

« Stéthoscope » pour l'auscultation des ponts

Lors de l'évaluation de la sécurité de structures existantes, les modèles de calcul des sollicitations peuvent être validés ou étalonnés à l'aide de mesures sur la structure. Un nouveau système de jauges d'extensométrie permet de réduire considérablement le temps nécessaire pour effectuer de telles mesures. La rapidité de l'installation et de la mesure, quelques minutes, fournit un outil qui est à l'ingénieur ce que le stéthoscope est au médecin. Les possibilités d'applications et les bénéfices du système ont été mis en évidence à travers une application pilote sur le pont de Kirchenfeld à Berne.

A l'image du pont de Kirchenfeld (fig. 1), la sécurité structurale et la résistance à la fatigue de nombreux ouvrages d'art doit être aujourd'hui contrôlée pour prolonger leur durée d'utilisation ou répondre à l'augmentation des charges de trafic. Or contrairement aux ouvrages neufs, les résultats des modèles de calcul peuvent être comparés avec des mesures effectuées sur l'ouvrage existant. Cette comparaison permet d'affiner le modèle et dans certains cas de renoncer à une intervention coûteuse et délicate. Mais l'installation de jauges d'extensométrie traditionnelles requiert des travaux complexes, donc onéreux, auxquels les maîtres d'ouvrage renoncent souvent.



Le nouveau système de jauges d'extensométrie dit « par frottement » simplifie la réalisation de mesures, réduisant substantiellement leur coût et les rendant plus intéressantes pour l'évaluation de la sécurité d'ouvrages existants.

Un nouveau système de mesure

Produit par la société *Tokyo Sokki Kenkyujo* au Japon [1,2]¹, ce nouveau système de mesure comprend une jauge d'extensométrie classique en pont complet fixée à l'extrémité d'un ressort, lequel s'appuie sur un cylindre en acier (fig. 2). Le cylindre est muni d'un aimant et lorsque celui-ci est appliqué sur une surface en acier, le ressort se comprime, plaquant fortement la jauge sur la structure. La force de frottement entre la jauge et la structure rend ces deux éléments solidaires, la jauge pouvant alors suivre et mesurer les déformations de la structure. Ce système permet de supprimer le laborieux travail de collage sur l'acier préalable à toute mesure avec des jauges traditionnelles : il suffit d'appliquer l'aimant à l'endroit où la mesure doit être effectuée pour commencer la récolte.

Par ailleurs, des mesures effectuées au Laboratoire de la construction métallique (ICOM) de l'EPFL [3] confirment les indications du fabricant [1] selon lesquelles les déformations mesurées sur une pièce en acier peinte sont identiques à celles mesurées sur une même pièce sans peinture. Ce résultat rend donc inutile le travail de ponçage de la peinture sur les ouvrages existants, supprimant du même coup les retouches de peinture une fois les mesures terminées. D'autres essais menés à l'ICOM [4] ont montré que le système de jauge mesure avec précision les vibrations d'une poutre (fig. 3), ce qui permet d'en déduire par exemple la fréquence propre et le taux d'amortissement.

Pour mesurer les déformations d'un élément en béton, il suffit de coller une fine plaque en acier contre la surface du béton et de placer ensuite la jauge sur cette plaque. Le collage de la plaque peut être effectué avec une colle à durcissement rapide. Les résultats issus de ce procédé ont été comparés avec ceux fournis par les jauges *oméga* utilisées traditionnellement pour mesurer les déformations des élé-

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Fig. 1 : Pont de Kirchenfeld, Berne

Fig. 2 : Système de jauge par frottement et principe de fonctionnement

Fig. 3 : Mesure des vibrations d'une poutre mixte (fréquence d'acquisition : 200 Hz)

Fig. 4 : Pont de Kirchenfeld à Berne : élévation et coupe type du tablier

ments en béton : aucune différence significative n'existe entre les deux méthodes.

Les jauges par frottement peuvent donc être utilisées de manière fiable tant sur des surfaces en acier (peintes ou non) que sur des surface en béton. La jauge permet par ailleurs d'effectuer des mesures statiques et dynamiques.

Etant donné leur facilité de mise en œuvre et les perspectives qu'elles offrent, une application pilote de ces jauges a été menée avec succès en Suisse sur le pont de Kirchenfeld.

Application sur le pont de Kirchenfeld

La *figure 4* montre une élévation et une coupe transversale type du pont de Kirchenfeld à Berne. Il s'agit d'un pont riveté, dont la durée d'utilisation ne cesse d'être prolongée. Malgré plusieurs inspections et interventions depuis son ouverture au trafic en 1883, la question de sa sécurité structurale et de sa résistance à la fatigue revient périodiquement en raison de l'augmentation des charges et de la détérioration des matériaux avec le temps.

Le bureau *Hager+Bettschen* à Berne a été mandaté par les transports publics bernois *Bernmobil* pour évaluer la sécurité de l'ouvrage. L'ICOM a été désigné comme expert pour cette évaluation, ainsi que pour valider les modèles utilisés à l'aide d'une série de mesures sur certains éléments critiques de l'ouvrage [3].

Durant une journée, dix points de mesure – sept sur la structure en acier du tablier (*fig. 5*) et trois sous la dalle en béton (*fig. 6*) – ont été successivement équipés de deux jauges par frottement. Elles ont été mises en place par des alpinistes, sans échafaudage. Entre trois et cinq mesures ont été effectuées pour chaque point. La *figure 7* illustre un exemple typique des déformations mesurées par les deux jauges placées dans une même section. Le passage de deux véhicules, un bus sur une voie du pont puis un tram sur l'autre voie, peut clairement être identifié. Le recours à deux jauges dans une même section permet de dissocier l'effort normal et la flexion qui agissent dans la section.

La comparaison entre les mesures et les résultats du modèle numérique a montré que les déformations réelles de la structure en acier sont plus faibles que celles calculées. Ce résultat a été pris en compte par l'introduction d'un facteur de modèle réduisant les sollicitations calculées. Pour la structure en acier, le facteur vaut $0,80^2$. Les mesures ont aussi souligné que la flexion dans les diagonales des entretoises (cornière, *fig. 5*) due à l'excentricité de l'axe de la barre par rapport au plan du treillis est inférieure à la flexion théorique calculée comme le produit de l'effort normal dans la barre et de son excentricité. Là encore, un facteur de réduction a

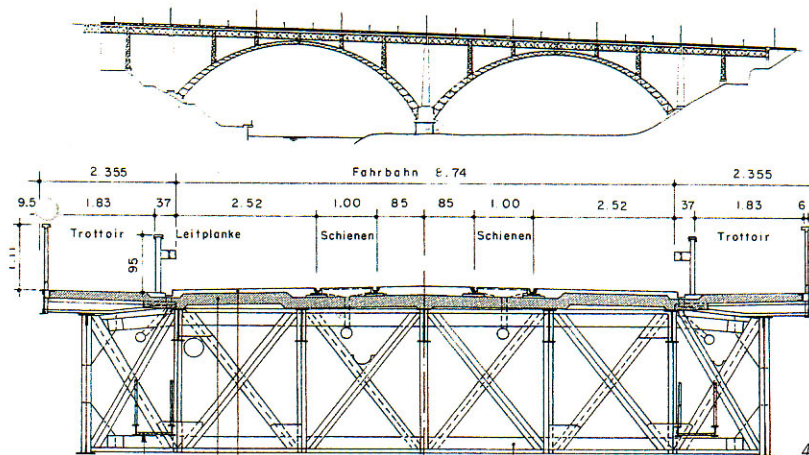
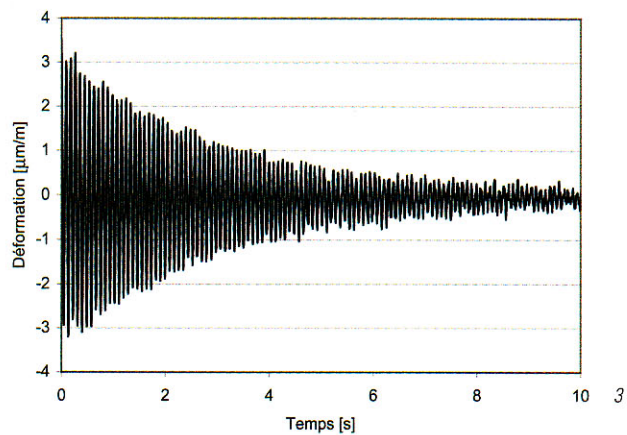
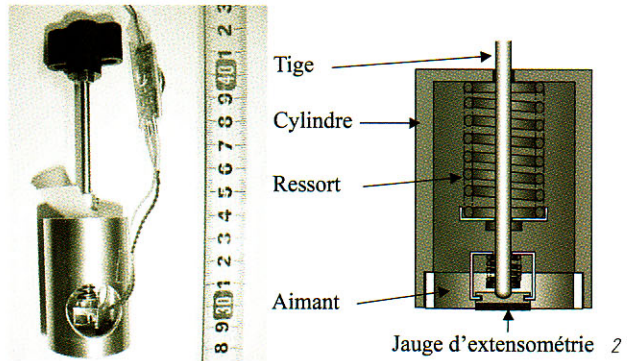


Fig. 5 : Deux jauges par frottement installées sur une section d'une diagonale (double cornière) dans une entretoise du tablier

Fig. 6 : Fixation d'une jauge par frottement sous la dalle en béton

Fig. 7 : Mesure des déformations dans une diagonale d'une entretoise lors du passage d'un bus, puis d'un tram (deux jauges)

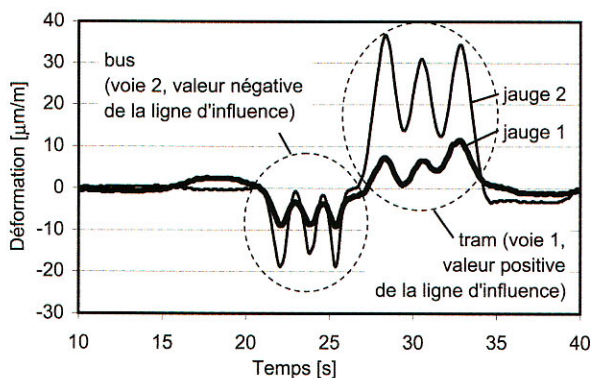
(Toutes les images illustrant cet article ont été fournies par les auteurs)



5



6



7

été introduit dans les calculs pour tenir compte de ce phénomène. Ce facteur est de 0,75 dans le cas du pont de Kirchenfeld.

Les mesures ont donc permis de réduire de 20% les sollicitations calculées dans la structure en acier, cela tant pour la vérification de la résistance à la fatigue que pour celle de la sécurité structurale. Les efforts de flexion dans les diagonales ont même pu être réduits à 60% ($0,80 \times 0,75$) des valeurs calculées. Ces « corrections », rendues possibles par les mesures *in situ*, ont permis au maître d'ouvrage de renoncer à une intervention lourde qui aurait impliqué le remplacement de nombreuses diagonales du tablier ainsi que le renforcement de la membrure de certaines entretoises en treillis.

Selon la difficulté d'accès aux points de mesure, il aura fallu de trois à cinq personnes sur l'ouvrage pour effectuer les mesures. 30 à 40 minutes sont nécessaires pour chaque point : ce temps comprend l'accès au point, la mise en place et le câblage des deux jauges, les mesures proprement dites (quatre mesures d'environ une minute chacune par point) et le démontage des jauges. Il est ainsi possible de mesurer les déformations d'une douzaine de points en une seule journée de travail. Par comparaison, un système traditionnel aurait nécessité plus de 100 heures de travail rien que pour installer les échafaudages, poncer la peinture et coller les jauges. Une durée à laquelle il convient d'ajouter le temps nécessaire pour procéder aux mesures, effectuer les retouches de peinture et démonter les échafaudages. A noter que ces temps ne tiennent pas compte du dépouillement et de l'analyse des mesures, une prestation similaire (et non négligeable) devant être fournie avec les deux systèmes.

L'intérêt économique de l'utilisation de jauges par frottement s'est donc révélé évident pour le pont de Kirchenfeld, puisqu'on a pu éviter une intervention lourde sur la structure tout en minimisant le coût intrinsèque des mesures.

Domaines d'applications

Les possibilités d'application des jauges par frottement dans l'évaluation des structures existantes sont nombreuses [2]. Elles concernent notamment :

- l'étalonnage ou la validation des modèles de calcul pour la vérification de l'aptitude au service, de la sécurité structurale ou de la résistance à la fatigue (pont de Kirchenfeld) ;
- la détermination de l'amplitude réelle des cycles de contraintes afin d'effectuer un cumul de dommage pour l'évaluation de la durée de vie résiduelle à la fatigue d'une structure en acier ;

² Le facteur vaut 1,00 pour la dalle en béton, ce qui signifie qu'aucune réduction des sollicitations n'est possible dans ce cas.

- la mesure des fréquences propres d'un ouvrage et de son taux d'amortissement (cas d'une passerelle piétonne soumise à des vibrations).

Les jauges par frottement constituent un outil rapide, simple et fiable. Une exploitation judicieuse de leurs mesures peut permettre de renoncer à des interventions de renforcement onéreuses sur les structures porteuses, ou tout au moins de limiter leur ampleur. Au service des ingénieurs, ces « stéthoscopes » peuvent contribuer à prolonger la durée de service des ponts existants sans pour autant faire exploser les coûts de cette « gériatrie » toute particulière.

Alain Nussbaumer, dr ing civil EPF
 Michel Thomann, dr ing civil EPF
 Manfred A Hirt, prof., dr ing civil EPF
 ICOM-ENAC-EPFL
 GC B3 495, Station 18
 CH - 1015 Lausanne

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Prof. Kentaro Yamada de l'Université de Nagoya pour avoir présenté ce nouveau système de jauge à l'ICOM. Nos remerciements s'adressent également à *Bernmobil* et au bureau *Hager + Bettschen* pour la confiance accordée dans le cadre des mesures sur le pont de Kirchenfeld. Merci enfin à Yves Rey, Sylvain Demierre et Delphine Chou pour la préparation et la réalisation des essais en laboratoire et *in situ*

Bibliographie

- [1] TOKYO SOKKI KENKYUJO Co. LTD. (ed) « Strain Checker FGMH-1 », Product documentation, 2005
- [2] T. OJIO, K. YAMADA, Y. SAITO, S. SHIINA. « Strain Checker : stethoscope for bridge engineers », in. « Proceedings of IABMAS 06, Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management », Porto, July 2006
- [3] Y. REY, M. THOMANN, A. NUSSBAUMER : « Mesures sur le pont de Kirchenfeld », Rapport de mandat IC 934-1, Laboratoire de la construction métallique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006
- [4] D. CHOU. Poutre Rolex, Jauges FGMH-1, « Système porteur mixte avec sous-tirant », Projet de semestre, Laboratoire de la construction métallique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2006

Exigeant

D'accord. Nous ne sommes que la deuxième plus grande entreprise d'ascenseurs en Suisse.

Pour répondre à vos exigences individuelles, nous sommes pas contre le numéro 1.



AS Ascenseurs

www.lift.ch