



**HAL**  
open science

## Analyse fréquentielle automatisée pour la mesure de tension de câbles de précontrainte extérieure

Jonas Aparicio, Gwendal Cumunel, Tien Hoang, Gilles Forêt, Yannick Jeanjean, J Castres Saint Martin

### ► To cite this version:

Jonas Aparicio, Gwendal Cumunel, Tien Hoang, Gilles Forêt, Yannick Jeanjean, et al.. Analyse fréquentielle automatisée pour la mesure de tension de câbles de précontrainte extérieure. Journées Cofrend 2023, Confédération française pour les essais non destructifs, Jun 2023, Marseille, France. 7 p., 10.58286/28493 . hal-04248450

**HAL Id: hal-04248450**

**<https://enpc.hal.science/hal-04248450>**

Submitted on 18 Oct 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Analyse fréquentielle automatisée pour la mesure de tension de câbles de précontrainte extérieure

J. Aparicio<sup>a,\*</sup>, G. Cumunel<sup>a</sup>, T. Hoang<sup>a</sup>, G. Foret<sup>a</sup>, Y. Jeanjean<sup>b</sup>, J. Castres Saint Martin<sup>b</sup>

a. Navier, École des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

b. Sanef, Issy-les-Moulineaux, France

\* corresponding author, E-mail : jonas.aparicio@enpc.fr

**Résumé** : De très nombreux ponts du patrimoine bâti sont équipés de câbles de précontrainte extérieure installés soit lors de la construction, soit lors de renforcements. Ces câbles sont généralement composés de torons en acier protégés par une gaine injectée au coulis de ciment. En mettant le béton en compression, les câbles lui permettent de résister aux charges auxquelles il est soumis. Il est alors important de pouvoir connaître la tension résiduelle dans les câbles afin de savoir s'ils assurent toujours leur fonction. Pour cela les méthodes vibratoires sont fréquemment utilisées. La méthode d'essai LPC n°35 est principalement utilisée en France pour les câbles sur ouvrage. Elle permet d'obtenir la tension d'un câble à partir de différents points de mesure lorsque le câble est suffisamment long pour pouvoir être modélisé par un modèle de corde vibrante. Les principales limites qui empêchent l'utilisation automatique de la méthode sont la localisation des points d'excitation, l'enregistrement des données et l'utilisation de plusieurs points de mesure. Le travail présenté dans cet article propose de s'affranchir de ces limites en déterminant tout d'abord l'ordre des modes associé aux fréquences détectées, puis en résolvant un problème inverse, afin de déterminer la tension et la rigidité en flexion du câble. La prise en compte de la rigidité en flexion et la nécessité de réaliser une seule mesure permettent de détecter la tension de n'importe quel câble de précontrainte extérieure avec une mesure unique. Cette méthode a été validée en laboratoire et testée sur ouvrage. Elle nécessite une estimation de la masse linéique et de la longueur libre du câble.

## 1 Introduction

La précontrainte extérieure est une technique de construction qui permet de réduire les sections des structures et, par là même, leur charge permanente et ainsi de diminuer la quantité de matériaux nécessaire à la construction de ponts de longue portée. Le comportement dynamique des structures dépendant de leurs caractéristiques mécaniques et structurelles [1], de nombreuses méthodes sont basées sur le suivi de celui-ci afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques mécaniques. Par ailleurs, en gestion d'ouvrage, il peut être utile de suivre l'évolution de la tension des câbles car le comportement structurel de l'ouvrage en dépend. Les méthodes de mesure de la tension les plus utilisés sur les câbles sont les suivantes [2] : le vérinage, les méthodes électromagnétiques et les méthodes modales. Les deux premières ne sont pas utilisables dans le cas de la précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment. L'utilisation des fréquences propres pour déterminer la tension d'un câble est ancienne. Cette méthode est appréciée en vertu de sa rapidité et de sa simplicité. Elle est connue en France sous le nom de méthode d'essai LPC n°35. Néanmoins, cette méthode comporte certaines limites : la non-prise en compte de la rigidité en flexion, de la déformation sous poids propre et des conditions aux limites ainsi que la nécessité de s'assurer, d'une part, de ne pas manquer de fréquences propres nécessaires à la détermination de la tension et, d'autre part, de connaître la longueur libre et la masse linéique du câble testé. Plusieurs travaux détaillent l'acquisition de données modales massives sur ouvrages [3, 4, 5, 6] afin de mesurer la tension dans les câbles.

Les méthodes modales permettent de déterminer la



tension dans un câble à partir des fréquences propres du câble et de différents modèles, de complexité variable, exposés dans [7, 8]. En supposant les paramètres mécaniques constants le long du câble, le modèle le plus simple est le modèle de corde vibrante

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T}{\mu} \frac{1}{4L^2} \quad (1)$$

$$\text{soit } T = 4\mu L^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (2)$$

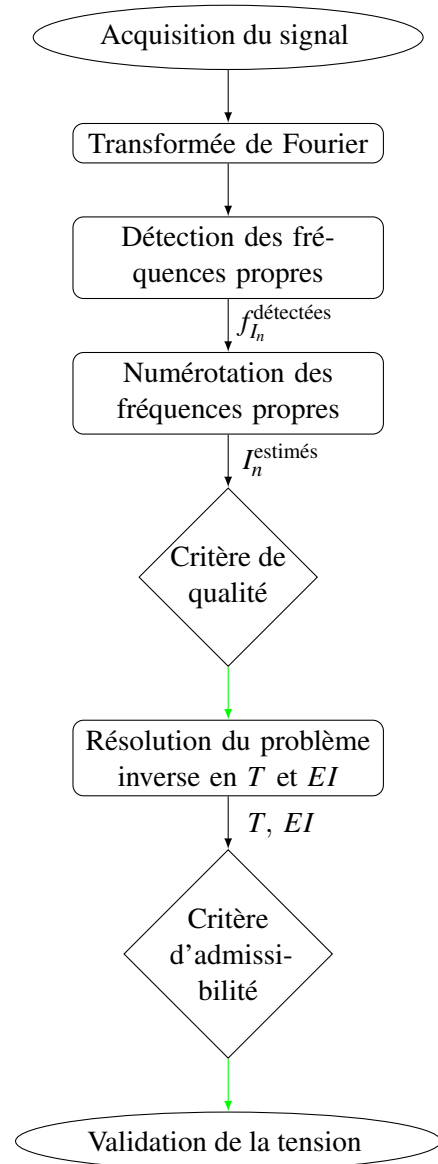
où  $T$  est la tension du câble,  $\mu$  sa masse linéique,  $L$  sa longueur libre entre appuis et  $f_n$  la fréquence associée au mode  $n$ . Ce modèle ne prend en compte ni la rigidité en flexion, ni la déformation sous poids propre. Dans le cas où le câble est court, c'est-à-dire que le ratio  $\frac{EI}{TL^2}$  n'est plus petit devant 1, il faut prendre en compte la rigidité en flexion  $EI$ . On obtient alors le modèle d'Euler-Bernoulli avec précontrainte axiale. Ce modèle permet d'écrire, sous l'hypothèse supplémentaire que les conditions aux limites sont bi-appuyées (déplacement bloqué mais rotation libre), la relation suivante

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T}{\mu} \frac{1}{4L^2} + \frac{EI}{\mu} \frac{n^2 \pi^2}{4L^4} \quad (3)$$

Ce modèle n'est plus valable si les conditions aux limites ne sont plus respectées, ce qui est le cas pour des segments de câbles très courts ou dans le cas de dispositifs particuliers à l'ancrage. Ce dernier point est exploré dans [9]. Dans le cas de câbles très longs, le câble au repos ne pouvant plus être considéré comme droit, il faut considérer la déformation du câble liée à son poids propre. Le modèle est alors non linéaire et une relation directe nécessite de nombreuses approximations. De nombreux auteurs se tournent alors vers une résolution du problème inverse à l'aide d'un calcul par éléments finis [10, 11].

Le travail présenté dans cet article détaille les différentes étapes permettant d'automatiser le processus pour estimer la tension d'un câble à l'aide d'une seule mesure en connaissant la longueur libre et la masse linéique de celui-ci. La validation expérimentale de cette méthode et les résultats de son utilisation sur ouvrage sont également présentés. L'objectif est de proposer une méthode permettant, à partir d'une acquisition rapide, d'estimer la valeur de la tension dans les câbles de précontrainte extérieure d'un ouvrage. Les tensions des câbles peuvent ensuite être utilisées, par exemple, pour le suivi de l'ouvrage ou comme données d'entrée d'un jumeau numérique.

## 2 Procédure de post-traitement des signaux



### 2.1 Numérotation des modes

**Acquisition du signal** L'acquisition des signaux de mesure a été réalisée à l'aide d'accéléromètres Brüel & Kjær (Type 4507-B-004) pour les expériences sur banc d'essais et sur ouvrage (Figure 1). La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 3200 Hz et la durée d'acquisition des signaux à 5 s. L'accéléromètre est positionné à proximité de l'ancrage, soit à 3-4 m pour l'expérience sur le banc d'essais et à 1 m pour les câbles sur ouvrage. Cela permet de minimiser le nombre de fréquences non détectées car le capteur ou le point d'excitation se trouve à proximité d'un nœud de vibration, au prix d'une détection plus difficile pour les premiers

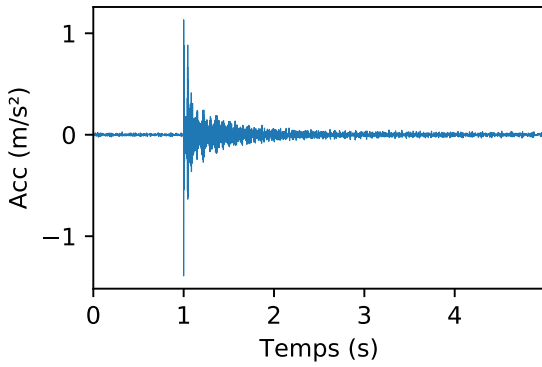


FIGURE 1 – Exemple de signal acquis par l'accéléromètre sur ouvrage.

modes. L'excitation du câble est effectuée par la chute d'une bille en acier sur le banc d'essais et par marteau d'impact sur ouvrage.

Pour les essais sur ouvrage, une durée d'acquisition plus longue aurait pu être choisie car le signal n'est pas complètement amorti au bout de 5 s.

**Détection des pics** La détection automatique des fréquences propres à partir du signal de l'accéléromètre est une étape critique de la procédure. Elle se fait en sélectionnant les maximums locaux du module de la transformée de Fourier des signaux de mesure (Figure 2).

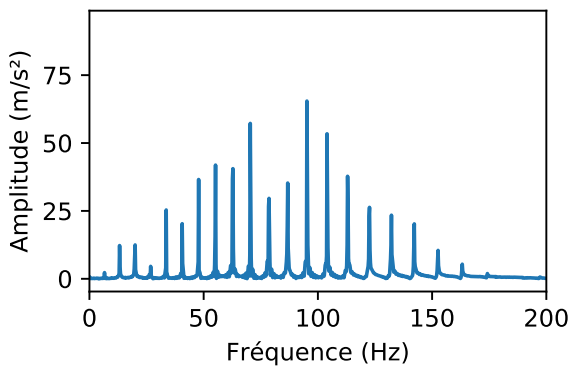


FIGURE 2 – Module de la transformée de Fourier du signal de l'accéléromètre.

Pour affiner la détection des fréquences propres en éliminant les faux positifs, plusieurs paramètres peuvent être utilisés. Les restrictions sur la détection entraîneront cependant la non détection de certaines fréquences. Deux critères ont été utilisés dans cette étude. Tout d'abord, la distance minimale entre deux pics de fréquence est choisie égale à 1 Hz. Cela permet d'éliminer une grande partie des faux positifs. Ensuite, le

deuxième critère utilisé est la proéminence qui est la différence entre l'amplitude du sommet d'un pic et celle du col voisin le plus élevé. Le choix de la proéminence dépend du type d'excitation. L'excitation par chute de bille sollicitant des fréquences plus élevées, l'amplitude du spectre est plus importante pour les fréquences plus élevées. Dans ce travail, nous avons choisi une valeur de proéminence égale à 30% de la moyenne du module de la transformée de Fourier pour les mesures sur le banc d'essais et égale à la moyenne du module pour les mesures sur ouvrage.

Les problématiques qui se posent sont la variation de hauteur des pics qui nécessite de ne pas avoir une proéminence trop élevée, les doubles pics qui nécessitent de ne pas avoir une distance entre les pics trop importante et les faux positifs qui découlent du fait de ne pas être suffisamment sélectif. Il y a donc un compromis à faire qu'il est difficile de généraliser puisqu'il dépend des caractéristiques du câble et de l'excitation. Des ajustements seront donc nécessaires suivant les signaux de mesure.

Par ailleurs, la fréquence maximale à laquelle est faite la détection doit être suffisamment importante pour avoir la plus grande précision possible et suffisamment faible pour ne pas avoir à faire une correction trop importante des effets quadratiques dûs à la rigidité en flexion (Eq. (3)). Nous avons ainsi sélectionné une fréquence maximale égale à 50 Hz sur le banc d'essais et à 200 Hz sur ouvrage.

**Ordre des modes** Déterminer l'ordre du mode pour chaque fréquence détectée est le deuxième point critique de la procédure. Cette tâche est rendue complexe par la non détection de certains modes, soit à cause de la sélectivité de l'algorithme de détection, soit parce que la position du capteur ne permet pas de détecter certains modes (proximité d'un nœud de vibration). Le risque de non-détection porte principalement sur les premiers modes dont la réponse mesurée est faible à cause de la position du capteur, proche d'un appui.

De plus, la numérotation des modes est d'autant plus complexe que certains modes apparaissent deux fois, ce que les auteurs attribuent à l'inhomogénéité de la rigidité en flexion le long du câble liée à l'évolution de la position des torons au sein du câble. Ce phénomène apparaît sur les modes d'ordre élevé, qui sont plus sensibles aux variations de rigidité en flexion.

**Critère de qualité** Un critère de qualité est défini arbitrairement en s'intéressant aux modes non détectés. Le signal sera rejeté s'il manque plus de 20% des modes

et considéré comme problématique s’il en manque plus de 10%. Le signal sera également considéré comme problématique s’il y a un triple mode et rejeté s’il y a un quadruple mode.

## 2.2 Problème inverse

**Choix du modèle** Pour relier la réponse en déplacement du câble à ses caractéristiques mécaniques, il est nécessaire de choisir un modèle. Le modèle le plus simple est celui de la corde vibrante. La réponse ne dépend alors que de la tension  $T$ , de la masse linéique  $\mu$  et de la longueur libre  $L$  du câble. Ce modèle est généralement suffisant pour la majorité des câbles de précontrainte cependant, pour les câbles de petites longueurs, la rigidité en flexion  $EI$  doit être prise en compte ainsi que l’influence des conditions aux limites et, pour les câbles de très grandes longueurs, la déformation due au poids propre du câble doit être prise en compte. Ainsi, pour le cas de la précontrainte extérieure, le modèle d’Euler–Bernoulli avec précontrainte axiale est choisi, les conditions aux limites des câbles étant considérées comme bi-appuyées.

**Détermination de  $EI$  et de  $T$**  Les modes détectés sont comparés aux modes théoriques, qui dépendent de  $EI$  et de  $T$ .

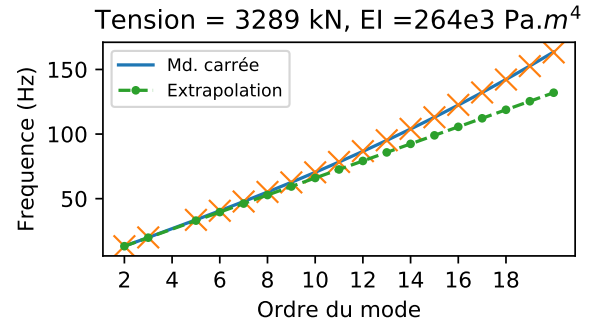
Soit  $I_n$  l’ensemble contenant les ordres estimés des modes détectés, la fonction coût suivante est utilisée pour obtenir l’ordre des modes

$$J(T, EI) = \sum_{i \in I_n} c_i (f_i^{\text{th}}(T, EI) - f_i^{\text{détectée}})^2 \quad (4)$$

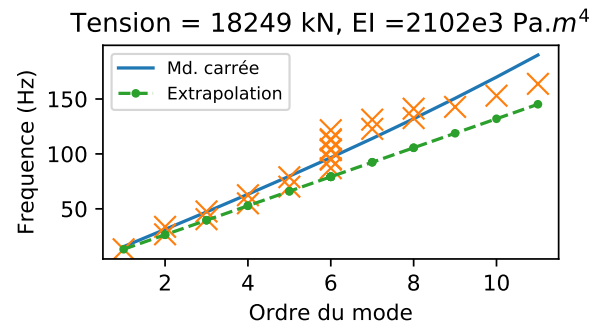
avec  $c_i = \frac{1}{i^2}$  un facteur de pondération permettant d’éviter que les modes élevés ne prédominent.

La résolution de ce problème inverse par la méthode des moindres carrés donne une estimation de  $T$  et  $EI$ . Les doubles pics sont traités comme deux pics distincts avec un poids de 50% chacun. La Figure 3 montre des exemples de détermination des paramètres mécaniques du câble à partir de cette fonction coût : l’extrapolation linéaire à partir de la première fréquence détectée (modèle de corde vibrante) est représentée en rouge, les fréquences obtenues numériquement en utilisant la méthode des moindres carrés sont représentées en bleu. Les croix représentent les fréquences détectées expérimentalement.

**Critère d’admissibilité** La valeur de la rigidité en flexion du câble,  $EI$ , déterminée en résolvant le problème d’optimisation est plus sensible aux erreurs. Elle



(a) Identification réussie



(b) Échec de l’identification à cause de la numérotation des modes

FIGURE 3 – Exemples de détermination des paramètres mécaniques du câble

est donc un bon indicateur de l’échec de l’identification de la tension. Par ailleurs, la rigidité en flexion n’est à priori pas homogène suivant la longueur du câble à cause de la géométrie des torons. La valeur de la rigidité en flexion estimée par la résolution du problème inverse est donc soumise à des variations. Néanmoins ces variations doivent rester dans un intervalle relativement proche des estimations théoriques de la rigidité en flexion du câble qui sont données dans la Table 1. Le signal est donc considéré comme problématique si la valeur de la rigidité en flexion est inférieure à la moitié de l’estimation ou supérieure au double de l’estimation.

TABLE 1 – Estimation de la rigidité en flexion

Câble	$EI$ estimé	$EI_{\min}$	$EI_{\max}$
5T15	40e3 Pa.m <sup>4</sup>	20e3 Pa.m <sup>4</sup>	80e3 Pa.m <sup>4</sup>
19T15	450e3 Pa.m <sup>4</sup>	150e3 Pa.m <sup>4</sup>	500e3 Pa.m <sup>4</sup>

Dans le cas d’un câble 19T15, l’estimation est faite en considérant les torons répartis de manière homogène dans le câble (Figure 4) ce qui est l’un des cas où la rigidité en flexion est la plus élevée. La rigidité en flexion alors obtenue est donc prise comme borne supérieure de

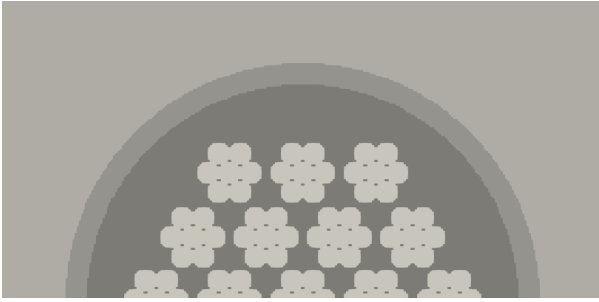


FIGURE 4 – Vue en Coupe de la moitié supérieure d’un câble 19T15 pour le calcul de la rigidité en flexion.

la rigidité en flexion admissible.

### 3 Validation expérimentale de la méthode

#### 3.1 Validation sur le banc d’essais de l’Université Gustave Eiffel de Nantes

Cette validation expérimentale a été réalisée dans le cadre d’une campagne d’essais sur des câbles de précontrainte extérieure. L’objectif majeur était de mieux comprendre le phénomène de ré-ancrage des fils des torons lors de leur rupture afin de définir des recommandations quant à l’impact du nombre de fils rompus sur la capacité résiduelle du câble à assurer sa fonction sans risque de rupture totale [12].

Les câbles ont été instrumentés avec des accéléromètres pour mesurer la réponse vibratoire et une cellule de force pour le suivi de la tension. Deux accéléromètres ont été utilisés séparément afin d’identifier la tension, situés à 3,4 m (n°1) et 4,3 m (n°2) de l’ancrage. L’excitation des câbles a été réalisée à l’aide d’un système automatique de chute de billes. Un ensemble de données a ainsi pu être constitué afin de comparer la tension obtenue à partir de la méthode modale (i.e. des accéléromètres) à celle mesurée à l’aide de la cellule de force. Les câbles de la campagne d’essais utilisés dans cette étude comprennent 5 torons et ont une longueur de 46,6 m. La fréquence maximale d’analyse choisie pour ces essais est de 50 Hz, la fréquence fondamentale étant proche de 2 Hz. La comparaison des données présentée Figure 5 montre une bonne corrélation entre les fréquences mesurées et celles déduites de la méthode modale, avec un écart de 2% pour le cas le plus défavorable. Pour certains états d’endommagement (i.e. nombre de rupture de fils), la réponse vibratoire du câble a été mesurée plusieurs fois et l’estimation de la tension à partir de ces mesures montre une bonne reproductibilité.

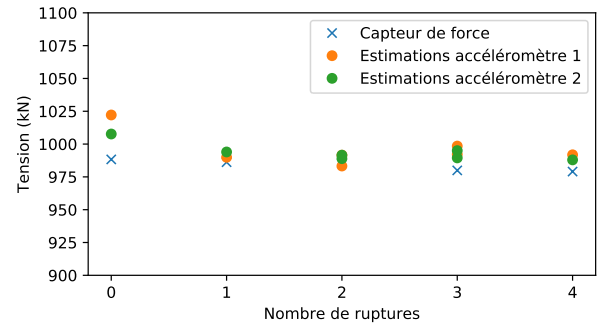


FIGURE 5 – Comparaison entre les tension mesurées par la cellule de force et celles estimées à l’aide des mesures des accéléromètres par la méthode modale pour un câble de précontrainte extérieure testé sur le banc d’essais de l’UGE Nantes.

#### 3.2 Validation sur ouvrage

Les mesures ont été réalisées sur le viaduc d’Echinghen situé sur l’autoroute A16. Un fléau entier a été testé. Les câbles étant tendus de part et d’autre de la pile, l’acquisition de mesures sur un fléau permet d’obtenir une mesure de la tension d’un câble de part et d’autre du déviateur en position haute (Figure 6). Un accéléromètre a été installé sur un collier de serrage pour une installation rapide sur les câbles à tester et ce dispositif a été utilisé sur la travée de rive du viaduc d’Echinghen. La réponse vibratoire de segments de câbles d’une longueur de 8,9 m à 32,4 m a été mesurée. Chaque mesure a été réalisée au minimum trois fois, cependant certains signaux se sont avérés inexploitable.



FIGURE 6 – Photo de l’une des travées testées

Les résultats présentés en Table 2 et Figure 7 montrent une bonne corrélation des tensions de part et d’autres du déviateur central et une bonne reproductibilité des mesures. Dans la Table 2, le code suivant est utilisé afin de préciser la qualité de l’estimation des paramètres mécaniques : B pour un bon signal, M pour un signal moyen et R pour un signal rejeté. L’écart type, lorsqu’il est défini, est représenté en rouge sur la Figure 7.

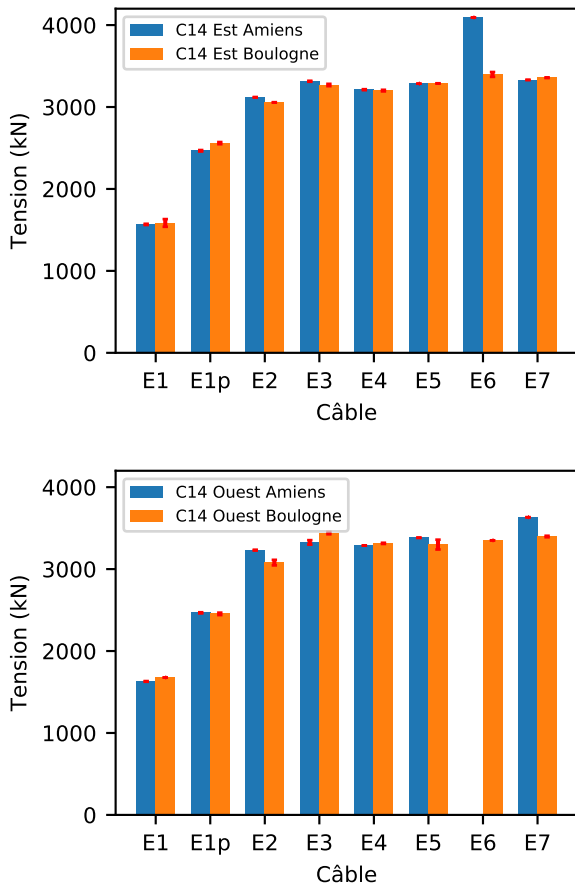


FIGURE 7 – Tensions estimées à partir de la réponse vibratoire des câbles sur la travée testée.

Hormis pour le câble E6 côté Amiens, pour lequel la méthode n’a pas donné de résultat satisfaisant, la différence la plus importante entre les deux côtés d’un même câble est de 100 kN (soit 4% d’écart) pour le câble E1, la différence diminuant à 30 kN (1% d’écart) pour le câble E7. L’estimation de la tension montre assez peu de dispersion pour des mesures répétées au même point. Par contre, la rigidité en flexion est différente de part et d’autre du câble. La méthode assure dans l’ensemble une bonne reproductibilité.

Dans le cas du câble E6, les premières fréquences sont difficiles à détecter à l’aide de la méthode automatique. Il faut donc soit détecter manuellement les pre-

TABLE 2 – Tensions dans le fléau testé côté Est

(a) Côté Amiens				
Câble	$L$ (m)	$T$ (kN)	$EI$ (1e3 Pa.m <sup>4</sup> )	Qualité
E1	8,9	2466 ± 7	198 ± 2	3M
E1p	8,9	1567 ± 9	182 ± 2	1B,2M
E2	12,6	3119 ± 3	245 ± 1	3M
E3	16,5	3314 ± 6	236 ± 0.5	3M
E4	20,5	3211 ± 6	265 ± 1	3M
E5	24,5	3285	264	1M,2R
E6	28,4	4093	263	1M,2R
E7	32,4	3331 ± 2	208 ± 0.5	3M
(b) Côté Boulogne-sur-Mer				
Câble	$L$ (m)	$T$ (kN)	$EI$ (1e3 Pa.m <sup>4</sup> )	Qualité
E1	8,9	2559 ± 47	173 ± 4	2B,1M
E1p	8,9	1585 ± 13	165 ± 27	3B
E2	12,6	3056 ± 3	190 ± 0	3B
E3	16,5	3269 ± 14	178 ± 4	3B
E4	20,5	3200 ± 9	247 ± 2	3M
E5	24,5	3290 ± 2	264 ± 0	1B,1M,1R
E6	28,4	3398 ± 30	185 ± 6	1B,1M,2R
E7	32,4	3358 ± 4	190 ± 1	2B,1M

miers modes, soit changer la position du point de mesure pour améliorer l’observabilité des premiers modes en choisissant un point de mesure plus proche du centre du câble.

## 4 Conclusion

Le travail présenté propose une analyse fréquentielle automatisée pour la mesure de tension de câbles de pré-contrainte extérieure. Cette analyse diffère de la méthode d’essai LPC n°35 car le modèle utilisé dans le

cadre de ce travail prend en compte la rigidité en flexion des câbles. La tension et la rigidité en flexion sont déterminées par la résolution d'un problème inverse. Cette méthode augmente ainsi la précision des résultats obtenus sur les câbles courts. Par ailleurs, l'algorithme développé est opérationnel même lorsque certaines fréquences ne sont pas observables. Un seul point de mesure et un seul point d'excitation sont nécessaires afin d'estimer la tension, permettant un gain de temps considérable par rapport à la méthode d'essai LPC n°35.

La méthode développée a ainsi permis d'estimer la tension dans des câbles de précontrainte extérieure d'une travée entière d'un pont en un temps d'opération plus court que pour les méthodes existantes. Un indicateur de qualité de l'estimation de la valeur de tension a été proposé permettant, en phase de mesure, de refaire la mesure si celui-ci n'est pas satisfait. La méthode peut alors permettre de constituer rapidement une base de données des valeurs de tension pouvant être traitée ensuite par Machine Learning ou être associée à un jumeau numérique afin de mettre en évidence un éventuel endommagement des câbles de précontrainte extérieure.

## Remerciements

Nous remercions l'ASFA pour le financement de la campagne d'essais concernant l'endommagement de câbles de précontrainte extérieure réalisée sur le banc d'essais de l'UGE Nantes.

## Références

- [1] R. W. CLOUGH, J. PENZIEN et D. S. GRIFFIN. Dynamics Of Structures. 1975.
- [2] S. CHO et al. Comparative Field Study of Cable Tension Measurement for a Cable-Stayed Bridge. In : *Journal of Bridge Engineering* 18.8 (août 2013), p. 748-757.
- [3] E. CAETANO. On the Identification of Cable Force from Vibration Measurements. In : *IABSE-IASS Symposium*. London, 2011.
- [4] J. R. CASAS. A Combined Method for Measuring Cable Forces : The Cable-Stayed Alamillo Bridge, Spain. In : *Structural Engineering International* 4.4 (nov. 1994), p. 235-240.
- [5] A. CUNHA, E. CAETANO et R. DELGADO. Dynamic Tests on Large Cable-Stayed Bridge. In : *Journal of Bridge Engineering* 6.1 (fév. 2001), p. 54-62.
- [6] R. GEIER et al. Accurate Cable Force Determination Using Ambient Vibration Measurements. In : *Structure and Infrastructure Engineering* 2.1 (août 2006), p. 43-52.
- [7] Z. FANG et J.-q. WANG. Practical Formula for Cable Tension Estimation by Vibration Method. In : *Journal of Bridge Engineering* 17.1 (jan. 2012), p. 161-164.
- [8] H. ZUI, T. SHINKE et Y. NAMITA. Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method. In : *Journal of Structural Engineering* 122.6 (juin 1996), p. 651-656.
- [9] Y.-H. HUANG et al. Unified Practical Formulas for Vibration-Based Method of Cable Tension Estimation. In : *Advances in Structural Engineering* 18.3 (mars 2015), p. 405-422.
- [10] B. H. KIM et T. PARK. Estimation of Cable Tension Force Using the Frequency-Based System Identification Method. In : *Journal of Sound and Vibration* 304.3 (juill. 2007), p. 660-676.
- [11] Y. Q. NI, J. M. KO et G. ZHENG. Dynamic Analysis of Large-Diameter Sagged Cables Taking into Account Flexural Rigidity. In : *Journal of Sound and Vibration* 257.2 (oct. 2002), p. 301-319.
- [12] J. APARICIO et al. Analyse Vibratoire d'un Câble de Précontrainte Extérieure Pour Différents Niveaux, d'endommagement. In : *25ème Congrès Français de Mécanique*. Nantes, 29 août- 2 septembre 2022.