



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*



## 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

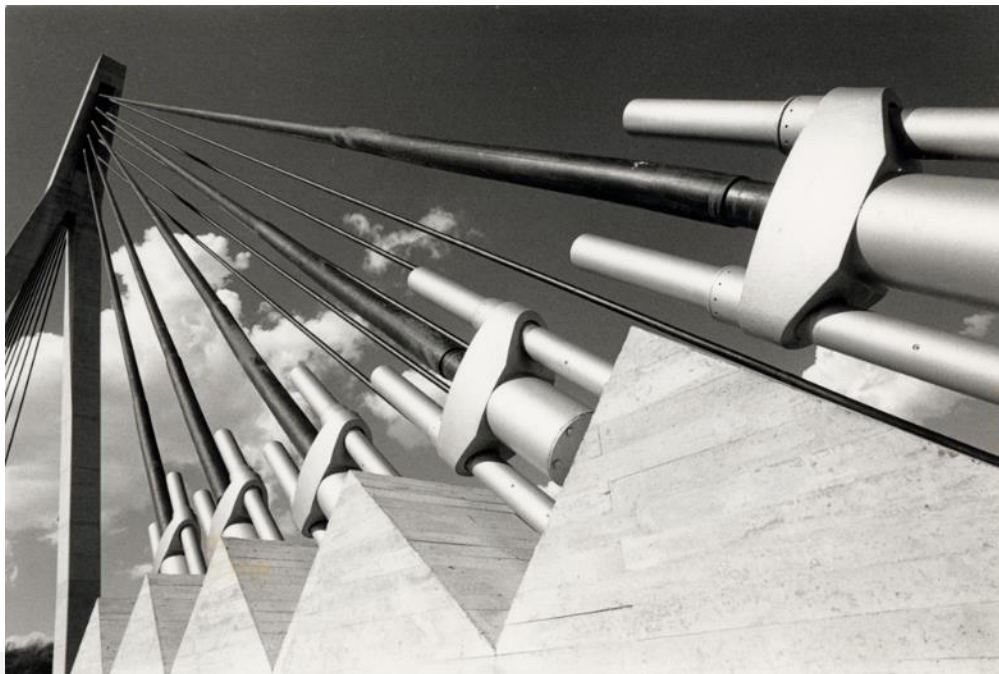


Belgisch **Wegencongres**  
Congrès belge de la **Route**

LEUVEN • 4-7.04.2022



## 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.



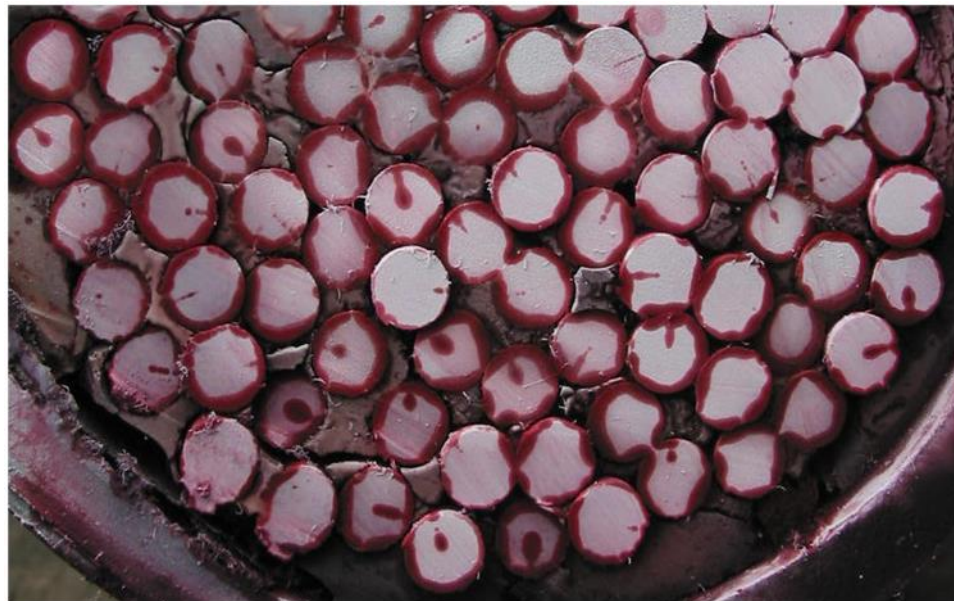


## Expertise : nombreuses ruptures





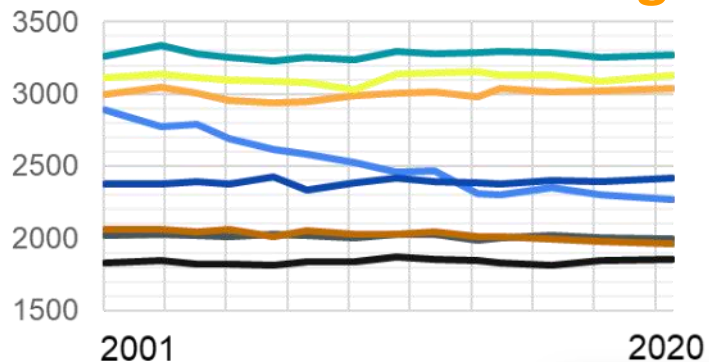
## Pathologie : corrosion fissurante sous contrainte







## 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



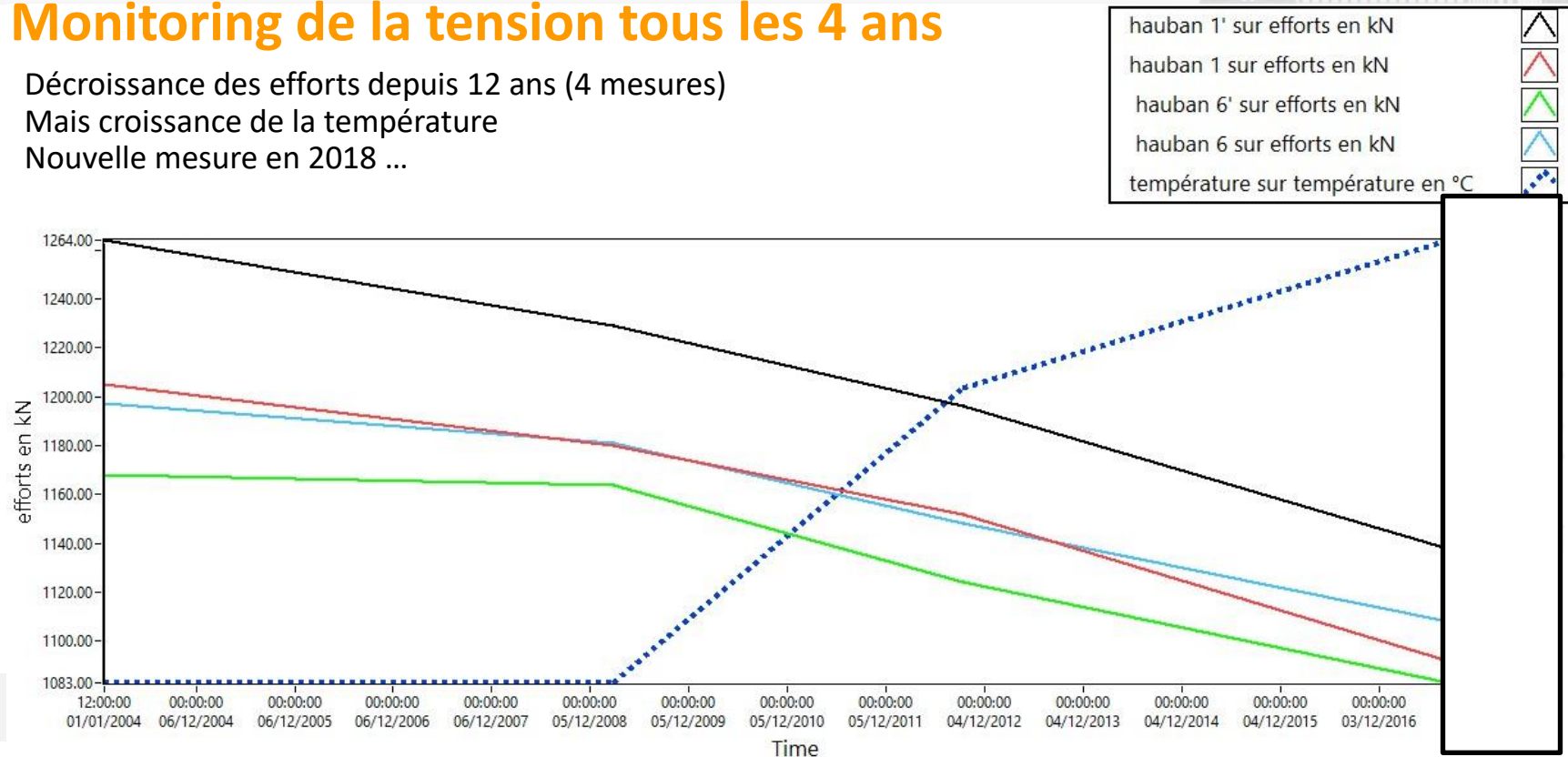


## Monitoring de la tension tous les 4 ans

Décroissance des efforts depuis 12 ans (4 mesures)

Mais croissance de la température

Nouvelle mesure en 2018 ...



## Exemple 3 : le pont d'Harchies





## Pour les haubans longs et souples, c'est simple



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

## 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 télémessure

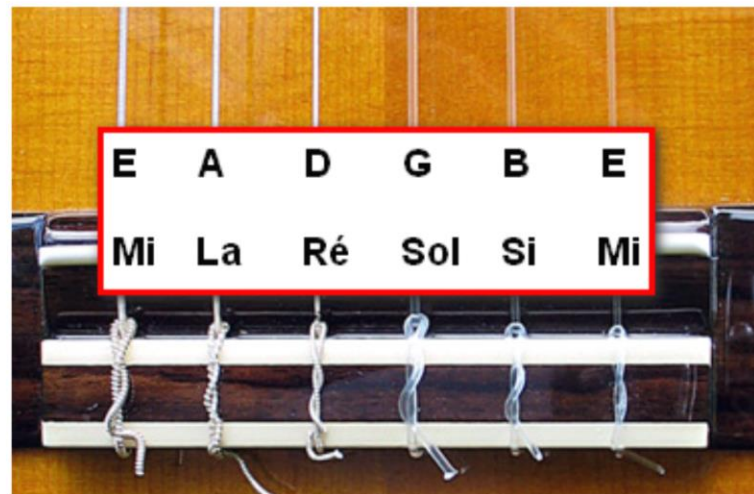
V2i



## 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

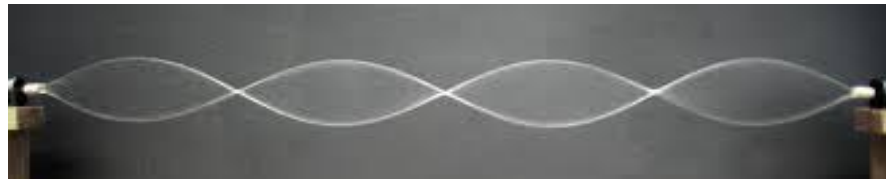
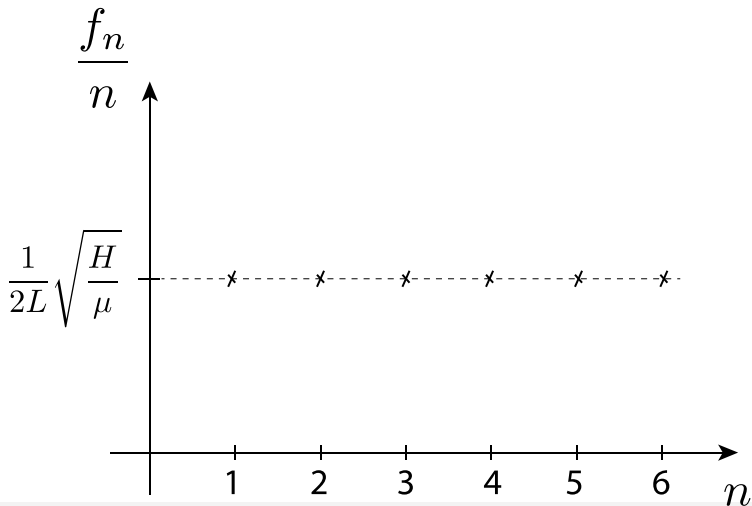
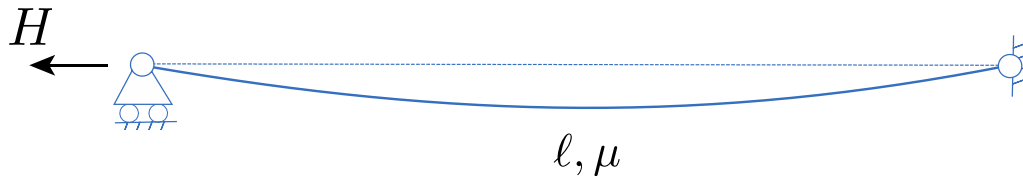






## Modèle : cas de base, la corde tendue

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

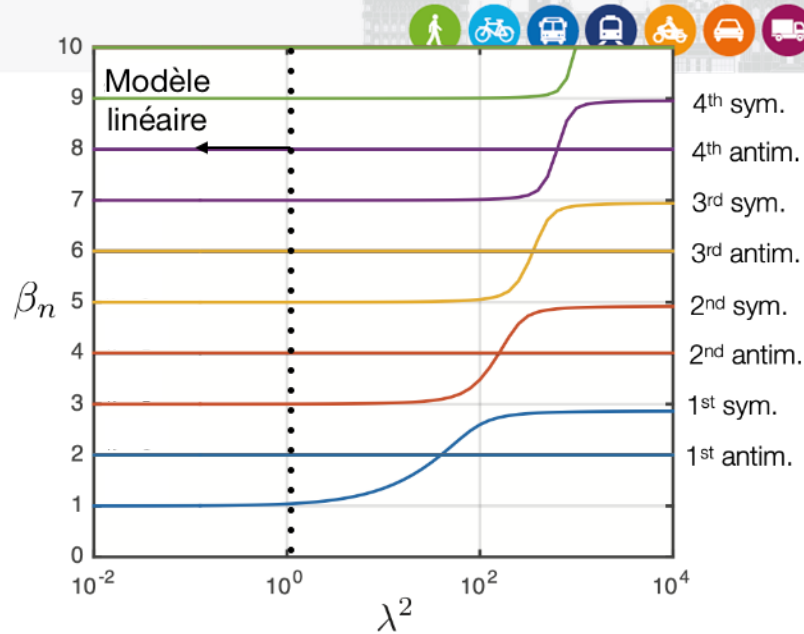
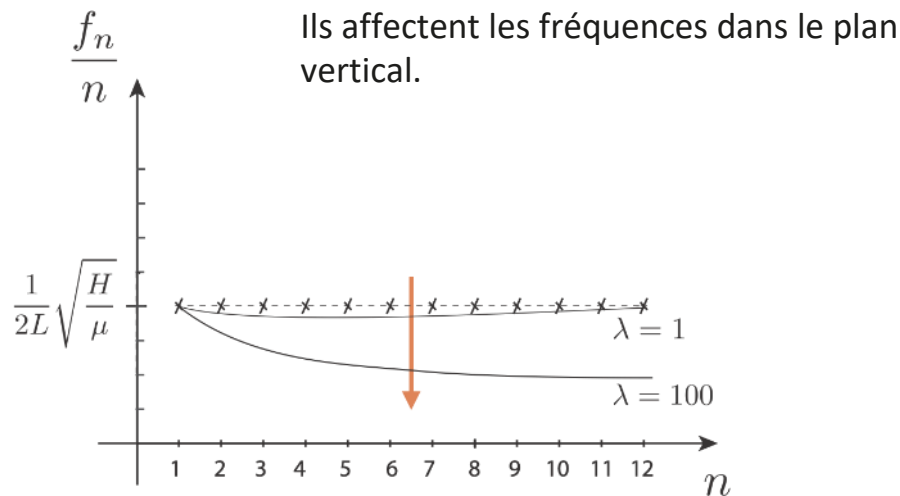


Hypothèses :

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



## Modèle : effets de gravité & d'inextensibilité

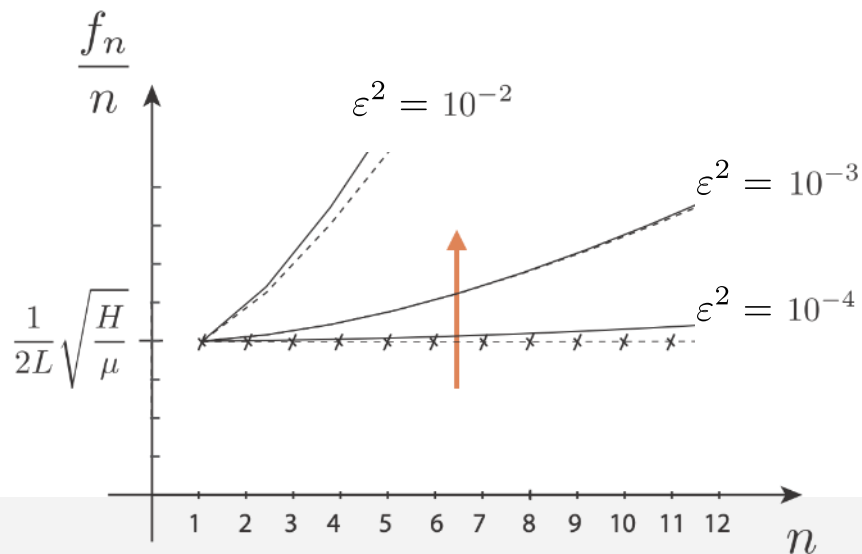


Paramètre d'Irvine

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

## Modèle : effets de flexion

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



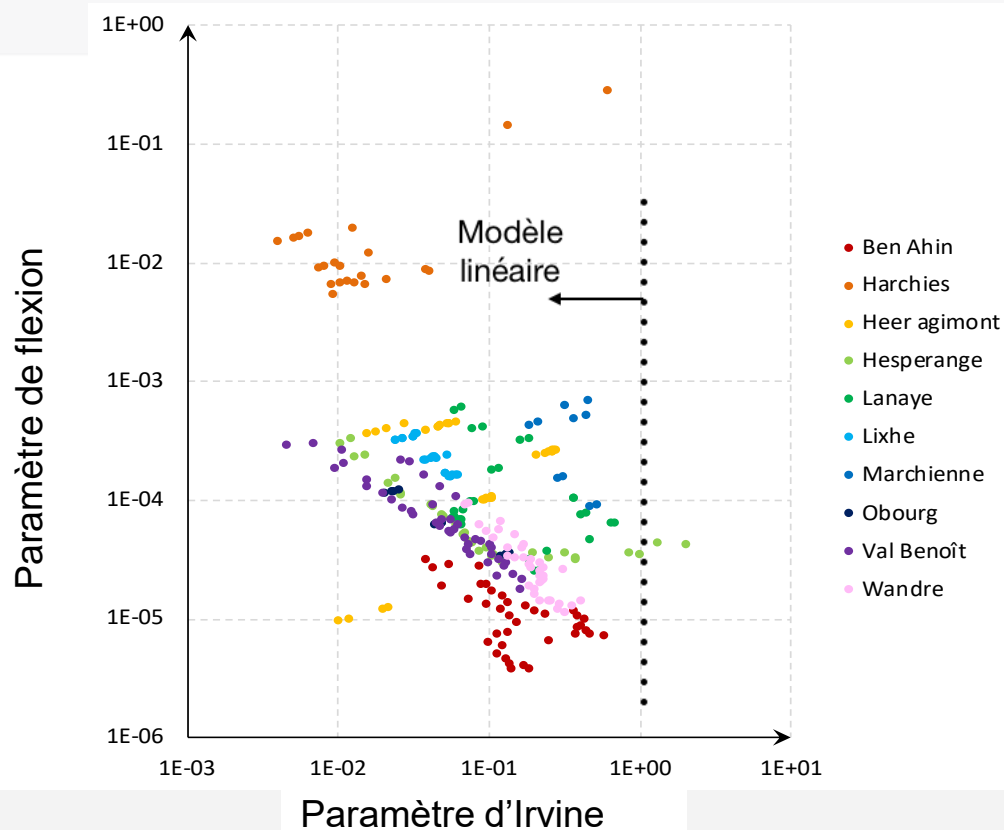
Paramètre de flexion

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

— bi-encasté

- - bi-rotulé

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



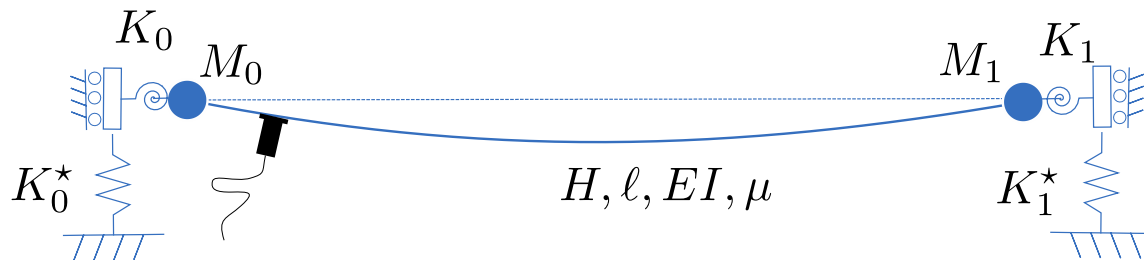
Effets de flexion : **OUI**

Effets d'Irvine : **NON**



## Modèle retenu :

Généralise les deux modèles dont le SPW disposait !



2 paramètres sont connus :  $\ell, \mu$

8 paramètres sont à identifier...

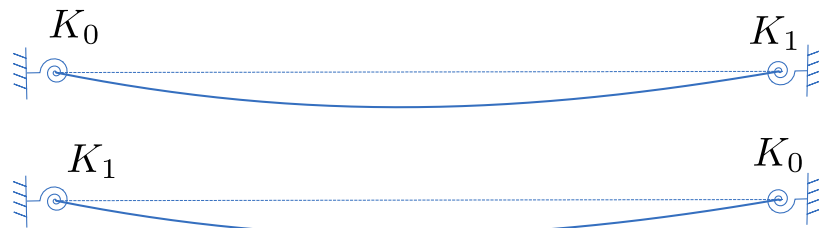
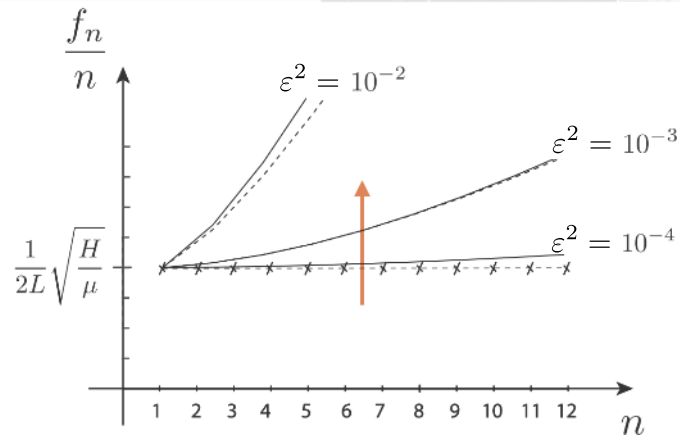


## Réduction du nombre de paramètres à identifier

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

$$H, \varepsilon, p, q$$

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



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

LEUVEN • 4-7.04.2022



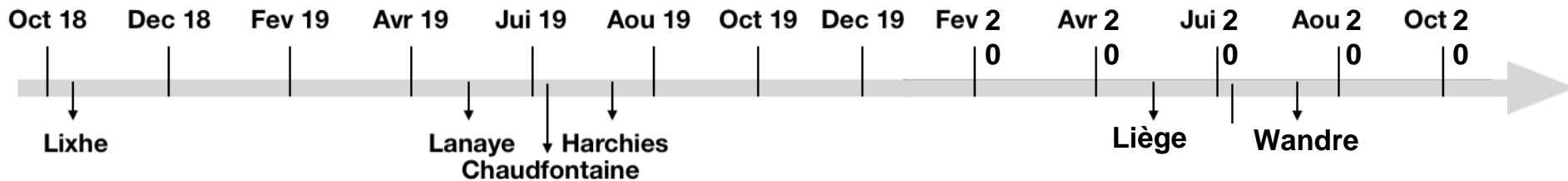
## Validations expérimentales





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

LEUVEN • 4-7.04.2022





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

LEUVEN • 4-7.04.2022



## Système de télémesure

*Mesure de vibration sur site*

*Mesure de tension à distance*

# 1. Acquisition, traitement de données

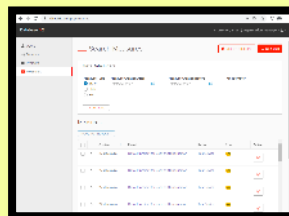


*Capteurs*



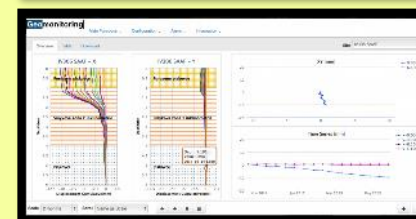
*Station*

# 2. Historisation, structuration des données



*Stockage cloud*

# 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

Capteurs



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



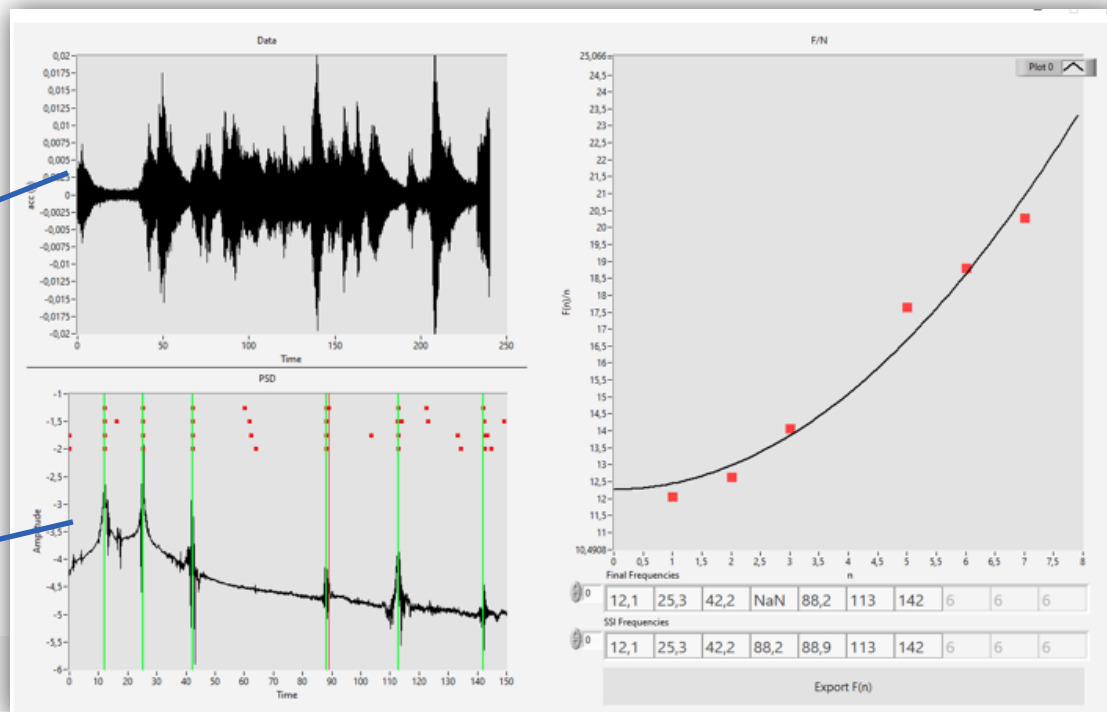




- Calcul des tensions des haubans, effectué par la station:

Vibrations  
mesurées par le  
capteur sans fil

Identification des  
modes de  
vibration du  
hauban



Courbe  
« fn/n »

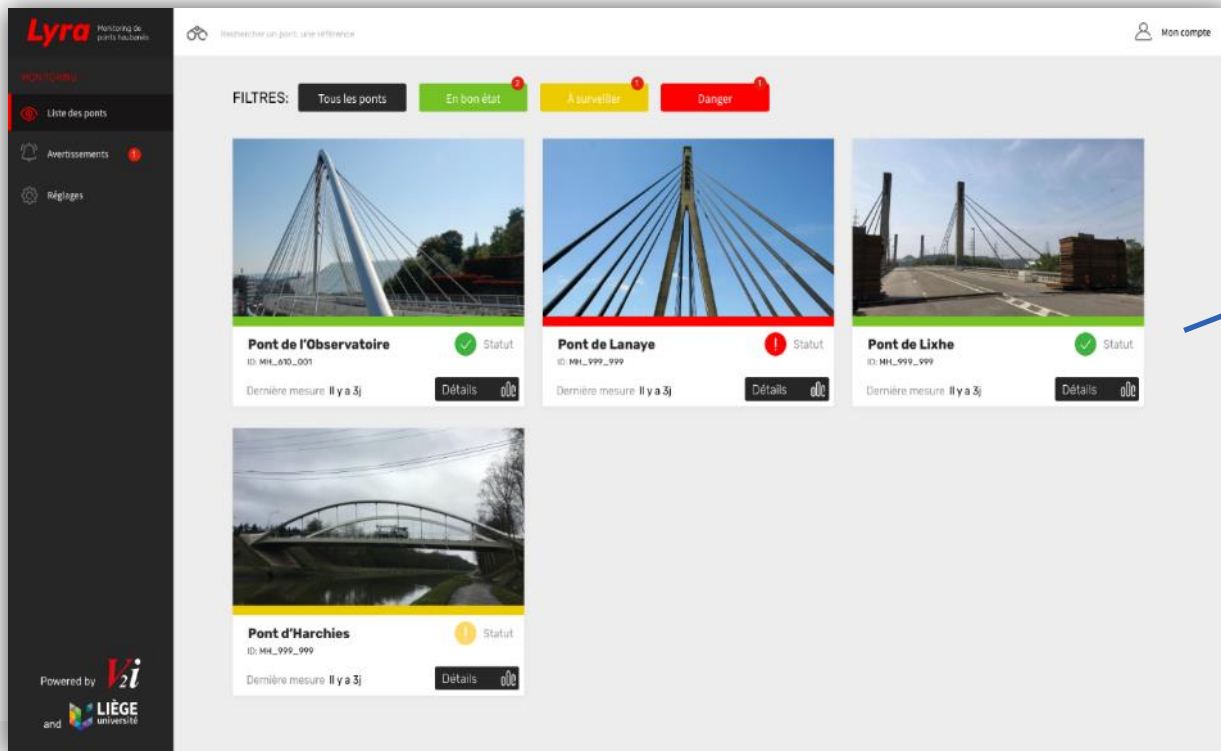
Algo.  
ULiège

Tension



## Visualisation des données

- Mise en forme des mesures stockées sur le serveur cloud



The screenshot shows the Lyra web application interface for bridge monitoring. The interface is in French and includes a sidebar with navigation options: 'Liste des ponts', 'Avertissements', and 'Réglages'. The main content area displays a grid of bridge cards, each with a photo, name, ID, and status. The status is indicated by a colored circle and the word 'Statut'. The cards are filtered by status: 'Tous les ponts', 'En bon état', 'À surveiller', and 'Danger'. The bridges shown are Pont de l'Observatoire (green status), Pont de Lanaye (red status), Pont de Lixhe (green status), and Pont d'Harchies (yellow status). Each card also shows the last measurement time and buttons for 'Détails' and 'Où'.

**Lyra** Monitoring de ponts hautement

Rechercher un pont, une référence

Mon compte

FILTRES: Tous les ponts En bon état À surveiller Danger

**Pont de l'Observatoire** Statut  
ID: MH\_610\_001  
Dernière mesure: Il y a 3j  
Détails Où

**Pont de Lanaye** Statut  
ID: MH\_999\_999  
Dernière mesure: Il y a 3j  
Détails Où

**Pont de Lixhe** Statut  
ID: MH\_999\_999  
Dernière mesure: Il y a 3j  
Détails Où

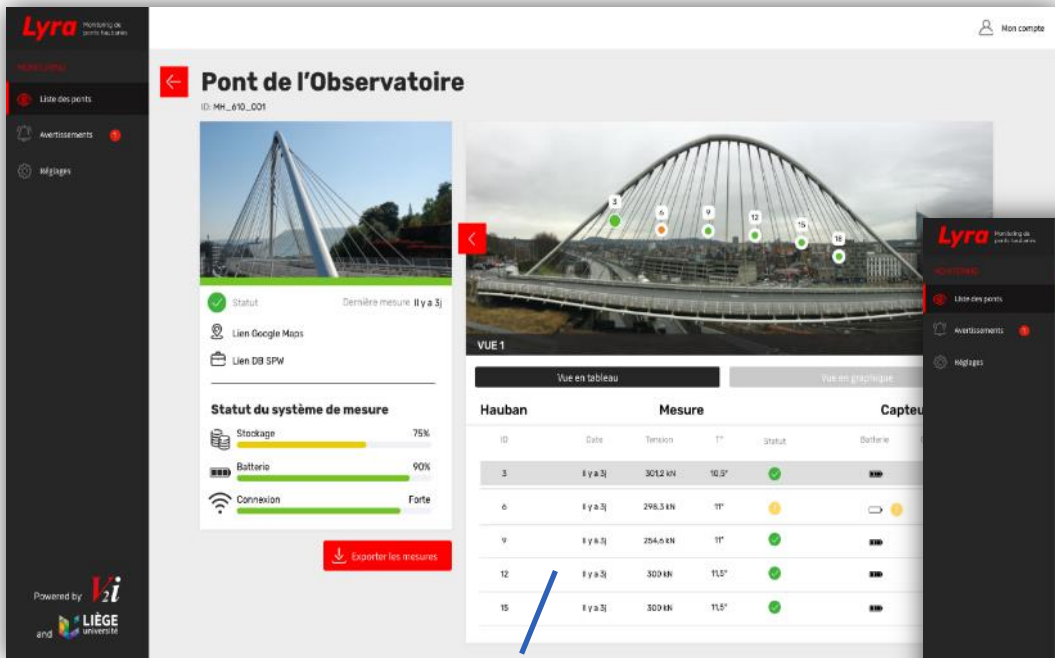
**Pont d'Harchies** Statut  
ID: MH\_999\_999  
Dernière mesure: Il y a 3j  
Détails Où

Powered by **Li** and **LIÈGE université**

Visualisation de tous  
les ponts sous  
surveillance et de  
leur statut

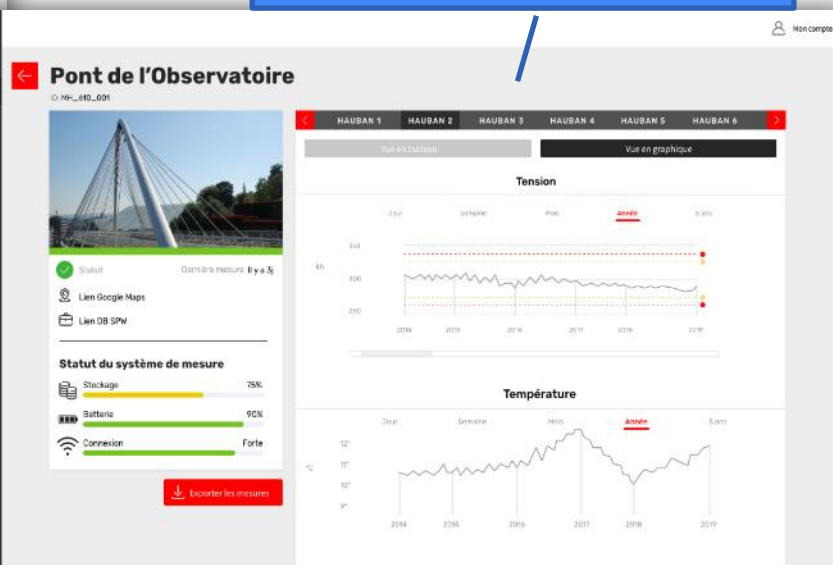


- Application web spécifique: vue détaillée d'un pont



Dernières tensions et température mesurées

Historique des tensions et températures





## 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



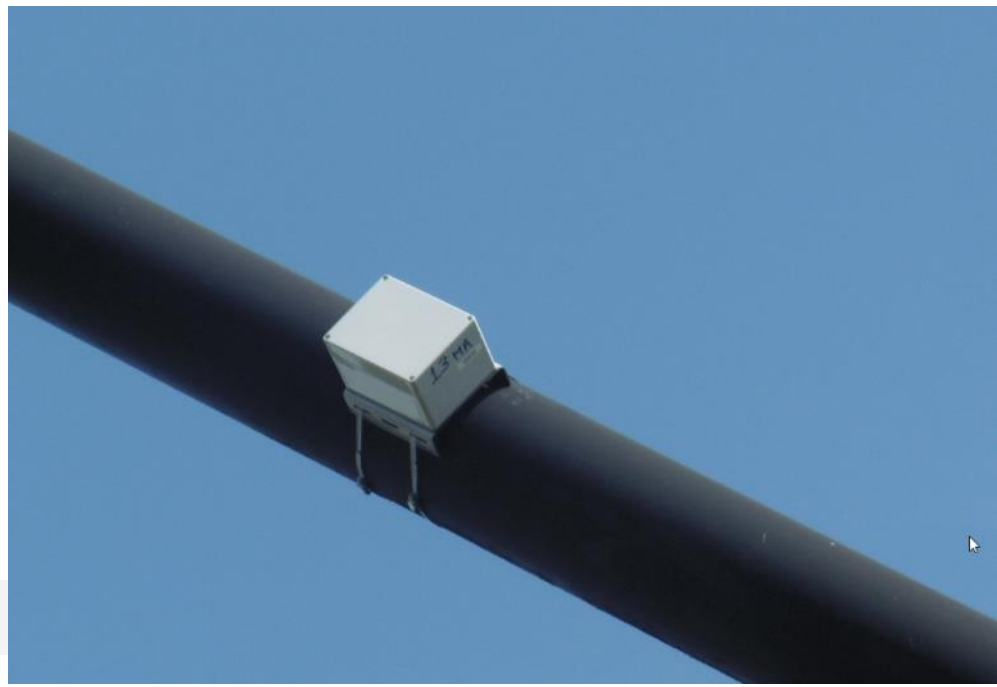




## Priorité 1 : Lanaye



Les capteurs sans fil





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

## 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 l'Esben-Erval, d'engleber le Castal Albert.

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

- deux nappes de dix haubans, soutiennent le tablier du pont ;

- deux nappes de cinq haubans ancrés en rive droite équilibrent 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.

L'instrumentation se compose de l'équipement suivant :

- 30 boîtiers contenant un accéléromètre tri-

directionnel, d'une sonde électronique permettant la transmission des données assurant l'al

- Une station d'acquisition recevant les données des capteurs et à l'aide d'un module paramétrique développé par l'Université et transmettant les données vers un serveur ;

- un panneau solaire et des batteries assurant l'alimentation de la station.

### Vue de situation



Variable	Monitor	Low Low	Low	High	High High	Send Low & High Warning	Send LowLow & HighHigh Warning
hauban 1	<input checked="" type="checkbox"/>	170	205	255	290	Maintenance	Client
hauban 11	<input checked="" type="checkbox"/>	290	345	425	480	None	Both

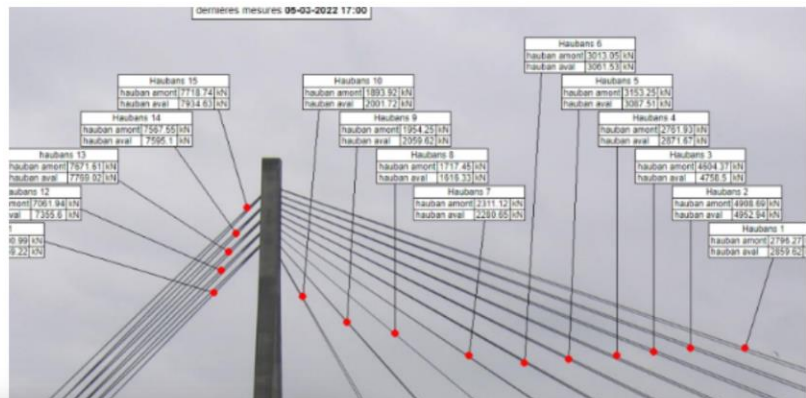
### Instrumentation

L'instrumentation se compose de l'équipement suivant :

- 30 boîtiers contenant un accéléromètre tri directionnel, d'une sonde de température, de l'électronique permettant la lecture des capteurs et la transmission des données sans fil et des batteries assurant l'autonomie du matériel ;

- Une station d'acquisition et de traitement, recevant les données des boîtiers, calculant les tensions des haubans à partir des signaux vibratoires et à l'aide d'un module paramétrique développé par l'Université et transmettant les données vers un serveur ;

- un panneau solaire et des batteries assurant l'alimentation de la station.



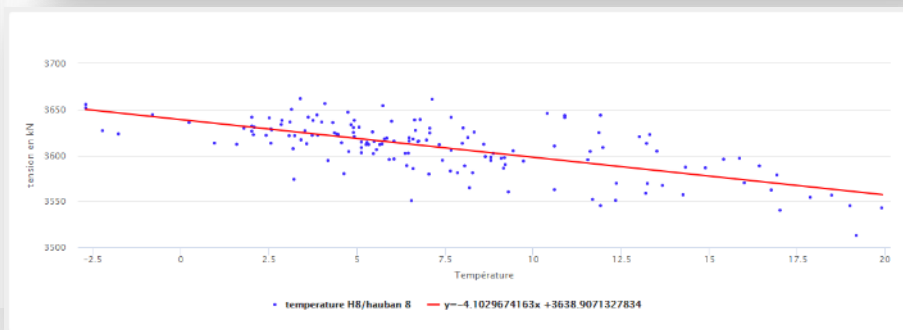
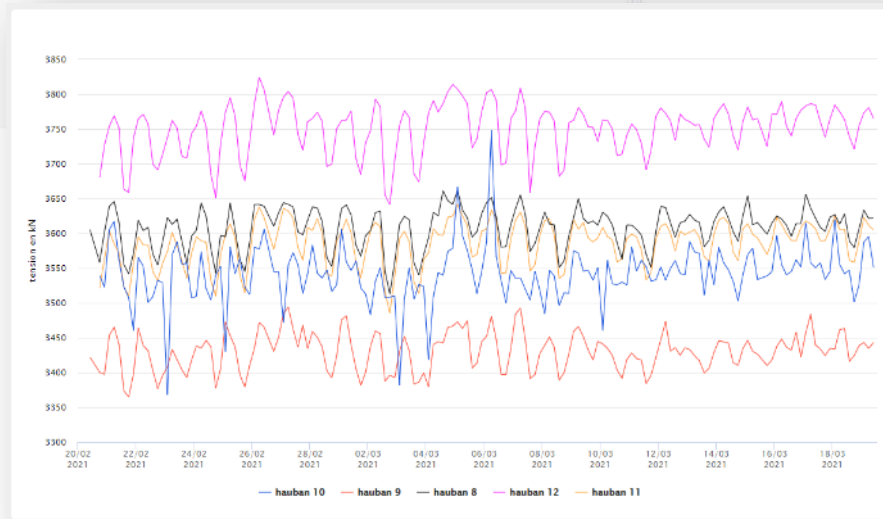
Variable	Monitor	Low Low	Low	High	High High	Send Low & High Warning	Send LowLow & HighHigh Warning
hauban 1	<input checked="" type="checkbox"/>	170	205	255	290	Maintenance	Client
hauban 11	<input checked="" type="checkbox"/>	290	345	425	480	None	Both



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

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

## 2. Suivi tempore





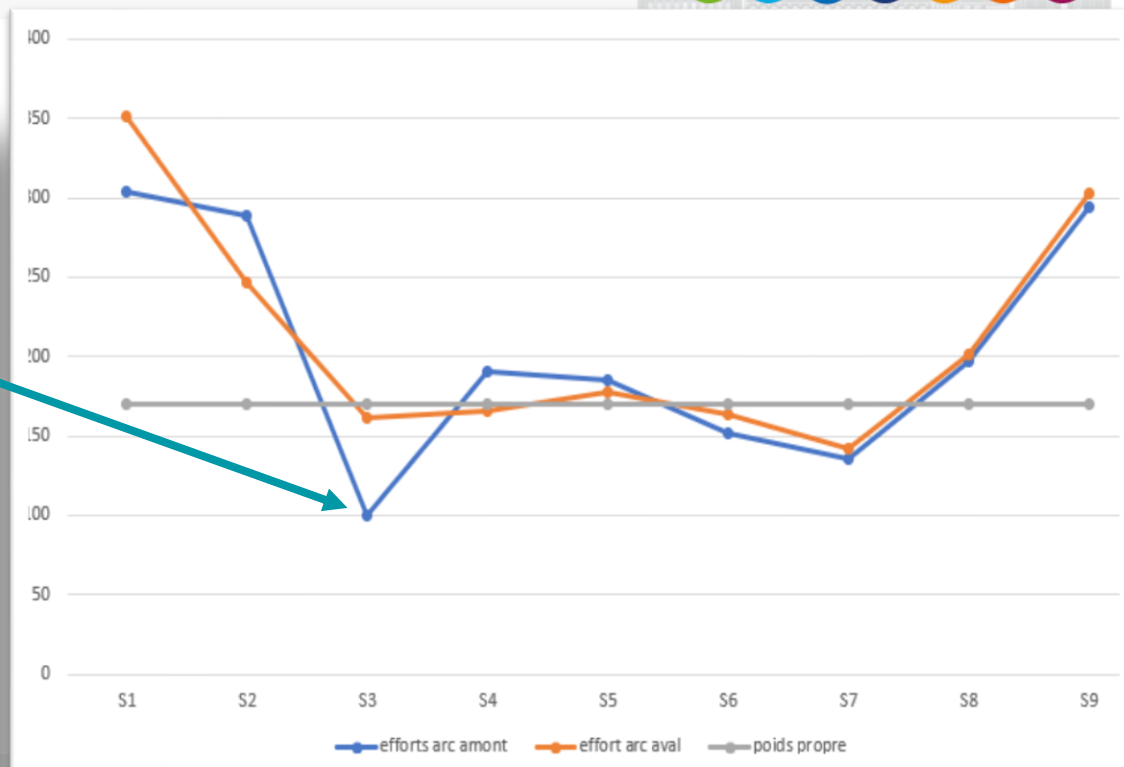
Objectif : Vérifier les tensions dans les suspentes métalliques pleines suite aux déformations causées pas les impacts d'objets flottants.



### 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





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

LEUVEN • 4-7.04.2022



**Merci de votre attention !**



Belgisch **Wegencongres**  
Congrès belge de la **Route**

LEUVEN • 4-7.04.2022



## Contact

👤 Patrice TOUSSAINT

☎ +32 475/75 48 41

✉ [patrice.toussaint@spw.wallonie.be](mailto:patrice.toussaint@spw.wallonie.be)





## 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



**FBEV**

Fédération Belge des Entrepreneurs de Travaux de Voirie asbl