

PhD thesis

Topic: Permeability evolution of granular soils in an internal erosion context

Secured financial support: ANR PERSÉE project carried by the GeM Institut (UMR CNRS 6183)

Starting date: the 3rd of October 2022

Funding length: 3 years

PhD Supervisors: Rachel GELET, Ngoc-Son NGUYEN, François BIGNONNET

Localization: GeM Institute (UMR CNRS 6183, <https://gem.ec-nantes.fr/ieg-2/>), Nantes Université, 58 rue Michel Ange, 44600 Saint-Nazaire

Description of the subject:

France relies on a significant stock of hydraulic structures with more than 9 000 km of protection against flooding, 8 000 km of dikes for navigation canals and 1 000 km of hydroelectric canals. The number of small embankment dams is around several tens of thousands, while the number of large dams approaches 600. An important aspect of this French hydraulic asset is its age: while most dams are older than half a century, most dikes are more than 100 years old. Hence, the maintenance of such a wide and old patrimony requires a costly upkeep and calls for scientific progress on the mechanisms which induce instabilities on these earth-structures. In addition, the probable consequences of climate change on the sea level and continental hydrology will lead to increasing solicitations on coastal and fluvial structures, which will reinforce the need for their surveillance and maintenance.

Hydraulic earth structures can suffer from instabilities induced by internal erosion processes, which are responsible for 46% of all disorders. The risk management related to volumetric erosion, named suffusion, calls for the numerical modelling of these structures. Such modelling requires the development of a new relationship that can describe the evolution of the permeability during the suffusion process, i.e. including the evolutions of the grain size distribution (GSD) and the constriction size distribution that both describe the soil's microstructure.

Overall, five numerical methods and several experimental tests will be used to adapt the concept of "controlling constriction size" to soils susceptible to suffusion. Our project is organized in four steps:

(i) First, numerical specimens will be studied to better understand the physical links between pore space characteristics extracted from granular specimens simulated with the discrete element method (Nguyen et al., 2021) and the permeability that can be computed thanks to a numerical full field homogenization technique (Bignonnet, 2020) (Figure 1). The idea is to work on numerical specimens constituted of spherical grains and simplified GSDs, with respect to that of in-situ soils.

(ii) Second, a physically-based relationship relating the key microstructure characteristics, identified previously, to the permeability will be sought with a semi-analytical homogenization method. This method provides an estimate of the permeability from a simplified and implicit representation of the microstructure, such as spherical grains, cylindrical pores, etc. This first relationship will be validated against the numerical simulations realised in step (i), by focusing on simplified GSDs and spherical grains. Next, this relationship will be extended to in-situ soil GSDs by using a probabilistic approach to obtain the key microstructure characteristics (Reboul et al., 2010; Seblany et al., 2021). Throughout steps (i) and (ii), the obtained results will be challenged for intact specimens and for suffusion-induced heterogeneous ones.

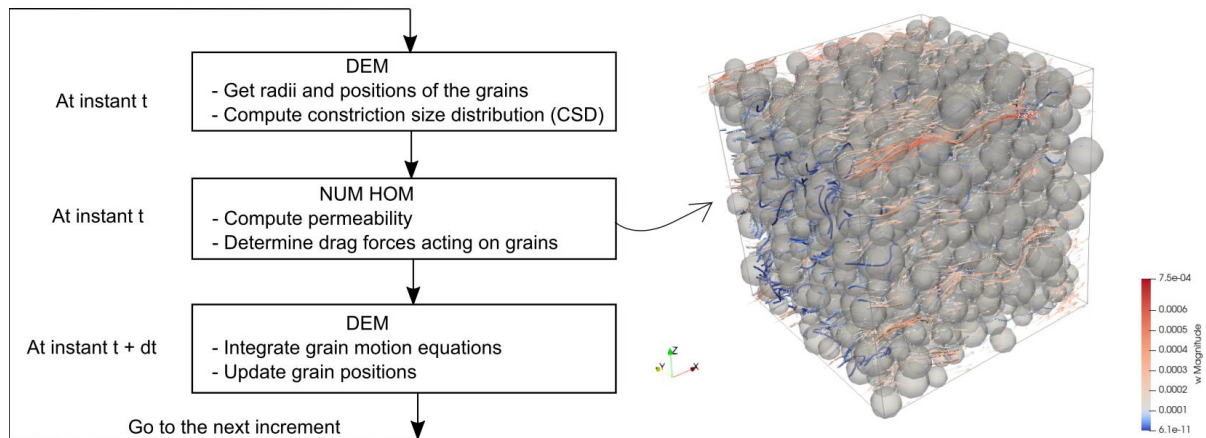


Figure 1: Coupled DEM and NUM HOM methods to study the link between the evolution of the permeability and the evolution of the micro-structure.

(iii) The validation of this extended physically-based relationship will be realised against several permeation and suffusion tests. In addition, multiple grain size distributions (initial, post-suffusion, eroded grains) will be realised to further validate the numerical approaches developed in step (ii) and (iv).

(iv) Finally, the extended physically-based relationship and the probabilistic approach will be implemented in our domestic finite element code which features a hydro-mechanical continuous model extended to suffusion (Gelet et al., 2021; Gelet et al. 2022). The numerical predictions of the permeability will be validated against the suffusion tests, performed in step (iii), and subsequently on a reduced physical model of dike.

The final product of this project, in addition to the deliverables of each step, will be a poro-mechanical simulation code that accounts for suffusion-induced fine grain loss and permeability changes. The model implemented inside this code will have been carefully validated against experimental data to allow its practical use by dam and dike stakeholders.

References:

[Bignonnet, F. \(2020\). Efficient FFT-based upscaling of the permeability of porous media discretized on uniform grids with estimation of RVE size. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 369, 113237.](#)

[Gelet, R., Kodieh, A., Marot, D., & Nguyen, N. S. \(2021\). Analysis of volumetric internal erosion in cohesionless soils: Model, experiments and simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45\(18\), 2780-2806.](#)

[Gelet, R., & Marot, D. \(2022\). Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: Model and sensibility analysis. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100313.](#)

[Nguyen, N. S., Taha, H., & Marot, D. \(2021\). A new Delaunay triangulation-based approach to characterize the pore network in granular materials. *Acta Geotechnica*, 1-19.](#)

[Reboul, N., Vincens, E., & Cambou, B. \(2010\). A computational procedure to assess the distribution of constriction sizes for an assembly of spheres. Computers and Geotechnics, 37\(1-2\), 195-206.](#)

[Seblany, F., Vincens, E., & Picault, C. \(2021\). Determination of the opening size of granular filters. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.](#)

Keywords: Permeability, discrete element method, homogenization, internal erosion, suffusion

Required skills:

- Highly motivated by scientific research, serious, curious
- Continuum mechanics, Homogenization, Numerical modeling, Constitutive laws
- Very good command in spoken and written English

Application procedure:

Fill the application form to https://questionnaires.univ-nantes.fr/persee_thesis

- Before proceeding, make sure you have the following files ready to upload in pdf format:
 - resume
 - cover letter
 - record of your academic grades and ranking for the past two years
 - recommendation letter (optional)
- Please fill the form only once

Application deadline: April 20th, 2022

Thèse de doctorat

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

Support de financement sécurisé : Projet ANR PERSÉE obtenue par l'Institut GeM (UMR CNRS 6183)

Date de démarrage : le 3 Octobre 2022

Durée du financement : 3 ans

Encadrants : Rachel GELET, Ngoc-Son NGUYEN, François BIGNONNET

Localisation : GeM Institute (UMR CNRS 6183, <https://gem.ec-nantes.fr/ieg-2/>), Nantes Université, 58 rue Michel Ange, 44600 Saint-Nazaire

Description du sujet :

La France dispose d'un parc important d'ouvrages hydrauliques avec près de 9 000 km de protection contre les crues, 8 000 km de digues de canaux de navigation et 1 000 km de canaux hydroélectriques. Le nombre de petits barrages est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers et celui des grands barrages avoisine 600. Un aspect important du patrimoine hydraulique français est son ancienneté : par exemple, la majorité des digues est âgée de plus d'un siècle. La maintenance de ce patrimoine, très étendu et ancien, exige un entretien coûteux et de ce fait requière des progrès scientifiques sur

l'érosion interne des sols. De plus, les conséquences probables du changement climatique sur l'hydrologie continentale vont conduire à des sollicitations accrues sur ces ouvrages avec la nécessité là aussi d'en renforcer la surveillance et la maintenance.

Les ouvrages hydrauliques en terre peuvent être sujets à des processus d'érosion interne, qui sont à l'origine de 46% des désordres rencontrés. La gestion des risques liés à une érosion volumique, dénommée suffusion, nécessite une modélisation numérique de ces ouvrages. Cette modélisation requière le développement d'une nouvelle relation permettant de décrire l'évolution de la perméabilité au cours du processus de suffusion, i.e. incluant l'évolution des tailles de grains et des tailles de constriction caractérisant la microstructure du sol.

Dans ce projet organisé en quatre étapes (i-iv), cinq méthodes numériques et plusieurs essais expérimentaux seront utilisés pour adapter le concept de « taille de constriction décisive » aux sols sensibles à la suffusion.

(i) Des échantillons numériques seront étudiés pour mieux comprendre le lien physique entre les caractéristiques de l'espace poral, extraits d'échantillons granulaires grâce à la méthode des éléments discrets (Nguyen et al., 2021), et la perméabilité qui peut être obtenue grâce à une méthode d'homogénéisation numérique (Bignonnet, 2020) (Figure 1). L'idée étant de travailler sur des échantillons numériques composés de grains sphériques et d'une granulométrie simplifiée par rapport à celle des sols in-situ.

(ii) Une relation basée sur la physique reliant les caractéristiques microstructurales décisives, identifiées précédemment, à la perméabilité sera investiguée grâce à une méthode d'homogénéisation semi-analytique. Cette méthode procure une estimation de la perméabilité à partir d'une représentation implicite et simplifiée de la microstructure, par exemple : des grains sphériques et des pores tubulaires. Cette première relation sera validée grâce aux résultats numériques de l'étape (i), i.e. avec des grains sphériques et une granulométrie simplifiée. Par la suite, cette relation sera étendue aux granulométries in-situ caractérisées grâce à une approche probabiliste. Les résultats obtenus aux étapes (i) et (ii) seront comparés pour des échantillons intacts et pour des échantillons rendus hétérogènes par la suffusion.

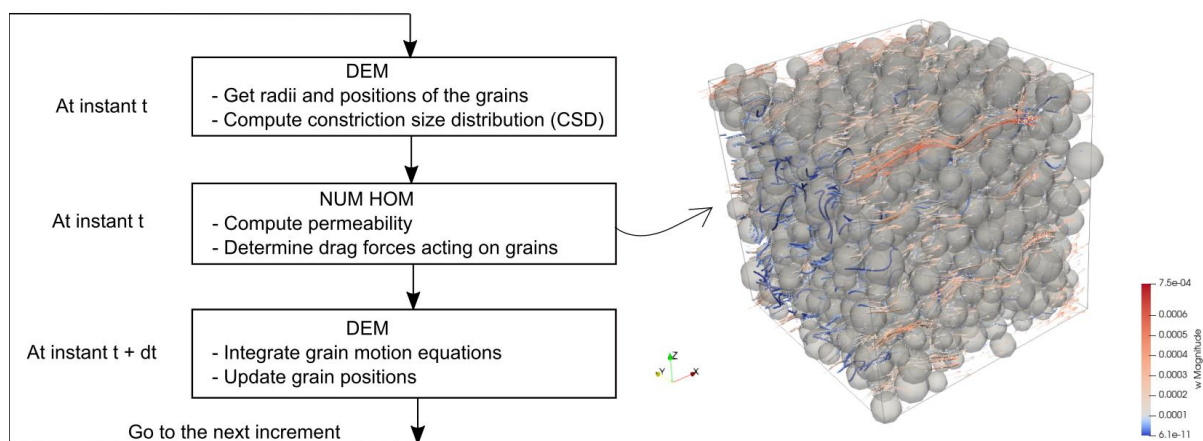


Figure 1 : Couplage DEM-NUM HOM pour étudier les liens physiques entre l'évolution de la perméabilité et l'évolution de la microstructure dans un contexte de suffusion.

(iii) La validation de cette relation étendue implique la réalisation de plusieurs essais de perméabilité et de suffusion. Afin de valider les approches numériques des étapes (ii) et (iv), plusieurs courbes granulométriques seront réalisées : pré-suffusion, post-suffusion et masse érodée.

(iv) Pour finir, cette relation étendue fondée physiquement ainsi que l'approche probabiliste seront implémentées dans un code aux éléments finis qui contient un modèle continu hydro-mécanique étendu à la suffusion (Gelet et al., 2021 ; Gelet et al., 2022). Les prédictions numériques de la perméabilité seront validées grâce aux essais expérimentaux réalisés à l'étape (iii) et par la suite sur un modèle physique de digue.

Le produit fini de ce projet, en plus des livrables de chaque étape, sera un code de simulation poro-mécanique capable de prendre en compte la perte de grains fins induite par la suffusion et les changements de perméabilité associés. Le modèle implémenté aura été soigneusement validé grâce à la méthode proposée ce qui permettra son utilisation par les maîtres d'ouvrages.

Références :

[Bignonnet, F. \(2020\). Efficient FFT-based upscaling of the permeability of porous media discretized on uniform grids with estimation of RVE size. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 369, 113237.](#)

[Gelet, R., Kodieh, A., Marot, D., & Nguyen, N. S. \(2021\). Analysis of volumetric internal erosion in cohesionless soils: Model, experiments and simulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45\(18\), 2780-2806.](#)

[Gelet, R., & Marot, D. \(2022\). Internal erosion by suffusion on cohesionless gap-graded soils: Model and sensibility analysis. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100313.](#)

[Nguyen, N. S., Taha, H., & Marot, D. \(2021\). A new Delaunay triangulation-based approach to characterize the pore network in granular materials. *Acta Geotechnica*, 1-19.](#)

[Reboul, N., Vincens, E., & Cambou, B. \(2010\). A computational procedure to assess the distribution of constriction sizes for an assembly of spheres. *Computers and Geotechnics*, 37\(1-2\), 195-206.](#)

[Seblany, F., Vincens, E., & Picault, C. \(2021\). Determination of the opening size of granular filters. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.](#)

Mots clés : Perméabilité, éléments discrets, homogénéisation numérique, érosion interne, suffusion

Compétences requises :

- Motivation pour la recherche scientifique, sérieux, curiosité
- Mécanique des milieux continus, Homogénéisation, Modélisation numérique, Lois de comportement
- Bon niveau d'anglais parlé et écrit

Procédure de candidature :

Remplir le questionnaire de candidature suivant : https://questionnaires.univ-nantes.fr/persee_thesis

- En amont, merci de vous munir des documents suivants au format pdf :
 - CV
 - Lettre de motivation
 - Relevé de notes de vos deux dernières années d'études
 - Lettre de recommandation (en option)
- Merci de ne remplir le formulaire de candidature qu'une seule fois

Date limite de candidature : Le 20 Avril 2022

