



## Introduction:

L'érosion est l'usure progressive de la matière solide sous l'effet d'agents naturels tels que le vent, l'eau ou la glace. Cela peut conduire à la dégradation de divers types de sols et à la génération de transports solides. Comprendre et mesurer l'ampleur de l'érosion des sols est crucial dans de nombreux domaines de l'environnement et de l'ingénierie. Le phénomène est étudié depuis des années dans des domaines comme la météorologie, la dégradation des fonds marins, l'érosion des côtes et l'évolution morphologique des rivières et des estuaires. En génie civil, l'érosion peut avoir un impact significatif sur la durabilité et la sécurité de structures telles que les barrages, les ponts et les structures offshore, et peut interférer avec les activités humaines [\(Bollaert, 2003\)](#), [\(Bonelli S. , 2012\)](#) et [\(Bonelli, 2013\)](#). L'érosion des sols a également des conséquences écologiques plus larges comme la dissémination de métaux lourds ou de particules radioactives par le transport de sédiments et l'impact sur le cycle global du carbone [\(Van Oost, 2007\)](#) dans les sols agricoles.

En France, on compte environ dix mille barrages, dont environ 500 classés comme grands, ainsi que plusieurs milliers de kilomètres d'ouvrages hydrauliques tels que des digues de rivière ou des remblais de cours d'eau. Leur objectif principal est de retenir l'eau dans le temps, mais ils sont également utilisés pour produire de l'énergie hydroélectrique et pour les systèmes d'irrigation pendant la saison sèche. Beaucoup de ces structures hydrauliques ont plus d'un demi-siècle, ce qui les rend particulièrement susceptibles de se briser [\(Foster, 2000\)](#). Plus de 70 incidents ont été rapportés par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) en France, en particulier lors de périodes de fortes crues (Aude en 1999, Gard en 2002, et Rhône-Alpes en 2003). Une telle défaillance d'un ouvrage hydraulique en terre peut avoir des conséquences dramatiques en termes de vies humaines et de pertes économiques.

L'érosion est de loin la cause la plus fréquente de rupture des barrages en terre. On peut distinguer deux situations différentes : L'érosion externe, c'est-à-dire la dégradation de la surface extérieure de l'ouvrage hydraulique en cas de surverse ou de débordement, et l'érosion interne qui a lieu à l'intérieur de l'ouvrage ou de la fondation par les flux d'infiltration. Dans ce dernier cas, il peut donc n'y avoir aucun signe extérieur d'érosion jusqu'à ce que le phénomène soit suffisamment avancé pour être visible et détectable par des appareils de mesure. La susceptibilité d'un sol à l'érosion peut être évaluée à l'aide d'appareils spécifiques développés à cet effet et basés sur des modèles d'interprétation principalement empiriques. La compréhension de la physique intrinsèque du mécanisme qui sous-tend les processus spécifiques de l'érosion des sols a été largement étudiée pour le cas spécifique des matériaux granulaires, mais très peu pour les sols cohérents, pour lesquels de nombreuses questions sont encore ouvertes.

Cette thèse traite de l'érosion induite par l'écoulement de l'eau de géomatériaux plus complexes que les sols de pure friction, que l'on retrouve souvent dans les ouvrages hydrauliques de génie civil ayant des implications socio-économiques importantes. Plus spécifiquement, nous nous concentrons ici sur les matériaux granulaires cimentés avec des liaisons solides inter-particules. Nous visons à étudier la caractérisation mécanique d'un système granulaire cimenté artificiel à différentes échelles et le développement d'instabilités

hydromécaniques de ce sol modèle, à la fois par fluidisation localisée et par chargement hydraulique. Ce travail de recherche multidisciplinaire implique différentes communautés scientifiques, notamment celles de la mécanique des sols, de la géotechnique et de la géophysique. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet bilatéral financé par l'ANR-DFG, appelé COMET (Coupled micromechanical modeling for the analysis and prevention of erosion in hydraulic and offshore infrastructures).

### Caractérisation micro-macro-mécanique:

Nos recherches ont d'abord porté sur la caractérisation micro-macro-mécanique expérimentale de matériaux granulaires cimentés artificiels, constitués de billes de verre sphériques liées par des ponts de paraffine. En faisant varier les propriétés (taille des particules, état de surface et teneur en paraffine) de ce matériau artificiel, nous avons testé une large gamme de paramètres de l'échantillon. D'une part, nous avons étudié plusieurs sollicitations à l'échelle micro pour étudier la force de liaison, allant des forces de traction et de cisaillement aux moments de flexion et de torsion. Malgré la grande dispersion détectée (erreur standard néanmoins inférieure à 20%), la force de microtraction s'est avérée augmenter à la fois avec la teneur en paraffine et le diamètre des billes de verre. Au moyen de la tomographie à rayons X et d'expériences spécifiques de traitement d'images, nous avons examiné trois modes différents de rupture du lien : (i) la rupture adhésive, lorsqu'un décollement complet à la surface de la perle se produit ; (ii) la rupture cohésive, lorsque le pont lui-même est fracturé ; (iii) la rupture mixte, qui combine les deux autres. Typiquement, environ 90% des ruptures de lien sont des ruptures adhésives pour les particules polies, alors que, pour les perles mates, les ruptures sont principalement mixtes. Seuls quelques rares cas de ruptures cohésives ont été observés pour les billes mates de grand diamètre. Un résultat intéressant est que, dans la dispersion intrinsèque, la résistance à la microtraction ne semble pas être affectée par la taille du pont de paraffine ni par le type de rupture. Pour interpréter nos mesures, nous avons réussi à dériver une loi théorique qui lie la force de micro-traction à la teneur volumique en paraffine, au nombre de coordination et au diamètre des grains. Enfin, nous avons proposé de relier linéairement les valeurs critiques de la force de cisaillement, du moment de flexion et du moment de torsion à la force de micro-traction, en utilisant des coefficients obtenus en ajustant l'ensemble de nos données et en offrant ainsi un modèle 3D calibré pour la cimentation des grains par des liaisons solides.

D'autre part, nous avons effectué des essais de macro-résistance pour lesquels une grande variabilité a été mesurée, encore plus grande qu'à l'échelle micro. Au-delà de cette dispersion, résultant à la fois de la dispersion de la force de cohésion particule-particule et d'un effet de taille finie suspecté lié aux macro-dispositifs, la résistance à la traction macro s'est avérée, comme prévu, augmenter avec la teneur en paraffine. Une proposition de loi théorique basée sur celle à l'échelle micro a été dérivée par l'utilisation d'une loi d'homogénéisation proposée par Richefeu et ses co-auteurs (Richefeu, 2006) et dans la continuité des travaux initiaux de Rumpf. Cette expression théorique suggère une dépendance uniquement de la concentration volumique de la paraffine et non de la taille des billes de verre. L'observation d'une rupture fragile instantanée au cours de plusieurs essais de fluage indique l'absence d'un endommagement progressant dans l'échantillon par des ruptures de liaison. Enfin, des essais complémentaires ont montré que la force macro-tensile pouvait être affectée par le taux de chargement, et la non-répétabilité des essais de fluage a mis en évidence la nature aléatoire du processus de rupture.

### Rupture hydraulique localisée d'une couche granulaire cimentée

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons réalisé plusieurs campagnes expérimentales sur des matériaux granulaires cimentés immergés soumis à une charge

d'écoulement localisée par injection au fond. Globalement, l'ensemble de ces expériences a montré que les lits cimentés composés de billes plus grosses et d'une teneur en paraffine plus élevée nécessitaient un débit plus important pour être déstabilisés. Quatre modes distincts de défaillance hydraulique ont été observés : (i) un régime statique, sans mouvement de l'échantillon ; (ii) une rupture de bloc, caractérisée par l'apparition d'une fissure médiane au-dessus de l'entrée de l'écoulement ; (iii) une rupture par voie fluidisée, par enfouissement progressif le long des parois vers l'entrée ; et (iv) une rupture par soulèvement de bloc, lorsque l'échantillon glisse vers le haut au niveau des parois latérales suite à une rupture préalable des liaisons à ses limites. Pour relier ces expériences à notre caractérisation micromécanique précédente, nous avons tracé la pression hydraulique critique, acquise lors de chaque expérience de rupture hydraulique, en fonction de la force de microtraction. La tendance résultante et plutôt spéculative a montré que le seuil hydraulique augmentait effectivement avec la cohésion du sol cimenté, quel que soit le mode de déstabilisation. Enfin, en cohérence avec les données précédentes issues d'expériences sur la fluidification localisée granulaire (Mena, 2017), il a été possible de rassembler de manière satisfaisante toutes les données, approximativement selon la loi d'Ergun, en considérant les nombres adimensionnels pertinents, à savoir le nombre de Reynolds de la particule d'entrée et le nombre d'Archimède, ce dernier étant adapté au cas cimenté en considérant la force de micro-traction au lieu du poids flottant du grain.

De plus, nous avons réussi à simuler plusieurs types de défaillances hydrauliques localisées dans des lits granulaires cimentés en utilisant un code numérique 2D maison basé sur une méthode de couplage LBM-DEM. Les paramètres gouvernant le début de l'érosion se sont avérés être le débit (indépendamment du profil de vitesse appliqué à l'injection d'entrée), le diamètre des particules, la force de liaison et la hauteur du lit. Une phénoménologie assez similaire a ainsi été observée, incluant les scénarios suivants qui rappellent les expériences : (i) le régime dit statique, avec un endommagement partiel possible par rupture d'une fraction des ponts solides ; (ii) le scénario de fracture, qui fait référence à une déstabilisation du lit cimenté par des fissures inclinées presque symétriques initiées depuis l'entrée ; (iii) le scénario de cheminée fluidisée, qui fait référence à une déstabilisation localisée des grains, depuis l'entrée, de la même manière qu'avec un matériau purement granulaire ; (iv) le scénario mixte, qui est une combinaison des deux précédents. En utilisant des diagrammes de phase, nous avons finalement discuté de l'influence du débit d'entrée et de la force de liaison sur les modes de défaillance. Dans l'ensemble, nous avons obtenu un accord intéressant bien que limité entre la partie numérique 2D et les résultats expérimentaux. Cependant, cette divergence nous incite à améliorer la modélisation en poursuivant une extension en 3D. En collaboration avec le BAM, quelques simulations 3D préliminaires et plutôt prometteuses utilisant le cadre WaLBerla ont été réalisées avec succès à la toute fin de cette thèse.

## References

1. Bollaert, E. a. (2003). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review. *Journal of Hydraulic Research*, 451-464.
2. Bonelli. (2013). *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*.
3. Bonelli, S. (2012). *Erosion of geomaterials*.
4. Foster, M. a. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 1000-1024.
5. Mena, S. E.-H. (2017). Parameters affecting the localized fluidization in a particle medium. *AIChE Journal*, 1529-1542.

6. Richefeu, V. a. (2006). Shear strength properties of wet granular materials. *Physical Review E*, 051304.
7. Van Oost, K. a. (2007). The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 626-629.