

**Activité de recherche et d'enseignement**  
**Rawaz Dlawar MUHAMMED**  
**Juin 2021**

---

Cette paragraphe présente une synthèse de mes travaux de recherche et qui se situent dans le cadre du génie mécanique et du génie civil et sont plus particulièrement reliés au domaine de la géotechnique. Il détaille dans les grandes lignes mon parcours et mes activités de recherche à partir du Master 2 jusqu'à présent.

**1. Master 2 recherche en géotechnique, Ecole des Ponts ParisTech (mars – septembre 2011)**

Dans le cadre du master MSROE, et notamment dans le cadre de mon stage de recherche du master, j'ai travaillé sur la problématique du renforcement des sols par création de colonnes en «soil-mixing» [11], avec application à la stabilité des plateformes ferroviaires du réseau ferré français. Une étude expérimentale, à partir d'une approche du type modélisation physique, a été menée, au sein de l'équipe géotechnique du laboratoire Navier de l'ENPC, sur des tronçons de colonnes de « soil-mixing » mis en œuvre dans des massifs de limon de grande taille. L'objectif principal était d'évaluer le frottement latéral unitaire (local) mobilisable le long du tronçon de colonne, sous chargements monotones et cycliques. Mon travail s'est inscrit dans la phase initiale de cette étude, avec, comme objectifs : (a) la caractérisation du limon de référence mis en œuvre à partir des essais d'identification géotechniques ; (b) l'élaboration d'un protocole de reconstitution des massifs d'argile ; (c) la réalisation d'essais préliminaires de validation du modèle physique développé.

Un programme d'essais préliminaires a été réalisé afin de valider le protocole expérimental développé, comportant à la fois des essais monotones à déplacement contrôlé, pour estimer la charge de fluage et la charge limite, et des essais cycliques réalisés sous différentes combinaisons de chargement cyclique. Les résultats ont permis de mettre en évidence l'influence de l'amplitude du chargement cyclique et du nombre de cycles qui semblent avoir un rôle prédominant sur le comportement du tronçon de colonne.

**2. Doctorat en géotechnique (novembre 2011 – octobre 2015), Ecole des Ponts ParisTech**

Les activités de recherche que j'ai développées dans le cadre de ma thèse de doctorat s'inscrivent dans le domaine de l'étude du comportement mécanique des fondations profondes et superficielles sous chargements statiques et cycliques. Le sujet principal de ma thèse est relié à l'étude du frottement local sol-pieu dans les sols fins saturés sous grands nombres de cycles [12]. L'approche retenue est une approche expérimentale du type modélisation physique en chambre d'étalonnage. En effet, lorsqu'un pieu est soumis à un chargement cyclique, les propriétés de frottement de l'interface sol-pieu peuvent évoluer de manière significative, avec, en général, une dégradation entraînant une réduction de la capacité portante du pieu. Dans ce cadre, l'objectif de la thèse était de réaliser une étude détaillée du comportement de l'interface sol-pieu lors de chargements cycliques axiaux dans une argile saturée, sous différentes conditions initiales de contrainte et différents paramètres de chargement. Nous étions intéressés par la fatigue de l'interface (grand nombre de cycle). Dans ce cadre, et afin de reconstituer un sol fin saturé au laboratoire, j'ai développé, avec l'aide de l'équipe technique du laboratoire, un dispositif de reconstitution de massifs d'argile saturée de grande taille, appelé « consolidomètre », qui permet de préparer de manière répétable des massifs d'argile saturée homogènes qui sont mis en œuvre et testés par la suite dans une chambre d'étalonnage. L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ma thèse m'a permis de mettre en évidence, pour un pieu sous chargement cyclique vertical, après une phase de dégradation initiale, une phase de renforcement du frottement local. Ce type de comportement n'a pas encore été décrit dans la littérature pour les argiles saturées. Une étude paramétrique a également été réalisée. On s'est intéressé, en particulier, à l'influence de l'amplitude du chargement cyclique, de la fréquence des cycles, du niveau des contraintes initiales appliquées au massif, ainsi que du nombre de cycles appliqués sur les comportements observés. L'accent a été mis sur le cas des grands nombres de cycles, typiquement quelques centaines de milliers, encore très peu étudié.

L'ensemble de ces travaux m'a permis de publier quatre articles dans une revue internationale de rang A [6], [8], [9] et [10], un rapport de recherche [1] ainsi que quatre communications [7], [13], [15] et [19].

### **3. Chargé de recherche (Post-doctorat)**

#### **3.1. Caractérisation d'une craie marine (novembre 2015- 2017)**

Depuis la soutenance de ma thèse, je poursuis actuellement mes activités de recherche dans le cadre d'un post-doc, réalisé, lui aussi, au sein de l'équipe Géotechnique du laboratoire Navier. Le premier travail s'est inscrit dans le cadre du projet d'implantation d'un champ d'éoliennes offshore au large de Fécamp, en Normandie, sur un site composé de matériaux crayeux affleurants, avec des profondeurs d'eau de l'ordre d'une trentaine de mètres. Ces travaux ont été réalisés en partenariat avec la société EDF-Energies nouvelles (EDF-EN). Leur objectif principal était d'étudier, sur un dispositif triaxial servohydraulique de grande taille, permettant de tester des éprouvettes de 300 mm de diamètre, le comportement mécanique de la craie saturée sous sollicitations statiques et cycliques, dans des conditions non drainées. Les résultats obtenus [16], pour les essais triaxiaux de compression consolidés non drainés ont permis de déterminer les paramètres du critère de rupture de Mohr-Coulomb (angle de frottement interne  $\varphi'$  et cohésion apparente  $c'$ ) et l'évolution de la résistance au cisaillement non drainé,  $c_u$  avec la contrainte de consolidation isotrope  $\sigma'_c$  pour ce matériau peu documenté.

En ce qui concerne les essais triaxiaux cycliques (CU-cyclique), les résultats obtenus ont permis de quantifier la génération de surpressions interstitielles sous des chargements de type tempête, comportant quelques centaines ou quelques milliers de cycles, caractérisés par un nombre de cycles relativement faible mais des amplitudes de cycle assez élevées.

Pour des raisons de confidentialité (jusqu'en 2019), aucun article de synthèse n'a encore été publié à ce jour sur ces travaux. Néanmoins, une partie des résultats ont été publiés dans le cadre de conférences nationales et internationales [17], [18] et [20].

#### **3.2. Liquéfaction des sables (novembre 2015- 2017)**

Durant la même période, un autre travail a été réalisé, en parallèle, sur la liquéfaction d'un sable venant de la région de Chlef, en Algérie, en collaboration avec le prof. Nouredine Della, enseignant à l'université de Chlef. Trois articles synthétisant ces travaux ont été publiés dans des revue internationale de rang A [2], [3] et [4] ainsi qu'une communication [5].

#### **3.3. Fracturation des réservoirs sableux en condition d'injection radiale (2017- 2018)**

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe géotechnique (CERMES) du Laboratoire Navier et la société TOTAL. Il s'agit d'une étude expérimentale de la fracturation des réservoirs sableux en condition d'injection radiale. Le travail avait déjà commencé dans le cadre de la thèse de doctorat (2011-2015) et du post-doc (mars 2015-juin 2017) dans laquelle un nouveau prototype d'essai d'injection radiale en chambre d'étalonnage en vue de s'approcher au mieux des conditions d'injection de puits a été développé. Dans le cadre de mon travail, des modifications ont été apportées au dispositif initial pour résoudre les difficultés expérimentales rencontrées auparavant qui empêchait dans certains essais l'augmentation de la pression de fluide lors de l'injection. Un programme d'essais a pu être réalisé. Nous avons pu, en particulier, mettre en évidence des chutes de la pression d'injection au-delà de la contrainte de consolidation minimale appliquée. Cette réponse pourrait être le signe d'une transition du régime d'injection et une possible fracturation du massif au voisinage du point d'injection. Des analyses après essai ont également été réalisées afin de quantifier le type de colmatage interne et/ou externe de la matrice sableuse ainsi que son hétérogénéité sur la hauteur de la crépine d'injection.

#### **3.4. Battage des pieux dans les sables denses saturés (2018 à présent)**

A partir de Janvier 2018, j'ai commencé à travailler dans le cadre d'un autre projet de recherche consacré à l'étude du processus de battage des pieux dans les sables denses saturés. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe géotechnique du laboratoire Navier et la société hollandaise IHC- IQIP. Le contexte de ce projet est celui de la construction d'éoliennes offshore de grande taille reposant sur des monopieux de grand diamètre battus dans des sables saturés. L'objectif est de mieux appréhender les mécanismes de battage des pieux dans les sables saturés en utilisant là aussi une approche expérimentale du type modélisation physique en chambre d'étalonnage. L'accent est mis sur l'influence des surpressions

interstitielles générées au cours du processus sur le déroulement de ce processus. Les résultats obtenus doivent permettre de proposer des améliorations au processus de battage actuellement utilisé pour ce type de pieu et, en particulier, d'en optimiser les paramètres (énergie, fréquence de battage, etc.). Un rapport de recherche intermédiaire a déjà été rédigé [14].

#### 4. Références

- [1]. Canou, J., **Muhammed, R.-D.**, Dupla, J.-C., Y. J. Cui, (2012) " Essais triaxiaux cycliques non drainés sur limon traité", Note de synthèse, P. 110.
- [2]. Della, N., **Muhammed, R. D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., (2016) "Influence of initial conditions on liquefaction resistance of sandy soil from Chlef region in northern Algeria", *Geotech Geol Eng* (2016) 34: 1971. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0077-8>
- [3]. Denine, S., Della, N., Feia, S., **Muhammed, R. D.**, Canou, J. and Dupla, J.-C. (2018) "Shear behavior of geotextile-reinforced Chlef sand in the Mediterranean region: Laboratory investigation", *Marine Georesources & Geotechnology*, 37, pp 599-608 <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1466224>
- [4]. Denine, S., Della, N., **Muhammed, R. D.**, Feia, S., Canou, J., Dupla, J.-C. (2016). Effect of Geotextile Reinforcement on Shear Strength of Sandy Soil: Laboratory Study. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(4), pp. 3-13. Retrieved 10 Jul. 2017, <https://doi.org/10.1515/sgem-2016-0026>
- [5]. Denine, S., Della, N., **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C. (2015). "An experimental investigation into the shear behavior of geotextile-reinforced sand". Deuxième séminaire international de Génie civil 'SIGCB', Béchar, 27 and 28 Octobre. P. 6.
- [6]. Khouaouci, M., **Muhammed R. D.**, Bouafia A., Canou J. & Dupla J.-C. (2021) Model pile behavior in calibration chamber under very large number of cycles of axial loading in saturated clay. *Geomechanics and geoengineering*. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1573325>
- [7]. **Muhammed R.D.**, Canou J., Dupla J.C., Tabbagh A. (2018) "Laboratory Study of Local Clay-Pile Friction Evolution for Large Numbers of Cycles". In *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique - Ouvrages -Structures. CIGOS 2017. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 8. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6713-6\\_74](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6713-6_74)
- [8]. **Muhammed, R. D.**, Canou J., Dupla J.-C., Tabbagh A. (2019) Evaluation of local friction and pore water pressure evolution along instrumented probes in saturated clay for large numbers of cycles. *Canadian Geotechnical Journal*. 56 (12) <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0408>
- [9]. **Muhammed, R. D.**, Canou J., Dupla J.-C., Tabbagh A. (2020) A parametric study on the evolution of cyclic clay-pile interface friction for large numbers of cycles. *Geotechnical and Geological Engineering journal*, 38, pages 5457–5473 <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01377-4>
- [10]. **Muhammed, R. D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., Tabbagh, A. (2018). "Evaluation of local soil-pile friction in saturated clays under cyclic loading". *Soils and Foundations*. Tokyo- 58(6) <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.06.006>
- [11]. **MUHAMMED, R.-D.**, (2011). "Etude sur modèle physique du renforcement des sols par colonnes en Soil-Mixing", Rapport de stage de master de recherche (MSc thesis), UPMC.
- [12]. **MUHAMMED, R.-D.**, (2015). "Etude en chambre d'étalonnage du frottement sol-pieu sous grands nombres de cycles. Application au calcul des fondations profondes dans les sols fins saturés", thèse de doctorat (PhD thesis). UPMC, p. 204. <https://www.theses.fr/2015PA066603>

- [13]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C. (2018) "EFFECT OF LOADING FREQUENCY ON THE EVOLUTION OF CLAY-PILE FRICTION FOR LARGE NUMBER OF CYCLES ", Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018, P. 8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01986127/document>
- [14]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., (2018). "EXPERIMENTAL STUDY, IN A CALIBRATION CHAMBER, OF THE PILE DRIVING PROCESS IN SATURATED SANDS" Intermediate report n°1, Synthesis of piezocone (CPTU) test results (WP1), Prepared for IHC IQIP, Netherlands.
- [15]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., H. Delmi (2016) "ETUDE EN CHAMBRE D'ETALONNAGE DU FROTTEMENT SOL-PIEU DANS UNE ARGILE SATURÉE SOUS GRAND NOMBRE DE CYCLES", Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Nancy, pp. 312-319 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01986157/document>
- [16]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., H. Delmi, (2016). "Mechanical characterization of Fecamp marine chalk on 100 mm and 300 mm diameter triaxial specimens", Final report, established for EDF-EN and G-TEC, 24 March, p. 80.
- [17]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., Palix, E. and Duc, M. (2018) "Hydro-mechanical behaviour of a weathered marine chalk". Engineering in Chalk, Imperial College – London. pp. 535- 540. <https://doi.org/10.1680/eiccf.64072.535>
- [18]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., Palix, E. et Duc, M. (2018) "COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE D'UNE CRAIE MARINE ALTEREE ", Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Champs-sur-Marne 2018, P. 8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01986116/document>
- [19]. **Muhammed, R.-D.**, Canou, J., Dupla, J.-C., Tabbagh, A. (2016). "Evaluation, in a calibration chamber, of soil-pile friction in a saturated clay for large numbers of cycles", EMI international conference, Metz, France <https://hal-univ-tlse3.archives-ouvertes.fr/SU-SCIENCES/hal-01986087>
- [20]. Palix, E., Souviat, B. and **Muhammed, R.-D.** (2017). " Effect of Sampling on Behaviour of Weathered Chalk with Flints", Offshore Site Investigation and Geotechnics, Proceedings of the 8th International Conference, 12–14 September 2017 at the Royal Geographical Society, London, pp. 1170-1177(8) DOI: <https://doi.org/10.3723/OSIG17.1170>