

Sujet de thèse en co-tutelle internationale France-Liban

Développement d'une méthodologie basée sur le couplage MED/CFD et l'apprentissage automatique pour l'analyse du risque d'érosion interne par suffusion d'ouvrages hydrauliques

MPLAB-Multidisciplinary Physics Laboratory, Faculté des Sciences, Université Libanaise, Hadat-Baabda, Liban
Laboratoire des Technologies Innovantes LTI, UR-UPJV 3899, Saint-Quentin, France

Contexte : L'érosion côtière est un phénomène naturel qui entraîne un recul progressive du trait de côte du fait de la perte des sédiments situés le long du littoral. Si un tel processus est normalement assez lent, celui-ci s'avère nettement accéléré par le dérèglement climatique de notre planète. Ainsi, on estime que si le réchauffement climatique atteint une valeur de 1,5 °C à la fin du siècle, la montée des océans pourrait elle atteindre 55 centimètres à l'horizon 2100. Cette réalité s'avère particulièrement problématique au Liban où plus de 40% de la population vit à proximité des 210 kilomètres du littoral libanais, l'exposant directement à des phénomènes maritimes destructeurs (submersion, tsunamis, etc . . .). Des études récentes menées en baie d'Akkar au nord du Liban, ont ainsi mis en exergue une évolution important du trait de côte avec 86 % de son littoral affecté et un recul moyen de près de 2 mètres par an. En France, l'érosion du littoral touche déjà près de 20% des côtes françaises, menaçant directement tout un écosystème bien établi comme c'est par exemple en côte d'Opale où la baie d'Authie est un exemple de zone de biodiversité très sensible au changement climatique et aux phénomènes côtiers. Ainsi, en dépit d'aménagements côtiers assez lourds par le biais d'un littoral artificialisé par des blocs rocheux et du béton, la nature très sableuse du trait de côte de la baie d'Authie qui facilite les mouvements sédimentaires ne permet pas de stabiliser son érosion, mettant en péril tout un écosystème et une biodiversité. Face à cette problématique, il est donc crucial de mieux comprendre les mécanismes menant à l'érosion du littoral afin d'apporter des éléments de solution efficaces pour protéger des populations et un environnement directement touchés par ce phénomène dont la maîtrise s'avère délicate. Parmi les mécanismes mis en exergue les plus destructeurs, la suffusion est un phénomène d'érosion interne (voir Figure 1) particulièrement destructeur qui peut entraîner la rupture d'un ouvrage hydraulique (digue, barrage, levée de terre . . .) du fait du détachement et du transport de sédiments à travers le sol granulaire par écoulement de l'eau.

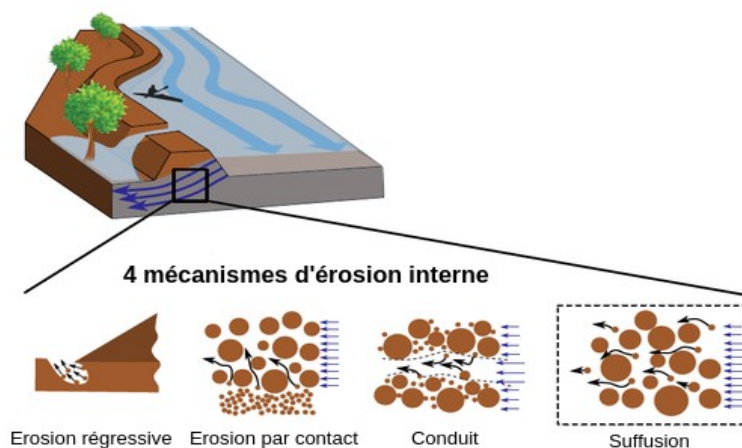


Figure 1 : Illustration des 4 phénomènes d'érosion interne (d'après <https://www.encyclopédie-environnement.org/>)

Objectifs : Parmi les voies déjà explorées pour étudier ce phénomène, le recours à des modèles numériques, utilisant des approches couplées multiphysiques intégrant généralement la CFD pour simuler finement l'écoulement de l'eau et la MED pour modéliser le caractère granulaire du sol [Xu2025] s'avère particulièrement pertinente. En effet, la MED présente l'avantage de décrire naturellement ce type de milieu permet de modéliser finement des phénomènes multi-physiques hydro-mécaniques complexes [Ammar2023]. Elle s'avère aussi particulièrement adaptée à la simulation de l'initiation et de la propagation de fissures [Leclerc2021, Leclerc2024]. Ainsi, le couplage MED/CFD présente de nombreux bénéfices, pour fournir par exemple des informations sur le taux d'érosion via l'estimation de la contrainte de cisaillement critique (CSS) [Rahimi2024], ou encore mieux comprendre l'impact des particules fines sur le comportement mécanique du sol [Taha2019, Taha2022] et permettre un suivi de la migration des particules fines à travers les pores [Wang2024]. Néanmoins, l'application du couplage MED/CFD se heurte à des problématiques de temps de calcul qui affecte la fiabilité et la précision des résultats prédictifs obtenus [Xu2025]. Une solution encore très novatrice dans ce domaine pour palier les limites de l'outil numérique consiste à tirer bénéfice de méthodes d'apprentissage automatique issus de l'intelligence artificielle lesquelles peuvent exploiter des bases de données expérimentales et numériques déjà existantes [Biglarfadafan2024, Gao2025]. Dans le cadre du sujet de thèse proposé, notre principal objectif est de mettre en place une approche de simulation du phénomène de suffusion basé sur le couplage MED-CFD et l'intelligence artificielle. Les résultats obtenus par le biais de ce modèle numérique à une échelle d'étude prédéfinie selon des jeux de paramètres (granulométrie, forme des particules, friction etc) pré-définis par le biais de plans d'expérience serviront de valeurs d'entrée à un modèle d'apprentissage automatique. Ce-dernier, une fois mis en place et alimenté avec suffisamment de données qui pourront être complétées par des résultats expérimentaux ou numériques de la littérature, fournira des informations cruciales sur les risques de rupture d'un ouvrage hydraulique (digue ou barrage) pour un large champ de configurations et de paramètres.

Méthodologie et planification :

Le sujet de thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe Mécanique et Ingénierie des Matériaux (MIM) du Laboratoire des technologies Innovantes (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne (UPJV/Amiens) et le Laboratoire de Physique Multidisciplinaire (MPLAB) de la faculté des sciences de l'université libanaise. L'équipe française apportera ses compétences en matière de simulation multi-physique avec la MED via la mise à disposition du code de calcul parallélisé MULTICOR3D++ (<https://github.com/leclercw/MULTICOR3D>) développé au LTI lequel intègre des outils de simulation hydro-mécanique avancés et permet de traiter des problèmes impliquant des systèmes particuliers de très grande taille, constitués de millions d'éléments discrets. Par le biais de l'équipe Systèmes Intelligents auquel est également membre Willy Leclerc, le LTI apportera également des compétences en matière de méthodes d'apprentissage automatique issus de l'intelligence artificielle. En ce qui concerne l'équipe libanaise, le professeur Khalil Abou Saleh fera bénéficier de ses compétences dans la modélisation des phénomènes de suffusion par le biais d'une approche numérique couplant CFD et MED développée dans le cadre d'un programme de collaboration franco-libanais Cèdre. Il apportera également son expérience en matière de caractérisation expérimentale afin d'évaluer le comportement mécanique d'échantillons de terre érodée (tests triaxiaux).

La planification du travail de thèse s'articulera sur la réalisation des tâches suivantes :

1. Etat de l'art et cadrage du sujet

La première partie de la thèse consistera à réaliser un état de l'art croisé suffisamment détaillé des avancées récentes réalisées dans les domaines de l'érosion côtière, de la suffusion et de la modélisation de ce type de phénomène par des approches de couplage MED/CFD. Il s'agira, à cette étape, d'évaluer la pertinence des modèles numériques existants et de sélectionner le plus adaptée pour implémentation dans le code MULTICOR3D++. Il s'agira par ailleurs de synthétiser un maximum de données déjà disponibles dans la littérature et le net. Enfin, sur la base d'articles de synthèse très récents, le doctorant recruté sera amené à prospecter les avancements réalisés et les perspectives de recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à l'étude du phénomène d'érosion interne.

2. Développement et exploitation d'un modèle de couplage MED/CFD

Sur la base de l'état de l'art réalisé et des travaux de thèse d'Habib Taha auxquels a contribué Khalil Abou Saleh, le doctorant recruté développera un modèle de couplage MED/CFD lequel sera intégré au code de calcul MULTICOR3D++. Sur la base d'éléments de benchmarking identifiés lors de la phase de bibliographie, un travail de validation sera réalisé à l'échelle du VER. Ce modèle prendra en compte divers paramètres granulaires réalistes tels que la granulométrie, la distribution des tailles des grains, la forme et la rugosité des particules, ainsi que leurs interactions avec le fluide (force de traînée et adhésion). Nous intégrerons également les propriétés mécaniques du sol, comme la résistance et la porosité, et étudierons les effets des conditions d'écoulement, notamment la vitesse de l'eau et les gradients de pression. Ce modèle permettra de mieux comprendre et prédire le phénomène de suffusion en tenant compte des interactions complexes entre le sol et le fluide sous différentes conditions.

3. Validation expérimentale en laboratoire à l'échelle réduite

Un ensemble d'essais expérimentaux seront réalisés en laboratoire au Liban pour valider le modèle numérique à l'échelle du VER. Plus précisément, des essais de compression triaxiaux seront menés afin de déterminer l'impact de la suffusion sur le comportement mécanique, la résistance au cisaillement et la stabilité d'un sol sous des conditions de contraintes contrôlées. Il s'agira par ailleurs de réaliser un travail d'observation microscopique (MEB) afin d'analyser la morphologie des grains, mesurer la porosité du sol étudié et évaluer sa dégradation structurale due au phénomène de suffusion. Ces expérimentations permettront de confronter les résultats numériques aux observations expérimentales et de parfaire la validation du modèle développé.

4. Mise en place d'une base de données et exploitation par l'IA

Il s'agira à cette étape de capitaliser sur l'ensemble des résultats numériques (issus du couplage MED/CFD implémenté dans MULTICOR3D++) et expérimentaux (issus des tests réalisés au Liban) afin de constituer une base de données structurée laquelle pourra être complétée par des données à la fois expérimentales et numériques issues de la littérature. Cette base sera exploitée par un modèle d'apprentissage automatique basé sur l'IA (de type réseaux de neurones) afin de prédire le comportement mécanique et la rupture du sol sous l'effet du phénomène de suffusion pour un large champ de configuration d'étude et de paramètres, à une échelle d'étude supérieure à celle du VER s'approchant au mieux de celle de l'ouvrage hydraulique.

5. Diffusion et valorisation scientifique

Le travail réalisé dans le cadre de ce travail de thèse sera valorisé à travers la publication de 3 articles scientifiques dans des journaux à facteur d'impact du domaine visé (Granular Matter, Journal of Geoscience and Environment Protection ou encore Geomechanics for Energy and the Environment). Nous visons également la participation à deux conférences nationales et deux conférences

internationales durant la période de thèse. Enfin, le mémoire de thèse rédigé ainsi que la base de données constituée seront diffusés librement. Le mémoire pourra ainsi servir d'ouvrage de référence aux acteurs académiques et industriels intéressés par les résultats obtenus et les développements numériques proposés.

Profil attendu:

Nous recherchons un(e) candidat(e) motivé(e) possédant un Master 2 ou un diplôme d'ingénieur en mécanique des fluides, génie civil (spécialité géotechnique ou hydraulique), ou science des matériaux. Une maîtrise de Python (NumPy, SciPy) et C++ (pour le calcul haute performance) est indispensable, ainsi qu'un intérêt pour la mise en place de plan d'expériences (méthodes Taguchi/Box-Behnken) et l'analyse de données multivariées. Le (ou la) candidat(e) devra faire preuve d'autonomie, de rigueur scientifique (gestion des incertitudes expérimentales) et d'une bonne maîtrise du français à l'écrit comme à l'oral. Une expérience en modélisation numérique (CFD, MED) ou une connaissance des problématiques côtières serait souhaitée. Ce sujet s'adresse à des profils curieux, rigoureux et motivés par la recherche interdisciplinaire en mécanique et sciences des données.

Références :

- [Ammar2023] A. Ammar, W. Leclerc, H. Haddad, A. Chetouani, M. Guessasma, Thermo-hygro-mechanical coupling model based on discrete element method to simulate hygrothermal-induced damage of PA6/GF30 material, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 282, 2023, 112450.
- [Biglarfadafan2024] M. Biglarfadafan, Artificial intelligence including machine learning and deep learning algorithms. In *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2024.
- [Gao2025] R. Gao, M. Gao, S. Yao, Y. Wen, Gully erosion susceptibility mapping considering seasonal variations of NDVI using a machine learning approach in the Mollisol region of China, *Soil and Tillage Research*, Volume 245, 2025, 106322.
- [Hu2022] Z. Hu, Z.X. Yang, N. Guo, Y.D. Zhang, Multiscale modeling of seepage-induced suffusion and slope failure using a coupled FEM-DEM approach, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 398, 2022, 115177.
- [Leclerc2021] W. Leclerc, A. Ammar, D. Moukadiri, T. Dridi, M. Guessasma, Halo approach to model cracks initiation and propagation in 3D Discrete Element Method simulation of homogeneous and heterogeneous materials, *Composite Structures*, Volume 259, 2021, 113222.
- [Leclerc2024] W. Leclerc, H. Haddad, M. Guessasma, Numerical approach using DEM to predict the failure mechanical response of porous brittle cylindrical tablets with a hole, *Powder Technology*, Volume 441, 2024, 119822
- [Rahimi2024] M. Rahimi-Larki, S. Vollmann, S. Jin, Flow-induced erosion modelling of cohesive material with coupled CFD-DEM approach, *Minerals Engineering*, Volume 217, 2024, 108947.
- [Taha2019] H. Taha, N.-S. Nguyen, D. Marot, A. Hijazi, K. Abou-Saleh, Micro-scale investigation of the role of finer grains in the behavior of bidisperse granular materials, *Granular Matter*, Volume 21, 2019, 28.
- [Taha2022] H. Taha, N.-S. Nguyen, D. Marot, A. Hijazi, K. Abou-Saleh, A DEM study of the effect of the loss of fine particles on the mechanical behavior of gap-graded soils, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Volume 31, 2022, 100305.
- [Wang2024] T. Wang, P. Wang, Z.-Y. Yin, F. Laouafa, P.-Y. Hicher, Hydro-mechanical analysis of particle migration in fractures with CFD-DEM, *Engineering Geology*, Volume 335, 2024, 107557.
- [Xu2025] J. Xu, F. Wang, R. Abegaz, State of the art of CFD-DEM coupled modeling and its application in turbulent flow-induced soil erosion, *Geosciences*, Volume 15(1), 2025, 21.

Encadrants : W. Leclerc (MCF-HDR/UPJV), H. Haddad (MCF/UPJV), K. Abou-Saleh (Pr/UL)

Contacts : Willy Leclerc (MCF-HDR/LTI), willy.leclerc@u-picardie.fr, +33 3 23 50 36 97
Khalil Abou-Saleh (PR/MPLAB), kabousaleh@ul.edu.lb