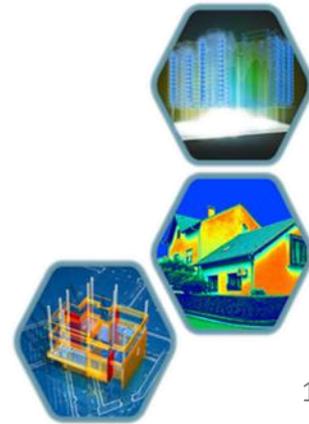


Méthode inverse pour la surveillance et la localisation des dommages dans les ponts

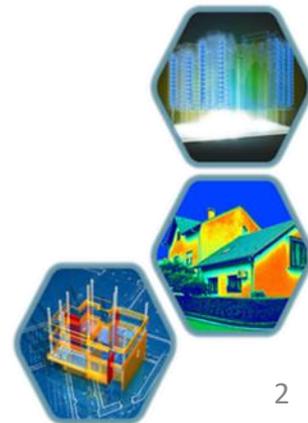
Julian Raedersdorff, David Clair, Fabien Batteix,
Alaa Chateauneuf

14 mars 2023



Sommaire

1. **Concepts de la surveillance**
2. **Projet CI3S et méthode inverse**
3. **Illustration sur maquette**
4. **Application au pont de Longues**
5. **Conclusion**



Grandeurs d'intérêt selon l'approche SHM

- **SHM basée sur l'exploitation**

- Mesure des conditions d'exploitation pour détecter les situations anormales



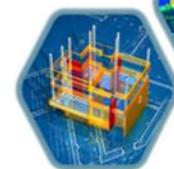
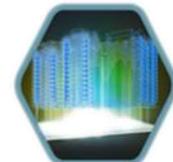
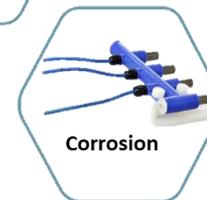
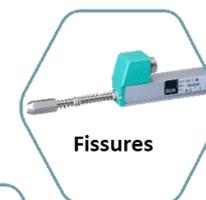
- **SHM basée sur essais vibratoires**

- Variation des Fréquences propres
- Modification des Modes propres
- Modification de l'Amortissement



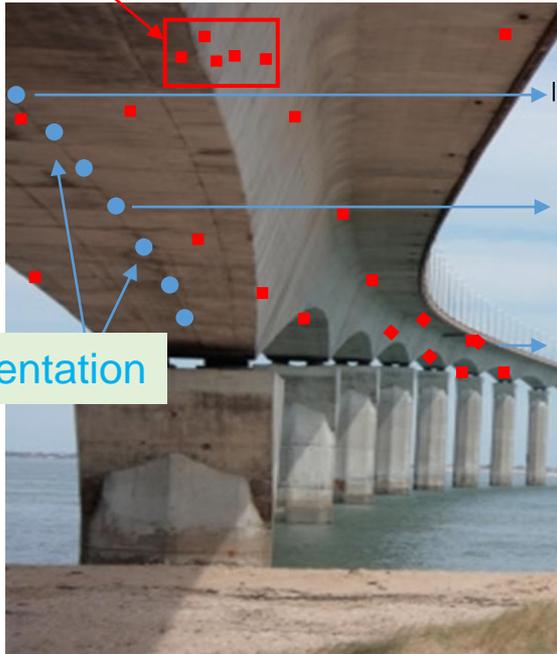
- **SHM basée sur l'état**

- Potentiel de corrosion
- Déformations, fissures..

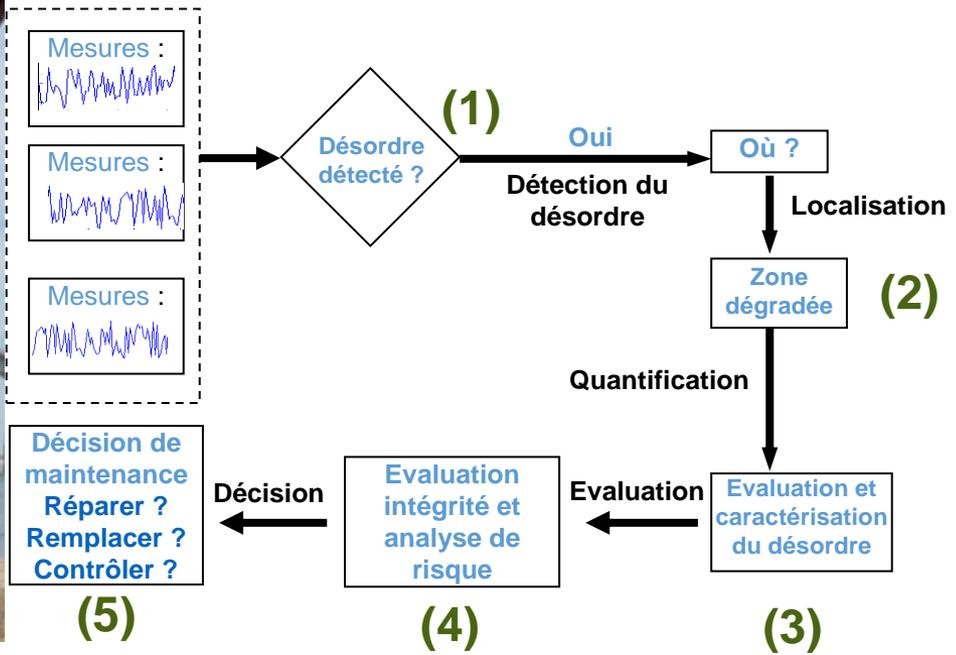


Procédure de surveillance

Zone endommagée



Instrumentation

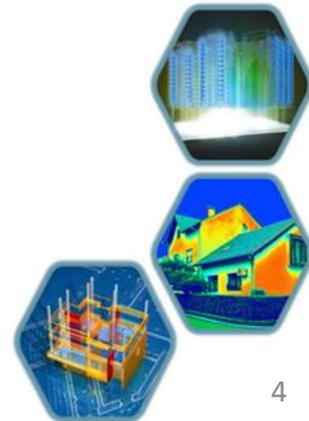


SHM :

- Détection du désordre
- Localisation du désordre
- Quantification du désordre
- Décision de maintenance

Incertitudes :

- Variation aléatoire charges
- Propriétés des matériaux
- Conditions d'appuis
- Saisonnalité



Projet CI3S

Objectif : Développement d'une Chaîne Intelligente de Surveillance de la Santé Structurale

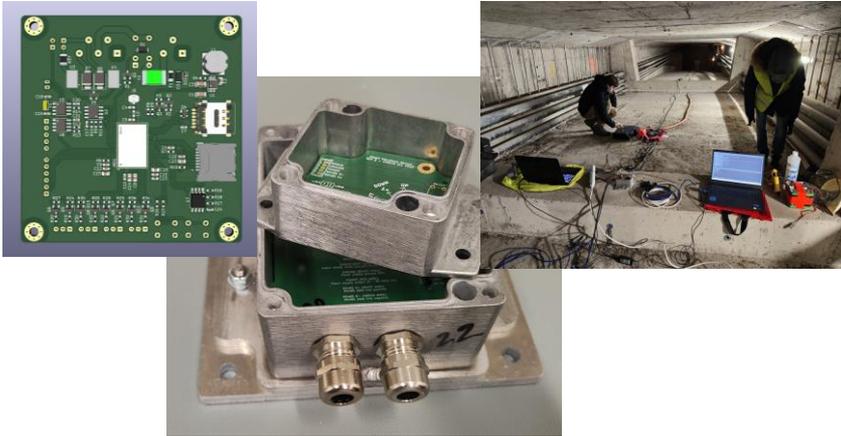
Systeme de
mesure performant
et peu onereux



Algorithmes de
traitement robustes

Methode inverse +
SSA

Intelligence
artificielle



Surveillance locale et globale

SHM local

Evaluation directe du composant ou désordre



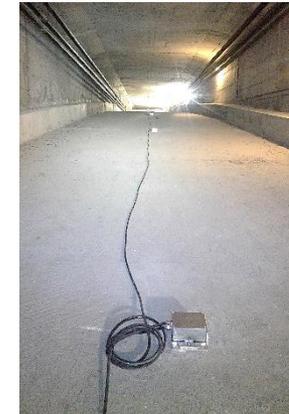
Fissures



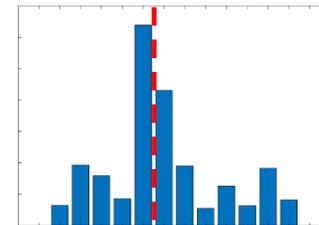
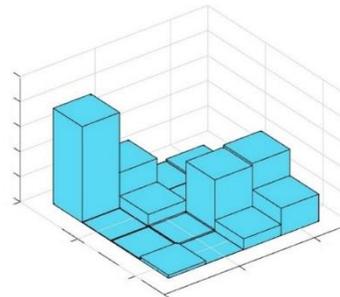
Corrosion

SHM global

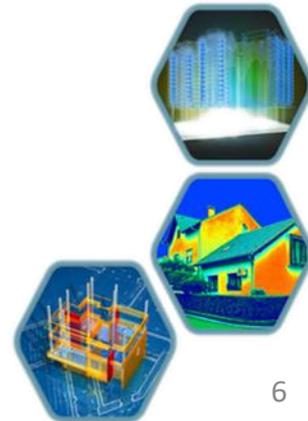
Evaluation indirecte du comportement de la structure



Accélération en n points



Extraction et post-traitement



Surveillance locale et globale

SHM local

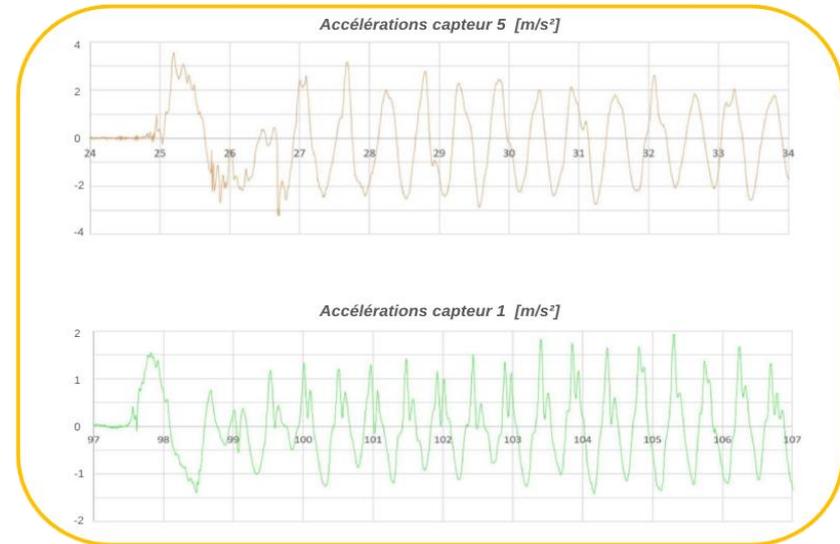
Mesure des déformations



● EXTENSOMETRES : Localisés sur Tirants et chaînes de barres

SHM global

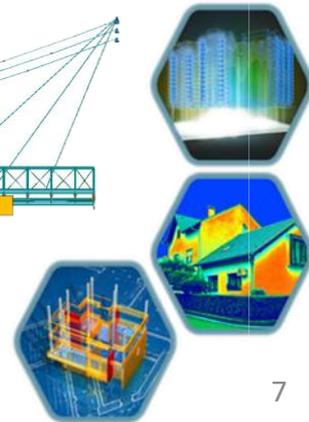
Mesure des vibrations sous exploitation



■ ACCELEROMETRES : Localisés sur pièces de ponts



Équipement du pont de Dallet (Octobre 2021)



Méthodologie d'analyse inverse

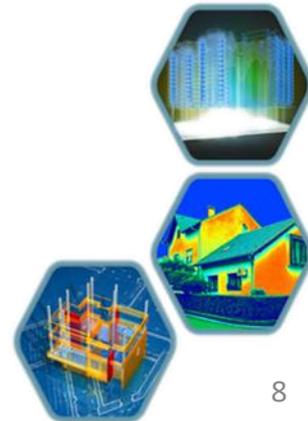
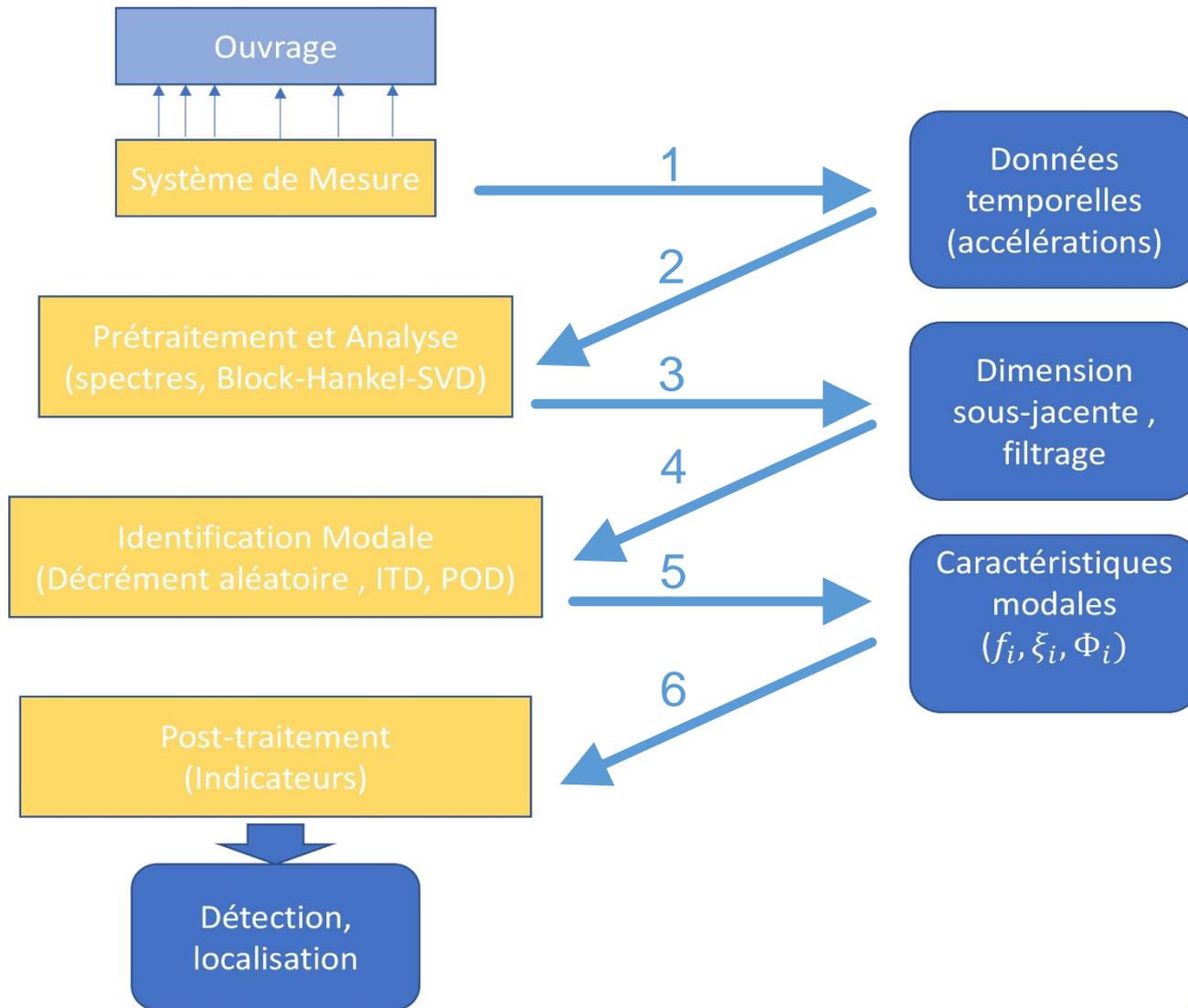
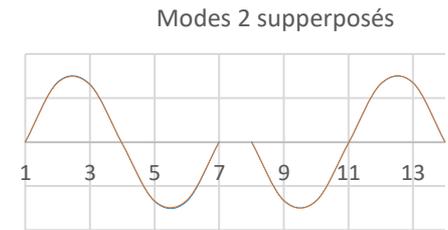
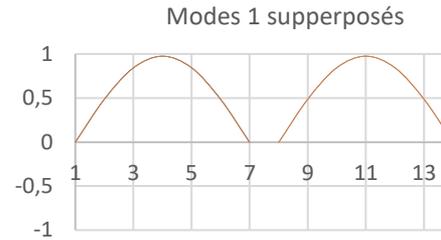
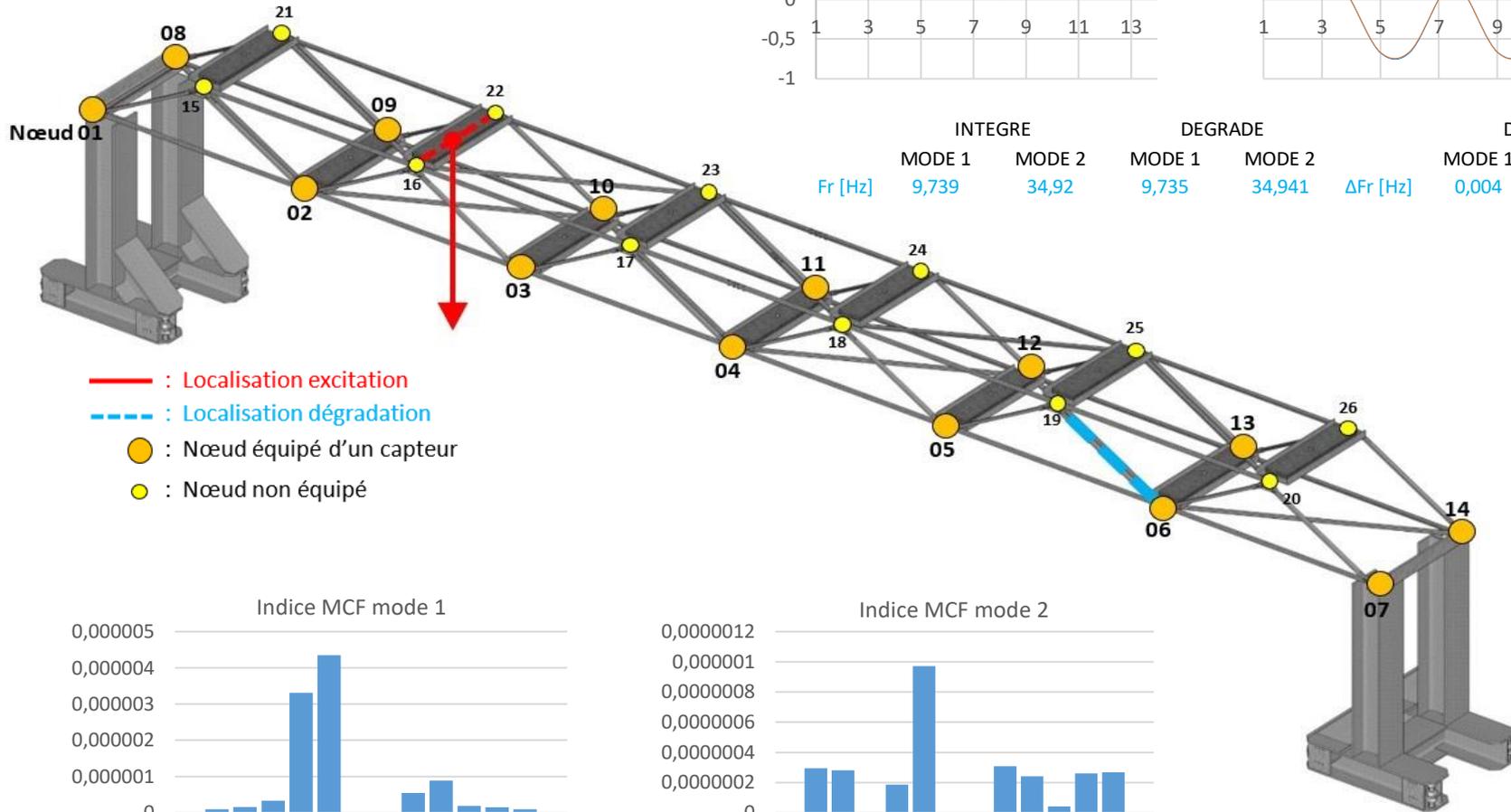


Illustration sur maquette numérique



	INTEGRE		DEGRADE		DELTA		
	MODE 1	MODE 2	MODE 1	MODE 2	MODE 1	MODE 2	
Fr [Hz]	9,739	34,92	9,735	34,941	ΔFr [Hz]	0,004	0,021

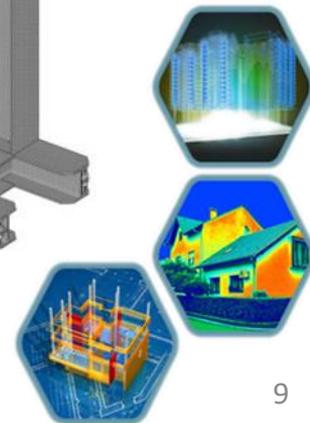
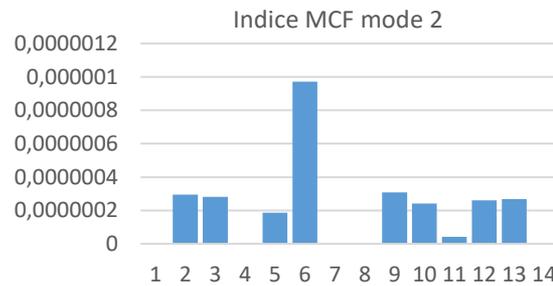
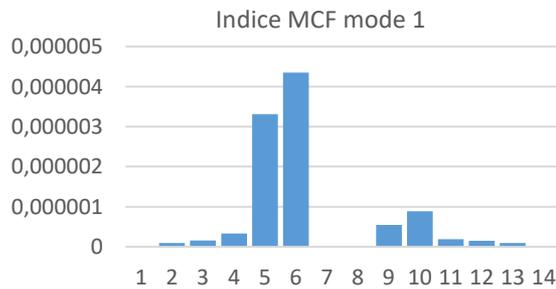


Illustration sur maquette réelle



Barre dégradée en place sur la maquette

	As (mm ²)	Ratio K_Normale	I(mm ⁴)	Ratio K_flexion	Lf (mm)	NCr_Eul (daN)
Section initiale	68,00	100%	932,00	100%	353,55	1545,3
Fer plat 14/5	70,00	103%	145,83	16%	707,11	60,5
Tube rond 8mm ép1mm	21,99	31%	137,44	15%	707,11	57,0
2 Tubes ronds 8mm ép1mm	43,98	65%	3 837,46	412%	707,11	113,9

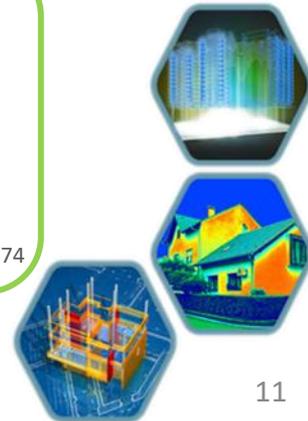
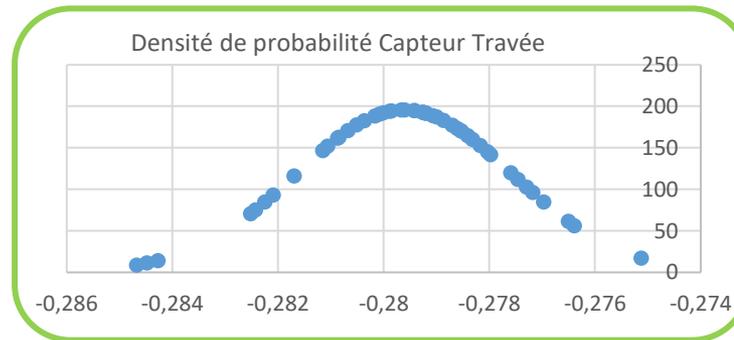
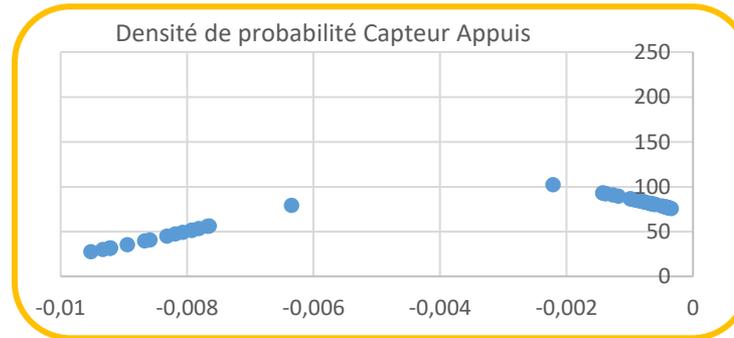
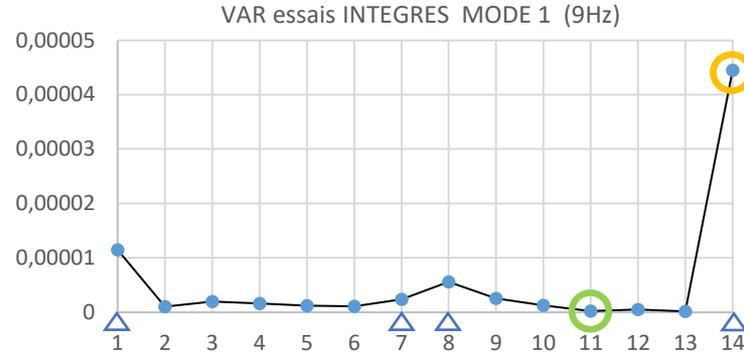
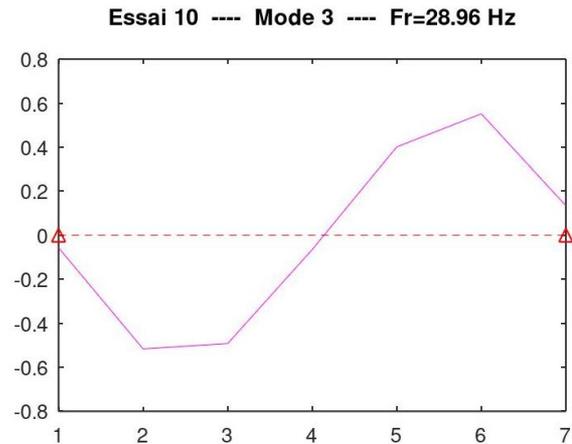
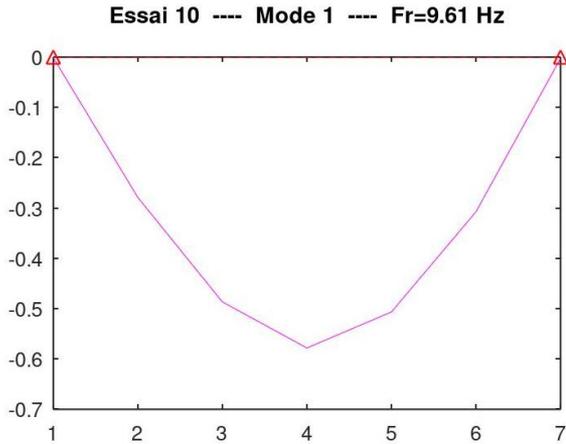
Pourcentage de rigidité résiduelle suivant type de dégradation



Vue sur barre intégrée et dégradée



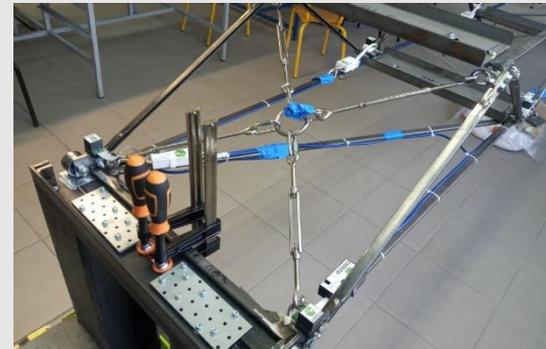
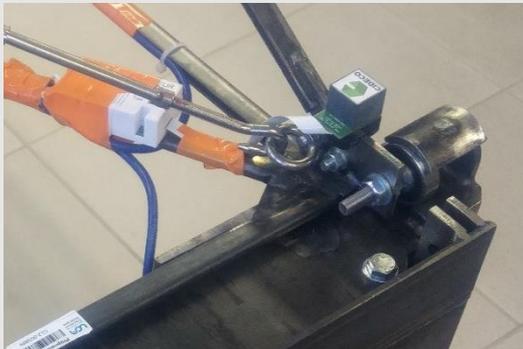
Résultats sur maquette réelle



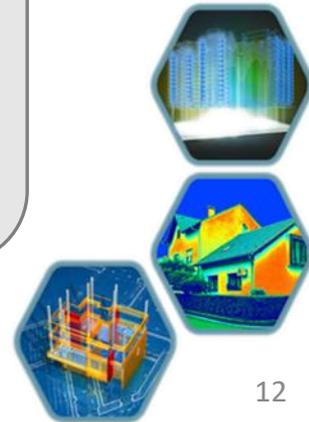
Evolution de la maquette réelle



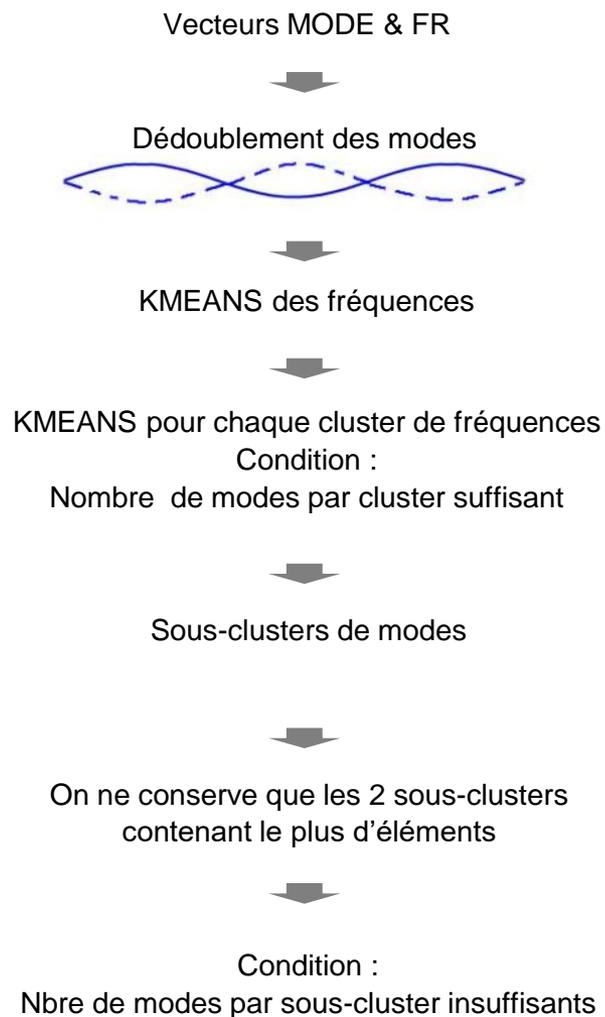
Installation initiale



Modifications successives des points sensibles



Algorithme de traitement des essais en série



Boucle sur l'ensemble des opérations avec assez d'itérations pour voir apparaître l'ensemble des modes



3 conditions :

Valeur, pente, et taux de variation max. Conservation du paquet à partir duquel les 3 critères sont satisfaits.



Calcul des variances avec 2 à n échantillons. On normalise les variances



Phi.Phi' et inversion modes en opposition de phase



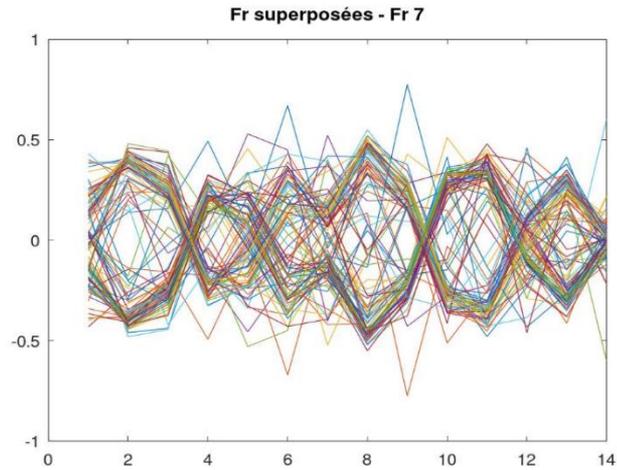
Vecteurs MODE & FR renommés par fréquence ascendante



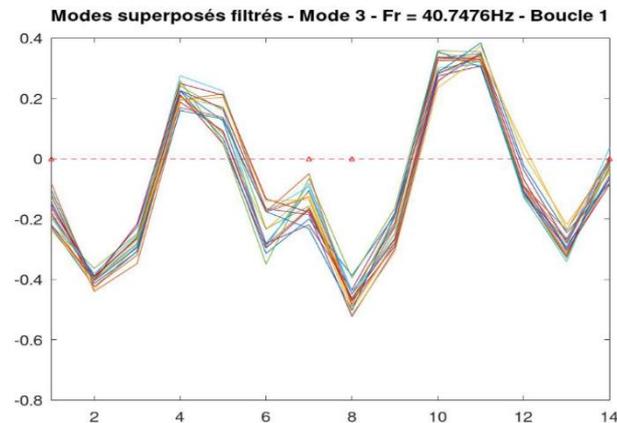
On supprime les modes dont les v.abs sont similaires



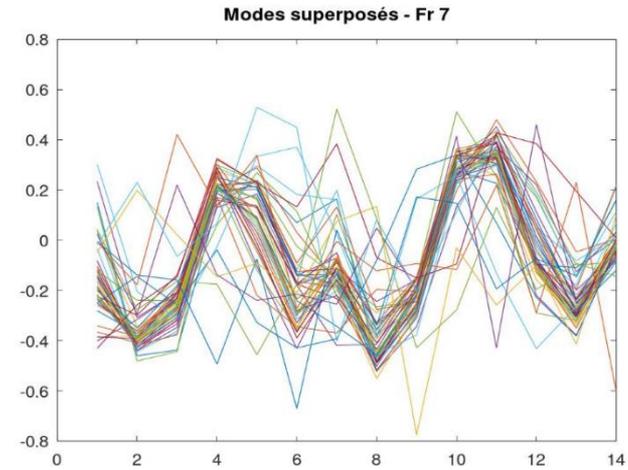
Résultats de l'algorithme



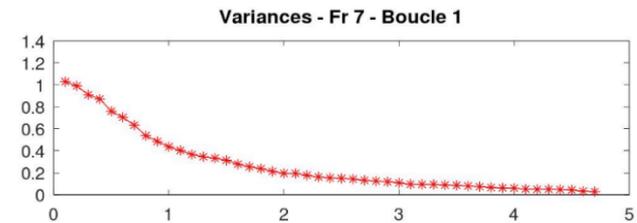
Cluster de fréquences après dédoublement



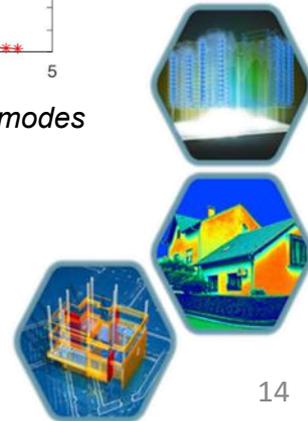
Cluster de modes en sortie d'algorithme



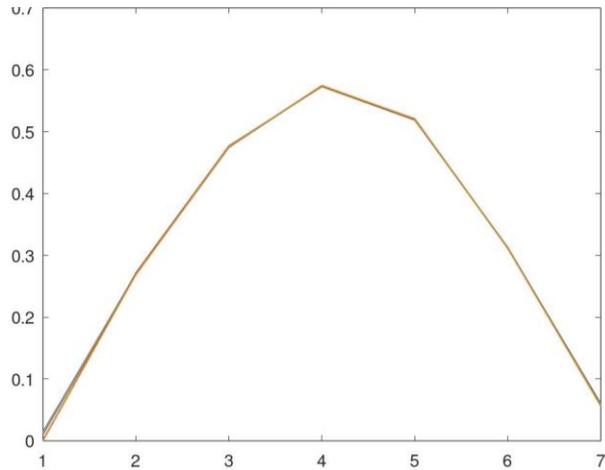
Cluster de modes pour calcul des variances



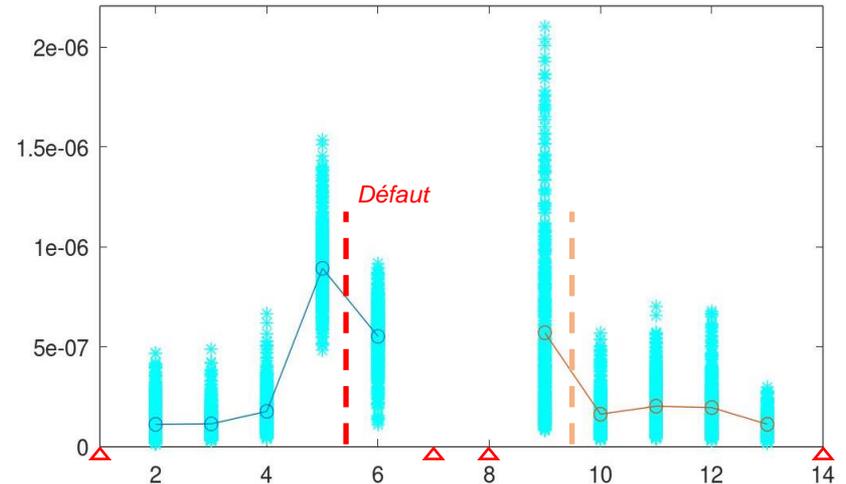
Graphique des Σ de variances pour 2 à m modes



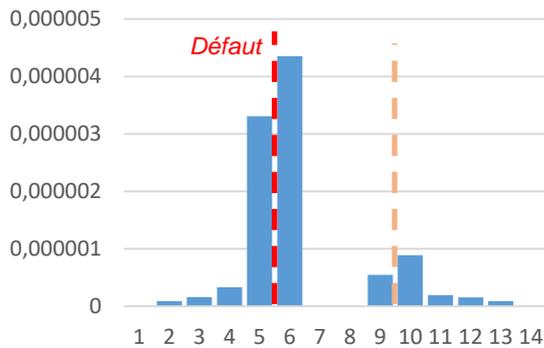
Analyse des essais en série : calcul d'indices



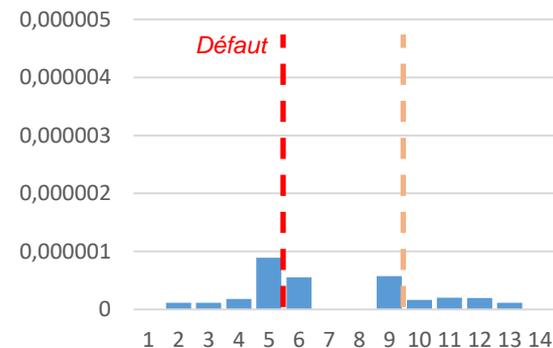
Modes 1 superposés filtrés - $F_r = 9,7082\text{Hz}$



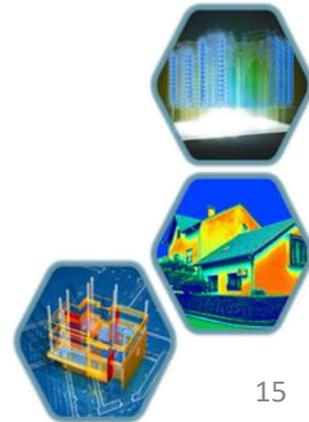
Indices MCF et moyenne pour le 1^{er} mode (9Hz) intervalle = 2σ



Indice MCF Robot mode 1

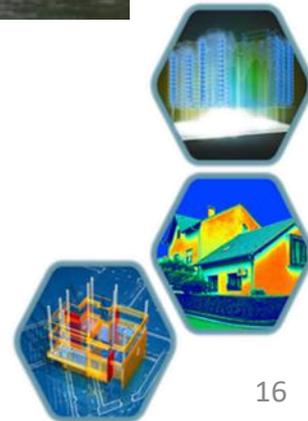
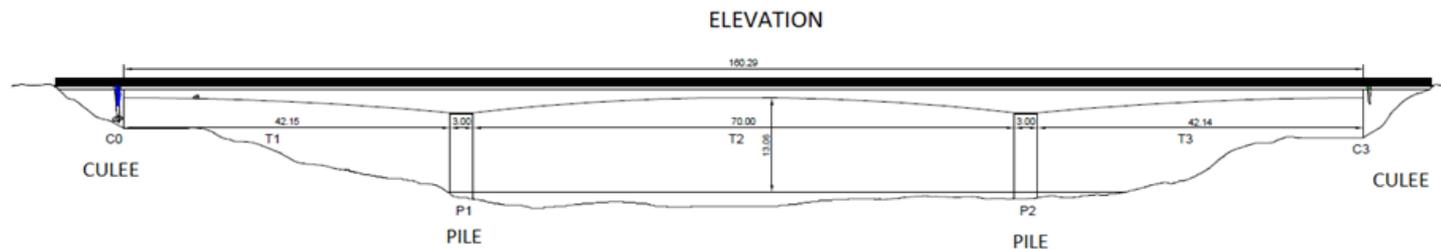


Indice MCF moyen pour le mode 1



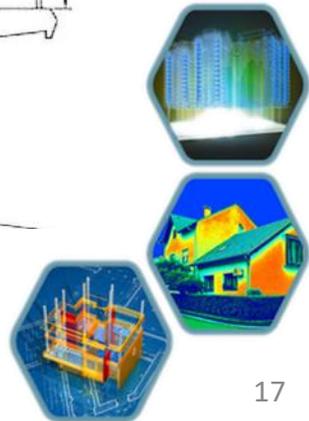
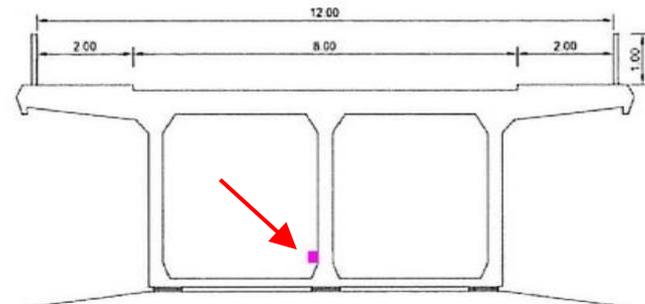
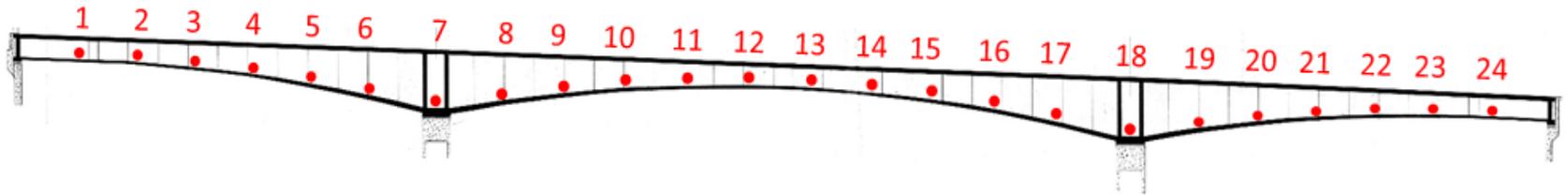
Pont de Longues

- Type d'ouvrage : Caisson double en béton précontraint
- Année de construction : 1971
- Longueur de l'ouvrage : 162 m
- Continuité : 3 travées



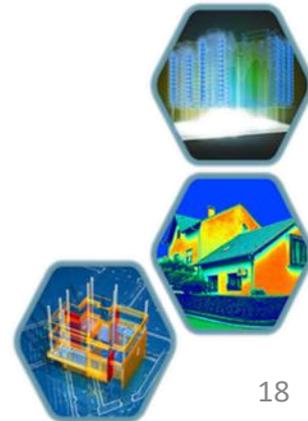
Instrumentation de l'ouvrage

- 24 accéléromètres disposés sur l'âme centrale à 30 cm au-dessus de la face supérieure de l'intrados, selon un espacement de 6,5 m.



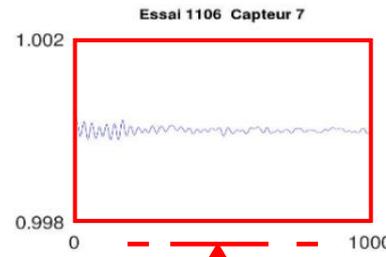
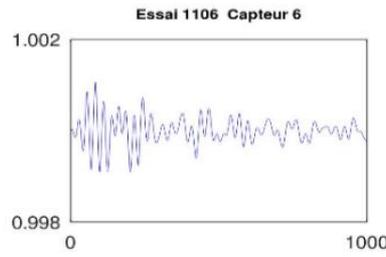
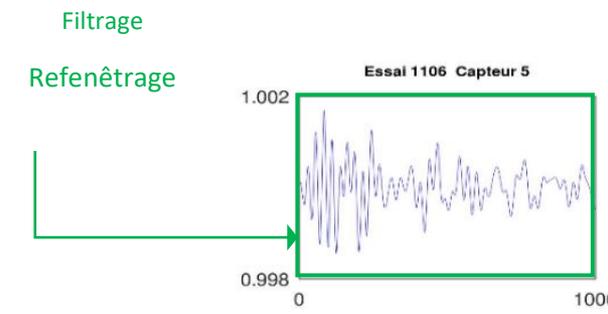
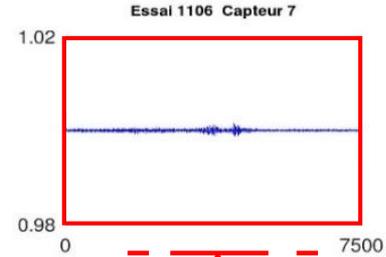
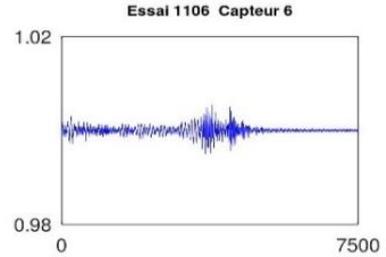
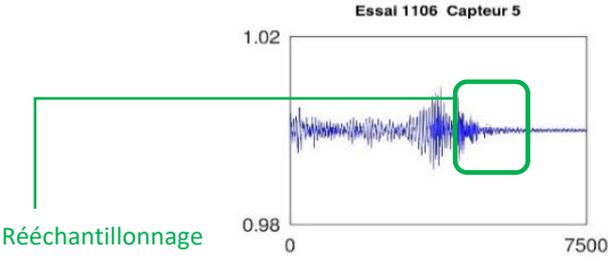
Essais de chargement

- **Configuration des essais :**
 - Passage de camions chargés à 26T
 - Croisement de 2 camions à mi-travée.
- **Spécificités de l'essai :**
 - Excitation de forte amplitude
 - Excitation simultanée « de part et d'autre de l'ouvrage »
 - Réponse libre sans excitation supplémentaire

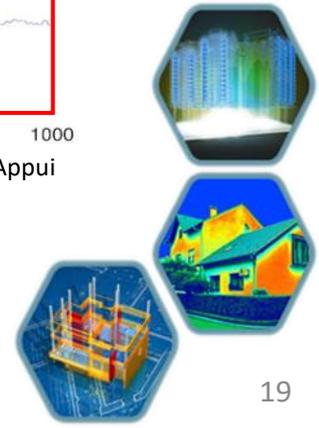


Exploitation des essais

- Durée du signal = 30s. Fréquence d'échantillonnage = 250Hz.
- Le signal mesuré comprend une séquence de réponse libre
- Très faible amplitude des signaux aux appuis



Traitement du signal pour 3 capteurs

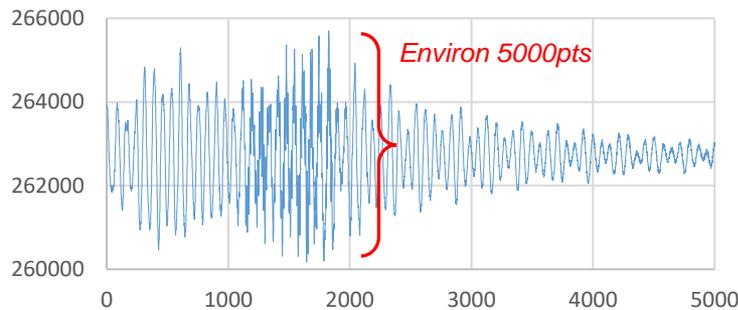


Analyse des signaux

- Détection de 6 modes avec les excitations « localisées »
- Accélérations d'amplitudes comparables aux 2 extrémités de l'ouvrage

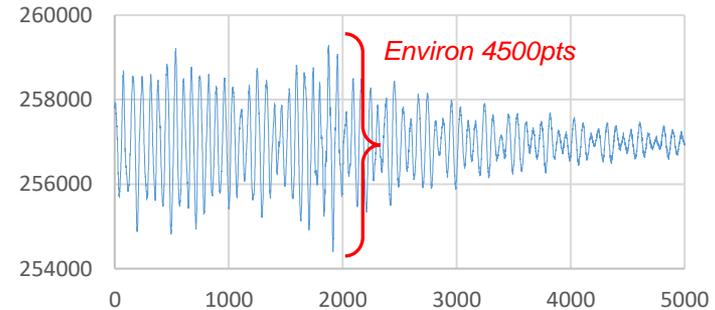
Essai 01 (1 seul véhicule)

Capteur 1 : au droit de la culée Sud



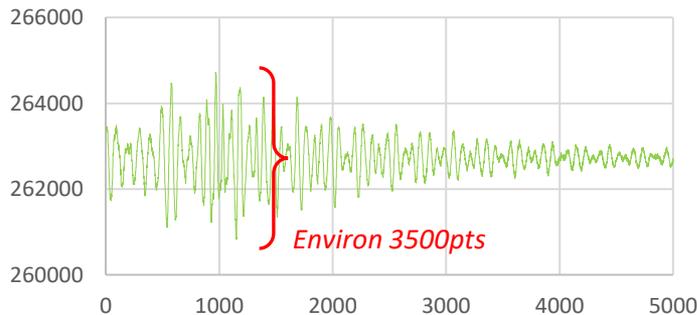
Essai 01 (1 seul véhicule)

Capteur 24 : au droit de la culée Nord



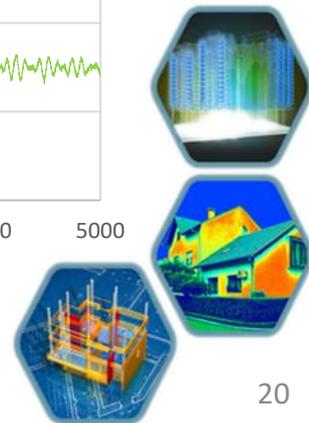
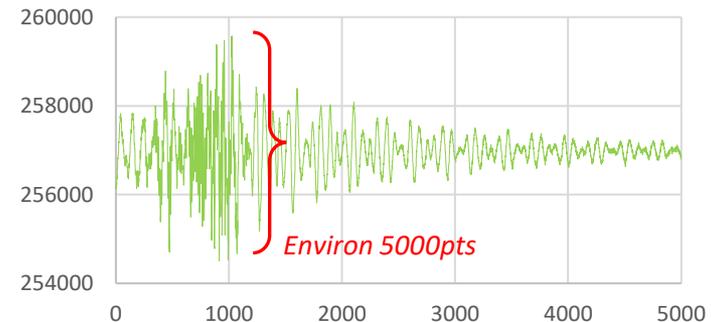
Essai 02 (1 seul véhicule)

Capteur 1 : au droit de la culée Sud



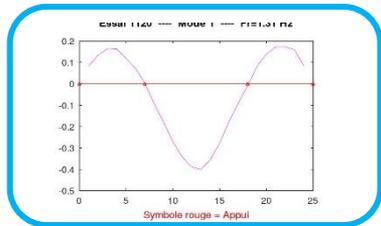
Essai 02 (1 seul véhicule)

Capteur 24 : au droit de la culée Nord

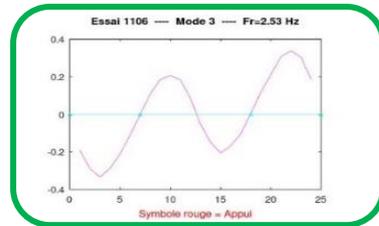


Calcul des modes

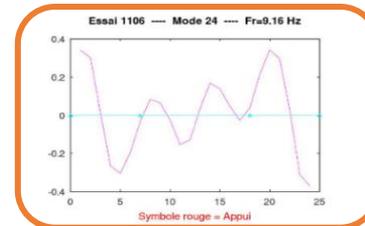
- 7 modes sous 10Hz
- Peu d'itérations avec l'algorithme pour obtenir ce résultat



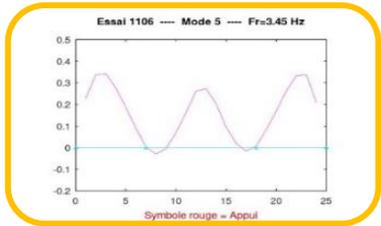
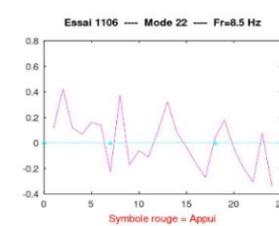
MODE 01 : 1,32Hz



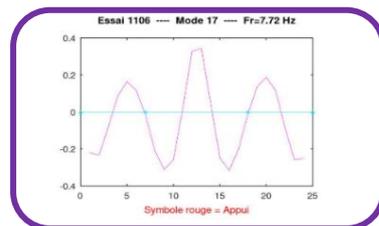
MODE 02 : 2,53 Hz



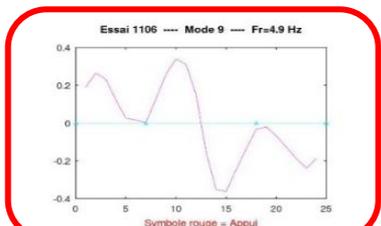
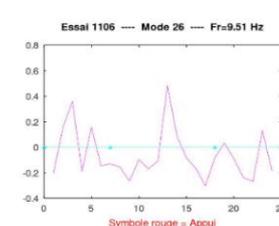
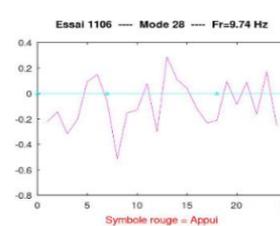
MODE 07 : 9,16Hz



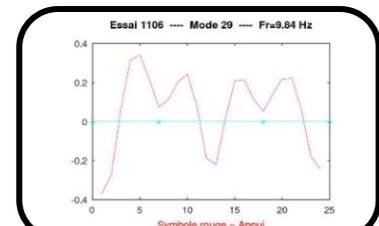
MODE 03 : 3,45Hz



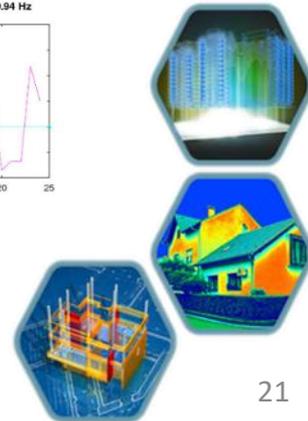
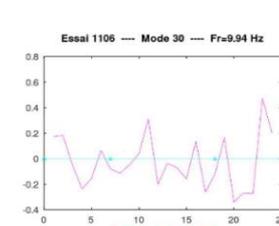
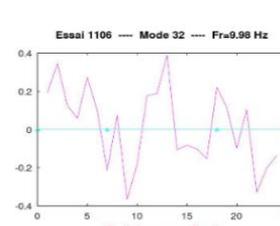
MODE 05 : 7,72Hz



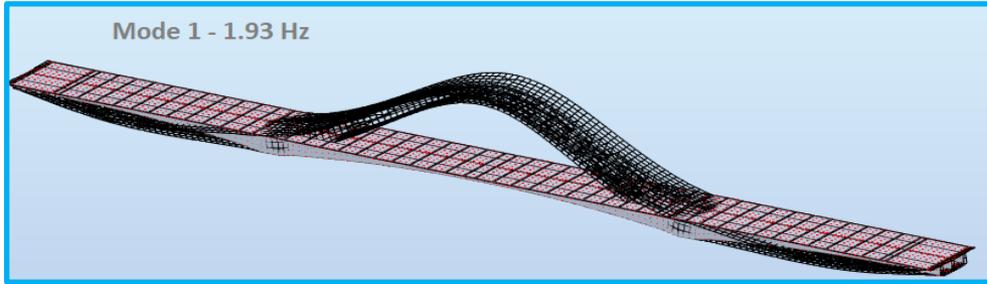
MODE 04 : 4,90 Hz



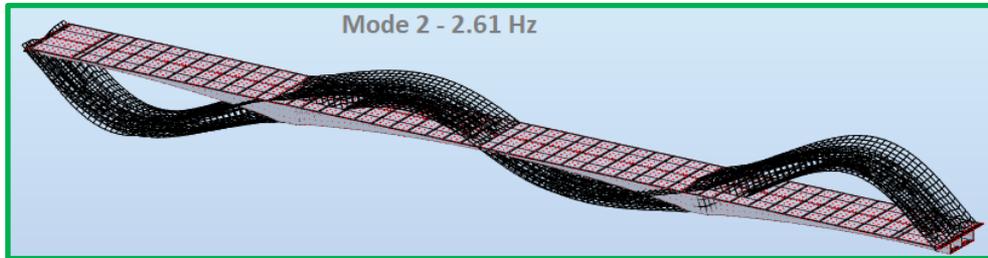
MODE 06 : 9,84Hz



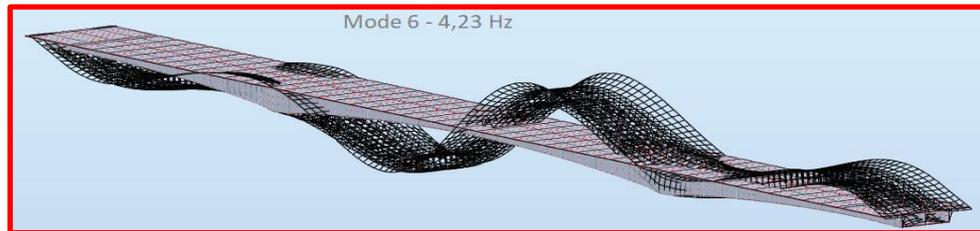
Comparaison des modes observés et numériques



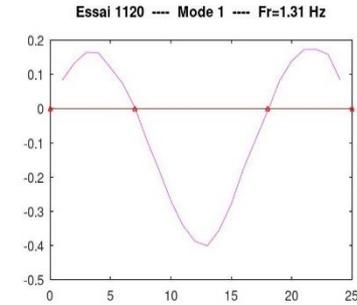
Mode 1 Robot. 1,93Hz



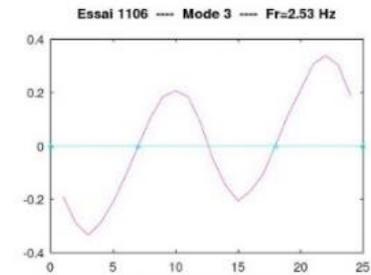
Mode 2 Robot. 2,61Hz



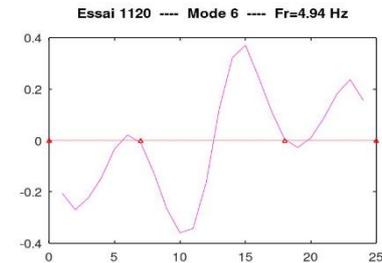
Mode 6 Robot. 4,23Hz



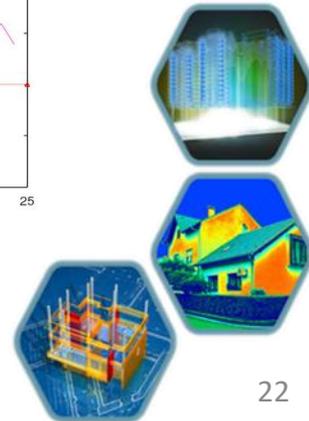
Mode 1 observé. 1,31Hz



Mode 2 observé. 2,53Hz

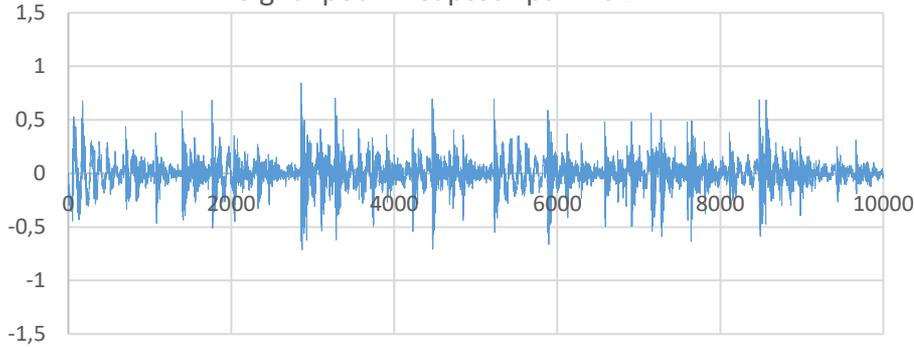


Mode 6 observé. 4,94Hz

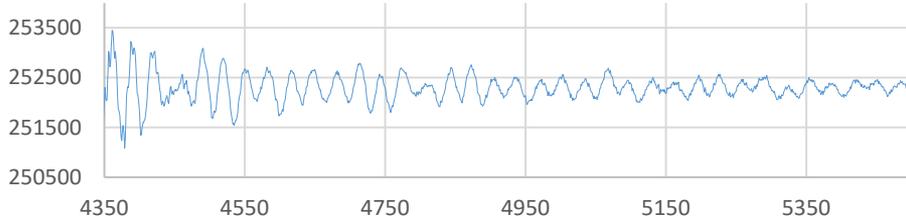


Cas standard : Décrément Aléatoire et ITD

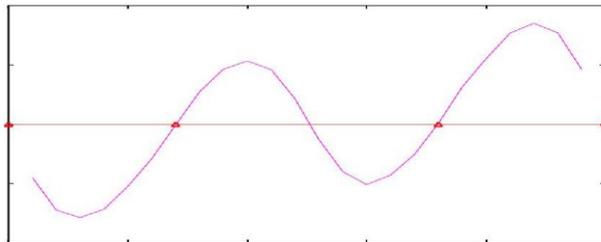
Signal pour 1 Capteur parmi 24



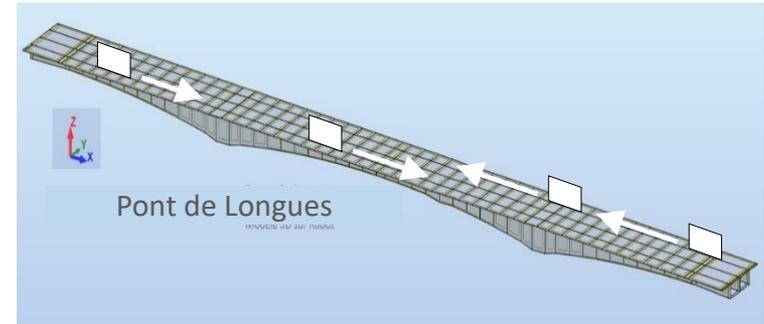
Fonction scalaire du décrément d'un capteur



Modes de flexion et de torsion-flexion



Excitations en condition d'exploitation



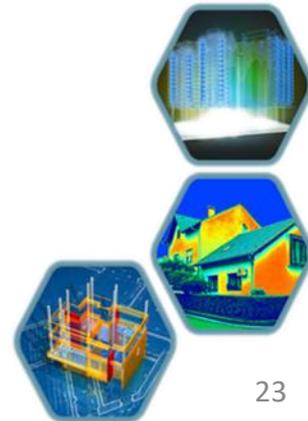
Décrément aléatoire

- Conditions de déclenchement
- Calcul des fonctions scalaires
- Fonction matricielle du décrément

Méthode d'Ibrahim

$$[H_f] = A [H_p]$$

$$A = [H_f][H_p]^+$$

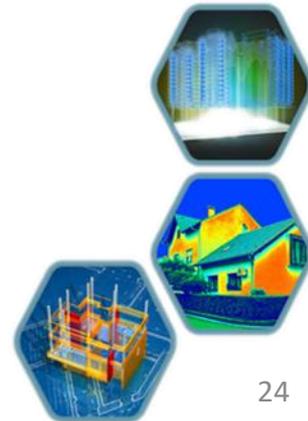


Conclusion

- **Systeme de mesure operationnel**
- **Algorithmes d'identification robustes**
- **Bonne capacite de detection et de localisation des dommages**

Perspectives

- **Etudes de sensibility**
- **Couplage avec les algorithmes d'IA**





Merci de votre attention !

