

Offre de thèse : Etude du comportement des matériaux granulaires sous sollicitation cyclique

Lieux : Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Campus de Nantes, laboratoire MAST/GPEM et laboratoire GERS/GMG, Allée des Ponts et Chaussées, 44344 Bouguenais ;

Encadrement : Riccardo Artoni (riccardo.artoni@univ-eiffel.fr), Patrick Richard, Bogdan Cazacliu (MASTGPEM) ; Luc Thorel, Matthieu Blanc (GERS/GMG)

Contexte : Dans nombreuses applications industrielles et situations naturelles, des matériaux granulaires sont sujets à des sollicitations cycliques. Dans le génie civil tel est le cas, par exemple, des sols soutenant des ouvrages géotechniques, des éléments de chaussées en conditions de service et lors de leur mise en œuvre par compactage, ou encore du ballast ferroviaire en service et en conditions de maintenance. Malgré les fortes implications du comportement cyclique des milieux granulaires sur leur capacité à reprendre les charges, ce type de comportement est encore mal compris, donc mal modélisé, en particulier quand le nombre des cycles devient important. Cela est encore plus vrai quand l'application présente des interfaces avec des structures (murs, pieux, rails, ...), où des déformations hétérogènes et irréversibles peuvent apparaître.

Les méthodes des éléments discrets (DEM), issues des travaux de Cundall & Strack (1979), sont des techniques numériques dans lesquelles un milieu granulaire est simulé comme une collection d'individus, en interaction par le biais de lois de contact rendant compte de l'impénétrabilité de la matière, du frottement, etc. Chaque corps est traité comme un objet distinct avec ses propres degrés de liberté. La simulation numérique discrète permet de fournir des informations micromécaniques sur le comportement à l'échelle du grain et en particulier sur les possibles mécanismes de dissipation d'énergie (frottement, dissipation interne aux grains, fracture, attrition) en fonction du niveau de sollicitation et de confinement.

La centrifugeuse géotechnique permet, sur un modèle réduit de sol (e.g. un sable) à surface libre, de reproduire un champ de contrainte semblable à celui de l'ouvrage en vraie grandeur. En modifiant la vitesse de rotation, on change la force centrifuge, ce qui permet d'atteindre une macrogravité jusque 100 fois l'accélération de la pesanteur terrestre. Il est ainsi possible de s'intéresser par exemple à une fondation en modèle réduit soumise à des charges cycliques, verticales ou horizontales, unidirectionnelles ou alternées (comme celles pouvant être exercées sur des fondations d'éoliennes off-shore). La centrifugeuse permet donc de pouvoir réaliser une étude paramétrique sur un modèle réduit en faisant varier la gravité (et donc les contraintes appliquées), mais aussi le signal de chargement appliqué (intensité, fréquence,...), voire les caractéristiques du sol (e.g. densité du sable).

Sujet : Cette thèse portera sur l'étude du comportement de matériaux granulaires sous sollicitation cyclique, en couplant (1) simulation numérique discrète, (2) essais en macrogravité, (3) modélisation avec des modèles élastoplastiques. Deux types de configurations seront étudiés. En premier lieu, la rhéologie du matériau en cas de sollicitation cyclique simple (ex cisaillement périodique) et en conditions homogènes sera caractérisée à l'aide de simulations numériques discrètes effectuées sur un volume élémentaire en milieu semi-infini (conditions tri-périodiques). Des choix de modélisation de complexité croissante seront employés, en considérant en particulier la polydispersité des grains. Les simulations permettront de quantifier pour ces matériaux modèles l'évolution des modules de Young et de cisaillement sécants (E/E_{max} , G/G_{max}) avec la déformation, et l'hystérésis typique d'une sollicitation cyclique, qui se traduit en dissipation d'énergie mesurable avec un coefficient d'amortissement hystérétique (damping ratio).

Ensuite, une configuration hétérogène représentant l'interaction entre un milieu granulaire et une structure sur laquelle agissent des sollicitations cycliques sera analysée. Par exemple le cas d'un corps cylindrique (s'apparentant à un pieu) inséré verticalement dans le matériau sera implémenté. L'analyse des résultats des simulations, notamment à travers des méthodes de

moyenne adaptées (Artoni & Richard 2015, 2019) permettra de caractériser les forces transmises à la structure, l'évolution des déplacements et de la microstructure du matériau, en fonction des paramètres physiques des matériaux (frottement, cohésion, polydispersité) et des paramètres de sollicitation (fréquence, amplitude, forme d'onde, nombre de cycles). L'objectif de ces simulations sera de comprendre l'effet des oscillations sur la structuration du milieu granulaire, l'évolution de sa réponse mécanique, et la rétroaction sur le comportement de la structure, en tenant compte des phénomènes de frottement effectif interne et à l'interface matériau/structure.

Les simulations numériques seront comparées à des expériences en macrogravité dans la centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel. Ces expériences seront dimensionnées en considérant le besoin de réduire les potentiels effets d'échelle (e.g. Garnier et al. 2007). Des simulations numériques discrètes seront effectuées en appoint à cette phase de conception, en variant la gravité, la dimension du système, la taille des grains et la compacité initiale, afin de vérifier les lois d'échelle de littérature et dans le but de reproduire des expérimentations en modèle réduit correspondant à une même fondation prototype.

Les expériences ainsi dimensionnées permettront d'étudier l'effet de sollicitations cycliques sur le comportement de l'interaction sol-structure. Les essais en centrifugeuse géotechnique permettront de tester une configuration de fondation (type pieu, inclusion rigide ou fondation superficielle) ou d'ancrage (clou) à l'échelle réduite tout en pouvant varier l'état de contrainte grâce à la macrogravité. Les sollicitations correspondront à des charges de service avec une fréquence typiquement de l'ordre de 1 Hz. Le dispositif expérimental sera conçu avec une paroi transparente permettant de suivre les déplacements des grains de sable par imagerie. L'effort appliqué à la fondation sera également mesuré. L'instrumentation pourra intégrer des fibres optiques, des capteurs de contrainte, de déplacement, en fonction de la géométrie retenue.

Les résultats des simulations numériques discrètes ainsi que des essais en centrifugeuse seront comparés aux prédictions d'un modèle élastoplastique développé au laboratoire GPEM pour décrire la mécanique des sols sous sollicitations cycliques (Cazacliu & Ibraim 2016). Les résultats des recherches menées dans le cadre de cette thèse pourront être publiés sur des revues de physique (pour les aspects plus fondamentaux), de génie des matériaux granulaires (pour les aspects techniques des simulations), de géotechnique (pour les applications). Au moins deux articles devraient être soumis avant la fin de la thèse. Il est également envisagé que le doctorant présente ses travaux lors de conférences thématiques.

Profil : Les candidats doivent être titulaires d'un Master 2 de physique, mécanique, génie civil, ou équivalent. Ils doivent être motivés par les approches couplant des expériences avec des simulations numériques.

References :

- Artoni, R., & Richard, P., 2015. Average balance equations, scale dependence, and energy cascade for granular materials. *Physical Review E*, 91(3), 032202.
- Artoni, R., & Richard, P., 2019. Coarse graining for granular materials: micro-polar balances. *Acta Mechanica*, 230(9), 3055-3069.
- Cazacliu B., Ibraim, E., 2016. Elasto-plastic model for sand including time effect. *Géotechnique Letters* 6.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., König D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F., Thorel L. 2007 Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics* ISSN 1346-213X, vol7, n°3, pp 1-24.