



**HAL**  
open science

## Influence de la raideur des assemblages rivetés d'une poutre treillis sur son comportement vibratoire

Hannah Franz, Emilie Lepretre, Mario Rinke, Sylvain Chataigner, Lamine Dieng

► **To cite this version:**

Hannah Franz, Emilie Lepretre, Mario Rinke, Sylvain Chataigner, Lamine Dieng. Influence de la raideur des assemblages rivetés d'une poutre treillis sur son comportement vibratoire. 25ème Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Association française de mécanique - AFM, Aug 2022, Nantes, France. 13 p. hal-04280126

**HAL Id: hal-04280126**

**<https://hal.science/hal-04280126>**

Submitted on 13 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Influence de la raideur des assemblages rivetés d'une poutre treillis sur son comportement vibratoire

H. FRANZ<sup>a</sup>, E. LEPRETRE<sup>b</sup>, M. RINKE<sup>c</sup>, S. CHATAIGNER<sup>d</sup>, L. DIENG<sup>e</sup>

a. Université Gustave Eiffel & AREP, hannah.franz@univ-eiffel.fr

b. Université Gustave Eiffel, emilie.lepretre@univ-eiffel.fr

c. Universiteit Antwerpen, mario.rinke@uantwerpen.be

d. Université Gustave Eiffel, sylvain.chataigner@univ-eiffel.fr

e. Université Gustave Eiffel, lamine.dieng@univ-eiffel.fr

## Résumé :

*Cet article détaille la méthode d'exploitation d'essais préliminaires réalisés sur une poutre treillis métallique à assemblages rivetés, visant à caractériser la raideur rotationnelle des assemblages par analyse modale expérimentale. L'extraction des paramètres modaux est effectuée à l'aide de la méthode « line-fit » pour les 6 premiers modes hors-plan identifiés expérimentalement à l'aide d'accéléromètres répartis sur les membrures haute et basse de la poutre. Le modèle numérique de la poutre, modélisant les barres de treillis avec des éléments finis de poutre 1-D, est comparé aux résultats expérimentaux grâce à des critères de qualité qui s'appuient sur les fréquences et les déformées modales obtenues numériquement et expérimentalement pour chacun des modes. L'étude des premiers modes permet d'ajuster les caractéristiques générales du modèle numérique, comme les conditions d'appui, et suggère que la représentation des assemblages rivetés comme encastrés est plus proche de la réalité que la représentation de ces assemblages comme rotulés.*

## Abstract :

*This paper details the analysis method of preliminary tests carried out on a metallic trussed beam with riveted joints, aiming to characterize the rotational stiffness of its joints by experimental modal analysis. The modal parameter extraction is done using the « line-fit » method for the first 6 experimentally identified out-of-plane modes, thanks to accelerometers distributed over the upper and lower chords of the beam. The numerical model of the beam, modeling the truss bars with one-dimensional beam elements, is compared with the experimental results thanks to quality criteria which are based on the frequencies and the modal shapes obtained numerically and experimentally for each mode. The study of the first modes helps adjusting general characteristics of the numerical model, such as the support conditions, and suggests that the representation of riveted joints as rigid is closer to reality than the representation of these joints as hinged.*

**Mots clés : treillis riveté, analyse modale, raideur rotationnelle des assemblages**

# 1 Introduction

Il subsiste aujourd'hui en France environ 90 halles de gare historiques à charpente métallique construites entre 1843 et 1931. Les pannes et les arbalétriers de ces charpentes sont souvent des poutres treillis rivetées en fer puddlé ou acier doux, réalisées au moyen de plats et de cornières solidarités par des assemblages mono-rivet (voir Fig. 1). Dans les projets de rénovation récents et en cours, ces poutres font régulièrement l'objet de renforts qui découlent de problèmes de stabilité identifiés grâce à des modèles aux éléments finis. Dans la réalité, des déformations excessives, comme celles de barres de treillis présentées sur la Fig. 1 en bas à droite, sont rarement observées lors des inspections visuelles réalisées par la SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français).



FIGURE 1 – Exemple de halle de gare historique : Le Havre. Vue globale, vue d'une panne et détail d'une panne avec des montants présentant des déformations excessives hors-plan. Photos : SNCF / AREP. Vue globale : Mathieu Lee Vigneau.

L'évaluation du risque de flambement, des barres de treillis (montants ou diagonales) ou des membrures, dépend fortement des hypothèses de modélisation retenues concernant la raideur rotationnelle des assemblages rivetés (voir Fig. 2). Ils sont le plus souvent représentés encastres dans le plan du treillis et rotulés hors plan, de manière conservatrice, mais ces hypothèses ne font pas l'unanimité au sein de la communauté des ingénieurs structure. Des études expérimentales récentes ont caractérisé la résistance d'assemblages rivetés, sans s'intéresser à leur raideur [1][2][3]. Des études numériques ont quant à elles porté sur la raideur de certaines typologies d'assemblages rivetés, en tenant compte de la force de serrage résultant du processus de rivetage [4][5][6]. Il n'existe cependant pas de caractérisation expérimentale de la raideur rotationnelle d'assemblages rivetés, à commencer par les assemblages mono-rivet caractéristiques des poutres treillis si communes dans les charpentes métalliques anciennes.

Cet article présente des essais réalisés sur une poutre treillis rivetée récupérée d'un chantier de démolition. L'objectif est de déterminer des valeurs de raideur rotationnelle pour les assemblages rivetés qui composent la poutre, par analyse modale expérimentale. Cet article détaille les essais vibratoires préliminaires qui ont permis de maîtriser l'extraction des paramètres modaux, à l'aide de la méthode « line-fit » [7], de valider la pertinence des premiers modèles numériques et de commencer à caractériser l'influence de la raideur des assemblages sur le comportement vibratoire. Un modèle numérique de la poutre a été réalisé sur le logiciel ROBOT [8], en privilégiant des éléments finis de poutre pour modéliser les membrures, les montants et les diagonales de la poutre treillis. Le modèle ROBOT a permis d'identifier que la raideur des assemblages n'a pas d'impact significatif sur les premiers modes : les 4

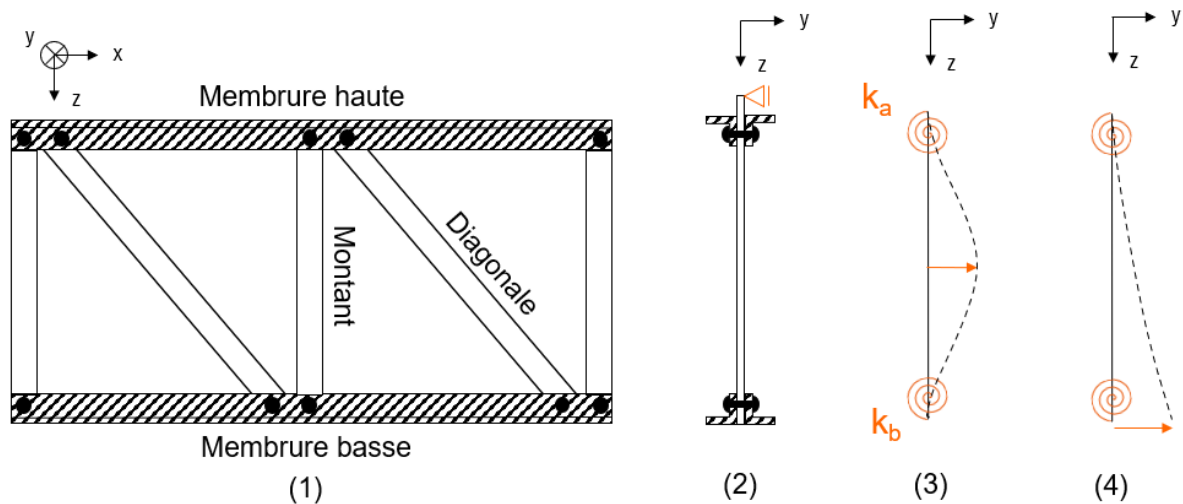


FIGURE 2 – Schéma d'une poutre treillis avec des assemblages mono-rivet vue en élévation (1) et en coupe au niveau d'un montant (2), avec un appui en membrure haute. Schéma des raideurs rotationnelles étudiées avec leur influence sur le flambement des montants (3) ou d'une membrure (4).

premiers modes ont des fréquences et des déformées modales qui restent quasiment les mêmes que l'on modélise les assemblages comme encastrés ou rotulés. Les essais préliminaires se sont donc concentrés sur l'exploitation des modes de basse fréquence pour ajuster d'autres paramètres de modélisation que la raideur des assemblages, tels que les caractéristiques du matériau et les conditions d'appui de la poutre. Les premiers modes identifiés expérimentalement sont comparés aux résultats numériques à travers l'évaluation de critères de qualité confrontant les fréquences et les déformées modales pour chacun des modes.

## 2 Objet d'étude

La poutre treillis rivetée servant d'objet d'étude a été récupérée du chantier de démolition d'une partie des abris de quais de la Gare de l'Est à Paris, datant de 1930 (voir Fig. 3). Il s'agit d'une poutre console, longue de 3,3 m, constituée d'un treillis de type Pratt de hauteur variant de 19 à 34 cm environ. Les sections des différents éléments sont connues grâce à des plans d'archives et ont été vérifiées grâce à des mesures au pied à coulisse, qui restent imprécises à cause de l'épaisseur de la peinture. Les membrures du treillis consistent en des doubles-cornières 45x45x5 mm et les montants et les diagonales en des plats 40x7 mm. Les montants et diagonales sont assemblés aux membrures par des rivets de diamètre 12 mm. A l'extrémité de la console, l'âme pleine est constituée d'un gousset de 7 mm d'épaisseur. Des ailettes horizontales servaient à supporter une poutre de rive. Au niveau de l'appui, des goussets de 7 mm d'épaisseur transmettent les efforts des membrures à une double-cornière verticale 60x60x6 mm (voir Fig. 4). Les efforts de la membrure haute sont également repris en partie par une ailette horizontale.

Les abris de quais ont été construits en même temps que la charpente de la couverture du quai transversal de la Gare de l'Est. L'acier constituant cette charpente a été caractérisé en 2016 par A-Corros grâce à des analyses chimiques, une étude métallographique et des essais de traction réalisés sur huit échantillons prélevés sur site [9]. Il s'agit d'acier doux ou extra-doux, c'est-à-dire avec une teneur en carbone inférieure à 0,2%, avec un module élastique moyen  $E = 210$  GPa. Le matériau de la poutre treillis qui constitue notre objet d'étude est supposé de même nature. Des essais de caractérisation du matériau de la poutre treillis étudiée seront réalisés ultérieurement pour confirmer cette hypothèse.



FIGURE 3 – Situation d’origine de la poutre treillis rivetée servant d’objet d’étude : les abris de quais de la Gare de l’Est à Paris. Photos : SNCF / AREP.

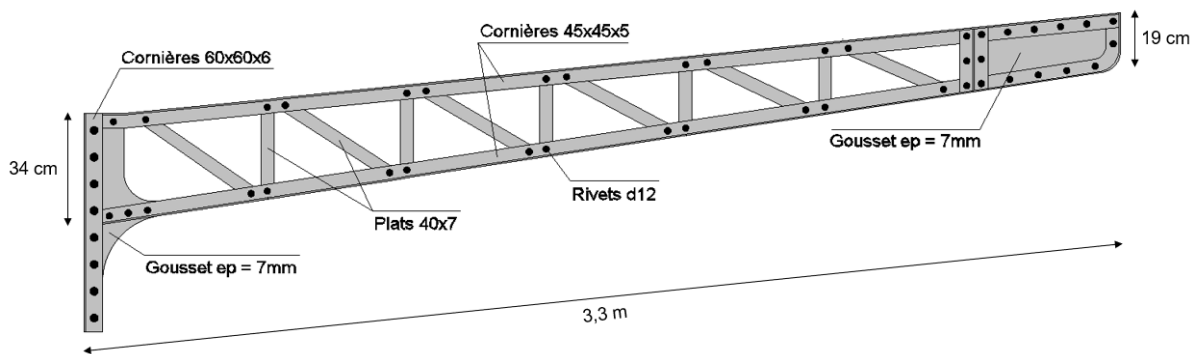


FIGURE 4 – Élévation schématique de la poutre treillis rivetée étudiée.

### 3 Analyse modale expérimentale

#### 3.1 Montage et instrumentation

Pour les essais, la poutre a été montée en console comme dans sa configuration d’origine à l’aide d’une platine en acier fixée sur un mur en béton (voir Fig. 5). Douze accéléromètres ont été répartis sur la poutre selon plusieurs dispositions afin de capter la réponse vibratoire : 7 accéléromètres capacitifs monoaxes et 5 accéléromètres capacitifs triaxes, avec des sensibilités variant entre 100 et 1000 mV/g selon les capteurs. Les capteurs étaient fixés à la poutre grâce à des aimants. La poutre a été excitée par des impulsions avec un marteau instrumenté PCB 086D05, muni d’un embout mou, avec une bande passante jusqu’à 150 Hz. L’acquisition des signaux a été réalisée au moyen du système HBM QuantumX, avec un module MX1615B et un module MX1601B, et du logiciel associé catman [10].

#### 3.2 Configurations d’essai

De manière à récupérer des déformées modales exploitables pour les modes globaux de la poutre, avec le nombre de capteurs à notre disposition, deux configurations d’essai ont été réalisées. Les capteurs ont été disposés :

1. tous en membrure haute (voir Fig. 6).
2. tous en membrure basse, en symétrique de la disposition en membrure haute.

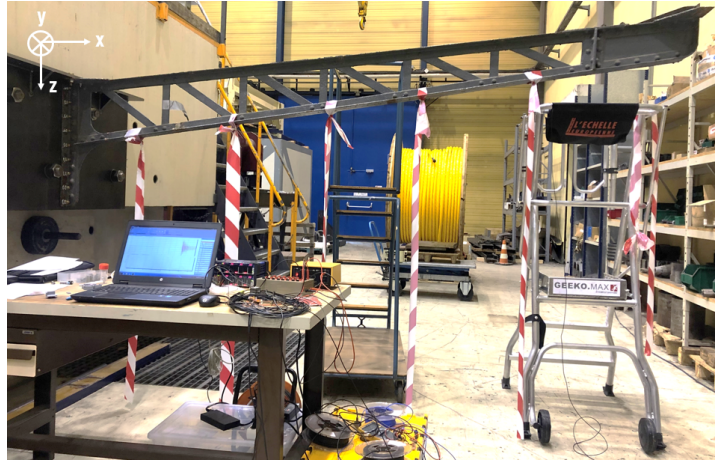


FIGURE 5 – Montage expérimental en laboratoire.

Les capteurs ont été répartis de manière la plus homogène possible le long de chaque membrure et positionnés ou bien au droit des montants ou à équidistance entre deux montants pour diagnostiquer d'éventuelles ruptures de pentes dans les déformations au niveau des montants. Les accéléromètres monoaxes permettaient d'acquérir des accélérations selon la direction  $y$  et les accéléromètres triaxes des accélérations selon les directions  $y$  et  $z$ . Seules les accélérations dans la direction  $y$  ont été exploitées. Dans la disposition en membrure basse, 2 accéléromètres (les accéléromètres 4 et 5) n'ont pas fonctionné correctement et ont été exclu de l'analyse. Les degrés de liberté étudiés consistent donc en 22 degrés de liberté en translation selon  $y$ , 12 en membrure haute et 10 en membrure basse. Pour chaque disposition de capteurs, la poutre a été excitée par une impulsion au marteau au niveau de l'extrémité de la membrure haute dans la direction horizontale. Les signaux temporels ont été acquis sur une durée de 5 secondes après impulsion, avec une fréquence d'acquisition de 4800 Hz. Chaque essai a été répété 3 fois.

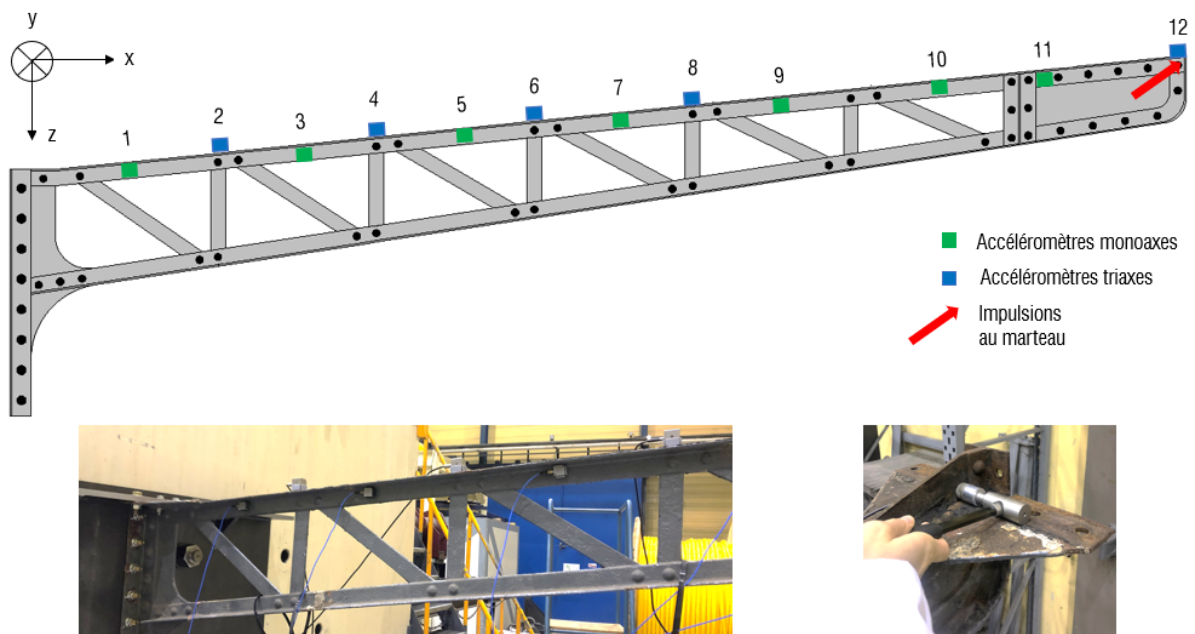


FIGURE 6 – Principe d'un essai avec disposition des accéléromètres en membrure haute de la poutre.

### 3.3 Extraction des paramètres modaux

L'analyse modale expérimentale a pour objectif de proposer un modèle structurel du système à partir de son comportement vibratoire. Elle consiste à trouver les coefficients de l'expression théorique de la réponse en fréquence qui permettent de se rapprocher le plus des données expérimentales. Pour un nombre choisi de modes, on cherche ainsi à connaître les paramètres modaux, à savoir la fréquence de résonance, l'amortissement, et la déformée modale, qui s'obtient grâce au module et à la phase de la constante modale en chaque point de mesure. Pour déterminer ces paramètres, plusieurs méthodes existent, locales ou globales. Dans cette étude, la méthode locale « line-fit » [7], qui traite chaque résonance séparément, a été privilégiée.

Les signaux temporels d'entrée, correspondant aux accélérations du marteau, et de sortie, correspondant aux accéléromètres, sont transformés dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une transformation de Fourier rapide (FFT). Comme les signaux d'entrée étaient très bruités, un filtre temporel a été appliqué au préalable de manière à ne récupérer que le pic de l'impulsion : seules les valeurs du signal dépassant 1/4 de la valeur maximale ont été conservées, les autres ont été mises égales à zéro. Quant aux signaux de sortie, un filtre passe-bande Butterworth d'ordre 2 leur a été appliqué pour retirer de leur spectre les fréquences inférieures à 1 Hz et supérieures à 400 Hz.

La fonction de réponse en fréquence (FRF) du système correspond au rapport, dans le domaine fréquentiel, entre l'entrée (la force excitatrice) et la sortie (le déplacement, la vitesse ou l'accélération en un point de mesure). Pour un système à  $N$  degrés de liberté, présentant donc  $N$  modes, la réceptance  $\alpha_{jk}(\omega)$ , qui donne la FRF du système pour le déplacement  $X_j$  du point  $j$  lorsque la structure est excitée par une force  $F_k$  au point  $k$ , peut s'écrire [7] :

$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{X_j}{F_k} = \sum_{r=1}^N \frac{r A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i \eta_r \omega_r^2} \quad (1)$$

Où  $\omega_r$ ,  $\eta_r$  et  $r A_{jk}$  sont respectivement la pulsation de résonance, l'amortissement hystérétique et la constante modale, complexe, du mode  $r$ . Ce sont les paramètres modaux que l'on cherche à obtenir.

La FRF est évaluée grâce à l'estimateur  $H_1$  qui réalise une forme de moyennage des essais répétés pour minimiser le bruit à la sortie [7] :

$$H_1(\omega) = \frac{S_{fx}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \quad (2)$$

Où  $S_{ff}$  est l'autospectre de la force d'excitation et  $S_{fx}$  l'interspectre entre l'entrée et la sortie.

La fonction de cohérence est un indicateur de la qualité de la mesure de la FRF. Elle vaut 1 pour une mesure sans bruit et 0 pour une mesure très bruitée. Son expression en fonction de la fréquence est :

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{fx}|^2}{S_{xx} S_{ff}} \quad (3)$$

Où  $S_{xx}$  est l'autospectre de la sortie. Lors de l'exploitation des résultats, seuls les pics avec une cohérence  $\gamma^2 > 0,8$  ont été considérés.

A partir des FFT des signaux d'entrée et de sortie, la FRF a d'abord été déterminée, pour chaque accéléromètre, sous forme de l'inertance, qui donne le rapport entre accélération et force excitatrice, puis convertie en réceptance  $\alpha(\omega)$  en divisant par  $-\omega^2$ .

Pour extraire les paramètres modaux pour chaque accéléromètre, la méthode « line-fit » a été implémentée sur Matlab [11]. La méthode « line-fit » fournit pour chaque pic de la FRF la fréquence de résonance  $\omega_r$ , l'amortissement  $\eta_r$  et les parties réelle et imaginaire  $a_r$  et  $b_r$  de la constante modale  ${}_r A_{jk}$  (voir Eq. 1). Cette méthode s'appuie sur des régressions linéaires des parties réelle et imaginaire de l'inverse de la réceptance pour des fréquences entourant un pic (voir Fig. 7). L'amplitude de la déformée modale du mode  $r$  au point  $j$  est donnée par le module de  ${}_r A_{jk}$  avec un signe indiqué par la phase. Pour chacun des modes, on a choisi un accéléromètre de référence, vérifié que le déphasage des autres accéléromètres par rapport à cette référence était proche de 0 ou de  $\pi$ , s'assurant ainsi qu'il s'agissait de modes réels et non complexes, et attribué un signe + ou - à l'amplitude de la déformée en chaque point de mesure, selon que le déphasage valait 0 ou  $\pi$ .

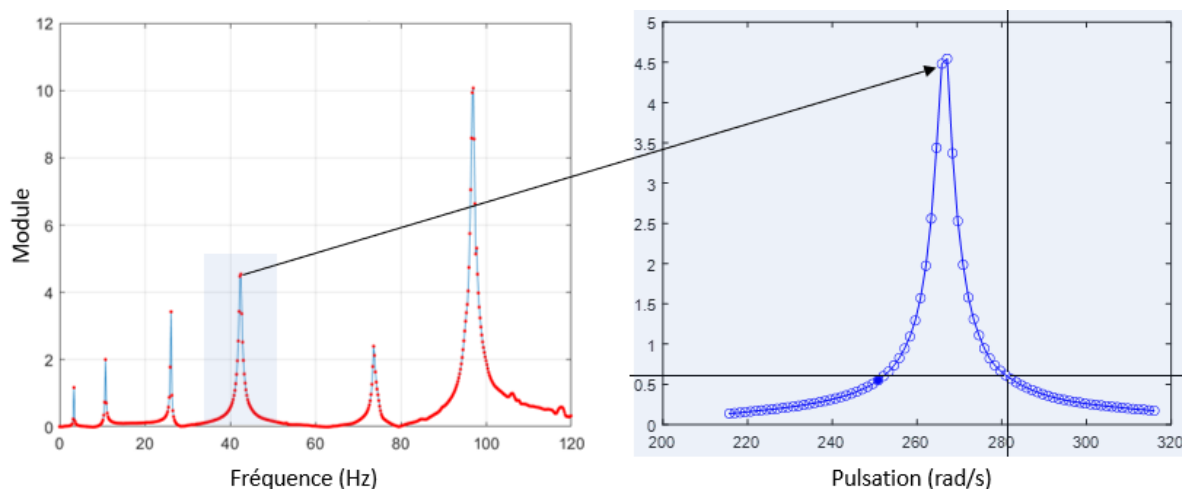


FIGURE 7 – Exemple de spectre du module de la réceptance selon  $y$  pour l'accéléromètre 9 en membrure haute et sélection des points de mesure autour d'un pic pour récupérer les paramètres modaux avec la méthode « line-fit ».

Les paramètres modaux des 6 premiers modes hors-plan de la poutre treillis, c'est-à-dire avec des déformations dans la direction  $y$ , ont été extraits pour chacun des 12 accéléromètres dans les deux configurations d'essais, membrure haute et membrure basse. Les valeurs statistiques des fréquences et amortissements obtenus sont présentées dans le Tab. 1.

Mode $r$	$\omega_r$ (SD) [rad/s]	$f_r$ (SD) [Hz]	$\eta_r$ (SD) [%]
1. mode	21.6 (0.5)	3.43 (0.07)	1.08 (1.03)
2. mode	68.0 (0.1)	10.83 (0.01)	1.46 (0.19)
3. mode	164.6 (0.3)	26.20 (0.05)	0.53 (0.07)
4. mode	274.1 (1.4)	43.63 (0.23)	1.38 (0.09)
5. mode	470.8 (4.7)	74.93 (0.75)	0.81 (0.12)
6. mode	618.1 (3.5)	98.38 (0.56)	1.28 (0.32)

TABLE 1 – Fréquences et amortissements moyens (avec leur écart-type SD) obtenus expérimentalement pour les 6 premiers modes hors-plan.

On peut vérifier que les paramètres modaux extraits reflètent bien les données expérimentales en régénérant le spectre du module de la réceptance grâce à la formule théorique donnée par l'Eq. 1. Un exemple de comparaison entre le spectre expérimental et le spectre régénéré est donné pour l'accéléromètre 9 en membrure haute par la Fig. 8. Pour le spectre régénéré, on a utilisé les constantes modales déterminées pour l'accéléromètre concerné et les fréquences et amortissements moyens obtenus pour chaque mode



à partir de tous les accéléromètres. On observe que la concordance entre le spectre expérimental et le spectre régénéré est meilleure pour les plus basses fréquences.

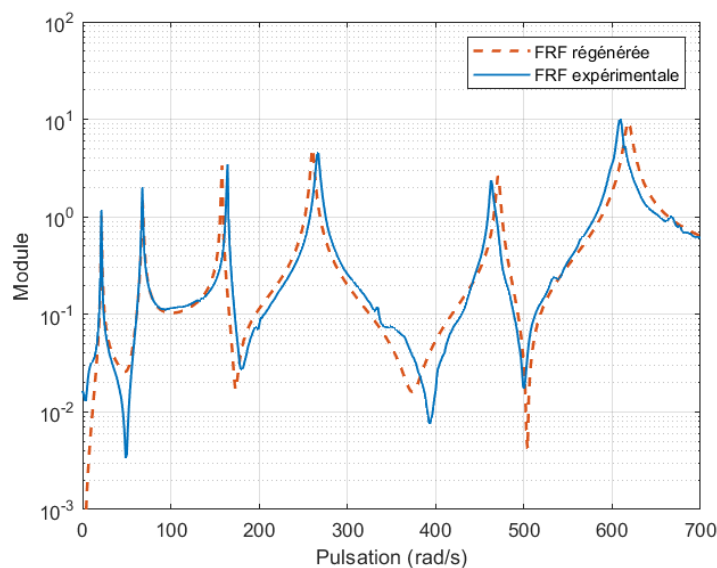


FIGURE 8 – Comparaison du spectre expérimental du module de réceptance selon  $\gamma$  pour l'accéléromètre 9 en membrure haute et du spectre régénéré à partir des paramètres modaux extraits par la méthode « line-fit ».

## 4 Modèle numérique

Un modèle numérique de la poutre a été réalisé sur le logiciel ROBOT [8]. Dans ce modèle, les membrures, les montants et les diagonales de la poutre treillis sont modélisés avec des éléments finis de poutre 1-D. Les goussets à l'extrémité de la poutre et au niveau des appuis sont modélisés avec des éléments surfaciques. Les assemblages rivetés sont modélisés par des conditions sur les 3 degrés de liberté de rotation au niveau de l'intersection entre les barres de treillis et les membrures. Dans cette étude, les assemblages sont modélisés comme rotulés dans le plan du treillis et le degré de liberté en torsion est également libre. Le paramètre que l'on fait varier concerne la rotation hors du plan du treillis : l'assemblage est modélisé par un ressort rotationnel dont la valeur varie entre 0 (assemblage rotulé) et  $\infty$  (assemblage encasté). Le matériau de la poutre a été modélisé avec un module d'Young  $E = 210$  GPa et un poids volumique  $\rho = 78$  kN/m<sup>3</sup>. Le poids des rivets, qui ne sont pas modélisés directement, a été estimé à 2,5% du poids de la poutre et a donc été négligé.

Seuls les modes de vibration hors-plan sont étudiés. Les déformées modales pour les 6 premiers modes hors-plan, lorsque les assemblages sont modélisés comme encastés (modèle « encasté »), sont représentées sur la Fig. 9. Lorsque les assemblages sont modélisés comme rotulés (modèle « rotulé »), les 4 premiers modes présentent des fréquences et des déformées modales similaires aux modes du modèle « encasté ». Des divergences apparaissent néanmoins dès le cinquième mode, avec l'apparition de modes dominés par les déformations des montants ou diagonales. Deux exemples en sont donnés sur la Fig. 10.

## 5 Résultats

Les déformées modales des 6 premiers modes hors-plan obtenues expérimentalement pour les membrures haute et basse ont été comparées avec les déformées modales obtenues numériquement avec

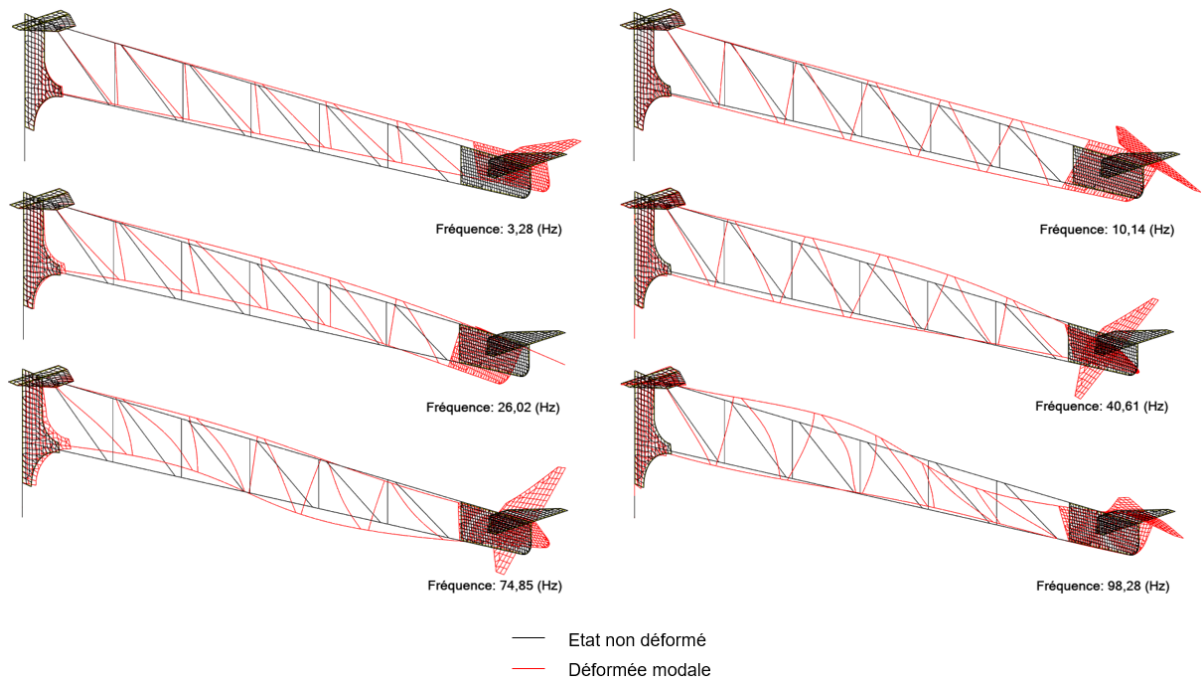


FIGURE 9 – Déformées modales des 6 premiers modes hors-plan obtenues avec le modèle « encastré ».

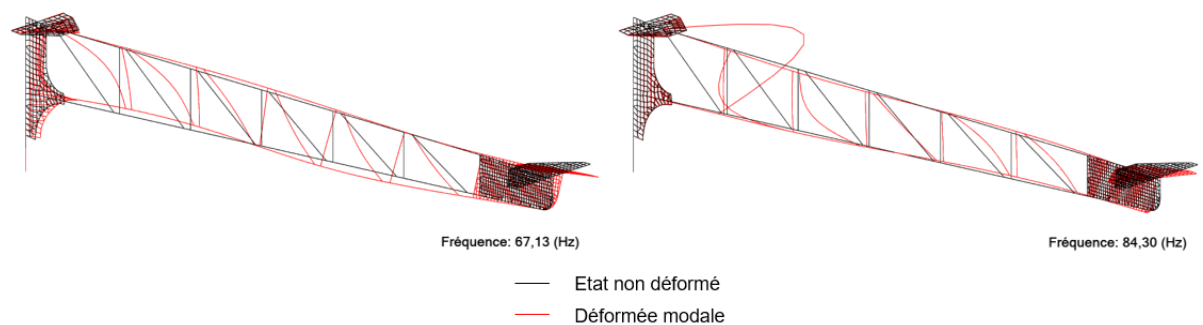


FIGURE 10 – Déformées modales de deux modes hors-plan dominés par des déformations de montants ou diagonales, obtenus avec le modèle « rotulé ».

ROBOT dans le modèle « encastré » (Fig. 11). Les déformées modales numériques ont été normalisées à 1 puis les déformées expérimentales, mesurées séparément pour les membrures haute et basse, ont été normalisées à l'aide d'une méthode des moindres carrés en s'appuyant sur les déformées numériques. Les fréquences indiquées sont les fréquences moyennes expérimentales.

L'écart entre le modèle numérique et les données expérimentales peut être mesuré grâce à des critères de qualité. Deux critères ont été utilisés dans cette étude. Le premier mesure la différence relative entre les fréquences numériques et expérimentales, le second mesure la différence entre les déformées modales [12] :

$$P_r = \delta f_r = \frac{|f_{r,num} - f_{r,exp}|}{f_{r,exp}} \quad \text{pour } r = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

$$L_r = 1 - MAC_r = 1 - \frac{|\Phi_{r,num}^H \cdot \Phi_{r,exp}|^2}{(\Phi_{r,num}^H \cdot \Phi_{r,num}) \cdot (\Phi_{r,exp}^H \cdot \Phi_{r,exp})} \quad \text{pour } r = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

Où  $f_r$  et  $\Phi_r$  sont respectivement la fréquence du mode  $r$  et le vecteur propre contenant les déformées modales normalisées dans le mode  $r$  pour les degrés de liberté étudiés,  $MAC_r$  est la somme des élé-

ments diagonaux de la classique matrice MAC « Modal Assurance Criterion » [7] et les indices  $num$  et  $exp$  désignent les paramètres obtenus numériquement et expérimentalement.  $P_r$  et  $L_r$  varient entre 0 et 1. Plus ces critères sont proches de 0, plus l'accord entre modèle numérique et données expérimentales est bon. A titre indicatif, l'accord peut être considéré satisfaisant entre un mode numérique et un mode expérimental si le terme correspondant du MAC est supérieur à 90% [7], c'est-à-dire si  $L_r$  est inférieur à 10%. L'évaluation de ces critères pour les 6 premiers modes repérés expérimentalement, en les comparant aux modes correspondants dans les modèles numériques « encastré » et « rotulé » est présentée dans le Tab. 2 et la Fig. 12.

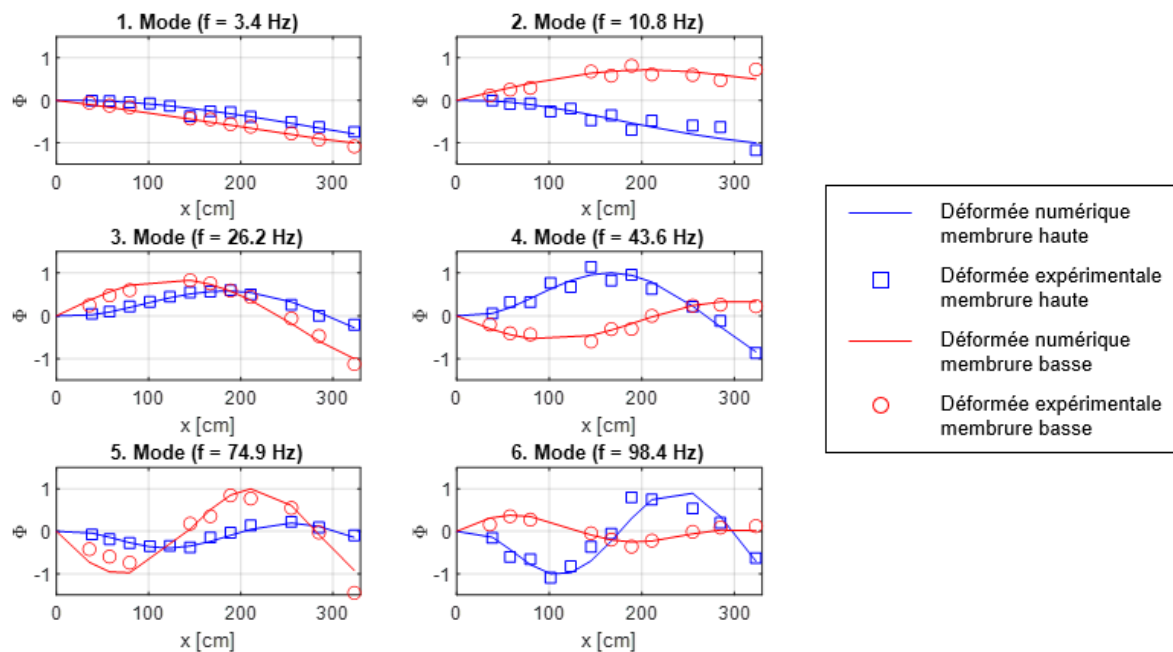


FIGURE 11 – Comparaison des déformées modales selon  $y$  des membrures haute et basse pour les 6 premiers modes hors-plan, obtenues expérimentalement et numériquement avec le modèle ROBOT avec des assemblages encastrés.

Mode $r$	$f_{r,exp}$ [Hz]	$f_{r,num}^{enc}$ [Hz]	$f_{r,num}^{rot}$ [Hz]	$P_r^{enc}$	$P_r^{rot}$	$L_r^{enc}$	$L_r^{rot}$
1. mode	3.43	3.28	3.13	4.4 %	8.8 %	1.2 %	1.3 %
2. mode	10.83	10.14	9.82	6.3 %	9.3 %	5.3 %	5.3 %
3. mode	26.20	26.02	24.93	0.7 %	4.9 %	1.8 %	2.3 %
4. mode	43.63	40.61	38.56	6.9 %	11.6 %	3.7 %	3.4 %
			67.13				
			69.76				
5. mode	74.93	74.85	72.21	0.1 %	3.6 %	11.0 %	10.6 %
			84.3				
			91.14				
			92				
6. mode	98.38	98.28	99.49	0.1 %	-	11.6 %	-

TABLE 2 – Critères de qualité obtenus pour la comparaison des données expérimentales avec le modèle numérique à assemblages encastrés et le modèle numérique à assemblages rotulés.

Pour les modes apparentés, les fréquences numériques obtenues avec le modèle « rotulé » sont inférieures

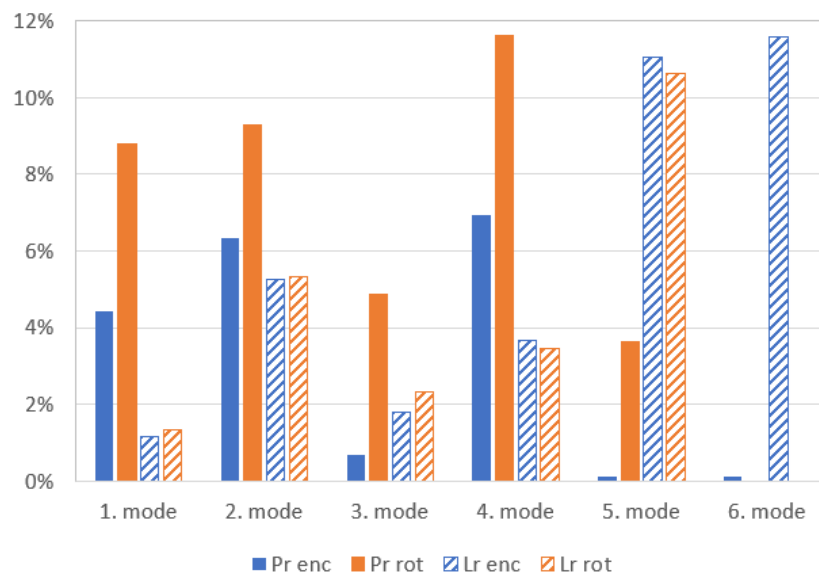


FIGURE 12 – Représentation graphique des critères de qualité pour les 6 premiers modes.

aux fréquences obtenues avec le modèle « encastré » et sont globalement en moins bon accord avec les données expérimentales. Par ailleurs, le modèle numérique « rotulé » présente des modes intermédiaires qui n'ont pas été repérés expérimentalement. Enfin, le 6<sup>ème</sup> mode expérimental ne se retrouve pas dans le modèle numérique « rotulé ». Ces premiers résultats semblent indiquer que le modèle numérique représentant les assemblages rivetés comme encastrés est plus proche de la réalité que le modèle avec les assemblages rotulés.

## 6 Conclusions et perspectives

L'analyse modale expérimentale présentée dans cet article a permis de construire un modèle numérique d'une poutre treillis rivetée avec des éléments finis de poutre 1-D en bon accord avec les données expérimentales concernant les premiers modes de vibration. Les essais préliminaires suggèrent que la représentation des assemblages rivetés comme encastrés est plus proche de la réalité que la représentation de ces assemblages comme rotulés. Plusieurs tâches restent néanmoins à réaliser pour confirmer cette hypothèse :

- Les modes ont été comparés à l'aide des fréquences et des déformées modales des membrures, mesurées séparément. Des configurations d'essai seront testées avec des capteurs de référence permettant d'évaluer l'amplitude des déformées modales de la membrure haute et basse l'une par rapport à l'autre.
- Il semble nécessaire d'identifier expérimentalement les modes locaux, dominés par la déformation de montants ou diagonales, de plus haute fréquence. Pour cela, des configurations d'essai seront testées avec des capteurs concentrés sur les montants et diagonales, et un marteau avec une bande passante plus large.
- Pour l'extraction des paramètres modaux, la méthode RFP, qui s'appuie sur les polynômes à fraction rationnelle [13] et traite simultanément tous les modes se trouvant dans une certaine bande de fréquence, sera également explorée.
- Un autre modèle numérique est en cours de réalisation : un modèle 3D Shell sur le logiciel MARC [14]. Ce modèle permet d'aborder la modélisation des assemblages rivetés d'une autre manière

que le modèle ROBOT. Dans le modèle 3D Shell, les barres de treillis sont modélisées avec des éléments de surface, comportant des trous au niveau des rivets. La modélisation des assemblages rivetés correspond alors à des couplages entre les noeuds des trous qui se trouvent en regard, ou à des conditions de contact autour de ces trous. La raideur rotationnelle de l'assemblage riveté n'est de cette façon pas une donnée d'entrée dans le modèle, elle résulte plutôt des conditions aux limites. Le modèle 3D Shell pourra permettre de comprendre les facteurs influençant la raideur rotationnelle « résultante » des assemblages rivetés.

La suite de l'étude permettra ainsi de caractériser la raideur rotationnelle des assemblages mono-rivet caractéristiques des poutres treillis dans les charpentes métalliques anciennes.

## Remerciements

La recherche présentée dans cet article est financée dans le cadre d'une thèse CIFRE par SNCF / AREP et l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

## Références

- [1] M. D'Aniello, F. Portioli, L. Fiorino, R. Landolfo, Experimental investigation on shear behaviour of riveted connections in steel structures, *Engineering Structures* 33 (2) (2011) 516–531.
- [2] Q. Collette, Riveted Connections in Historical Metal Structures (1840-1940). Hot-driven Rivets : Technology, Design and Experiments., Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel (2014).
- [3] L. Gallegos Mayorga, S. Sire, M. Ragueneau, B. Plu, Understanding the behaviour of wrought-iron riveted assemblies : manufacture and testing in France, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering History and Heritage* 170 (2) (2017) 67–79.
- [4] O. Minor, P. Ryjáček, Rotational Stiffness of Connections in a Historical Steel Railway Bridge, in : *Structural Analysis of Historical Constructions*, Springer, Cham, 2019, pp. 1082–1089.
- [5] B. M. Imam, T. D. Righiniotis, M. K. Chryssanthopoulos, Numerical modelling of riveted railway bridge connections for fatigue evaluation, *Engineering Structures* 29 (11) (2007) 3071–3081.
- [6] M. Al-Emrani, R. Kliger, FE analysis of stringer-to-floor-beam connections in riveted railway bridges, *Journal of Constructional Steel Research* 59 (7) (2003) 803–818.
- [7] D. J. Ewins, *Modal testing : theory, practice, and application*, 2nd Edition, Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England ; Philadelphia, PA, 2000.
- [8] Autodesk - Robot Structural Analysis [consulté 2021-05-10].  
<https://www.autodesk.fr/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR>
- [9] A-Corros Expertise, Gare de l'Est, Paris - Caractérisation de l'acier constituant la charpente de la couverture du quai transversal, Rapport technique, littérature grise (2016).
- [10] HBM - catman [consulté 2022-04-04].  
[https://www.hbm.com/fr/2290/catman-logiciel-acquisition-de-donnees/?product\\_type\\_no=Logiciel%20DAQ](https://www.hbm.com/fr/2290/catman-logiciel-acquisition-de-donnees/?product_type_no=Logiciel%20DAQ)
- [11] C. Hondermarck, Analyse vibratoire des câbles tendus - détermination des paramètres mécaniques de fonctionnement : tension, endommagement..., Rapport technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, stage de fin d'études (2007).

- [12] K. Szopa, M. Iwaniec, J. Iwaniec, Modelling and identification of bolted truss structure with the use of design of experiment approach, *Structures* 27 (2020) 462–473.
- [13] M. H. Richardson, D. L. Formenti, Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials, in : *Proceedings of the 1st international modal analysis conference*, Vol. 1, Union College Schenectady, NY, 1982, pp. 167–186.
- [14] MSC Software - Marc [consulté 2021-05-10].  
<https://www.mscsoftware.com/fr/product/marc>