

Sujet de thèse

*Mitigation of Suffusion risk in Flood protection dikes reinforced with local materials :
Experimental assessment and numerical modeling*

*Atténuation du risque de suffusion dans les digues de protection renforcées par des
matériaux locaux : Evaluation expérimentale et modélisation numérique*

Directeurs de thèse : Abdelkrim BENNABI (ESTP ; email : abennabi@estp.fr)
Marwan SADEK (ULille; email : marwan.sadek@polytech-lille.fr)

Laboratoires : Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) / Institut de
recherche de la construction (IRC)

Ecole Doctorale : ED ENGSYS – Université de Lille

Nature du contrat : CDD 36 mois - Financement projet Européen Interreg

Début prévu de la thèse : 01 octobre 2025

Contexte et problématique :

La thèse s'intègre dans le cadre d'un projet européen (BONSAI : Boosting flOod resilieNce in estuarine Systems Anticipating shifting cLIimate zones) qui vise à renforcer la résilience des ouvrages hydrauliques du type digue et les systèmes estuariens face aux inondations, en anticipant les effets du changement climatique. Ce projet coordonné par STOWA (2024-2029) regroupe une quinzaine de partenaires (académiques, industriels, collectivités, ...) en France (ULILLE, ESTP, CEREMA, ISL) et en Europe (Allemagne, Belgique, Pays-Bas). La thèse proposée sera effectuée en partenariat entre l'Université de Lille et l'ESTP qui sont deux partenaires du projet BONSAI.

L'érosion interne, et plus particulièrement le phénomène de suffusion, constitue l'un des principaux risques menaçant la stabilité des digues de protection contre les inondations. Ce processus se produit lorsque des particules fines de sol sont entraînées par l'eau à travers une matrice granulaire plus grossière, provoquant une dégradation progressive de la structure. Le danger devient critique lors de montées rapides du niveau d'eau en amont, induisant d'importants gradients hydrauliques à travers la digue.

Dans ce contexte, des renforcements d'urgence sont souvent nécessaires, en particulier au pied aval des digues, là où la percolation est la plus intense. Cependant, les matériaux utilisés en urgence sont généralement prélevés à proximité du site, et ne respectent pas toujours les critères granulométriques ou de densité exigés pour les filtres qualifiés, comme ceux utilisés dans les barrages. Cela soulève de fortes incertitudes quant à leur efficacité à empêcher la migration des particules fines tout en assurant un bon drainage.

Il est donc essentiel de mieux comprendre le comportement de ces matériaux en conditions réelles et dégradées, notamment sous l'effet du temps, des cycles saisonniers et des événements hydrauliques extrêmes.

Objectifs :

Cette thèse vise (i) à caractériser les matériaux in situ, souvent hétérogènes, pouvant être utilisés pour les renforcements d'urgence des digues fluviales ; (ii) à étudier leur comportement vis-à-vis de la suffusion à l'aide d'essais de laboratoire reproduisant des cycles environnementaux et des sollicitations hydrauliques réalistes ; (iii) à développer un modèle numérique à éléments discrets (DEM) permettant de simuler le comportement réel de ces sols pouvant présenter des hétérogénéités granulaires et de compactage face à l'érosion interne ; (iv) à intégrer les effets du temps, des saisons et des événements extrêmes dans les approches expérimentales et numériques ; et (v) à élaborer une bibliothèque de mesures réactives, associant des seuils de vulnérabilité à des recommandations pratiques pour les interventions d'urgence.

Méthodologie :

Études expérimentales : colonnes de suffusion

L'étude utilise une colonne de suffusion pour simuler l'érosion interne des sols sous gradients hydrauliques. Les essais intégreront : (i) la variabilité naturelle des sols (granulométrie, compacité), (ii) les cycles saisonniers (tel que humidité/dessiccation), et (iii) des événements extrêmes (injections brutales, saturation prolongée, sécheresse). On mesurera les particules érodées, la perméabilité, la concentration en fines et le temps d'initiation de l'érosion, afin de définir un Indice de Résistance à l'Érosion quantifiant la résilience des matériaux.

Modélisation numérique : méthode des éléments discrets (DEM) :

Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets (DEM) sera développé afin de reproduire le comportement granulaire réel des matériaux soumis à la suffusion. (i) Ce modèle prendra en compte les interactions entre grains, telles que les forces de contact et les mécanismes de détachement ; (ii) l'évolution des pressions interstitielles ; (iii) l'hétérogénéité des matériaux ainsi que la qualité de leur compactage ; et (iv) les effets des cycles climatiques, incluant la formation de microfissures et les variations de porosité. (v) Le couplage fluide-solides permettra de simuler l'initiation et la progression de la suffusion, les pertes de perméabilité dues à la migration des particules fines, ainsi que l'impact des sollicitations hydrauliques variables dans le temps. (vi) Le modèle sera calibré et validé à partir des résultats expérimentaux.

Intégration du facteur temps et des conditions climatiques :

Les études (expérimentales et numériques) intégreront les effets du vieillissement, des variations saisonnières et des événements extrêmes. Ceci afin de mieux représenter le comportement réel et à long terme des renforcements d'urgence, notamment face au changement climatique.

Plan de travail prévisionnel (3 ans) :

Le plan de travail prévisionnel s'étale sur trois ans. (i) Au cours de la première année, les activités principales incluront une revue bibliographique approfondie, les prélèvements de sols sur le terrain, la caractérisation des matériaux in situ et la mise en place du dispositif expérimental basé sur les colonnes de suffusion. (ii) La deuxième année sera consacrée à la conduite de la campagne expérimentale complète, au développement du modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets (DEM) et à la réalisation des premières simulations. (iii) Enfin, la troisième année portera sur la validation croisée des données expérimentales et

numériques, l'intégration des effets des cycles climatiques dans les modèles, la construction de la bibliothèque de mesures réactives, ainsi que la rédaction et la finalisation de la thèse.

- **Mots Clés** : Modélisation numérique, érosion interne, suffusion, expérimental, modélisation en éléments discrets, Digues fluviales, Renforcement d'urgence, Cycles climatiques

- **Profil recherché** : Une solide formation en géomécanique, accompagnée de compétences avancées en modélisation numérique, en particulier par la méthode des éléments discrets (DEM). Une bonne maîtrise des outils de programmation tels que Python et Matlab est attendue, ainsi qu'un bon niveau d'anglais, à l'écrit comme à l'oral.

- **Envoyer CV** + lettre de motivation + diplômes et bulletin de notes + recommandations (lettres ou références du contact)

Context and problem statement:

The thesis is part of a European project (BONSAI: Boosting flood resilience in estuarine Systems Anticipating shifting climate zones) which aims to enhance the resilience of hydraulic structures such as dikes and estuarine systems against flooding, while anticipating the effects of climate change. This project, coordinated by STOWA (2024-2029), involves around fifteen partners (academics, industries, local authorities, etc.) in France (ULILLE, ESTP, CEREMA, ISL) and in Europe (Germany, Belgium, the Netherlands). The proposed thesis will be carried out in collaboration between the University of Lille and ESTP, both partners of the BONSAI project.

Internal erosion, and more specifically the phenomenon of suffusion, is one of the main risks threatening the stability of flood protection dikes. This process occurs when fine soil particles are carried by water through a coarser granular matrix, gradually degrading the structure. The danger becomes critical during rapid water level rises upstream, inducing significant hydraulic gradients through the dike. In this context, emergency reinforcements are often necessary, particularly at the downstream toe of the dikes, where percolation is most intense. However, the materials used in emergency interventions are generally sourced from nearby locations and do not always meet the particle size or density criteria required for qualified filters, such as those used in dams. This raises considerable uncertainties about their effectiveness in preventing the migration of fine particles while ensuring proper drainage. It is therefore essential to better understand the behavior of these materials under real and degraded conditions, especially under the effects of time, seasonal cycles, and extreme hydraulic events.

Objectives:

This thesis aims to (i) characterize in situ materials, often heterogeneous, that can be used for emergency reinforcement of river dikes; (ii) study their behavior towards suffusion using laboratory tests reproducing environmental cycles and realistic hydraulic stress; (iii) develop a discrete element model (DEM) to simulate the real behavior of these soils, which may present granular and compaction heterogeneities, in response to internal erosion; (iv) integrate the

effects of time, seasons, and extreme events into experimental and numerical approaches; and (v) create a library of reactive measures, linking vulnerability thresholds to practical recommendations for emergency interventions.

Methodology:

Experimental Studies: Suffusion Columns:

The study uses a suffusion column to simulate internal erosion of soils under hydraulic gradients. The tests will integrate: (i) the natural variability of soils (grain size, compaction), (ii) seasonal cycles (such as wetting/drying), and (iii) extreme events (abrupt injections, prolonged saturation, drought). Eroded particles, permeability, fine particle concentration, and erosion initiation time will be measured to define an Erosion Resistance Index quantifying the resilience of the materials.

Numerical Modeling: Discrete Element Method (DEM):

A numerical model based on the Discrete Element Method (DEM) will be developed to reproduce the real granular behavior of materials subjected to suffusion. (i) This model will take into account grain-to-grain interactions, such as contact forces and detachment mechanisms; (ii) the evolution of interstitial pressures; (iii) the heterogeneity of materials and the quality of their compaction; and (iv) the effects of climatic cycles, including the formation of micro-cracks and variations in porosity. (v) The fluid-solid coupling will simulate the initiation and progression of suffusion, permeability losses due to the migration of fine particles, and the impact of variable hydraulic stresses over time. (vi) The model will be calibrated and validated using experimental results.

Integration of Time Factor and Climatic Conditions:

The studies (both experimental and numerical) will integrate the effects of aging, seasonal variations, and extreme events, to better represent the real and long-term behavior of emergency reinforcements, particularly in the face of climate change.

- Keywords: Numerical Modeling, Internal Erosion, Suffusion, Experimental, Discrete Element Modeling, River Dikes, Emergency Reinforcement, Climatic Cycles

- Required Profile: A strong background in geomechanics, along with advanced skills in numerical modeling, particularly using the Discrete Element Method (DEM). Proficiency in programming tools such as Python and Matlab is expected, as well as a good level of English, both written and spoken.

- Send CV + motivation letter + diplomas and grade transcripts + recommendations (letters or contact references).