

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602

Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes

Spécialité : Génie civil et géotechnique

Par

Mohamed EL SHAMIEH

Evolution de la perméabilité des sols granulaires dans un contexte d'érosion interne par suffusion

Thèse présentée et soutenue à Saint-Nazaire, Nantes Université, le 3 Novembre 2025

Unité de recherche : GeM-Institut de recherche en génie civil et mécanique-UMR CNRS 6183

Rapporteurs avant soutenance :

Christian GEINDREAU
Antoine WAUTIER

Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes
Ingénieur en Chef des Ponts des Eaux et des Forêts HDR,
INRAE- Aix-en-Provence

Composition du Jury :

Président :

Examineurs :

Eric VINCENS
Luisa ROCHA DA SILVA
Ariane ABOU CHAKRA

(à préciser après la soutenance)

Professeur des Universités, Ecole Centrale de Lyon
Professeure des Universités, Ecole Centrale de Nantes
Maitresse de Conférences HDR, INSA Toulouse

Directeur de thèse :

Co-dir. de thèse :

Encadrant :

Didier MAROT
Rachel GELET
François BIGNONNET

Professeur des Universités, Nantes Université
Maitresse de Conférences HDR, Nantes Université
Maitre de Conférences, Nantes Université

Titre : Evolution de la perméabilité des sols granulaires dans un contexte d'érosion interne par suffusion.

Mots clés : Suffusion, perméabilité, matériau granulaire, DEM (méthode des éléments discrets), transformée de Fourier rapide, homogénéisation multi-échelle, modélisation numérique et analytique

Résumé : Les ouvrages hydraulique en terre sont sujets à l'érosion interne, la suffusion étant l'un des mécanismes les plus complexes et les moins compris. Elle modifie la microstructure des sols granulaires en érodant sélectivement les fines, entraînant des variations de perméabilité, même lorsque la porosité ou la granulométrie restent inchangées. Cette thèse développe un cadre multi-échelle pour prédire l'évolution de la perméabilité dans les sols affectés par la suffusion, à partir d'une étude numérique et d'une modélisation analytique. Une investigation numérique est menée avec la méthode des éléments discrets (DEM) pour générer les échantillons, des techniques de Delaunay pour caractériser l'espace poral, et un solveur basé sur la transformée de Fourier rapide (FFT) pour estimer la perméabilité. L'analyse de trois configurations microstructurales, isotrope (M0), modifiée par gravité (M1) et par l'écoulement (M2), met en évidence des paramètres clés, tels que les diamètres de constriction pondérés D_{cw} et la porosité. Une nouvelle relation perméabilité-microstructure est proposée, inspirée du modèle de Kozeny-Carman. Le modèle développé est calibré sur des modèles de la littérature et validé sur un large ensemble d'échantillons numériques uniformes et à granulométrie discontinue. Les résultats obtenus mettent en exergue la robustesse du modèle, notamment dans les configurations modifiées par l'écoulement.

Afin de limiter le temps de calcul, nous développons un modèle analytique micromécanique auto-cohérent dans un cadre d'homogénéisation de champ moyen, basé sur les équations de Brinkman. La phase solide est représentée par la granulométrie, tandis que la phase poreuse est caractérisée par des diamètres équivalents contraints par la surface spécifique (s.s.a.). Quatre paramètres clés : granulométrie, porosité, rapport de tailles de pores et fraction de pores fins, définissent un cadre analytique unifié capable de représenter à la fois des familles de pores mono et bimodales, décrivant les configurations microstructurales de M0 (isotrope) à M2 (modifiée par l'écoulement). Les prédictions analytiques montrent un bon accord avec les simulations numériques pour différentes granulométries et états de compaction, reproduisant avec succès l'évolution de la perméabilité et la constante de Kozeny-Carman dans les systèmes modifiés par l'écoulement. Globalement, cette approche numérique-analytique combinée constitue un outil physiquement fondé et efficace en calcul, pour prédire les variations de perméabilité dans les sols granulaires soumis à la suffusion, avec des implications pour l'évaluation de l'érosion interne dans les ouvrages hydraulique en terre.

Title: Permeability evolution of granular soils in an internal erosion context by suffusion.

Keywords: Suffusion, permeability, granular material, DEM, fast Fourier transform, multi-scale homogenization, numerical and analytical modeling.

Abstract: Hydraulic earth structures are susceptible to internal erosion, with suffusion being one of the most complex and least understood mechanisms. Suffusion alters granular soil microstructure by selectively eroding fines, leading to significant changes in permeability, even when porosity or grain size distribution remain unchanged. This thesis develops a comprehensive multiscale framework to predict permeability change in suffusion-affected granular soils by following a detailed numerical investigation and an analytical modeling. First, a numerical investigation is conducted using the Discrete Element Method (DEM) for sample generation, Delaunay-based techniques for pore space characterization and a Fast Fourier Transform (FFT)-based solver for permeability estimation. Through systematic analyses of three microstructural configurations, isotropic compacted (M0), gravity-modified (M1) and flow-modified (M2), this numerical investigation identifies critical descriptors, such as weighted constriction diameters D_{cw} and porosity, governing permeability variations. A new permeability-microstructure relation is proposed, inspired by the classical Kozeny-Carman model. The developed model is calibrated against existing literature models and validated on a wide set of numerical uniform and gap-graded specimens. The obtained results highlight the robustness of the model, especially in flow-modified microstructural configurations.

Second, to limit computational time, we then develop a self-consistent micromechanical analytical model within a mean-field homogenization framework, based on Brinkman equations. The solid phase is represented by the grain size distribution, while the pore phase is characterized by equivalent diameters constrained by specific surface area (s.s.a.). Four key inputs: grain size distribution, porosity, pore size ratio and fine pore fraction, define a unified analytical framework capable of representing both mono and bimodal pore families, describing isotropic M0 to flow-modified M2 microstructural configurations. Analytical predictions show good agreement with numerical simulations across gradings and compaction states, successfully capturing permeability evolution and the Kozeny-Carman constant in flow-modified systems. Overall, this combined numerical-analytical approach provides a physically grounded, computationally efficient tool for predicting permeability changes in granular soils under suffusion, with implications for the assessment of internal erosion in hydraulic earth structures.