



HAL
open science

Analyse vibratoire de câbles de précontrainte extérieure pour différents niveaux d'endommagement

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

► To cite this version:

Jonas Aparicio, Gwendal Cumunel, Tien Hoang, Gilles Forêt, Yannick Jeanjean, et al.. Analyse vibratoire de câbles de précontrainte extérieure pour différents niveaux d'endommagement. Congrès Français de Mécanique, Association Française de Mécanique; Centrale Nantes; CNRS; Nantes Université; Arts et Métiers; École Navale; La Rochelle Université, Aug 2022, Nantes, France. hal-04248632

HAL Id: hal-04248632

<https://enpc.hal.science/hal-04248632>

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.

Analyse vibratoire de câbles de précontrainte extérieure pour différents niveaux d'endommagement

J. Aparicio^a, G. Cumunel^a, T. Hoang^a, G. Foret^a, Y. Jeanjean^b, J. Castres
Saint Martin^b

a. Laboratoire Navier, UMR 8205, École des Ponts, Univ. Gustave Eiffel, CNRS, Champs-sur-Marne,
France - jonas.aparicio@enpc.fr

b. Sanef, Issy les Moulineaux, France

Résumé :

La précontrainte extérieure est une technique de construction largement utilisée depuis les années 1980 pour les grands ouvrages de génie-civil, permettant de réduire les sections des structures et par là même leur charge permanente, et plus récemment pour renforcer des structures.

Les câbles de précontrainte extérieure sont composés de torons comportant chacun sept fils à très haute limite élastique mis en œuvre dans une gaine PEHD et ancrés dans des blocs en béton armé. Ils sont généralement tendus à 80 % de leur limite de rupture (hors fluage et retrait). Une injection au coulis de ciment dans les gaines était réalisée pour la protection des câbles jusque dans les années 2000. Or, ce type de protection ne permet pas de préserver les câbles en cas de défaillance de la gaine (défaut d'étanchéité, déchirures etc.) ou de défaut d'injection. Dès lors la durabilité du câble n'est plus assurée et une corrosion sous tension peut survenir, pouvant générer la rupture de fils et de torons. Lors des ruptures des fils ou torons, un réancrage s'opère par frottement entre le coulis et les fils ou torons, ce qui a pour effet de maintenir la tension du câble et de porter la portion de câble endommagée à sa limite à la rupture. La rupture du câble est alors très brutale, dégageant une énergie considérable pouvant mettre en danger la structure et d'éventuels opérateurs présents sur site. La détection du niveau de dégradation d'un câble avant sa rupture est donc de première importance pour les gestionnaires d'ouvrages.

Plusieurs câbles de 46,6 m de longueur entre appuis ont été testés sur le site de l'UGE Nantes et amenés jusqu'à la rupture par découpe progressive des fils composant les torons. Trois câbles comprenant un seul toron de sept fils ont été testés dans un premier temps. Les câbles ont été tendus à 0.70 Frq, correspondant aux tensions résiduelles usuelles observées sur ouvrage réel après retrait et fluage. Des dispositifs d'excitation ont permis de solliciter les câbles afin de mesurer leur réponse vibratoire à l'aide d'accéléromètres. Au fur et à mesure des ruptures des fils, des variations des fréquences propres sont observées et utilisées afin de caractériser l'état du câble.

Abstract :

External prestressing is a construction technique widely used since the 1980s for large civil engineering structures. This technique is used to reduce the cross-sectional area of structures, and thus their permanent load, and more recently to reinforce structures.

External prestressing tendons are composed of strands, each comprising seven wires with a very high elastic strength, laid in a HDPE sheath, anchored in reinforced concrete blocks and generally tensioned to 80 % of their tensile strength (excluding creep and shrinkage). For the protection of the cables, cement grout has been injected into the sheaths until the 2000s. However, this protection does not make it possible to preserve the cables in case of failure of the sheath (leakage, cracking, etc.) or injection default. The durability of the cable is therefore no longer guaranteed and stress-corrosion can occur. Because of the re-anchoring by friction in the grout of the wires and strands broken by corrosion, the stress of the damaged area of the cable increases until its breaking limit is reached. The fracture is then very sudden, releasing considerable energy that can endanger the structure and any operators present on site. Detecting the level of degradation of a cable before its fracture is therefore essential for the structure managers.

Several cables 46,6m long between supports have been tested on the site of UGE Nantes and have been brought to fracture by progressive cutting of the wires making up the strand. Firstly, three cables comprising a single strand of seven wires have been tested. The cables have been tensioned to 0.70 Frq corresponding to the usual residual stresses observed in real structures after shrinkage and creep. Excitation devices have been used in order to measure the vibration response using accelerometers. As the wires break, variations in the natural frequencies are observed and used to characterize the condition of the cable.

Mots clefs : Durabilité, Béton précontraint, Endommagement, CND, Analyse modale

1 Introduction

La précontrainte extérieure a été largement utilisée lors de la construction des grands ouvrages depuis les années 1980. Le parc d'ouvrages mis en œuvre avec cette technique demande à être surveillé car les câbles sont vieillissants. Il devient alors primordial de pouvoir caractériser l'état d'endommagement des câbles afin de pouvoir prédire leur performance résiduelle.

La rupture des câbles de précontrainte est toujours entraînée par la corrosion de l'acier des torons [3]. Cette corrosion est favorisée par des défauts d'étanchéité de la gaine, d'injection ou des problèmes de composition du coulis. La corrosion va entraîner la rupture de fils puis de torons. La tension ne va baisser que marginalement dans les câbles à chaque rupture en raison du mécanisme de réancrage. La contrainte dans chaque toron sain va alors augmenter jusqu'à la rupture du câble faisant courir des risques pour la sécurité des personnes et de l'ouvrage.

Les essais réalisés dans cette étude avaient pour objectif de mieux comprendre le phénomène de réancrage 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. L'analyse vibratoire du câble était un objectif secondaire du programme d'essais. Des câbles de 46,6 m de longueur, composés d'un seul toron protégé par gaine et injectés au coulis de ciment, ont été mis en tension et ensuite amenés à la rupture par découpe successive des fils. Le programme d'essais étant conséquent, les différents câbles ont été instrumentés avec de nombreux dispositifs de mesures (jauges, fibres optiques, systèmes d'émission acoustique, ...). La présente communication porte sur l'analyse vibratoire d'un câble pour différents niveaux d'endommagement.

2 Mise en oeuvre expérimentale

2.1 Réalisation des câbles

Les essais ont été réalisés à l'Université Gustave Eiffel de Nantes sur le banc d'essais de câble de précontrainte du département Matériaux et Structures (MAST) [2]. Le dispositif a été mis en place par la société Freyssinet.

Le toron a tout d'abord été enfilé par le chevêtre passif (Figure 1) puis dans les segments de gaine PEHD (diam. 63 mm, ép. 5,8 mm) qui sont ensuite soudés thermiquement. Lors des deux premiers essais, le choix a été fait de remplacer la gaine PEHD par une gaine transparente en partie centrale du câble afin de pouvoir suivre la fissuration du coulis. Le raccord avec la gaine transparente du premier monotoron a été réalisé avec des raccords vissables. Un évent a par ailleurs été monté sur la gaine pour permettre une meilleure qualité d'injection du coulis. Puis, les systèmes d'ancrage du câble ont été installés au niveau des deux chevêtres, un capteur de force étant présent du côté du chevêtre passif. Un vérin est alors utilisé pour mettre en tension le câble au niveau du chevêtre actif à une tension égale à 0,7 F_{rg} . La tension lue sur le capteur de force le jour de l'essai, avant découpe, est comprise entre 186 kN et 204 kN (Table 1). Enfin, le câble est injecté au coulis de ciment (Superstressement, voir Table 2).

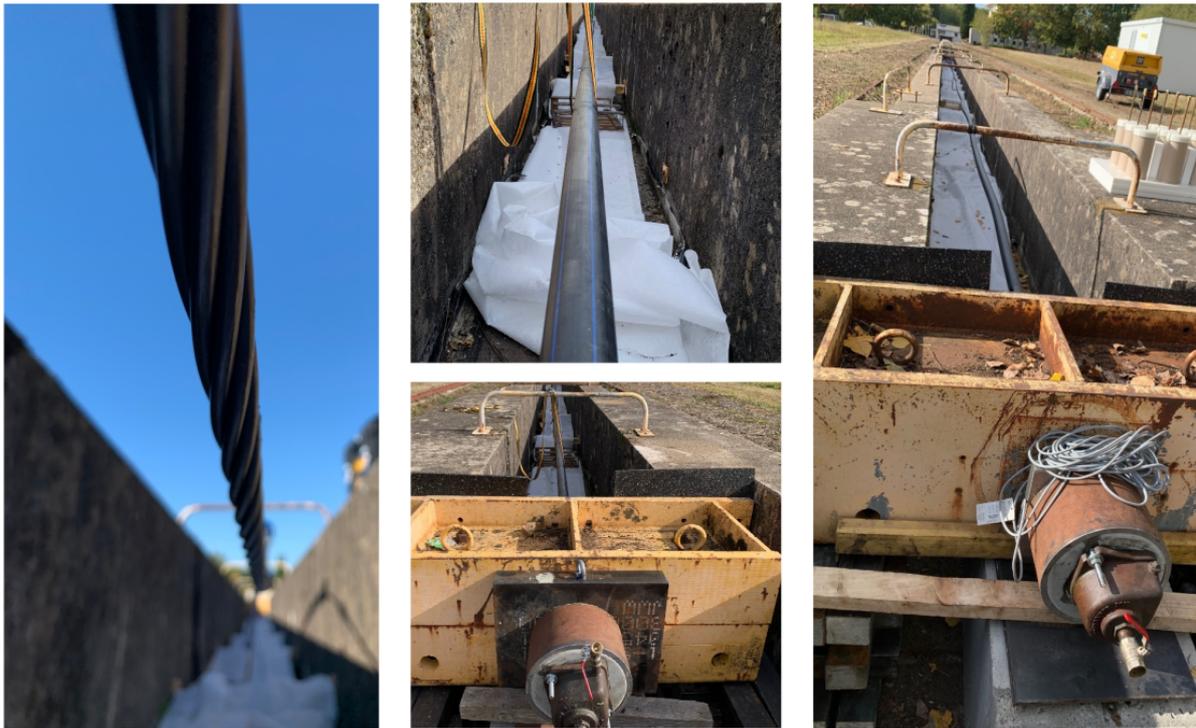


FIGURE 1 – Mise en place du premier monotoron

Câbles	Ruptures	Tension initiale	Tension avant rupture totale
Monotoron 1	5	186 kN	74 kN
Monotoron 2	6	204 kN	38 kN
Monotoron 3	3	204 kN	174 kN

TABLE 1 – Nombre de ruptures de fils avant rupture totale du câble

Les trois câbles testés ont une longueur libre de 46,6 m et la masse d'un câble est d'environ 280 kg. La

	Masse linéique (kg.m ⁻¹)	Module d'Young (GPa)	Inertie géométrique ⁴ (mm ⁴)	EI (m ⁴ Pa)
Toron T15S	1,18 ¹	200 ²	3000 ²	600
Coulis Superstressem	3,8 ²	~ 10 – 20 ²	340000 ²	~ 3500 – 7000
Gaine PEHD	1,06 ¹	1,7 ¹	430000 ¹	700
Câble	6 ³	sans objet	sans objet	4000 – 8000

¹ Fiche produit ² Estimé ³ Mesuré ⁴ Le toron est supposé parfaitement centré

TABLE 2 – Caractéristiques mécaniques des constituants du câble

zone du câble considérée comme «encastrée» à une longueur de l'ordre de 30 à 40 cm. Au regard de la longueur du câble et de la tension appliquée à celui-ci, les conditions aux limites ont été considérées comme des appuis simples.

La découpe des fils se fait toujours au même endroit, en partie centrale du câble, une semaine après l'injection (Figure 2). Pour cette découpe, une trappe est réalisée en découpant la gaine sur une longueur de 20 cm et le toron est dégagé par enlèvement du coulis au moyen d'un burin. Les fils sont ensuite coupés un par un à l'aide d'une scie rotative Dremel (Figure 2). Les mesures vibratoires sont réalisées entre chaque découpe.

FIGURE 2 – 3^e découpe du premier monotoron et 2^e découpe du troisième monotoron

Par ailleurs, pour des questions de sécurité, des dispositifs anti-fouettement du câble et anti-éjection de la tête d'ancrage ont été mis en place. Un soin important a été apporté pour faire en sorte que ce dispositif ne gêne pas la réponse vibratoire du câble.

2.2 Évolution du protocole de réalisation

Le protocole de réalisation des câbles a évolué au cours des essais :

- Les deux premiers câbles testés ont été munis d'une gaine transparente en PVC d'une longueur de 6 mètres en partie centrale du câble pour suivre le front de fissuration débouchante sur le coulis. Ces gaines se sont rompues brutalement lors de la seconde rupture de fil en raison du caractère fragile du PVC. Le choix d'une gaine PEHD sur toute la longueur du câble a été fait pour le troisième monotoron.

- La qualité de l'injection s'est aussi améliorée. Le premier câble présentait des défauts d'injection avec la présence d'une rigole de moins d'un centimètre en partie haute. Le deuxième câble était mieux injecté mais présentait un problème de centrage du toron, préjudiciable pour le phénomène de réancrage.
- Pour remédier au problème du centrage, le troisième câble a été presque intégralement supporté pendant la prise du coulis pour s'assurer que le toron reste bien centré dans la gaine.

2.3 Acquisition des mesures vibratoires

Entre chaque découpe de fil, le dispositif d'excitation fait tomber une ou plusieurs billes sur le câble afin de le solliciter (Figure 3). Généralement, trois essais ont été réalisés entre chaque découpe.

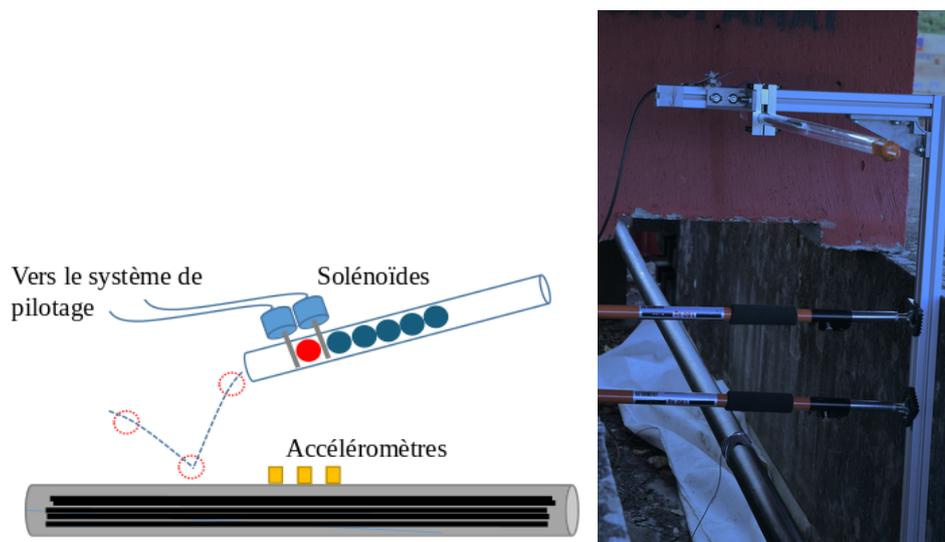


FIGURE 3 – Dispositif d'excitation par chute de bille

Sous l'effet du choc, le câble se met à vibrer et son accélération est mesurée à l'aide d'accéléromètres Brüel & Kjær (Type 4507-B-004). À partir du deuxième monotoron, les accéléromètres sont restés actifs pendant la rupture des câbles. Des essais de vibration ambiante ont également été réalisés. Les données sont acquises (durée d'acquisition de 10 secondes) grâce à des cartes d'acquisition National Instrument et traitées par un programme Labview créé pour l'occasion.

Les accéléromètres sont collés sur le câble dans les directions axiale et verticale (Table 3) à une distance comprise entre 3 m et 5 m du chevron passif. Cette position résulte d'un compromis permettant de se situer à la distance la plus proche possible d'un ancrage pour pouvoir identifier un maximum de fréquences tout en étant suffisamment éloigné pour avoir des signaux d'une amplitude raisonnable.

Câbles	Répartition capteurs
Monotoron 1	2 accéléromètres verticaux
Monotoron 2	2 verticaux, 1 horizontal et 1 axial
Monotoron 3	3 verticaux et 1 axial

TABLE 3 – Répartition des accéléromètres

L'acquisition se fait aux fréquences indiquées dans la Table 4.

En plus de l'instrumentation permettant de suivre la réponse vibratoire du câble, deux systèmes d'émission acoustique et un système de suivi des déformations du câble étaient installés. Les données mesurées

Câble	Fréquence d'acquisition	Ruptures	Ambiant
Monotoron 1	1067 Hz	Non	Non
Monotoron 2	1600 Hz	Oui	Oui
Monotoron 3	1600 Hz	Oui	Oui

TABLE 4 – Fréquences d'échantillonnage

par ces systèmes ne sont pas traitées dans ce travail.

3 Analyse vibratoire du câble

3.1 Modélisation du câble

Les câbles de précontrainte peuvent être modélisés comme des cordes vibrantes ou des poutres d'Euler-Bernoulli avec tension [1]. L'équation régissant le déplacement transverse, $v(x, t)$, d'une corde vibrante est définie par [6] :

$$\mu(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = p(x, t) \quad (1)$$

Pour le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli avec tension, l'équation est :

$$\mu(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} \right) = p(x, t) \quad (2)$$

avec $\mu(x)$ la masse linéique, T la tension, $EI(x)$ la rigidité de flexion, L la longueur du câble et $p(x, t)$ le chargement linéique.

Le câble est supposé bi-appuyé ($v(0) = 0$, $v''(0) = 0$, $v(L) = 0$, $v''(L) = 0$), les déformées modales s'écrivent alors pour les deux modèles sous la forme $\sin(n\pi \frac{x}{L})$ avec n entiers.

Les pulsations propres obtenues pour le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli avec tension sont :

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

soit

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

Les pulsations sont donc égales à la somme des carrés des pulsations obtenues, respectivement, pour le modèle de corde vibrante et pour le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli (sans tension). Le rapport entre les carrés de ces deux pulsations donne l'importance relative de la rigidité de flexion par rapport à la tension. Ce rapport est égal à $\frac{EI}{TL^2}$ [6]. Notons par ailleurs que des méthodes modales ont déjà été utilisées avec succès pour déterminer la tension de câbles sur ouvrage [1, 4].

Le câble a donc été modélisé par éléments finis en utilisant le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli avec tension. Le diamètre du câble est celui de la gaine PEHD, soit 63 mm, ce qui donne un moment quadratique égal à $7,73 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$. La masse volumique équivalente vaut $1924,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Le nombre d'éléments finis utilisés pour mailler le câble est égal à 1000, soit une longueur de 4,66 cm pour un élément. Pour rappel, la longueur du câble est égale à 46,6 m. Les paramètres restants du modèle, la tension et le module d'Young équivalent du câble, ont été recalés à partir des fréquences propres du câble à l'état sain

(Etat 0) identifiées expérimentalement. La première fréquence propre expérimentale ($f_1=1,906$ Hz) a été utilisée pour recalibrer la tension et la valeur obtenue est égale à 187,5 kN. La valeur du module d'Young équivalent a été déterminée en minimisant la moyenne des erreurs relatives entre les fréquences propres identifiées expérimentalement et celles issues du modèle numérique pour l'intervalle [0 - 100] Hz. Le module ainsi obtenu vaut 4,9 GPa.

Il faut noter que la variation de masse au centre du câble due à l'enlèvement du coulis, nécessaire pour la découpe du câble, a été prise en compte dans le modèle. La Figure 4(a) illustre les résultats obtenus dans ce cas pour l'évolution des fréquences en fonction de l'ordre du mode (à gauche) ainsi que pour l'évolution de f_n^2/n^2 en fonction de n^2 (à droite). Pour l'évolution de f_n^2/n^2 en fonction de n^2 , la courbe obtenue pour l'état sain donne bien une droite, conformément à l'équation (4), alors que celle obtenue pour le cas d'une variation de masse au centre du câble donne une courbe en « marches d'escalier ». L'allure de la courbe provient de la position de la variation de masse vis à vis d'un noeud ou d'un ventre des différents modes. Si la variation de masse est située au ventre d'un mode l'effet sera maximal et il sera minimal si la variation est située au noeud d'un mode. La Figure 4(b) représente la dérivée, par rapport à n^2 , de la courbe en « marches d'escalier » et permet de montrer que l'effet de la variation de masse est plus important pour les premiers modes.

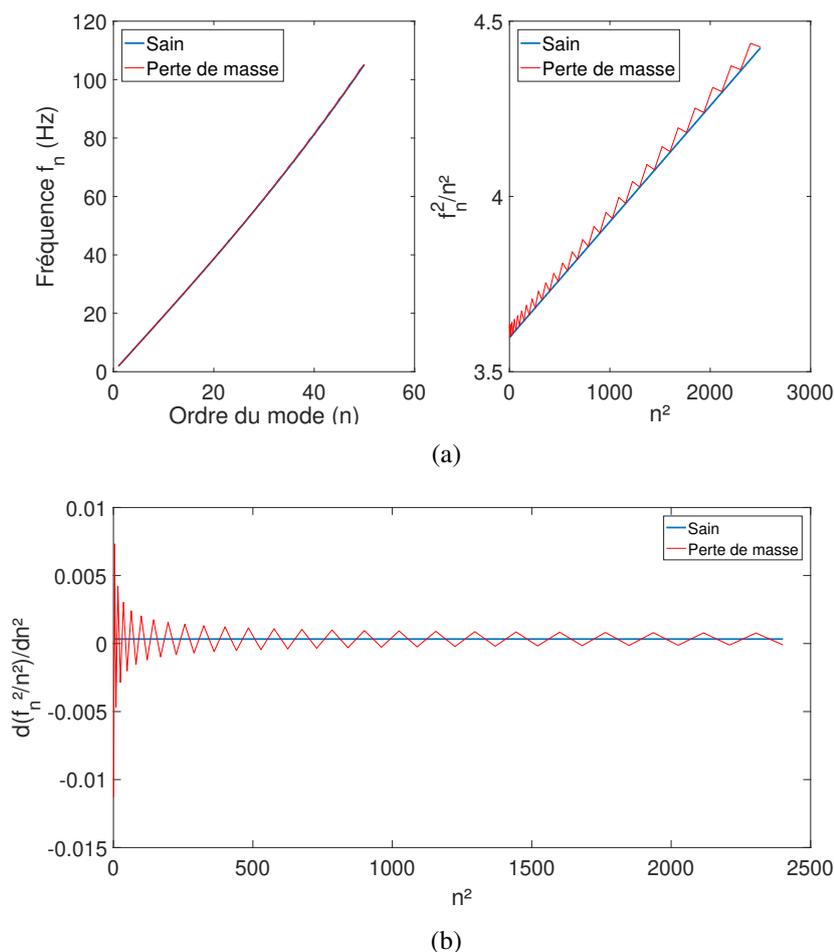


FIGURE 4 – Impact d'une perte de masse au centre du câble, modélisé par éléments finis, sur l'évolution des fréquences

3.2 Post-traitement des signaux de mesure

Les signaux traités dans cette étude sont ceux obtenus à partir de deux accéléromètres verticaux situés entre 3 m et 5 m du chevêtre passif du 3^e monotoron. Nous nous sommes concentrés sur ce monotoron car c'est celui pour lequel la mise en oeuvre a permis d'obtenir un mécanisme de réancrage représentatif des câbles de précontrainte extérieure sur ouvrage. La Figure 5 présente les signaux temporels obtenus à partir de ces accéléromètres suite à un choc dû à la chute d'une bille sur le câble à l'état sain (Etat 0), ainsi que les modules des transformées de Fourier correspondantes. L'état du câble lorsqu'un fil a été coupé est appelé Etat 1 et ainsi de suite lorsque d'autres fils sont coupés (Etat 2 pour deux fils et Etat 3 pour trois fils).

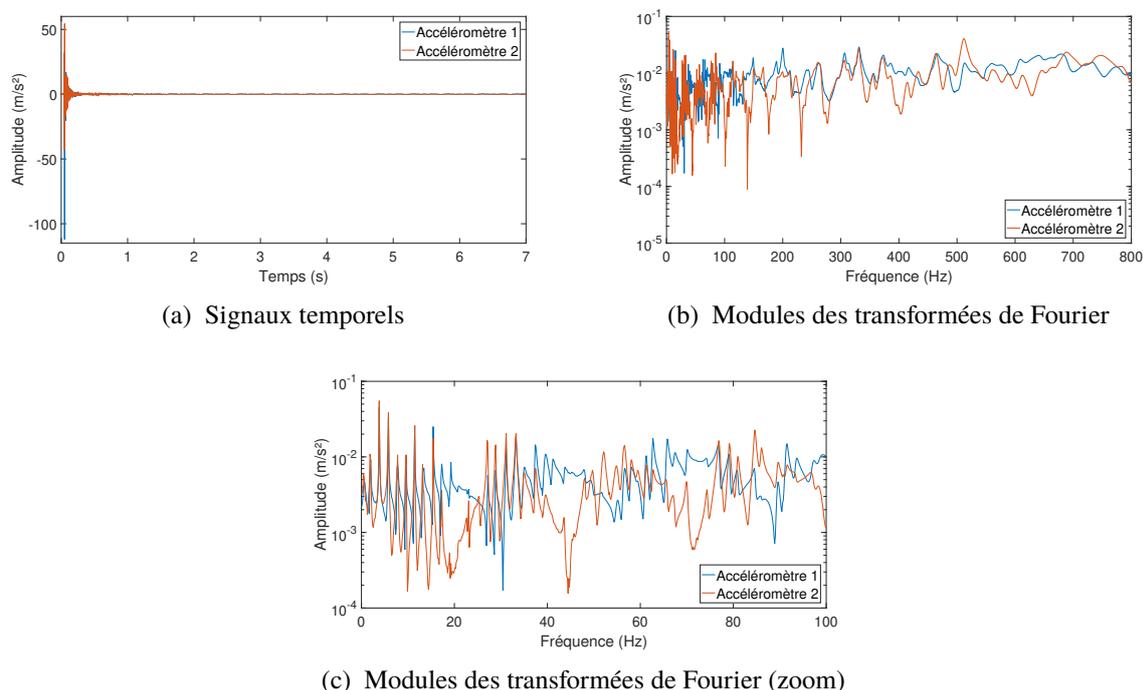


FIGURE 5 – Excitation par bille du 3^e monotoron à l'état sain

Le zoom des modules des transformées de Fourier sur la plage [0 - 100] Hz permet de se rendre compte de la densité modale importante obtenue pour le câble. La modulation en amplitude des modules des transformées de Fourier est due au positionnement des capteurs ainsi qu'à celui de l'excitation par bille.

A partir de la somme des modules des transformées de Fourier des capteurs, les fréquences potentiellement identifiables sont sélectionnées. Ensuite, une méthode d'identification modale fondée sur la transformée en ondelettes continues est utilisée afin d'obtenir les paramètres modaux des différents modes. Pour plus de détail sur la méthode d'identification modale se référer à [7].

La Figure 6 illustre les modules de la transformée en ondelettes obtenus pour différents modes pour l'un des deux capteurs : (a) 2^e mode, (b) 3^e mode, (c) 8^e mode et (d) 19^e mode. Les arêtes ou fréquences instantanées obtenues pour les deux capteurs sont également représentées sur les figures correspondant aux différents modes, ainsi que les hyperboles (en gras) définissant le domaine non soumis aux effets de bords (entre les deux hyperboles), qui est utilisé pour calculer les paramètres modaux. Les fréquences instantanées obtenues ne sont pas toujours très linéaires ce qui rajoute de l'incertitude sur l'identification des fréquences propres du câble.

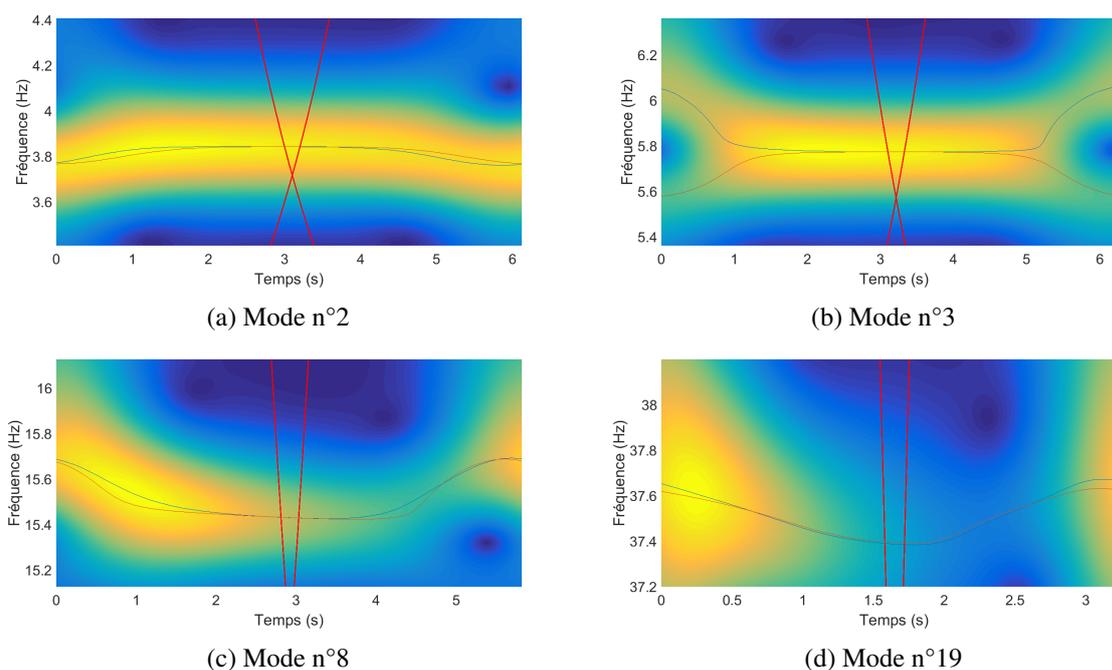


FIGURE 6 – Modules de la transformée en ondelettes et fréquences instantanées obtenus à partir des signaux des accéléromètres pour différents modes du câble à l'état sain

Pour chaque état, hormis pour l'état sain pour lequel un seul essai était exploitable, trois essais ont été analysés afin d'obtenir les valeurs des fréquences propres des différents modes. Les mesures avec l'excitation par bille avaient une bonne répétabilité. La plage de mesure des accéléromètres utilisés ainsi que le moyen d'excitation choisi (assez léger) rend cependant difficile l'identification des premières fréquences du câble qui sont très peu présentes dans les signaux de mesure obtenus. Généralement, la première fréquence propre identifiée exploitable est la 4^e ou 5^e fréquence.

De plus, s'il est relativement aisé d'identifier l'ordre du mode avec seulement deux capteurs pour les premiers modes, cela l'est beaucoup moins pour les modes plus élevés. C'est pourquoi nous nous sommes limités à la plage de fréquences [0 - 100] Hz pour l'analyse. Des fréquences propres sont identifiables au delà de 100 Hz mais l'identification de l'ordre des modes nécessite un travail complémentaire. Nous nous sommes servis du modèle éléments finis récalé afin d'identifier plus facilement l'ordre des modes.

Il faut noter également que les modes dont les nœuds correspondent au point d'excitation ainsi qu'au placement des capteurs ne sont pas détectés, le 11^e mode ainsi que le 22^e mode par exemple. Ces modes correspondent à l'emplacement du dispositif d'excitation, situé à environ 1/11^e de la longueur du câble. Les fréquences propres obtenues expérimentalement pour les modes identifiables communs à tous les états du câble sont répertoriées dans la Table 5. Les valeurs répertoriées sont les moyennes des valeurs obtenues pour les deux accéléromètres pour les différents essais.

3.3 Détection de l'endommagement

Différentes techniques existent pour déterminer l'endommagement d'un câble [2], par exemple, la méthode impact-écho pour détecter les vides dans les câbles dans un massif, la réflectométrie ultrasonore pour détecter les ruptures proches de l'ancrage et, plus récemment, la méthode d'auscultation par fuite magnétique.

Mode	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°14	n°15	n°16	n°17
Etat 0	9.57	11.47	13.22	15.43	17.26	27.12	28.84	31.12	33.22
Etat 1	9.51	11.40	13.15	15.36	17.14	26.97	28.66	30.96	33.06
Etat 2	9.44	11.25	13.01	15.15	16.81	26.59	28.30	30.57	32.64
Etat 3	8.64	10.70	12.54	14.40	16.12	25.43	27.11	29.26	31.11

Mode	n°19	n°31	n°32	n°35	n°38	n°39	n°40	n°41
Etat 0	37.39	61.20	62.69	69.99	76.90	79.15	80.93	84.61
Etat 1	37.21	60.77	62.33	69.48	76.44	78.61	80.41	84.04
Etat 2	36.67	60.09	61.62	68.83	75.61	77.81	79.54	83.25
Etat 3	35.12	58.28	60.29	67.01	74.40	76.49	79.28	81.52

TABLE 5 – Fréquences propres (en Hz) obtenues expérimentalement pour les modes identifiables communs à tous les états du câble

Une méthode de détection d'endommagement a été développée au laboratoire [5] pour un câble modélisé par une poutre d'Euler-Bernoulli avec précontrainte axiale. Afin d'étudier les variations des paramètres mécaniques entre deux états de la structure, une estimation analytique au premier ordre de la variation relative de chaque fréquence a été établie en fonction des variations relatives de la densité linéique, de la rigidité en flexion et de la tension. Grâce à cette estimation, une méthode de localisation et de quantification de la modification à partir de deux essais a été proposée. Cette méthode permet de localiser la modification structurelle seulement à l'aide des premières fréquences propres de la structure après modification, l'état de référence étant supposé bien connu.

Nous avons tenté d'appliquer cette méthode en utilisant les fréquences propres identifiées pour le câble pour les différents états (Table 5). La méthode s'est avérée peu concluante tant sur la localisation que sur la quantification des variations relatives de la densité linéique et de la rigidité en flexion. Le fait que les toutes premières fréquences ne soient pas identifiables et que la détermination des fréquences identifiées puisse être entachée d'une incertitude importante sont des raisons possibles pouvant expliquer l'échec de la méthode. Un travail numérique complémentaire sera à mener afin de mieux identifier les causes.

La quantification de la variation relative de la tension est cependant en accord avec les résultats de la Table 6 qui compare, pour les différents câbles (monotoron 1 à 3), la variation de la tension mesurée par le capteur de force à la variation de la fréquence fondamentale estimée en moyennant les cinq premières fréquences propres identifiées divisées par l'ordre du mode correspondant. Comme les premières fréquences propres suivent le modèle de la corde vibrante, l'impact de la rigidité en flexion étant très faible, cela permet d'obtenir une estimation de la première fréquence propre du câble.

Des problèmes rencontrés lors de la réalisation des deux premiers essais ont eu pour conséquence un réancrage moins important que celui attendu par les acteurs du domaine de la maintenance des câbles. La tension a ainsi beaucoup plus chuté lors des ruptures de fils pour les deux premiers essais que pour le troisième essai mieux réalisé (Table 6). La Table 6 permet ainsi d'observer la relation entre la variation de tension du câble, la variation de l'estimation de la fréquence fondamentale et le niveau d'endommagement du câble.

Nous avons ensuite cherché à comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques obtenus à partir du modèle éléments finis du câble. La Figure 7 présente, pour l'état sain, l'évolution des fréquences propres identifiées en fonction de l'ordre du mode ainsi que la fonction f_n^2/n^2 et sa dérivée (par rapport à n^2). Les allures des courbes obtenues expérimentalement sont très similaires à celles obtenues à partir

	Etat 0 (Sain)	Etat 1	Etat 2	Etat 3
Monotoron 1	100%	98%	92%	78%
Monotoron 2	100%	98%	87%	71%
Monotoron 3	100%	99%	96%	85%

Suivi de la tension

	Etat 0 (Sain)	Etat 1	Etat 2	Etat 3
Monotoron 1	100%	99%	96%	88%
Monotoron 2	100%	99%	94%	85%
Monotoron 3	100%	100%	98%	90%

Évolution de la fréquence fondamentale estimée

TABLE 6 – Correspondance entre tension et fréquence fondamentale estimée

du modèle numérique (Figure 4).

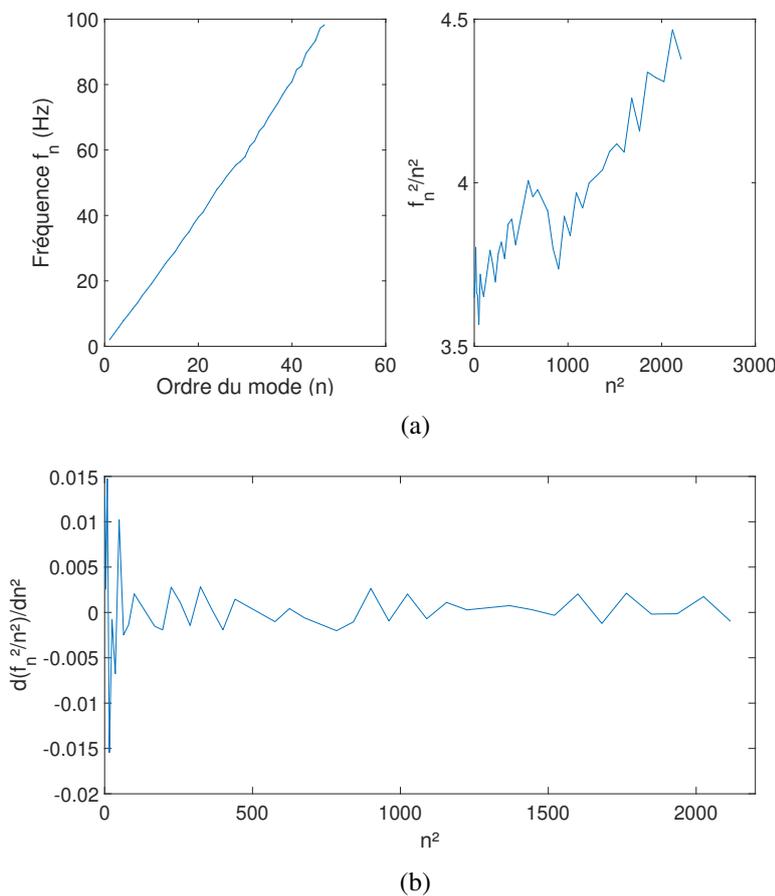


FIGURE 7 – Fréquences propres obtenues expérimentalement pour l'état sain du câble et représentation de la fonction f_n^2/n^2 et de sa dérivée (par rapport à n^2)

Dans l'hypothèse où le comportement du câble suit celui du modèle d'une corde vibrante, la fonction f_n^2/n^2 doit être une droite horizontale dont la valeur est égale à $\frac{T}{\mu} \left(\frac{1}{2L}\right)^2$ (Eq.(4)). Ce n'est pas le cas ici (Figure 7(a), à droite), ce qui valide l'utilisation du modèle de poutre d'Euler-Benoulli avec tension pour décrire le comportement du câble. Même si la valeur de la tension est très importante, il est pertinent de considérer la rigidité de flexion pour le câble.

La courbe de la Figure 7(b) quant à elle nous permet bien, de part son allure, d'identifier qu'un défaut de masse est présent au sein du câble à l'état 0. Afin d'exploiter l'expression de l'équation (4) pour caractériser l'endommagement du câble, l'évolution de la fonction f_n^2/n^2 pour les différents états du câble est calculée à partir des données de la Table 5 et représentée sur la Figure 8.

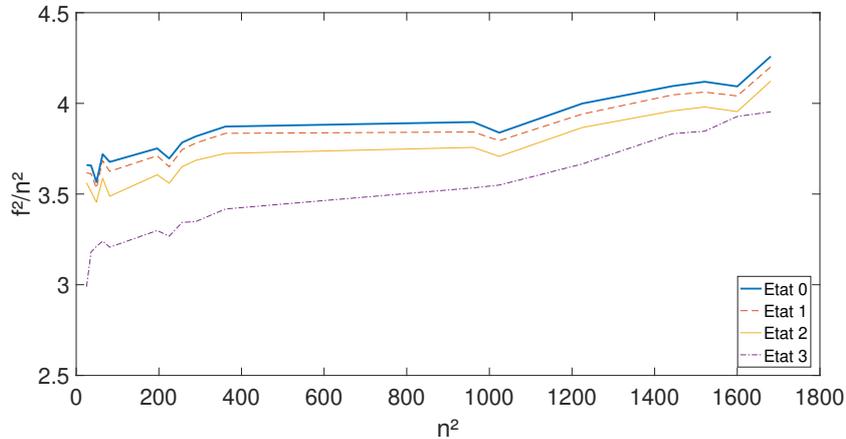


FIGURE 8 – Évolution de la fonction f_n^2/n^2 pour les différents états du câble

Les coefficients de la régression linéaire de la fonction f_n^2/n^2 ont ensuite été calculés pour les différents états et sont répertoriés dans la Table 7.

Etat	$a (\times 10^{-4})$	b	R^2
Etat 0	2,94	3,66	0,896
Etat 1	2,84	3,62	0,887
Etat 2	2,93	3,53	0,900
Etat 3	4,48	3,17	0,949

TABLE 7 – Coefficients de la régression linéaire de la fonction $f_n^2/n^2 (=a \cdot n^2 + b)$ pour les différents états du câble

On retrouve bien dans l'évolution du terme constant de la fonction f_n^2/n^2 la baisse de tension observée au niveau du capteur de force (Table 6). Le coefficient directeur de la fonction, dépendant de $\frac{EI}{\mu}$, est plus délicat à interpréter puisqu'il ne varie presque pas pour les états 0 à 2 avant d'augmenter pour l'état 3. Il est important de noter que les paramètres de rigidité en flexion EI et de masse linéique μ , considérés dans la fonction f_n^2/n^2 , sont représentatifs d'un matériau homogène pour l'ensemble du câble. Il semble ainsi difficile de pouvoir dire, sans avoir fait d'étude numérique au préalable, l'effet qu'aura une variation locale de l'un de ces paramètres sur le coefficient directeur de la fonction f_n^2/n^2 . Une étude complémentaire est donc à mener pour statuer sur la possibilité de pouvoir détecter un défaut localisé de masse ou de raideur à l'aide de ce coefficient.

4 Conclusion et perspectives

L'analyse des résultats des essais vibratoires n'a, pour l'instant, pas permis de faire le lien entre une perte de rigidité de flexion due à la rupture des fils et un critère utilisant les fréquences propres du câble. On retrouve bien cependant une relation entre la tension du câble et son niveau d'endommagement. Les résultats sont encourageants et le travail de post-traitement des signaux de mesure est à poursuivre. Le

post-traitement peut être amélioré afin d'identifier davantage de fréquences propres et d'autres méthodes de détection d'endommagement peuvent être testées ou développées. Par ailleurs, toutes les données concernant les monotorons n'ont pas été traitées, notamment les signaux enregistrés pendant les ruptures de fils. Ces signaux devraient sans doute permettre une meilleure identification des premiers modes, l'excitation due à la rupture d'un fil étant beaucoup plus énergétique que celle des billes utilisées lors des essais.

Une campagne d'essais sur des câbles comprenant cinq torons a été réalisée suite à cette campagne d'essais en capitalisant sur l'expérience obtenue lors de ces essais, notamment pour ce qui concerne la réalisation du corps d'épreuve. Les données mesurées lors de cette seconde campagne restent encore à traiter.

Financement

Les essais ont été financés par l'Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes (ASFSA).

Références

- [1] Elsa CAETANO. « On the Identification of Cable Force from Vibration Measurements ». In : *Proceedings of the 35th Annual Symposium of IABSE / 52nd Annual Symposium of IASS / 6th International Conference on Space Structures : Taller, Longer, Lighter - Meeting growing demand with limited resources*. London, United Kingdom, juin 2011.
- [2] Jean Louis CHAZELAS et al. *Evaluer l'état de La Précontrainte : Avancées Récentes Dans Le Développement de Méthodes Non Destructives d'auscultation. Suivi de Diagnostic Des Conduits de Précontrainte Extérieure Par Sonde Capacitive*. Etudes et Recherches Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées. IFSTTAR, jan. 2012.
- [3] Bruno GODART. *La Pérennité Du Béton Précontraint*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, jan. 2014.
- [4] Viet Long HO et al. « Effects of Measuring Techniques on the Accuracy of Estimating Cable Tension in a Cable-Stay Bridge ». In : *Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore : Springer, 2020, p. 433-445.
- [5] T.-T.-H. LE et al. « Structural changes assessment in axial stressed beams through frequencies variation ». In : *International Journal of Mechanical Sciences* 110 (2016), p. 41-52.
- [6] Thi Thu Ha LE. « Contribution à la détection, à la localisation d'endommagements par des méthodes d'analyse dynamique des modifications structurales d'une poutre avec tension : application au suivi des câbles du génie civil ». Thèse de doct. 2014.
- [7] Thien-Phu LE et Pierre ARGOUL. « Continuous wavelet transform for modal identification using free decay response ». In : *Journal of Sound and Vibration* 277.1-2 (2004), p. 73-100.