

Piles de ponts soumis aux affouillements: Vibrations rigides des structures en interaction avec des sols élastiques

Mohamed Belmokhtar¹, Franziska Schmidt¹, Alireza Ture Savadkoohi², Christophe Chevalier³

¹ MAST-EMGCU, Univ Gustave Eiffel, F-77454 Marne-la-Vallée, France; {mohamed.belmokhtar,franziska.schmidt}@univ-eiffel.fr

² Univ Lyon, ENTPE, LTDS, CNRS UMR 5513, F-69120 Vaulx-en-Velin, France; alireza.turesavadkoohi@entpe.fr

³ GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, F-77454 Marne-la-Vallée, France; christophe.chevalier@univ-eiffel.fr

Résumé — Ces travaux mettent en évidence le comportement vibratoire des piles de pont soumis aux affouillements. Une campagne expérimentale en laboratoire a été mis en oeuvre sur des modèles réduits ayant emprise dans du sable d'Hostun. Via une analyse en fréquence des réponses libres des corps d'épreuves, un mode dit "rigide" sensible à l'affouillement a été détecté. Une modélisation couplant la mécanique du solide pour la structure et la mécanique des milieux continus pour les sols permet d'en discerner le phénomène résultant. Le modèle pourra donc être comparé aux résultats des expérimentations.

Mots clés — Dynamique des Structures, Traitement du Signal, Mécanique du Solide, Affouillement.

Introduction :

Pour le suivi vibratoire des effets de l'affouillement, il est essentiel de modéliser ce phénomène par des paramètres physiques. En effet, grâce à l'analyse modale des signaux, l'objectif de nos travaux est d'identifier une variation de caractéristiques modales comme conséquence direct d'une variation des conditions d'implantation des piles dans le sol. Nous analysons l'affouillement seulement, car pour l'instant nous ne prendrons pas en compte l'effet de l'eau pouvant être considéré comme une masse ajoutée [1].

Suite à des recherches bibliographiques et à des observations de certains phénomènes lors d'expériences nous pouvons constater que pour une structure affouillée, l'interaction entre le sol et la structure (ISS) permet une bonne appréhension de ce phénomène. Ce domaine (ISS) a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs depuis la fin du XIXe siècle, notamment pour le dimensionnement des fondations [2]. Avec l'essor du numérique fin XXe siècle [3], l'ISS s'est prêtée aux calculs dynamiques, en particulier dans le domaine du parasismique. Néanmoins pour la prise en compte du comportement dynamique d'une structure affouillée, cela reste assez novateur [4, 5, 6, 7, 8]. Cet article permet l'appréhension du phénomène physique en soulignant un comportement observable, qui est la vibrations de corps rigides.

1 Analyse en fréquences de modèles réduits de piles de ponts :

1.1 Protocole expérimental

Suite au travaux concernant les fondations profondes [8, 5], une campagne expérimentale portant sur des fondations superficielles à été mise en oeuvre. Les expériences portent sur des modèles réduits de piles de ponts (voir figure 1). Chaque pile est enfouie d'une profondeur D dans du sable d'Hostun contenu dans un bac de 110x90x70cm. Quatre accéléromètres sont placés sur les corps d'épreuves avec un total de 9 voies d'acquisition. Ces capteurs sont numérotés de 1 à 4, du haut vers le bas respectivement. Les directions des accélérations mesurées sont :

- x de normale la plus grande surface latérale,
- y de normale la plus petite surface latérale,



FIGURE 1 – Photo des différents corps d'épreuves testés

— z dont la direction est celle du champ de pesanteur terrestre.

Des essais d'impacts selon les directions x et y via un pendule (voir figure 2) permettent d'analyser la réponse libre des piles à un impact initial constant. Cet essai est répété en faisant varier D afin d'observer la sensibilité des corps d'épreuves à l'affouillement.



FIGURE 2 – Dispositif d'excitation : portique, corde et masse en guise de pendule pour l'impact.

1.2 Analyse en fréquence des réponses libres

Ces essais ont vu émerger un comportement vibratoire différent de ceux trouvés dans [5, 8] : Les vibrations de corps rigide. Ce comportement a pu être observable directement sur les signaux. En effet un phénomène plus lent dans la figure 3 peut être constaté selon les directions de l'excitation. Les phénomènes plus hauts en fréquences, quant à eux, sont les modes de vibrations élastiques.

Nous étudions la corrélation entre les voies d'acquisition $y_{i \in [1,4]}$. La matrice des corrélation dans le domaine fréquentiel $[G_{yy}(j\omega)]$ admet une décomposition en valeur singulière avec :

$$[G_{yy}(\omega)] = [U(\omega)][S(\omega)][V(\omega)] \quad (1)$$

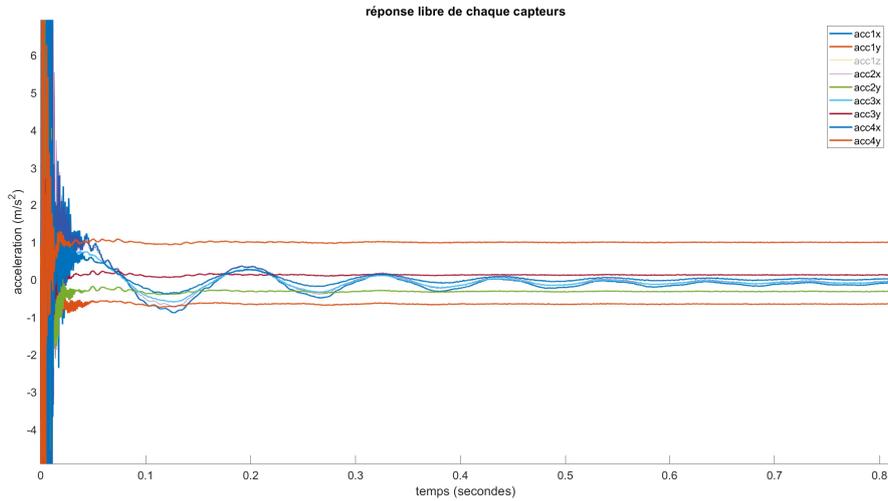


FIGURE 3 – Déformée modale pour $D = 15cm$, fréquences propre à $18,3, Hz$

FIGURE 4 – Réponses temporelles des capteurs avec excitation selon x

Au plus proche de la pulsation propre ω_k , on a la ration suivante [9] :

$$([U(\omega_k)])_1 \approx (\Phi)_k, \quad (2)$$

où $(\Phi)_k$ est la déformée du mode k . Ainsi les relations dans les équations 1 et 2 permettent d'analyser les signaux en identifiant les fréquences propres et déformées. La figure 5 établit les résultats de cette méthode pour une pile rectangulaire de longueur $L = 0.75m$ et de surface transversale $b \times h = 0.15 \times 0.1m^2$.

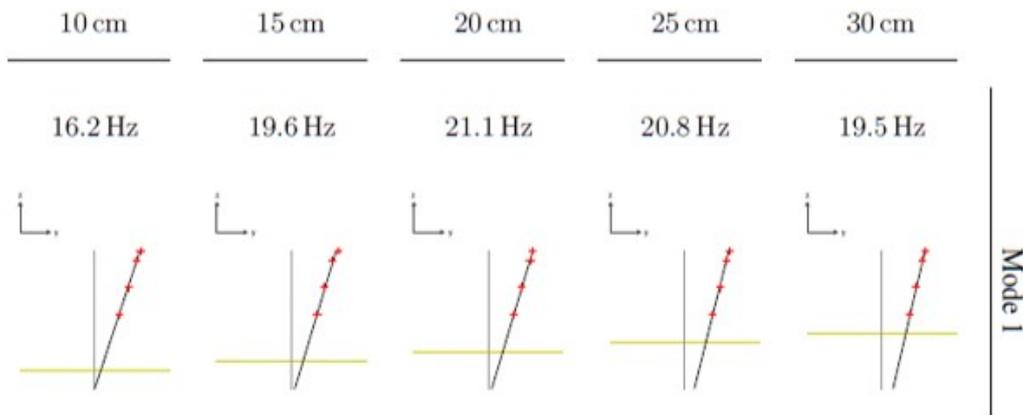


FIGURE 5 – Déformée modale obtenue après traitement du signal

2 Modélisation :

2.1 Développement analytique

D'après la section précédente, le comportement identifié est une rotation rigide dont le centre rotation se situe à la base de la structure. Ce centre de rotation est l'origine des axes dans la figure 5, et pour un angle de rotation faible, ($\theta \ll 1$) :

$$u(z, t) \approx z\theta \quad (3)$$

La réaction du sol est modélisée par un comportement élastique [10, 11]. Nous pouvons écrire,

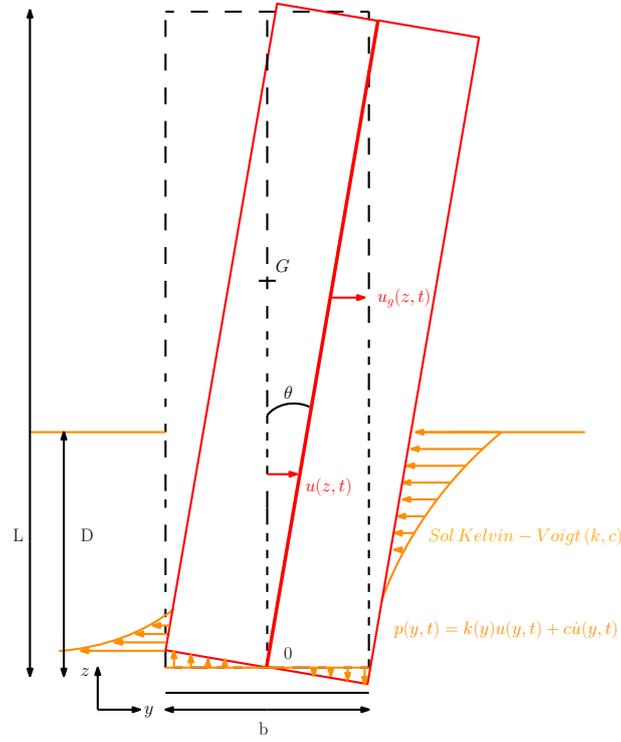


FIGURE 6 – Vibration rigide du mode 1 identifié expérimentalement

en négligeant l'amortissement, l'équation du pendule suivant :

$$J\ddot{\theta} + k\left(\frac{D^3}{3} + \frac{b^3}{16}\right)\theta = 0, \quad (4)$$

où J est le moment d'inertie, b la largeur de la pile et k le module de réaction du sol où ressort de Winkler [10]. Nus exprimons la fréquence du mode rigide f_0 :

$$2\pi \times f_0 = \sqrt{\frac{D^3}{3} + \frac{b^3}{16}} \sqrt{\frac{k}{J}}. \quad (5)$$

2.2 Modélisation par éléments finis

Une modélisation par éléments finis a permis de compléter notre étude et de comparer les déformées avec celles obtenues expérimentalement : cela confirme la rotation autour de la base de la pile. Lors des simulations par éléments finis nous avons supposé les déplacements du bac nuls. Le sol et la structure sont deux solides élastique avec un contact lisse à leur interface.

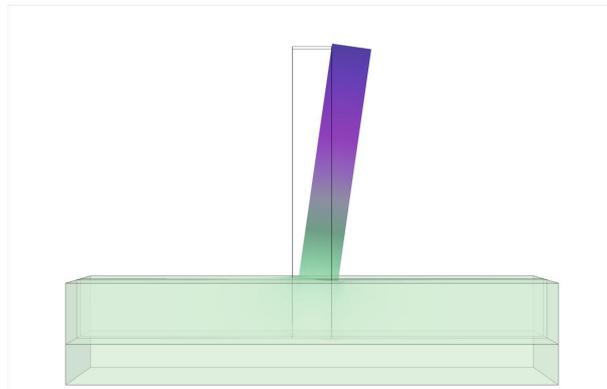


FIGURE 7 – Déformée modale obtenue par éléments finis pour $D = 15\text{cm}$, fréquence propre à $18,3, \text{Hz}$

3 Conclusion

Pour conclure, les trois approches (expérimentale, analytique et numérique) semblent être assez proches pour des faibles profondeurs de sol. Cela est un encouragement en un sens car le phénomène d'affouillement préoccupe les exploitants d'ouvrages lorsque celui-ci devient critique. Néanmoins, comme l'indique la figure 8 les modèles analytiques et numériques ne semblent plus représenter le phénomène observable par l'expérience. Des analyses non linéaires ont été ajoutées par la suite pour compléter ce modèle.

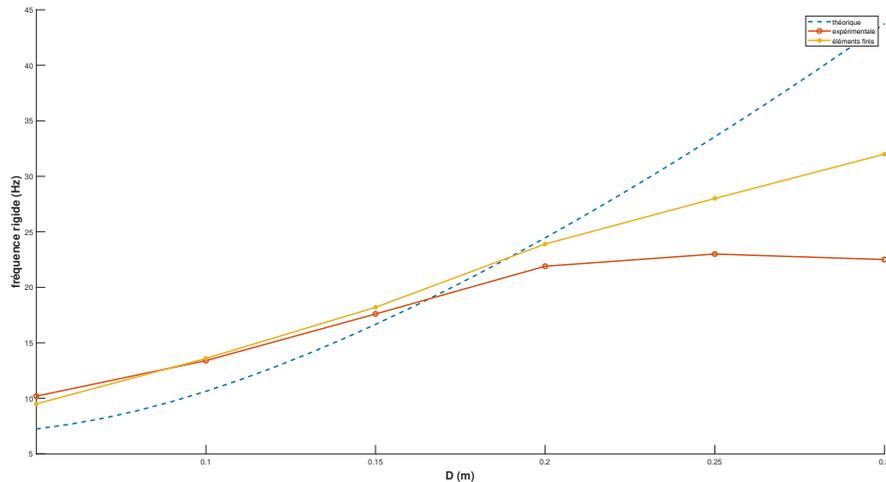


FIGURE 8 – Comparaison entre les études théoriques, numériques et expérimentales

Références

- [1] R. W. Yeung. Added mass and damping of a vertical cylinder in finite-depth waters. *Applied Ocean Research*, 3(3) :119–133, July 1981.
- [2] Eduardo Kausel. Early history of soil–structure interaction. 30(9) :822–832.
- [3] N. Makris and G. Gazetas. Displacement phase differences in a harmonically oscillating pile. *Géotechnique*, 43(1) :135–150, 1993.
- [4] Ali Zarafshan, Amirhossein Iranmanesh, and Farhad Ansari. Vibration-Based Method and Sensor for Monitoring of Bridge Scour. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6) :829–838, November 2012.
- [5] N. Boujia, F. Schmidt, C. Chevalier, D. S., and D. Pham van Bang. Effect of Scour on the Natural Frequency Responses of Bridge Piers : Development of a Scour Depth Sensor. *Infrastructures*, 4(2) :21, June 2019.
- [6] Nissrine Boujia, Franziska Schmidt, Christophe Chevalier, Dominique Siegert, and Damien Pham Van Bang. Using rocking frequencies of bridge piers for scour monitoring. *Structural engineering international*, page 20 p., January 2020.
- [7] L. J. Prendergast, D. Hester, K. Gavin, and J. J. O’Sullivan. An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour. *Journal of Sound and Vibration*, 332(25) :6685–6702, December 2013.
- [8] Mohamed Belmokhtar, Franziska Schmidt, Alireza Ture Savadkoohi, and Christophe Chevalier. Scour monitoring of a bridge pier through eigenfrequencies analysis. *SN Applied Sciences*, 3 :303, February 2021.
- [9] Rune Brincker, Lingmi Zhang, and Palle Andersen. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3) :441–445, jun 2001.
- [10] E. Winker. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit (on elasticity and fixity) dominicus. 1867.
- [11] George Gazetas. Analysis of machine foundation vibrations : State of the art. 2(1) :2–42.