

SHM–France 14/03/2023

**Analyse dynamique
d'un pont à haubans**

François DAVID

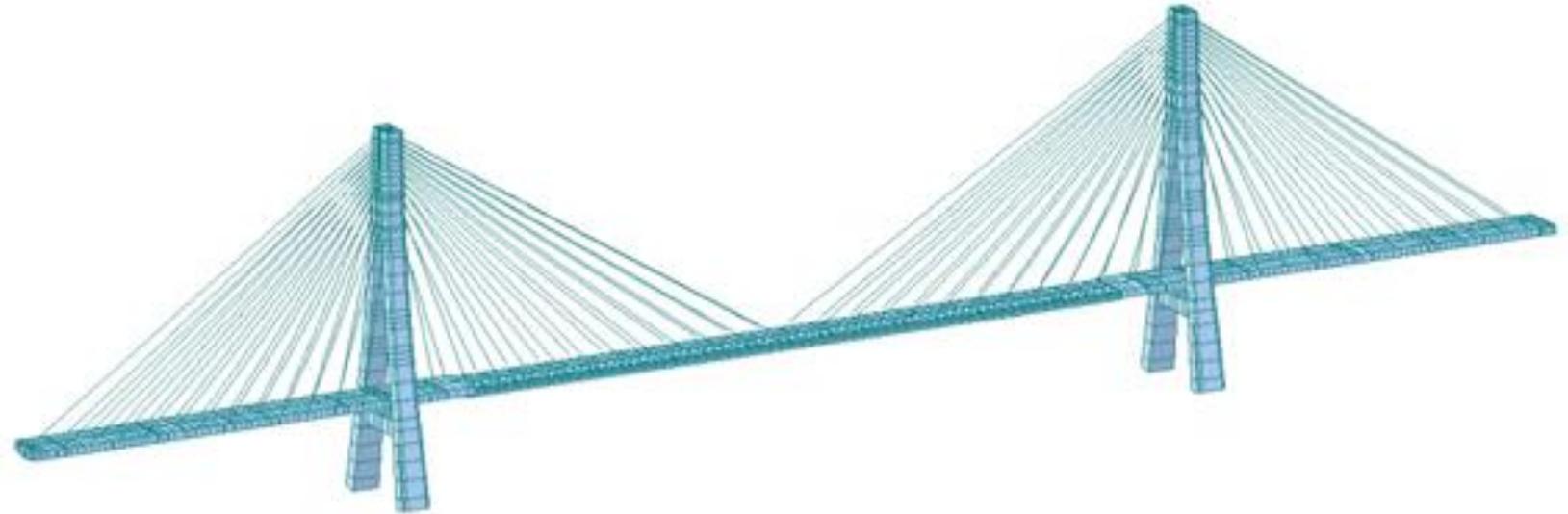
Matthieu PERRAULT



Introduction

› Pont à haubans

- Date de construction: Mid 80s
- Date d'ouverture: Mid 90s
- ~700 m de long
- 96 câbles



Introduction

› Problématiques Client

- Vibrations tablier / câbles
- Méconnaissance des tensions des câbles
- Méconnaissance origine de déformations visibles sur travée centrale
- Tenue aux conditions difficiles (ouragans)
- Système EA non effectif (trop de fausses alertes non confirmées par autres méthodes)
 - Installé depuis 2002, en cours de démontage

› Mise en œuvre S-lynks

- OMA dense des travées haubanées
- Estimation fréquences/tension/amortissement de 5 haubans par mesures de vibrations ambiantes
- Corrélation mesure de tension haubans et OMA

Quelques chiffres

› Déroulement des tests

- 20 nodes S-lynks utilisés
- 4 opérateurs
- **~1,5 jour d'acquisitions de données** pour le tablier, la tour Nord et 5 câbles.
 - voie sud fermée jour N, voie nord fermée jour N+1
- ~120 points de mesure 3 axes (XYZ), 20–60 minutes par acquisition
- > 99 % des données acquises et récupérées

› Processing OMA

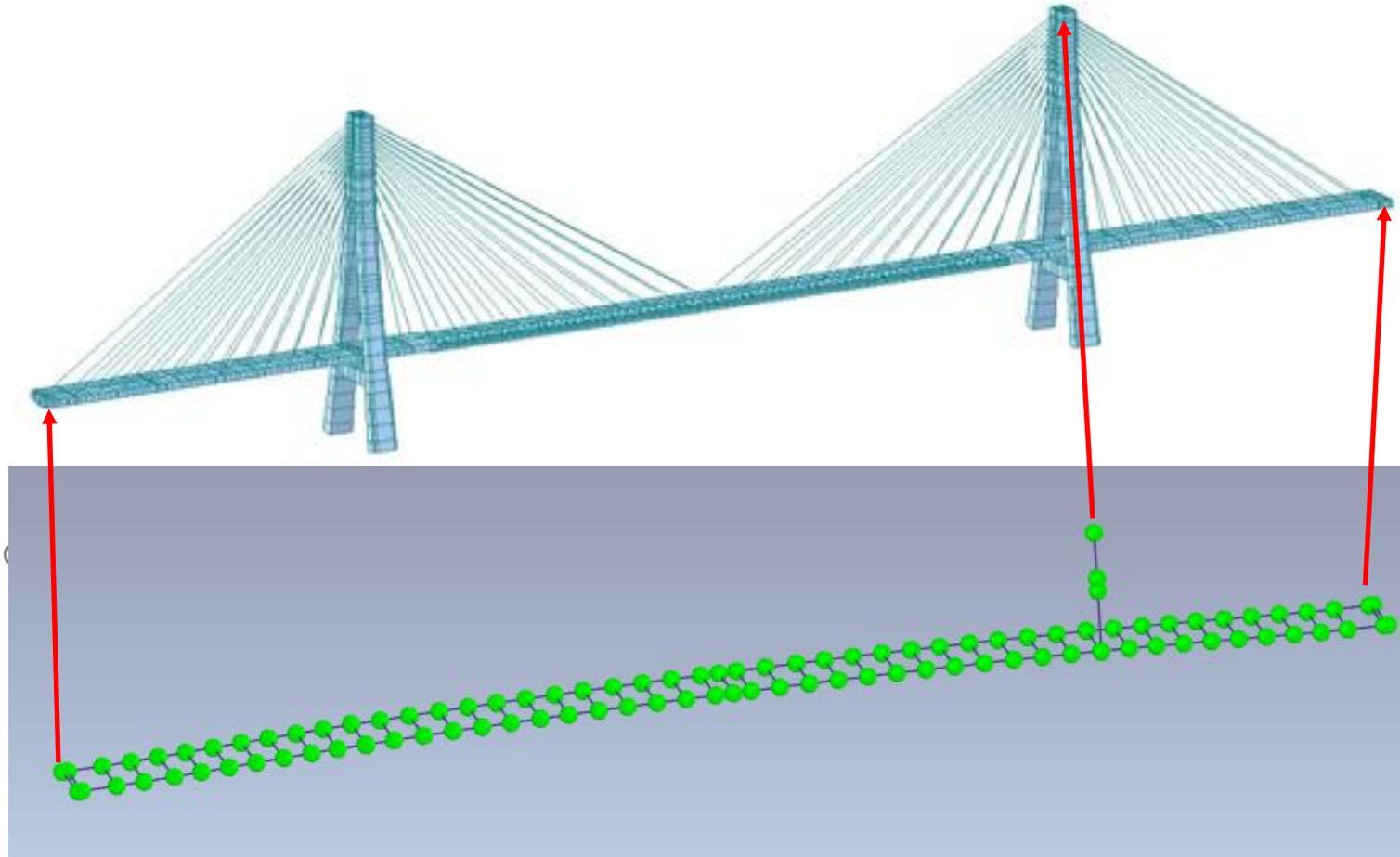
- **Quelques minutes** (incluant la récupération et conversion des données, la saisie de la géométrie du pont et le traitement des données)
- 28 modes de vibration détectés entre **0,3 Hz et 4,0 Hz** avec une bonne résolution sur les déformées modales

Auscultation par OMA

› Analyse modale Opérationnelle

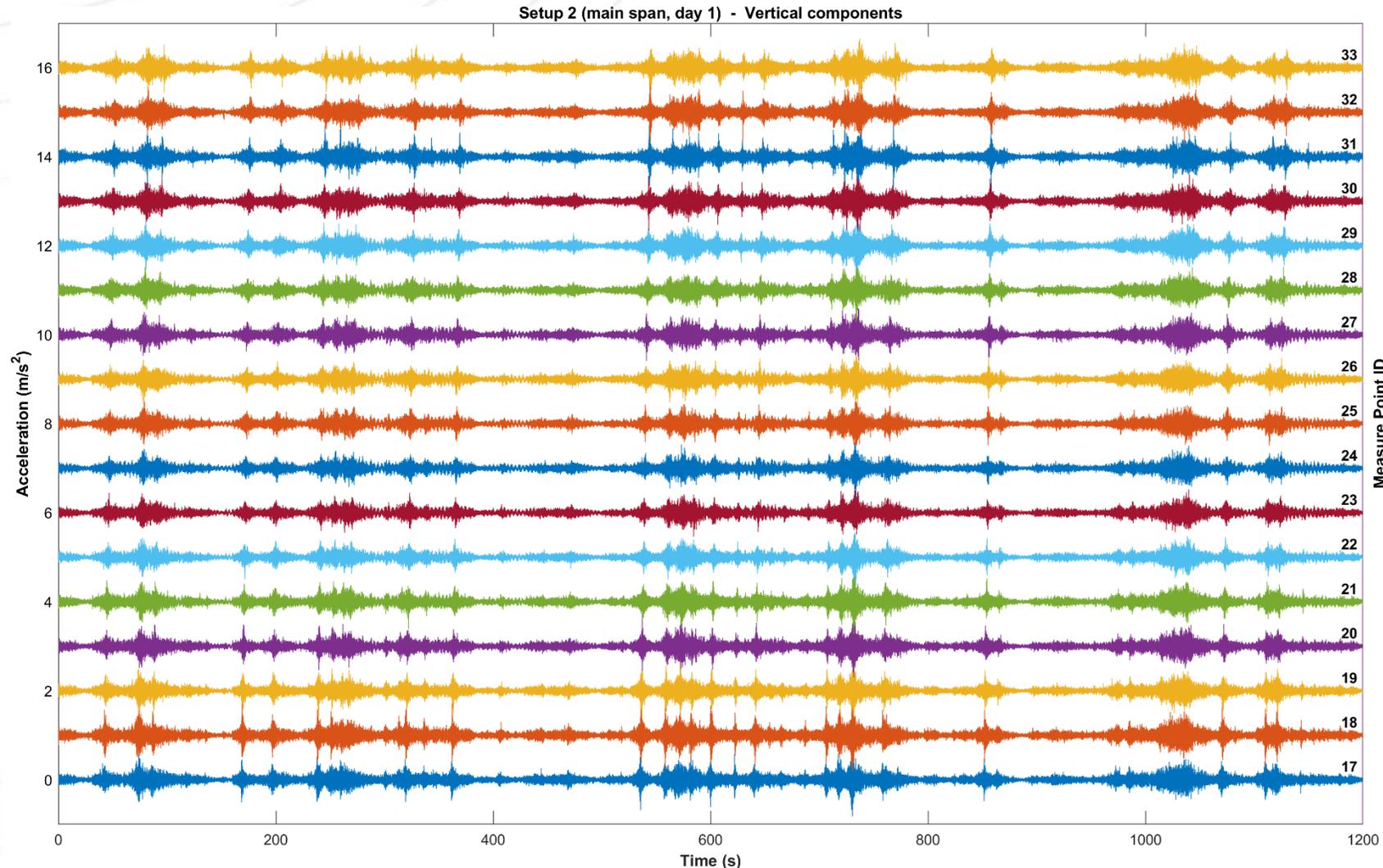
› 104 points de mesure

- 1 point tous les 15m environ
- 2 lignes de mesure
- 6 acquisitions
 - 1 node fixe, 19 nodes mobiles
 - Mesures simultanées
 - 20 minutes de mesure par acquisition
- Mesure de vibrations ambiantes
 - Sous trafic normal
- Durée :
 - 2x ½ journée de mesures



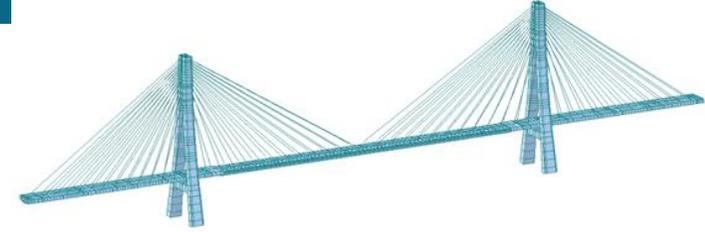
Auscultation par OMA – données brutes

› Setup 2 (day 1, main span), vertical components

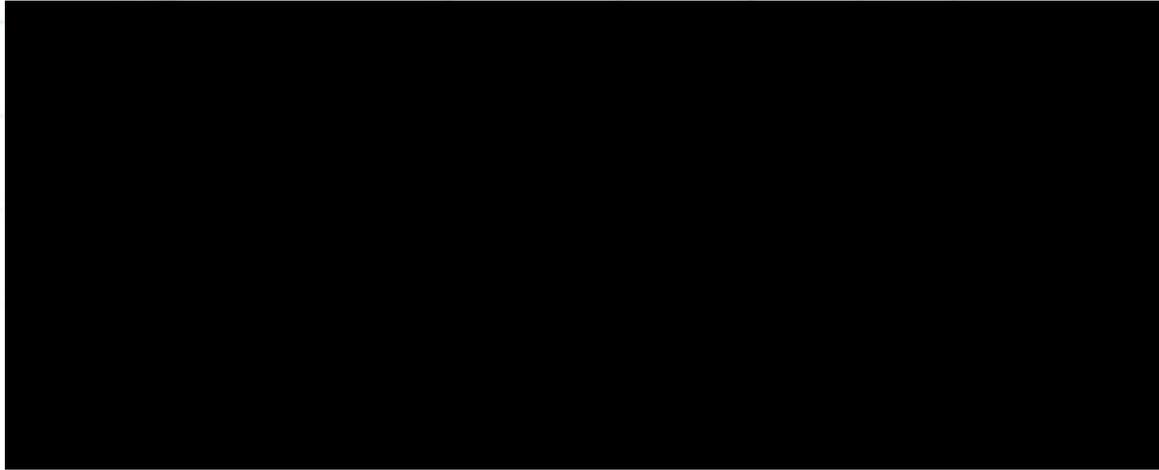


Artificial offsets have been added for plotting

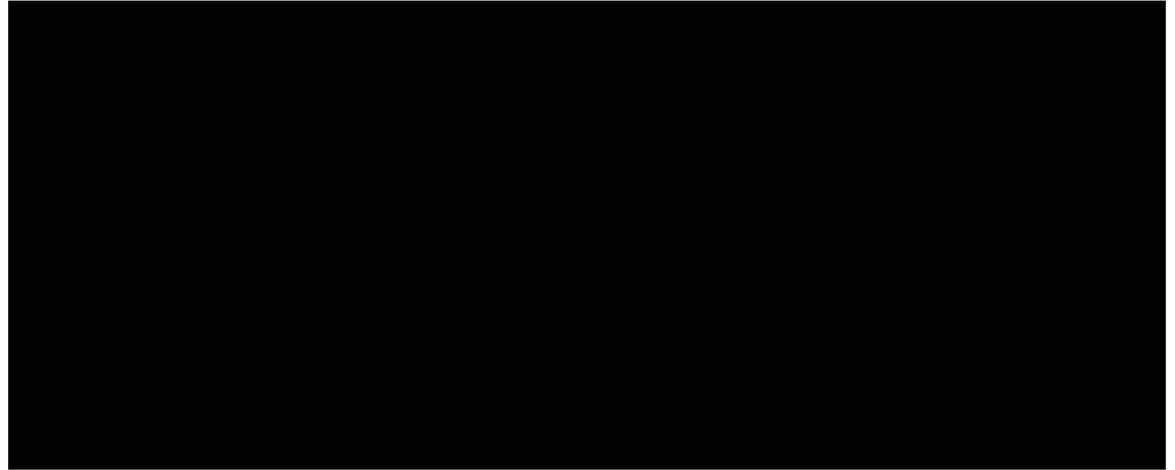
Auscultation par OMA



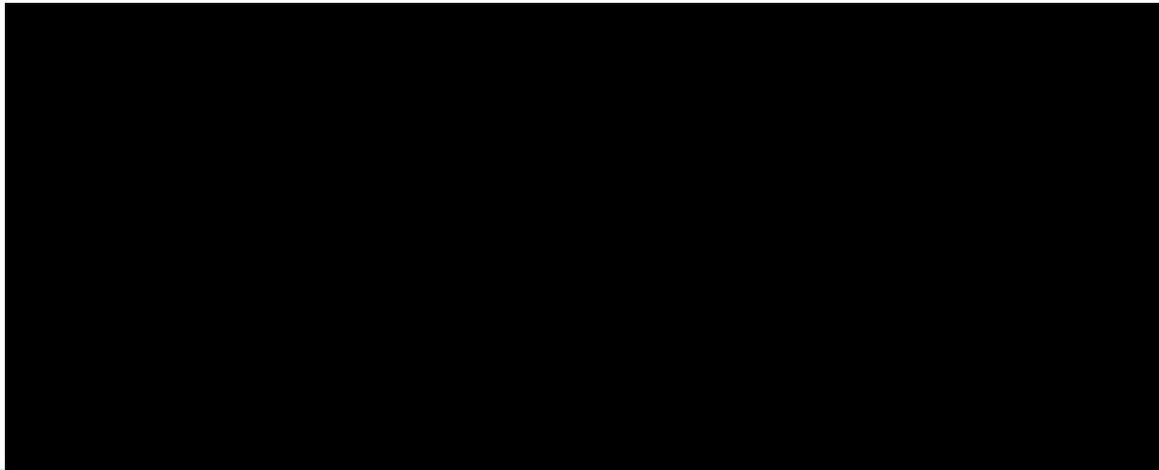
0.29 Hz – 1st vertical mode



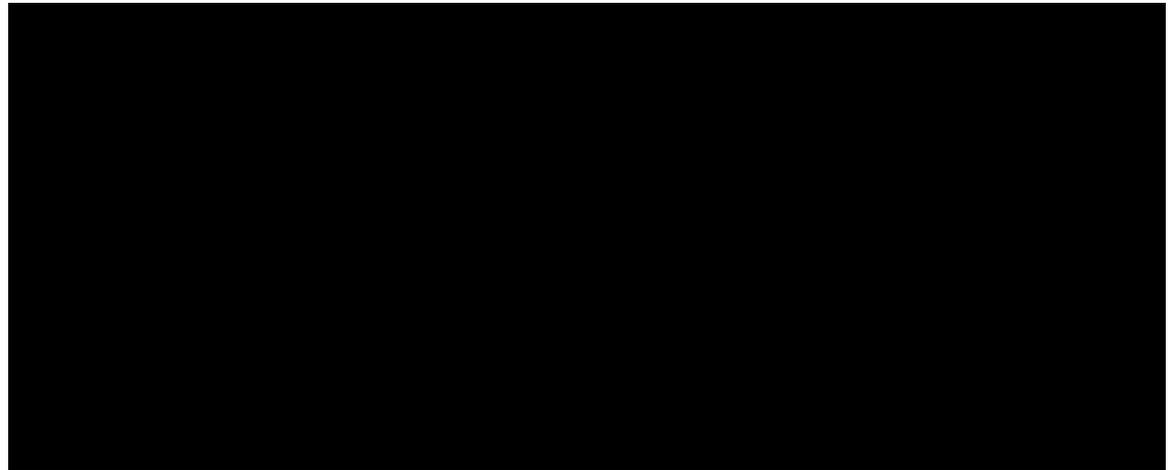
0.38 Hz – 2nd vertical mode



0.58 Hz – 3rd vertical mode



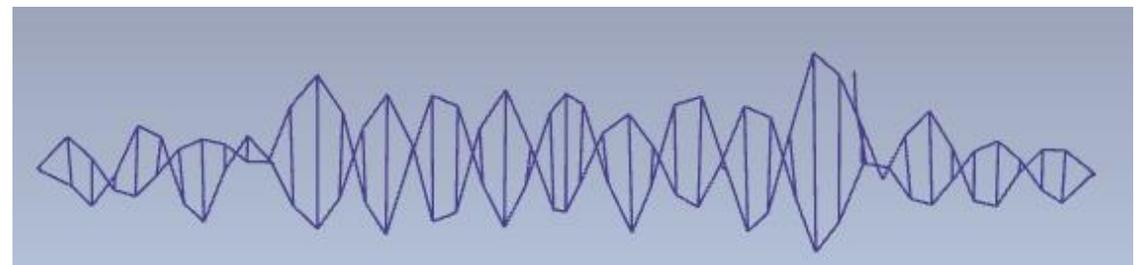
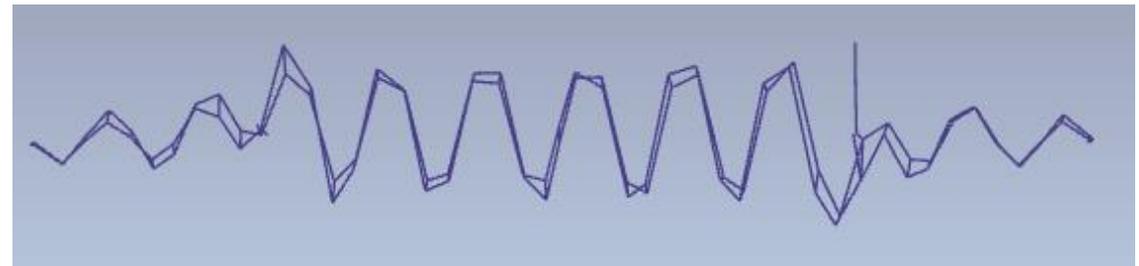
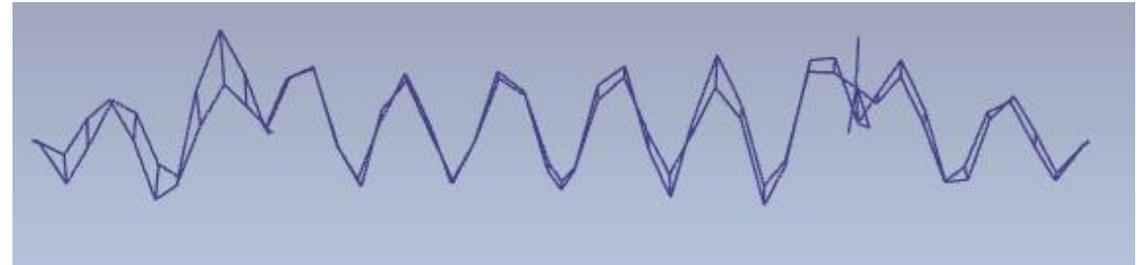
0.69 Hz – 1st torsional mode



Auscultation par OMA

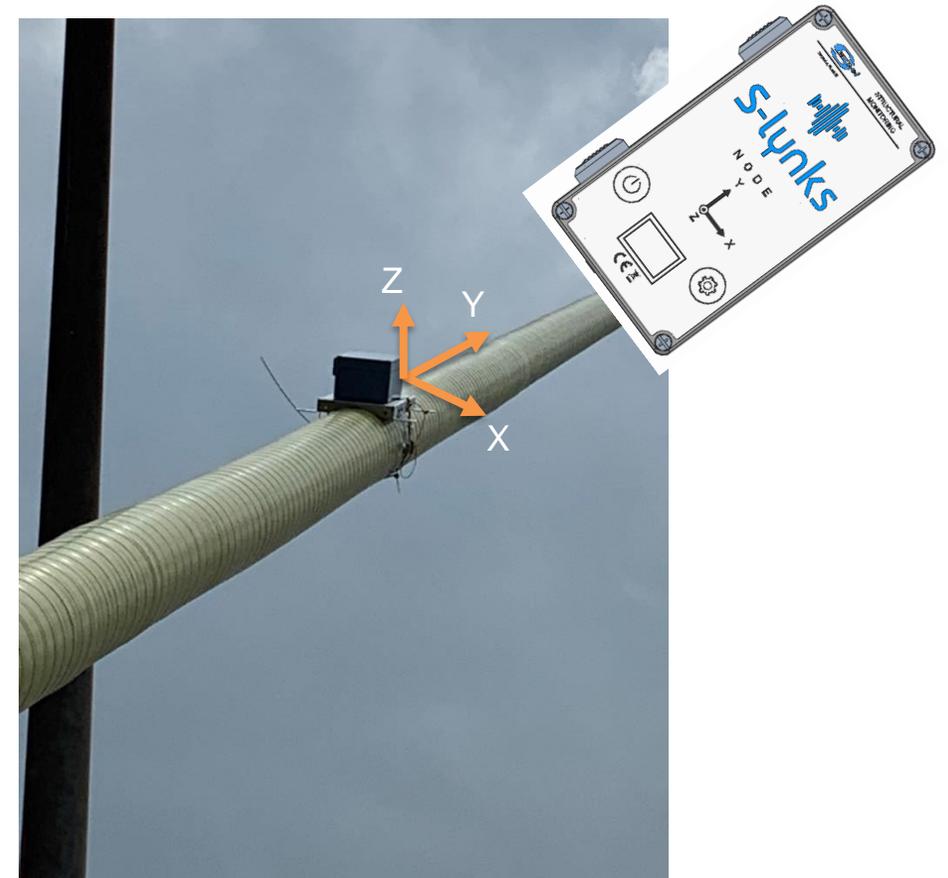
(Only observations, no modeling)

- > 11th (antisymmetric) vertical mode
2.112 Hz
- > 11th (symmetric) vertical mode
2.295 Hz
- > 12th (symmetric) vertical mode
2.536 Hz
- > 9th torsional mode
2.667 Hz



Monitoring de câble – mesure de tension

› Monitoring de 5 câbles → estimation de tension



› Vibrations ambiantes

- 1 h d'acquisition par câble
 - Quelle durée mini pour obtenir un résultat robuste ?
 - Variabilité de la mesure sur une heure ?

Monitoring de câble – mesure de tension

› Mesure fréquences

- 10+ premiers modes

› Mesure amortissements

› Estimation tension

Références :

Mesure de la tension des câbles par vibration –
Méthode d'essai des LPC n°35, LCPC, Janvier 1993.

Estimation de la tension des câbles par méthode
vibratoire, Fiche C4-2, Guide Auscultation Ouvrage
d'Art, Ifsttar, 2015.

› Test sous vibrations ambiantes

MÉTHODES D'AUSCULTATION
DE LA STRUCTURE
MESURES DE FORCES



C4-2

ESTIMATION DE LA TENSION DES CÂBLES PAR MÉTHODE VIBRATOIRE

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF

La méthode permet d'évaluer la tension de câbles accessibles.

La fréquence de vibration d'un câble est liée à sa tension. En assimilant la vibration du câble à celle d'une corde vibrante, la relation entre ces deux grandeurs est donnée par la formule suivante :

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

avec : f_n : fréquence du nième mode de vibration (en Hz)

n : ordre du mode de vibration

L : longueur libre du câble (en m)

T : tension du câble (en N)

μ : masse linéique (en kg/m)

PRINCIPE

La tension est évaluée sur la base de la fréquence fondamentale f_0 de vibration du câble en appliquant la formule :

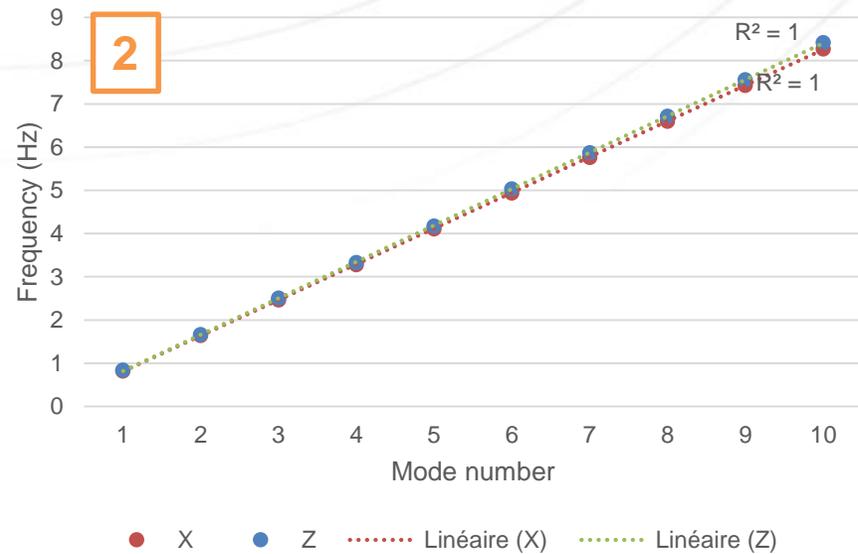
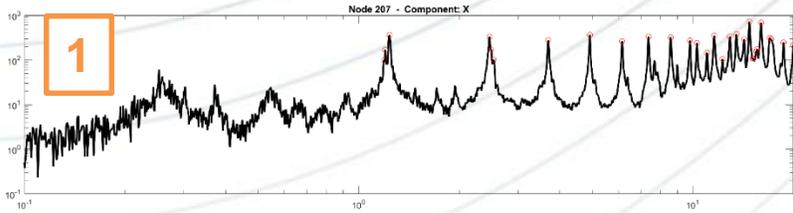
$$T = 4 f_0^2 L^2 \mu$$

Pour qu'un câble fonctionne comme une corde vibrante, son inertie EI doit être négligeable par rapport à TL^2 . Un test préliminaire permet de s'en assurer en vérifiant la proportionnalité des fréquences propres mesurées jusqu'au septième mode. La fréquence fondamentale est alors égale

$$\text{à } f_0 = \frac{f_n}{n}, \quad n \leq n_0$$

Le câble est équipé d'un accéléromètre, puis mis en vibration soit par secousse manuelle, soit par choc avec un marteau, soit par le biais d'une corde attachée au câble ; l'analyse du signal spectral fournit la valeur de la fréquence fondamentale qui fournit à son tour la tension.

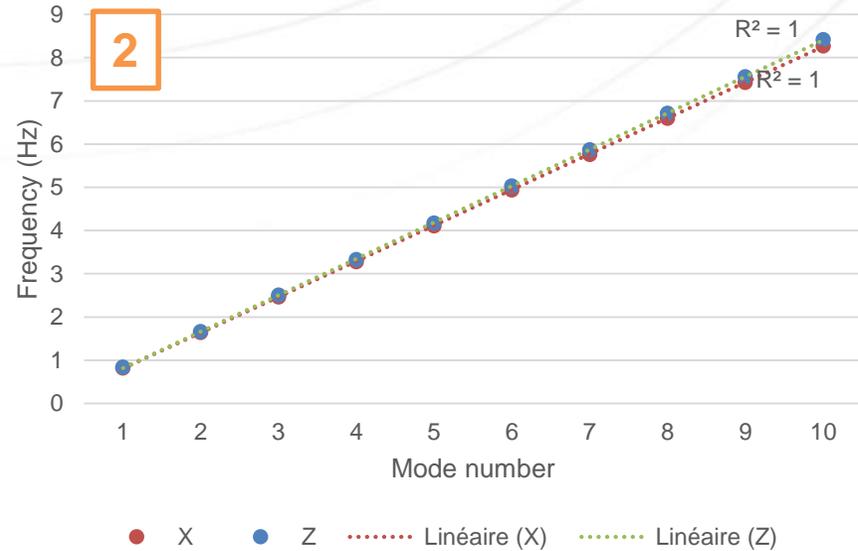
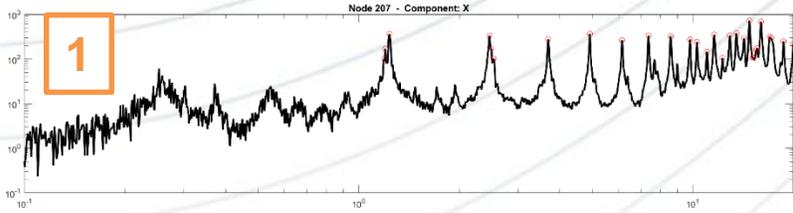
Monitoring de câble – mesure de tension



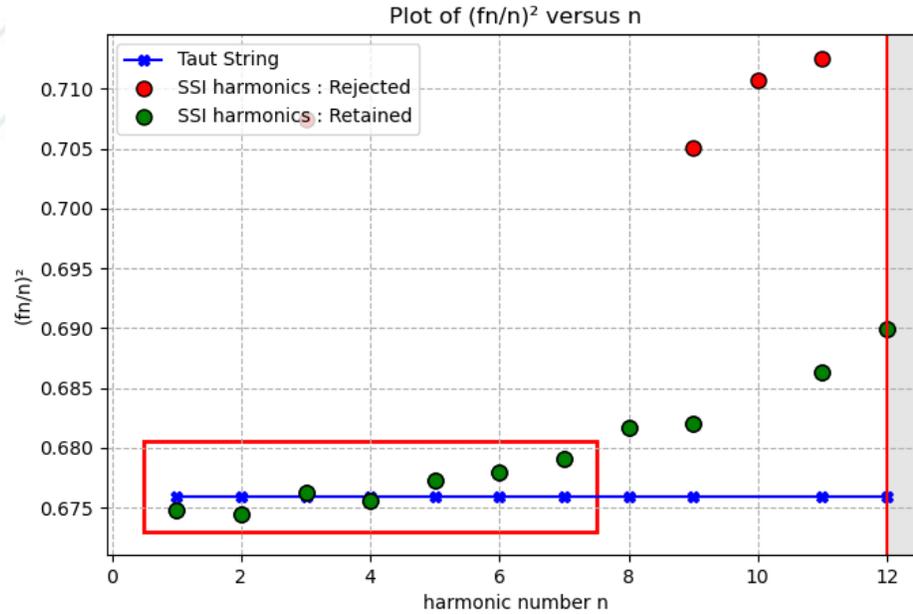
3

$$T = 4 f_0^2 L^2 \mu$$

Monitoring de câble – mesure de tension



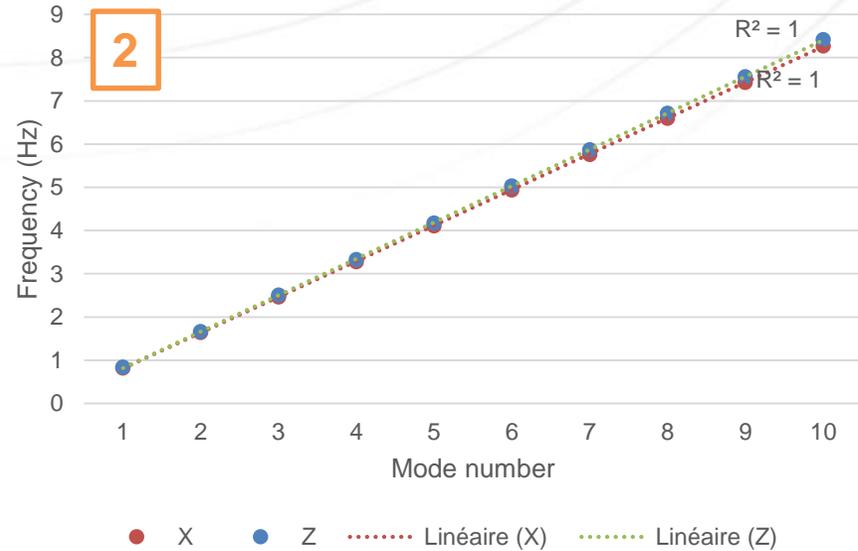
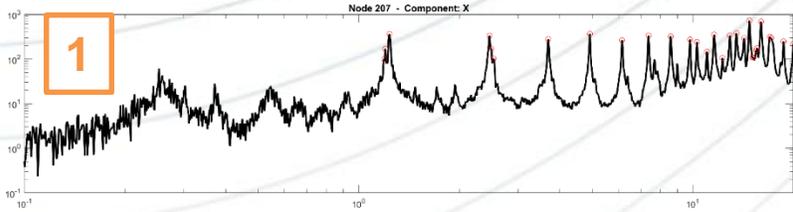
3 $T = 4 f_0^2 L^2 \mu$



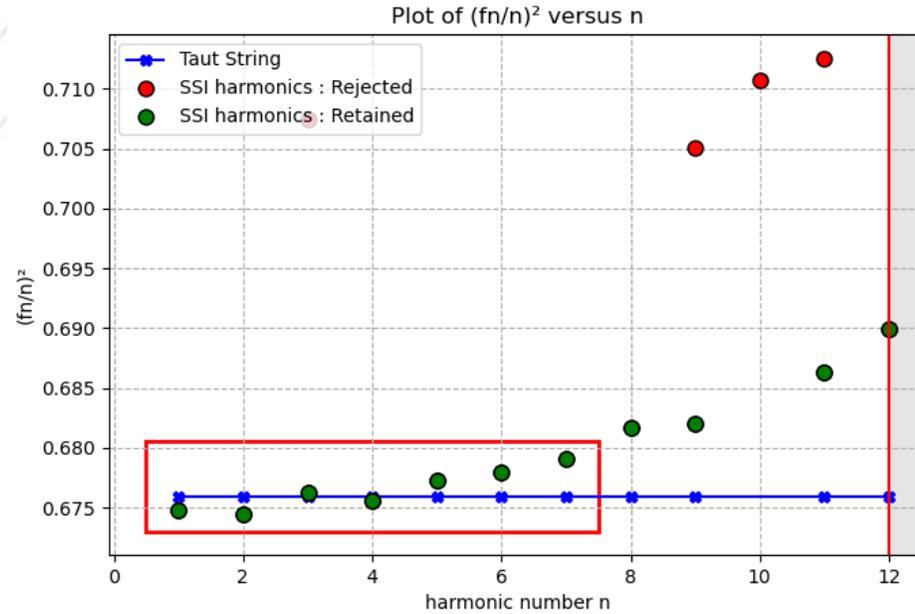
> Linéaire
(corde vibrante)

T = 3709 kN

Monitoring de câble – mesure de tension

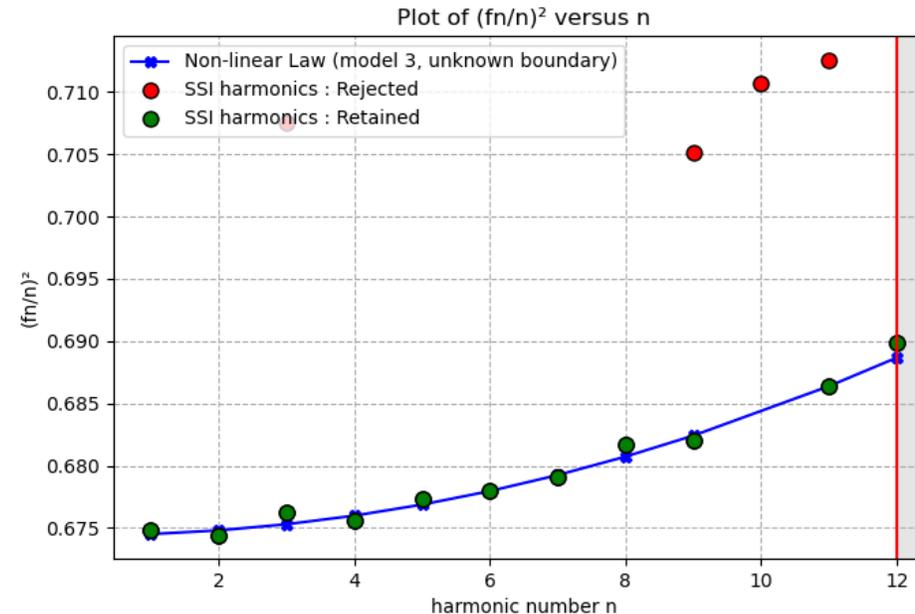


3 $T = 4 f_0^2 L^2 \mu$



> Linéaire
(corde vibrante)

T = 3709 kN



> Non linéaire

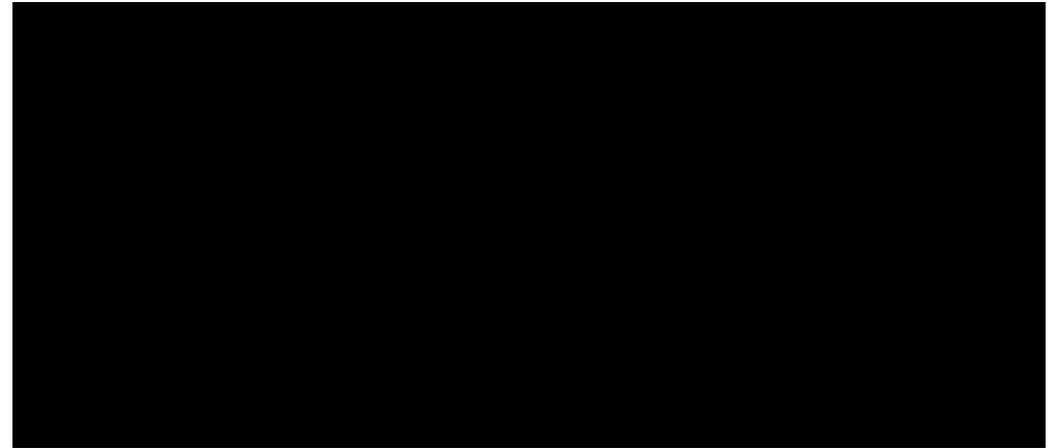
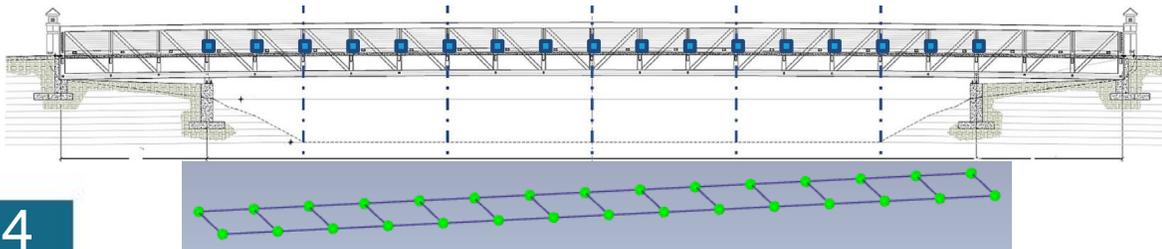
T = 3663 kN

(-1.2 % de différence avec l'estimation linéaire)

Complémentarité OMA / Monitoring câbles

› Analyse modale

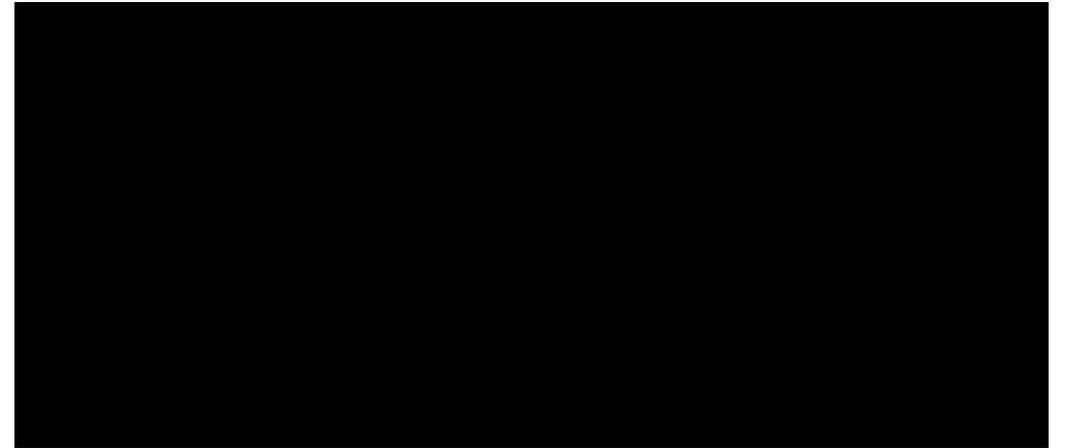
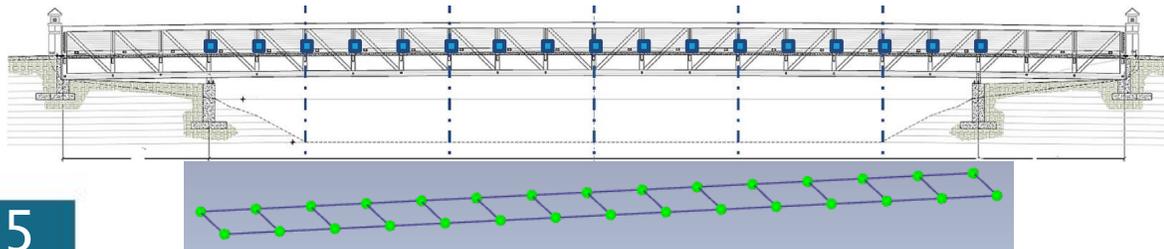
- La réponse de la structure est une combinaison linéaire des déformées modales
- Les paramètres dynamiques (fréquences / déformées modales / amortissements) dépendent de la répartition des masses / raideurs / amortissements dans le système.
- Symétrie du pont => symétrie des déformées modales ?



Complémentarité OMA / Monitoring câbles

› Analyse modale

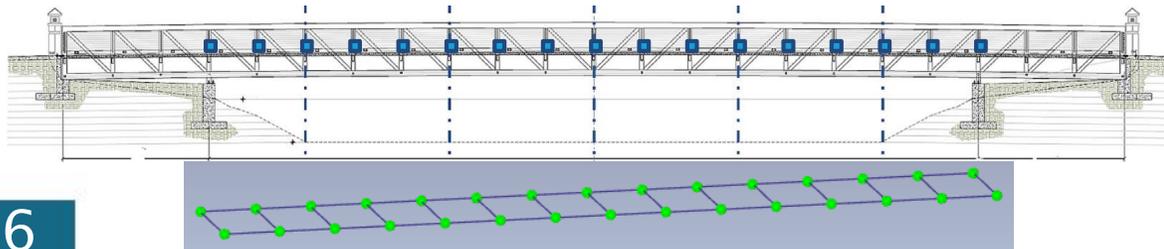
- La réponse de la structure est une combinaison linéaire des déformées modales
- Les paramètres dynamiques (fréquences / déformées modales / amortissements) dépendent de la répartition des masses / raideurs / amortissements dans le système.
- Symétrie du pont => symétrie des déformées modales ?



Complémentarité OMA / Monitoring câbles

› Analyse modale

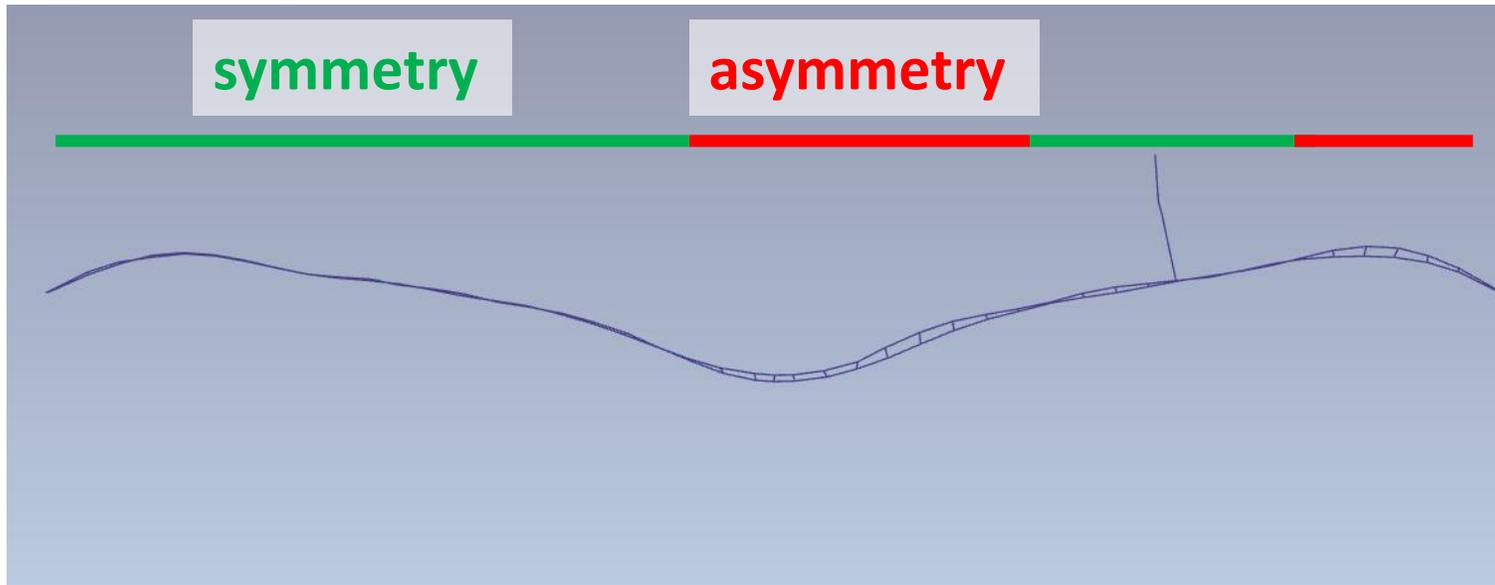
- La réponse de la structure est une combinaison linéaire des déformées modales
- Les paramètres dynamiques (fréquences / déformées modales / amortissements) dépendent de la répartition des masses / raideurs / amortissements dans le système.
- Symétrie du pont => symétrie des déformées modales ?



Complémentarité OMA / Monitoring câbles

> Analyse modale

- La réponse de la structure est une combinaison linéaire des déformées modales
- Les paramètres dynamiques (fréquences / déformées modales / amortissements) dépendent de la répartition des masses / raideurs / amortissements dans le système.
- Symétrie du pont => symétrie des déformées modales ?

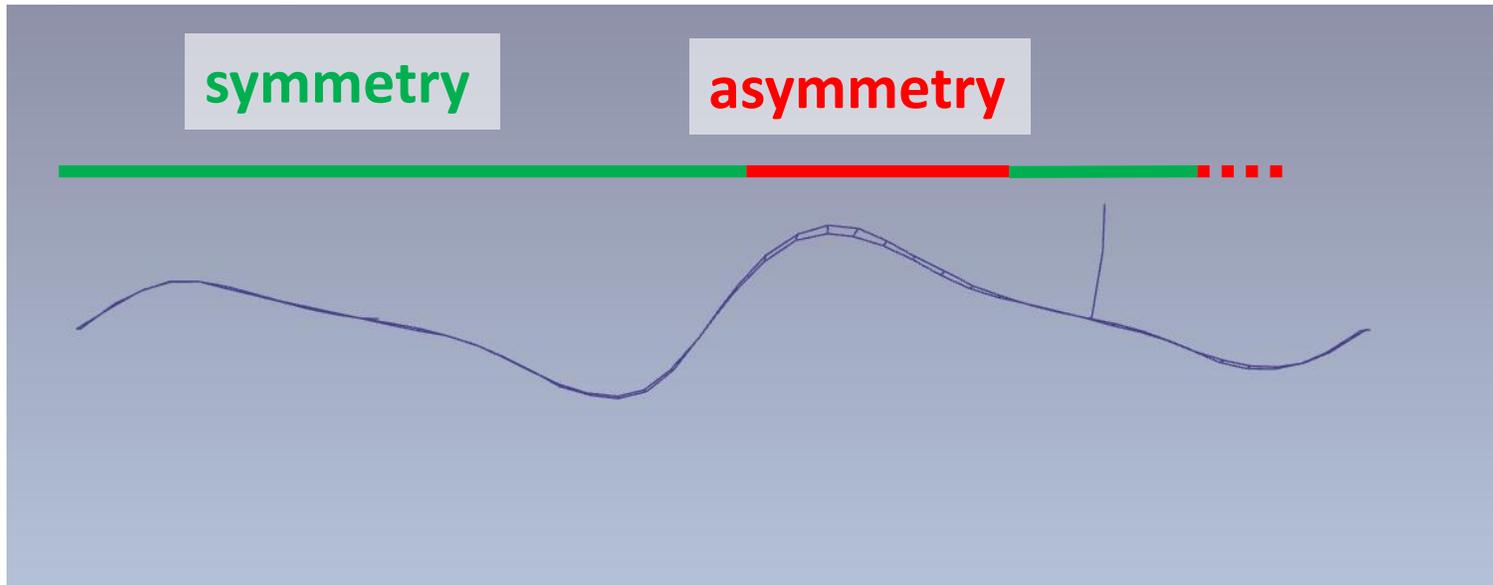


Frequency (Hz)	Damping (%)
0.296	3.1
0.376	2.1
...	
0.692	1.0

Complémentarité OMA / Monitoring câbles

> Analyse modale

- La réponse de la structure est une combinaison linéaire des déformées modales
- Les paramètres dynamiques (fréquences / déformées modales / amortissements) dépendent de la répartition des masses / raideurs / amortissements dans le système.
- Symétrie du pont => symétrie des déformées modales ?

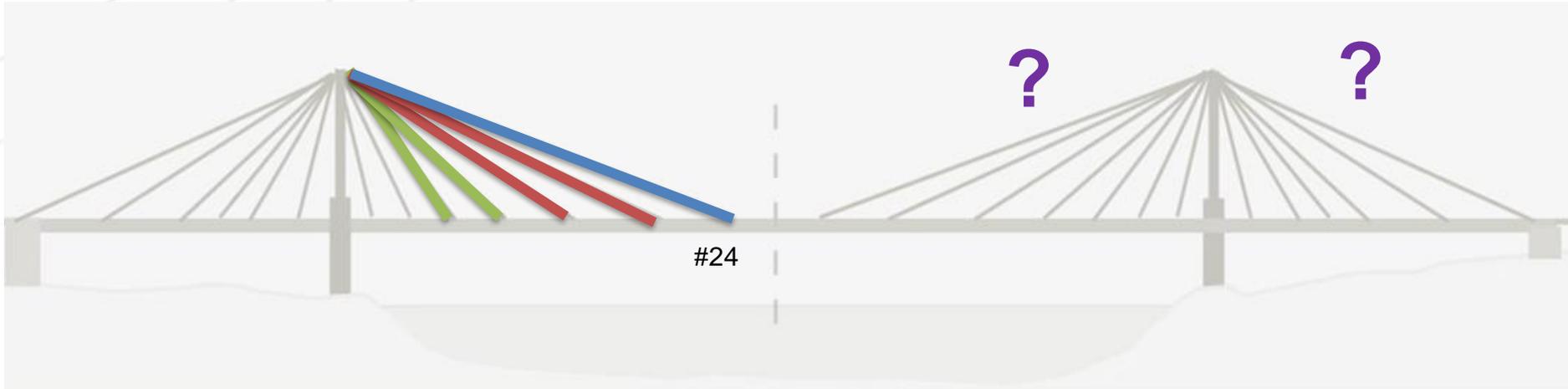


Frequency (Hz)	Damping (%)
0.296	3.1
0.376	2.1
...	
0.692	1.0

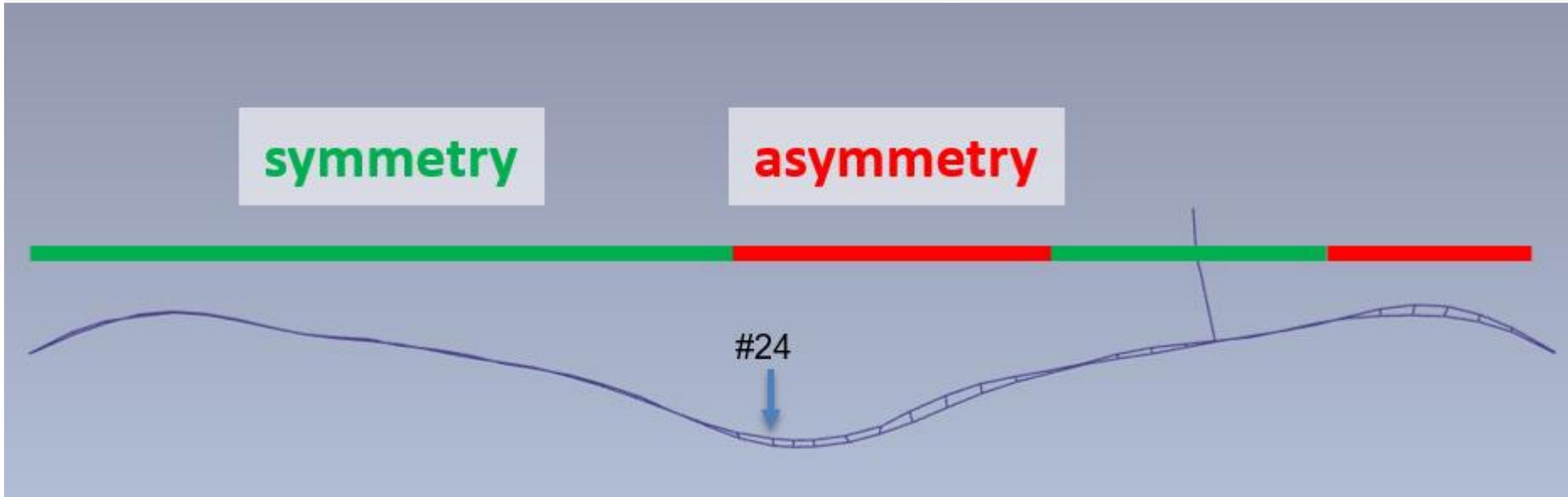
Complémentarité OMA / Monitoring câbles

Cable Tension

- Lower tension
- Same tension
- Higher tension



Modal Analysis
1st vertical mode



Software mesures et processing OMA

The screenshot shows the S-lynks software interface for 'Pont 3 Continents C'. The 'Representation' panel on the left displays a 3D wireframe model of a bridge structure. The 'Measure point' panel on the right contains a table with the following data:

Point	X	Y	Z	Actions
1	0	0	0	[Icons]
2	0	12.39	0	[Icons]
3	0	24.78	0	[Icons]
4	0	37.17	0	[Icons]
5	0	49.56	0	[Icons]
6	0	61.95	0	[Icons]
7	0	74.35	0	[Icons]
8	0	86.74	0	[Icons]
9	0	99.13	0	[Icons]
10	0	111.52	0	[Icons]
11	0	0	0	[Icons]
12	0	0	0	[Icons]
13	0	0	0	[Icons]
14	0	0	0	[Icons]
15	0	0	0	[Icons]
16	0	0	0	[Icons]
17	0	0	0	[Icons]
18	0	0	0	[Icons]
19	0	0	0	[Icons]
20	0	0	0	[Icons]
21	0	0	0	[Icons]
22	0	0	0	[Icons]

> Carnet terrain et acquisitions

> Processing et résultats

The screenshot shows the S-lynks software interface for 'Pont 3 Continents C' in the 'Processing et résultats' section. The 'Representation' panel on the left displays a 3D wireframe model of the bridge structure. The 'PSD' panel on the right shows a plot of Power Spectral Density (PSD) versus Frequency (Hz) for various measurement points. The 'Modes' panel on the right shows a table of modes with the following data:

Id	Frequency	Damping	Display
1	1.115	1.946	[Icon]
2	2.017	2.936	[Icon]
3	2.267	3.602	[Icon]
4	2.512	2.916	[Icon]
5	3.253	2.697	[Icon]
6	3.807	4.170	[Icon]
7	4.546	3.142	[Icon]
8	5.428	2.184	[Icon]
9	6.265	2.099	[Icon]
10	6.774	3.005	[Icon]
11	8.910	2.044	[Icon]

