



Belgisch **Wegen**congres Congrès belge de la **Route**

LEUVEN · 4-7.04.2022

Le développement d'un outil de monitoring des tensions dans les haubans et suspentes de ponts

Patrice Toussaint

Directeur f.f. – Direction de l'Expertise des Ouvrages – SPW MI

Edouard Verstraelen – V2i



SPW Mobilité et Infrastructures
Etienne Willame, *Directeur général*



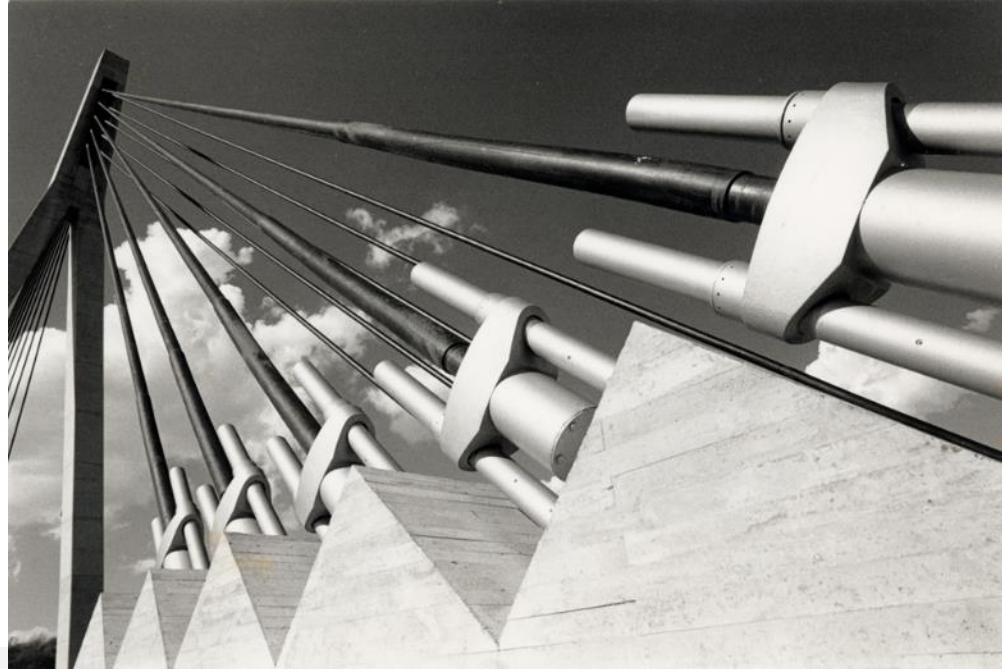
 Wallonie
mobilite infrastructures
SPW

Missions de la Direction

- Organiser la gestion des 6.000 ouvrages du SPW MI
- Organiser des formations techniques « ponts » pour les agents du SPW MI
- Réaliser des expertises spécifiques
- Organiser le monitoring temporaire ou continu d'ouvrages
 - Cellule instrumentation : 2 ingénieurs et 1 gradué
 - Compétence interne pour la plupart des demandes :
 - Achat matériel
 - Mise en place des capteurs et dataloggers
 - Transmission des données sur la cloud
 - Traitement et analyse
 - Pour des cas spécifiques, collaboration avec des spécialistes => objet de cet exposé



Origine du besoin : pont de Lanaye





En 2001, mesure de tension sur les haubans



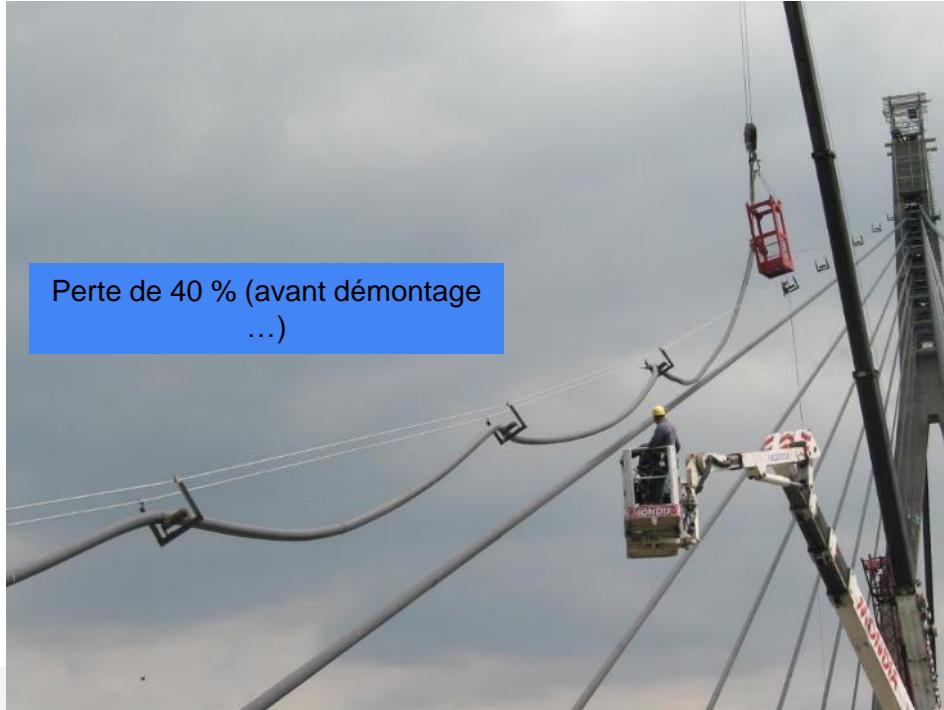
1 mesure / 3 ans :

- Préparation de la mesure
- Mise en place d'une signalisation
- Placement des accéléromètres, acquisition
- Dépouillement et rapport texte





En 2004, remplacement du hauban défectueux.





Expertise : nombreuses ruptures



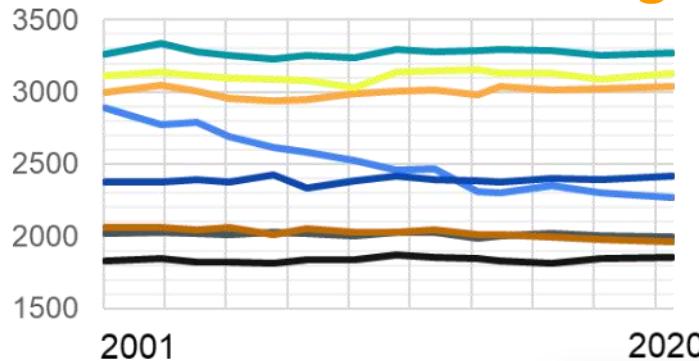


Pathologie : corrosion fissurante sous contrainte





Suivi régulier des autres haubans



14 séries de mesures :

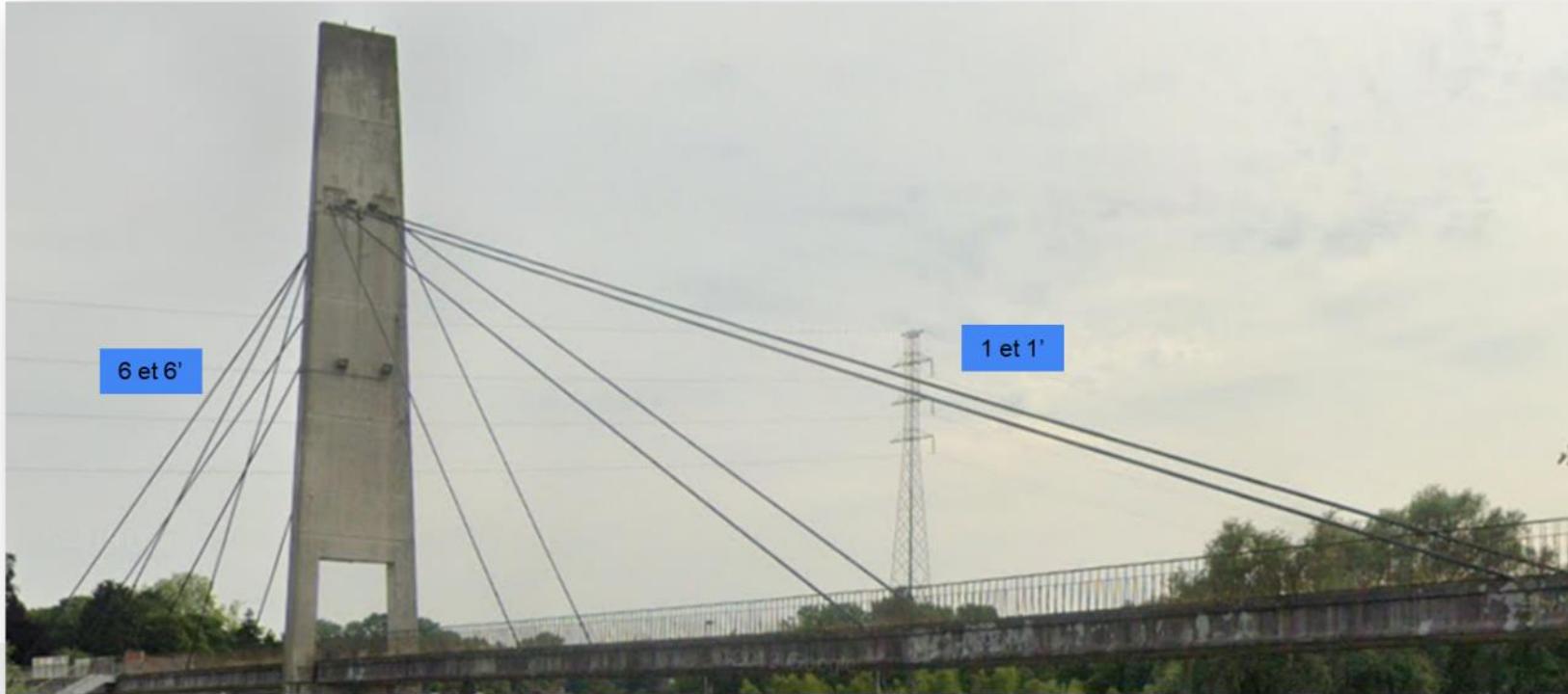
- 1 journée de mesure sur site avec 3 personnes
- 1/2 journée d'analyse et de rapportage

**Perte de 21 % sur le
hauban n°1 amont =>
remplacement en 2020**





Exemple 2 : passerelle d'Hobourg





Monitoring de la tension tous les 4 ans

Décroissance des efforts depuis 12 ans (4 mesures)

Mais croissance de la température

Nouvelle mesure en 2018 ...

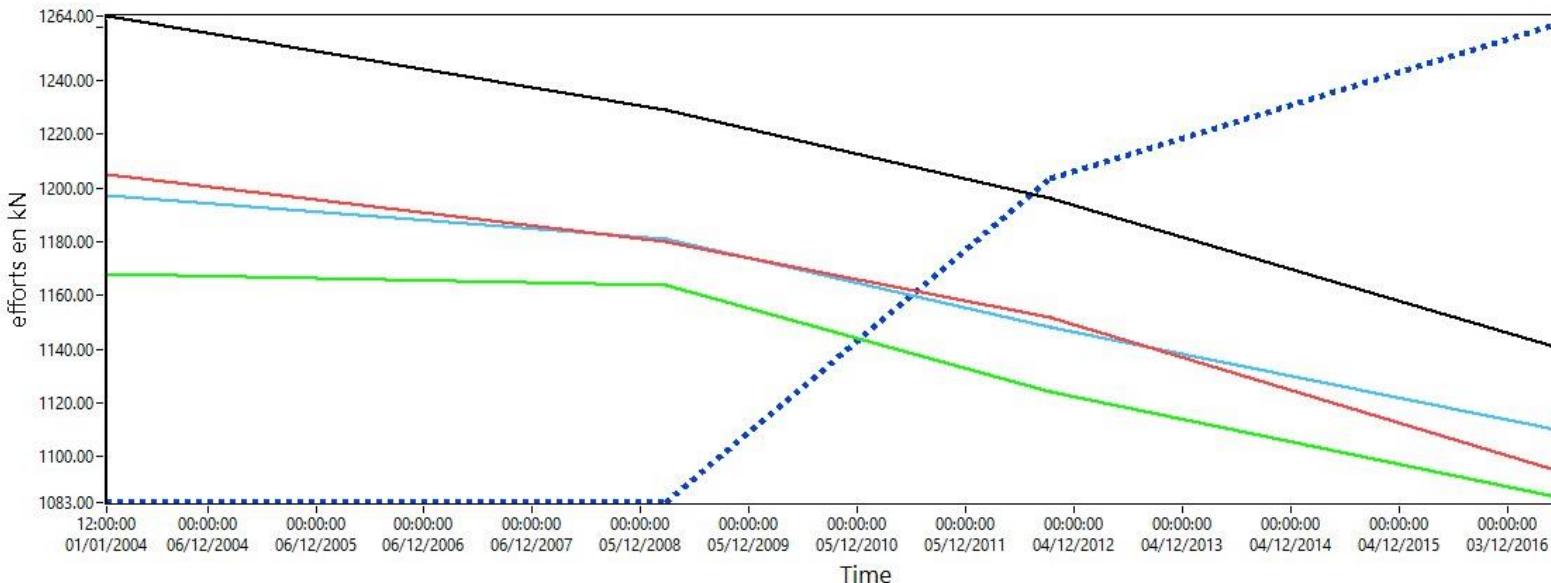
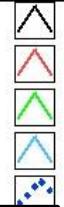
hauban 1' sur efforts en kN

hauban 1 sur efforts en kN

hauban 6' sur efforts en kN

hauban 6 sur efforts en kN

température sur température en °C





Exemple 3 : le pont d'Harchies





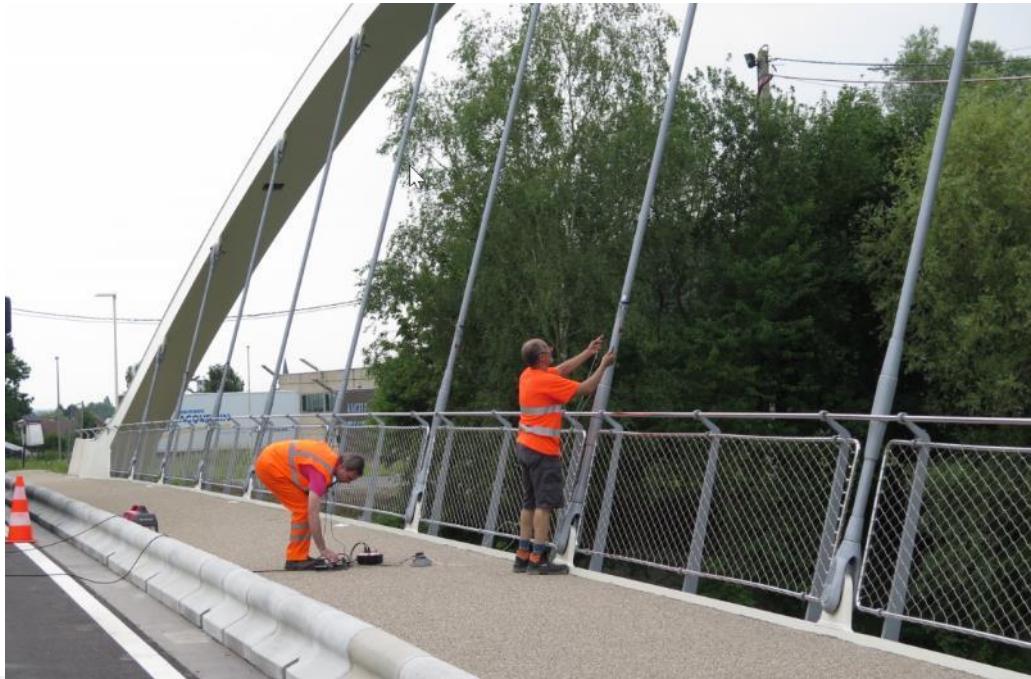
Pour les haubans longs et souples, c'est simple



$$H = 4 * \mu * l^2 * f^2 / n^2$$



Parfois, c'est plus compliqué ...





Synthèse des besoins

- Développements mathématiques
 - Calcul pour toutes les géométries
 - Estimation de l'erreur
- Moins de déplacements, plus de mesures
- Gestion d'alarmes, rapports semi-automatiques



Développements mathématiques =>
Algorithme puissant

ULiège

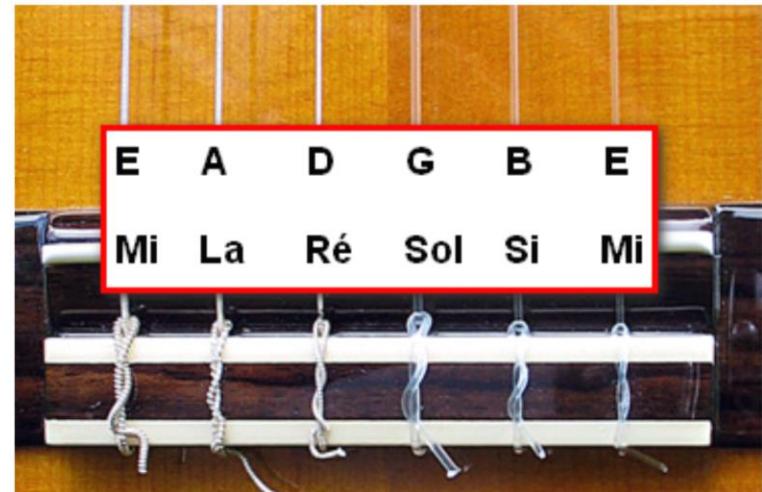
Station de télémesure
V2i



Principe de la code de guitare

Pour accorder une guitare, on adapte la tension de chaque corde.

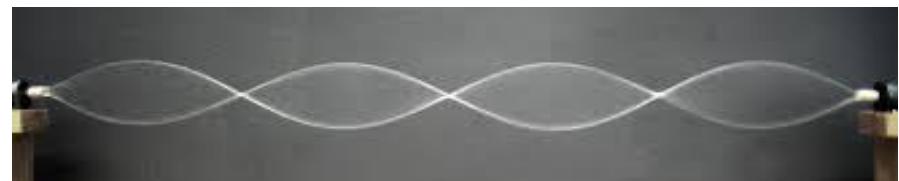
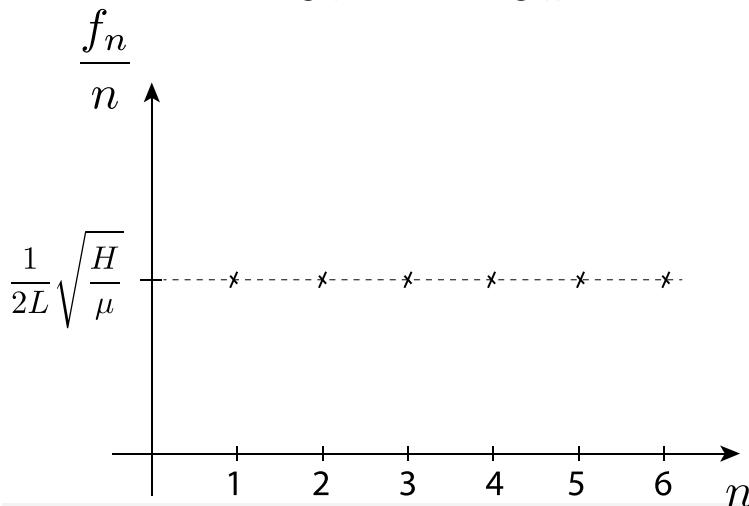
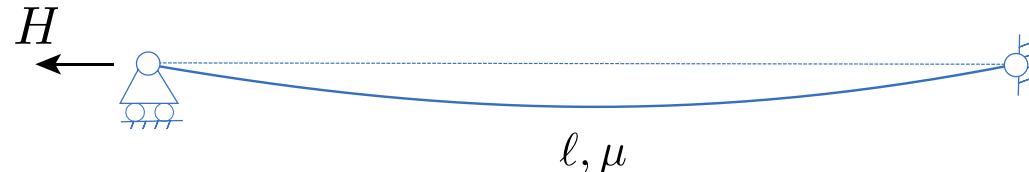
- ⇒ La fréquence propre de vibration de la corde dépend de sa tension
- ⇒ En mesurant les fréquences propres avec des accéléromètres, il est possible de calculer la tension de la corde





Modèle : cas de base, la corde tendue

$$\mu \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

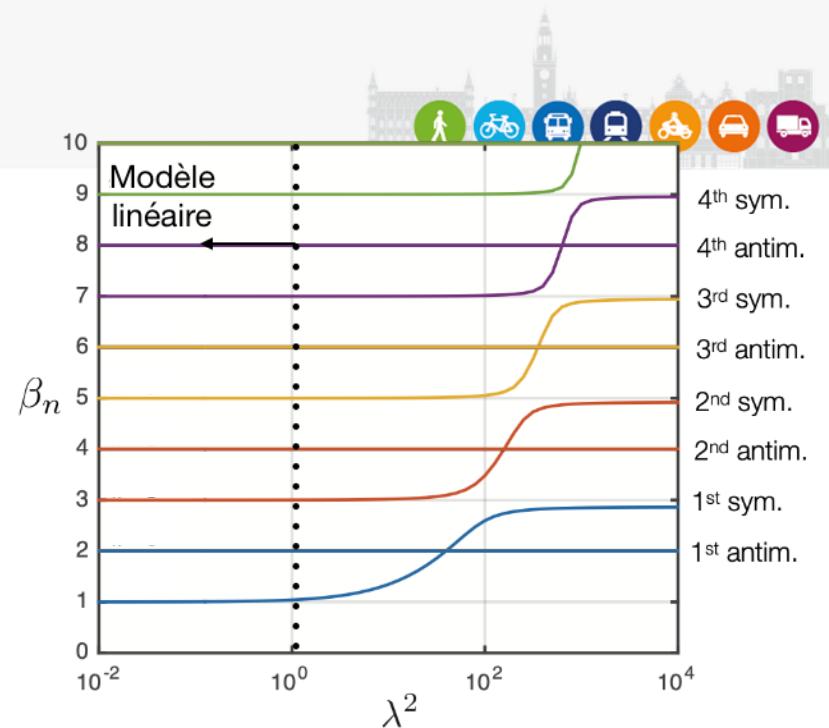
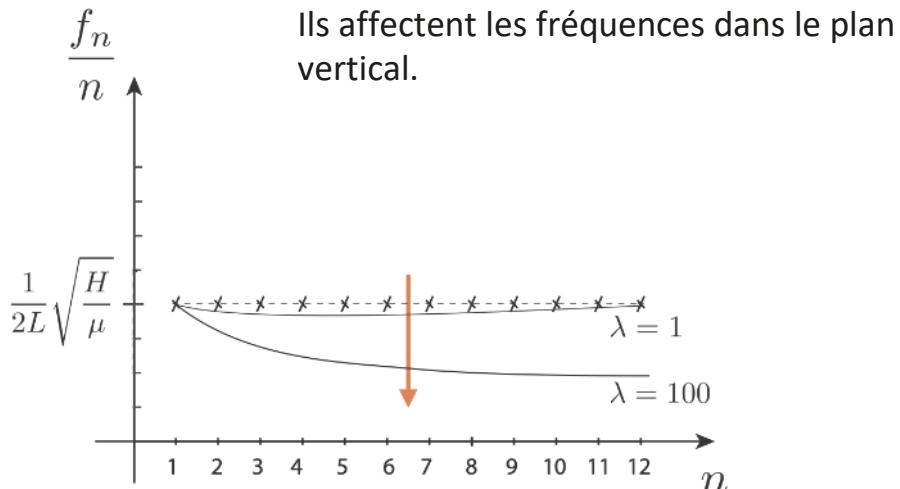


Hypothèses :

- Petits déplacements transversaux
- Câble extensible, tension > poids
- Raideur flexionnelle négligeable



Modèle : effets de gravité & d'inextensibilité



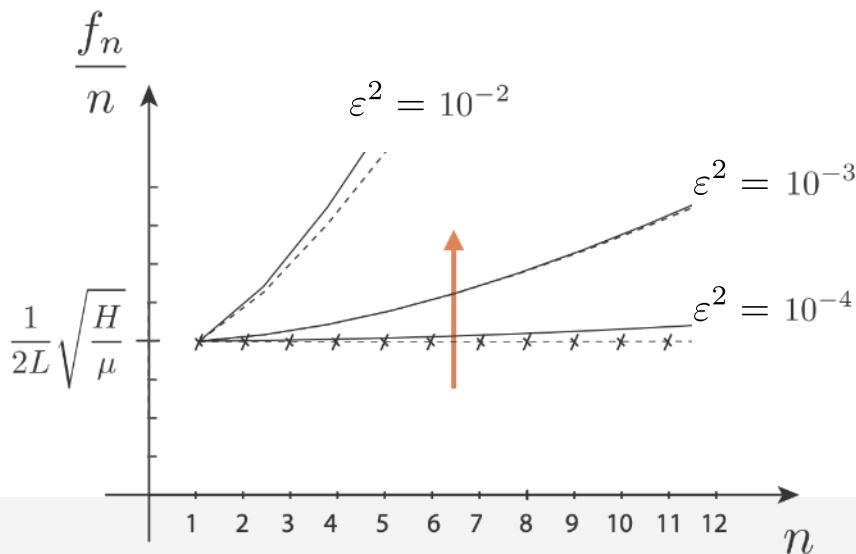
Paramètre d'Irvine

$$\lambda^2 = \frac{1}{\left(\frac{H}{\mu g L}\right)^2 + \frac{1}{8}} \frac{EA}{H}$$



Modèle : effets de flexion

Les fréquences augmentent avec la raideur en flexion,
mais aussi avec la raideur en rotation des ancrages !



Paramètre de flexion

$$\varepsilon^2 = \frac{EI}{HL^2}$$

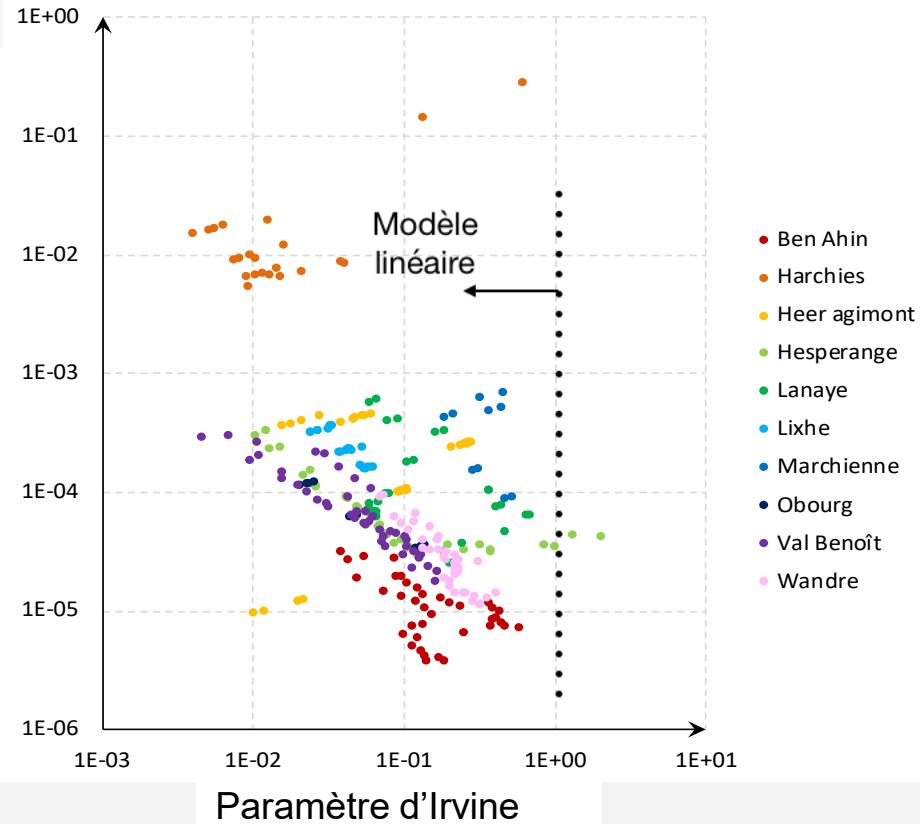
— bi-encastré

- - bi-rotulé

$$\frac{f_n}{n} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{H}{\mu}} \sqrt{1 + n^2 \pi^2 \varepsilon^2}$$



Paramètre de flexion



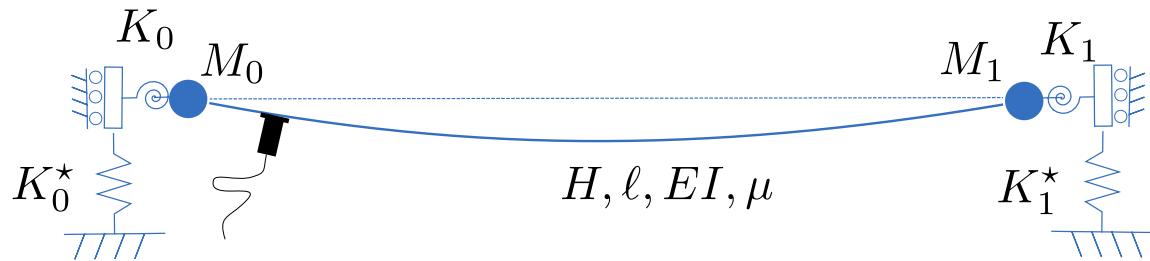
Effets de flexion : OUI

Effets d'Irvine : NON



Modèle retenu :

Généralise les deux modèles dont le SPW disposait !



2 paramètres sont connus : ℓ, μ

8 paramètres sont à identifier...



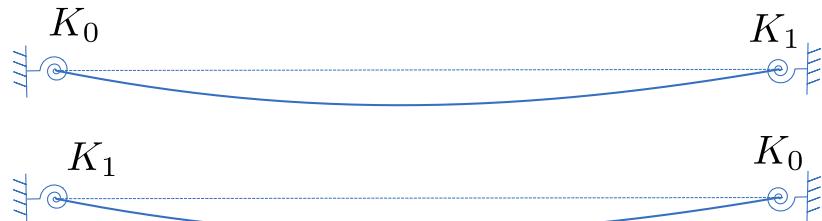
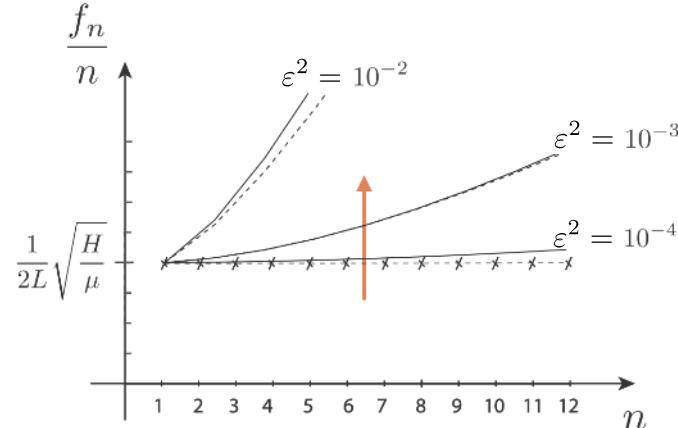


Réduction du nombre de paramètres à identifier

Impossible d'identifier certains paramètres :

- Si on a moins de 8 fréquences propres
- S'ils n'influencent pas la fonction objectif
- S'ils ont le même effet sur les fréquences

Sont-ils d'ailleurs tous utiles ?





Analyse de l'identifiabilité des paramètres

H, ε, p, q

Développement de modèles à 2, 3 ou 4 paramètres globaux

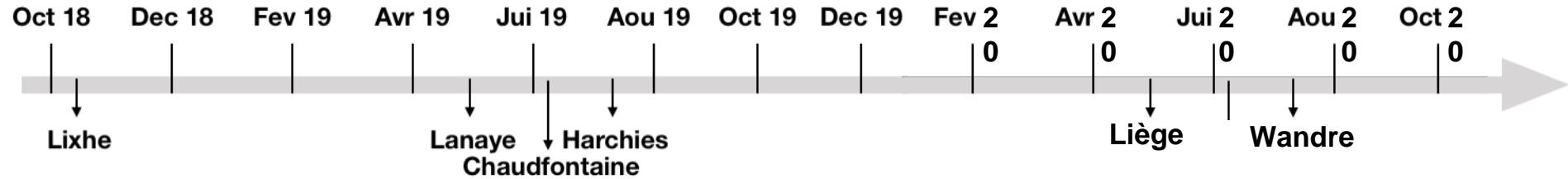
Passage d'un à l'autre en fonction des intervalles de confiance

Transition continue entre les deux modèles déjà existants au SPW

Estimation de la tension dans les câbles et de l'erreur commise



Validations expérimentales





Système de télémétrie



Mesure de vibration sur site

1. Acquisition, traitement de données



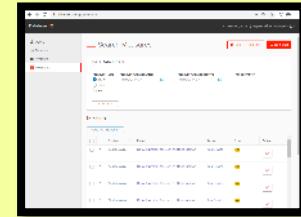
Capteurs



Station



2. Historisation, structuration des données

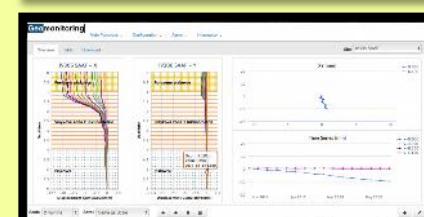


Stockage cloud



Mesure de tension à distance

3. Visualisation web

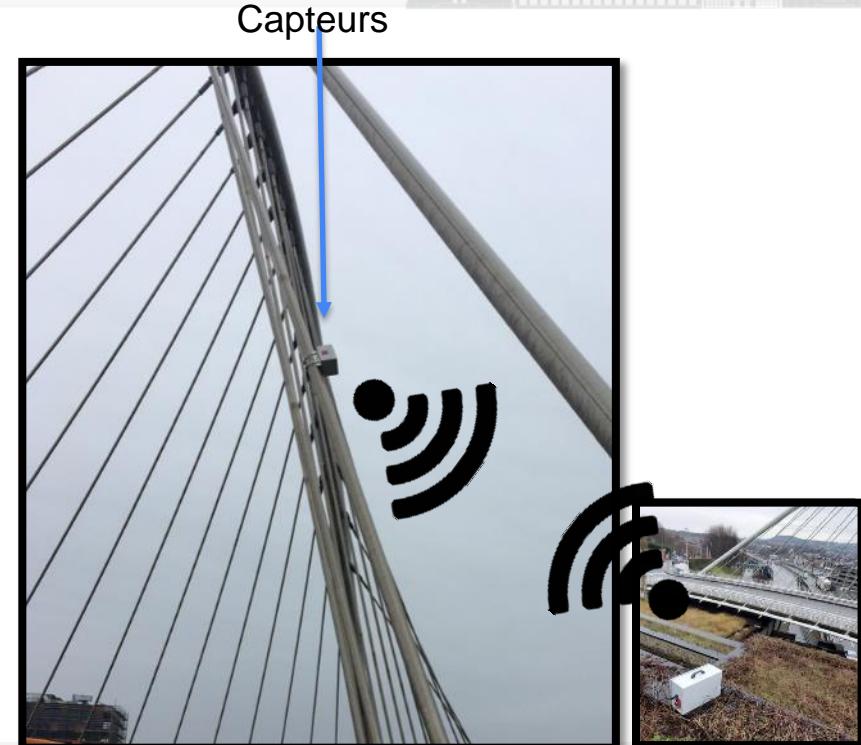


...



Capteurs sans fil

- Capteur d'accélération
- Capteur de température
- Avantages :
 - 10 ans d'autonomie sur batterie
 - Pas de longs câbles à tirer !
- Casing et fixation sur mesure :
 - Large gamme de diamètres
 - Testé sur pot vibrant



Station



Station centrale de mesure

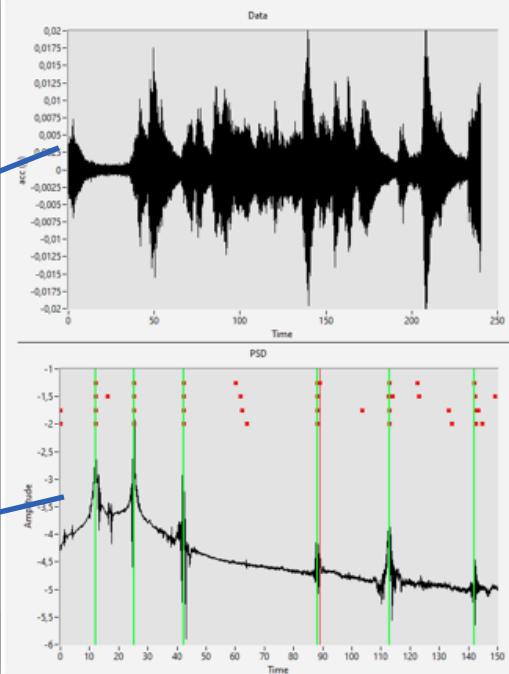
- En charge de :
 - l'acquisition des mesures
 - du calcul des tensions
 - du stockage local
 - de l'envoi vers le cloud (tension, statut batterie...)
- Sur batterie, rechargement via réseau électrique ou panneaux solaire
- 4 mesures de tension par hauban par jour
 - configurable à distance via le web



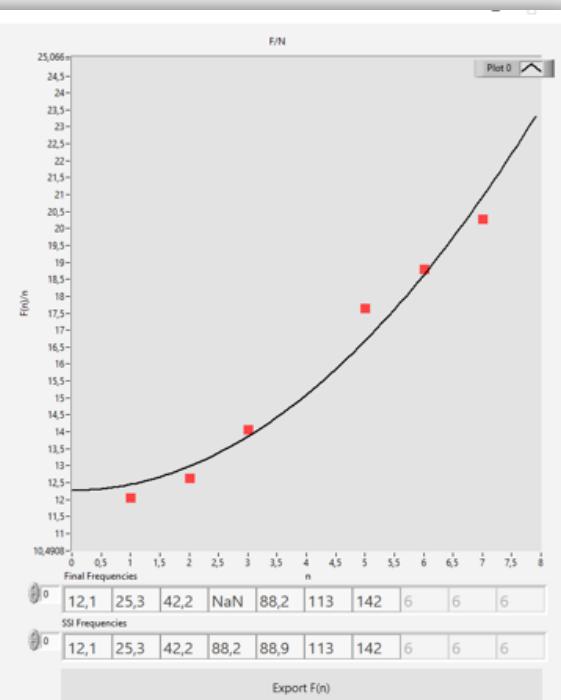


- Calcul des tensions des haubans, effectué par la station:

Vibrations
mesurées par le
capteur sans fil



Identification des
modes de
vibration du
hauban



Courbe
« f_n/n »

Algo.
ULiège

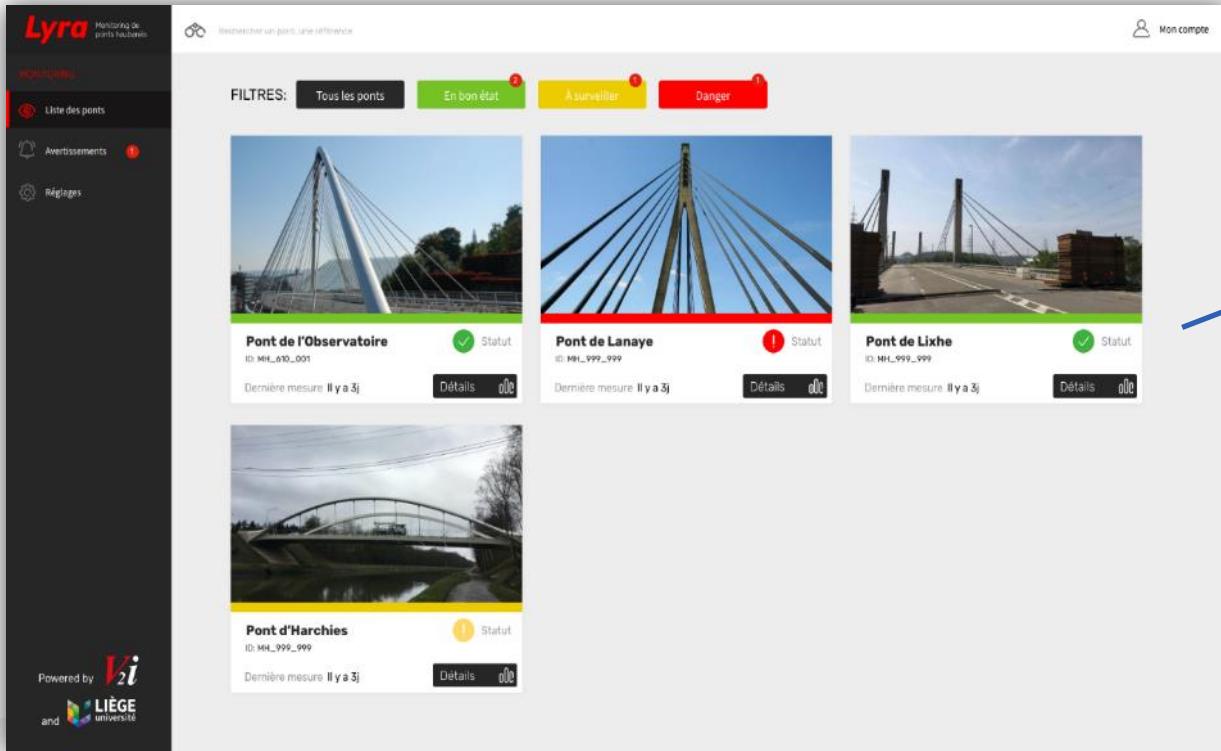
Tension



Visualisation des données



- Mise en forme des mesures stockées sur le serveur cloud



Lyra Monitoring de ponts belges

Rechercher un pont, une référence

Mon compte

FILTRES: Tous les ponts En bon état à surveiller Danger

Pont de l'Observatoire
ID: MH_610_001
Statut: ✓
Dernière mesure: Il y a 3j Détails Statut

Pont de Lanaye
ID: MH_999_999
Statut: !
Dernière mesure: Il y a 3j Détails Statut

Pont de Lixhe
ID: MH_999_999
Statut: ✓
Dernière mesure: Il y a 3j Détails Statut

Pont d'Harchies
ID: MH_999_999
Statut: ⚠
Dernière mesure: Il y a 3j Détails Statut

Powered by **Ki** and **LIÈGE université**



Visualisation de tous les ponts sous surveillance et de leur statut



- Application web spécifique: vue détaillée d'un pont

Pont de l'Observatoire
ID: MH_610_001

Statut
Dernière mesure il y a 3j

Lien Google Maps
Lien DB SPW

Statut du système de mesure

Stockage	75%
Batterie	90%
Connexion	Forte

Hauban **Mesure** **Capteur**

ID	Date	Tension	T°	Statut	Batterie
3	Il y a 3j	301.2 kN	10.5°	Vert	75%
6	Il y a 3j	298.5 kN	11°	Jaune	90%
9	Il y a 3j	254.6 kN	11°	Vert	90%
12	Il y a 3j	300 kN	11.5°	Vert	75%
15	Il y a 3j	300 kN	11.5°	Vert	75%

Exporter les mesures

Dernières tensions et température mesurées

Historique des tensions et températures

Pont de l'Observatoire
ID: MH_610_001

Tension

Température



En pratique, comment la technique est-elle utilisée ?

1. Monitoring en continu des ouvrages les plus importants
2. Monitoring temporaire et mesures espacées
3. Mesures ponctuelles

1. Monitoring en continu

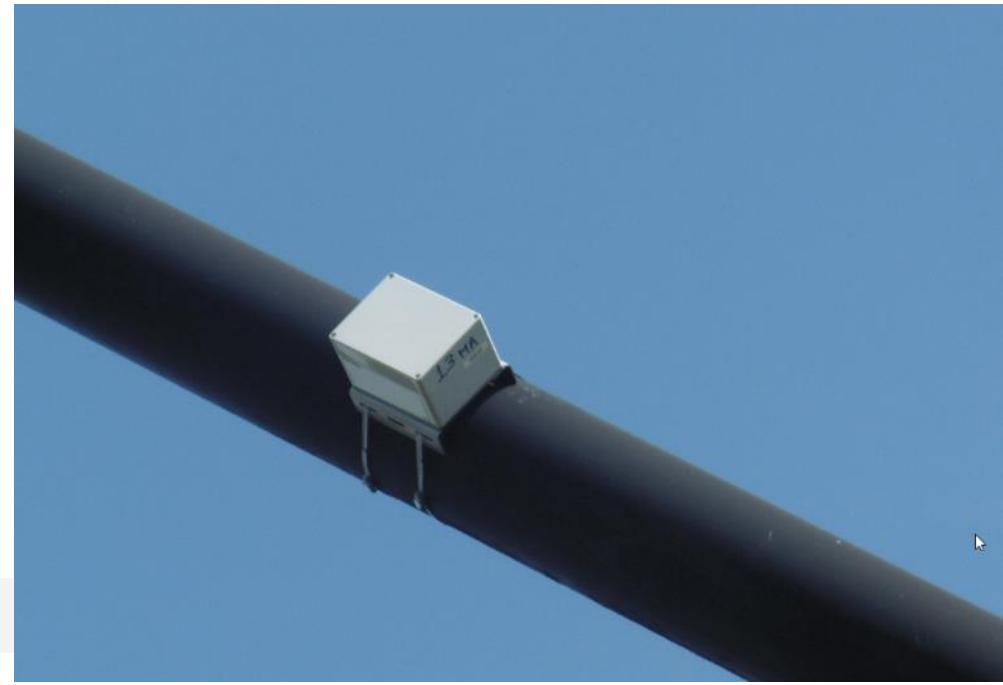
- Pont de Lanaye
- Pont du Pays de Liège
- Pont de Wandre



Priorité 1 : Lanaye



Les capteurs sans fil



Priorité 1 : Lanaye

Data-logger et panneau solaire



Priorité 1 : Lanaye

Logiciel de suivi en continu – gestion des alertes et alarmes

Introduction

Le pont de Lanaye est pont haubané en béton de 132 m de longueur, permettant à une route communale reliant les villages de Lanaye et d'Ében-Emael, d'enjamber le Canal Albert.

Les haubans, au nombre de trente, se épousent en quatre nappes à partir de deux pylônes, situés à l'amont et à laval du pont en rive droite, de la manière suivante:

- deux nappes de dix haubans, soutenant le tablier du pont ;
- deux nappes de cinq haubans ancrés en rive droite équilibrant les efforts sur les pylônes.

Dans le cadre de la mise en œuvre d'une politique de suivi plus régulier des haubans, et suite à des problèmes de corrosion ayant conduit au remplacement des deux haubans les plus long supportant le tablier, cet ouvrage a été choisi comme premier cas de mise en application du système de monitoring développé conjointement avec l'Université de Liège et la société V2i.

Instrumentation se compose de l'équipement suivant:

- 30 boîtiers contenant un accéléromètre tri-axial
- Directionnel, d'une soi
- Electronique permettant la transmission des données assurant l'autonomie du matériel
- Une station d'acquisition et de traitement, regroupant les données des boîtiers et à l'aide d'un modèle paramétrique développé par L'université et transmettant les données voulues vers un serveur ;
- un panneau solaire et des batteries assurant l'alimentation de la station.

Vue de situation



dernières mesures 09-03-2022 17:00

Haubans 15
hauban amorti 17717.74(N)
hauban aval 7934.63(N)

Haubans 14
hauban amorti 1567.55(N)
hauban aval 7595.1(N)

Haubans 13
hauban amorti 7871.81(N)
hauban aval 7799.02(N)

Haubans 12
hauban amorti 1061.94(N)
hauban aval 17355.61(N)

Haubans 11
hauban amorti 8.22(N)
hauban aval 8.22(N)

Haubans 10
hauban amorti 1893.92(N)
hauban aval 2001.72(N)

Haubans 9
hauban amorti 1954.25(N)
hauban aval 1959.67(N)

Haubans 8
hauban amorti 17717.45(N)
hauban aval 1816.33(N)

Haubans 7
hauban amorti 2311.12(N)
hauban aval 2260.65(N)

Haubans 6
hauban amorti 2013.95(N)
hauban aval 2061.53(N)

Haubans 5
hauban amorti 2153.25(N)
hauban aval 3087.51(N)

Haubans 4
hauban amorti 2781.93(N)
hauban aval 2871.67(N)

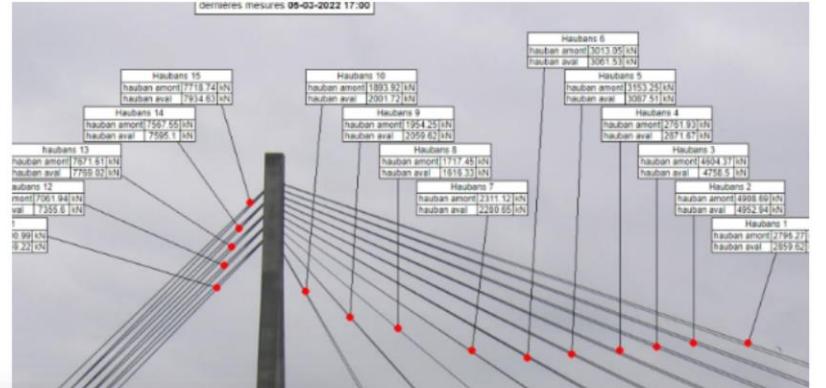
Haubans 3
hauban amorti 4604.37(N)
hauban aval 4796.5 (N)

Haubans 2
hauban amorti 6040(N)
hauban aval 4952.54(N)

Haubans 1
hauban amorti 795.27(N)
hauban aval 2859.62(N)

Send Low & High Warning

Send LowLow & HighHigh Warning



Instrumentation

L'instrumentation se compose de l'équipement suivant :

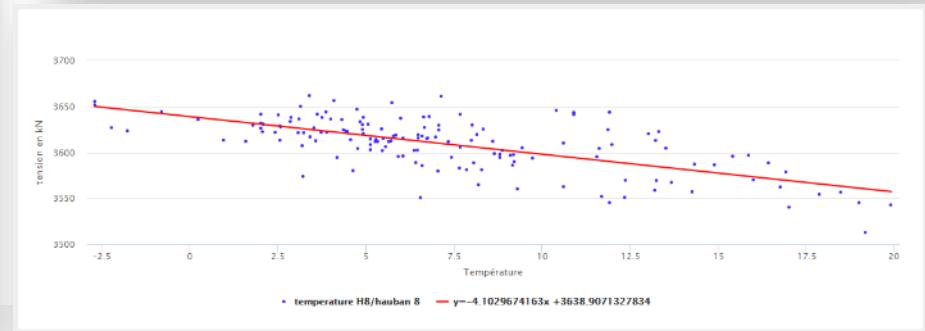
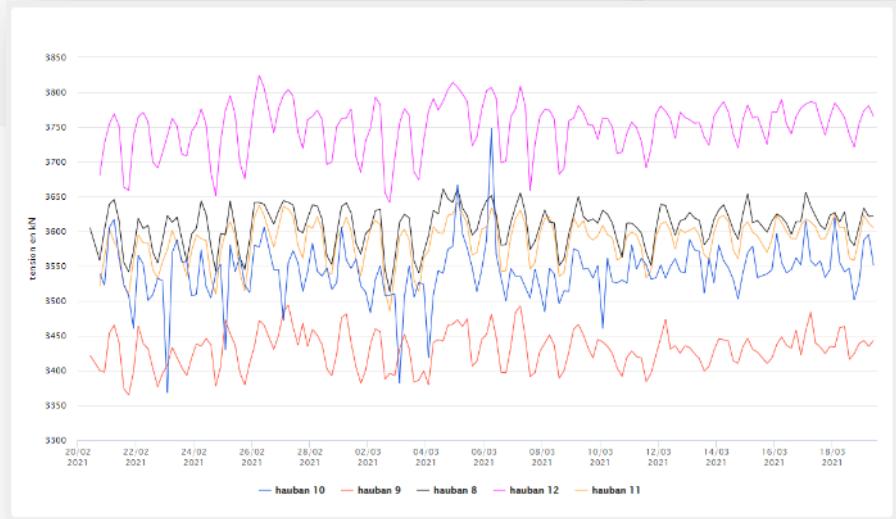
- 30 boîtiers contenant un accéléromètre tri-axial, d'une soi
- Electronique permettant la transmission des données assurant l'autonomie du matériel
- Une station d'acquisition et de traitement, regroupant les données des boîtiers et à l'aide d'un modèle paramétrique développé par L'université et transmettant les données voulues vers un serveur ;
- un panneau solaire et des batteries assurant l'alimentation de la station.




Objectif : définir l'influence de la température sur la tension

Ensuite, mesures de contrôle à intervalles réguliers (3 ou 6 ans)

2. Suivi temporaire



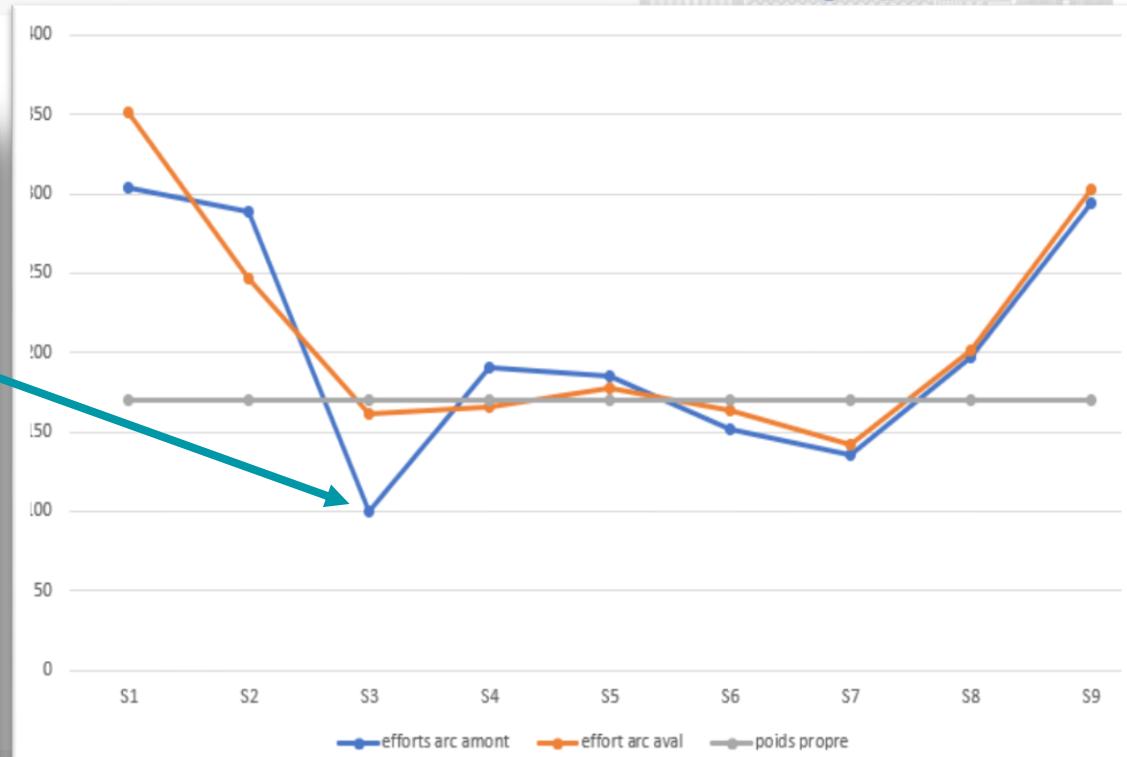
Objectif : Vérifier les tensions dans les suspentes métalliques pleines suite aux déformations causées par les impacts d'objets flottants.



3. Mesures ponctuelles : exemple suite aux inondations



3. Mesures ponctuelles : exemple suite aux inondations



En développement



- Adaptation aux ponts avec suspentes croisées (en cours)
- Test de mesures sur câbles de post-contrainte
- Nouveaux capteurs autonomes avec panneaux solaires
- Tests sur les méthodes par analyse d'image (DIC) pour mesurer les fréquences propres



Merci de votre attention !



Contact

 Patrice TOUSSAINT

 +32 475/75 48 41

 patrice.toussaint@spw.wallonie.be





Belgisch **Wegen**congres
Congrès belge de la **Route**
LEUVEN • 4-7.04.2022



UNE ORGANISATION



ABR

Association
Belge de la Route



**AGENTSCHAP
WEGEN & VERKEER**

AVEC LE SOUTIEN DE



Centre de
recherches routières



BRUXELLES MOBILITÉ
SERVICE PUBLIC RÉGIONAL DE BRUXELLES

Wallonie
mobilité infrastructures
CDM



FBEV

Fédération Belge des Entrepreneurs de Travaux de Voirie asbl