

# AUSCULTATION VIBRATOIRE ET MODELISATION D'UN PONT MAÇONNE LORS D'UN ESSAI DE CHARGEMENT

## **AMBIENT VIBRATION ASSESSMENT AND MODELLING OF A MASONRY ARCH BRIDGE DURING A LOADING TEST**

Antoine GUILLEMOT<sup>1</sup>, Pierre MORENON<sup>2</sup>, Laurent BAILLET<sup>3</sup>, Éric LAROSE<sup>3</sup>, Sten FORCIOLI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géolithe, 181 rue des Bécasses, Groupe Géolithe, 38920 Crolles, France

<sup>2</sup> LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, Toulouse, France

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

**RÉSUMÉ** – Un essai de chargement *in situ* a été réalisé sur la voûte du pont d'Osserain (Pyrénées-Atlantiques), qui a permis de solliciter et de fragiliser la structure en maçonnerie, ainsi que d'étudier sa réponse lors du chargement. Une analyse spectrale des mesures de vibrations ambiantes a aidé à la paramétrisation d'un modèle numérique par éléments finis, et apporte des informations précieuses sur l'endommagement du pont.

**ABSTRACT** – An experimental loading test has been applied to an arch of Osserain bridge (Pyrénées-Atlantiques), in order to weaken the masonry structure and to study its response to loading. Modal analysis from ambient vibration measurements helps to parameterize a finite-element numerical model, and provides valuable information on the damage to the bridge.

### 1. Contexte de l'étude

Cette communication vise à présenter les premiers résultats de l'auscultation vibratoire du pont en maçonnerie d'Osserain (Pyrénées-Atlantiques), en vue d'une estimation de l'endommagement de l'ouvrage.

L'étude s'inscrit dans le contexte du projet de recherche national Dolmen visant à améliorer les connaissances actuelles sur les ouvrages de génie civil en maçonnerie, et rassemblant plusieurs acteurs de la communauté scientifique et de la construction. Le chantier démonstrateur du pont d'Osserain a pour but d'expérimenter plusieurs méthodes de suivi d'ouvrages, en bénéficiant d'un site voué à la déconstruction programmée à la fin de l'année 2023. Plusieurs groupes de travail dédiés à la modélisation et l'instrumentation ont étudié au préalable l'ouvrage.

Un essai de chargement appliqué sur une voûte du pont, par l'ajout successifs de blocs bétons sur le remplissage, a été effectué entre les 24 et 26 octobre 2023, en vue de solliciter et fragiliser la structure en maçonnerie, et d'étudier sa réponse au chargement. À l'aide de plusieurs types de mesures, principalement topographiques, l'objectif consiste à déterminer le déplacement et le comportement de l'ouvrage au cours des différentes phases de chargement et déchargement.

## 2. Méthodes

### 2.1. Instrumentation sismologique

Dans ce cadre, la société Géolithe, avec la collaboration du laboratoire ISTERre, a mis en place une instrumentation composée de deux sismomètres (vélocimètres type Lennartz Electronic LE-3D/20s 3 composantes) disposés sur les tympans, au droit de la voûte chargée et d'une pile, sur une durée de 10 jours comprenant les phases de chargement et déchargement de la voûte.

Ces capteurs passifs mesurent en continu la réponse vibratoire de l'ouvrage à des ondes élastiques produites par des sources d'origine naturelle (séismes, vent, pluie, écoulement de la rivière, ...) ou anthropique (trafic routier, infrastructures diverses). L'analyse du contenu fréquentiel de ces vibrations ambiantes permet de déterminer et suivre temporellement les paramètres modaux de la structure : forme modale, fréquence de résonance, amortissement (Rainieri & Fabbrocino, 2014).

En effet, les modes de résonance propres à l'ouvrage sont caractérisés par des pics d'énergie à certaines fréquences (Magalhães & Cunha, 2011). Si la stabilité temporelle des sources de vibrations est suffisante, les valeurs de ces fréquences de résonance peuvent être estimées avec une bonne précision et une résolution temporelle fine (horaire, voire moins). En cas de modification de géométrie ou de changement des contraintes mécaniques de l'ensemble vibrant, ces fréquences sont significativement impactées (Roux et al., 2014, Larose et al., 2015). Pour cette raison, les méthodes d'évaluation de l'état des structures se fondent sur cette méthode vibratoire, le suivi de fréquences de résonance étant un bon candidat au suivi de l'endommagement mécanique et un précurseur de rupture en milieu naturel. L'analyse des vibrations ambiantes est donc appliquée pour la surveillance d'écaillés rocheuses (Larose et al., 2015, Colombero et al., 2021), de bâtiments (Astorga et al., 2019) ou de ponts maçonnés (Civerra et al., 2022 ; Barros et al. 2023).



Figure 1. (a) Vue d'ensemble de la voûte chargée du pont d'Osserain, lors de la dernière phase de chargement. (b) Vue d'ensemble du pont d'Osserain, avant chargement. (c) Zoom sur l'instrumentation du sismomètre 1, avec capteur (gris), câble sismologique (blanc) et numériseur (noir).

## 2.2. Modélisation mécanique

La modélisation numérique du pont d'Osserain utilisée dans cette étude utilise l'approche par éléments finis à l'aide du logiciel Cast3m (Cast3m, 2022). Dans un premier temps, une loi de comportement élastique à deux paramètres (module d'élasticité et coefficient de Poisson) est utilisée pour chaque matériau. La géométrie 3D réalisée respecte les dimensions de l'ouvrage au niveau de la maçonnerie (joint et blocs ne formant qu'un seul matériau homogénéisé), le remblai et les blocs de béton. Les pieds de culée et de piles sont encastrés. Le maillage final comporte 145 000 tétraèdres (Figure 2).

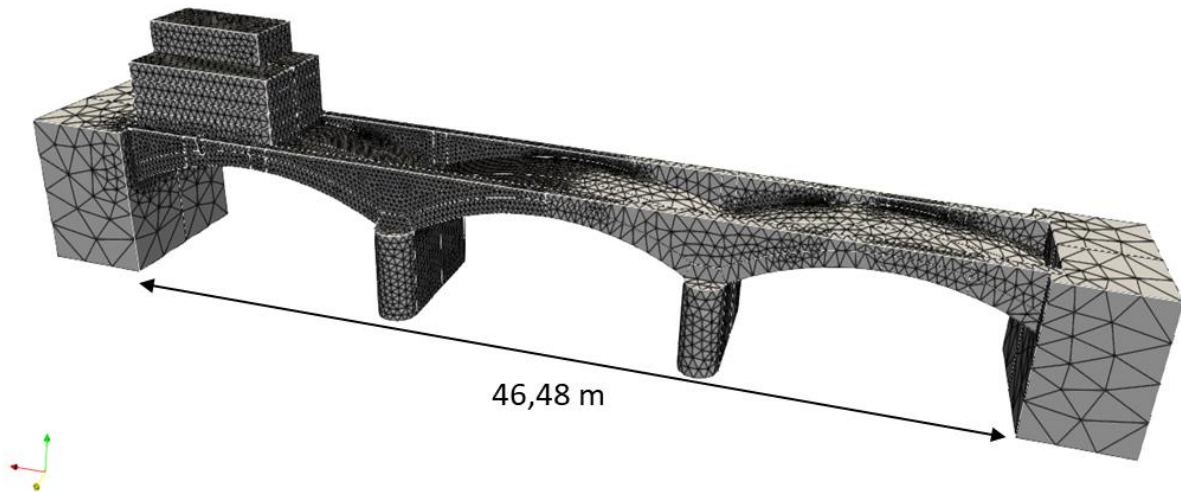


Figure 2. Maillage du modèle d'éléments finis, avec la géométrie correspondante à la phase de chargement maximal (sans remblai).

## 3. Résultats de l'auscultation vibratoire et lien avec la modélisation

L'analyse spectrale des vibrations ambiantes constitue la première étape du traitement des données. Nous avons appliqué la méthode de décomposition dans le domaine fréquentiel (*Frequency Domain Decomposition*, Brinckler et al., 2001), après avoir retiré tous les événements microsismiques, qui peuvent perturber l'identification des paramètres modaux. Au capteur positionné sur la voûte chargée, nous détectons des maxima locaux de densité de puissance spectrale, dont les deux premiers sont particulièrement visibles et stables sur la composante principale, entre 5 et 12 Hz environ (Figure 3). Il s'agit des deux premiers modes de résonance de l'ouvrage, dont on peut suivre l'évolution temporelle de leur fréquence au cours de la période de mesure.

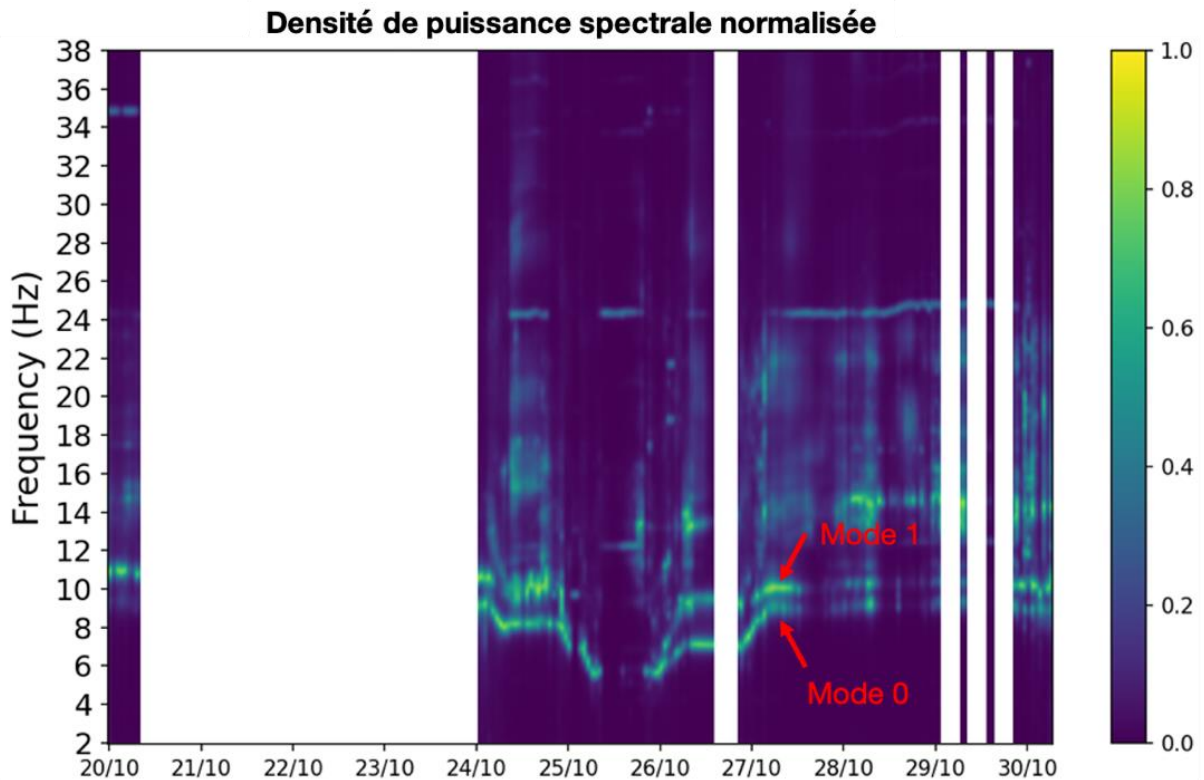


Figure 3. Densité de puissance spectrale normalisée de la composante principale issue de la décomposition fréquentielle des vibrations ambiantes au cours du temps, avec détection des deux premiers modes de vibration.

Pour ces deux modes, la composante verticale du déplacement domine, et au second ordre, le mouvement horizontal est davantage longitudinal que transversal.

L'analyse modale du modèle numérique permet d'obtenir les formes modales des deux premiers modes du pont, qui se révèlent cohérentes avec celles détectées par le sismomètre placé sur la voûte (Figure 4).

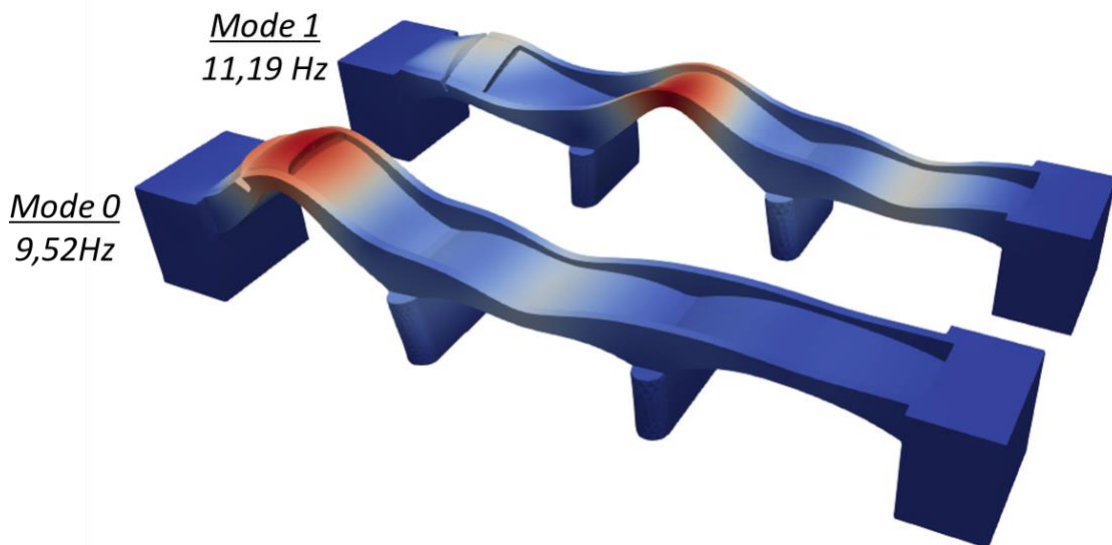


Figure 4. Les deux premières formes modales obtenues par l'analyse modale du modèle numérique avec un module d'élasticité de 4.8 GPa pour la maçonnerie.

De plus, les valeurs de fréquences de résonance estimées avant le chargement de la voûte aident à la calibration des paramètres mécaniques d'un modèle du pont d'Osserain en éléments finis. Une analyse paramétrique a été effectuée afin de déterminer la sensibilité respective des fréquences de résonance modélisées aux différentes caractéristiques du pont (Figure 5). Il en ressort que le paramètre le plus influent est le module d'Young du matériau maçonné homogénéisé constitué de la pierre et du joint. Celui-ci est évalué par analyse inverse numérique à 4.8 GPa, ce qui correspond à environ 10% de celui de la pierre seule (40 GPa mesures en laboratoire en cours), montrant la grande souplesse des ouvrages en maçonnerie.

L'auscultation vibratoire permet ainsi d'aider à évaluer ponctuellement la rigidité des ouvrages maçonnés et leurs conditions aux limites, et ainsi d'améliorer la calibration des modèles numériques par une méthode facile à mettre en œuvre, rapide et non destructive.

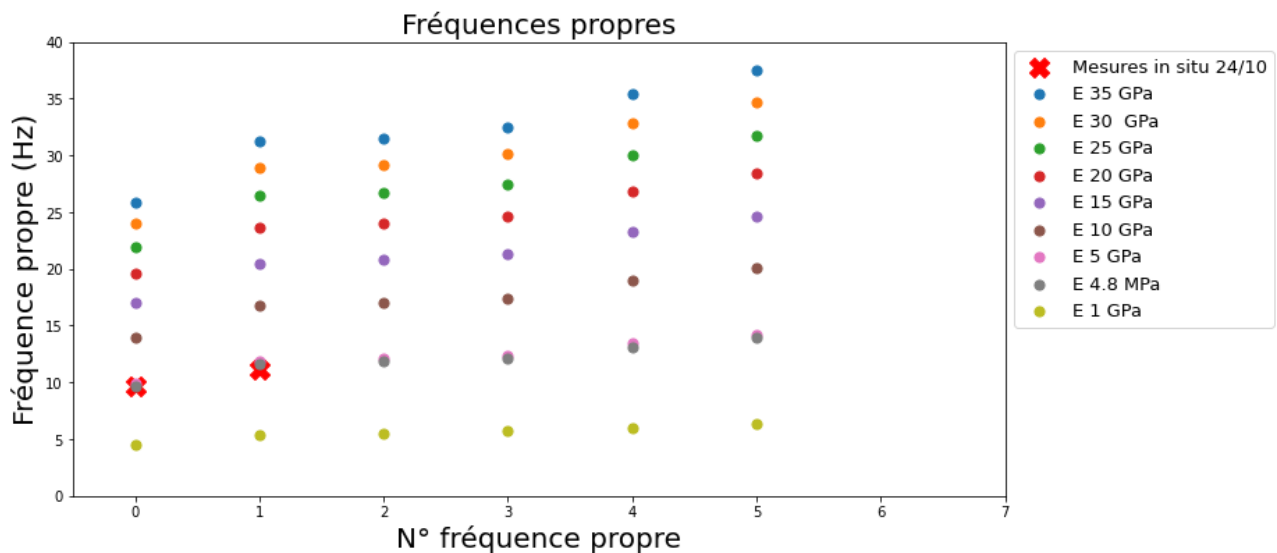


Figure 5. Comparaison des fréquences propres en fonction du module d'élasticité obtenues numériquement avec les valeurs issues des mesures in situ.

#### 4. Apports de l'essai de chargement

Les fréquences de résonance mesurée au cours du temps évoluent en fonction des niveaux de chargement de la voûte par les blocs béton (Figure 6). On observe une diminution importante (plusieurs dizaines de %) des valeurs de fréquence lors des phases de chargement pendant lesquelles des blocs béton sont ajoutés sur la voûte. Au cours des phases de déchargement, les fréquences réaugmentent jusqu'à des valeurs comparables à celles de l'état initial avant chargement, avec néanmoins un léger écart pour le mode 1.

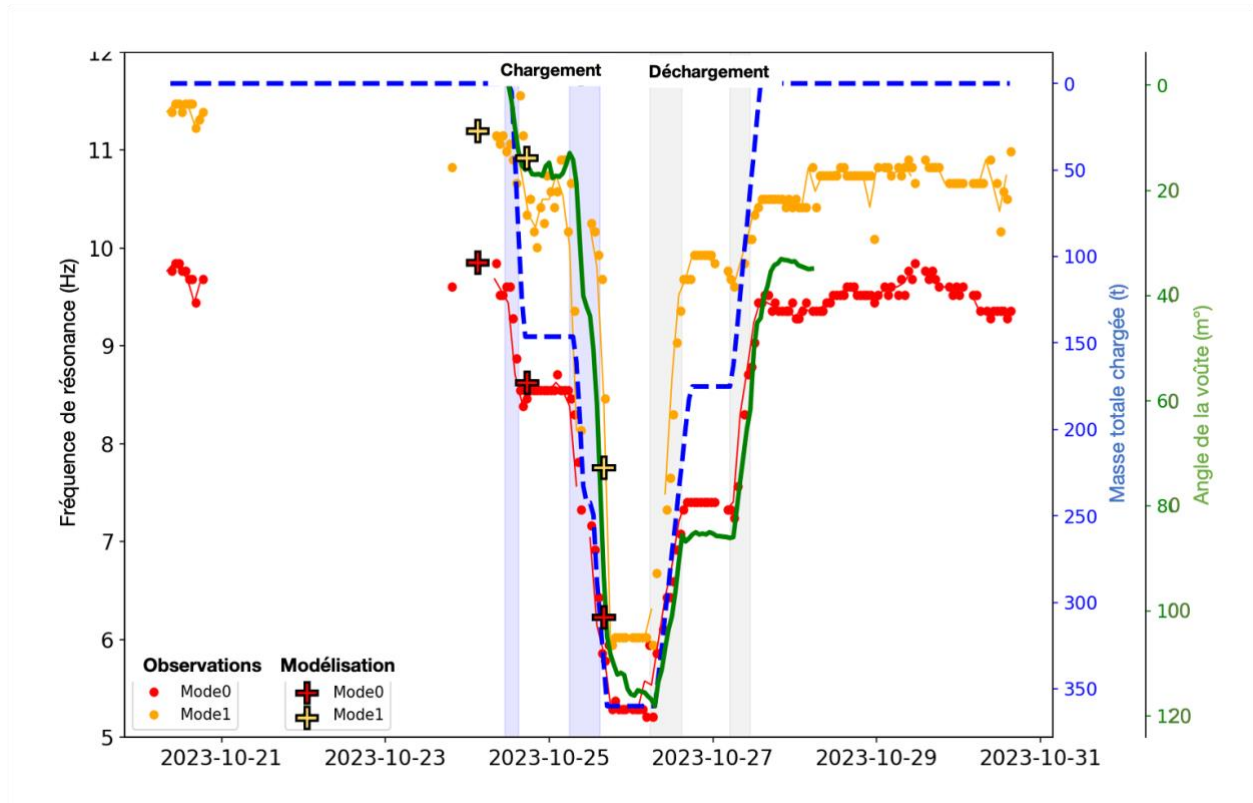


Figure 6. Évolution temporelle des fréquences de résonance des deux modes de vibration observés, de la masse totale chargée sur la voûte (bleu) et de l'angle de la voûte mesuré par inclinomètre (vert). Les fréquences de résonance numériques obtenues à l'aide du modèle élastique sont également montrées pour différents niveaux de chargement.

L'anti-corrélation entre fréquence de résonance et masse de la structure est évidente (Figure 7a) et linéaire (coefficient de régression proche de 1). Cependant, un phénomène d'hystérésis semble apparaître au long de l'essai de chargement, surtout détectable pour le mode 1 (Figure 7b), suggérant une irréversibilité de la déformation induite par le chargement qui peut provenir d'une augmentation de l'endommagement de la structure. Cette hypothèse est étayée par la non-réversibilité de la déformation de la voûte, mesurée par inclinomètre.

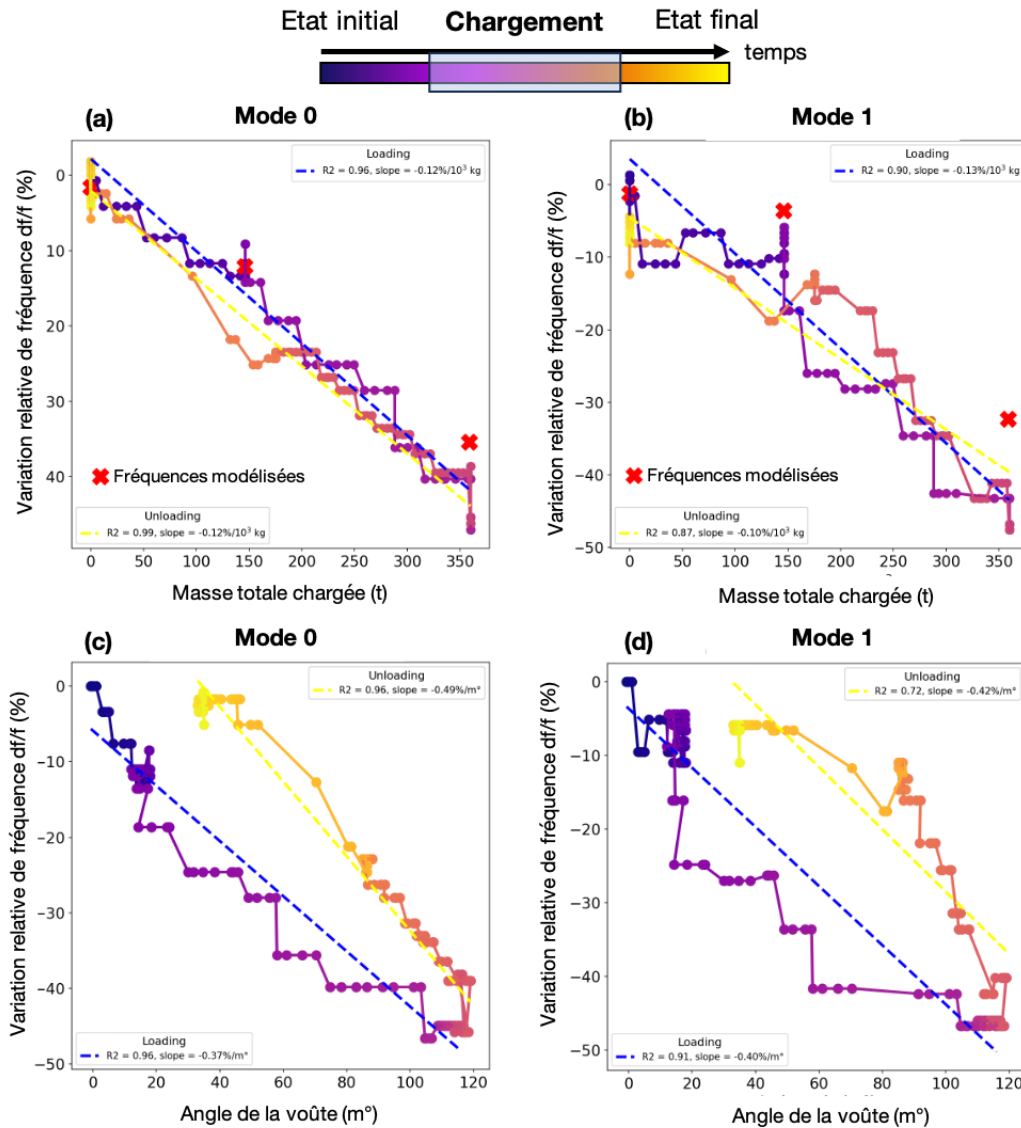


Figure 7. Relations entre les variations relative des fréquences observées des deux premiers modes de résonance et la masse chargée ((a) et (b)), et l'angle de la clef de voûte ((c) et (d)), respectivement. Les fréquences modélisées sont indiquées par une croix rouge.

L'essai de chargement a été modélisé numériquement, en prenant en compte les niveaux successifs de blocs béton chargés sur la voûte. La géométrie, la masse et la rigidité des blocs étant connue, l'effet mécanique du chargement a pu être simulé fidèlement. Le calage du module d'Young réalisé précédemment permet de retrouver la flèche (déformation verticale) mesurée pour les deux premiers niveaux de blocs posés, ce qui valide la méthodologie réalisée. L'analyse modale des modèles chargés montre une diminution des fréquences de résonance des deux premiers modes (voir croix sur Figures 6-7). La comparaison des résultats d'analyse modale avec les observations montre une grande concordance, mais l'effet du chargement sur les fréquences semble sous-estimé au-delà de 2 niveaux de blocs. Une prise en compte de l'endommagement non linéaire du matériau dans la modélisation est alors nécessaire pour expliquer les variations de fréquences observées ; cette perspective de travail est actuellement en cours de réalisation.

#### 4. Conclusions

L'originalité du chantier démonstrateur du pont d'Osserain réside dans l'essai de chargement effectué, qui a permis d'appliquer une sollicitation contrôlée de la voûte et d'en mesurer précisément les effets sur la structure, par des mesures de bruit de fond sismique et de déformation. L'auscultation vibratoire a permis de calibrer les modules mécaniques de matériaux complexes comme les maçonneries, et améliore donc le calage des paramètres des modèles numériques. Le suivi vibratoire au cours de l'essai de chargement a permis, en complément des mesures topographiques, d'étudier la réponse du matériau à une forte contrainte, et de détecter l'endommagement induit, ouvrant la voie à sa quantification précise par une modélisation non-linéaire.

#### 5. Autorisation de publication

Les auteurs certifient l'autorisation de publication de cette communication. Ils tiennent à remercier l'ensemble des acteurs du projet national Dolmen, de la fondation Ferec et les parties prenantes impliquées dans la réalisation du chantier démonstrateur du pont d'Osserain, en particulier le Département des Pyrénées-Atlantiques. Les auteurs tiennent également à remercier le CEA pour fournir le code aux éléments finis CASTEM ([www.cast3m.cea.fr](http://www.cast3m.cea.fr)).

#### 6. Références bibliographiques

- Astorga, A. L., Gueguen, P., Riviere, J., Kashima, T., & Johnson, P. A. (2019). Recovery of the resonance frequency of buildings following strong seismic deformation as a proxy for structural health. *Structural Health Monitoring*, 18(5-6), 1966-1981.
- Barros, B., Conde, B., Cabaleiro, M., Solla, M., & Riveiro, B. (2023). Multi-objective optimization-based model calibration of masonry bridges. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02306.
- Brincker, R., Ventura, C. E., & Andersen, P. (2001). Damping estimation by frequency domain decomposition. In *Proceedings of IMAC 19: A conference on structural dynamics: Februar 5-8, 2001, Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida, 2001* (pp. 698-703). Society for Experimental Mechanics.
- Cast3M. 2022. [Online], <http://www-cast3m.cea.fr/index.php>
- Civera, M., Mugnaini, V., & Zanotti Fragonara, L. (2022). Machine learning-based automatic operational modal analysis: A structural health monitoring application to masonry arch bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(10), e3028.
- Colombero, C., Jongmans, D., Fiolleau, S., Valentin, J., Baillet, L., & Bièvre, G. (2021). Seismic noise parameters as indicators of reversible modifications in slope stability: a review. *Surveys in Geophysics*, 42, 339-375.
- Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., ... & Massey, C. (2015). Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? *Journal of Applied Geophysics*, 116, 62-74.
- Magalhães, F., & Cunha, Á. (2011). Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge. *Mechanical systems and signal processing*, 25(5), 1431-1450.
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures*. Springer, New York, 142, 143.
- Roux, P., Guéguen, P., Baillet, L., & Hamze, A. (2014). Structural-change localization and monitoring through a perturbation-based inverse problem. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(5), 2586-2597.