



Full Length Research Paper

Modélisation numérique de l'interaction sol-structure : cas d'un monopieu soumis à une charge latérale

Ndèye Maty NDOYE^{1*}, Aliou Badara CAMARA¹, Mathilde MORVAN², AbdelHamid BOUCHAIR²,
Pierre BREUL², Séni TAMBA¹

¹ Ecole Polytechnique de Thiès, LASTEE, BP : A10 Thiès, Sénégal

² Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

Received April 2024 – Accepted June 2024



*Corresponding author. ...ndoyenm@ept.edu.sn / abcamara@ept.edu.sn

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé :

L'interaction sol-structure est le phénomène par lequel les charges de la superstructure, appliquées aux fondations, affectent le sol et la fondation elle-même. Ce phénomène qui a une influence sur la stabilité et la sécurité des ouvrages est fondamental dans la conception des fondations afin d'assurer leur durabilité. Plusieurs approches telles que le modèle de Winkler, la méthode des éléments finis, entre autres permettent de modéliser ce phénomène.

Ce travail présente une modélisation numérique sur ANSYS de l'interaction sol-pieu où le pieu est soumis à une charge latérale. Le modèle s'appuie sur les données expérimentales de Nusairat et al. A travers cette modélisation, le comportement mécanique complexe d'un monopieu, installé dans un sol argileux a été analysé dans le but de comprendre les mécanismes de déformation et de déplacement résultant de l'interaction sol-pieu. L'influence des propriétés du sol, des conditions aux limites et de la finesse du maillage, a également été examinée.

Les résultats obtenus avec le modèle ANSYS sont assez proches des résultats de la campagne expérimentale, en particulier en tête de pieu contrairement au modèle ABAQUS de Nusairat. Toutefois, des écarts subsistent à la base du pieu, probablement en raison de la simplification du modèle concernant la fixation. Cette étude met en lumière l'importance d'une modélisation précise pour capturer les phénomènes non linéaires associés à l'interaction sol-structure.

Bien que cette recherche offre des perspectives prometteuses, elle met en évidence la nécessité de poursuivre les investigations et les études paramétriques sur les conditions de fixation pour mieux affiner les résultats.

Mots clés: Interaction sol-structure, modélisation, monopieu, argile, charge latérale

Cite this article:

Ndèye Maty NDOYE, Aliou Badara CAMARA, Mathilde MORVAN, AbdelHamid BOUCHAIR, Pierre BREUL, Séni TAMBA (2024). Modélisation numérique de l'interaction sol-structure : cas d'un monopieu soumis à une charge latérale. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 6(1), pp. 33-36. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

L'interaction sol-structure vise à étudier le comportement du couplage entre une structure soumise à une excitation quelconque et le sol support, qui possède ses caractéristiques propres de déformabilité, voire de résistance. En effet, lorsqu'une structure est construite, elle exerce des charges sur le sol, qui répond en retour par des déformations et des déplacements. Ces réponses du sol influencent, à leur tour, le comportement de la structure. Ce phénomène se poursuit jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint [1]. Littéralement, l'interaction sol-structure traduit la

modification du mouvement du sol (ou de la structure) du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol). Cette interaction est, bien entendu, plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et du type de fondation [2, 3].

Dans le cas d'une fondation de type monopieu soumise à une charge latérale, la prise en compte de l'interaction sol-structure est très importante dans l'objectif de restreindre les déplacements et les déformations des fondations dans les limites admissibles. La superstructure étant fixée aux fondations, de grandes déformations pourraient affecter

la stabilité et la sécurité de l'ouvrage ou conduire à sa ruine.
Le travail présenté dans ce document traite de la modélisation numérique de l'interaction sol-pieu à l'aide du logiciel ANSYS.

2. Modélisation numérique

2.1. Modèle

Le modèle numérique réalisé sur ANSYS est basé sur les données expérimentales de Nusairat et al. [4]. Le modèle expérimental est constitué d'un sol hétérogène argileux d'une part et d'autre part, d'un pieu composé d'un profilé IPE (W14x109) enrobé de béton et l'ensemble confiné dans un tube creux en acier (Figure 1).

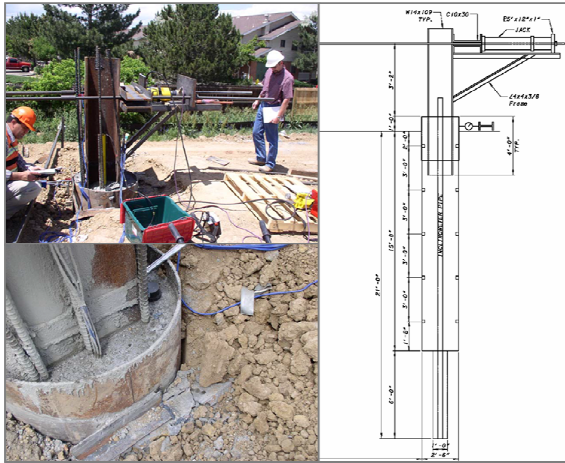


Figure 1 : Campagne expérimentale de Nusairat et al [4]

La modélisation par éléments finis est basée sur les caractéristiques géométriques du modèle expérimental. La Figure 2 illustre le modèle réalisé sur ANSYS avec une stratification du sol conforme aux résultats de la campagne expérimentale. Ce modèle numérique ne prend pas en compte la partie tube creux.

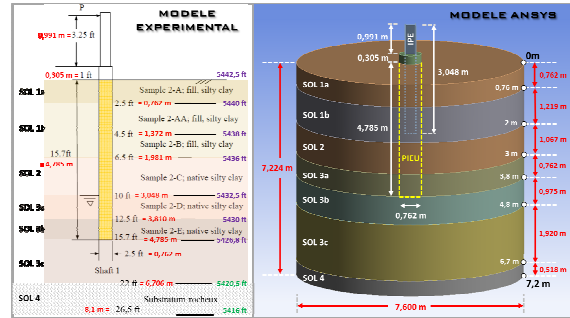


Figure 2 : Modèle numérique

2.2. Propriété des matériaux

Les propriétés des différents matériaux utilisés sont données dans le Tableau 1. Les valeurs d'écroutissage isotrope sont tirées des résultats de l'essai triaxial donnés par le Tableau 2.

Tableau 1. - Propriétés des matériaux

Propriétés	SOL 1a	SOL 1b	SOL 2	SOL 3a	SOL 3b	SOL 3c	SOL 4	Béton	Acier
	0 - 0,76 m	0,76 - 2 m	2,0 - 3,0 m	3 - 3,8 m	3,8 - 4,8 m	4,8 - 6,7 m	+6,7 m		
Variables des champs matériaux	Table								
Densité (kg/m ³)	1762,031			1954,3	2018,3	1842,1	2082,4	2 402,77	7 850
Elasticité isotrope									
Dérivé de : Module de Young et coefficient de Poisson									
Module de Young (MPa)	28,54	22,89	11,13	5,44	23,95	170,65	34 473,79	210 000	
Coefficient de Poisson	0,4999							0,2	0,3
Module d'élasticité (MPa)	4,76E+05	3,82E+05	1,85E+05	90667	3,99E+05	2,84E+06	19152	1,75E+05	
Module de cisaillement (MPa)	9,5148	7,6303	3,7094	1,8133	7,9842	56,884	14364	80769	
Ecroutissage isotrope multilinéaire	Tabulaire								
Echelle	1								
Décalage (MPa)	0								
Mohr-Coulomb									
Surface de limité élastique									
Angle de friction interne initial (Degré)	0				30	0	-		
Cohésion initiale (MPa)	0,05746	0,0383		0	0,00014				
Angle de dilatance (Degré)	0								
Angle de frottement interne résiduel (Degré)	0				30	0			
Cohésion résiduelle (MPa)	0,05746	0,0383		0	0,00014				

Tableau 1 : Résultats de l'essai triaxial

SOL	Couches (m)	Es (MPa)	C1 (MPa)	ε1	C2 (MPa)	ε2	C3 (MPa)	ε3	C4 (MPa)	ε4
SOL 1a	0 - 0,76	28,5443	0,0714	0	0,1069	0,008	0,1172	0,0155	0,1262	0,04
SOL 1b	0,76 - 2	22,8906	0,0538	0	0,0827	0,029	0,1186	0,07	0,1262	0,11
SOL 2	2,0 - 3,0	11,1281	0,0476	0	0,0718	0,016	0,0910	0,09	0,1020	0,19
SOL 3a	3 - 3,8	5,4400	0,0241	0	0,0478	0,029	0,0586	0,09	0,0634	0,19
SOL 3b	3,8 - 4,8	23,9524	0,0241	0	0,0621	0,023	0,0779	0,098	0,0807	0,198

A partir des valeurs du module de Young E et du coefficient de poisson ν, le logiciel calcule le module d'élasticité K (module d'élasticité isostatique) et le module de cisaillement G, donnés par les équations 1 et 2 [5, 6].

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [\text{Eq. 2}]$$

2.3. Maillage

Le maillage est réalisé en tenant compte du compromis temps de calcul - précision des résultats. Ainsi, des éléments prismatiques triangulaires sont utilisés pour la partie en béton du pieu. Pour le sol et le profilé IPE, des éléments hexaédriques sont retenus avec un affinement du maillage à l'interface sol-pieu (Figure 3). En effet, la méthode des éléments finis consiste à discrétiser un domaine en plusieurs sous-domaines appelés éléments. La solution recherchée, est interpolée à partir de "bouts" de solutions définis sur chaque nœud. C'est pourquoi la précision des résultats dépend du nombre d'éléments utilisés. Ainsi, il est crucial de raffiner le maillage aux endroits du domaine où la solution varie rapidement [7, 8].

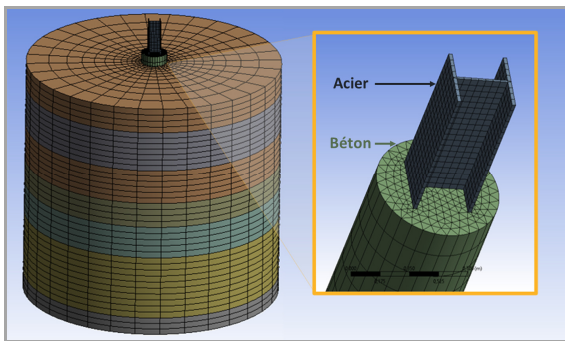


Figure 3 : Maillage

2.4. Conditions de contact

Dans l'interaction sol-structure, la transmission des efforts, de la structure vers le sol, se fait à travers une fine couche de sol en contact avec la structure appelée "interface", siège de phénomènes mécaniques complexes. En outre, cette interface est le siège de déformations et de concentrations de contraintes significatives. La rupture est souvent observée au sein de cette couche [9, 10].

La gestion des contacts basée sur la surface nécessite, deux surfaces : l'une est définie comme la surface maîtresse et l'autre, comme la surface esclave. La surface maîtresse doit être plus rigide que la surface esclave [4]. Par conséquent, la surface extérieure du pieu est considérée comme la surface maîtresse, tandis que le côté intérieur de la surface du sol qui entoure directement le pieu est la surface esclave. Les nœuds de la surface maîtresse peuvent pénétrer dans la surface esclave, mais l'inverse ne peut pas se produire [4].

Pour cette simulation, un contact sans frottement est adopté. En effet, l'angle de frottement à l'interface sol-pieu en béton δ est donné par l'équation 3 (en fonction de l'angle de frottement interne φ) et le coefficient de frottement sol-pieu μ est lié à l'angle de frottement à l'interface δ par l'équation 4 [3, 10, 11, 12].

$$\delta = \frac{2}{3}\phi \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$\mu = \text{Tan}(\delta) \quad [\text{Eq. 4}]$$

Dans le cas des argiles, avec un angle de frottement interne φ = 0 (Tableau 1), l'angle de frottement à l'interface δ = 0 et le coefficient de frottement à l'interface sol-pieu μ est nul [14].

Pour éviter un décollement à l'interface sol-pieu, le type de contact "pas de séparation" est adopté. Ce type de contact assure que le pieu et le sol restent toujours en contact (Figure 4). Néanmoins, ce type de contact permet le glissement relatif des surfaces en contact [15].

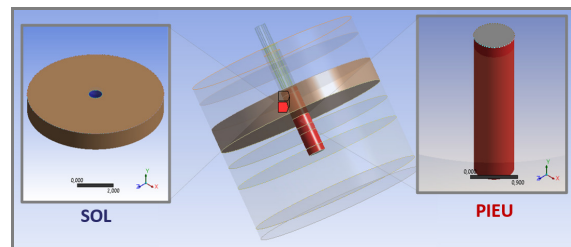


Figure 3 : Contact sol-pieu

2.5. Conditions aux limites et de chargement

La condition support fixe est appliquée sur la face latérale et sur la face inférieure (base) du modèle de sol.

Une charge horizontale de 400,34 kN est appliquée en tête de pieu (Figure 5).

Après simulation, le logiciel fournit, entre autres, les valeurs de déplacement et de déformation (Figure 6).

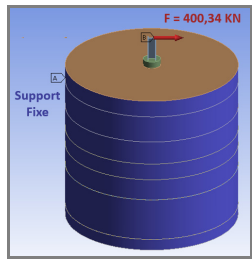


Figure 5 : Conditions aux limites et de chargement

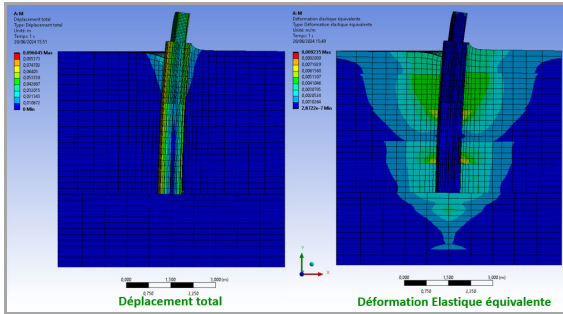


Figure 4 : Illustration de résultats de la simulation

Dans le modèle expérimental, le capteur de déplacement a été inséré à l'intérieur du pieu pour recueillir son déplacement en fonction de la profondeur. Ainsi, une trajectoire est définie sur le modèle numérique au milieu du pieu suivant sa longueur afin de relever les déplacements à la même position que celle de la campagne expérimentale.

3. Résultats et discussions

Sur la base de la campagne expérimentale de Nusairat et al., plusieurs modélisations numériques ont été effectuées. Il s'agit de la modélisation sur ABAQUS faite par Nusairat et al. [4] et de la modélisation sur FLAC 3D de Lassaad Hazzar [16].

La Figure 7 montre une comparaison des résultats de ces différentes modélisations.

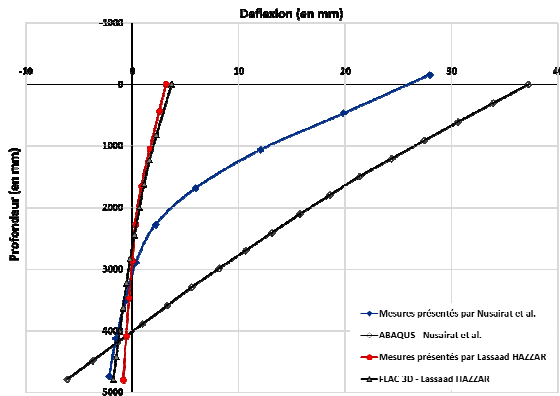


Figure 5 : Superposition des résultats de Hazzar (FLAC 3D) avec les résultats de Nusairat et al. (ABAQUS)

La comparaison des résultats présentés par Hazzar avec ceux obtenus par Nusairat et al. révèle des différences significatives. En effet, les mesures expérimentales

fournies par Hazzar, présentées comme étant les résultats obtenus par Nusairat et al., diffèrent des résultats présentés par ces derniers.

Ceci nous conduit à exclure les résultats obtenus par Hazzar pour la suite des comparaisons.

Les résultats de déplacement obtenus pour le modèle ANSYS sont donnés par la Figure 8.

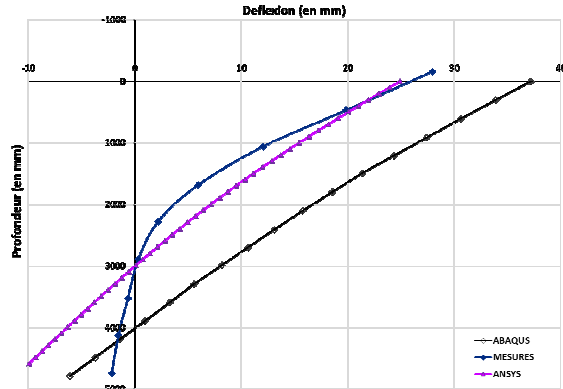


Figure 6 : Superposition des résultats ANSYS avec les résultats ABAQUS et expérimental

L'analyse de la Figure 8 montre qu'en tête de pieu, les résultats obtenus après modélisation sur ANSYS convergent beaucoup plus avec les résultats expérimentaux que ceux obtenus avec la modélisation sur ABAQUS.

À la base du pieu, les résultats montrent des écarts. Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par les conditions de fixation dans cette zone et la non prise en compte du tube creux en acier dans la modélisation. De plus, aucun progiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis n'est capable de répondre de façon satisfaisante aux problèmes spécifiques posés par la technologie des fixations. En effet, les non linéarités inhérentes à ce problème (non linéarités matérielles, ...) sont nombreuses et aucune d'entre elles ne peut être négligée [17].

Néanmoins des études paramétriques supplémentaires pourraient donner une meilleure compréhension du problème.

4. Conclusion

La prise en compte de l'interaction sol-structure est très importante lors de la mise en place des structures pour garantir leur stabilité et leur sécurité. Ainsi, ce travail visant à faire la modélisation de l'interaction sol-structure, d'une fondation de type monopieu soumise à une charge latérale, a été effectuée sur ANSYS. Ce qui a permis de mieux comprendre la variation des déplacements, mais aussi des contraintes dans la structure.

Cette étude numérique est basée sur la campagne expérimentale de Nusairat et al. Les résultats obtenus avec le modèle ANSYS sont beaucoup plus proches des résultats expérimentaux comparés aux modèles ABAQUS de Nusairat et al. et du modèle FLAC 3D de Hazzar.

Par ailleurs, une campagne géotechnique est actuellement en cours sur le site de l'Ecole Polytechnique de Thiès - site retenu pour la suite de l'étude - pour caractériser le sol rencontré.

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier le laboratoire géotechnique de l'Ecole Polytechnique de Thiès, ainsi que les entreprises AGTS et CACO qui nous assistent dans les essais géotechniques.

REFERENCES

- [1] Ch. Bay-Gress, J.-G. Sieffert, et J. Laue, « Modélisation de l'interaction sol-fondations superficielles », Revue française de géotechnique, p. 37-45, 1999, Consulté le: 9 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.geotech-fr.org/sites/default/files/rfg/article/88-4.pdf>
- [2] Alain Pecker, « Soil Behavior: Dynamic Soil-Structure Interactions », in Dynamic Behavior of Concrete and Seismic Engineering, Wiley-ISTE, 2010, p. 125-163. doi: 10.1002/9780470611555.ch4.
- [3] Alain Pecker, Dynamique des sols. Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1984. Consulté le: 21 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://pdfcoffee.com/download/dynamique-des-sols-pecker-pdf-free.html>
- [4] J. Nusairat, R. Y. Liang, R. Engel, D. Hanneman, N. Abu-Hejleh, et K. Yang, « Drilled shaft design for sound barrier walls, signs, and signals », oct. 2004. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.codot.gov/programs/research/reports/2004/drilledshaft.pdf>
- [5] R. Nova, Soil Mechanics. John Wiley & Sons, 2010. Consulté le: 8 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.singlelogin.re/book/2156098/5a693d/soil-mechanics.html>
- [6] J. E. Bowles, Physical and geotechnical properties of soils. McGraw-Hill, 1979. Consulté le: 29 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/36318420/Bowles_Physical_and_Geotechnical_Properties_of_Soils_pdf
- [7] Vincent Manet, Méthode des éléments finis. Creative Commons, 2014. Consulté le: 4 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://cel.hal.science/file/index/docid/967936/filename/v5_livre.pdf
- [8] Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, « Recommandations pour la modélisation numérique des ouvrages géotechniques », juin 2023. Consulté le: 7 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/rapport_2023-06-13_rm_n_cfms_complet_v5_hd.pdf
- [9] I. Said, « Comportement des interfaces et modélisation des pieux sous charge axiale », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2006. Consulté le: 29 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/download/pdf/48352558.pdf>
- [10] V. De Gennaro, « Etude du comportement mécanique des interfaces sol-structure. Application à l'analyse du comportement des pieux », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999. Consulté le: 7 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/tel-04471250>
- [11] V. De Gennaro et R. Frank, « Modélisation de l'interaction sol-pieu par la méthode des éléments finis », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, p. 107-133, 2005, Consulté le: 6 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_256-257_107-133.pdf
- [12] S. Grange et D. Salciarini, Deterministic Numerical Modeling of Soil-Structure Interaction. Wiley, 2021. Consulté le: 7 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/293144/1/Deterministic%20Numerical%20Modeling%20of%20Soil-Structure%20Interaction%20-%20Charlier.pdf>
- [13] Association Française de Normalisation, « Eurocode 7: Calcul géotechnique », juin 2005. Consulté le: 8 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://fewlinux.free.fr/FSP/RGT/NF%20EN%201997-1%20-%20Eurocode%207%20%20%20calcul%20g%E9otechnique.%20Partie%201%20%20%20r%E8gles%20g%E9n%E9rales.pdf>
- [14] J. E. Bowles, Foundation analysis and design, 5e éd. McGraw-Hill, 1997. Consulté le: 25 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://cequest.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/09/je-bowles-isbn0071188444bowlesfoundationanalysisanddesign.pdf>
- [15] X. Chen et Y. Liu, Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press, 2015. Consulté le: 7 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://oss.jishulink.com/upload/202111/72907645fc6a476abaa5f4aea7fd16c2.pdf>
- [16] L. Hazzar, « Analyse numérique de la réponse des pieux sous sollicitations latérales », Université de Sherbrooke, 2014. Consulté le: 13 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/5894/Hazzar_Lassaad_PhD_2014.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [17] H. Walter, « Modélisation 3D par éléments finis du contact avec frottement et de l'endommagement du béton : application à l'étude de fixations ancrées dans une structure en béton », INSA, Lyon, 1999. Consulté le: 6 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lamcos.insa-lyon.fr/files/theses/234-thesepdf.pdf>