



HAL
open science

Etude expérimentale de l'impact d'une liaison boulonnée sur le comportement dynamique d'une structure

François Louf, Sami Daouk, Christophe Cluzel, Olivier Dorival, Laurent
Champaney, Sylvie Audebert

► To cite this version:

François Louf, Sami Daouk, Christophe Cluzel, Olivier Dorival, Laurent Champaney, et al.. Etude expérimentale de l'impact d'une liaison boulonnée sur le comportement dynamique d'une structure. 12e Colloque National en Calcul de Structures, May 2015, Giens, France. hal-01183167

HAL Id: hal-01183167

<https://hal.science/hal-01183167>

Submitted on 6 Aug 2015

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.

Etude expérimentale de l'impact d'une liaison boulonnée sur le comportement dynamique d'une structure

F. Louf¹, S. Daouk¹, C. Cluzel^{1,2}, O. Dorival³, L. Champaney¹, S. Audebert⁴

¹ LMT-Cachan, ENS-Cachan/CNRS, 61 avenue du Président Wilson, 94230 Cachan Cedex, France

² IUT-SGM, rue du Père Jarlan, 91025 Evry, France

³ Université de Toulouse, Institut Clément Ader (ICA); INSA, UPS, Mines Albi, ISAE, 135 avenue de Ranguel, 31077 Toulouse Cedex, France

⁴ EDF Recherche et Développement, Département Analyses Mécaniques et Acoustique, EDF Lab Clamart, 1 avenue du Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex, France

Résumé — L'objectif final de ce travail qui se situe dans le cadre du projet FUI SICODYN est de mettre en évidence les incertitudes sur le comportement dynamique d'une structure (fréquence propres, dissipation) liées à la présence de liaisons boulonnées. Un montage académique permettant de maîtriser les chargements au sein d'une liaison boulonnée a été conçu et les premiers essais réalisés permettent notamment de mettre en évidence la dépendance de la fréquence de résonance et de la dissipation au niveau de chargement dans la liaison.

Mots clés — vibrations, assemblage boulonné, dissipation, incertitudes.

1 Contexte de l'étude présentée

Le travail présenté se place dans le contexte du projet FUI 2012-2015 SICODYN, piloté par EDF R&D, dont l'objectif est la quantification des variabilités et des incertitudes sur le comportement dynamique des structures, à la fois sous l'aspect expérimental et sous l'aspect numérique [1], [2]. Le but ultime du projet est d'obtenir une boîte à outils et des méthodologies de calcul permettant de donner aux bureaux d'études, soit des intervalles de confiance, soit des coefficients de sécurité adaptés aux simulations mises en œuvre pour réaliser le dimensionnement vibratoire des structures. Dans ce contexte, une partie du travail porte sur la caractérisation des incertitudes liées aux assemblages boulonnés présents dans les structures industrielles. L'objectif principal du travail présenté est de quantifier expérimentalement l'influence des paramètres de la liaison boulonnée sur la réponse dynamique de la structure. Parmi les paramètres importants à considérer, on trouve : le type et le niveau de chargement de la liaison boulonnée, la précharge des boulons, le nombre et la position des boulons effectivement serrés, l'ordre de serrage des boulons. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire de disposer d'une liaison boulonnée dont les conditions de liaison peuvent être facilement modifiées et pour laquelle le type et le niveau de chargement est maîtrisé. Pour satisfaire ces contraintes, une structure assemblée académique a été développée.

2 Conception du montage académique

2.1 Principe de fonctionnement

Pour un faible niveau d'effort dans une liaison boulonnée, la variation des différents paramètres cités en introduction ne causera aucune modification significative de la réponse dynamique de la structure. En revanche, pour de fortes charges, de légers décollements, et surtout des glissements (de l'ordre du μm) au niveau de la liaison sont susceptibles d'apparaître dans les différentes zones de contact entre les deux pièces constituant la bride ainsi qu'entre les boulons et les pièces. Ces effets contribueront à une variation des raideurs et des mouvements relatifs et donc à une variation des fréquences propres et des amortissements modaux. Cependant, solliciter la liaison en dynamique à des niveaux de chargement élevés n'est pas aisé avec un matériel expérimental de taille raisonnable. Une solution proposée est de profiter de l'amplification dynamique et d'exciter la structure sur ses modes propres. Ainsi, à faible niveau de char-

gement, les amplitudes de la réponse pourront être importantes. On propose donc de définir une liaison boulonnée raccordée à deux masses excentrées par des bras élastiques. L'ensemble est considéré en libre-libre. La transformation de l'énergie cinétique des masses en énergie élastique dans les poutres permettra de transmettre les efforts souhaités vers la liaison boulonnée.

2.2 Dimensionnement

Les principaux critères de conception de la structure sont, dans l'ordre d'importance décroissant : (i) le niveau de chargement doit être tel que des glissements et/ou ouvertures de l'ordre de quelques μm puissent apparaître localement, (ii) la structure complète doit rester dans le domaine élastique lorsqu'elle est ainsi fortement chargée, (iii) les premiers modes propres doivent être associés à des fréquences inférieures à 1 kHz. La démarche de dimensionnement est itérative. Pour chaque mode que l'on souhaite étudier (premier mode de flexion pour commencer), une itération comporte les étapes élémentaires suivantes :

- recherche de la forme du mode propre et de la fréquence propre associée en fonction de la géométrie retenue et des masses additionnelles : cette étape est rapide puisqu'un modèle analytique a été réalisé ;
- pour une forme de chargement de la liaison compatible avec la forme du mode étudié (moment, effort tranchant, ...), recherche de l'amplitude du chargement conduisant à des ouvertures et des glissements locaux suffisants ; pour cela, une analyse éléments finis non linéaire (contact, frottement) est menée sur la bride (figure 1) ; la tenue mécanique de la bride et du reste de la structure est également vérifiée à cette étape ;
- pour une excitation à la fréquence de résonance, et pour l'amortissement modal minimal postulé au départ (0.2 %), estimation analytique du lien entre l'amplitude du chargement dans la liaison et l'effort à injecter ; cette étape permet de vérifier que la capacité du pot est suffisante.

Les études ont permis de converger vers la structure présentée sur la figure 2(a).

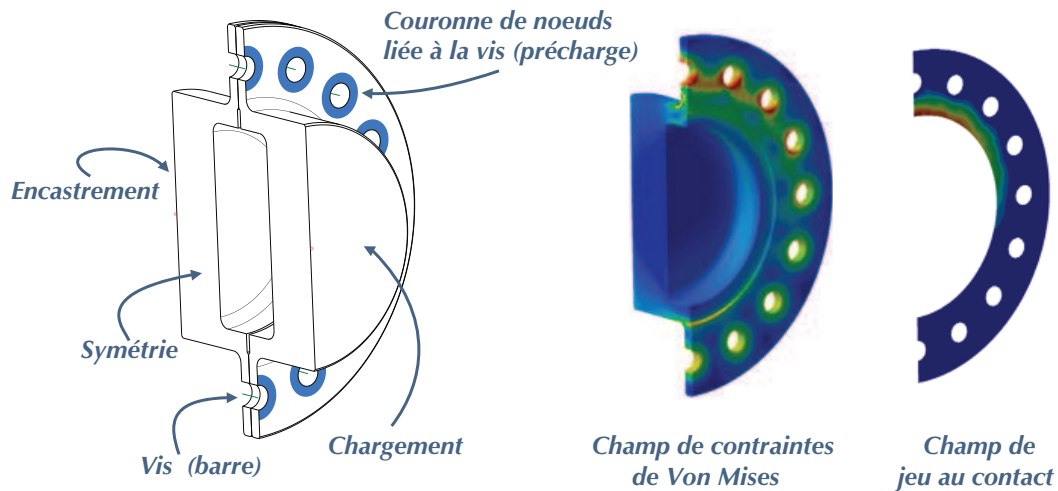


FIGURE 1 – Illustration du modèle fin utilisé pour déterminer les quantités d'intérêts au niveau de la zone de contact entre brides

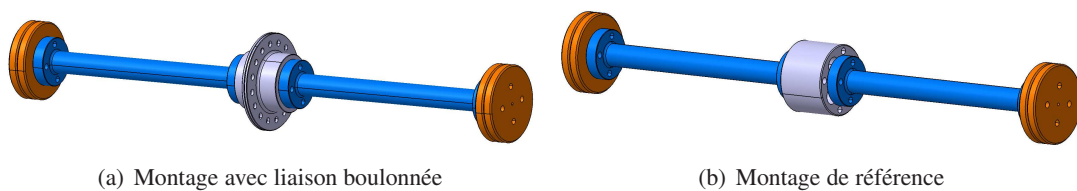


FIGURE 2 – Géométrie finale de la structure à tester

3 Premiers résultats expérimentaux

3.1 Estimation de la dissipation

Une première approche pour caractériser expérimentalement la dissipation inhérente à la présence d'une liaison boulonnée dans une structure peut consister à exploiter les amortissements modaux ζ_i fournis par les logiciels d'analyse modale expérimentale. L'estimation de ces quantités ζ_i peut se faire à l'aide de la méthode de mesure à -3 dB (ou méthode de Ewins). Cela revient à considérer les fréquences $f_{i,1}$ et $f_{i,2}$ à -3 dB du maximum de l'amplitude de la fonction de transfert à la fréquence de résonance f_i . Les fréquences $f_{i,1}$ et $f_{i,2}$ sont également les extrema de la partie réelle de la fonction de transfert autour de la fréquence f_i . Le taux d'amortissement est alors donné par : $\zeta_i = \frac{f_{i,2} - f_{i,1}}{2 f_i}$. Cette mesure suppose que l'amortissement est constant en fonction de l'amplitude des vibrations et n'est précise que pour un faible niveau de charge. En effet, le pilotage expérimental est généralement automatisé et le passage à la fréquence propre étant risqué, le niveau d'effort injecté est abaissé fortement pour ne pas dégrader la structure. Une alternative à cette méthode est la Capacité d'Amortissement Spécifique (Specific Damping Capacity SDC) qui est une mesure de l'amortissement dans les structures pour une déformée donnée (par exemple une déformée modale) [3]. Elle est exprimée en fonction de l'énergie dissipée par cycle et de l'énergie élastique (ou stockée) par cycle : $\psi = W_d/W_e$. L'énergie dissipée W_d est calculée en sommant la puissance injectée sur une période dans la structure :

$$W_d = \int_0^T \vec{F} \cdot \vec{v} dt = \int_0^T \vec{F} \cdot \vec{d}u .$$

L'effort \vec{F} est connu via un capteur d'effort présent sur la tige de l'excitateur. Un accéléromètre disposé au droit de l'excitateur permet par intégration d'obtenir la vitesse recherchée \vec{v} . L'énergie élastique W_e est calculée sur les 2 poutres élastiques via la mesure du moment de flexion en deux endroits d'une poutre au moyen de deux ponts de jauges. La répartition du moment fléchissant étant linéaire sur les poutres, si l'on néglige les effets d'inertie sur les poutres elles-mêmes, on en déduit son expression sur chaque poutre, puis l'énergie de déformation associée. Avec cette méthode, on ne fait aucune hypothèse sur la variation de l'amortissement en fonction de l'amplitude des vibrations. Cette mesure permet alors de caractériser avec précision l'amortissement de chaque mode pour un niveau quelconque de chargement dans la liaison. Il peut être relié au taux d'amortissement modal via la relation : $\psi = 4\pi \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$.

3.2 Premiers résultats

Des premiers essais ont été effectués sur la structure composée d'une pièce centrale rigide (figure 2(b)). Cette première étude permet tout d'abord de valider le dimensionnement effectué en vérifiant que les modes propres et fréquences propres obtenus sont cohérents avec les calculs menés. Elle permet ensuite d'estimer l'énergie dissipée dans la structure du fait de la présence de liaisons boulonnées autres que la liaison devant être caractérisée. Ainsi, par analyse différentielle, il sera possible d'estimer l'énergie dissipée dans la liaison boulonnée à caractériser. La figure 3(a) montre l'évolution de la fréquence de résonance du premier mode en fonction du moment dans la partie centrale. On constate que cette fréquence diminue légèrement du fait de légers décollements qui peuvent apparaître sous fort chargement. La figure 3(c) montre l'évolution de la capacité d'amortissement spécifique et de l'amortissement modal donnés par le logiciel en fonction du niveau de chargement. On constate que la dissipation associée à ce montage de référence est faible quel que soit le niveau de charge. Par ailleurs, on constate toutefois que l'énergie dissipée augmente sensiblement avec le niveau de chargement.

Une série d'essais a également été réalisée sur la liaison boulonnée composée de 16 boulons M12 uniformément serrés à 70 N.m. Cette fois, la figure 3(d) met en évidence une plus forte dépendance de la dissipation au niveau de chargement. De même, la figure 3(b) montre que la variation de la fréquence de résonance est déjà plus importante que celle constatée dans le montage de référence du fait de la présence de liaisons supplémentaires. Pour le moment, les SDC données sont celles de l'ensemble (montage + liaison). Pour une référence sur la démarche différentielle, il est possible de se reporter à [4].

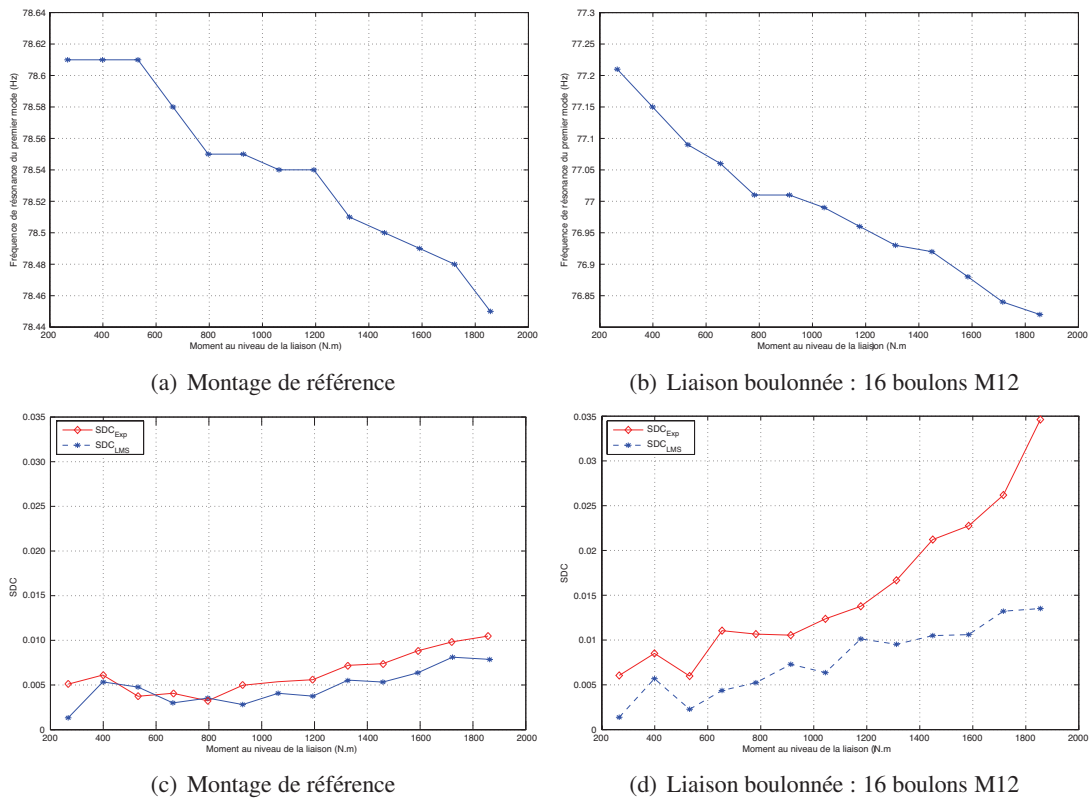


FIGURE 3 – Evolution de la fréquence de résonance du premier mode de flexion et de la capacité d’amortissement spécifique obtenues expérimentalement en fonction du moment dans la partie centrale

4 Conclusion et perspectives

Dans ce travail, nous avons tout d’abord présenté la démarche de dimensionnement d’une structure académique destinée à estimer expérimentalement la dissipation induite par une liaison boulonnée. L’objectif, à terme, est de mettre en évidence les liens entre les paramètres incertains associés à la liaison (précharge notamment) et les caractéristiques dynamiques de l’assemblage (fréquences propres, dissipation). Nous avons montré comment estimer de façon fiable la dissipation induite par la liaison travaillant sur un mode de vibration donné et la démarche a été mise en œuvre sur un montage de référence, sans liaison boulonnée, et donc réputé faiblement dissipant, puis sur un montage présentant une liaison boulonnée. Les résultats obtenus sont encourageants et invitent désormais à tester les multiples configurations imaginées pour la liaison boulonnée : précharge plus faible mais uniforme, précharge localement trop faible, boulon manquant, etc. Ces résultats supplémentaires seront présentés durant la conférence.

Remerciements : ce travail s’insère dans le projet FUI 2012-2015 SICODYN (pour des SIMulations crédibles via la CORRélation calcul-essai et l’estimation d’incertitudes en DYNamique des structures). Les auteurs souhaitent remercier l’aide apportée par le Fond Unique Interministériel.

Références

- [1] S. Audebert, *SICODYN international benchmark on dynamic analysis of structure assemblies : variability and numerical-experimental correlation on an industrial pump*, Mécanique & Industries, 11(6), 439-451, 2010.
- [2] S. Audebert, A. Mikchevitch, I. Zentner, *SICODYN international benchmark on dynamic analysis of structure assemblies : variability and numerical-experimental correlation on an industrial pump (part 2)*, Mechanics & Industry 15, 1-17, 2014.
- [3] J. De Crevoisier, N. Swiergiel, L. Champaney, F. Hild, *Identification of In Situ Frictional Properties of Bolted Assemblies with Digital Image Correlation*, Experimental Mechanics. Vol 52, Num 6, 561-572, 2012.
- [4] P. Rouch, C. Cluzel, O. Guezet, *Meso-model and experimental identification of damping in joint of satellite sandwich panel*, European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Toulouse, France, 15-17 Sept, 2009.