

Analyse vibratoire d'un pont en maçonnerie lors d'un essai de chargement *in situ*

Pierre Morenon^{1,2}, Antoine Guillemot³

¹LMDC, Université de Toulouse, UPS/ INSA, Toulouse, France

²Toulouse Tech Transfer, Toulouse, France

³Géolithe, 181 rue des Bécasses, Groupe Géolithe, 38920 Crolles, France

RESUME La France compte plus de 60 000 ponts en maçonnerie. Leur diagnostic et leur entretien sont donc des enjeux majeurs pour la pérennité du transport routier et ferroviaire. La détermination d'indicateurs de dégradation de ces structures au cours du temps a pour objectif de quantifier leur endommagement, ainsi que de déterminer leur capacité portante résiduelle et la maintenance prédictive adaptée. L'analyse vibratoire est un outil non destructif qui fournit des informations utiles pour atteindre ces objectifs. Le projet national DOLMEN a pu bénéficier de la déconstruction du pont d'Osserain (pont surbaissé à trois arches) pour instrumenter l'ouvrage et réaliser un essai de chargement générant des non-linéarités. Des vélocimètres placés sur le tablier du pont ont permis de réaliser des mesures de vibrations ambiantes avant, pendant et après l'essai de chargement/déchargement. Après analyse spectrale des données de bruit ambiant, les fréquences de résonance des deux modes propres détectés ont pu être utilisées pour calibrer les paramètres d'un modèle numérique 3D par éléments finis. Le module d'élasticité de la maçonnerie homogénéisée avant chargement a notamment pu être déterminé par cette approche, et validé par comparaison avec la flèche obtenue lors du début du chargement de l'ouvrage. Un modèle d'endommagement a ensuite été utilisé pour prendre en compte la fissuration, et retrouver l'évolution irréversible des paramètres modaux de l'ouvrage. Les résultats sont cohérents avec les observations et attestent de la pertinence du suivi vibratoire des ouvrages en maçonnerie pour déterminer l'évolution de leur endommagement. Le développement et l'utilisation de modèles numériques avancés permettent de simuler le comportement non linéaire de l'ouvrage et son impact sur le comportement vibratoire ; il pourra à terme servir à déterminer sa capacité portante résiduelle.

Mots-clefs Analyse vibratoire ; Maçonnerie ; Pont ; Mesures non-destructives ; Modélisation

I. INTRODUCTION

La France compte plus de 60 000 ponts en maçonnerie (SETRA, 2005; SNCF, 2002). Évaluer leur état d'endommagement et assurer leur entretien sont donc des défis importants pour garantir la pérennité de ces ouvrages et la sécurité de leurs usagers. La détermination d'indicateurs de dégradation de ces structures au cours du temps a pour objectif de quantifier leur endommagement, ainsi que de déterminer leur capacité portante résiduelle et la maintenance idoine. La maçonnerie jointoyée est un composite multi-matériaux complexe, car les matériaux qui la composent (mortier et blocs de pierres ou de briques) ont chacun des comportements non-linéaires et parfois

anisotropes. Cette anisotropie est principalement due à l'interface entre les matériaux et la stéréotomie des pierres. Les résistances en traction sont très faibles (< 0.1 MPa) (Como, 2013), ce qui induit des fissurations précoces. A ce jour, il n'existe pas de règlement de recalcul des ouvrages de maçonnerie en place même si des recommandations existent (AFGC, 2022). Des méthodes de diagnostic permettant d'établir l'état actuel des ouvrages sont donc nécessaires. L'analyse vibratoire est un outil non destructif permettant de mesurer les paramètres modaux de l'ouvrage, qui sont utiles pour atteindre ces objectifs. Cette technique est couramment utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour les ouvrages en acier, bois ou béton, mais également sur les ouvrages en maçonnerie (Gentile and Saisi, 2007; Onat, 2020; Ramos et al., 2010). Cependant, les études d'évolution du comportement vibratoire lors de l'endommagement d'un ouvrage réel avec un chargement contrôlé sont beaucoup plus rares.

Le Projet National DOLMEN (Développement d'Outils et de Logiciels pour la Maçonnerie Existante et Neuve) vise à approfondir les connaissances sur les ouvrages de génie civil en maçonnerie. Ce projet réunit divers acteurs de la communauté scientifique et du secteur de la construction. Il a pu bénéficier de la déconstruction du pont maçonné d'Osserain pour instrumenter l'ouvrage et réaliser un essai de chargement par blocs de béton, générant des non-linéarités. Le travail proposé ici consiste tout d'abord à l'analyse spectrale des données de bruit ambiant (mesurées en continu par des vélocimètres). Les fréquences de résonance des deux premiers modes propres détectés ont ensuite été utilisées pour calibrer les paramètres d'un modèle numérique 3D par éléments finis. La question de l'estimation du module d'élasticité de la maçonnerie homogénéisée est tout d'abord traitée, puis un modèle d'endommagement a ensuite été utilisé pour prendre en compte la fissuration en utilisant les fréquences propres mesurées pendant le chargement du pont.

II. Chargement et instrumentation du pont d'Osserain

A. Description de l'ouvrage

Le pont d'Osserain (Pyrénées-Atlantiques) est un pont à trois arches surbaissées de 14 mètres de portée datant du XIX^{ème} siècle (Fig 1.). Le Conseil Département des Pyrénées-Atlantiques a autorisé l'instrumentation et la mise en chargement avant déconstruction de l'ouvrage prévue fin 2023. La maçonnerie se compose d'un calcaire isotrope très dur (masse volumique 2644 kg/m³, porosité moyenne de 2.22%, résistance en compression entre 94 et 203 MPa, module d'élasticité de 59 GPa en moyenne sur des carottages (Hichri et al., 2024) et homogène sur tout l'ouvrage (11% de coefficient de variation suite à une campagne de mesure de vitesse du son (Parent and Morenon, 2024)) et de joints de mortier de chaux.

B. Chargement/déchargement

Avant chargement, la totalité du remblai a été retirée, excepté sur une demi-travée, pour favoriser l'amplitude des déplacements (et donc potentiellement de l'endommagement) sous un chargement raisonnable. Une saignée a également été réalisée à un tiers de la portée pour favoriser

l'endommagement du pont pendant le chargement. Le chargement a consisté en la pose de blocs de béton de 2,4 T chacun sur 6 niveaux (soit 360 tonnes) (Fig 1.). Cette phase de chargement s'est déroulée en deux jours : 2 niveaux ont été mis en place le premier jour et les autres le jour suivant. Le déchargement a eu lieu dans la foulée, sur deux jours également.



FIGURE 1 : Vue aérienne du pont d'Osserain (Gérard Viossanges) lors de la fin de la phase de chargement. En médaillon : zoom sur une station sismologique, avec vélocimètre, câble sismologique et numériseur.

C. Instrumentation sismologique et spatiale

De nombreuses méthodes non destructives (radar, mesure de vitesse du son, tomographie) et d'auscultation (fissurométrie, mesures de déformation par fibre optique, vidéocorrélation) ont été déployées sur l'ouvrage avant et pendant le chargement. Les résultats utilisés dans ce travail sont issus de l'instrumentation sismologique (Fig 1.), en utilisant également les mesures topographiques et inclinométriques.

Le bureau d'ingénierie-conseil Géolithe, en collaboration avec le laboratoire ISTERre (Grenoble), a mis en place une instrumentation composée de deux sismomètres (vélocimètres 3 composantes type Lennartz Electronic LE-3D/20s) 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 les vibrations ambiantes (ou bruit de fond sismique) produites par des sources d'origine naturelle (vent, pluie, écoulement d'eau, ...) ou anthropique (trafic, infrastructures). L'analyse fréquentielle de ces données vibratoires permet de déterminer, les pics d'énergie à certaines fréquences, les fréquences de résonance propres de l'ouvrage, ainsi que l'amortissement et les formes modales correspondantes (Magalhães et al., 2012).

Dans le cadre d'un suivi, à condition que les sources de vibrations soient stables temporellement, les valeurs de ces fréquences de résonance peuvent être estimées avec une bonne précision et une résolution fine (horaire, voire moins). Ces fréquences sont sensibles aux modifications de géométrie, du champ de contraintes ou de rigidité de l'ensemble vibrant (Larose et al., 2015; Roux et al., 2014). 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 des matériaux. La méthode est donc appliquée à la surveillance d'écaïlles rocheuses en milieu naturel (Colombero et al., 2021), de bâtiments (Astorga et al., 2019) ou de ponts maçonnés (Barros et al., 2023; Civera et al., 2022). L'extraction des données mesurées n'a ici pu être réalisée que sur un des deux capteurs (à mi-travée de la voûte chargée), ce qui rend moins précise l'analyse des modes. Néanmoins, cette position à mi-travée est satisfaisante pour mesurer les deux premiers modes de vibration de la voûte (amplitude forte des formes modales au point de mesure).

Par ailleurs, des inclinomètres ont été posés au niveau du rein de la voûte chargée. Un suivi topographique a permis de suivre la flèche de l'ouvrage lors du chargement/déchargement.

III. Détermination des fréquences de résonances par traitement des mesures des vélocimètres

L'analyse fréquentielle constitue la première étape du traitement des données de vibrations ambiantes. Pour le 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 entre 5 et 12 Hz environ (Fig. 2). Il s'agit des deux premiers modes de résonance de l'ouvrage au niveau de la voûte, lesquels sont principalement verticaux au premier ordre.

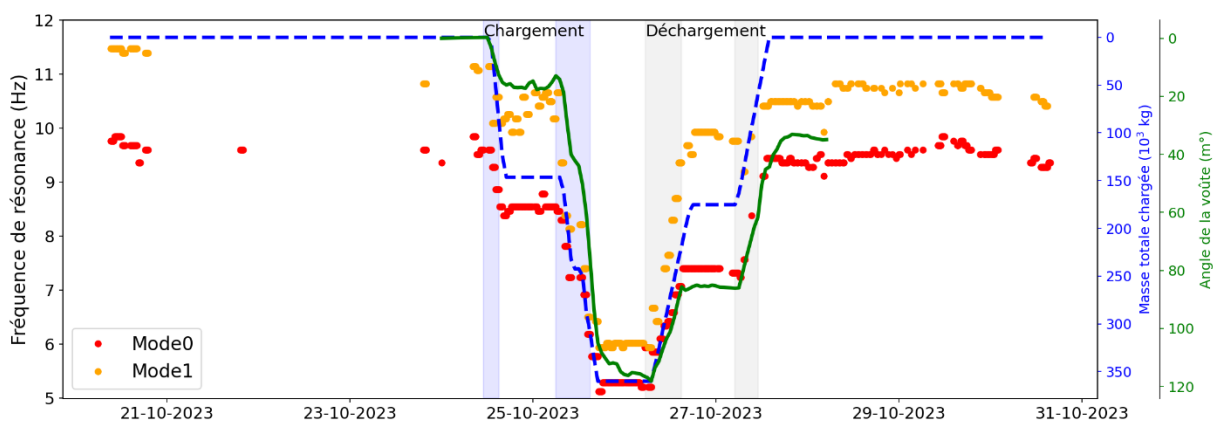


FIGURE 2. Évolution des fréquences de résonance mesurées par les sismomètres (points rouges et oranges pour les deux modes, respectivement), de la masse totale chargée sur la voûte (bleu) et de l'angle de la voûte mesuré par inclinomètre (vert).

IV. Détermination du module d'élasticité homogénéisé de la maçonnerie avant chargement par calcul aux éléments finis des fréquences de résonances

A. Géométrie, maillage et modèle

La modélisation numérique du pont d'Osserain adoptée dans cette étude repose sur 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 appliquée à chaque matériau. La géométrie 3D modélisée respecte les dimensions de l'ouvrage, intégrant la maçonnerie (où joints et blocs sont considérés comme un matériau homogénéisé), le remblai et les blocs de béton. Les pieds de culée et de piles sont encastrés. Le maillage final comprend 145 000 tétraèdres (Fig. 3).

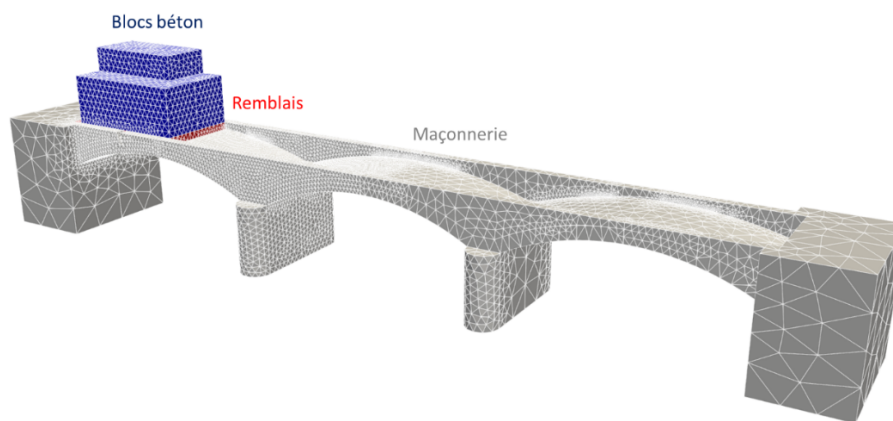


FIGURE 3. Maillage du pont et du chargement en éléments finis

B. Détermination du module d'élasticité homogénéisé

L'analyse modale du modèle numérique permet d'identifier les formes modales des deux premiers modes du pont avant chargement (Fig. 4). La masse volumique de 2600 kg/m^3 pour la maçonnerie est calibrée avec des données issues du dossier carrière des pierres calcaires (2683 à 2760 kg/m^3) datant de la construction du pont et dont l'ordre de grandeur est validé les mesures de vitesse du son sur les pierres (moyenne de 5100 m/s (Parent et al., 2015)) et les essais en laboratoire (2644 kg/m^3 (Hichri et al., 2024)). Une étude paramétrique est réalisée sur le module d'élasticité (Fig. 5), et le coefficient de Poisson de la maçonnerie dans le but de les calibrer. Le coefficient de Poisson n'a que peu d'impact sur les résultats des fréquences propres ($< 0.1 \text{ Hz}$ entre 0.05 et 0.3), sa valeur est fixée à 0.2 .

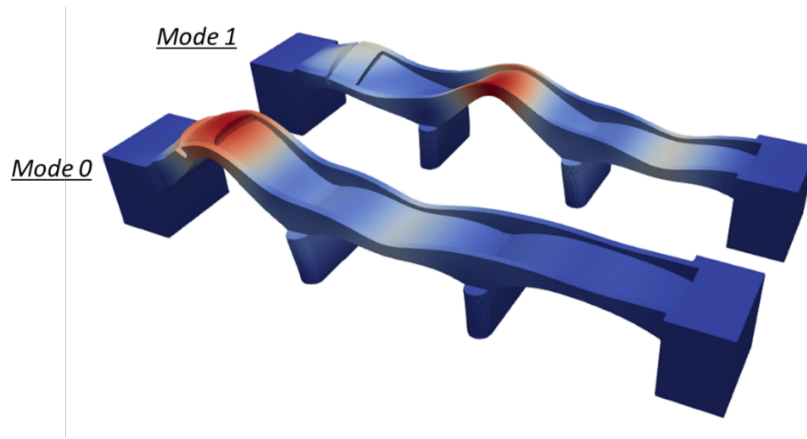


FIGURE 4. Visualisation des deux premiers modes obtenus avant chargement via le modèle aux éléments finis

L'étude paramétrique sur le module d'élasticité montre un impact important sur les fréquences de résonance de l'ouvrage (Fig. 5). Le module avant chargement est calibré à 4,8 GPa pour retrouver la valeur propre du mode 0. Cette valeur est très cohérente avec les modules homogénéisés obtenus sur ce type de matériau (1 à 10 GPa) (Como, 2013), ce qui est très inférieur au module de la pierre (ici entre 45 et 60 GPa) à cause des joints de mortier et des interfaces donnant de la souplesse à ces structures. Enfin, un changement de conditions aux limites (libération de l'encastrement sur les faces verticales des culées) est testé, ce qui impacte positivement le mode propre 1 (torsion) (Fig. 6).

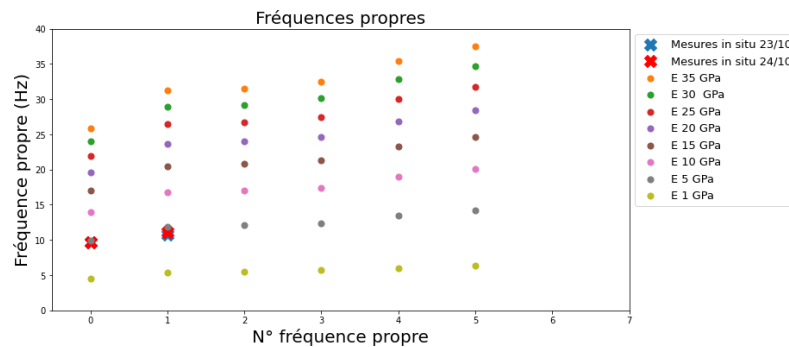


FIGURE 5. Comparaison de l'analyse paramétrique numérique sur le module d'élasticité et des mesures effectuées avant le chargement du pont (23 et 24 octobre 2023)

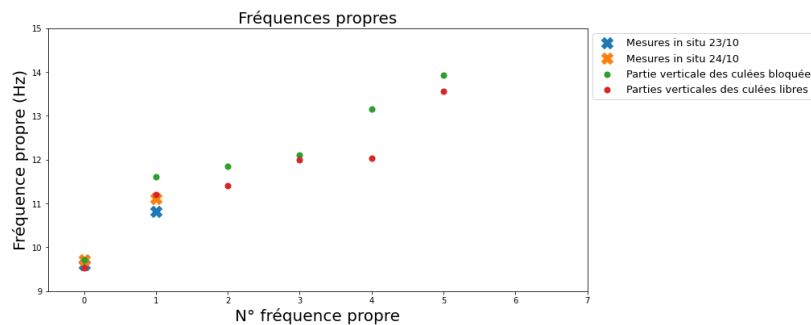


FIGURE 6. Comparaison de l'analyse paramétrique numérique sur les conditions aux limites mécaniques et des mesures effectuées avant le chargement du pont (23 et 24 octobre 2023)

C. Validation par comparaison de la flèche de l'ouvrage pendant le chargement

La validation de ce module d'élasticité homogénéisé est réalisée à l'aide de la flèche mesurée à mi-travée avec le suivi topographique lors du chargement des deux premiers niveaux de blocs (Fig. 7). La validation se cantonne à ces premiers niveaux de blocs pour rester dans un domaine élastique (linéarité des déplacements en fonction de la charge appliquée). La raideur de l'ouvrage calibrée sur les fréquences de résonance est très fidèle à celle mesurée in situ (7% d'écart par rapport à la régression linéaire (Fig. 7)). Cette validation est une première étape clé de ce travail.

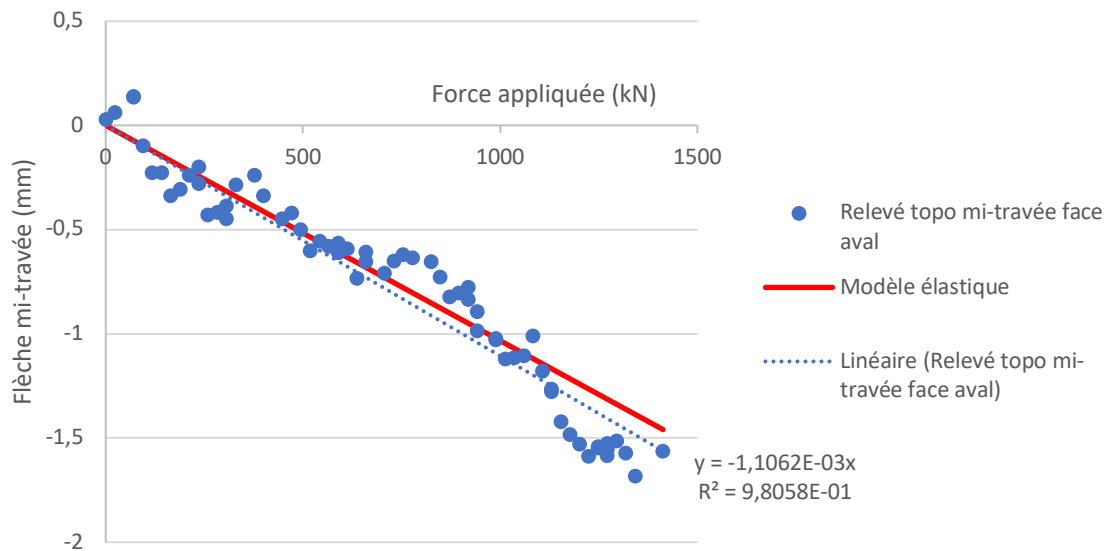


FIGURE 7. Comparaison de la flèche calculée et mesurée à mi-travée pour les deux premiers niveaux de blocs

V. Prise en compte de l'endommagement de l'ouvrage pendant le chargement

A. Prise en compte de l'endommagement dans le calcul vibratoire

Le modèle non-linéaire utilisé est le modèle endo3d développé au LMDC de Toulouse (Sellier et al., 2022). En traction, trois critères de Rankine orthotropes permettent de calculer des déformations plastiques orientées grâce à un écoulement associé. La phase d'adoucissement post-pic est induite par des endommagements qui sont calculés à partir des déformations plastiques dans les directions principales en dissipant une énergie de fissuration donnée par l'utilisateur.

Pour calculer la matrice de rigidité nécessaire au calcul des fréquences de résonance en éléments finis, le maximum de ces trois endommagements (D_I, D_{II}, D_{III}) est calculé en chaque élément, ce qui pondère le module d'élasticité E (Eq. (1)). Ainsi, un endommagement isotrope est utilisé dans un premier temps pour le calcul du module sécant E_D utilisé dans le calcul numérique des fréquences de résonances.

$$E_D = E(1 - \max(D_I, D_{II}, D_{III})) \quad \text{Eq. (1)}$$

B. Evolution des fréquences de résonances avec le chargement

Les fréquences de résonance mesurées au cours du temps évoluent en fonction des niveaux de chargement de la voûte par les blocs béton (Fig. 8). Plus le chargement est important plus la fréquence mesurée est faible pour les modes 0 et 1. Cette tendance est retrouvée avec le modèle élastique, cependant, la fréquence de résonance calculée avec le modèle d'élasticité bien que non-linéaire en fonction du chargement (la réponse vibratoire dépend de la racine du ratio raideur/masse) s'écarte des valeurs mesurées avec l'augmentation de la charge. Un calcul mécanique incrémental est mené avec le modèle d'endommagement ce qui permet de localiser l'endommagement (pied de pile, bandeau, saignée) (Fig. 9). Il permet de retrouver les fréquences obtenues pendant le chargement en calibrant sur les fréquences obtenues pour un chargement de 360 tonnes. La résistance en traction est de 0.05 MPa et l'énergie de fissuration en traction est de 7 J/m² ce qui cohérent avec les valeurs issues de la bibliographie (Bisoffi-Sauve, 2016).

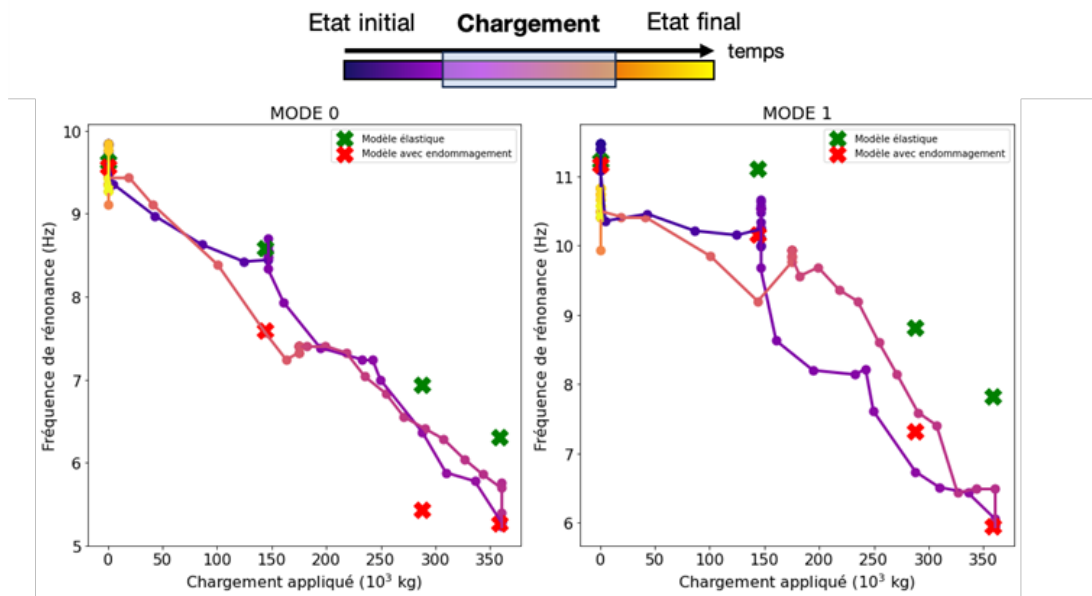


FIGURE 8. Relations entre les variations relative des fréquences observées et modélisées (modèle élastique et d'endommagement) des deux premiers modes de résonance et le chargement appliqué (écart type de 0.15 Hz pour le mode 0 et 0.18 Hz pour le mode 1)

Les non-linéarités observées sur les valeurs issues des mesures notamment sur le mode 1 pendant le chargement pourraient être dues au phasage dissymétrique de montage des niveaux (le phasage est différent au déchargement). L'endommagement de l'ouvrage est confirmé par les déplacements et les rotations non-linéaires observées par les mesures in-situ et leurs valeurs résiduelles après déchargement. Cependant, au cours des phases de déchargement, les fréquences réaugmentent jusqu'à des valeurs proches mais inférieures à celles de l'état initial avant chargement (-1.5% pour le mode 0 et -5.9% pour le mode 1, avec une incertitude de mesure de l'ordre de 2%). Les valeurs

après déchargement semblent proches des valeurs initiales compte tenu de la non-linéarité observée au plus fort du chargement. L'origine de ce phénomène pourrait provenir de la refermeture des joints mais aussi des pluies survenues pendant le déchargement qui pourraient avoir changé les caractéristiques vibratoires de l'ouvrage. D'un premier abord, l'eau ajoutée de la masse et réduit le module apparent des pierres ce qui entraîne une baisse des fréquences propres, cependant l'eau ne sature pas le pont de manière homogène et de l'eau s'est accumulée dans la troisième travée ce qui pourrait changer ces conclusions. La température peut également avoir un impact non négligeable sur la fréquence propre (10% dans (Ramos, 2007)). Une étude numérique de l'évolution des fréquences propres en fonction du phasage précis (chargement/déchargement) est envisagée pour identifier l'origine des phénomènes. L'altération finale de la fréquence propre du mode 1 plus marquée pourrait signifier que des fissures (ou joints) longitudinales ou biaisés sont ouverts (la fibre optique a permis de valider leur présence) alors que les joints orthogonaux se sont refermés. Un plus grand nombre de capteurs aurait pu permettre de mieux qualifier cette hypothèse. L'étude des modes supérieurs pourrait être envisagée pour compléter l'analyse.

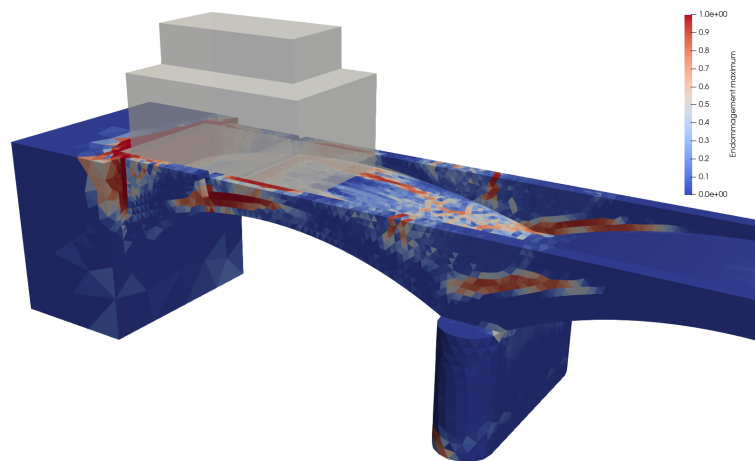


FIGURE 9. Endommagement maximum obtenu au maximum du chargement

VI. Conclusions et perspectives

De nombreux ouvrages en maçonnerie composent le parc des ponts français. Leur sûreté et leur maintenance reposent tout d'abord sur la phase de diagnostic. L'analyse vibratoire est une des solutions existantes pour établir les paramètres des modèles permettant de calculer la capacité portante résiduelle des ouvrages. Le projet national DOLMEN a pu profiter de la déconstruction du pont d'Osserain pour instrumenter et charger l'ouvrage sur une demi-travée à l'aide de blocs en béton (360 tonnes). La concomitance de mesures in situ et d'un chargement contrôlé est une originalité de ce travail. L'analyse vibratoire de deux vélocimètres en phase de pré-chargement couplée à un modèle numérique élastique (éléments finis) a permis d'établir le module d'élasticité homogénéisé de la maçonnerie. Il a ensuite été validé par comparaison avec la flèche de la voûte lors du début du chargement. Les résultats sont très cohérents et attestent de la validité de la démarche. Outre le modèle élastique, un modèle d'endommagement a ensuite été utilisé pour

calculer la chute du module apparent lors de l'augmentation de la charge (comportement non-linéaire des déplacements et des rotations avec la charge). Lors du chargement les fréquences évoluent d'abord conformément au modèle élastique mais s'en écartent ensuite. Le modèle d'endommagement permet de retrouver les fréquences de résonances au maximum du chargement avec des évolutions correctes, une non-linéarité du comportement de l'ouvrage pendant le chargement étant attesté par des capteurs de déplacements de l'ouvrage par ailleurs. L'analyse vibratoire semble donc être un outil pertinent pour le suivi des structures en maçonnerie. Cependant, le comportement vibratoire lors du déchargement est plus complexe car les valeurs finales de fréquences de résonance sont proches des valeurs avant chargement (différence non significative pour le mode 0, avec variation relative de -1.5% inférieure à l'incertitude de mesure, et différence significative pour le mode 1, avec une variation relative de -5,9%), ce qui semble montrer des différences de sensibilité des modes à l'endommagement. La réversibilité apparente observée pourrait être due à la refermeture de certains joints lors du déchargement (et donc une restitution de raideur), notamment les joints rayonnants, justifiant une altération du mode 1 mais pas du mode 0 après décharge. Par ailleurs, l'impact du changement d'état hydrique des pierres lors du déchargement (forts épisodes de pluie pendant le déchargement), ainsi que l'impact de l'effet thermique (Ramos, 2007) pourraient également être étudiés numériquement (avec la prise en compte de la masse d'eau supplémentaire et des évolutions des caractéristiques thermo-hydro-mécaniques afférentes, via une modélisation poroélastique par exemple). L'objectif est de comprendre voire de corriger la variabilité temporelle des mesures due à ces variables d'origine environnementale et non structurelle. L'étude des modes supérieurs pourrait également être envisagée pour compléter l'analyse.

REMERCIEMENTS

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).

REFERENCES

- AFGC, 2022. Évaluation structurale et conception de réparation des ouvrages d'art en maçonnerie - Version numérique.
- 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, 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.
- Bisoffi-Sauve, M., 2016. Etude des ouvrages maçonnés en pierre par la méthode des éléments discrets : caractérisation et modélisation du comportement cohésif des joints (phdthesis). Université de Bordeaux.

- 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, 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.
- Como, M., 2013. Masonry strength and deformability. *Statics of historic masonry constructions* 1–49.
- Gentile, C., Saisi, A., 2007. Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and building materials* 21, 1311–1321.
- Hichri, K., Parent, T., Morel, S., 2024. Evaluation multi-échelle de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques des pierres calcaires du Pont d’Osserain (Rapport interne DOLMEN).
- Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., Walter, F., Jongmans, D., Guillier, B., Garambois, S., 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., Caetano, E., 2012. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and signal processing* 28, 212–228.
- Onat, O., 2020. Impact of mechanical properties of historical masonry bridges on fundamental vibration frequency, in: *Structures*. Elsevier, pp. 1011–1028.
- Parent, T., Domede, N., Sellier, A., Mouatt, L., 2015. Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 79, 149–156.
- Parent, T., Morenon, P., 2024. Analyse des mesures de vitesse du son sur le pont d’Osserain (Rapport interne DOLMEN).
- Ramos, L.F., 2007. Damage identification on masonry structures based on vibration signatures (doctoralThesis).
- Ramos, L.F., De Roeck, G., Lourenço, P.B., Campos-Costa, A., 2010. Damage identification on arched masonry structures using ambient and random impact vibrations. *Engineering Structures* 32, 146–162.
- 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, 2586–2597.
- Sellier, A., Morenon, P., Domede, N., 2022. Computational performances optimization of a non-linear mechanical behaviour model for geomaterials. Presented at the *Rencontres Universitaires de Génie Civil* 022, Lille.
- SETRA, 2005. IQOA-PONTS, Campagne d’évaluation 2004.
- SNCF, 2002. Prescriptions techniques pour la surveillance et la maintenance des ouvrages d’art, Référentiel infrastructure, document d’application.