

Modélisations physique et numérique de l'érosion interne dans les ouvrages en remblais

Mots clés : suffusion ; digues ; modèle physique ; FEM ; théorie des mélanges ; filtration ; approche énergétique

Contexte

La France dispose d'un parc important d'ouvrages hydrauliques avec près de 9 000 km de digues 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. En outre, les études statistiques menées à l'échelle nationale (Fry et al., 2015) comme à l'échelle mondiale (Foster et al., 2000) montrent que seules 5% des défaillances subies par les digues en remblais sont dues aux glissements de talus, processus qui est bien pris en compte par les outils d'aide à la gestion des risques desdits ouvrages. Par contre, 95% de ces défaillances sont générées par les phénomènes de surverse et d'érosion interne, or ces processus ne sont pas correctement modélisés. Ce constat met en exergue la nécessité de réaliser des progrès scientifiques sur l'érosion interne des sols. La gestion des risques vis-à-vis de l'érosion interne est particulièrement difficile, car l'instabilité peut se produire même en l'absence de submersion de l'ouvrage et elle peut se produire suivant quatre mécanismes distincts : érosion régressive, érosion de conduit, suffusion et érosion de contact. Particulièrement dans le cas de la suffusion, son développement s'accompagne d'un couplage entre la sollicitation hydrodynamique et le comportement hydromécanique des sols. Ce couplage explique la complexité de la caractérisation de la sensibilité des sols et de ses conséquences sur leur comportement mécanique. Il convient de souligner en outre que les conséquences 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.

Approche

Les recherches menées au sein de l'Institut GeM sur la suffusion ont d'ores et déjà permis : (i) le développement de dispositifs expérimentaux pour la caractérisation de la sensibilité à l'érosion interne des sols (Rochim et al., 2017; Marot et al., 2020 ; Marot et al., 2024), (ii) l'élaboration d'une méthode d'interprétation (Marot et al., 2016), (iii) l'identification des paramètres prépondérants et des grandeurs intrinsèques (Kodieh et al., 2020 ; Gelet et Marot, 2022) et enfin (iv) la modélisation numérique de la suffusion (Gelet et al., 2021). La poursuite de ces travaux nécessite la production de résultats expérimentaux dédiés à la validation du modèle numérique, suivant différentes échelles spatiales et temporelles. Suivant cet objectif, trois modèles physiques de différentes tailles sont envisagés sur le long terme et avec plusieurs partenaires scientifiques : (a) à petite-échelle (longueur à la base : 1 m, hauteur : 0,45 m et largeur : 0,15 m), (b) à l'échelle intermédiaire (longueur à la base de l'ordre de 5,5m, hauteur de l'ordre de 1m et largeur de l'ordre de 1m) et (c) à grande échelle (longueur à la base de l'ordre de 30 m, hauteur de l'ordre de 3,5 m et largeur de l'ordre de 6 m). La

confrontation des résultats obtenus nous permettra d'étudier l'effet d'échelle éventuel et d'extrapoler ces résultats à l'échelle d'une structure réelle.

La présente étude se focalisera sur le modèle physique à petite échelle qui sera minutieusement instrumenté afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux avec les résultats numériques. Nous souhaitons en particulier mesurer le débit de l'effluent, le taux d'érosion des particules érodées, les pressions interstitielles en différents points du modèle, la déformation tridimensionnelle du talus et de la crête (photogrammétrie, Li et al., 2022 & 2023a ; Gelet et al., 2021 ; Horikoshi et Takahashi, 2015). Des mesures de densité et granulométriques post-suffusion seront également réalisées pour mesurer la nouvelle répartition spatiale des fines induite par l'érosion (Li et al., 2023b).

Les essais expérimentaux nécessaires à la caractérisation des sols testés vis-à-vis de la suffusion pourront être réalisés sur les dispositifs expérimentaux déjà développés. A la lumière de nos récents résultats (Oli et al., 2024), il semble que l'état mécanique influence peu le développement de la suffusion. Néanmoins, l'influence de la direction de l'écoulement par rapport à la gravité apparaît moins négligeable (Marot et al., 2020). Or dans un ouvrage comme dans un modèle physique, l'écoulement est majoritairement horizontal ou sub-horizontal. Ainsi, une étude comparative sur l'effet de la direction de l'écoulement sur les paramètres de l'érosion complètera cette partie expérimentale.

Le modèle hydromécanique actuellement utilisé pour modéliser la suffusion est basé sur la théorie des mélanges et sur une loi de comportement basée sur l'approche énergétique (Gelet et al., 2021). Cette loi de comportement a permis de représenter de façon satisfaisante, sur un volume élémentaire représentatif (VER), l'évolution du taux de masse érodée pour différents sols (Gelet et Marot., 2022) et différents chemins de chargement hydraulique (Kodieh et al., 2021). Néanmoins, le modèle doit encore être amélioré afin de prendre en compte la possibilité d'une filtration des grains érodés entre deux VER. Cette amélioration nécessite l'introduction de règles de filtration dans la suite des travaux initiés par Locke et al. (2001) et par Reboul et al. (2010).

Résultats attendus

Les livrables du projet seront :

- Etude de l'effet de la direction de l'écoulement sur les paramètres de la suffusion
- Développement d'un modèle physique de digue instrumenté et réalisation de plusieurs essais expérimentaux
- Codage de règles de filtration inter-éléments dans le code éléments finis existant
- Simulation numérique des essais expérimentaux

Compétences requises

- Une compétence en géomécanique expérimentale est requise
- Des compétences sur la caractérisation physique, mécanique et hydraulique des sols sont fortement recommandées.
- Des compétences en codage FORTRAN ou C++ sont recommandées.

Informations complémentaires & Contacts

La thèse sera située sur le site universitaire Heinlex à Saint-Nazaire.

Un Curriculum Vitae, une lettre de motivation et le relevé de notes (M1, M2) doivent être adressés par e-mail pour toute candidature à :

Dr. ZhongSen LI : zhongsen.Li@univ-nantes.fr

Dr. Rachel GELET : rachel.gelet@univ-nantes.fr

Prof. Didier MAROT : didier.marot@univ-nantes.fr

Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, 44600, France

Références

- Foster, M., Fell, R., & Spanagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 1000-1024.
- Fry, J.J., François, D., Marot, D., Bonelli, S., Royet, P., Chevalier, C., & Deroo L. (2015). Etude de l'érosion interne: apport du projet Eniroh. 25^{ème} Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD), Stavanger, Norvège, juin 2015. pp.486-507.
- 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*, 31, 100313.
- Horikoshi, K., & Takahashi, A. (2015). Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow. *Soils and Foundations*, 55(5), 1293-1304.
- Kodieh, A., Gelet, R., Marot, D., & Fino, A. Z. (2021). A study of suffusion kinetics inspired from experimental data: comparison of three different approaches. *Acta Geotechnica*, 16, 347-365.
- Li, Z.-S., Zhang, Y., Janiszewski, M., Korkiala-Tanttu, L. (2022). Radial deformation and failure of stabilised soft clay under uniaxial compression. *Soils and Foundations*, 62(5), 101213.
- Li, Z.-S., Korkiala-Tanttu, L., Solowski, W. (2023a). Measurement of three-dimensional shrinkage deformations and volumes of stabilised soft clay during drying with Structure from Motion photogrammetry. *Acta Geotechnica*, 18, 5319-5339.
- Li, Z.-S., Fleureau, J.-M., Souli, H., Fry, J.-J., Ouahbi, T., Taibi, S. (2023b). Effect of internal stability on the failure properties of gravel-sand mixtures. *Computers and Concrete*, 31(5), 395-403.
- Locke, M., Indraratna, B., & Adikari, G. (2001). Time-dependent particle transport through granular filters. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(6), 521-529.
- Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H. H., Bendahmane, F., & Sibille, L. (2016). Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology. *Natural Hazards*, 83, 365-388.
- Marot, D., Tran, D. M., Bendahmane, F., & Le, V. T. (2020). Multidirectional flow apparatus for assessing soil internal erosion susceptibility. *Geotechnical Testing Journal*, 43(6), 1481-1498.
- Marot, D., Oli, B., Bendahmane, F., Gelet, R., & Leroy, P. (2024). A Hydraulic Loading Path-Controlled and Stress-Controlled Erosion Apparatus for Assessing Soil Internal Erosion. Submitted to Geotechnical Testing Journal.
- Oli, B., Gelet, R., Marot, D., Bendahmane, F. & Coubard, G. (2024). Characterizing the initiation and the development of internal erosion under complex stress states. Submitted to Acta Geotechnica.
- 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.
- Rochim, A., Marot, D., Sibille, L., & Thao Le, V. (2017). Effects of hydraulic loading history on suffusion susceptibility of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(7), 04017025.