

Uniformisation et automatisation du monitoring des tensions dans les suspentes et haubans de ponts

AUGUSTE Thierry ¹, DENOËL Vincent ², GEUZAINÉ Margaux ³, RUTTEN Christophe ⁴, VERSTRAELEN Edouard ⁴, TOUSSAINT Patrice ⁵

¹ Ingénieur, Service Public de Wallonie.

² Professeur, Université de Liège.

³ Ingénieur, Université de Liège, Fonds National de la Recherche Scientifique.

⁴ Chef de projets, V2i - Développement et conception produit.

⁵ Directeur f.f., Service Public de Wallonie, Direction de l'Expertise des Ouvrages.

RESUME

La détermination des tensions des haubans et suspentes de ponts par mesures accélérométriques est maîtrisée et utilisée depuis longtemps au SPW (Service Public de Wallonie), mais la méthode utilisée ne permet pas un calcul correct pour les suspentes présentant des géométries complexes, et le contrôle est effectué de manière ponctuelle avec une périodicité variable. Le projet présenté, issu d'une collaboration avec l'Université de Liège et la société V2i spécialisée dans l'acquisition et le traitement vibratoire a permis de développer un système performant d'instrumentation basé sur cette technique et destiné à remplacer la méthodologie actuelle :

- Les algorithmes d'acquisition et de traitement des données issues des accéléromètres sans fil permettent un calcul précis des tensions pour toute géométrie complexe des suspentes (raideur flexionnelle, encastremements partiels, ...)
- Les données, recueillies plusieurs fois par jour, sont traitées et transmises sur le cloud, permettent un suivi sécuritaire en continu via une gestion automatisée des alertes mises en place

Mots-clefs : instrumentation, suspente, vibration, télémesure

Introduction

Comme d'autres administrations ayant en charge des ponts haubanés et désirant s'assurer de leur état de santé [1,2], la Direction de l'Expertise des Ouvrages réalise depuis de nombreuses années [3], un suivi de la tension des haubans sur les nombreux ponts gérés par la Région Wallonne.

En effet, malgré le soin apporté à leur réalisation et à leur mise en place, ces éléments peuvent être sujet à des pathologies qui, au fil des ans, peuvent induire des ruptures internes des fils ou torons qui les constituent, et donc diminuer leur capacité portante jusqu'à, pour certains cas, remettre en question la stabilité d'ensemble de l'élément ou de la structure.

L'exemple du pont de Lanaye en Wallonie illustre ce type de situation ; les mesures de tension effectuées par la direction compétente du SPW depuis l'inauguration du pont en 1986 ont conduit au remplacement de deux haubans à cause de pertes de tensions (jusqu'à 50% de la tension initiale) suite à des ruptures de fils soumis à des pathologies de corrosion fissurante sous tension.



Photo 1

2004 – démontage du hauban défectueux (photo SPW)



Photo 2

Ruptures de fils repérées lors de l'expertise (photo SPW)

De nombreuses publications attestent de l'importance de la problématique [4-6] par exemple rencontrée sur le pont de Saint-Nazaire, en France.

L'intérêt de remplacer des mesures ponctuelles réalisées, par exemple tous les ans, par un suivi en continu se justifie également par l'effet des dilatations thermiques sur les mesures de tension, effet qui ne peut être éliminé de l'analyse que si de nombreuses mesures sont disponibles.

Le dernier point justifiant les améliorations mises en place touche à la complexité du calcul des efforts. Les équations de la corde tendue qui étaient utilisées pour calculer la tension à partir des fréquences propres étaient irrésolvables avec l'ancienne méthode sans hypothèses trop simplificatrices.

Collaboration SPW-ULg-V2i

Pour répondre à tous ces besoins, un partenariat a été mis en place avec deux spécialistes reconnus dans le domaine vibratoire, à savoir le service du professeur Denoël de l'Université de Liège et la société V2i.

Le contrat a permis le développement d'un système de télémessure avec capteurs sans fil de grande autonomie avec implémentation dans l'outil de monitoring d'un nouvel algorithme de calcul des tensions.

Pour le calcul des tensions, le modèle le plus simple qui existe pour représenter la dynamique des câbles est le modèle dit de « corde tendue », dans lequel le câble est supposé fortement tendu et de raideur négligeable [7].

La réalité du terrain est parfois loin de cet idéal académique, comme en témoignent les suspentes du pont de Harchies.



Photo 3

Vue du pont d'Harchies (photo SPW)



Photo 4

Vue des suspentes courtes du pont d'Harchies (photo SPW)

A l'autre extrême, il existe des modèles s'apparentant plutôt à des poutres, pour lesquelles les fréquences propres s'organisent de façon plus que proportionnelle par rapport à la fréquence fondamentale. Cette organisation des fréquences est modifiée lorsque les conditions limites sont différentes d'appuis rotulés [7]. Ceci témoigne non seulement d'une certaine complexité, mais aussi, indique qu'il « suffit » d'observer cette organisation des fréquences en fonction de leur rang pour pouvoir déterminer des informations comme la tension dans le hauban, la raideur en flexion du hauban, la raideur en flexion des appuis, les masses des culots, etc. En effet, pour autant que chacun des paramètres ait sa propre signature sur cette organisation des fréquences, il est possible de décoder l'information sur les valeurs des fréquences propres pour pouvoir identifier les paramètres du câble [8].

Modèle paramétrique

Cette répartition des fréquences illustre les deux étapes nécessaires pour l'approche du problème de détermination des efforts dans le cas de géométries complexes. La première concerne le développement, l'analyse et la compréhension fine d'un modèle paramétré assez général pour pouvoir capturer suffisamment précisément les différentes configurations de haubans rencontrés sur les ponts de Wallonie. Le modèle qui a La seconde consiste à développer une méthode d'identification, ou d'analyse inverse, permettant de déterminer les paramètres de ce modèle qui aboutissent à reproduire au mieux les fréquences propres mesurées. Celle-ci est loin d'être banale. En effet, là où les méthodes habituelles se baseraient sur un ajustement par la méthode des moindres carrés, une analyse théorique approfondie a été réalisée [8] de façon à déterminer l'identifiabilité des différents paramètres.

été retenu est représenté ci-dessous.

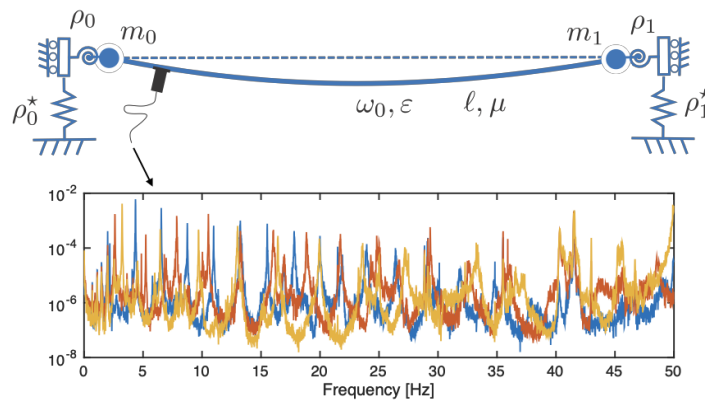


Figure 1 : modèle paramétrique utilisé pour la géométrie d'une suspente

L'approche développée est unifiée, dans le sens où le modèle mécanique de câble utilisé est unique, que le câble soit long, court, trapu avec des appuis flexibles ou non, en translation et/ou en rotation. En fonction du nombre de fréquences détectées, la méthode d'ajustement adapte automatiquement le nombre de paramètres à identifier à 2, 3 ou 4.

Par ailleurs, la méthode développée ne nécessite l'utilisation que d'un seul capteur par câble, dont le positionnement est déterminé par rapport à la position des nœuds des premiers modes de fréquences propres mais aussi par des considérations d'ordres pratiques, telles que les moyens d'accès ou la protection contre le vandalisme.

Systeme de monitoring

La solution de télémessure, développée par V2i, est une solution complète, hardware et software, prenant en charge toutes les opérations nécessaires au calcul et la mise à disposition des mesures de tensions dans les haubans : acquisition, analyse, stockage cloud et visualisation web. Elle est composée d'accéléromètres et de capteurs de température sans fil, d'une station centrale d'acquisition, d'un serveur de donnée (cloud) et d'une interface web permettant, à distance, la visualisation et l'exploitation des données.

Pour les capteurs de vibration, un système d'alimentation sur mesure a été conçu pour la durée de vie requise (10 ans) et intégré à un capteur OEM (Original Equipment Manufacturer). L'ensemble capteur et système d'alimentation est protégé par un casing IP65 résistant aux UV, dont la structure interne est imprimée en 3D.

La station centrale prend en charge la gestion du timing de l'acquisition des mesures, les paramètres d'acquisitions (durée, fréquence), le traitement des données et le stockage des mesures et résultats (local et envoi dans le cloud). Elle acquiert les mesures de chaque capteur de manière séquentielle, avec une durée de mesures de 5 minutes pour chaque hauban.

Les données temporelles sont alors traitées par transformée de Fourier rapide pour obtenir les données fréquentielles, utilisées pour visualisation dans un algorithme d'identification par la méthode SSI (Stochastic Subspace Identification) [9,10].

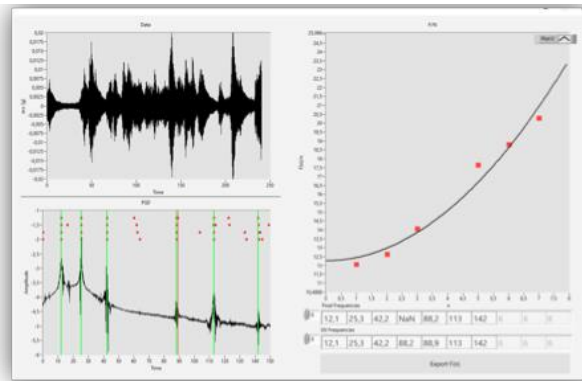


Figure 2 : identification des fréquences propres

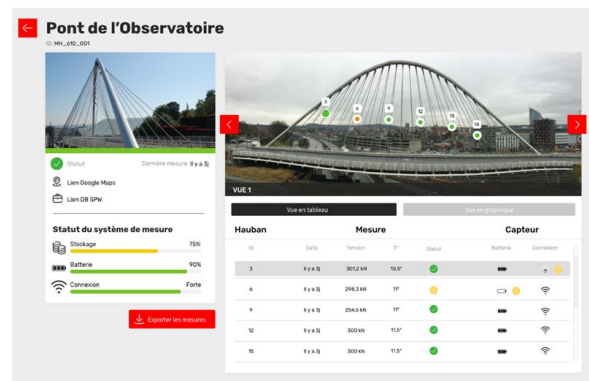


Figure 3 : interface web de visualisation des données

Une fois les modes de résonance identifiés, ceux-ci sont traités par l'algorithme développé par l'ULiège qui fournit alors l'estimation de la tension dans le hauban. Tous ces traitements sont réalisés directement sur la station de mesure, de façon délocalisée.

Les mesures brutes et les résultats du calcul de tension sont ensuite sauvegardés localement et envoyés vers le serveur de stockage cloud lorsqu'une connexion 4G est disponible.

Le serveur permet également d'envoyer des alarmes sous forme de courriel ou de sms lorsqu'une valeur (tension, statut batterie, ...) est en dehors de limites définies.

Conclusions

Un système de monitoring des tensions dans les haubans avec capteurs sans fil basse consommation et système d'acquisition et de traitement autonome a été développé sur base d'un nouvel algorithme de traitement des données de vibrations ; celui-ci est, applicable quel que soit la géométrie du câble, permet un suivi en continu via la gestion des niveau d'alarmes.

Bibliographie

- [1] Ph Demars and D Hardy. Mesure des efforts dans les structures à câbles. Annales des travaux publics de Belgique, 6:515–531, 1985.
- [2] J. M. Ko, Y. Q. Ni, H. F. Zhou, J. Y. Wang, and X. T. Zhou. Investigation concerning structural health monitoring of an instrumented cable-stayed bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2009.
- [3] Armin B. Mehrabi. In-service evaluation of cable-stayed bridges, overview of available methods and findings. *Journal of Bridge Engineering*, 11(6):716–724, 2006
- [4] João P. Santos, Christian Crémona, Luís Calado, Paulo Silveira, and André D. Orcesi. On-line unsupervised detection of early damage. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016.
- [5] Méthode d'essai LPC n°35, Mesure de la tension des câbles par vibration, LCPC 1993
- [6] Byeong Hwa Kim and Taehyo Park. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method. *Journal of Sound and Vibration*, 304(3-5):660–676, jul 2007.
- [7] Elsa de Sá Caetano, International Association for Bridge, and Structural Engineering. Cable Vibrations in Cable-stayed Bridges. *Structural engineering documents*. IABSE, 2007.
- [8] Foti, F., Geuzaine, M., & Denoël, V. (2020). On the identification of the axial force and bending stiffness of stay cables anchored to flexible supports. *Applied Mathematical Modelling*.
- [9] Overschee, P. V. and Moor, B. D., Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications, *Kluwer*, 1996.
- [10] M. Goursat, M. Döhler, L. Mevel, and P. Andersen, Crystal Clear SSI for Operational Modal Analysis of Aerospace Vehicles, Proceedings of the IMAC-XXVIII February 1–4, 2010, Jacksonville, Florida USA.