

Une approche interdisciplinaire pour mieux évaluer la performance structurale de charpentes métalliques anciennes (1850-1930)

H. Franz

Université Gustave Eiffel, MAST/SMC

RESUME Evaluer avec précision la performance structurale de structures existantes, *a fortiori* anciennes, est un défi majeur. Le cadre normatif actuel commence à énoncer des principes permettant de considérer ces structures différemment de structures neuves. Les halles de gare à charpente métallique construites entre 1850 et 1930 constituent un patrimoine constructif et architectural dont l'évaluation structurale à des fins de réhabilitation pose de nombreux verrous techniques. La thèse décrite dans cet article explore comment se déclinent les principes proposés par la norme expérimentale XP CEN/TS 17440 dans le cas de l'étude des poutres treillis rivetées largement constitutives des halles de gare. L'article détaille l'approche interdisciplinaire de la thèse, entre ingénierie et histoire, visant à lever des incertitudes sur la détermination des propriétés des matériaux, la mise en œuvre de modèles d'analyse structurale, le choix de règles de vérification et l'élaboration d'options d'intervention structurale. Au-delà de l'application aux charpentes métalliques anciennes, cette démarche cherche à contribuer à l'amélioration des pratiques de rénovation et de réemploi.

Mots-clefs halles de gare ; poutres treillis rivetées ; histoire de la construction ; analyse structurale ; flambement ; analyse modale expérimentale

I. INTRODUCTION

La France dispose d'un large patrimoine de constructions métalliques du 19^{ème} et début du 20^{ème} siècle (Lemoine, 1986). Afin d'être préservées ou de répondre aux usages actuels, ces constructions sont entretenues, réparées, ou renforcées, en suivant des critères patrimoniaux, économiques et écologiques. La réévaluation de leur capacité portante selon nos méthodes actuelles est une étape souvent nécessaire pour garantir sécurité et durabilité. Or, les structures métalliques anciennes ont été conçues avec des méthodes différentes des nôtres aujourd'hui. Les normes actuelles, notamment les Eurocodes, sont principalement orientées vers le calcul de structures neuves. La formation des ingénieurs en génie civil est également davantage tournée vers la conception du neuf que la rénovation de l'existant. L'ambition de la thèse qui fait l'objet de cet article est ainsi de contribuer à améliorer la connaissance du comportement de structures métalliques anciennes, et à favoriser la mise en œuvre de méthodes adaptées de dimensionnement, puis éventuellement de renforcement, lors de projets de rénovation ou de réemploi.

Pour porter cette ambition, la thèse recourt à l'interdisciplinarité entre sciences de l'histoire et sciences de l'ingénierie. Cette complémentarité est particulièrement essentielle à la préservation du patrimoine industriel, à forte composante technique (Gasnier, 2019). La norme expérimentale XP CEN/TS 17440 (AFNOR, 2020), destinée à compléter les Eurocodes concernant l'évaluation et la rénovation des structures existantes, encourage la prise en compte simultanée des performances structurales et de la valeur patrimoniale. Cet article propose des pistes permettant d'appliquer l'approche conceptuelle proposée par ce cadre réglementaire émergent à des objets d'étude concrets. Dans une première partie, le choix des objets d'études est détaillé. Il s'agit des poutres treillis rivetées dans les halles de gare à charpente métallique construites de la moitié du 19^{ème} siècle au début du 20^{ème} siècle. Dans une deuxième partie, en suivant la structure de la norme XP CEN/TS 17440, l'article identifie des verrous scientifiques et techniques qui font l'objet de travaux pendant la thèse et met en avant des voies de résolution interdisciplinaires.

II. OBJETS D'ETUDE

Les objets de l'étude ont été choisis de manière à appartenir à des familles suffisamment restreintes, pour une analyse approfondie, tout en étant suffisamment représentatifs des constructions métalliques anciennes, pour une applicabilité élargie des résultats. Ils ont par ailleurs été sélectionnés en identifiant des verrous scientifiques concernant la compréhension de leur comportement structural, et en considérant l'impact d'un accroissement de connaissances sur la pratique de rénovation. Le choix s'est effectué à trois échelles.

Un type de construction a d'abord été retenu : les halles de gare historiques à charpente métallique (Figure 1(a)). Au-delà de leur fonctionnalité, couvrir des quais de voies ferrées, ces halles jouaient au 19^{ème} siècle un rôle représentatif pour les compagnies de chemins de fer et disposaient donc de structures à la pointe de la technique. Aujourd'hui, environ 90 halles de gare construites entre 1850 et 1930 ont été préservées. Elles constituent un corpus d'étude intéressant du point de vue patrimonial, avec une littérature fournie (Kanai, 2005; Meeks, 1956) et des archives centralisées par la SNCF au Mans. Concernant les pratiques de rénovation actuelles, la thèse s'appuie sur les données récentes mises à disposition par son partenaire industriel AREP dans le cadre d'une convention CIFRE. AREP, filiale de SNCF Gares & Connexions, fait en effet régulièrement partie de la maîtrise d'œuvre pour la rénovation de halles de gare (Emile & Veston, 2020).

Un type d'élément structural a ensuite été sélectionné : les poutres treillis rivetées en fer puddlé ou acier doux, réalisées au moyen de plats et de cornières solidarités par des assemblages mono-rivets (Figure 1(b)). Ces poutres servent souvent de pannes ou d'arbalétriers dans les charpentes métalliques de toitures de bâtiments, notamment les halles de gare. Elles sont récurrentes dans le langage architectural des structures métalliques anciennes car elles offraient de la flexibilité aux concepteurs et contribuaient à l'aspect de légèreté. Le dimensionnement des poutres treillis est abondamment traité dans les manuels de construction et publications scientifiques du 19^{ème} siècle (Collignon, 1869) et a également attiré, plus tard, l'attention de l'histoire des techniques (Rinke & Kotnik, 2010). Dans les rénovations de halles de gare des vingt dernières années, les pannes et arbalétriers en treillis ont régulièrement fait l'objet de renforts

découlant de problèmes de stabilité identifiés grâce à des modèles aux éléments finis. Dans la réalité, des déformations excessives sont pourtant rarement observées lors des inspections visuelles programmées par la SNCF. Les poutres treillis rivetées sont ainsi un bon support pour questionner les approches de dimensionnement actuelles en regard des méthodes historiques.

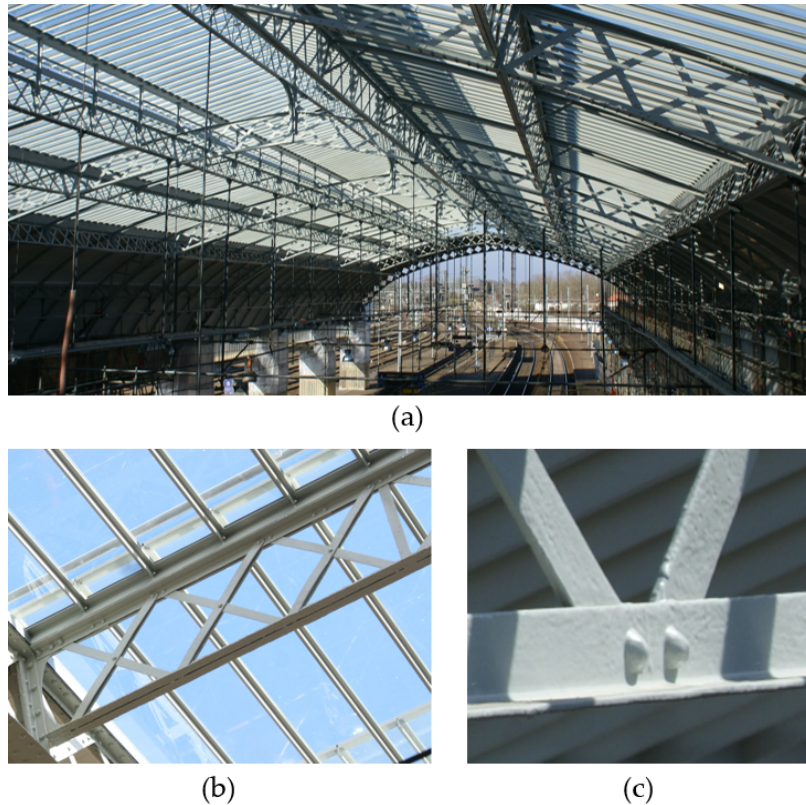


FIGURE 1. Objets d'étude déclinés à 3 échelles, à l'exemple de la Gare de Montauban : (a) la halle de gare ; (b) la poutre treillis ; (c) l'assemblage mono-rivet. Photos : SNCF-AREP.

Enfin, un détail constructif est au cœur de la thèse : l'assemblage mono-rivet entre les membrures et les diagonales des poutres treillis (Figure 1(c)). Le rivetage à chaud a été la méthode d'assemblage par excellence en construction métallique des années 1840 à la moitié du 20^{ème} siècle, quand les soudures se sont généralisées (Collette, 2014). La variété des assemblages rivetés est infinie. Les assemblages mono-rivets sont pertinents à étudier du fait de leur récurrence et de leur élémentarité. La caractéristique d'intérêt pour la thèse est leur raideur rotationnelle. En effet, l'évaluation du risque de flambement des diagonales ou des membrures de poutres treillis dépend fortement des hypothèses de modélisation retenues concernant la raideur des assemblages rivetés (Figure 2). Des études expérimentales récentes ont caractérisé la résistance d'assemblages rivetés, sans s'intéresser à leur raideur (D'Aniello et al., 2011). Des études numériques ont quant à elles porté sur la raideur de certaines typologies d'assemblages rivetés complexes (Minor & Ryjáček, 2019). Il n'existe cependant pas de caractérisation expérimentale de la raideur rotationnelle d'assemblages rivetés, à commencer par les assemblages mono-rivets.

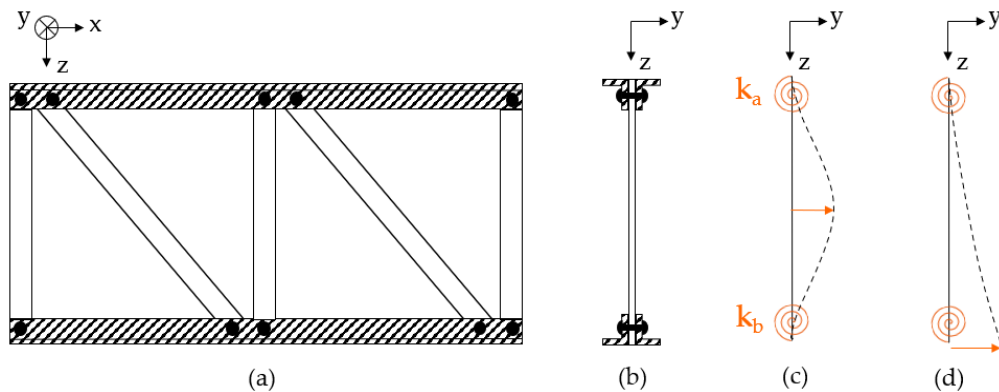


FIGURE 2. Schéma d'une poutre treillis avec des assemblages mono-rivets, vue (a) en élévation et (b) en coupe. Schéma des raideurs rotationnelles étudiées, avec leur influence sur le flambement (c) des diagonales ou (d) d'une membrure.

III. APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE STRUCTURALE ET L'ÉLABORATION D'INTERVENTIONS

Afin d'évaluer la performance structurale d'une structure existante par le calcul, la norme XP CEN/TS 17440 articule ses recommandations autour de trois éléments : la détermination des « variables de base », dont les propriétés des matériaux, les méthodes de modélisation, et les règles de vérification. La norme souligne ensuite que les options d'intervention émanent des résultats de l'évaluation. Dans le cas des objets d'étude choisis, les poutres treillis rivetées dans les halles de gare anciennes, il s'agit concrètement d'évaluer le risque de flambement, qui est le mode de ruine le plus souvent numériquement prédominant, et d'arbitrer quels sont les renforts les plus adaptés, si nécessaires.

A. Propriétés des matériaux

Un des paramètres importants à définir concernant le matériau en présence dans une charpente métallique ancienne, fonte, fer puddlé ou acier doux, est la limite d'élasticité, car c'est sur ce paramètre que reposent les critères de résistance de l'Eurocode 3 (AFNOR, 2005) pour vérifier les sections et les instabilités de barres. L'étude des projets de rénovation récents de halles de gare, menés par la SNCF, montre que le choix de ce paramètre s'appuie sur deux types de source : un diagnostic des matériaux ou une note de calcul historique de la charpente concernée. Le diagnostic des matériaux fournit des données d'échantillonnage de la structure qui doivent être confrontées, pour être pertinentes, à des paramètres statistiques déterminés à partir d'une « population de structures comparables » (XP CEN/TS 17740 §7.1(5)). L'interdisciplinarité peut ici intervenir : des recherches historiques et patrimoniales sont utiles pour situer la charpente métallique à évaluer dans un contexte technique et dans une famille de structures. La thèse s'est donc attachée à caractériser les spécificités structurales des halles de gare, en décrivant les typologies des fermes, qui sont les éléments structuraux principaux, mais aussi les typologies des pannes et arbalétriers rivetés, qui sont des éléments secondaires. L'étude s'est appuyée sur une revue étendue de plans et de photographies. Les résultats de diagnostics de matériaux sur une vingtaine de halles de gare ont par ailleurs été recensés et confrontés à la littérature.

Afin de déterminer la limite d'élasticité, les ingénieurs cherchent parfois à utiliser les notes de calcul historiques d'origine de la charpente à étudier, qui affichent des valeurs de « contrainte limite ». Il semble en effet pertinent, notamment en amont d'un échantillonnage de la structure, d'exploiter les « informations préalables disponibles » (XP CEN/TS 17740 §7.1(2)). Là encore, l'histoire des techniques est utile pour contextualiser ces informations et encadrer leur utilisation. La thèse a mené une recherche approfondie sur le concept de contraintes limites employé pour le dimensionnement de constructions métalliques au 19^{ème} siècle (Franz, Rinke, et al., 2022). Il a été mis en évidence qu'une valeur de contrainte limite dans une note de calcul historique peut indiquer à l'ingénieur d'aujourd'hui si la structure a été conçue avec plus ou moins d'audace, mais ne peut pas servir à définir une valeur caractéristique de limite d'élasticité pour des calculs selon l'Eurocode 3.

B. Modélisation : conditions aux limites

L'étude de projets de rénovation récents de halles de gare a révélé des incertitudes concernant la modélisation des assemblages rivetés dans les poutres treillis. Dans la pratique des ingénieurs, les poutres treillis sont représentées par des modèles privilégiant des éléments finis de poutre 1-D. Les assemblages sont modélisés par des degrés de liberté à l'intersection entre les membrures et les diagonales. Concernant la raideur rotationnelle, les assemblages rivetés sont souvent représentés encastres dans le plan du treillis et rotulés hors plan. La « liberté de mouvement dans les joints » fait partie des hypothèses importantes à confirmer pour la modélisation de structures existantes (XP CEN/TS 17740 §8.1(3)). Des recherches historiques ont été menées au début de la thèse sur les méthodes de dimensionnement des poutres treillis au 19^{ème} siècle. L'analyse structurale reposait tantôt sur la théorie des poutres treillis, supposant des assemblages rotulés dans le plan, tantôt sur une considération de poutre évidée, correspondant plutôt à l'inverse. Comme le risque de flambement n'était pas vérifié par le calcul pour les poutres treillis (Franz, Rinke, et al., 2022), la raideur rotationnelle hors plan des assemblages n'était pas un sujet. La thèse fait donc intervenir la mécanique expérimentale pour évaluer la raideur rotationnelle hors plan des assemblages rivetés.

Plusieurs poutres treillis rivetées ont été récupérées d'un chantier de démolition. Des essais vibratoires ont été réalisés en laboratoire sur l'une des poutres pour déterminer des valeurs de raideur rotationnelle pour les assemblages, par analyse modale expérimentale. La poutre a été instrumentée avec 12 accéléromètres, répartis selon plusieurs dispositions, et excitée avec des impulsions au marteau (Figure 3). Les paramètres modaux ont été extraits avec la méthode line-fit (Ewins, 2000). La comparaison des résultats expérimentaux avec un modèle à éléments finis de poutre 1-D réalisé sur le logiciel ROBOT d'Autodesk suggère que la représentation des assemblages rivetés comme encastres est plus proche de la réalité que la représentation de ces assemblages comme rotulés (Franz, Lepretre, et al., 2022). Les résultats doivent encore être confrontés à un modèle 3D Shell réalisé sur le logiciel MARC de MSC Software, dans lequel la modélisation des assemblages correspond à des conditions de couplage ou de contact. L'étude de la méthode vibratoire vise d'abord à caractériser la raideur des assemblages rivetés, en fonction de leur géométrie et de la force de serrage. Mais cette méthode pourrait également être mise en œuvre sur site, sur une poutre treillis à étudier, pour compléter les informations disponibles sur la structure (comme suggéré par XP CEN/TS 17740 §8.4).



FIGURE 3. Poutre treillis instrumentée avec 12 accéléromètres pour les essais vibratoires.

C. Vérifications structurales

La vérification du flambement est déterminante pour évaluer la performance structurale de poutres treillis rivetées. Le flambement est un mode de ruine majeur pour les constructions métalliques en général. Dans le cas des structures métalliques anciennes, il est d'autant plus important d'évaluer correctement aujourd'hui le risque de flambement, que le flambement n'était au 19^{ème} siècle pas vérifié par le calcul pour des éléments autres que les colonnes. Une revue photographique des poutres treillis rivetées dans les halles de gare a montré que la prévention du flambement avait fait l'objet uniquement de mesures constructives (Franz, Rinke, et al., 2022).

Dans la pratique actuelle des ingénieurs, la vérification du flambement d'une poutre treillis se fait classiquement en évaluant individuellement la résistance des barres de treillis aux instabilités selon l'Eurocode 3 (NF EN 1993-1-1 §6.3). Pour le flambement hors plan, la longueur de flambement des diagonales est prise égale à la longueur d'épure et la longueur de flambement des membrures à la longueur entre appuis. La littérature propose cependant des pistes pour tenir compte de la raideur des assemblages (Lee, 2013) et du maintien apporté par le treillis aux membrures (Wen & Yue, 2020). Par des études de cas numériques, la thèse explore les marges de manœuvre possibles au sein du cadre normatif imposé par l'Eurocode 3, pour réaliser une vérification selon la méthode des coefficients partiels (XP CEN/TS 17740 §9.3). Il s'agit par exemple, en faisant varier la raideur rotationnelle des assemblages, de déterminer les longueurs de flambement grâce à des modes globaux d'instabilité de l'ossature ou d'effectuer une analyse au second ordre.

D. Interventions

L'étude de projets de rénovation récents de halles de gare, dans lesquels des poutres treillis rivetées ont fait l'objet de renforts, a mis en évidence que le choix de la méthode de renfort semble davantage lié au savoir-faire de l'entreprise de construction qu'aux spécificités de la structure. Un inventaire photographique a permis de classer les types de renforts couramment mis en œuvre : ils consistent soit en l'ajout d'éléments à la structure pour fournir plus de maintien, soit en une augmentation de section des barres de treillis. L'efficacité structurale des différents types de renforts doit être étudiée dans la thèse, via des modèles numériques. La thèse s'intéresse également à une autre considération importante dans l'élaboration des interventions structurales, à savoir l'acceptabilité d'un point de vue patrimonial (XP CEN/TS 17740 §D.8). Elle est liée à des

critères simples, tels que la discrétion et la réversibilité des interventions, et plus complexes, comme la préservation de l'authenticité. Une étude des spécificités et des évolutions structurales des halles de gare anciennes au gré des rénovations entreprises à partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle a ainsi été réalisée pour proposer une réflexion sur ce qui fait l'authenticité de ces structures.

IV. CONCLUSION

La publication récente, en 2020, de la norme expérimentale XP CEN/TS 17740 concernant l'évaluation et la rénovation des structures existantes souligne que le cadre normatif en vigueur, incarné par les Eurocodes, fait défaut sur cette thématique. Les incertitudes auxquelles sont confrontés les ingénieurs dans leur pratique de la rénovation questionnent la pertinence des interventions structurales. La thèse valorisée dans cet article montre comment la mobilisation interdisciplinaire de l'ingénierie et de l'histoire peut lever des verrous techniques liés aux différents points d'attention soulignés par la norme expérimentale.

Les poutres treillis rivetées dans les halles de gare construites entre 1850 et 1930 sont des objets d'étude de choix. La thèse met en évidence que l'étude de leur valeur patrimoniale ainsi que leur contextualisation dans l'histoire des techniques peuvent être mises à profit pour l'évaluation de leur performance structurale. Là où des incertitudes existent, concernant les propriétés des matériaux ou sur les méthodes de renfort les plus adaptées, l'histoire offre une prise de recul qui permet une capitalisation des connaissances. Là où l'histoire démontre que la conception d'origine fait défaut, concernant l'évaluation du risque de flambement par exemple, la recherche en mécanique et génie civil peut fournir de nouvelles connaissances, qui permettent d'affiner les méthodes de dimensionnement.

L'interdisciplinarité est ainsi au cœur de la démarche de cette thèse visant à favoriser la préservation de structures métalliques anciennes, et plus largement de structures patrimoniales, que ce soit dans le cadre d'une réhabilitation ou d'un réemploi.

V. REMERCIEMENTS

La recherche présentée dans cet article est financée dans le cadre d'une thèse CIFRE par AREP, filiale de la SNCF, et l'Association Nationale de la Recherche et la Technologie (ANRT). Elle est également soutenue par une bourse d'études de l'association Rails & Histoire.

VI. REFERENCES

AFNOR. (2005). *Calcul des structures en acier. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*. Norme française NF EN 1993-1-1.

AFNOR. (2020). *Evaluation et rénovation des structures existantes*. Norme expérimentale XP CEN/TS 17440.

Collette, Q. (2014). *Riveted Connections in Historical Metal Structures (1840-1940). Hot-driven Rivets: Technology, Design and Experiments*. [PhD thesis]. Vrije Universiteit Brussel.

Collignon, E. (1869). *Cours de mécanique appliquée aux constructions – Résistance des matériaux*. Dunod.

D’Aniello, M., Portioli, F., Fiorino, L., & Landolfo, R. (2011). Experimental investigation on shear behaviour of riveted connections in steel structures. *Engineering Structures*, 33(2), 516-531. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.010>

Emile, A., & Veston, V. (2020). Les « Grandes Halles Voyageurs » : Une architecture durable. *Patrimoine industriel*, 77, 75-83.

Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice, and application* (2nd ed). Research Studies Press.

Franz, H., Lepretre, E., Rinke, M., Chataigner, S., & Dieng, L. (2022). Influence de la raideur des assemblages rivetés d’une poutre treillis sur son comportement vibratoire. *25ème Congrès français de mécanique (CFM 2022)*. <https://hal.science/hal-03768998>

Franz, H., Rinke, M., Lepretre, E., & Dieng, L. (2022). The gap between theory, practice and regulations in design criteria for iron and steel structures in 19th century France: The example of train sheds. In Campbell, WP, J. et al (Éd.), *Timber and Construction: Proceedings of the Ninth Conference of the Construction History Society* (p. 287-300). Construction History Society. <https://hal.science/hal-03767415>

Gasnier, M. (2019). Réflexion épistémologique sur le patrimoine industriel : De la pluridisciplinarité à l’interdisciplinarité. *Revue d’histoire des sciences*, 72(2), 309-347. <https://hal.science/hal-02867726>

Kanai, A. (2005). *Les gares françaises et japonaises, halle et bâtiment principal – Une recherche comparative*. Ecole nationale des Ponts et Chaussées.

Lee, S. (2013). *Effective length K-Factors for flexural buckling strengths of web members in open web steel joists* [Master Thesis]. Bucknell University.

Lemoine, B. (1986). *L’Architecture du Fer : France ; XIX. siècle*. Champ Vallon.

Meeks, C. (1956). *The Railroad Station. An Architectural History*. Yale University Press.

Minor, O., & Ryjáček, P. (2019). Rotational Stiffness of Connections in a Historical Steel Railway Bridge. In R. et al Aguilar (Éd.), *Structural Analysis of Historical Constructions* (Vol. 18, p. 1082-1089). Springer International Publishing.

Rinke, M., & Kotnik, T. (2010). The changing concept of truss design caused by the influence of science. First International Conference on Structures and Architecture, ICSA. https://www.schwartz.arch.ethz.ch/Publikationen/Dokumente/truss_science_rinke.pdf

Wen, Q.-J., & Yue, Z.-X. (2020). Elastic buckling property of the upper chords in aluminum half-through truss bridges. *Structures*, 27, 1919-1929. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.057>