

Essais d'impact sur modèle réduit: essais sur différent type d'ouvrages et différentes conditions de fondations

Impact test on small scale models: tests on different bridge type and different foundations conditions

Thibault BADINIER¹, Philippe REIFFSTECK¹, Nelchaelle Lorraine OKANDZA EBANDZA², Franck GUIRADO¹, Chi-Wei CHEN³

1 Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

2 CESI, Campus CESI Nanterre, 93 boulevard de la Seine, BP602, 92006 Nanterre, France

3 EMF-EXP, Département des Ouvrages d'Art, DTR, DGII, SNCF Réseau, La Plaine Saint Denis Cédex, thibault.badinier@univ-eiffel.fr

RESUME : Le RTRI (organisme d'appui technique et de développement des sociétés japonaises de transport ferroviaire JR) a développé un outil de caractérisation indirecte de la santé des systèmes de fondation des piles de ponts qui est utilisé de manière systématique depuis une vingtaine d'années sur les ouvrages pour le trafic classique et Shinkansen. L'Université Gustave Eiffel en collaboration avec SNCF Réseau a mis en œuvre ce dispositif. L'application sur un modèle réduit complémentaire des ouvrages ferroviaires déjà étudié a permis d'analyser certaines configurations.

L'enjeu est de cerner l'influence de la typologie des ouvrages sur la réponse et étudier la possibilité de disposer d'une première estimation de la qualité du système de fondation, en comparant les différentes piles d'un même pont. Les résultats présentés sont discutés et des premières conclusions sont proposées.

ABSTRACT: The RTRI (technical support and development organization for Japanese railway companies JR) has developed a tool for indirectly characterizing the health of bridge pier foundation systems, which has been used systematically for around 20 years on structures for conventional and Shinkansen traffic. Gustave Eiffel University, in collaboration with SNCF Réseau, has implemented this system. Its application to a complementary scale model of the railway structures already studied has enabled certain configurations to be analyzed.

The challenge is to identify the influence of the type of structure on the response and to study the possibility of obtaining an initial estimate of the quality of the foundation system, by comparing the different piers of the same bridge. The results presented are discussed and initial conclusions are proposed.

Mots-clés: fondations, ponts, auscultations, modèle.

1 INTRODUCTION

Les fondations des ouvrages d'art en rivière sont soumises à de multiples sollicitations extérieures et à diverses sources de dégradation. Parmi celles-ci, l'érosion représente un phénomène particulièrement destructeur : en retirant le sol support sous et autour de la fondation, elle peut entraîner une perte de portance et, in fine, la ruine de l'ouvrage. L'exemple le plus connu en France reste l'effondrement du pont Wilson en 1978.

Pour surveiller et anticiper les risques liés à l'affouillement des fondations et à leur déstabilisation, le RTRI (Railway Technical Research Institute, Japon) a développé une méthode d'auscultation non destructive, basée sur la mesure dynamique des fréquences propres des piles des ouvrages d'art (Nishimura & Tanamura, 1989 ;

Masui et Suzuki, 2009). Ainsi, en mesurant le comportement dynamique des piles sous l'impact d'un boulet en acier, il semble possible d'évaluer l'influence du niveau d'affouillement sur la variation de rigidité de la fondation. La méthode est codifiée dans les référentiels de maintenance ferroviaire japonais (RTRI, 2010). Elle a été étudiée et appliquée dans plusieurs pays (Pham, 2017 ; Ko et al. 2015).

Ce suivi est un indicateur important pour la maintenance des ponts ferroviaires pour les opérateurs japonais. Il est renouvelé lors des inspections d'ouvrages et après tout évènement climatique comme une crue. Il est utilisé après réparation pour évaluée la restauration d'une stabilité adéquat au trafic.

Cependant, le référentiel établi par le RTRI, conçu principalement pour les ouvrages à tablier typiques du Japon, nécessite une adaptation pour être

transposable aux typologies d'ouvrages de France métropolitaine, qui incluent des ouvrages historiques en maçonnerie et en arche.

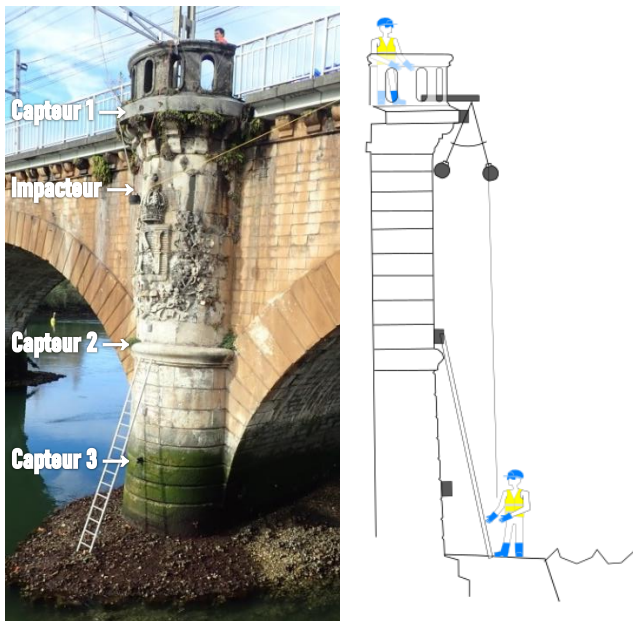


Figure 1. Impact test sur le pont de la Bidassoa (Chen)

Cette communication présente la réalisation d'essais de réponse dynamique sous impact sur des modèles réduits de pont, dans des conditions contrôlées afin d'évaluer la pertinence de cette approche pour différentes typologies d'ouvrages d'art. Plusieurs configurations d'ouvrages ont été étudiées :

- Ponts à tablier ou ponts en arche,
- Fondations sur semelle ou fondations mixtes,
- Différents niveaux d'affouillement.

Le comportement des piles du pont modèle est observé sous une sollicitation par impact, à l'aide d'accéléromètres. Les signaux obtenus sont ensuite analysés en fréquence et discutés.

2 PRECEDENTES EXPERIMENTATIONS

2.1 Dispositif expérimental

Le système d'essai d'impact développé par le RTRI, qui en est à sa quatrième génération, se compose de (Figure 1) :

- 1 ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition,
- 1 récepteur WIFI,
- 3 à 4 boîtiers accéléromètres,
- 1 impacteur actionné manuellement (boule de 30 kg) ou automatiquement.

Sur l'ouvrage, les capteurs peuvent être installés provisoirement lorsque la surveillance de celui-ci n'est pas régulière. Dans ce cas, on recourt à un

système de colle chaude ou d'adhésif thermo-fusible. Lorsqu'une auscultation régulière est nécessaire, des plaques métalliques de 10x15 cm sont installées sur l'ouvrage par chevilles et tirefond. Les capteurs peuvent alors y être installés rapidement par un système magnétique.

Lors d'un essai, l'opérateur sur l'échelle ou le cordiste fixe la ou les plaques puis installe les capteurs sur les plaques. Ceux-ci sont positionnés à 1 m du haut de la pile, au milieu et à 1 m au-dessus du point le plus bas, dans le plan médian de la pile (voir Figure 1)

L'impacteur est installé sur une corde à une longueur adéquate selon la configuration de l'ouvrage testé. Celle-ci peut être fixée au garde-corps par exemple, ou à une structure rapportée permettant de déporter le point de fixation.

La réalisation des impacts se fait le plus souvent manuellement par l'action de l'opérateur en bas de la pile testé. Celui-ci procède alors de la manière suivante :

- Éloigner l'impacteur et le guider pour qu'il frappe d'un coup sec la pile dans l'axe,
- Frapper la pile sans rebond dans sa partie supérieure,
- Répéter l'impact au minimum 6 fois et idéalement 10 fois

Les signaux obtenus sont analysés pour déterminer de la fréquence propre de l'ouvrage. Le signal est découpé sur une plage de temps de x secondes (selon un choix judicieux de l'opérateur) et une transformée de Fourier est réalisée ainsi que le calcul de l'angle de phase (RTRI, 2019).

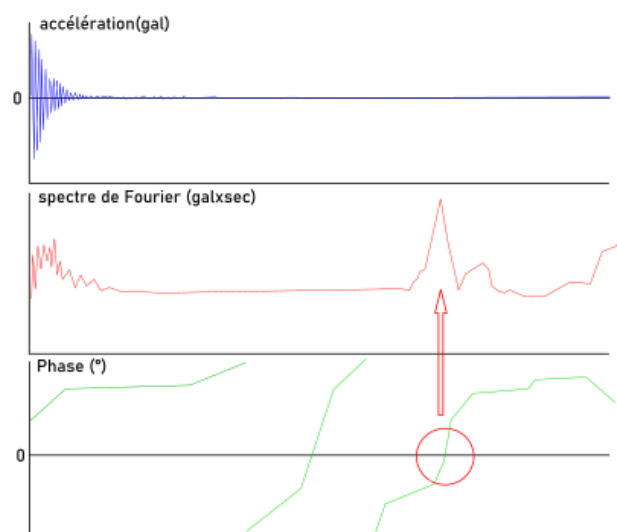


Figure 2. Principe de détermination de la fréquence

La fréquence est conventionnellement définie au niveau du changement de signe de l'angle de phase.

On cherchera à définir celui-ci de manière la plus précise possible par le calage d'une sigmoïde (Figure 2).

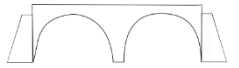




2.2 Structures testées

Différentes structures ont été étudiées en France et au Japon avec cette technique dans le but de comparer l'application de cette méthode dans différentes configurations. En France, des ponts ferroviaires sur la Bidassoa, l'Oise et la Seine ont été testés et comparés à quelques exemples de la base de données des ponts japonais. Toutefois, des difficultés d'interprétation sont apparues. Entre autres points, la typologie du pont détermine la pertinence de la méthode d'impact par rapport à la méthode des bruits de fonds (autre méthode d'auscultation dynamique) (Lin et al, 2026). En effet, en raison de l'histoire de chaque pays, son réseau ferroviaire a été construit selon différents choix techniques et économiques.

Le réseau ferroviaire français (RFF) a été principalement construit au cours du XIXe siècle par différentes entreprises privées qui ne fusionnent qu'en 1945. Leurs choix de conception dépendent du contexte géomorphologique ainsi que du type et de l'étendue du réseau, mais une grande majorité de ponts en arc en maçonnerie de pierre ou de brique ont été utilisés lors de la construction. Après trois guerres (1870, 1914-1918, 1939-1945), une partie de ces tabliers ont été reconstruits/remplacés par des tabliers à poutres enrobées. Le tableau 1 résume les différents types de ponts et leur utilisation respective en France et au Japon.

Aujourd'hui, les ponts en arches (dans toutes leurs déclinaisons) représentent environ 58% du patrimoine du RFF, contre environ 30% pour les ponts à tablier sur piles (pour l'ensemble des méthodes constructives).

Table 1. Types de ponts et fréquence dans le parc

Type de ponts	Schéma	Japon	France
Voute plein cintre ou surbaissée			+++
Cadre			+
Dalle		+++	++
Poutres jumelles		++	+
Poutrelles et poutres		+	

3 MONTAGE EXPERIMENTAL

Les différences entre les études de cas réels au Japon et en France ne permettant pas une comparaison systématique et plus précise, il a été proposé de réaliser des essais sur des modèles à petite échelle. Ces essais doivent permettre d'étudier la modification de la réponse de l'ouvrage en fréquence propre dans différents cas et en tenant compte de l'augmentation de la complexité de la structure (Figure 3).

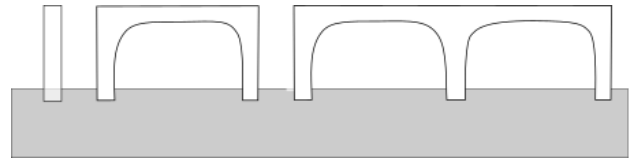


Figure 3. Échelle du modèle avec plusieurs arches

Il convient de noter que les modèles étant produits à l'échelle réduite, et sans recours à la macrogravité (modèles non centrifugés), ceux-ci répondent à des règles de similitude différentes de celles appliquées pour les modèles centrifugés. De ce fait, les résultats brut obtenue en doivent pas être considérés comme transposable directement à des ouvrages réels et devront faire l'objet d'une analyse de similitude pour cela. Cependant, les résultats présentés ici permettent une comparaison qualitative de la méthode entre les différents cas de figure analysés.

3.1 Conception

Afin de représenter des ponts typiques du RFF, des modèles à petite échelle ont été conçus de façon modulaire. La conception du modèle de base correspond à la géométrie de l'arche du « pont de Bidassoa », il reproduit la courbure des arches et les ratios des dimensions. La géométrie du modèle est présentée en Figure 4.

Le modèle est alors composé de trois éléments distincts. Une demi-arche, un pilier et une semelle de fondation. Ces trois, produit en plusieurs exemplaires, vont être assemblé par boulonnage de façon à former différentes configurations de pont. On peut alors assembler un pont en arche ou un pont type poutres métallique. Les piles peuvent être installées directement, ou sur les semelles de fondations. Des pieux peuvent être ajoutés sous fondations afin de simuler différents types de fondations (26 pieux par pile). Ceux-ci sont représentés par des sections de tige filetée métallique vissés dans des inserts sous la semelle.

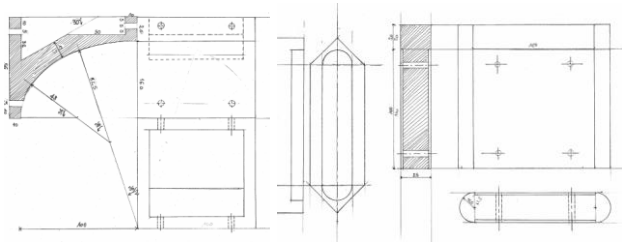


Figure 4. Premières esquisses du pont modèle (Reiffsteck)

Les caractéristiques principales sont :

- Portée : 225 mm ;
- Longueur du pilier : 125 mm ;
- Largeur du pilier : 25 mm ;
- Hauteur totale du pilier : 120 mm.

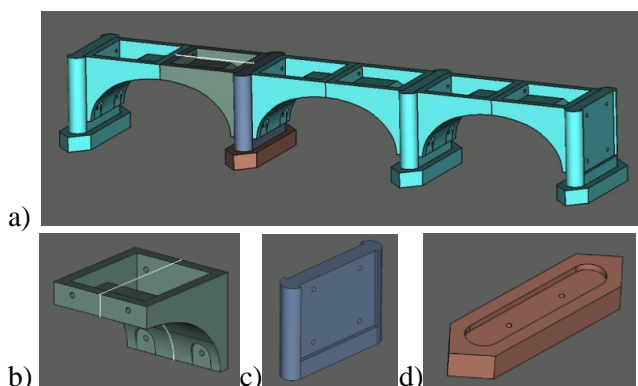


Figure 5. Modèle CAO 3D d'un élément de pont (a) structure complète, (b) demi-arche, (c) pile, (d) semelle (Badinier)

3.2 Construction

Les éléments du pont modèle ont été modélisés dans un logiciel de CAO ce qui a permis la conception des moules adaptés en négatif des pièces. Ceux-ci ont été fabriqués à l'aide d'une imprimante 3D.

Plusieurs exemplaires de chaque pièce ont ainsi été réalisés par moulage d'un mortier renforcé par un treillis en fibre de verre (Figure 6).

Les caractéristiques du mortier sont :

- CEM5, E/C=0,5 ; C500-E250-S350
- Module dynamique : $E_d=7,7-8,25$ GPa
- Résistance à la compression : 46 MPa

Les culées ont été modélisées à l'aide de plaques métalliques également boulonnées à la dernière pile. Dans un assemblage type poutre métallique, celle-ci a été reproduite à l'aide de feuilles d'acier pliées.

L'ouvrage final est systématiquement composé de trois travées, et deux piles centrales. L'entraxe entre les piles est toujours identique quel que soit la configuration.



Figure 6. Élément de pont assemblé pour reproduire le type de pont en arc sur la Bidassoa (Guirado)

3.3 Instrumentation

Des accéléromètres unidirectionnels ont été utilisés pour instrumenter chaque pile du pont modèle. Ils sont fixés à l'aide de pâte repositionnable, au sommet des piles et peuvent donc être orientés dans différentes directions afin d'étudier différents comportements de l'ouvrage. Un système DEWE-43-A de Dewesoft réalise l'acquisition signaux lors des impacts. L'impacteur utilisé est une bille en acier de 20g.

Le pont modèle est installé sur un bac remplis de sable Hostun reconstitué à 80 % de densité relative à l'état sec.

Lors d'un essai, le pont modèle est installé dans la configuration choisie et les accéléromètres sont installés. L'enregistrement de signaux est réalisé simultanément sur l'ensemble des voies d'acquisition. L'opérateur réalise manuellement les impacts avec soin. L'énergie d'impact doit rester modérée de façon à ne pas créer de mouvement perceptible à l'œil. L'impact doit être unique et sans rebond, celui-ci est répété entre 3 et 5 fois, avec un temps de pause d'au moins une seconde entre deux impacts. Plusieurs séries d'impact peuvent être réalisées sur la même configuration, avec des impacts sur les quatre piles (y compris celles composant les culées), et sur les faces amont et aval de chaque pile.

3.4 Tests effectués

Les essais ont été réalisés fin 2024 et début 2025. Différentes conditions ont été testées de façon à faire varier :

- Type de pont : poutre métallique ou arches ;
- Type de fondation : fondation superficielle, groupe de pieux lâches ou denses ;
- Présence d'affouillement : profondeur d'enfoncement ou autre type d'affouillement.

3.4.1 Sur caisson

3.4.1.1 Influence du type de pile

Préalablement, une configuration avec une pile seule sans charge appliquée et une avec une pile assemblée avec deux demi-arches sont comparées.

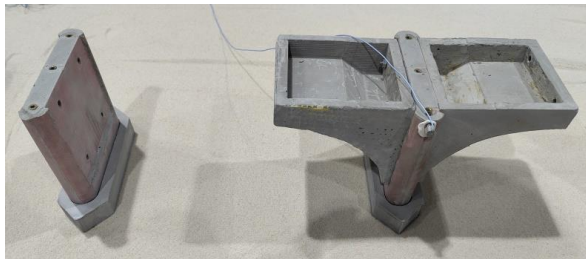


Figure 7. Élément de pont (a) pile nue et (b) pile avec deux demi-arches (Reiffsteck)

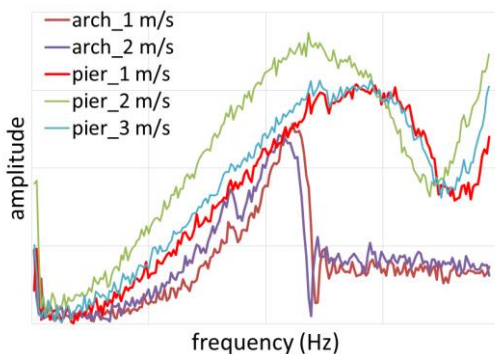


Figure 8. Réponse dans le domaine fréquentiel (influence des arches)

L'analyse des signaux obtenus (figure 8) montrent que la charge ajoutée par les demi-arches diminue la fréquence propre d'environ 140 Hz à 108 Hz.

3.4.1.2 Influence de l'encastrement dans le terrain

L'influence de l'encastrement sur la configuration à pile unique entraîne une augmentation de la fréquence naturelle : de 140 Hz pour $D=0$ à 169 Hz pour $D=20$ mm et 40 mm). Aucune différence majeure n'est observée dans la fréquence propre entre 20 et 40 mm, probablement en raison de l'état meuble du sable.

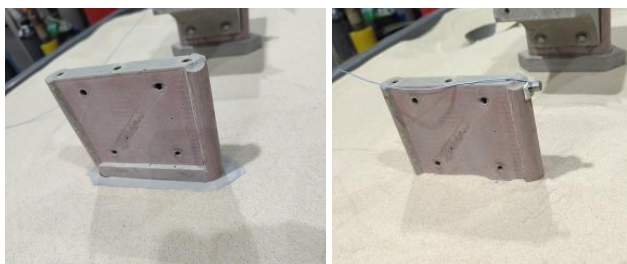


Figure 9. Piles avec différents encastrement (a) 20 mm et (b) 40 mm (Reiffsteck)

Pour observer l'effet de l'affouillement (simplifié) sur un pont en arc (cas de référence), 50 mm de sable ont été excavés entre les piliers sous la base de fondation peu profonde. La deuxième configuration (Figure 11) simule un affouillement en amont.

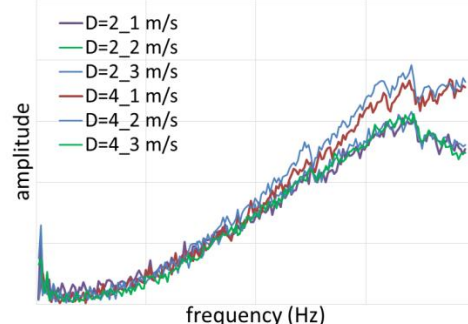


Figure 10. Réponse dans le domaine fréquentiel (influence de l'encastrement; $D=2$ et 4 cm)

Dans le troisième cas, le sable a été retiré sous un tiers du caisson afin de simuler une situation d'affouillement grave.



Figure 11. Modèle de pont en arc avec affouillement symétrique de 50 mm de profondeur (Reiffsteck)

Les fréquences respectives sont de 74, 79, 80 et 79 Hz, on peut conclure qu'aucune influence significative sur la fréquence propre n'est observable si la capacité portante reste inchangée et/ou si la rigidité du pont compense la perte de capacité portante. En réalité, un pont en maçonnerie peut être beaucoup plus ductile que le modèle.

Il convient de noter que pour cette expérience, les écrous étaient serrés, ce qui conférait au modèle une rigidité considérable.

Dans ce cas, seul un affouillement schématisé a été étudié, mais une forme plus réaliste tirée de la bibliographie peut être reproduite en fonction de la forme de la pile (Chabert et Engeldinger, 1956).

3.4.1.3 Influence du type de poutre

Dans une première approche, une seule plaque d'aluminium a été utilisée pour simuler la poutre hyperstatique. Des charges ont été appliquées sur les

axes des piliers (0, 1 et 3 daN) et ont entraîné une augmentation nette de la fréquence propre (respectivement 115, 158 et 193 Hz) et une diminution de l'amplitude (respectivement 0,019, 0,009 et 0,006). Des patches en caoutchouc ont été utilisés pour simuler les appuis du pont.

Le pic observé à 65 Hz, pratiquement inchangé pendant l'augmentation de la charge, peut être dû à la structure de poutre choisie.

3.4.2 Sur pieux

Une étude paramétrique plus systématique de l'influence sur le système de fondation d'un pont en arc a été réalisée. Des systèmes de fondation sans pieux, c'est-à-dire des fondations superficielles, et avec pieux ont été testés (Figure 12).

Deux types de piles ont été testés : verticales ou avec arches. De plus, une profondeur d'érosion croissante a été imposée. Les cas avec une pile autonome sont numérotés 00i. Pour les cas numérotés 10i, la pile est intégrée dans le modèle de pont.

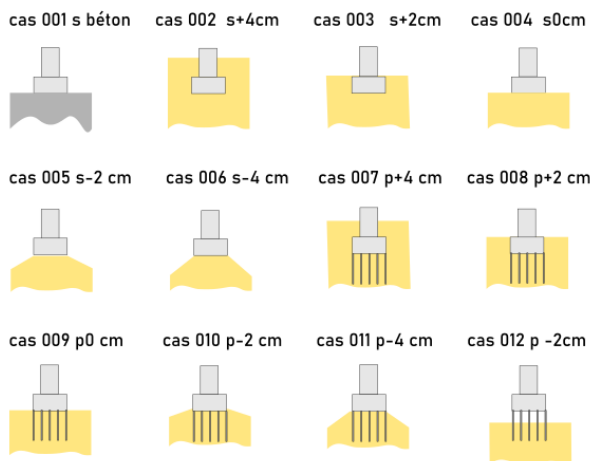


Figure 12. Cas étudiés

Les cas numérotés 10i ont la même profondeur d'affouillement que le cas 00i.

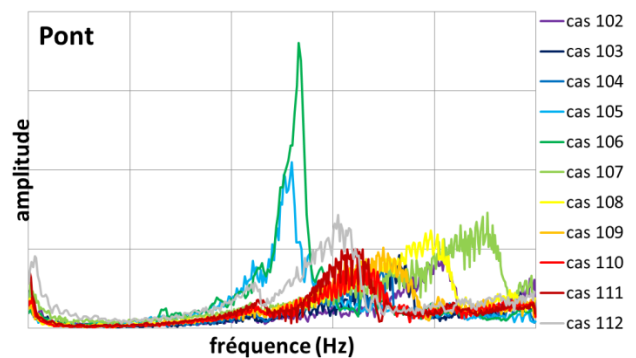
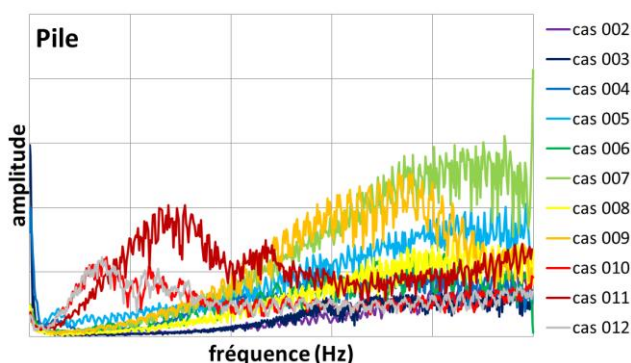


Figure 13. Réponse dans le domaine fréquentiel (influence des pieux)

La figure 13 montre comment la fréquence naturelle diminue lorsque le modèle de lit de rivière est approfondi, c'est-à-dire lorsqu'il y a affouillement. Un tel phénomène est conforme aux observations réalisées par Seki et al., (2001) et Murata et al., (2019). Les configurations avec pieux sont les moins influencées. La situation avec le pilier sur fondation peu profonde est la plus proche du mode corps rigide et s'avère la plus sensible à l'abaissement du niveau du sable.

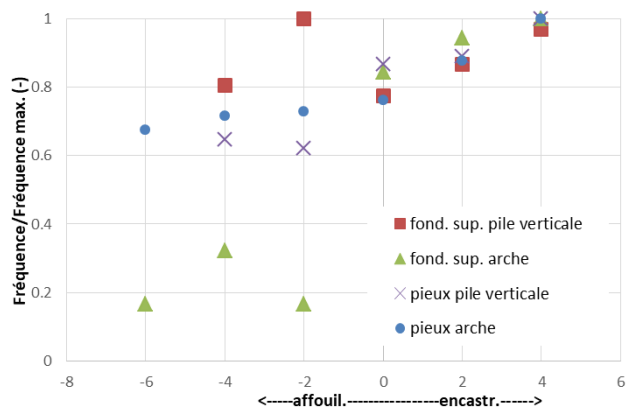


Figure 14. Évolution de la fréquence propre en fonction de l'encastrement

La figure 14 synthétise l'ensemble des mesures et confirme les tendances à la chute de la fréquence avec la diminution de l'encastrement et ce quel que soit le mode de fondation ou la structure.

3.4.3 Sur pieux déconnectés

Des cas supplémentaires ont été réalisés pour simuler :

- La déconnexion du pieu de la semelle modélisant le cas de la dégradation des pieux en bois,
- L'enceinte du système de fondation par un mur de palplanches.

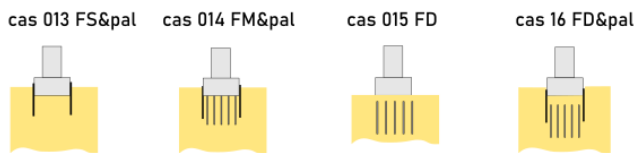


Figure 15. Cas complémentaires

La paroi de palplanches a été recréée à l'aide d'une fine plaque métallique de forme trapézoïdale (Figure 16).



Figure 16. Vue de la pile avec parois de palplanches

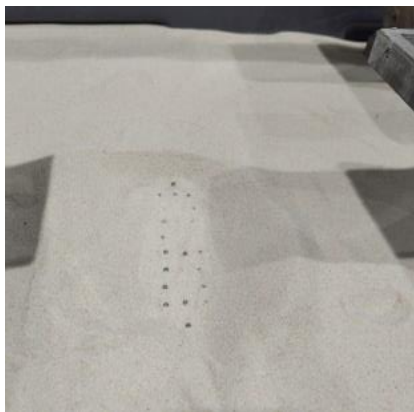


Figure 17. Emplacement des pieux déconnectés de la semelle

Pour les fondations superficielles (cas FS – 1 et 13) et les fondations sur radier (cas FM – 9 et 14), les spectres restent relativement similaires avec des pics juste en dessous de 100 Hz (mode de basculement global) et un pic régulier autour de 120 Hz (mode de basculement d'une pile avec déformation globale du tablier). La Figure 18 montre que la fréquence est légèrement augmentée en raison de la présence d'un mur de palplanches dans le cas FS. A noter que la feuille métallique n'étant pas connectée à la fondation la variation reste très faible. Mais aucun effet réel n'est observé lorsque les pieux sont connectés à la semelle, c'est-à-dire dans le cas FM.

Lorsque les pieux sont déconnectés de la semelle mais toujours en place (cas FD – 15 et 16), les spectres changent radicalement. La fréquence de la

fondation déconnectée (cas 15) montre un accroissement par rapport à la fondation superficielle seule (cas 1) et la présence de l'enceinte (cas 16) semble diminuer la fréquence. Sans doute l'effet de la mise en place est prépondérant sur l'effet du confinement.

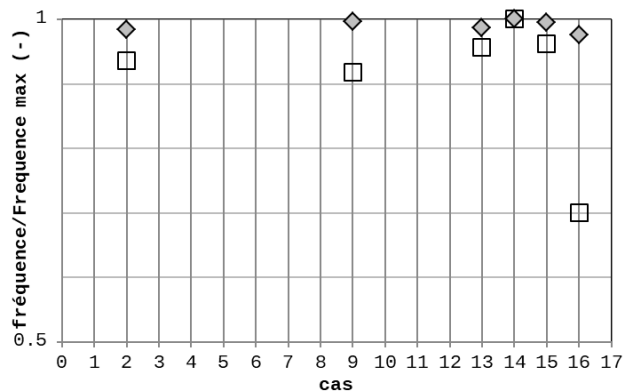


Figure 18. Cas complémentaires

4 DISCUSSION

Cette étude met en évidence l'influence de l'ancrage du système de fondations sur pieux-radier sur la fréquence naturelle. Systématiquement, cette fréquence naturelle diminue pour un mode de déformation donné, quel que soit le cas.

Différentes rigidités de structure (c'est-à-dire serrage des liaisons) doivent encore être testées pour les ponts en arc et les ponts à poutres. L'influence du mode de déformation de l'ouvrage n'a pas été étudiée car il n'aura que peu d'application pratique en comparaison avec le système RTRI utilisé à échelle réelle n'instrumentant qu'une pile (Mazzeo et al., 2023 ; Mudahemuka et al., 2024).

La technique du bruit de fond mise en œuvre en parallèle sur les ouvrages est confrontée à de nombreux écueils du fait de la très faible connaissance des caractéristiques détaillées des ouvrages et de la difficulté à définir un pic de fréquence clair.

5 CONCLUSIONS

Une maquette du pont a été utilisée pour mener une étude paramétrique du comportement dynamique d'un tel ouvrage. Des cas avec des pieux, serrés ou non au caisson (simulant la pourriture des pieux en bois), ont été réalisés. Un batardeau a également été simulé à l'aide de plaques métalliques.

L'étude montre l'influence des conditions aux limites sur l'évolution de la réponse dynamique. Des

tendances similaires ont été observées sur les ouvrages réels et corroborent ces résultats.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le RTRI et ses ingénieurs pour le prêt du matériel et leurs conseils précieux, SNCF Réseau pour son soutien financier et l'accès à ses ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chabert J., Engeldinger P. (1956) Étude des affouillements autour des piles des ponts. Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France, Bureau Central d'Étude pour les Équipements d'Outre-Mer (BCEOM), 130 pages

Pham H. K., (2017) Application of Impact Vibration Test Method for Bridge Substructure Evaluation, EACEF 2017, 138, 02017 (2017) DOI: 10.1051/mateconf/201713802017

Ko Y-Y, Chang W-K, Liu K-Y, Hung H-H and Chang K-C (2015) Damage Evaluation for RC Bridge Piers Using Vibration Measurement, *Advances in Structural Engineering*, DOI: 10.1260/1369-4332.18.9.1501

Masui Y., Suzuki O. 2009, Development of a Soundness Evaluation System for Bridge Substructured, JR EAST Technical Review-No.14, 65-68

Mazzeo M., De Domenico D., Quaranta G., Santoro R., (2023), Automatic modal identification of bridges based on free vibration response and variational mode decomposition technique, *Engineering Structures*, Volume 280, 115665,

ISSN 0141-0296,
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115665>.

Mudahemuka E, Miyagi M, Shin R, Kaneko N, Okada Y, Yamamoto K. (2024) Estimating Bridge Natural Frequencies Based on Modal Analysis of Vehicle-Bridge Synchronized Vibration Data. *Sensors* 6;24(4):1060. doi: 10.3390/s24041060. PMID: 38400218; PMCID: PMC10891791

Murata K. Sanagawa T. Ikai T. Nishioka H. (2019) Document on the effect of soil cover thickness on the vibration characteristics of actual bridge piers, Research work documents, Railway Technical Research Institute, W433161Q , 13 pages

Nishimura A., Tanamura S.; (1989) A Study on Integrity Assessment of Railway Bridge Foundation, RTRI Report Vol. 3, No. 8, pp. 41–49, Aug.

RTRI (2010) Maintenance standards for railways, pp 165-171

RTRI (2019) Impact IV notice, Measuring systems for health assessment, 97 pages

Seki M., Tanaka H., Tsutsumi Y., Yamashita K., Nakano S. Nishimura A. (2001) Proposition de système de contrôle de l'exploitation des trains sur les ponts ferroviaires tenant compte de la fréquence naturelle des piliers en cas d'inondation Société japonaise du génie civil n° 686/VI-52, 79—89, (en japonais)

Lin Y.-H., Chen C.-H., Peng H.-Y., and Shih D.-S., (2026) Applying a Passive Vibration Detection Technique to Assess Bridge Pier Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 152(2): 11, <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14431>