

## Sujet de thèse

***Amélioration de la stabilité des digues de protection par l'utilisation de matériaux locaux : atténuation des risques de suffusion et d'endommagement liés à la faune – Approche expérimentale et modélisation numérique***

**Direction de thèse / Encadrement :**

Jamal EL KHATTABI (ULille, jamal.elkhattabi@univ-lille.fr)

Marwan SADEK (ULille, marwan.sadek@polytech-lille.fr)

Abdelkrim BENNABI (ESTP, abennabi@estp.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 :** Contrat doctoral - Financement projet Européen Interreg

**Début prévu de la thèse :** 01 Mars 2026

**Contexte et problématique :**

La thèse s'intègre dans le cadre d'un projet européen (BONSAI : Boosting flood resilience in estuarine Systems Anticipating shifting climate 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 dans le cadre d'un partenariat entre les équipes de recherche de l'Université de Lille et l'ESTP, tous les deux membres du consortium BONSAI.

L'érosion interne résulte de plusieurs phénomènes agissant sur la structure des digues. Parmi ceux-ci, la suffusion et l'activité de la faune fouisseuse constituent les facteurs les plus préoccupants. La suffusion représente l'un des principaux risques compromettant la stabilité des digues de protection contre les inondations. Ce processus se manifeste lorsque les particules fines du sol sont entraînées par l'écoulement de l'eau à travers une matrice granulaire plus grossière, entraînant une dégradation progressive de la structure interne. Le risque devient particulièrement critique lors des montées rapides du niveau d'eau en amont, qui génèrent des gradients hydrauliques élevés au sein de la digue. Parallèlement, l'action de la faune constitue un autre facteur majeur de fragilisation. Les galeries et terriers creusés par les animaux altèrent la cohésion du matériau et favorisent l'apparition de voies préférentielles d'écoulement, accentuant ainsi le risque d'érosion interne. L'interaction entre ces deux phénomènes, suffusion et activité animale, accroît considérablement la vulnérabilité des digues, en particulier lors des épisodes de remontée rapide des niveaux d'eau, pouvant conduire à leur rupture partielle ou totale.

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. De même, l'activité animale est fortement influencée par la nature et les conditions du milieu.

Dans ce contexte, des renforcements d'urgence sont souvent nécessaires, notamment au pied aval des digues, là où la percolation est la plus marquée. Cependant, les matériaux employés dans ces interventions rapides sont généralement prélevés à proximité, 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. Par ailleurs, l'activité de la faune dépend étroitement de la nature du sol, de son taux d'humidité, ainsi que des conditions environnementales locales, influençant directement la vulnérabilité du corps de digue face aux phénomènes d'érosion interne.

Il apparaît donc essentiel de mieux appréhender le comportement de ces matériaux en conditions réelles et dégradées, notamment lorsqu'ils sont soumis à des altérations dans le temps, à des cycles saisonniers de mouillage-séchage, ou encore à des sollicitations 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 caractériser les digues par des méthodes de contrôle non destructif (v) développer des modèles permettant de détecter les zones dégradées par l'activité animale (vi) développer des relations entre les paramètres physiques et l'état hydraulique (vii) à intégrer les effets du temps, des saisons et des événements extrêmes dans les approches expérimentales et numériques ; et (viii) 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.

#### **Études expérimentales sur site : Géoradar et résistivité électrique sur sites :**

L'étude vise à détecter les terriers d'animaux et leur géométrie, tout en caractérisant les conditions locales favorisant l'installation. Ces mesures qui se feront à base du Géoradar basse, moyenne et haute fréquence seront combinées aux relevés de tomographie de résistivité électrique (ERT).

#### **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.

#### **Modélisation numérique : méthode des éléments finis (Hydrus) :**

Ce code permet de simuler les transferts unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels de l’eau et des solutés dans des milieux poreux à saturation variable. Couplé aux mesures de tomographie de résistivité électrique, il devient possible de développer des modèles hydrogéophysiques établissant des relations quantitatives entre la teneur en eau, la conductivité électrique apparente et les propriétés texturales du sol. Ces corrélations permettent d’améliorer la caractérisation spatiale et temporelle des processus de suffusion, d’identifier les zones de fragilisation interne et de suivre l’évolution de la porosité et de la perméabilité dans le corps de digue au cours des cycles hydriques.

#### **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, réalisation des campagnes géophysiques 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, à la finalisation des campagnes géophysiques avec développement des modèles hydrogéophysiques, 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 :** érosion interne, suffusion, expérimental, méthodes de contrôle non destructif, Hydrogéophysique, digues fluviales, renforcement d’urgence, cycles climatiques, Modélisation numérique

**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)

**Accompagnement scientifique :** Le doctorant bénéficiera d’un accompagnement scientifique assuré par un chercheur post-doctoral.