

Résumé

Ce projet de recherche s'inscrit dans le contexte de l'utilisation croissante des géogrilles pour le renforcement et la stabilisation des sols granulaires, en particulier dans les infrastructures de transport telles que les chaussées et les voies ferrées. L'objectif principal est de mieux comprendre, à l'échelle microscopique, les mécanismes d'interaction entre les particules de sol et les éléments de géogrille, afin d'identifier les paramètres déterminants de la performance du système sol-géogrille et de fournir des bases scientifiques pour son dimensionnement.

La démarche adoptée repose sur une approche conjointe expérimentale et numérique. Sur le plan expérimental, des essais triaxiaux ont été réalisés sur des échantillons granulaires secs de différentes tailles, complétés par des campagnes de tomographie à rayons X. Ces analyses ont permis d'évaluer l'effet du renforcement sur la rigidité initiale, la résistance au pic, le comportement volumique et la localisation des déformations, tout en révélant l'impact de la géogrille sur la microstructure et la porosité locale autour des ouvertures.

Sur le plan numérique, des simulations par la méthode des éléments discrets (DEM), mises en œuvre dans YADE, ont permis de reproduire fidèlement les conditions expérimentales. Différentes représentations de grains (sphères, et agrégats de sphères) et un modèle de la géogrille simplifié par un réseau de nœuds et de liaisons cylindriques ont été testés. La calibration du modèle, effectuée sur la base des courbes contrainte-déformation, du comportement volumique et des observations tomographiques, a montré une bonne capacité prédictive du modèle pour la rigidité initiale, la résistance au pic et la distribution des contacts à l'état initial.

Par la suite, une analyse numérique approfondie du comportement triaxial a été conduite. Les résultats mettent en évidence que l'efficacité de la géogrille repose sur la synergie entre les mécanismes de frottement et butée, dont la mobilisation dépend des propriétés mécaniques et géométriques du système. La zone d'influence autour de la géogrille se caractérise par une augmentation locale de la porosité et une redistribution en forme de dôme des contraintes horizontales. Le suivi des efforts internes montre en outre une mobilisation hétérogène de la géogrille, les nervures centrales étant plus sollicitées que celles en périphérie.

L'étude paramétrique confirme que la performance du système dépend de l'équilibre entre : les propriétés du sol (forme des grains, frottement intergranulaire), les conditions d'échantillon (confinement, élanement, nombre et position des nappes), et les caractéristiques de la géogrille (rigidité, taille, frottement d'interface). La rigidité de la géogrille présente un seuil d'efficacité au-delà duquel les performances se stabilisent. Par ailleurs, le rôle stabilisateur du renfort est confirmé : sous sollicitations cycliques, la géogrille limite significativement l'accumulation de déformations permanentes.

Cette recherche propose ainsi un cadre méthodologique robuste, combinant essais triaxiaux, tomographie 3D et simulations DEM, pour étudier les mécanismes multi-échelles d'interaction sol-géogrille. Dans l'ensemble, elle montre que les géogrilles agissent à la fois comme éléments de renforcement (accroissement de la résistance et de la rigidité) et de stabilisation (contrôle des déformations différées et maintien de la microstructure). Ces résultats, issus d'une approche intégrée expérimentale et numérique, constituent une avancée notable pour la compréhension des interactions micromécaniques sol-géogrille et offrent des perspectives concrètes pour l'optimisation des dispositifs de renforcement et de stabilisation des sols granulaires.

Mots clés : Inclusion, Milieu granulaire, Méthode des Éléments Discrets, Tomographie RX, Interaction sol-structure, Géogrille.

Abstract

This research project is set in the context of the increasing use of geogrids for the reinforcement and stabilization of granular soils, particularly in transportation infrastructures such as roads and railways. The main objective is to gain a deeper understanding, at the microscopic scale, of the interaction mechanisms between soil particles and geogrid elements, in order to identify the key parameters governing the performance of the soil–geogrid system and to provide scientific bases for its design.

The adopted methodology combines experimental and numerical approaches. On the experimental side, triaxial tests were conducted on dry granular samples of different sizes, complemented by X-ray tomography campaigns. These analyses made it possible to assess the effect of reinforcement on initial stiffness, peak strength, volumetric behavior, and strain localization, while also revealing the influence of the geogrid on the microstructure and local porosity around the apertures.

On the numerical side, simulations using the Discrete Element Method (DEM), implemented in YADE, were conducted to replicate the experimental conditions. Different grain representations (spheres and clumps) and a simplified geogrid model consisting of a network of nodes and cylindrical links were tested. Model calibration, based on stress–strain curves, volumetric behavior, and tomographic observations, demonstrated a good predictive capacity for initial stiffness, peak strength, and contact distribution at the initial state.

A detailed numerical analysis of the triaxial behavior was then carried out. The results highlight that the efficiency of the geogrid relies on the synergy between friction and abutment mechanisms, whose mobilization depends on the mechanical and geometrical properties of the system. The influence zone around the geogrid is characterized by a local increase in porosity and a dome-shaped redistribution of horizontal stresses. The monitoring of internal forces further shows heterogeneous mobilization of the geogrid, with central ribs being more solicited than peripheral ones.

The parametric study confirms that the system performance depends on the balance between soil properties (grain shape, interparticle friction), sample conditions (confinement, slenderness, number and position of geogrid layers), and geogrid characteristics (stiffness, aperture size, interface friction). The geogrid stiffness shows a threshold of efficiency beyond which performance stabilizes. Moreover, the stabilizing role of the reinforcement was confirmed: under cyclic loading, the geogrid significantly limits the accumulation of permanent strains.

This research thus proposes a robust methodological framework that combines triaxial testing, 3D tomography, and DEM simulations to investigate the multiscale mechanisms of soil–geogrid interaction. Overall, it demonstrates that geogrids act both as reinforcement elements (enhancing strength and stiffness) and as stabilizing elements (controlling long-term deformations and preserving soil microstructure). These results, obtained from an integrated experimental and numerical approach, represent a significant step forward in the understanding of soil–geogrid micromechanical mechanisms and offer concrete perspectives for optimizing reinforcement and stabilization systems in granular soils.

Keywords: Inclusion, Granular material, Discrete Element Method, X-ray Tomography, Soil–structure interaction, Geogrid.