



IMG C

LA DURABILITÉ DE LA PRÉCONTRAÎNTE EXTÉRIEURE

Journée Technique
Vendredi 27 septembre 2018
FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS



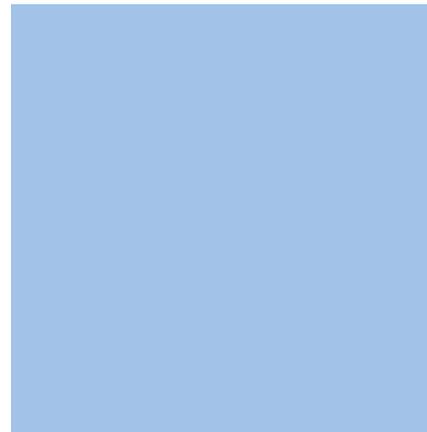
Mesures de tension résiduelle dans les câbles de précontrainte extérieure par méthode vibratoire LPC 35

Jean-Philippe MAHERAULT
et Eric HELIN (QUADRIC)



SOMMAIRE

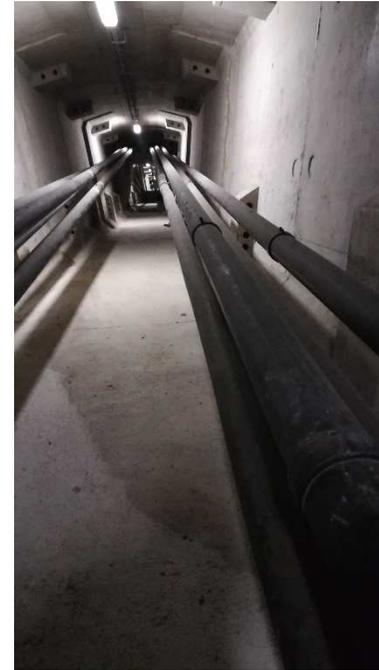
1. Généralités
2. Références
3. Déroulé de l'auscultation
4. Un peu de théorie
5. Matériel – méthodologie
6. Applications



**Mesures de tension
résiduelle dans les câbles
de précontrainte extérieure
par méthode
vibratoire LPC 35**

1 - Généralités

- Objectif
 - Effectuer la **mesure de la tension dans un câble** (il s'agit de l'effort moyen sur le tronçon de câble testé)
- Principe
 - **Exciter** le câble (choc mou)
 - **Mesurer** les fréquences vibratoires,
 - **Calculer** la tension dans le câble.



2 - Références

- Méthode d'essai LPC n°35 du Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports - janvier 1993
- Fiche C4-2 de l'IFSTTAR – Estimation de la tension des câbles par la méthode vibratoire – octobre 2015



Mesure de la tension des câbles par vibration

MÉTHODE D'ESSAI LPC N° 35

Méthodes d'auscultation de la structure - Mesures de forces

ESTIMATION DE LA TENSION DES CÂBLES PAR MÉTHODE VIBRATOIRE

PRINCIPES ET DESCRIPTIONS SOMMAIRES	
OBJECTIF	La méthode permet d'estimer la tension de câbles accrochés à une structure vibrante. Elle permet de vérifier la tension de câbles à partir d'une mesure de vibration. La relation entre les deux grandeurs est donnée par la formule suivante : $T = \frac{m \cdot f^2}{2L}$
PRINCIPE	La tension est évaluée sur la base de la fréquence fondamentale f_1 de vibration du câble en utilisant la formule : $T = \frac{m \cdot f_1^2}{2L}$ Pour un câble fonctionnant comme une corde vibrante, on note L la longueur du câble, m la masse linéique du câble en kg/m. La relation est évaluée sur la base de la fréquence fondamentale f_1 de vibration du câble en utilisant la formule : $T = \frac{m \cdot f_1^2}{2L}$ Pour un câble fonctionnant comme une corde vibrante, on note L la longueur du câble, m la masse linéique du câble en kg/m. La relation est évaluée sur la base de la fréquence fondamentale f_1 de vibration du câble en utilisant la formule : $T = \frac{m \cdot f_1^2}{2L}$
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis longtemps
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Accéléromètre de sensibilité comprise entre 0,5 et 500 mV/g Amplificateur pour accéléromètre Analyseur en temps réel de fréquence permettant de connaître immédiatement la tension de câbles à partir de la mesure de vibration.   

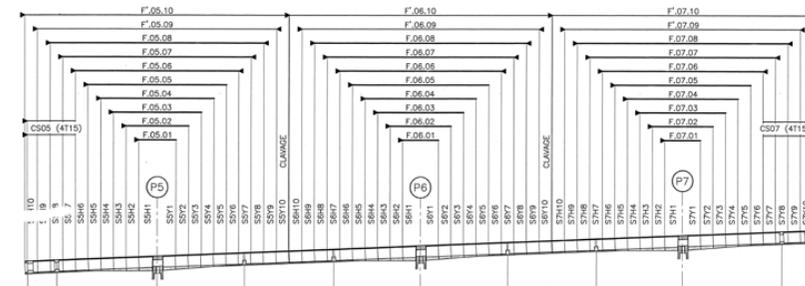
Les collections de l'Ifsttar

Octobre 2015

3 – Déroulé de l'auscultation

3-1 Préparation de l'intervention

- Récupération du **plan de précontrainte et du carnet de mise en tension** →
- Calcul de la **masse linéique** des câbles →
- Calcul de l'**inertie** du câble
- Calcul de la **longueur libre** théorique des câbles (entre déviateurs)



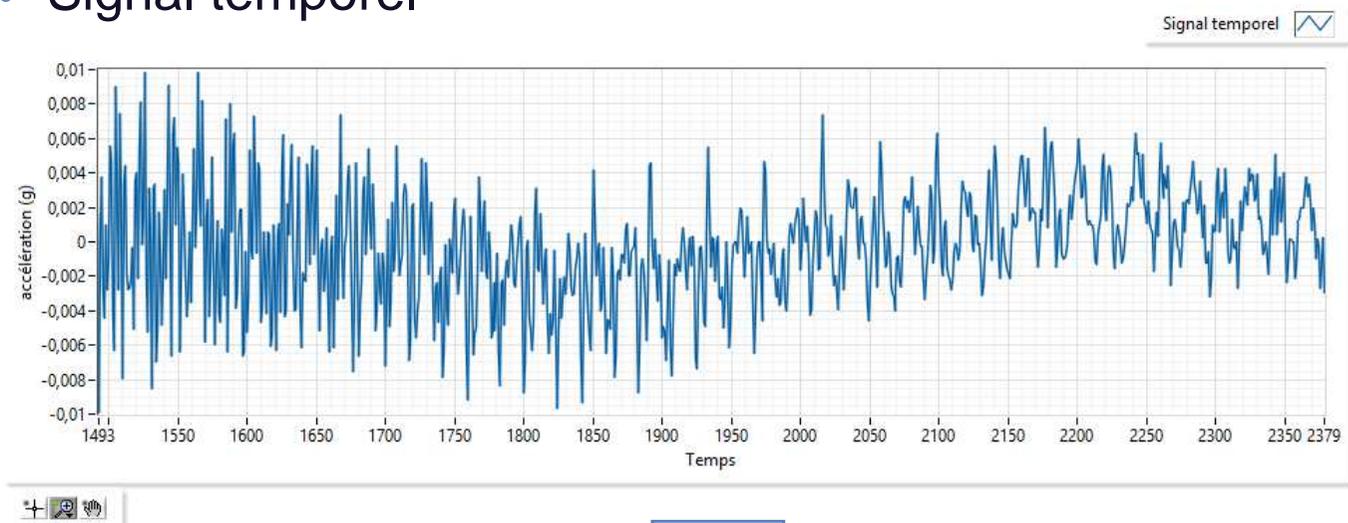
Câbles 19 T 15	
Øgaine ext (m)	0,113
Øgaine int (m)	0,097
Densité PEHD	0,95
Poids de la gaine (kg/m)	2,5
Section T 15 (m ²)	1,5E-04
Nombre de torons	19
Densité toron	7,85
Poids des torons (kg/m)	22,4
Densité coulis de ciment	1,80
Poids coulis de ciment (kg/m)	8,2
Poids du câble (kg/m)	33,1

3-2 Mesures de terrain

- Prise de mesure de la longueur libre du câble
- Pose d'un **accéléromètre** 
- **Excitation** des câbles
- **Acquisition** des mesures vibratoires (3 mesures / câbles)
- **Première analyse** et exploitation des données par transformée de Fourier (analyse fréquentielle FFT = Fast Fourier Transform) pour validation de la **qualité opératoire**

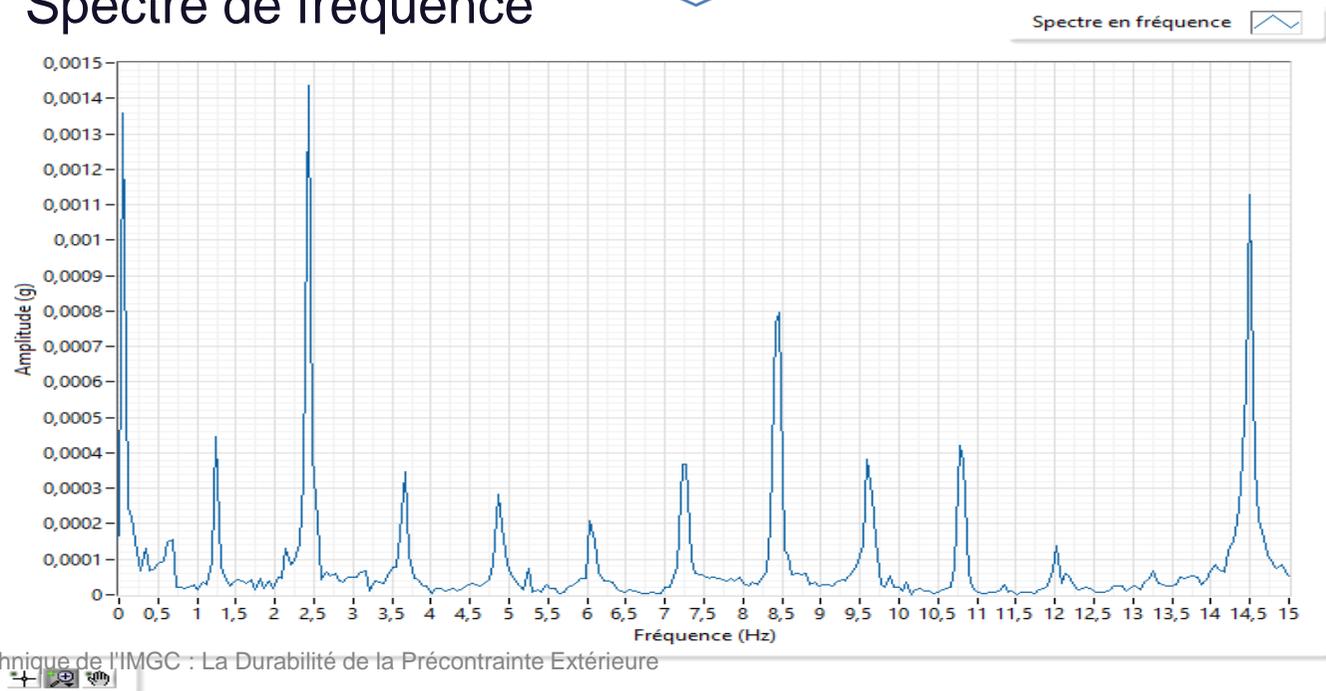


- Signal temporel



FFT

- Spectre de fréquence



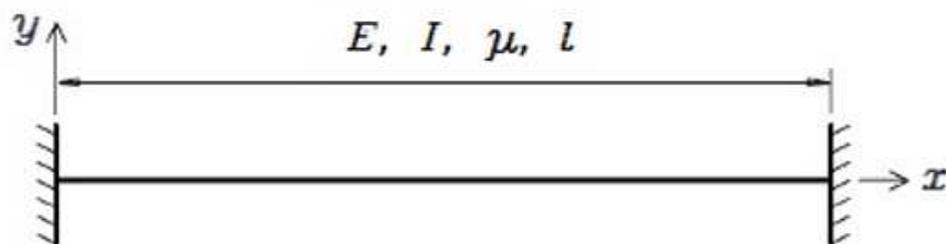
3-3 Travail de bureau

- Calcul des **fréquences propres** et des tensions résiduelles dans les câbles
- **Comparaison** avec les efforts théoriques, **analyse et conclusion.**

4 – Un peu de théorie...

4-1 Equation fondamentale pour une barre bi-encastree

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$



- **E** = module d'élasticité du câble
 - $2 \cdot 10^5$ MPa pour les fils et barres,
 - $1,9 \cdot 10^5$ MPa pour les torons
- **I** = Inertie du câble
- **μ** = masse linéique des câbles
- **l** = longueur vibrante
- **T** = tension

4-2 Calcul de la tension (résolution analytique)

Si les câbles peuvent être considérés comme des **cordes vibrantes simples** (EI faible) :

$$T = \frac{4l^2 \mu f_n^2}{n^2}$$

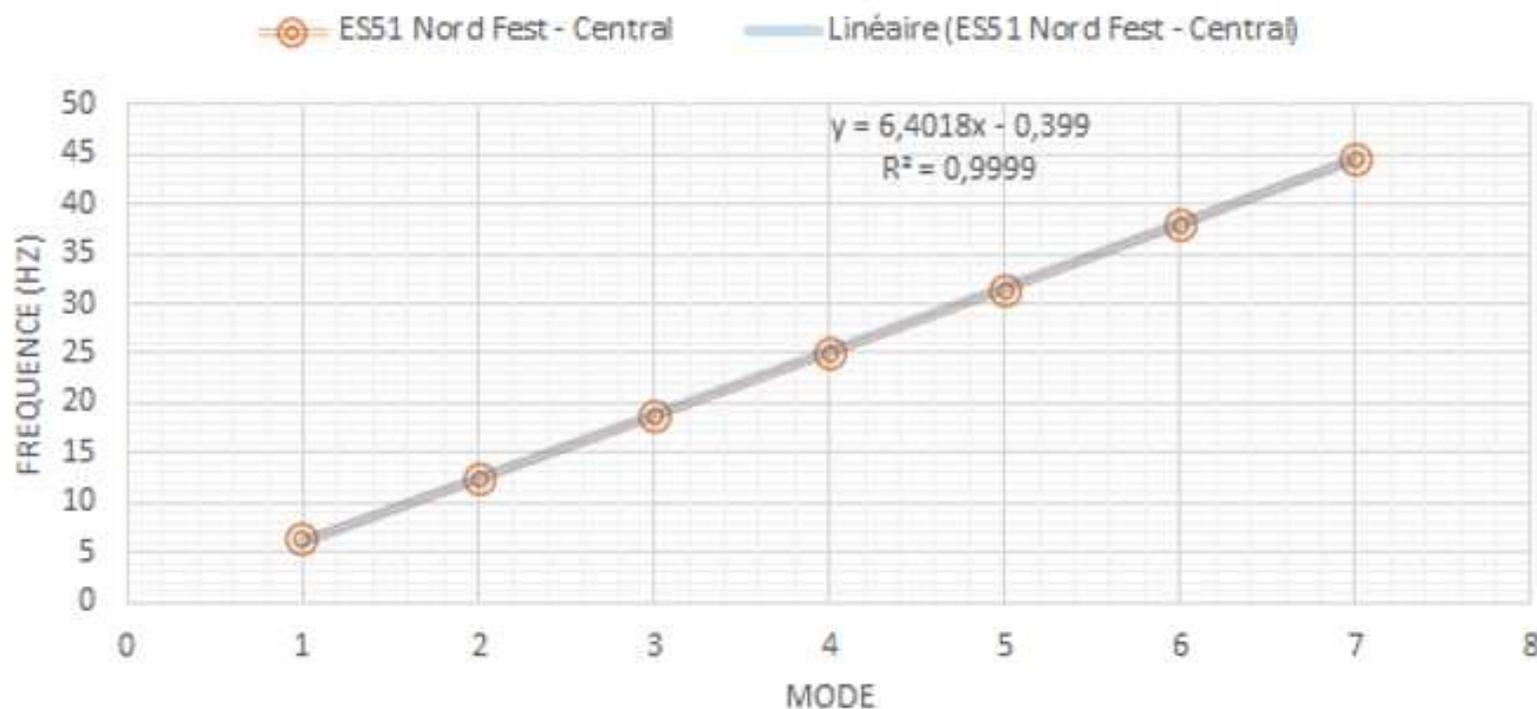
Sur la base du mode fondamental (n=1) :

$$T = 4l^2 \mu f^2$$

- f_n = fréquence du mode de vibration n (Hz)
- μ = masse linéique des câbles (kg/m)
- l = longueur vibrante (m)
- T = tension (N)

4-3 Limites du modèle

- **Cordes vibrantes simples (théorie du fil)** : si EI négligeable par rapport à TL^2 , ce qui suppose **la proportionnalité des fréquences propres mesurées jusqu'au septième mode**



4-4 Si le module de rigidité n'est pas négligeable (résolution itérative)

- Faible longueur du câble,
- Raideur importante

=> Les conditions aux limites du câble influent sur la vibration

Dans ce cas :

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \left[1 + 2R + \left(4 + \frac{n^2 \pi^2}{2} \right) R^2 \right]$$

$$\text{avec : } R = \sqrt{\frac{EI}{Tl^2}} \text{ et } n^2 \ll \frac{Tl^2}{\pi^2 EI}$$

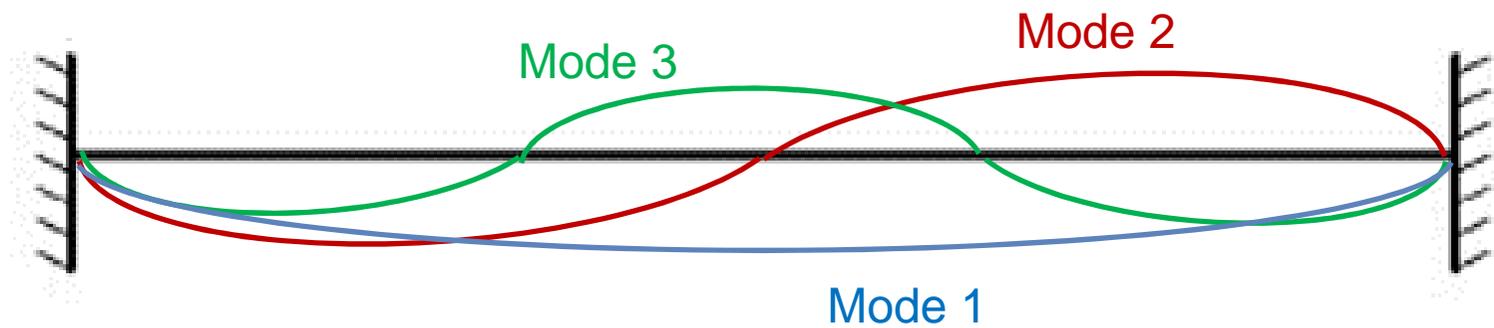
5 – Matériel - méthodologie

5-1 Matériel

- **Accéléromètres**
- **Boitier d'acquisition**
- **PC portable**



5-2 Point d'excitation



6 – Applications

6-1 Pont de Normandie

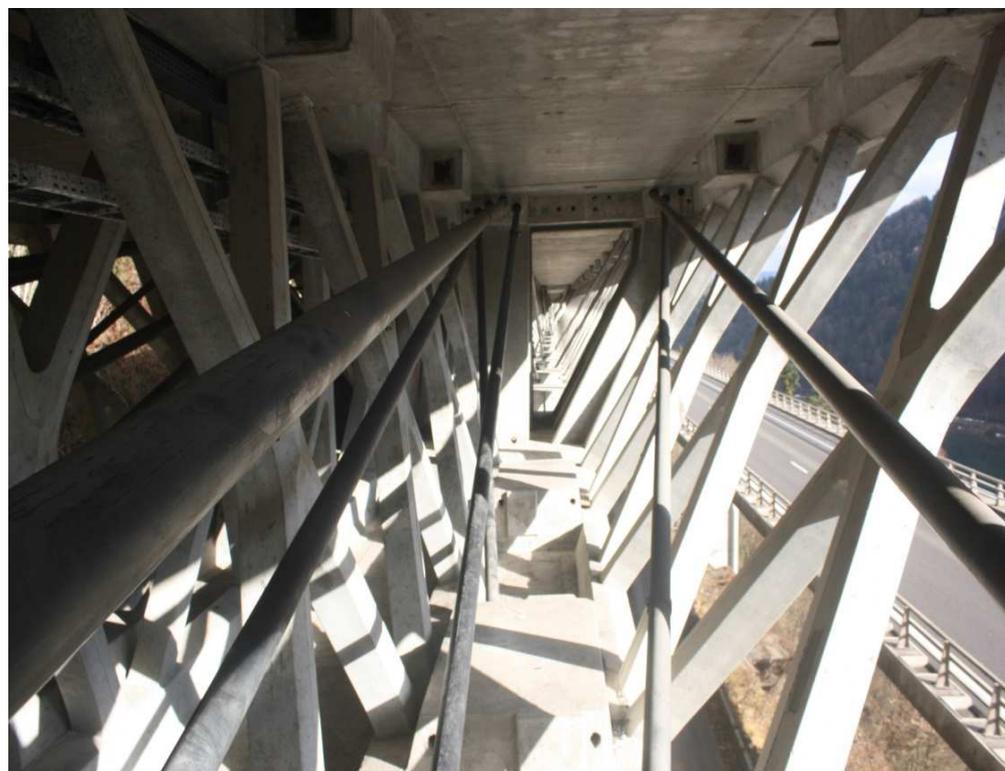


- Tronçons de câble assez courts entre déviateurs.
- Utilisation de la méthode de **résolution itérative**



6-2 Viaduc de Sylans (A40)

- Contrôle de câble après rupture
- Mesures sur les câbles présentant des défauts visuels
- Utilisation de la méthode de **résolution itérative**



6-3 Viaduc de Rogerville (A13)

- Mesures sur les câbles présentant un festonnage
- Utilisation de la méthode de **résolution analytique**

