

Caractérisation vibratoire et hydraulique de l'affouillement autour de piles de pont

Y El Baghli¹, F. Schmidt², S. Boyaval¹, C. Chevalier³, F. Larrarte^{1,3}

¹ Laboratoire d'Hydraulique Saint Venant, ENPC, Institut Polytechnique de Paris, Chatou, France

² Université Gustave Eiffel, MAST, Marne-la-Vallée, France

³ Université Gustave Eiffel, GERS, Marne-la-Vallée, France

RESUME L'affouillement, processus d'érosion des sols autour des structures en site aquatique, constitue un problème majeur dans le domaine du génie civil. Or la détection et le suivi des affouillements présentent des défis importants liés notamment à la nature souvent subaquatique des fondations à surveiller. Les méthodes actuelles permettent de surveiller et d'évaluer les risques d'affouillement. Cependant, ces méthodes peuvent être coûteuses et techniquement complexes. De plus, il s'agit de méthodes temporellement ponctuelles qui ne permettent pas d'offrir un suivi des affouillements. L'objectif de cette étude est d'analyser les effets des affouillements sur les piles de ponts, en mettant l'accent sur la relation possible entre l'affouillement progressif et la variation des fréquences propres des piles de ponts. Après une présentation du protocole expérimental, nous présenterons les résultats qui ont par ailleurs été comparés avec les données de la littérature pour discuter des méthodes utilisées. Les conclusions suggèrent que les techniques employées dans ces travaux pourraient avoir un potentiel intéressant pour la surveillance des affouillements. Les perspectives de ce travail incluent le développement et l'amélioration de méthodes de suivi en temps réel, intégrant à la fois des mesures hydrauliques et vibratoires, pour une meilleure gestion des affouillements.

Mots-clés vibrations, affouillement, ponts, écoulement à surface libre, LS-PIV

I. INTRODUCTION

L'affouillement, processus d'érosion des sols autour des structures en site aquatique, constitue un problème majeur dans le domaine du génie civil. Ces phénomènes érosifs, causés par les courants fluviaux ou maritimes, peuvent induire une instabilité, un endommagement voire un effondrement des ouvrages tels que les ponts, barrages et quais. A titre indicatif, aux Etats-Unis, 78 des 503 défaillances (16%) observées entre 1989 et 2000 sont dues à l'érosion du lit des cours d'eau ou des berges sur lesquels reposent les fondations des ponts. De plus 165 cas de défaillance dues aux crues ont pu être recensé, soit une proportion de 33% (Wardhana & Hadipriono 2003). En France, l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978 et, plus récemment, l'effondrement du pont de la rivière Saint-Étienne sur l'Île de la Réunion en 2007, sont deux exemples des conséquences désastreuses des affouillements. La sécurité des usagers et des infrastructures dépend donc fortement de la capacité à détecter et à gérer ces affouillements de manière précoce ou préventive. La détection des affouillements présente des défis importants liés notamment à la nature souvent

subaquatique des fondations à surveiller. Les méthodes actuelles, basées sur des inspections visuelles, des sondages, et des technologies de détection avancées comme la télédétection (utilisation du LIDAR bathymétrique) ou les plongeurs sous-marins, permettent de surveiller et d'évaluer les risques d'affouillement (Setra, 2013). Cependant, ces méthodes peuvent être coûteuses et techniquement complexes, nécessitant des investissements en équipement et en formation. De plus, il s'agit de méthodes temporellement ponctuelles et qui ne permettent pas d'offrir un suivi continu des affouillements. L'objectif principal de ce travail sur des modèles physiques en canal hydraulique est d'analyser les effets des affouillements sur le comportement structurel des piles de ponts, en mettant l'accent sur la relation entre l'affouillement progressif et les modifications des fréquences propres des piles, afin de mieux comprendre comment l'érosion impacte la stabilité structurale. En parallèle, des mesures hydrauliques ont été effectuées pour évaluer les conditions d'écoulement et déterminer les vitesses critiques susceptibles d'entraîner l'érosion du lit fluvial.

Après quelques rappels d'état de l'art, nous présenterons les moyens et la méthodologie mis en œuvre avant de détailler les résultats et de conclure.

II. ELEMENTS D'ETAT DE L'ART

En raison des enjeux considérables qu'il représente, l'affouillement est étudié depuis longtemps. Ainsi, en 1873, Durand-Claye faisait déjà diverses expériences et concluait qu'"avoir en amont une forme de triangle et en aval une forme arrondie pourrait être une solution pratique et rationnelle" pour les piles de ponts. Au XXe siècle, les efforts de recherche ont augmenté dans le monde entier et des lois ont été proposées pour prédire la profondeur d'affouillement (Chabert & Engeldinger 1956, Melville & Sutherland 1988).

Selon Breusers et al. (1977), la profondeur d'affouillement d'équilibre d_{se} (« scour depth at equilibrium ») au niveau de la pile d'un pont peut être estimée par la relation générale (1) :

$$d_{se} = f(\rho, \mu, U, h, g, d, U_c, D) \quad (1)$$

où g est l'accélération de la gravité ; h est la profondeur de l'eau ; U est la vitesse moyenne en amont ; d est le diamètre typique des sédiments, ρ est la masse volumique du sédiment ; μ est la viscosité dynamique du fluide, U_c est la valeur critique de la vitesse associée au mouvement des particules du lit et D est la dimension typique (par exemple le diamètre moyen) de la pile. De nombreuses autres relations empiriques ont été proposées avec une dépendance générale de d_{se} aux paramètres hydrauliques, géotechniques et structurels. Sheppard et al. (2014) ont comparé 23 équations/méthodes prédictives de profondeur d'affouillement local à l'équilibre. Si ces méthodes ont gagné en précision au fil des ans, elles ne prennent cependant pas compte que des structures de forme simple dans des sédiments non cohésifs. Par ailleurs, qu'en est-il des structures déjà existantes ? C'est pour cela que nous cherchons à développer une méthode de suivi en continu.

Le phénomène d'affouillement est une combinaison de plusieurs processus, qui en complexifie la compréhension et la surveillance. Comme le souligne Ettema et al. (2017), "bien que de nombreux

progrès aient été réalisés en matière de conception au cours des 60 dernières années, l'affouillement reste l'une des principales causes de défaillance des ponts". La gestion des structures, en particulier des structures existantes, consiste donc à effectuer des relevés réguliers ou, mieux encore, une surveillance continue. Ainsi, afin de mieux maîtriser les risques liés à l'affouillement, de nombreux systèmes de surveillance ont été développés, basés sur des dispositifs, intrusifs ou non, et des mesures directes ou indirectes, ponctuelles ou continues, fixes ou mobiles, utilisant des technologies variées. Ainsi Brandimarte et al. (2012) listent de nombreux paramètres qui peuvent être mesurés mais aucun ne concerne l'état de la structure. Prendergast & Gavin (2014) présentent également un recensement des méthodes et mentionnent le suivi vibratoire qui a été étudié au laboratoire par Wang et al. (2017) ou Boujia et al. (2021) et testée sur le terrain par Larrarte et al. (2022). Les travaux présentés ici visent à approfondir notre connaissance de ces techniques et leur capacité à suivre l'évolution de l'affouillement.

III. ETUDE EXPERIMENTALE

A. Installation et instrumentation

Le canal utilisé pour nos expérimentations en modèle physique est situé dans les installations d'EDF Lab à Chatou (France, 78). Le canal dispose d'une section d'essais de 10 m de long sur 0,40 m de large et 0,50 m de haut. Une des parois du canal est en verre, offrant ainsi une vue directe et continue sur l'écoulement. Grâce à une interface tactile, le débit d'eau dans le canal peut être varié de 0 à 30 l/s et ajusté au dixième, permettant une interaction directe avec la pompe pour modifier les conditions d'écoulement en temps réel. La veine d'essais a été caractérisée par une cartographie des vitesses avec une perche UB Hydro d'Ubertone. Ces données ont ensuite été utilisées pour calculer le débit dans cette section à l'aide d'une méthode des aires. Le débit obtenu correspond à celui annoncé par l'interface de commande du canal à 2% près. Pour l'étude une couche uniforme de sédiments de 20 cm de haut a été déposée (Figure 1). Le sable utilisé dans cette expérience a un diamètre moyen $d_{50} = 0,5$ mm.

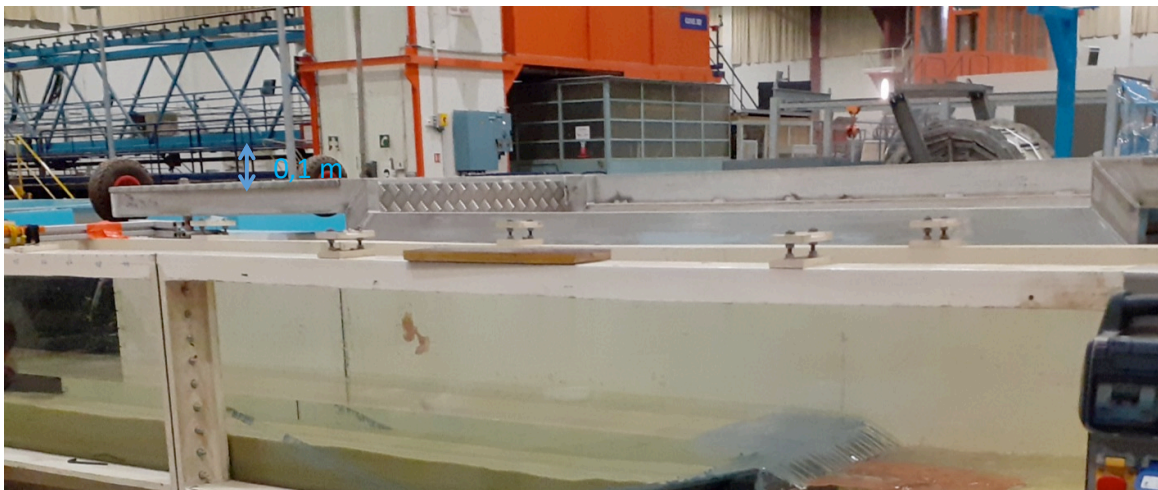


FIGURE 1. Mis en place du lit sédimentaire au fond du canal

Afin de mesurer la profondeur et la forme de la fosse d'affouillement sans interférer avec elle, nous avons utilisé une méthode non intrusive qui consistait à photographier la forme du fond à proximité de la pile.

La vitesse en surface de l'écoulement a été mesurée par une technique non intrusive qui permet de mesurer les champs de vitesse à la surface de l'écoulement, la vélocimétrie par imagerie des particules (PIV). Cela consiste à semer dans le fluide des particules de traçage, en l'occurrence ici des billes en polystyrène, qui sont ensuite filmées par une caméra GoPro placée au-dessus du canal. Le mouvement des particules est capturé à intervalles réguliers, et le logiciel FUDAA est utilisé pour traiter ces images, permettant ainsi de calculer les champs de vitesse sur la surface de l'eau (Bodart 2023).

Breusers et al (1977) et Richardon & Davis (2001) ont montré que la géométrie de la pile influence la profondeur d'affouillement. Les piles étudiées sont en mortier, elles reprennent les géométries mentionnées par ces auteurs. Leurs dimensions sont précisées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristique des piles

Sigle	Forme en plan	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Hauteur (cm)
O4	Oblongue	20	4	15
O8	Oblongue	20	8	15
R4	Rectangulaire	20	4	15
R8	Rectangulaire	20	8	15

Pour générer les vibrations nécessaires à l'étude, un marteau a été utilisé (Bao et al. 2017). Il convient de noter que ces dispositifs ne sont ni normés ni communément utilisés. Dans cette étude préliminaire, nous nous sommes inspiré des travaux de Belmokhtar (2024). Ce système utilise une masse sphérique attachée à une corde, permettant de provoquer des chocs ponctuels sur les piles et induire ainsi des accélérations mesurables sur les structures (Figure 2). Chaque pile a été soumise à dix chocs dans la direction x , qui est celle de l'écoulement, et dix autres dans la direction y , qui est la direction transversale. Les chocs étaient appliqués (Figure 2) en visant le même endroit en écartant la masse d'un angle constant au bout d'un fil de longueur constante. Cela reste néanmoins artisanal et la fiabilisation fait partie des travaux en cours.

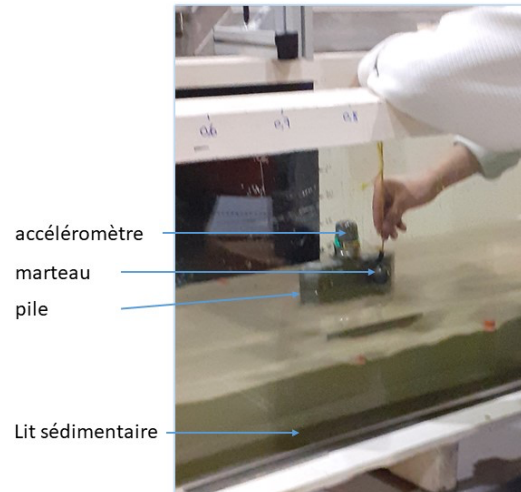


FIGURE 2. La pile encastrée dans le lit sédimentaire, le marteau et l'accéléromètre

Afin de détecter les changements potentiels de fréquences propres sous l'effet de l'affouillement, des accéléromètres ont été installés au sommet des piles. Il s'agit d'accéléromètres sans fil G-Link 200. Chaque accéléromètre est équipé d'un capteur triaxial MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), capable de mesurer les accélérations dans les trois directions principales : x , y , et z . Dans notre cas, l'accent a été mis sur les directions dans le plan horizontal x et y . Les données vibratoires ont été collectées en temps réel grâce au logiciel Sensor-Connect (MicroStrain), qui permet de visualiser les signaux en direct et de les stocker pour une analyse ultérieure. Une fois les données brutes collectées, elles ont été exportées vers Matlab pour une analyse par transformée de Fourier rapide (FFT - Fast Fourier Transform).

B. Protocole expérimental

La pile étudiée est ensablée à une profondeur de 5 cm, soit un tiers de sa hauteur totale. Elle est placée à équidistance des parois latérales, assurant ainsi une répartition uniforme des écoulements autour de la structure et un moindre effet de bords. Avant la première mise en marche du canal, le sable est tassé. Une fois la pile correctement installée, un accéléromètre est fixé en haut de pile pour permettre les mesures vibratoires. Le canal est ensuite mis en route avec un débit de 6,5 l/s (35% du débit maximum du canal) pour lequel la mesure vibratoire (faite de 2x10 réplicats comme vu précédemment), que nous appelons Mesure 0, est effectuée. Puis, le débit du canal est augmenté à 13,5 l/s (45% du débit maximum du canal) pour initier l'affouillement autour de la pile. Une fois l'affouillement jugé suffisant, le débit est réduit à nouveau à 6,5 l/s pour stabiliser la situation. Une photo est alors prise, elle permet de déterminer la forme de la fosse d'affouillement le long de la pile. Une nouvelle mesure vibratoire (faite de 2x10 réplicats) est alors réalisée. Ce processus est répété en augmentant puis en réduisant le débit du canal (Figure 3), pour passer progressivement à des niveaux d'affouillement plus élevés. Les mesures sont prises à chaque étape, jusqu'à obtenir 5 ou 6 points de mesure ou le basculement de la pile.

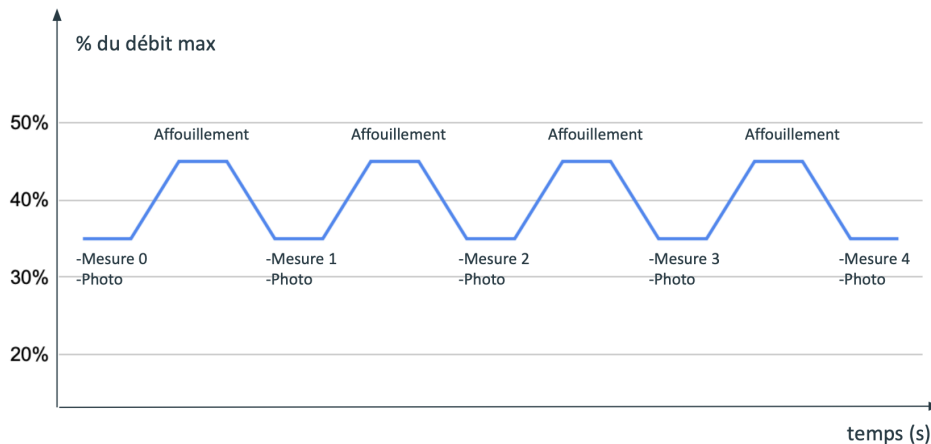


FIGURE 3. Schématisation du déroulé d'une expérience vibratoire sur une pile

Le débit de 6,5 l correspond à une vitesse d'écoulement de 0,19 m/s, ce qui est en dessous du seuil d'érosion tel que défini par la courbe de Hjulstrom, ce qui permet de prendre des mesures initiales sans variation significative du niveau d'affouillement. Les mesures de vitesse ont permis d'obtenir des profils verticaux qui ont permis de déterminer la vitesse de cisaillement puis la contrainte de cisaillement au fond du canal $\tau = 0,121$ Pa. Le paramètre de Shields θ est déterminé par l'équation (2) :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho - \rho_{eau})g d_{50}} \quad (2)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, ρ la masse volumique, d_{50} le diamètre moyen. Ici θ est estimé à 0,06, indiquant que les conditions sont suffisantes pour initier le mouvement des particules de sédiments, ce qui est cohérent avec nos observations expérimentales.

IV. RESULTATS

A. Influence de la forme des piles sur la vitesse en surface

La figure 4 montre l'évolution du champ de vitesse à la surface en fonction de la forme et de la largeur de la pile. Les particules de polystyrène utilisées pour ensemencher montre bien le point d'arrêt qui se forme à l'étrave des piles, en particulier celles qui sont rectangulaires. Ces dernières engendrent également un sillage plus long que les piles oblongues. L'écoulement est accéléré le long des piles, mais il est difficile de sérier l'influence du confinement dans ce canal relativement étroit.

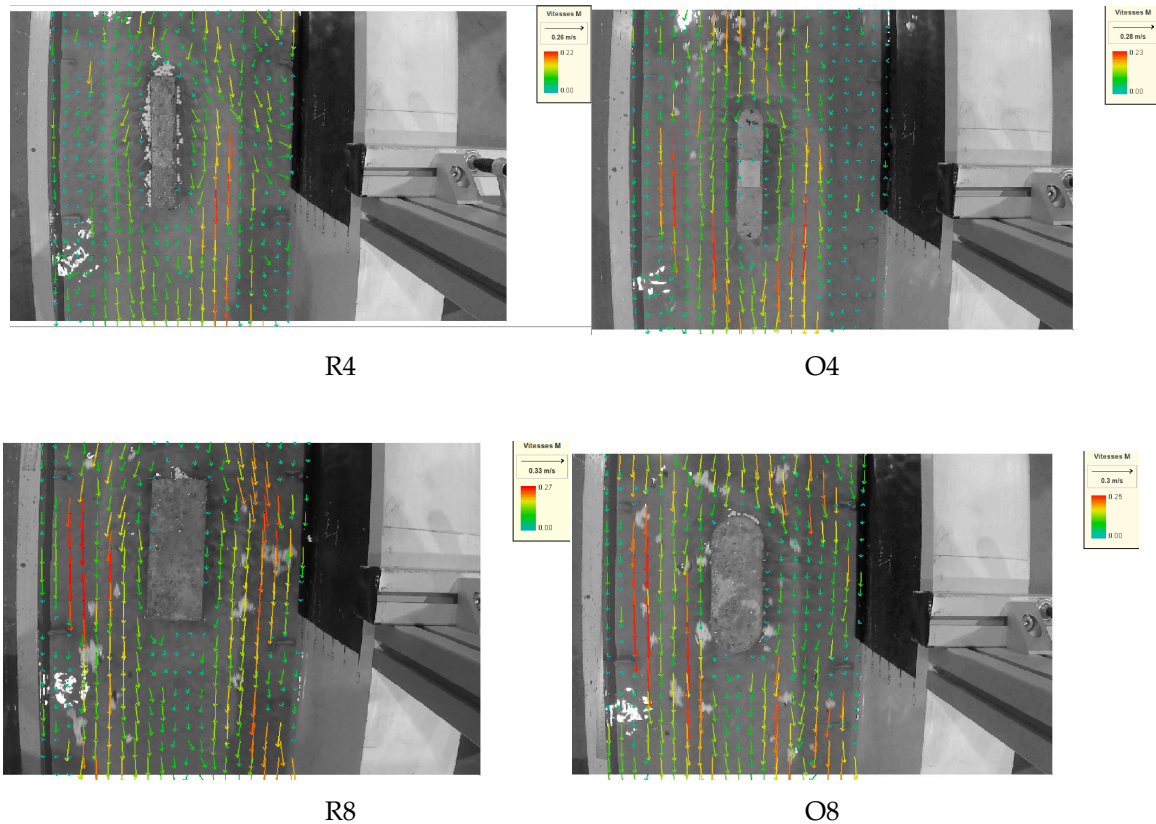


FIGURE 4. Champ de vitesse en surface autour des piles R4, O4, R8 et O8

B Influence de la forme des piles sur la forme d'affouillement

La figure 5 montre l'évolution de forme du fond le long de la pile pour différentes piles aux différents créneaux présentés sur la figure 3. Il peut être observé que le sable se creuse en avant de la pile pour s'amasser plus en aval. La forme de la pile joue alors un rôle essentiel dans sa stabilité. En effet, pour les piles circulaires, le sable est évacué vers l'aval de la pile et celle-ci est déstabilisée dès que la profondeur d'affouillement atteint la semelle. La pile bascule alors. Pour les autres formes, le sable s'accumule le long de la pile et crée un nouvel encastrement qui retarde le basculement de celle-ci.

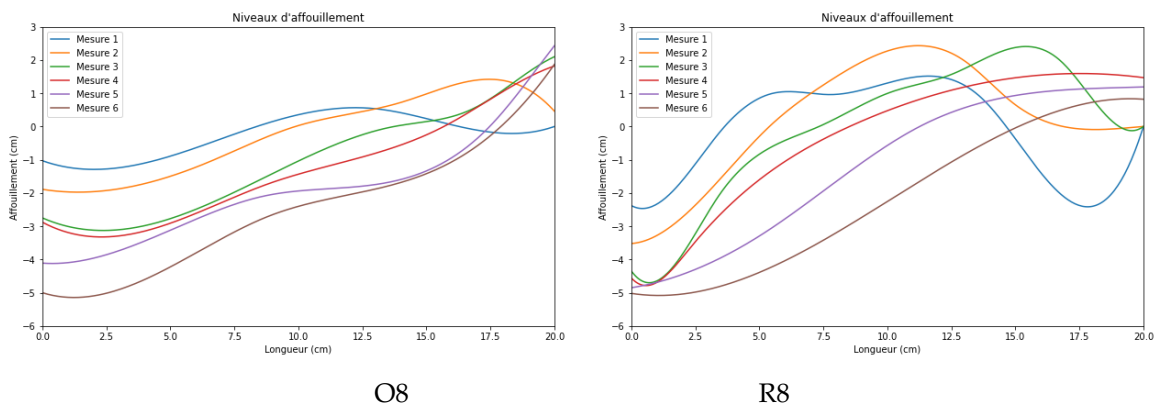


FIGURE 5. Forme de la fosse d'affouillement le long de piles

C Influence de la forme des piles et de la profondeur d'affouillement sur les fréquences propres

La figure 6 montre l'évolution, pour différentes piles, et en fonction de la profondeur d'affouillement, de la seconde fréquence propre. En effet, Bao et al. (2017) ont montré que celles-ci sont plus sensibles que la première fréquence propre. Les fréquences propres décroissent quelle que soit la géométrie de la pile, ce qui est un résultat attendu (Boujia 2020). Pour les piles circulaires (Figure 6), les fréquences sont environ 50% plus faibles que pour les autres géométries, ce qui est dû à l'élanement différent. En effet, pour des poutres encastrées-libres, la première fréquence propre est proportionnelle à $\frac{1}{h^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot S}}$ où h est la hauteur (ou longueur) libre, E le module d'Young, I le moment quadratique et S la section. La hauteur libre h au carré au dénominateur entraîne ainsi une diminution des fréquences propres lorsque la profondeur d'affouillement croît. L'évolution de la fréquence est aussi proportionnelle à $\sqrt{\frac{I}{S}}$ (le module d'Young E et la densité ρ du mortier utilisé étant constants pour l'ensemble des corps d'épreuve).

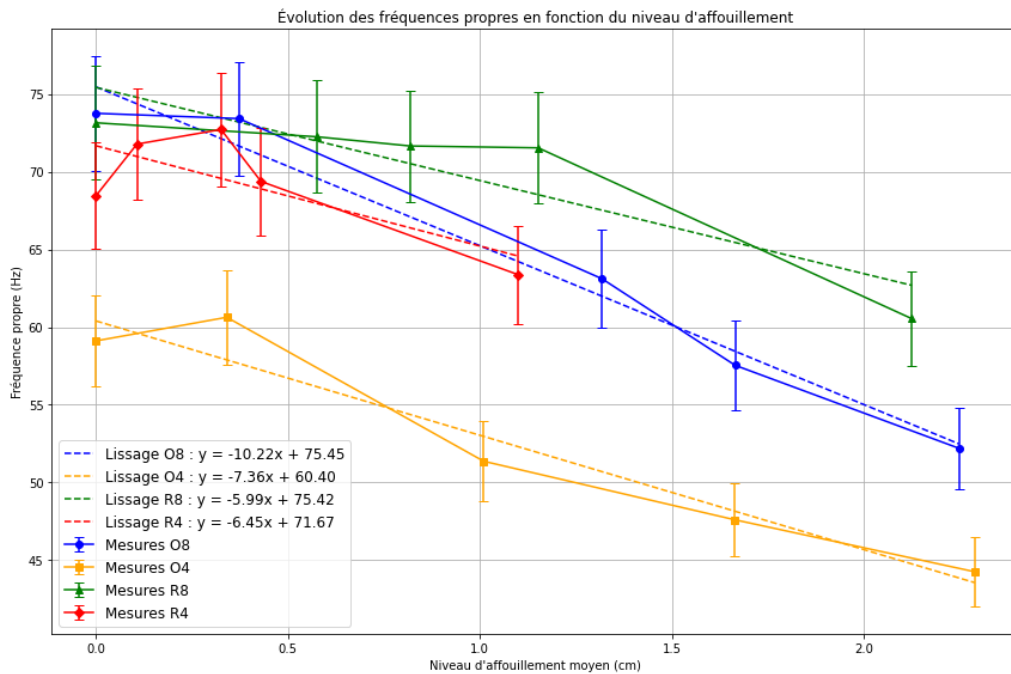


FIGURE 6. Influence de la forme de la pile sur l'évolution des fréquences propres

V. CONCLUSION

Les expérimentations menées dans le cadre de ce travail combinent des techniques de suivi vibratoire, telles que la mesure par accéléromètre et l'analyse par transformée de Fourier, avec des

mesures hydrauliques obtenues par des capteurs. Ce couplage entre hydraulique et vibratoire permet de proposer des méthodologies innovantes pour la détection précoce des affouillements. Cet article présente les techniques de suivi utilisées, une description détaillée des dispositifs expérimentaux et des méthodes adoptées pour évaluer les conséquences des formes et des dimensions des piles. Nous discutons également des résultats obtenus lors des essais expérimentaux, de l'analyse des données hydrauliques et vibratoires. Ces travaux préliminaires nous incitent à poursuivre sur la mise au point des méthodes vibratoires pour le suivi en continu de l'affouillement au pied d'ouvrages en site hydraulique.. Outre la forme de l'étrave des piles, l'influence de la longueur de celles-ci (pour les non circulaires) paraît devoir être revisitée car une pile longue pourrait bénéficier de stabilité (un peu comme les barrages poids) susceptible de retarder les effets néfastes d'un affouillement.

REFERENCES

Bao, T., Andrew Swartz, R., Vitton, S., Sun, Y., Zhang, C., Liu, Z. (2017). Critical insights for advanced bridge scour detection using the natural frequency. *Journal of Sound and Vibration*, 386:116–133, doi :[10.1016/j.jsv.2016.06.039](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.06.039)

Belmokhtar, M., Schmidt, F., Ture Savadkoohi, A., Chevalier, C. (2024). New approach to monitor bridge piers subjected to scour using rocking vibrations: theoretical and experimental identification of two vibration modes. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 14 (3), 817-829, doi : 10.1007/s13349-023-00755-9

Bodart, G. (2023). "Évaluation et amélioration des méthodes de détermination des vitesses en surface d'écoulement par analyse de séquence d'images", Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.

Boujia, N., Schmidt, F., Chevalier, C., Siegert, D., Pham Van Bang, D. (2020). Using Rocking Frequencies of Bridge Piers for Scour Monitoring. *Structural Engineering International*, 31(2):286–294, doi : 10.1080/10168664.2020.1768811

Brandimarte, L., Paron, P., Di Baldassarre, G. (2012). Bridge pier scour: A review of processes, measurements and estimates. *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*, 11(5)

Breusers, H. N. C., Nicollet G., Shen H.W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research* 15 (3):211-252, doi :[10.1080/00221687709499645](https://doi.org/10.1080/00221687709499645)

Chabert, J., Engeldinger, P. (1956). Étude des affouillements autour des piles de ponts. Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France

Durand-Claye, A. (1973). Expériences sur les affouillements. *Annales des Ponts et Chaussées*, p.467

Ettema, R., Constantinescu, G., Melville, B. (2017). Flow-Field Complexity and Design Estimation of Pier-Scour Depth: Sixty Years since Laursen and Toch. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), doi :[10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001330)

Larrarte, F., Chevalier, C., Chollet, H., Schmidt, F., Belmokhtar, M. and Wintenberger, C., (2022). Monitoring of Real Sites affected by Scour: Observation, Analysis and Feedback of Field Data, *Proceedings of the 39th IAHR World Congress, Granada, June 19–24*, doi : [10.3850/IAHR-39WC252171192022438](https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022438)

Melville, B. W., Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1210–1226.

Prendergast, L., Gavin, G. (2014). A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2):138-149, doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.007

Richardson, EV, Davis, SR (2001). Evaluating scour at bridges. Hydraulic engineering circular number 18 (HEC 18). *Publication number NHI 01-001, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington DC*

Setra, (2013). Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fondations en site aquatique : Fascicule 10, *ISBN : 978-2-11-129885-9*

Wang, C., Yu, X.? Liang, F. (2017). A review of bridge scour: mechanism, estimation, monitoring and countermeasures. *Nat Hazards* 87:1881–1906, doi 10.1007/s11069-017-2842-2

Wardhana, K., Hadipriono? fc (2003). Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 17.3, p. 144-150. doi : 10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:3(144).