

MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'ESSAIS D'EXTRACTION DE GÉOGRILLES

NUMERICAL MODELLING OF GEOGRID PULLOUT TESTS

Marcus GUADAGNIN MORAVIA^{1,2}, Pascal VILLARD², Delma DE MATTOS VIDAL¹

1 *Inst. Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brésil*

2 *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France*

RÉSUMÉ – Ce travail est basé sur un modèle numérique de géogridde impliquant des éléments discrets déformables. Cette approche permet au modèle de prendre en compte le caractère continu des nervures de la géogridde et d'éviter certains problèmes numériques tels que la rugosité numérique de la surface des géogrilles, comme c'est le cas lorsque la grille est discrétisée par un ensemble de sphères. Les études proposées impliquent des comparaisons entre des simulations de l'essai d'extraction de géogrilles confinées dans un milieu granulaire constitué de particules sphériques ou non sphériques. Le modèle numérique a démontré toute son aptitude pour étudier le problème traité et les résultats obtenus sont cohérents avec le comportement attendu du renfort géosynthétique.

Mots-clés : Géogridde, Méthode des Eléments Discrets, Renforcement des sols, Essai d'extraction.

ABSTRACT – This work uses a geogrid model that comprises deformable discrete elements. This approach allows the model to take into account the continuous nature of the geogrid ribs and avoids numerical problems, such as artificial numerical roughness on the surface of the geogrids, as is the case of the grid modelled by a set of clumped spheres. The studies comprise comparisons between pull-out test simulations of geogrids embedded in samples of granular material consisting of spherical and non-spherical particles. The results obtained are consistent with the expected behaviour of the geosynthetic reinforcement, and the numerical model demonstrated all its ability to study the problem treated.

Keywords: Geogrids, Discrete Element Method, Reinforcement soil layers, Geogrid pull-out test.

1. Introduction

L'utilisation de géogrilles pour renforcer les couches de sol granulaires est une technique largement utilisée dans les ouvrages géotechniques en raison des avantages économique et environnemental qu'elle représente. Bien que la littérature rende compte de nombreuses études dédiées au comportement des structures renforcées par des géogrilles, la connaissance des mécanismes d'interaction reste incomplète. En particulier ceux liés aux micro-mécanismes, qui sont pourtant cruciaux pour optimiser le dimensionnement. Le comportement complexe de ces structures dépend, entre autres aspects, des mécanismes d'interaction entre les particules du matériau granulaire et les nervures longitudinales et transversales de la géogridde (par exemple, le frottement, le roulement des grains et l'imbrication entre les particules de sol et les mailles du renfort). L'étude expérimentale de ces mécanismes est difficile compte tenu du manque de dispositifs expérimentaux capables d'évaluer le comportement localisé entre les particules du matériau granulaire et les éléments constitutifs de la géogridde. D'autre part, l'approche numérique représente une option robuste, adaptable et économique pour l'étude et le développement de ce type de problème. De par leur facilité d'utilisation et malgré certains inconvénients inhérents à leur formulation (nombre de paramètres, modélisation complexe du comportement d'interface), certains modèles continus, tels que les modèles avancés d'état critique basés sur la théorie des milieux continus de Cosserat, sont parfois utilisés pour modéliser les tests d'extraction de géogrilles. En comparaison avec ces approches, la Méthode des Eléments Discrets – MED (Cundall et Strack, 1979) permet de modéliser le comportement complexe du sol et son interaction avec les éléments structuraux, en utilisant un nombre relativement restreint de paramètres. La nature granulaire du matériau a un impact décisif sur les mécanismes d'interaction avec le renfort géosynthétique et, par conséquent, sur le comportement mécanique des couches de sol renforcées par géogridde. Un modèle MED permet de considérer les contacts entre particules et, ainsi, de représenter numériquement cette nature caractéristique du sol.

Afin de contribuer à la compréhension de l'interaction entre le sol et la géogridde, une étude paramétrique d'essais d'extraction de géogrilles a été menée grâce à un modèle MED tridimensionnel.

L'un des objectifs de ce travail est de comparer les simulations numériques pour lesquelles on a fait varier la taille et la géométrie des particules (particules sphériques et non sphériques). La méthodologie comprend la préparation des échantillons numériques en utilisant la procédure *Radius Expansion - Friction Decrease* – REFD (Chareyre et Villard, 2002 ; Salot et al., 2009) pour obtenir des ensembles granulaires denses et permettre la mise en place de la géogrille (à mi-hauteur de l'échantillon). Les tests d'extraction ont été menés jusqu'à l'extraction partielle de près de la moitié de la géogrille afin d'accéder au comportement au pic et d'explorer le comportement en grandes déformations de la grille. Les essais ont permis d'estimer la force d'extraction en fonction du déplacement en tête du renfort ainsi que les efforts dans différentes sections des nervures longitudinales et transversales.

Nous présenterons successivement dans cet article : la procédure expérimentale et les mécanismes d'interaction liés à la réalisation d'un essai d'extraction de géogrilles, l'approche DEM utilisée et la description du modèle numérique spécifique à la modélisation des géogrilles, les résultats obtenus et les principales conclusions.

2. Essai d'extraction de géogrilles

En raison de sa configuration relativement simple, l'essai d'extraction est couramment utilisé pour évaluer l'interaction entre un matériau granulaire et une géogrille. Cet essai consiste en une extraction partielle de la géogrille, insérée dans un sol compacté, à vitesse de déplacement constante. Dans un test typique (ASTM D6706-01, 2001), une vessie avec de l'air ou de l'eau applique une pression de confinement à la surface du sol. En appliquant une charge axiale directement en tête du renfort, il est possible d'extraire la géogrille de l'échantillon. Les mesures durant l'essai, des forces appliquées en tête, des déplacements et des déformations de la géogrille permettent d'appréhender les mécanismes d'interaction. Néanmoins, il est important de noter que les conditions de chargement entre les essais d'extraction et un cas réel peuvent être différentes. Par exemple, dans le cas des remblais ou encore des chaussées renforcées à leurs bases, c'est le matériau granulaire qui se déplace et sollicite la géogrille et non l'inverse comme dans l'essai d'extraction.

Les structures renforcées par géogrille ont un comportement complexe et il est souvent difficile d'appréhender lors d'un essai d'extraction expérimental les mécanismes d'interaction entre les particules de sol et les éléments de renforcement, comme par exemple le frottement, le roulement des grains et la butée du sol au voisinage de la géogrille, en raison de la concentration des contraintes pendant l'essai. Par ailleurs, l'approche numérique représente une alternative intéressante pour l'évaluation et le développement de ce type de problème car elle permet d'accéder à des informations locales fondamentales pour comprendre le comportement de l'interface sol-renforcement. Ainsi, ci-dessous, un aperçu de l'état de l'art est exposé en considérant des études expérimentales et numériques sur le sujet. Une description générale des principales approches de modélisation de géogrilles prenant en compte la MED est également présentée.

2.1. Interaction sol-renfort

Une meilleure compréhension de l'interaction sol-renfort peut conduire à des améliorations du dimensionnement pour de multiples applications impliquant le renforcement du sol. Dans la littérature de nombreux travaux abordent cette problématique. Par exemple, Palmeira et Milligan (1989) ont collecté un ensemble de résultats d'essais d'extraction de grille pour étudier les facteurs multiples qui peuvent influencer sur les résultats. Généralement, les courbes force-déplacement d'essais d'extraction montrent des tendances communes, imputables aux mécanismes de transfert des efforts entre le sol et le renfort. Pour exemple, sur les courbes de la Figure 1, Wang et al. (2016) et Taghavi et al. (2017) mettent en évidence la contribution des nervures transversales de la géogrille à la résistance totale à l'extraction. Le comportement usuel suit une augmentation de la force de traction jusqu'à une valeur maximale lorsque le renforcement commence à se déplacer au sein de l'échantillon. Après le pic, les forces d'extraction ont tendance à diminuer car la longueur du renfort à l'intérieur de l'échantillon diminue également.

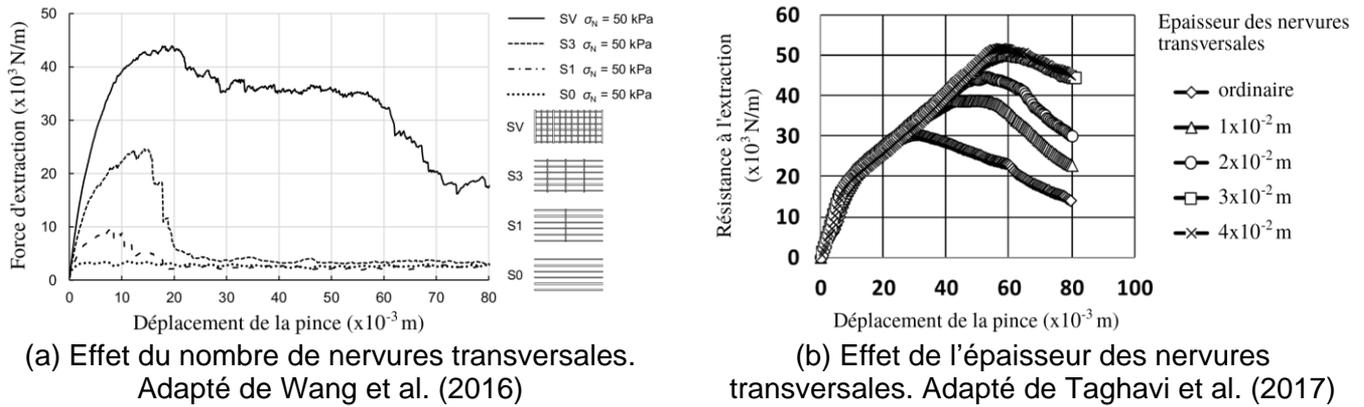


Figure 1. Résultats d'essais d'extraction de géogrilles avec différentes configurations de nervures transversales

Les progrès récents de la technologie des sols transparents ont permis d'améliorer la mesure des petites déformations développées dans la géogrille et dans la masse du sol. Ezzein et Bathurst (2014) et Ferreira et Zornberg (2015) combinent cette technologie avec le développement de nouveaux dispositifs d'essais d'extraction. Ces travaux utilisent la technique *Digital Image Correlation* – DIC pour déterminer les déplacements du renforcement et des particules spécifiques (i.e., particules marquées) du matériau granulaire. Malgré les apports importants de ces méthodes, la technique utilisée pour la capture d'images pour l'analyse des résultats nécessite un étalonnage et un traitement des données. Le processus est spécifique à chaque situation d'essai, ce qui le rend moins flexible pour les études impliquant différentes configurations d'essai. Il est également nécessaire de corriger les distorsions mesurées dans l'objectif des caméras et celles liées au désalignement entre les plans de l'objet et l'image à chaque capture effectuée par les caméras, ce qui peut réduire la précision des mesures de déplacement. Même en prenant les précautions nécessaires, certains types de comportement ne peuvent être évalués que qualitativement. Contrairement à cette réalité, les études numériques visent à augmenter la précision et les possibilités de mesures, à travers des modèles flexibles aux adaptations.

Les possibilités d'études numériques sont nombreuses et fonction du type d'approche. Dans la littérature, on trouve principalement deux approches prédominantes, comprenant respectivement la Méthode des Éléments Finis – MEF et la modélisation discrète par MED. Dans le cadre des méthodes numériques continues, les travaux de Khedkar et Mandal (2009), d'Abdi et Zandieh (2014) et de Touahmia et al. (2018) concernent des résultats expérimentaux étayés par des analyses numériques FEM. Les études numériques présentées par Khedkar et Mandal (2009) et d'Abdi et Zandieh (2014) sont proches. Elles mettent en œuvre des modèles bidimensionnels, avec des nervures longitudinales du renfort modélisées par des éléments linéiques avec deux degrés de liberté de translation dans chaque nœud et des nervures transversales modélisées par des éléments de type poutre, perpendiculaires à l'axe longitudinal du renfort, avec trois degrés de liberté par nœud (c'est-à-dire deux degrés de translation et un degré de rotation). Pour modéliser l'interaction entre le renfort et le sol, un élément d'interface est disposé autour de la nervure longitudinale et relié aux éléments du sol. Bien que les courbes expérimentales force-déplacement montrent une concordance raisonnable avec les résultats numériques, l'approche de ces deux études limite les possibilités d'accès à des comportements localisés spécifiques au problème. De plus, il n'est pas possible de prendre en compte l'effet du roulement des particules dans les modèles MEF, ce qui est un inconvénient pour les études qui se concentrent sur l'interaction sol-renfort.

Touahmia et al. (2018) présentent une analyse par éléments finis tridimensionnelle pour le problème d'extraction de géogrilles. Malgré la modélisation tridimensionnelle, le modèle ne permet pas d'obtenir les efforts dans des nervures spécifiques du renfort, ni de prendre en compte l'effet des ouvertures de géogrilles. En fait, une modélisation plus réaliste par cette approche peut nécessiter un très grand nombre de degrés de liberté pour les éléments du géosynthétique, ce qui entraîne des difficultés numériques et un coût de calcul élevé. La difficulté de définir précisément le comportement de contact des éléments d'interface est également un inconvénient des modèles MEF. Dans ce cas, la modélisation discrète, qui de par sa formulation, gère naturellement les interactions entre le matériau granulaire et la géogrille, peut contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes localisés.

2.2. Modélisation discrète des géogrilles

Différents auteurs ont modélisé des géogrilles à partir d'agrégats ou d'agglomérats rigides formés par des éléments géométriques moins complexes, tels que des sphères liées entre elles. L'introduction de degrés de liberté internes dans l'agrégat rigide de sphères permet aux structures modélisées d'être déformables. À titre d'exemple d'études récentes utilisant cette approche, Chen et al. (2018) a présenté deux modèles tridimensionnels de géogrilles à mailles carrées ou triangulaires aboutissant à un modèle de renforcement réaliste. Un autre exemple est le travail dans lequel Chen et al. (2019) ont effectué des essais d'extraction bidimensionnels et évalué l'effet de la rigidité en traction de la géogrille sur le comportement micromécanique de la couche de sol renforcée. Les deux approches utilisent des assemblages de sphères liées entre elles par des liaisons spécifiques (parallel bonds) qui permettent de prendre en compte la transmission des forces et des moments entre les particules qui composent la géogrille.

La modélisation du renforcement géosynthétique par des sphères agrégées présente deux inconvénients importants à noter. Le premier est que cette approche peut entraîner une augmentation significative du nombre total d'éléments du modèle, ce qui réduit son efficacité de calcul. L'autre est une rugosité numérique artificielle sur la surface du renfort causée par les sphères agglomérées, ce qui peut provoquer un comportement irréaliste du modèle numérique.

Dans le but d'obtenir une approche MED qui capture la nature continue des éléments qui composent le renfort géosynthétique, mais sans les problèmes décrits ci-dessus, un modèle tridimensionnel de géogrille basé sur des éléments déformables (Chareyre et Villard, 2005 ; Bourrier et al., 2013; Effeindzourou et al., 2016) a été développé (Moravia et al., 2019) puis utilisé dans cette étude. L'utilisation d'éléments déformables constitue une manière raffinée de simuler numériquement la géogrille, de par son adaptabilité et sa capacité à reproduire les attributs des géogrilles nécessaires pour décrire correctement leur comportement mécanique.

3. Aspects généraux du modèle MED

La préparation d'échantillons numériques influence directement les résultats finaux des simulations. Comme dans les études expérimentales, les échantillons numériques doivent être soigneusement préparés ou assemblés, en respectant leur état initial et leurs propriétés intrinsèques. Dans le cas des simulations d'extraction de géogrilles, il est important d'obtenir des conditions adéquates pour les échantillons telles que l'homogénéité et l'équilibre sous poids propre avant de simuler l'essai d'extraction. Les sections suivantes fournissent une description générale de l'approche numérique discrète utilisée pour la géogrille et le matériau granulaire et présentent les techniques utilisées pour préparer les échantillons pour les simulations. Il est important de souligner que l'outil de modélisation discrète utilisé ici est le code de calcul open source YADE.

3.1. Géogrille

Les caractéristiques et la structure des géogrilles varient en fonction du procédé de fabrication, par exemple des géogrilles extrudées, soudées, tricotées ou tissées. Bien qu'une représentation numérique réaliste soit requise, un modèle numérique spécifique à un type précis de géogrille finit par restreindre son domaine d'application. Ainsi, l'approche de modélisation retenue ici, s'intéresse à décrire le comportement générique d'une géogrille standard pouvant être sollicitée par traction, par flexion, par cisaillement et par torsion en raison de son interaction avec le milieu granulaire, c'est-à-dire l'emboîtement, le frottement et la butée.

Le comportement en traction dépend essentiellement de la rigidité en traction des nervures longitudinales de la géogrille, tandis que le cisaillement dépend essentiellement de la rigidité au cisaillement des nœuds aux points de croisement. Les comportements de flexion et de torsion sont fonction à la fois de la rigidité en traction des nervures longitudinales et de la rigidité des points de croisement. L'extraction de la géogrille peut induire de la butée (c'est-à-dire une action d'appui ou de contrefort) entre les nervures transversales de la géogrille et les particules granulaires bloquées et imbriquées dans les ouvertures. Ce mécanisme dépend de la valeur relative entre l'épaisseur des nervures et la taille des particules. Enfin, le frottement à la surface des nervures de la géogrille et le mécanisme d'emboîtement permettent de transmettre les efforts internes du squelette granulaire au renfort.

Le modèle utilisé pour la géogrille dans le code YADE comprend des éléments déformables caractérisés par des cylindres et des facettes (Figure 2), tel que décrit dans les travaux de Bourrier et al. (2013) et Effeindzourou et al. (2016). Les cylindres sont obtenus à partir de la somme de Minkowski d'une sphère et d'un segment. De même, les facettes, de forme triangulaire, appelées PFacets dans YADE, sont obtenues à partir de la somme de Minkowski d'une sphère et d'un plan. Les relations constitutives de ces deux types d'éléments sont définies par les informations définies aux nœuds des éléments, appelés GridNodes dans YADE, qui sont les centres des sphères qui caractérisent les limites de l'élément.

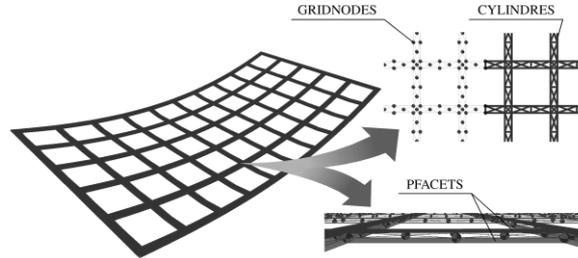


Figure 2. Eléments constitutifs d'une géogrille

Les concepts de base régissant les interactions externes et internes des cylindres et des PFacets sont similaires à ceux utilisés pour définir l'interaction entre deux sphères et reposent sur la définition d'une sphère virtuelle au sein des cylindres et des PFacets dans la projection du point de contact. Ainsi, tous les changements d'état de la sphère virtuelle sont interpolés et les forces et moments sont ensuite distribués linéairement sur les GridNodes. En ce qui concerne les efforts et moments internes, les calculs sont basés sur les déplacements et les rotations relatives entre les GridNodes.

Le modèle de contact élastique-plastique linéaire de Cundall est utilisé pour décrire l'interaction entre la géogrille et les particules de sol. Cette loi calcule les forces de contact entre deux éléments à partir des déplacements relatifs résultant de l'intégration des composantes de la vitesse relative des deux corps en contact par rapport au temps. Les vitesses relatives sont calculées en utilisant des points de contact de référence sur chaque élément (généralement les points situés sur la ligne reliant les centres des éléments en interaction). En combinant ces quantités relatives dans la loi force-déplacement de Cundall, les incréments des forces normales et de cisaillement peuvent être exprimés comme suit :

$$dF_n = k_n^c \cdot (du_n/dt) \cdot dt \quad (1)$$

$$dF_s = k_s^c \cdot (du_s/dt) \cdot dt \quad (2)$$

Où dF_n et dF_s sont respectivement les incréments de force normale et tangentielle, k_n^c et k_s^c sont respectivement des raideurs de contact normale et tangentielle, du_n/dt et du_s/dt sont respectivement les vitesses relatives normale et tangentielle et dt le pas de temps du calcul. La liaison de contact peut être assimilée à deux ressorts disposés en série de sorte que la raideur normale dans le contact est calculée par la moyenne harmonique des rigidités individuelles de ces ressorts. La raideur tangentielle k_s^c est directement liée à k_n^c par le rapport de rigidité de contact ν_c .

Dans le calcul de la force tangentielle F_s , une valeur limite peut être définie par une loi de frottement de type Coulomb qui, pour le cas des sols sans cohésion, est exprimée par l'équation (3). Si une valeur absolue de F_s tente à dépasser la valeur limite, le module de la force tangentielle est fixé égal à F_s^{lim} . La force de contact F_c est calculée par sommation des forces normales et tangentielles. F_c est appliquée à chaque élément en interaction, ce qui peut générer des moments en plus des forces au cours de l'étape de calcul. Ces moments et forces résultants sont ensuite utilisés pour intégrer les équations de mouvement pour chaque élément séparément, en obtenant des données de position et d'orientation. L'équation (4) donne l'expression du moment de la force (c'est-à-dire du couple) dû à la force de contact dans chaque élément sphérique, par exemple.

$$F_s^{\text{lim}} = \|F_n\| \cdot \tan(\phi_\mu) \quad (3)$$

$$\tau = \left(R_i - \frac{\delta}{2} \right) \cdot n \times F_c \quad (4)$$

Avec F_s^{lim} la valeur limite de la force tangentielle, F_n la force normale, ϕ_μ l'angle de frottement inter-particules (c'est-à-dire la valeur la plus petite du frottement entre les deux éléments en interaction), τ le moment des forces, R_i le rayon de la sphère, δ la profondeur de pénétration du contact (c'est-à-dire l'interpénétration entre les éléments en contact) et n le vecteur unitaire normal (parallèle à l'axe d'interaction qui passe par les centres des éléments).

La loi de calcul des efforts internes dans les éléments de type cylindre et PFacet est similaire à celle définie précédemment, mais intègre dans sa formulation l'adhérence ainsi que les moments de flexion et de torsion. Lors du calcul des efforts internes, les déplacements relatifs se font entre les GridNodes de l'élément. Les moments internes sont obtenus par des lois linéaires à partir des rotations relatives de ces nœuds et des raideurs associées à chaque type de moment (c'est-à-dire raideur en flexion et raideur en torsion).

3.2. Matériau granulaire

La disposition et l'imbrication des particules de l'assemblage granulaire peuvent influencer significativement son comportement mécanique. Par exemple, Matsushima et Saomoto (2002) ont trouvé une plus grande résistance au cisaillement pour les arrangements de particules qui ont des formes plus angulaires ou non convexes. Dans cet article, des agrégats rigides de plusieurs sphères juxtaposées recréent numériquement le caractère de non-convexité des matériaux granulaires. Les agrégats de ce type sont appelés clumps (c'est-à-dire amas de sphères) dans YADE. Cherchant à évaluer les différences de comportement entre les échantillons avec des particules sphériques et non sphériques, nous avons utilisé pour définir les clumps un modèle de particules génériques asymétriques composé de quatre sphères qui présentent des caractéristiques angulaires tel que présenté sur la Figure 3.

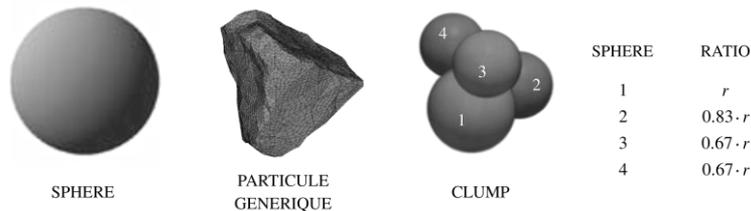


Figure 3. Particules génériques modélisées (sphère et clump, où r est le rayon de la sphère de référence du clump)

L'échantillon granulaire numérique combine aléatoirement des clumps de même géométrie mais de tailles différentes pour ne pas générer un assemblage granulaire régulier en termes d'agencement. Quatre tailles de clumps ont été considérées en augmentant et en réduisant les rayons des sphères de 20 % et 40 % de sorte que le ratio entre les plus gros et les plus petits clumps est de 2,5. Dans le cas de l'assemblage de sphères, la granulométrie retenue suit une distribution uniforme définie par un rayon moyen et un écart type respectivement de $1,20 \cdot 10^{-2}$ m et $6,00 \cdot 10^{-3}$ m. En moyenne, le nombre de particules granulaires au sein d'une maille de la géogrille varie entre 4 et 8.

3.3. Préparation des échantillons

La préparation des échantillons se fait en trois étapes principales. La première consiste à générer la géogrille et l'assemblage granulaire en tenant compte de leurs géométries respectives (Tableau 1). La longueur et la largeur de la géogrille sont similaires à celles de l'échantillon granulaire (longueur = 0,1 m x largeur = 0,5 m x hauteur = 0,5 m). La deuxième étape comprend la procédure REFD (Radius Expansion – Friction Decrease) pour obtenir un assemblage granulaire dense avec une porosité spécifique (Chareyre et Villard, 2002 ; Salot et al., 2009). Les deux premières étapes imposent une

condition statique à la géo grille, rendant impossible tout mouvement ou déformation. La troisième et dernière étape concerne la phase d'application de la gravité pendant laquelle les particules granulaires et les éléments de la géo grille sont libres en déplacement. La Figure 4 illustre un échantillon numérique lors de la simulation d'extraction de géo grilles.

Tableau 1. Paramètres du modèle d'essai d'extraction de géo grille

Paramètre	Géo grille biaxiale	Matériau granulaire	Unité
Épaisseur	$4,00.10^{-3}$	–	m
Ouverture des mailles de la géo grille	$0,08 \times 0,08$	–	m
Section transversale des nervures	$2,51.10^{-5}$	–	m ²
Densité	$1,00.10^2$	$2,60.10^3$	kg/m ³
Angle de frottement de contact	20,00	30,00	°
Module d'Young	$4,00.10^9$	$1,00.10^6$	Pa (N/m ²)
Rapport de rigidité de contact ($\nu_c = K_T/K_N$)	0,30	0,50	–
Cohésion normale	∞	–	Pa (N/m ²)
Cohésion tangentielle	∞	–	Pa (N/m ²)

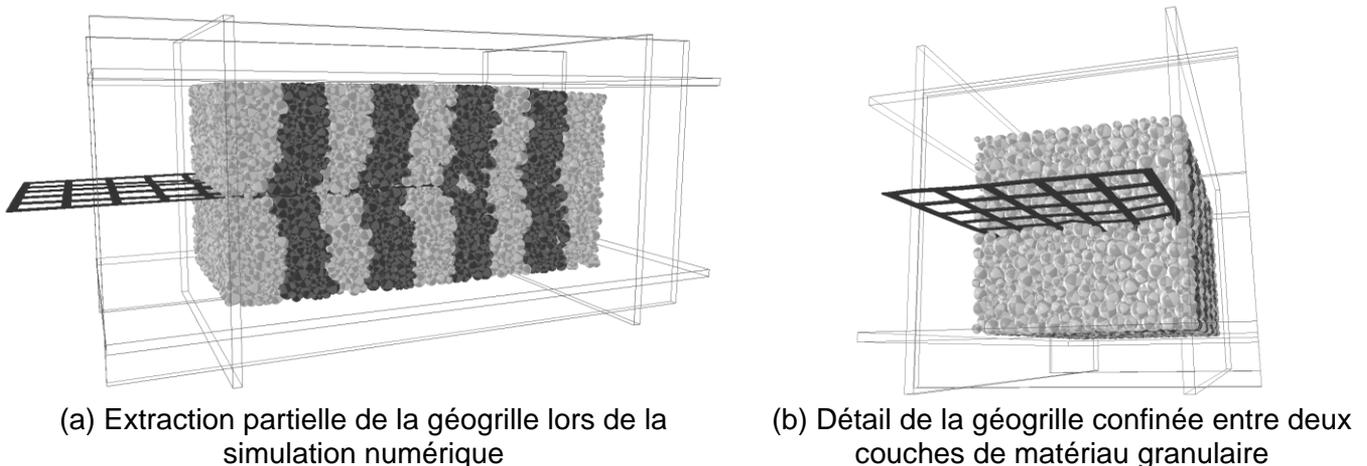


Figure 4. Simulation d'extraction de géo grilles

4. Analyse des résultats

Les analyses d'essai d'extraction de géo grilles dans ce travail n'ont pas pour but de reproduire un cas réel d'extraction de géo grille, mais d'améliorer la compréhension du comportement de l'interface. Ainsi, les paramètres du Tableau 1 ont été choisis afin de mettre en évidence les mécanismes étudiés et d'optimiser le coût de calcul. Les paramètres macroscopiques, qui permettent une caractérisation plus habituelle du matériau, peuvent être déterminés en simulant des essais triaxiaux sur des échantillons numériques de matériaux granulaires, par exemple. Les simulations ont porté sur des échantillons contenant trois mille et neuf mille particules. Plus le nombre de sphères dans l'échantillon est élevé, plus le ratio entre la taille moyenne des particules et la taille du maillage de la géo grille est petit. La Figure 5 compare les courbes force-déplacement pour des échantillons avec le même nombre de particules, mais avec des géométries de particules différentes (c'est-à-dire des sphères et des clumps).

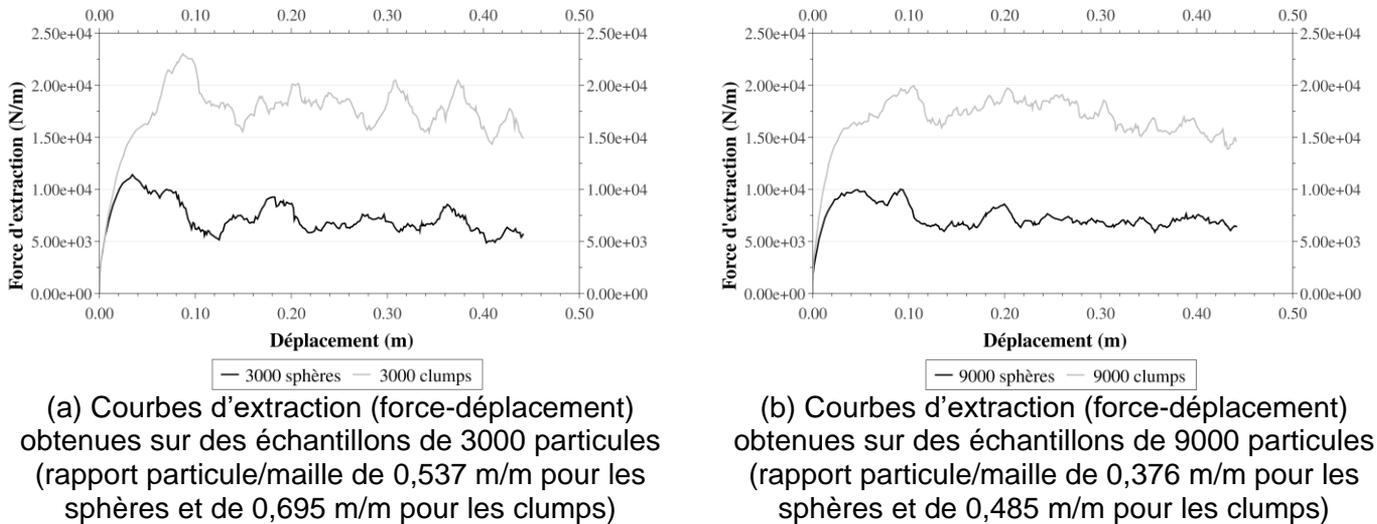


Figure 5. Courbes force-déplacement des simulations d'extraction de géogrilles

En comparant les résultats, il est possible de vérifier que le pic initial des courbes est obtenu pour un déplacement du renfort plus important pour les échantillons constitués de clumps. Bien que ces échantillons présentent une résistance initiale à l'extraction environ deux fois supérieures à celle des échantillons de particules sphériques, un plus grand déplacement de la géogrille est nécessaire pour atteindre le pic (Figure 5). Pour les clumps, la courbe force-déplacement présente deux pentes initiales distinctes avant d'atteindre le pic. La valeur de déplacement de 0,03 m définit approximativement la fin et le début de la première et deuxième section de pente, ce qui indique deux mécanismes successifs de mobilisation de la géogrille.

- Le premier est dû à la fois au frottement entre le matériau granulaire et les nervures de la géogrille et à la mobilisation par butée du matériau granulaire situé devant les nervures transversales. Dans ce cas, les particules non sphériques s'opposent plus rapidement au déplacement de la géogrille (pente initiale des courbes force-déplacement plus importante pour les clumps comparativement aux sphères). De plus, la force d'extraction maximale est plus élevée pour les matériaux composés de particules plus angulaires ou non convexes. Ceci est lié directement aux comportements macroscopiques des assemblages de clumps et de sphères pour lesquels les angles de frottement macroscopiques sont respectivement de 50° et 31° .

- Le second est lié au désenchevêtrement des particules granulaires confinées au sein des mailles de la grille et à leur mode de franchissement des nervures transversales (rotation et déplacement vertical). Les particules non sphériques conduisent à un agencement plus dense des particules au sein de la maille de la géogrille et, par conséquent, conduisent à une mobilisation plus rapide du renforcement. Dans ce type de mécanisme, la modification des arrangements de particules au sein des mailles du renfort peut entraîner un changement de la pente de la courbe force-déplacement. Un autre point observé est qu'une diminution du ratio entre la taille des particules et l'ouverture des mailles de la grille tend à réduire les pics de force.

Qualitativement, les comparaisons entre les résultats expérimentaux obtenus par Wang et al. (2016) et Taghavi et al. (2017) (présentés sur les Figures 1a et 1b) et les résultats des simulations numériques (présentés sur les Figures 5a et 5b) font apparaître de fortes similitudes. Sur la Figure 1a, avec l'augmentation du nombre de nervures transversales, on constate que les forces d'extraction augmentent et que la courbe force-déplacement fait apparaître deux pentes jusqu'au premier pic. Sur la Figure 1b, ces pentes sont également bien définies et, avec l'augmentation de l'épaisseur des nervures transversales, on constate une augmentation du pic de résistance, car le franchissement des nervures par les particules nécessite des déplacements verticaux et des mouvements plus importants. Cette comparaison entre les résultats met en évidence le potentiel d'utilisation du modèle numérique discret en conjonction avec des mesures expérimentales pour une compréhension plus approfondie de l'interaction entre les matériaux granulaires et la géogrille.

Parmi les nombreuses possibilités d'analyse de données qu'offre le modèle, les contraintes axiales dans les sections de nervures longitudinales et transversales de la géogrille peuvent être obtenues lors des simulations (Figure 6). Bien que le comportement observé avec les échantillons de clumps indique une mobilisation plus élevée des forces d'extraction, les tendances observées entre les échantillons

avec des particules sphériques et non sphériques sont qualitativement similaires. Par conséquent, seules les contraintes axiales obtenues dans les simulations impliquant des clumps sont présentées ici. La Figure 6a compare les valeurs des contraintes axiales obtenues dans les nervures longitudinales des mailles 1 et 2 ; la maille 1 étant la plus proche du point d'application de la force d'extraction. Les valeurs de contraintes obtenues dans la section A de la maille 1 sont logiquement supérieures aux valeurs obtenues pour la maille 2. En effet, les contraintes les plus fortes résultant des efforts de frottement entre la géogrille et le matériau granulaire sont concentrées dans la région d'application de la force d'extraction et ont tendance à s'annuler à l'extrémité opposée de la géogrille (extrémité libre). Un autre aspect qui apparaît sur la Figure 6a est que, contrairement aux tendances observées sur les courbes force-déplacement, les contraintes axiales dans la section des nervures longitudinales sont, pour une même maille, assez similaires entre les échantillons, malgré des rapports entre la taille des particules et le diamètre d'ouverture des mailles différents (c'est-à-dire la comparaison pour les échantillons de 3000 et 9000 particules).

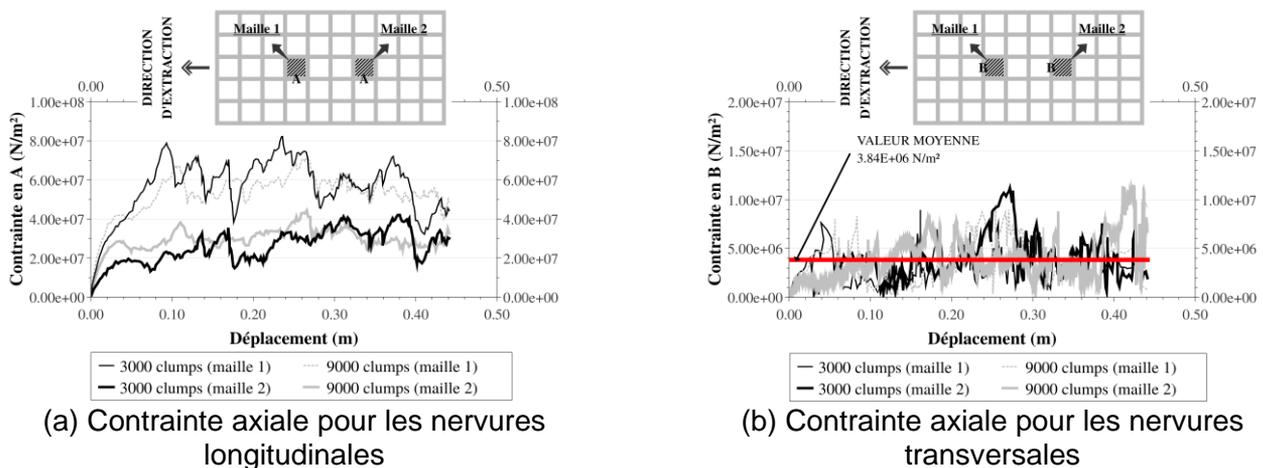


Figure 6. Contraintes axiales dans différentes sections des nervures longitudinales et transversales

En ce qui concerne les nervures transversales, contrairement aux nervures longitudinales, les valeurs des contraintes axiales dans les sections situées dans les mailles 1 et 2 sont assez semblables. Ce résultat implique que le mécanisme d'interaction principal de ces éléments est similaire à celui d'un contrefort ou d'un obstacle qui restreint le mouvement du renfort dans le sens longitudinal. La contribution au renforcement des sphères de petits diamètres (9000 clumps) est en moyenne légèrement inférieure à celle des sphères de plus grand diamètre (3000 clumps) pour lesquelles la force d'extraction est légèrement plus importante. La valeur moyenne calculée en considérant les quatre courbes contrainte-déplacement des nervures transversales indiquées par la ligne rouge sur la Figure 6b ($3,84E+06$ N/m²) est inférieure à celle des nervures longitudinales. Malgré cela, les contraintes mobilisées dans les nervures transversales ne sont pas négligeables et les pics de contraintes obtenus lors de l'extraction de la géogrille peuvent s'écarter et dépasser de trois fois la valeur moyenne calculée.

5. Conclusion

Une modélisation discrète tridimensionnelle des essais d'extraction de géogrilles a été proposée pour contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes d'interaction à l'interface du renforcement géosynthétique et du matériau granulaire. Les analyses ont impliqué des échantillons de différentes tailles de particules sphériques et non sphériques. Les résultats numériques obtenus sont cohérents avec le comportement attendu. Par exemple, la zone de renforcement la plus proche de l'application de la force d'extraction est la plus sollicitée (contraintes axiales dans les sections des nervures longitudinales plus élevées en tête du renfort). De plus, les tendances obtenues numériques sont qualitativement comparables à celles présentées dans la littérature pour les résultats d'essais expérimentaux d'extraction de géogrilles.

Les mécanismes d'interaction entre le matériau granulaire et les nervures de la géogrille ont montré une sensibilité à la taille des particules. Les pics des courbes force-déplacement et des courbes contrainte-déplacement sont moins prononcés dans les échantillons contenant des particules plus

petites. Si dans le sens longitudinal de la grille, la taille des particules est peu influente, le ratio entre la taille des particules et l'épaisseur des nervures transversales à un léger rôle dans leur franchissement et donc sur la force d'extraction. Enfin, les résultats obtenus montrent que le modèle numérique est pertinent pour l'analyse des mécanismes d'interaction locaux et qu'il permet d'apporter des réponses pratiques concernant le comportement de l'interface entre la géogrid et le matériau granulaire.

6. Références bibliographiques

- Abdi M.R., Zandieh A.R. (2014). Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. *Geotextiles and Geomembranes* 42 (5), 494-504.
- ASTM D6706-01 (2001). Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- Bourrier F., Kneib F., Chareyre B., Fourcaud T. (2013). Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering* 61, 646-657.
- Chareyre B., Villard P. (2002). Discrete element modeling of curved geosynthetic anchorages with known macro-properties. In: KONIETZKY, H. (Ed.), *Numerical modeling in micromechanics via particle methods* (197-203). Swets & Zeitlinger, Gelsenkirchen, Germany.
- Chareyre B., Villard P. (2005). Dynamic spar elements and discrete element methods in two dimensions for the modeling of soil-inclusion problems. *Journal of Engineering Mechanics* 131 (7), 689-698.
- Chen C., McDowell G., Rui R. (2018). Discrete element modelling of geogrids with square and triangular apertures. *Geomechanics and Geoengineering* 16, 495-501.
- Chen W.-B., Zhou W.-H., Jing X.-Y. (2019). Modeling geogrid pullout behavior in sand using discrete-element method and effect of tensile stiffness. *International Journal of Geomechanics* 19 (5), 04019039–1-04019039–13.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 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.
- Ezzein F.M., Bathurst R.J. (2014). A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil. *Geotextiles and Geomembranes* 42 (3), 246-255.
- Ferreira J., Zornberg J. (2015). A transparent pullout testing device for 3D evaluation of soil-geogrid interaction. *Geotechnical Testing Journal* 38 (5), 686-707.
- Khedkar M.S., Mandal J.N. (2009). Pullout behaviour of cellular reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes* 27 (4), 262-271.
- Matsushima T., Saomoto H. (2002). Discrete element modeling for irregularly-shaped sand grains. *Proc. 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 239-246.
- Moravia M.G., Villard P., Vidal D.M. (2019). Geogrid pull-out modelling using DEM. *E3S Web Conf.* 92, 13015
- Palmeira E.M., Milligan G.W.E. (1989). Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. *Géotechnique* 39 (3), 511-542.
- Salot C., Gotteland P., Villard P. (2009). Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests. *Granular Matter* 11 (4), 221-236.
- Taghavi, S.H.S., Mosallanezhad, M. (2017). Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. *Canadian Geotechnical Journal* 54 (5), 621-630.
- Touahmia M., Rouili A., Boukendakdji M., Achour B. (2014). Experimental and numerical analysis of geogrid-reinforced soil systems. *Arabian Journal for Science and Engineering* 43 (10), 5295-5303.
- Wang Z., Jacobs F., Ziegler M. (2016). Experimental and DEM investigation of geogrid-soil interaction under pullout loads. *Geotextiles and Geomembranes* 44 (3), 230-246.