Fabrice EMERIAULT<sup>1</sup>, Pascal VILLARD<sup>1</sup>, Luc SIBILLE<sup>1</sup>

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

*\*ahmad.elayoubi@outlook.fr*

**RESUME :** Cette étude présente un modèle DEM destiné à analyser le comportement d’un matériau granulaire renforcé par géogridle. La calibration, fondée sur des essais triaxiaux et des données tomographiques, montre que le modèle reproduit de manière cohérente les mécanismes microscopiques (imbrication, perturbation de la porosité) ainsi que les tendances macroscopiques, malgré une sous-estimation aux faibles confinements. Concernant les variations de volume, les simulations restituent le phasage classique de contractance initiale suivie d’une dilatance, mais avec une dilatance surestimée en raison de la microstructure idéalisée des grains. Après validation, le modèle numérique a été appliqué à un échantillon renforcé de grande taille pour étudier l’influence du renforcement. Les résultats révèlent une sensibilité marquée au taux de confinement, la géogridle étant particulièrement plus efficace pour limiter les déformations latérales et accroître la résistance sous faibles contraintes. L’étude menée sur la géométrie des ouvertures met en évidence un rapport optimum autour de  $b/D_{50} = 5,1$ , qui permet de maximiser la résistance globale mobilisée et l’efficacité du confinement. Le modèle s’avère être également un outil pertinent pour l’optimisation de la géométrie des géogridles et l’analyse détaillée des interactions sol–géogridle.

**ABSTRACT:** This study develops and validates a DEM model intended to analyze the behavior of a granular material reinforced with a geogrid. The calibration, based on triaxial tests and tomographic data, shows that the model consistently reproduces the microscopic mechanisms (interlocking, porosity disturbance) as well as the macroscopic trends, despite an underestimation at low confinement levels. In terms of volumetric behavior, the simulations reproduce the classical sequence of initial contractancy followed by dilatancy, but with an overestimated dilatancy due to the idealized microstructure of the grains. After validation, the model was applied to a large numerical specimen to study the mobilization of the reinforcement. The results reveal a marked sensitivity to the confinement level, with the geogrid being particularly more effective in limiting lateral deformations and increasing strength under low stresses. The study conducted on the aperture geometry highlights an optimum ratio around  $b/D_{50} = 5.1$ , maximizing the mobilized global strength and the confinement efficiency. The model thus provides a relevant tool for the geometric optimization of geogrids and the detailed analysis of soil–geogrid interactions.

**Mots-clés:** matériau granulaire ; renforcement ; géogridle ; modélisation DEM ; tomographie RX.

### 1 INTRODUCTION

La stabilisation des sols granulaires par géogridles constitue une technique largement utilisée en génie civil pour améliorer la résistance et la stabilité des remblais, des routes et des voies ferrées. Ces matériaux composites tirent leur performance des propriétés et de l’interaction complexe entre la matrice granulaire et les éléments de renforcement (rigidité, géométrie et disposition) qui jouent un rôle déterminant dans la mobilisation des contraintes et la limitation des déformations latérales.

Malgré l’intérêt pratique des renforcements par géogridle, la compréhension des mécanismes microscopiques d’interaction sol–géogridle reste

limitée, car leur quantification est difficile à réaliser expérimentalement. Les méthodes d’investigation classiques fournissent des informations sur le comportement global, mais offrent peu de détails sur les interactions locales entre les particules de sol et la géogridle (imbrication, agencement, porosité locale).

Dans ce contexte, les techniques d’imagerie avancées, en particulier la tomographie à rayons X, permettent de caractériser la microstructure 3D et d’identifier les zones d’influence des géogridles, fournissant ainsi des données précieuses pour la compréhension des mécanismes locaux.

Parallèlement, la modélisation par éléments discrets (DEM) constitue un outil adapté pour simuler le comportement des matériaux granulaires à l’échelle

des grains (Cundall et Strack, 1979). Cependant, un modèle DEM nécessite une calibration fine pour produire des résultats réalistes. La calibration à partir de données expérimentales et tomographiques permet de rendre compte à la fois des mécanismes microscopiques et de la réponse macroscopique, offrant ainsi un cadre robuste pour analyser les mécanismes locaux d'interaction sol-géogrille et pour quantifier l'effet des différents paramètres liés aux matériaux et à la géométrie de l'échantillon.

L'objectif de cet article est double : (i) valider un modèle DEM pour un sol granulaire renforcé par géogrille en confrontant les résultats numériques aux essais triaxiaux et à la tomographie 3D, et (ii) exploiter ce modèle pour étudier l'efficacité du renforcement et identifier les géométries optimales, notamment en termes de rapport ouverture/diamètre moyen des grains. Ce travail s'inscrit dans la continuité des études réalisées par El Ayoubi et al. (2024, 2025) et El Ayoubi (2025) basées sur le développement d'un modèle numérique, implémenté dans le logiciel opensource « YADE » (Šmilauer et al., 2021), dédié au dimensionnement des systèmes de renforcement par géogrille et à la compréhension des mécanismes d'interactions sol-géogrille.

## 2 MATERIAUX ET METHODES

### 2.1 Matériau granulaire

Le matériau granulaire réel se compose d'agrégats calcaires à granulométrie uniforme caractérisée par un coefficient d'uniformité  $C_u$  de 1,5 et une taille médiane des particules  $D_{50}$  d'environ 10,4 mm (Figure 1).

Pour les simulations numériques, les grains sont représentés par des « clumps », c'est-à-dire des agrégats de sphères se chevauchant et agissant comme un corps rigide unique. Cette approche permet d'obtenir un compromis satisfaisant entre coût de calcul et description de la forme des grains. Afin de caractériser la morphologie des particules, cinq grains représentatifs, notés de « a » à « e », ont été sélectionnés (Figure 2). La Figure 2 illustre les grains réels et les « clumps » ainsi générés. Pour chaque grain et clump numérique, des mesures de forme ont été réalisées, lesquelles serviront à l'analyse morphologique présentée en Section 3.1.

Les particules sont modélisées comme un matériau purement frictionnel dont les propriétés mécaniques sont résumées dans le Tableau 1. Les paramètres microscopiques retenus comprennent l'angle de frottement interparticulaire  $\phi_{int}$ , le module de contact  $E_c$  et le rapport de rigidités tangentielle et normale de contact  $K_T/K_N$ . Ces grandeurs contrôlent les

interactions granulaires dans le cadre du modèle de contact élastoplastique linéaire de Cundall et Strack (1979), où la rigidité normale  $K_N$  est constante et définie à partir du module de contact  $E_{ci}$  et du rayon  $r_i$  des deux particules en contact, comme indiqué par l'équation (1). Ces paramètres permettent de modéliser un matériau granulaire dont l'angle de frottement interne est de  $30^\circ$ .

$$K_N = 2 \frac{E_{c1}r_1 \cdot E_{c2}r_2}{E_{c1}r_1 + E_{c2}r_2} \quad (1)$$

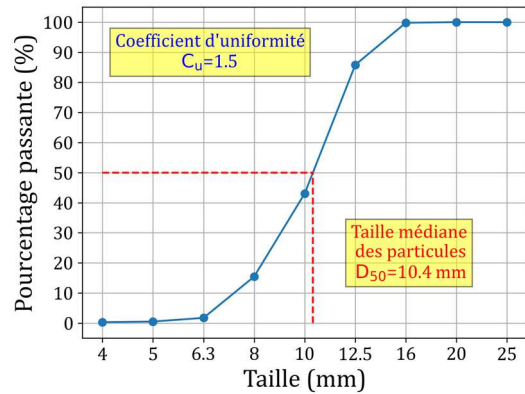


Figure 1. Distribution granulométrique du matériau granulaire

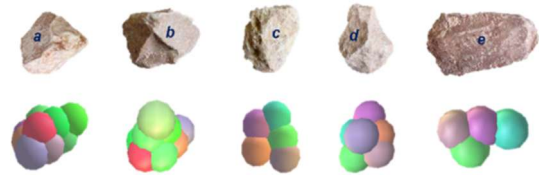


Figure 2. Agrégats simulés basés sur la reproduction géométrique des grains réels

Tableau 1. Propriétés microscopiques des agrégats numériques

Paramètre	Valeur	Unité
$\phi_{int}$	30	°
$E_c$	$10^8$	N/m <sup>2</sup>
$K_T/K_N$	0,5	-

### 2.2 Géogrille

Le renforcement utilisé est une géogrille biaxiale, présentant une maille carrée de 40 mm centre-à-centre (Figure 3.a). Ses propriétés mécaniques principales comprennent : 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. Les nervures présentent une largeur moyenne de 8 mm et une épaisseur d'environ 1 mm.

Pour les simulations numériques, la géogrille est modélisée selon l'approche simplifiée proposée par Effeindzourou et al. (2016) (Figure 3.b). Dans cette représentation, les nervures sont constituées de nœuds

interconnectés par des cylindres agissant comme des éléments poutre dont le comportement est linéaire élastique parfaitement plastique. La rigidité normale interne  $K_n$  d'une nervure est définie à partir du module d'Young  $E$ , de la longueur  $L$  et de la section  $A$  de l'élément, conformément à l'équation (2).

$$K_n = \frac{E \cdot A}{L} \quad (2)$$

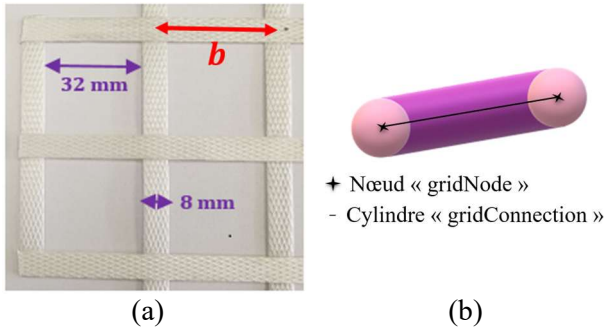


Figure 3. (a) Géogrille biaxiale réelle ; et (b) Représentation numérique d'une nervure

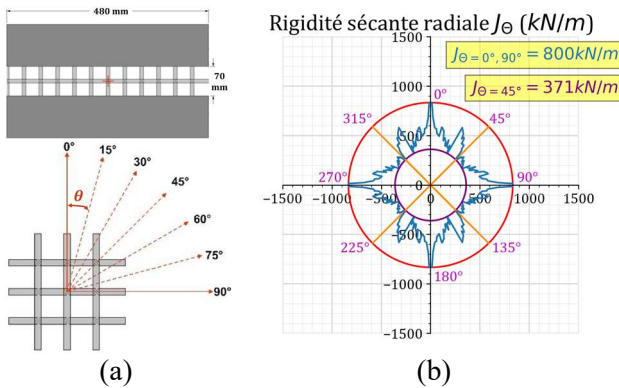


Figure 4. (a) Illustration du schéma d'essai de traction sur géogrille ; et (b) Caractérisation de la rigidité sécante radiale à 0,5 % de déformation pour la géogrille simulée

Le modèle numérique a été calibré conformément à la norme EN ISO 10319. La procédure consiste à réaliser une série d'essais de traction sur des échantillons de géogrille, de longueur effective 70 mm (définie dans la direction de traction) et de largeur 480 mm. Différentes inclinaisons  $\theta$  de l'échantillon par rapport à l'axe vertical (Figure 4.a) ont été testées permettant de calculer les rigidités radiales  $J_\theta$  à 0,5 % de déformation (définies comme le rapport entre la résistance à la traction  $T_\theta$  et la déformation  $\varepsilon_\theta = 0,5 \%$  correspondante) selon l'équation (3).

$$J_\theta = \frac{T_\theta}{\varepsilon_\theta} \quad (3)$$

Les résultats présentés par la Figure 4.b, obtenus en considérant  $E = 6,12 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  et  $A = 50,3 \text{ mm}^2$ , montrent que le modèle numérique reproduit

correctement la réponse mécanique attendue d'une géogrille biaxiale. La rigidité axiale recherchée de  $J = 800 \text{ kN/m}$  est bien restituée le long des deux directions principales ( $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$ ). La rigidité radiale minimale est obtenue pour  $\theta = 45^\circ$ , avec une valeur d'environ  $371 \text{ kN/m}$ , légèrement inférieure à la référence expérimentale du producteur ( $440 \text{ kN/m}$ ).

### 2.3 Préparation de l'échantillon

La confrontation numérisation–expérimentation a été réalisée en considérant des essais de compression triaxiale menés sur des échantillons de petite taille, de 70 mm de diamètre et 140 mm de hauteur (Figure 5). Les échantillons expérimentaux et numériques suivent le même protocole de préparation : dépôt gravitaire puis compactage en quatre couches de même hauteur. Par soucis d'efficacité, l'échantillon numérique est généré dans un parallélépipède délimité par six parois rigides. Bien que la géométrie diffère, cette approche garantit une génération stable de l'échantillon et une application contrôlée des contraintes, assurant un état de contrainte macroscopiquement équivalent à un essai triaxial de révolution en l'absence de localisation des déformations.

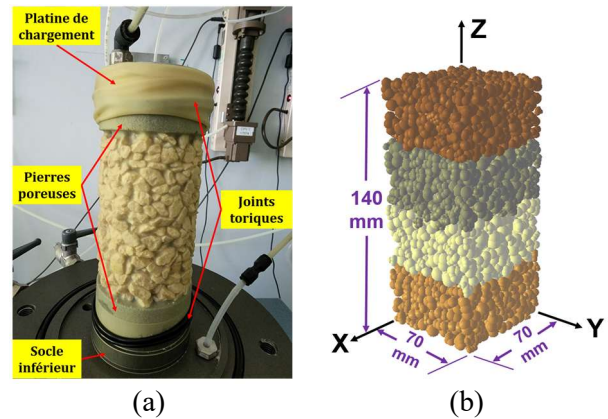


Figure 5. Échantillons étudiés : (a) expérimental, et (b) numérique

Afin de reproduire les conditions expérimentales, la masse volumique sèche  $\rho_d$  cible est fixée à  $1590 \text{ kg/m}^3$ , ce qui correspond à une porosité  $n$  de 0,40, en supposant une masse volumique absolue  $\rho_s$  des grains égale à  $2650 \text{ kg/m}^3$ , valeur usuellement admise pour des granulats calcaires. Le nombre total de particules est d'environ 800 particules.

Les particules sont d'abord déposées sans frottement afin d'obtenir un état dense. Le compactage est ensuite assuré par une plaque mobile appliquant un déplacement vertical constant, permettant d'obtenir des couches régulières, uniformément densifiées, avec une surface plane. Après compactage de la dernière

couche, les contraintes de confinement sont imposées via les parois latérales. Une phase de stabilisation est ensuite réalisée, avant l'application du chargement déviatorique, obtenu par le déplacement contrôlé des parois horizontales hautes et basses.

### 3 VALIDATION DE L'ETAT DE LA MICROSCRUTURE NUMERIQUE A PARTIR DE L'IMAGERIE 3D

Parmi les techniques d'imagerie avancées, la tomographie par rayons X se distingue comme un outil non destructif et informatif. Elle permet la visualisation tridimensionnelle et la quantification des phénomènes à l'échelle du grain en exploitant le contraste d'atténuation des rayons X entre les phases solides et les phases vides.

Dans cette étude, la tomographie est utilisée pour faire le lien entre les observations expérimentales et le réalisme du modèle numérique. Les scans ont été menés au laboratoire 3SR (Grenoble, France) sur un échantillon confectionné à partir de la procédure de préparation décrites précédemment (Figure 6). L'échantillon intègre trois niveaux successifs de géogrille, afin d'observer la structure interne à l'état non chargé et d'évaluer l'influence locale de chaque nappe sur l'agencement granulaire. Compte tenu du diamètre réduit de l'échantillon, la largeur disponible ne permet d'intégrer qu'une seule maille complète de géogrille, ce qui impose certaines limitations géométriques mais demeure suffisant pour des conclusions préliminaires.



Figure 6. Photographie de l'échantillon scanné montrant l'installation d'une maille de géogrille

#### 3.1 Morphologie des grains

L'imagerie 3D permet de vérifier la représentativité du modèle numérique, et en particulier la capacité des « clumps » (agrégats de sphères) à reproduire les morphologies réelles observées pour les grains sélectionnés (formes « a » à « e »).

Les paramètres de forme des matériaux granulaires numériques et expérimentaux ont été évalués à l'aide de la méthode du diagramme de Zingg (1935). Cette

méthode consiste à inscrire le grain dans un prisme rectangulaire afin de déterminer ses trois longueurs caractéristiques : épaisseur  $S$ , largeur  $I$  et longueur  $L$ . A partir de ces grandeurs, deux indicateurs géométriques ont été calculés : le rapport d'élongation ( $ER = I/L$ ) et le rapport de planéité ( $FR = S/I$ ). Ces rapports permettent de classer les particules en quatre catégories morphologiques (lames, tiges, disques et sphéroïdes) en utilisant des seuils standards fixés à  $2/3$  (Figure 7).

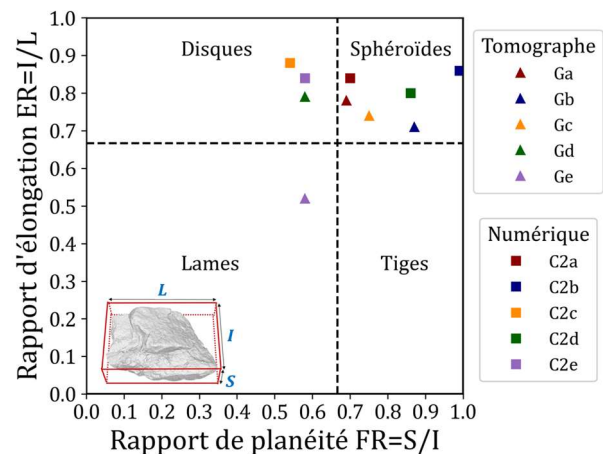


Figure 7. Analyse de la forme des grains étudiés selon la classification de Zingg (1935) et comparaison entre les grains réels et numériques

Les résultats issus de la tomographie indiquent que la plupart des grains choisis ont des formes s'approchant de sphéroïdes et de disques, avec une prédominance de formes presque sphériques. La comparaison entre les agrégats réels et leurs correspondants numériques a montré une concordance satisfaisante, les particules simulées appartenant à la même catégorie de forme, à savoir des sphéroïdes et des disques. Cela confirme que les clumps générés représentent de manière adéquate les morphologies de grains ciblées.

#### 3.2 Imbrication locale des grains dans les mailles

L'imagerie 3D permet d'estimer la capacité d'imbrication mécanique entre les grains et les mailles. Le rapport entre la taille des ouvertures de la géogrille  $b$  et le diamètre moyen des grains  $D_{50}$ , noté  $b/D_{50}$ , constitue un paramètre clé dans l'étude des interactions sol-géogrille. Au sein d'une maille, le décompte des grains a été effectué sur des coupes 2D tomographiques prises au niveau de la géogrille, en gardant à l'esprit les limites inhérentes à la nature tridimensionnelle des grains.

La Figure 8 montre que, pour les deux approches (expérimentale et numérique), on identifie en moyenne

trois à quatre grains visibles le long de chaque direction de l'ouverture. Cette estimation est en accord avec la valeur cible de  $b/D_{50} = 3,8$ , et cohérente avec les recommandations de la littérature concernant les conditions d'imbrication optimales (Mulabdić et al., 2018). Ce résultat confirme que la configuration retenue permet une interaction mécanique représentative entre le sol et la géogrille, condition essentielle pour reproduire numériquement les mécanismes d'interaction locale.

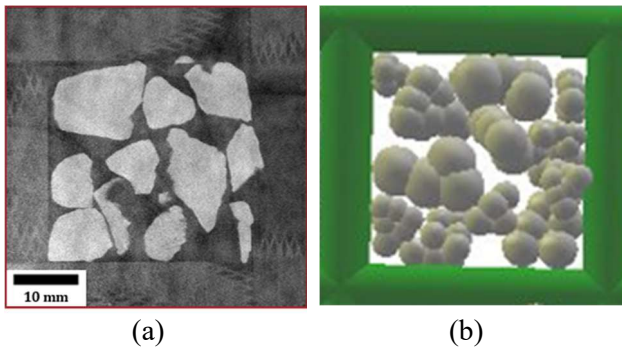


Figure 8. Coupes horizontales au niveau de la géogrille : (a) image en niveaux de gris et (b) modèle numérique illustrant l'imbrication des grains dans les ouvertures

### 3.3 Investigation préliminaire de la porosité locale par niveau de gris

La réorganisation locale de l'arrangement granulaire à proximité des mailles de la géogrille, peut également se manifester par des variations de porosité. Afin de caractériser plus finement cette influence de la géogrille sur la microstructure, une analyse complémentaire des profils moyens de niveaux de gris, extraits le long de l'axe vertical d'un échantillon compacté sans chargement mécanique, a été réalisée à partir des images tomographiques (Figure 9).

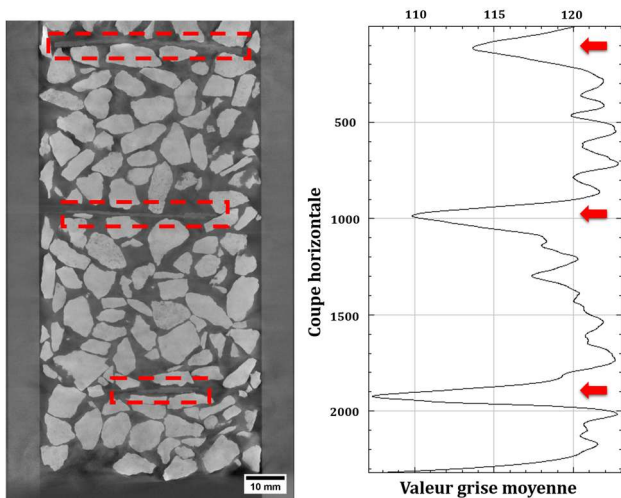


Figure 9. Evolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale le long de la hauteur de l'échantillon

Le profil obtenu présente trois chutes nettes de la valeur moyenne du niveau de gris, chacune correspondant à l'emplacement d'une nappe de géogrille. Chaque décroissance s'étend sur un minimum de 100 coupes tomographiques (1 coupe = 1 pixel = 50  $\mu\text{m}$ ) de part et d'autre de la position centrale de la nappe, ce qui représente une zone perturbée de l'ordre de  $\pm 5 \text{ mm}$  ( $\approx \pm 0,5 D_{50}$ ) autour du plan de la géogrille. En dehors de ces régions directement influencées par les nappes, les valeurs moyennes des niveaux de gris demeurent relativement homogènes, traduisant une structure granulaire globalement régulière. Ces variations localisées confirment ainsi une détection indirecte mais robuste de la perturbation du champ de densité induite par la présence de la géogrille.

## 4 ANALYSE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ECHANTILLONS NON RENFORCES

Après avoir vérifié que l'agencement des particules numériques était conforme aux observations expérimentales, il est désormais possible de calibrer les paramètres micromécaniques des lois d'interaction de telle sorte à ce que le modèle numérique retranscrive correctement le comportement du matériau granulaire réel.

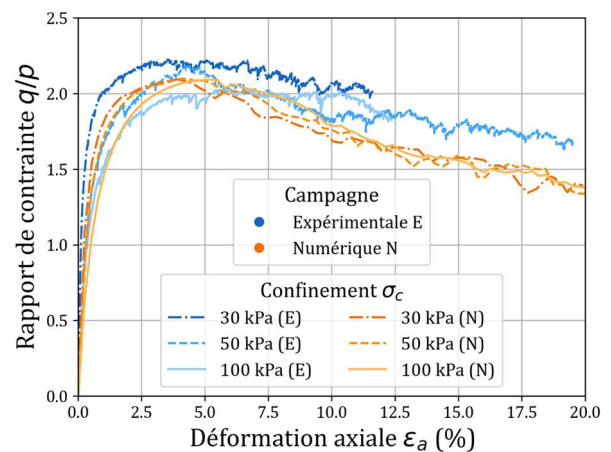


Figure 10. Evolution du rapport de contraintes  $q/p$  issue des essais expérimentaux et des simulations numériques

La calibration du modèle DEM repose sur la comparaison directe entre les évolutions du rapport de contrainte  $q/p$ , défini comme le rapport entre la contrainte déviatorique  $q$  et la contrainte moyenne  $p$ , obtenues numériquement et celles mesurées lors des essais triaxiaux expérimentaux réalisés sous trois niveaux de confinement  $\sigma_c$  : 30, 50 et 100 kPa (Figure 10). Ce paramètre, couramment utilisé comme indicateur classique de la mobilisation du cisaillement

de l'échantillon par rapport à l'état isotrope (Aboul Hosn et al., 2017), permet d'estimer la résistance au pic et le niveau de résistance résiduelle de l'échantillon granulaire.

Les valeurs maximales expérimentales de  $q/p$  atteignent respectivement 2,23, 2,18 et 2,03 pour des confinements de 30, 50 et 100 kPa. Le modèle numérique restitue correctement la forme générale de la courbe, avec une montée progressive vers le pic suivie d'un adoucissement. Toutefois, la valeur numérique du maximum reste légèrement inférieure ( $q/p \approx 2,09$  pour les trois confinements). Aux faibles confinements, on observe une sous-estimation du pic numérique et de la pente initiale, confirmant les limites du modèle linéaire associé à la faible angularité des grains simulés. En revanche, la correspondance est satisfaisante pour le confinement de 100 kPa.

En phase post-pic, les simulations tendent vers une valeur asymptotique de  $q/p \approx 1,37$ , inférieure à la valeur expérimentale résiduelle estimée autour de 1,65. Cet écart est principalement attribuable à la morphologie simplifiée des grains numériques (agrégats de sphères), qui ne reproduisent pas les mécanismes de résistance au roulement liés à la forme anguleuse des grains et qui sont responsables du maintien d'une résistance résiduelle élevée. L'analyse du comportement volumique confirme ces observations : le modèle DEM reproduit bien le phasage contractance-dilatance caractéristique d'un matériau granulaire dense soumis au cisaillement, mais surestime nettement l'amplitude de la dilatance, conséquence de la microstructure idéalisée.

Malgré ces écarts aux faibles confinements, le modèle basé sur des agrégats de sphères, calibré sous 100 kPa, parvient à reproduire de manière satisfaisante la rigidité initiale, la résistance au pic et l'évolution qualitative du comportement post-pic. Ce compromis entre réalisme mécanique et coût numérique justifie l'utilisation du modèle numérique pour des analyses plus approfondies menées sur les interactions sol-géogridde.

## 5 ANALYSE MECANIQUE DU MATERIAU GRANULAIRE RENFORCE : APPORTS DU MODELE DEM

Ayant calibré le modèle numérique avec les données tomographiques et les essais triaxiaux, il est désormais possible d'exploiter ce modèle pour analyser en détail le comportement mécanique d'un matériau granulaire renforcé par géogridde.

L'étude porte ici sur un échantillon numérique cubique de grande taille dont les côtés mesurent 200 mm, comprenant 10 400 grains et présentant une

porosité initiale de 0,34 (Figure 11). Dans la littérature, la position optimale de la nappe de géogridde au sein de la hauteur de l'échantillon varie selon les configurations et les mécanismes de renforcement considérés. Dans une étude antérieure menée sur ce même modèle (El Ayoubi et al., 2024), la position la plus efficace a été identifiée à mi-hauteur, conduisant au meilleur gain de résistance par rapport au cas non renforcé. Cette condition optimale est retenue ici comme configuration de référence.

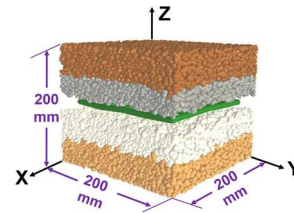


Figure 11. Echantillon simulé avec une géogridde placée à mi-hauteur

### 5.1 Mobilisation de la géogridde en fonction du taux de confinement

Avant d'analyser l'influence de différents paramètres, il convient de vérifier, dans un premier temps, le rôle de la contrainte de confinement  $\sigma_c$ . Cette étape préliminaire permet de préciser dans quelle mesure l'efficacité du renforcement dépend du niveau de confinement, notamment dans le domaine des faibles contraintes, particulièrement représentatif des conditions de service dans certaines applications (couches de ballast, sols faiblement confinés).

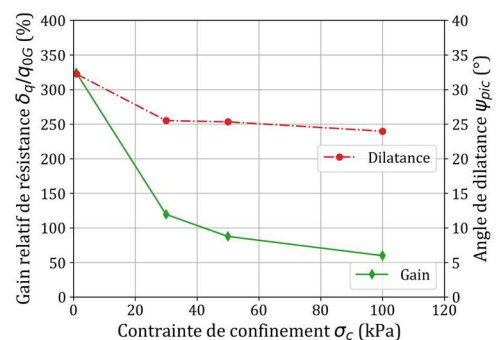


Figure 12. Gain relatif de résistance et angle de dilatance au pic en fonction de la contrainte de confinement

La Figure 12 présente les résultats obtenus pour les échantillons renforcés par géogridde, pour différents niveaux de confinement : 1, 30, 50 et 100 kPa. Ils permettent de calculer le gain relatif de résistance  $\delta q / q_{0G}$  au pic, défini comme le rapport entre le gain de résistance au pic  $\delta q$  et la contrainte au pic de la configuration sans géogridde  $q_{0G}$ .

Ce gain est de 324 % à 1 kPa et diminue de manière asymptotique jusqu'à 60 % à 100 kPa. Cette tendance

confirme que la géogrille compense la faiblesse intrinsèque du matériau peu contraint en apportant un confinement additionnel.

Parallèlement, les mesures de l'angle de dilatace au pic montrent une évolution également cohérente : il atteint  $32^\circ$  à 1 kPa, puis chute à environ  $25^\circ$  pour les confinements de 30, 50 et 100 kPa. La réduction progressive de la dilatace traduit une diminution des déplacements relatifs grains/géogrille lorsque le confinement croît, ce qui atténue mécaniquement l'effet bénéfique de la géogrille.

Ces observations confirment que l'efficacité relative des renforcements par géogrilles est d'autant plus marquée que le confinement est faible, et qu'elle tend à décroître à mesure que la résistance propre du sol non renforcé augmente.

## 5.2 Influence sur la résistance mécanique de l'échantillon renforcé du rapport $b/D_{50}$

L'analyse présentée dans cette section vise à évaluer l'influence de la taille des ouvertures de la géogrille sur l'efficacité du renforcement sous un confinement de 100 kPa. L'échantillon étudié, de section  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ , intègre une géogrille de référence dont la surface effective ( $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ) comprend 16 mailles carrées, correspondant à un rapport géométrique  $b/D_{50} = 3,8$ .

Afin d'isoler l'effet spécifique de la taille des ouvertures, trois configurations de géogrilles ont été générées (Figure 13), de telle sorte à ce qu'elles ne diffèrent que par la largeur de maille. Pour chacune d'elles, la surface effective, la rigidité globale et l'épaisseur des nervures (8 mm) ont été strictement conservées. Les rapports  $b/D_{50}$  associés s'échelonnent entre 3,1 et 7,7.

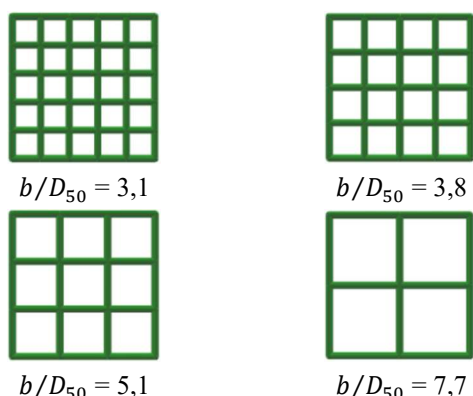


Figure 13. Géométries des géogrilles étudiées

Les résultats principaux sont présentés à la Figure 14 sous forme de gain relatif de résistance et de déformations latérales  $\varepsilon_x$  mesurées à deux niveaux de contrainte déviatorique ( $q = 648 \text{ kPa}$  et  $q = 970 \text{ kPa}$ ).

Les performances mécaniques de ces différentes configurations apparaissent globalement proches, avec un optimum marqué pour le rapport  $b/D_{50} = 5,1$  (Figure 14.a). Ainsi, bien que l'apport de la géométrie des mailles soit peu prononcé, l'ouverture de maille correspondant à un rapport  $b/D_{50} = 5,1$  semble la plus efficace, pour la gamme d'ouvertures étudiées, en favorisant une meilleure imbrication des grains au sein des ouvertures et une mobilisation optimale du renforcement.

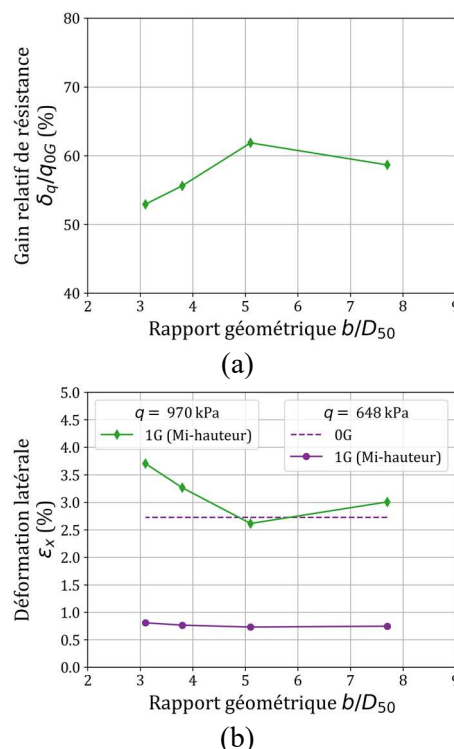


Figure 14. Evolution (a) du gain relatif de résistance et (b) de la déformation latérale de l'échantillon en fonction de la taille des ouvertures

Concernant les déformations latérales (Figure 14.b), pour le niveau de contrainte  $q = 648 \text{ kPa}$  correspondant au pic de l'échantillon non renforcé, on constate que la géogrille réduit significativement les déformations. Sans renforcement, celles-ci atteignent  $\varepsilon_x = 2,7 \%$ , tandis qu'avec géogrille elles se limitent à  $\varepsilon_x = 0,75 \%$  en moyenne, soit une réduction d'environ 3,6 fois. A un niveau de contrainte plus élevé ( $q = 970 \text{ kPa}$ , proche du pic de l'échantillon renforcé par géogrille), le rapport  $b/D_{50} = 5,1$  se singularise à nouveau avec la plus faible valeur de déformation latérale ( $\varepsilon_x = 2,6 \%$ ), confirmant son rôle d'optimum pour le matériau granulaire retenu. Ce résultat présente une tendance intermédiaire, située entre deux gammes de valeurs rapportées dans la littérature : une plage couramment mentionnée entre 1 et 4 (Mulabdić et al., 2018), et des valeurs plus élevées, comprises entre 7 et 12 (Ahmadi et Moghadam, 2017).

## 6 CONCLUSIONS

L'étude présentée met en évidence la capacité du modèle DEM à reproduire de manière cohérente et représentative le comportement d'un matériau granulaire renforcé par géogrid, en accord avec les observations expérimentales issues des essais triaxiaux et des analyses tomographiques, en dépit des simplifications inhérentes à la représentation des nervures et au choix de la loi de contact.

Sur le plan microscopique, la confrontation numérique–expérimentale montre que le modèle DEM est capable de représenter assez fidèlement la morphologie des grains, la qualité de l'imbrication locale dans les mailles, ainsi que les variations de porosité du squelette granulaire au niveau de la géogrid. L'analyse d'échantillons de plus grand diamètre permettrait d'approfondir l'évaluation d'un éventuel effet sur la microstructure initiale.

Sur le plan macroscopique, la réponse numérique rend compte de manière satisfaisante des tendances observées expérimentalement, conduisant à une bonne correspondance globale pour des confinements élevés ( $\sigma_c = 100$  kPa).

Une fois cette validation acquise, le modèle a été appliqué à des échantillons renforcés de grande taille. Les simulations montrent une contribution significative de la géogrid à la limitation des déformations latérales et à l'augmentation de la résistance mobilisée. Cette mobilisation est particulièrement marquée sous faibles confinements.

Par ailleurs, l'étude menée sur la taille des ouvertures révèle l'existence d'un optimum mécanique autour de  $b/D_{50} = 5,1$ , maximisant l'efficacité de confinement latéral apporté par la géogrid pour les conditions mécaniques et géométriques considérées. Cette tendance permet de confirmer l'intérêt d'une optimisation géométrique des géogrids en fonction de la granulométrie du sol. Une analyse paramétrique plus étendue pourrait conduire à une évolution de cet optimum en fonction du confinement effectif ou des propriétés mécaniques du système sol–géogrid.

En résumé, l'approche numérique développée constitue un outil robuste pour l'analyse et l'optimisation du renforcement des sols par géogrid. Elle permet d'explorer quantitativement des aspects difficiles à évaluer expérimentalement, tels que les modes de transferts d'effort entre le sol et la géogrid. Ces avancées enrichissent la compréhension des interactions sol–géogrid, orientent le dimensionnement des systèmes de renforcement et ouvrent la voie à l'application du modèle à des conditions géotechniques plus complexes.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'École Doctorale I-MEP<sup>2</sup> et Grenoble INP pour le financement apporté à la thèse du premier auteur et les équipes du laboratoire 3SR à Grenoble pour la réalisation des campagnes de tomographie, ainsi que pour leur expertise dans l'acquisition et le traitement des données expérimentales.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboul Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., & Chareyre, B. (2017). Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction. *Granular Matter*, 19(4), 4. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0687-0>
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Effeindzourou, A., Chareyre, B., Thoeni, K., Giacomini, A., & Kneib, F. (2016). Modelling of deformable structures in the general framework of the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.07.015>
- El Ayoubi, A., Emeriault, F., Villard, P., & Sibille, L. (2024). Investigation des interactions à l'échelle locale entre un milieu granulaire et une géogrid–DEM 3D, dans : *12ème JNGG*, Poitiers, France.
- El Ayoubi, A., Emeriault, F., Villard, P., & Sibille, L. (2025). Effects of grains characteristics and geogrid shape and rigidity on the behaviour of reinforced granular soil– 3D DEM study. *Revue Française de Géotechnique*, (184), 7. <https://doi.org/10.1051/geotech/2025021>
- El Ayoubi, A. (2025). *Micro-mécanique de l'interaction milieu granulaire-géogrid souple sous chargement complexe - Investigation expérimentale et numérique*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, France.
- Mulabdic, M., Minažek, K., & Kaluđer, J. (2018). Geogrids—What is important. In *5th CETRA*, Zadar, Croatia, 215-221. <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2018.934>
- Saleh Ahmadi, M., & Nikbakht Moghadam, P. (2017). Effect of geogrid aperture size and soil particle size on geogrid-soil interaction under pull-out loading. *Journal of textiles and polymers*, 5(1), 25-30.
- Šmilauer, V. et al. (2021), Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project. DOI:10.5281/zenodo.5705394
- Zingg, T. (1935). *Beitrag zur schotteranalyse*. PhD Thesis, ETH Zurich.