



L'INSTRUMENTATION
GÉOPHYSIQUE SUR MESURE
GEOPHYSICAL EQUIPMENT

**Analyse modale opérationnelle des
structures: théorie, applications et limites.**

Société créée en 1994 est spécialisée dans la fourniture de matériels, d'accessoires et de logiciels géophysiques. Nous proposons des services associés comme la formation technique et la réparation.



VENTE

Un vaste choix d'appareils pour l'ensemble des méthodes de géophysique appliquée.



LOCATION

Un service de location d'appareils géophysiques et de logiciels sur la France et à l'étranger.



FORMATION

Des formations techniques et pratiques sur l'utilisation des instruments de mesure.



ASSISTANCE TECHNIQUE



MAINTENANCE



L'INSTRUMENTATION
GÉOPHYSIQUE SUR MESURE
GEOPHYSICAL EQUIPMENT



Partenaires historiques

ABEM

SCINTREX
A DIVISION OF LRS

SENSYS[®]
Magnetometers & Survey Solutions

AGS Aarhus GeoSoftware

Bartington
Instruments

SMARTSOLO

GEM
SYSTEMS
ADVANCED MAGNETOMETERS

CHAUVIN ARNOUX
CHAUVIN ARNOUX GROUP

GEONICS

ZP

geotomographie

Seismic Source

LIPPMANN
Geophysikalische Messgeräte

SolGeo
INSTRUMENTS

DUALEM

GEORADIS

WWW.GEOREVA.EU

GEOREVA

Nouveaux partenariats



Géoradar à haut rendement et haute précision



Solutions de surveillance des structures à long terme (SHM)



Radar et instruments d'auscultation béton (CND)



Stations sismiques tout-en-un pour
la géologie et le génie civil

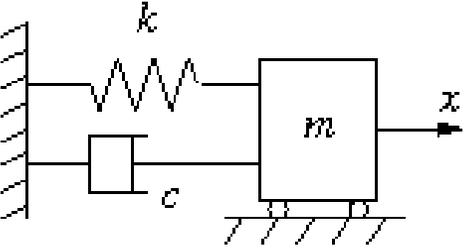


Définition

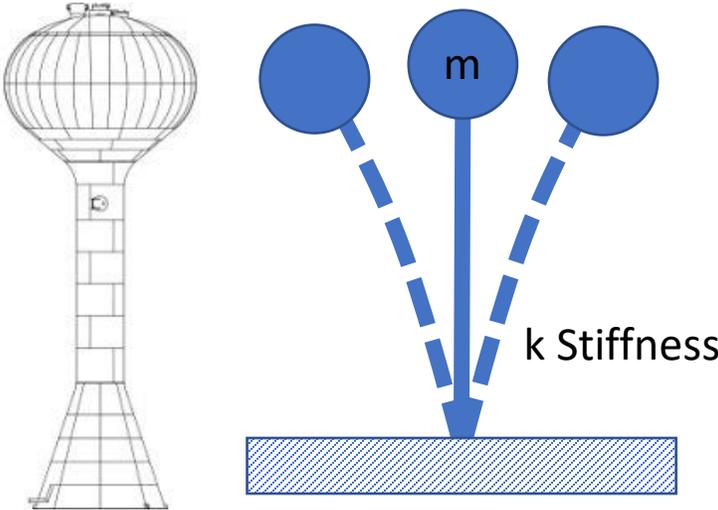
L'analyse modale

L'estimation du comportement dynamique des bâtiments, ponts, barrages... est un opération très répandue dans la conception de tout type de structure ou dans la modification de structures existantes. Cela est requis par de nombreux codes de construction afin de d'établir la résistance de la structure aux séismes, vents ou autres charges dynamiques.

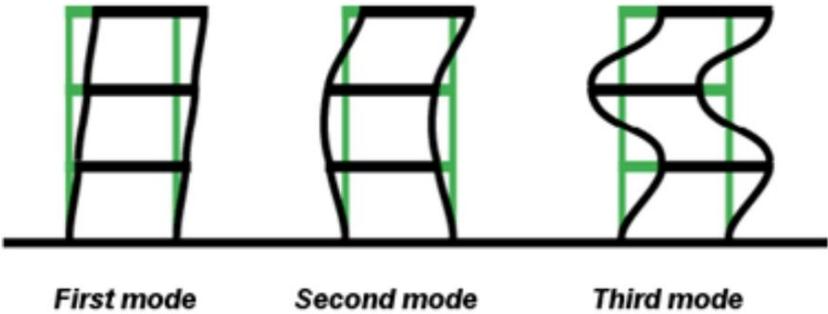
En ingénierie structurale, l'analyse modale utilise la masse totale et la rigidité de la structure pour trouver, de manière mathématique ou expérimentale, les différentes périodes pour lesquelles elle va naturellement vibrer (resonner).



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$



SDOF model of water tank => f0



MDOF model of a three floor building => f0, f1, f2

L'analyse modale opérationnelle

On parle d'analyse modale opérationnelle lorsque que la source d'excitation des différents mode de vibration de la structure est considérée comme passive. Cette source est le **bruit de fond sismique**, aussi appelé bruit de fond ambient, il existe de partout sur la surface de la Terre.

Ses origines sont diverses:

< **2 Hz**, principalement produit par des phénomènes naturels comme les variations atmosphériques et océaniques (vagues, marées, tempêtes, moussons...), et d'autres sources naturelles comme le vent et la pluie.

> **2 Hz**, origine anthropique, industrie, trafic...

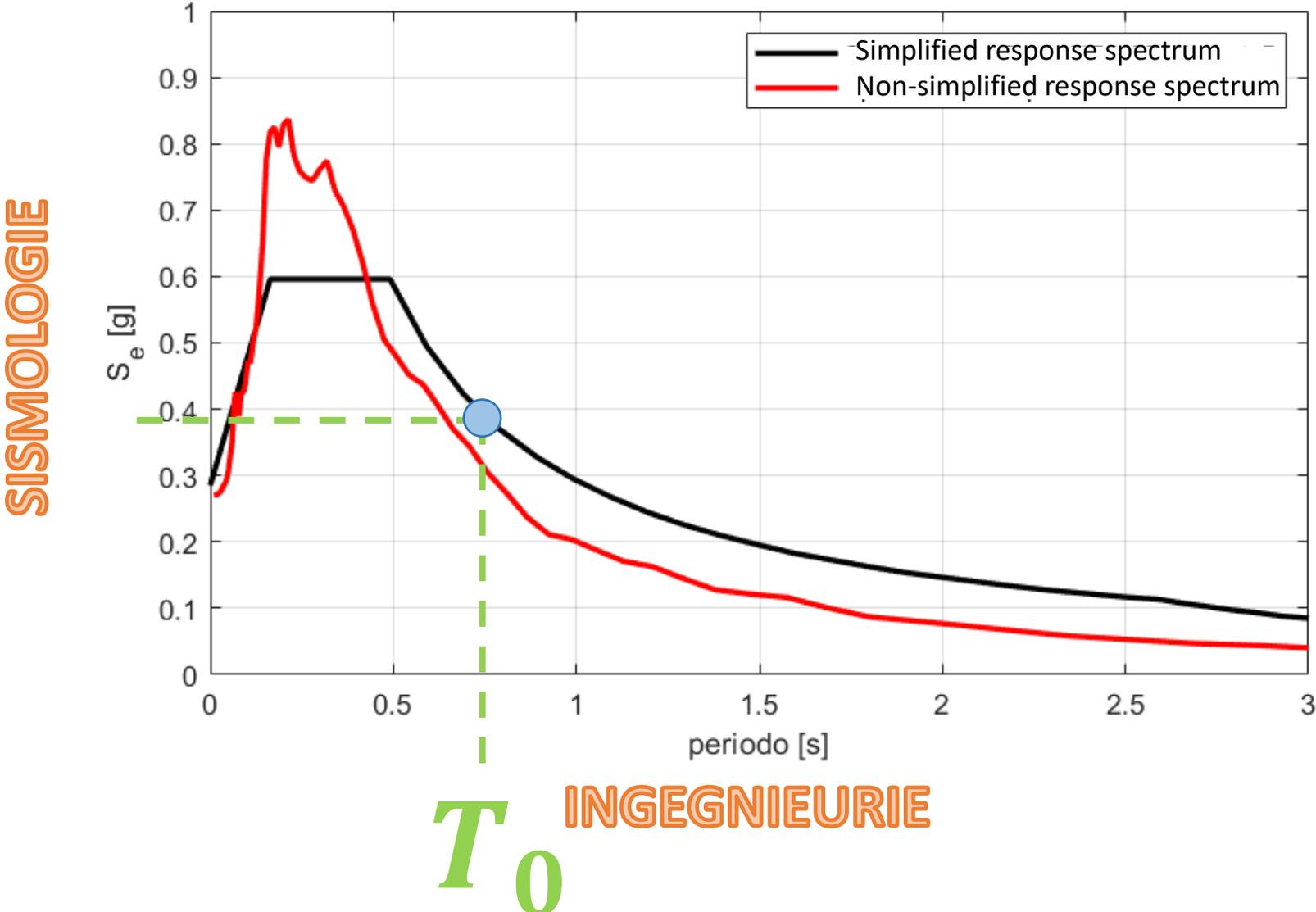
Le bruit de fond sismique agit comme **une source permanente d'excitation de la Terre**. Et le plus intéressant, c'est qu'il excite les **fréquences de résonance locales des sous-sols et des structures**.

La méthode de sismique dites passive, utilisée pour l'analyse modale opérationnelle, consiste donc à enregistrer ce bruit de fond ambient avec un capteur suffisamment sensible afin d'identifier les fréquence de résonance des bâtiments ou du sous-sol d'une manière passive, non intrusive et rapide.



En quoi est-ce nécessaire aujourd'hui ?

Spectre de réponse et rétrofit sismique

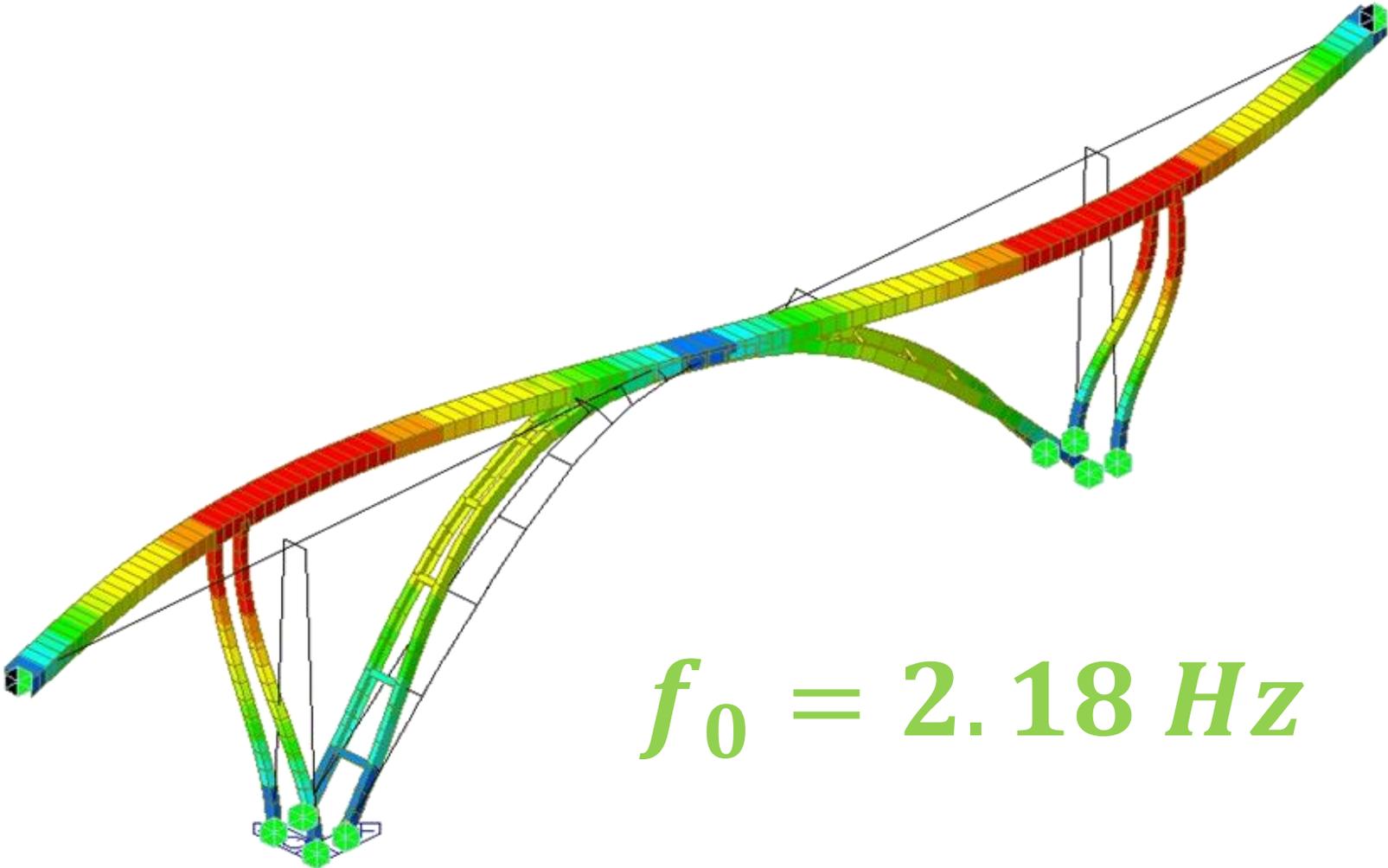


SISMOLOGIE

T_0 INGEGNERIE



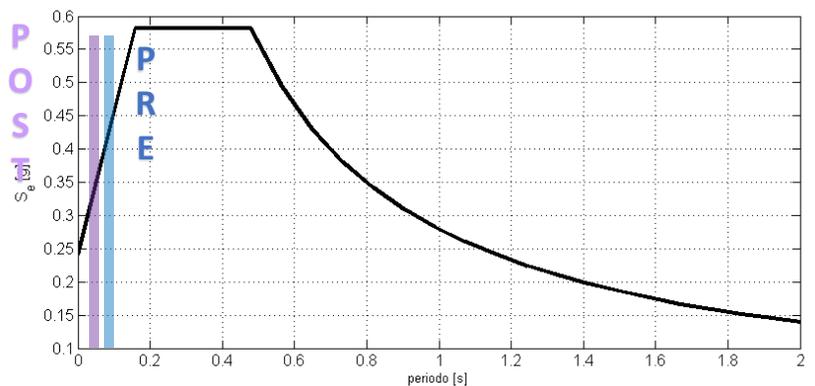
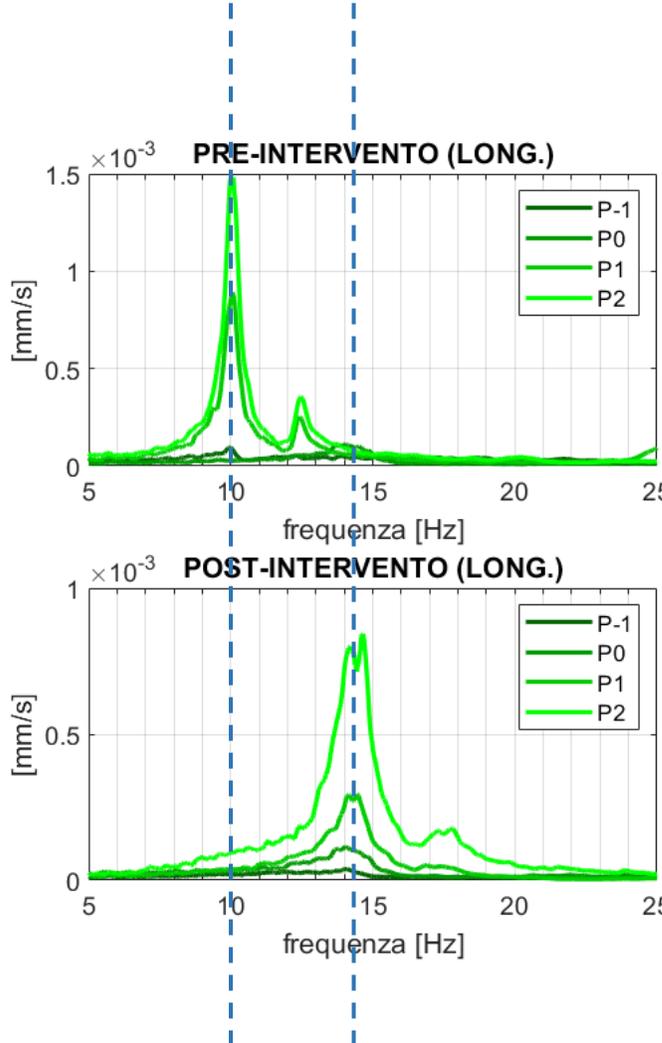
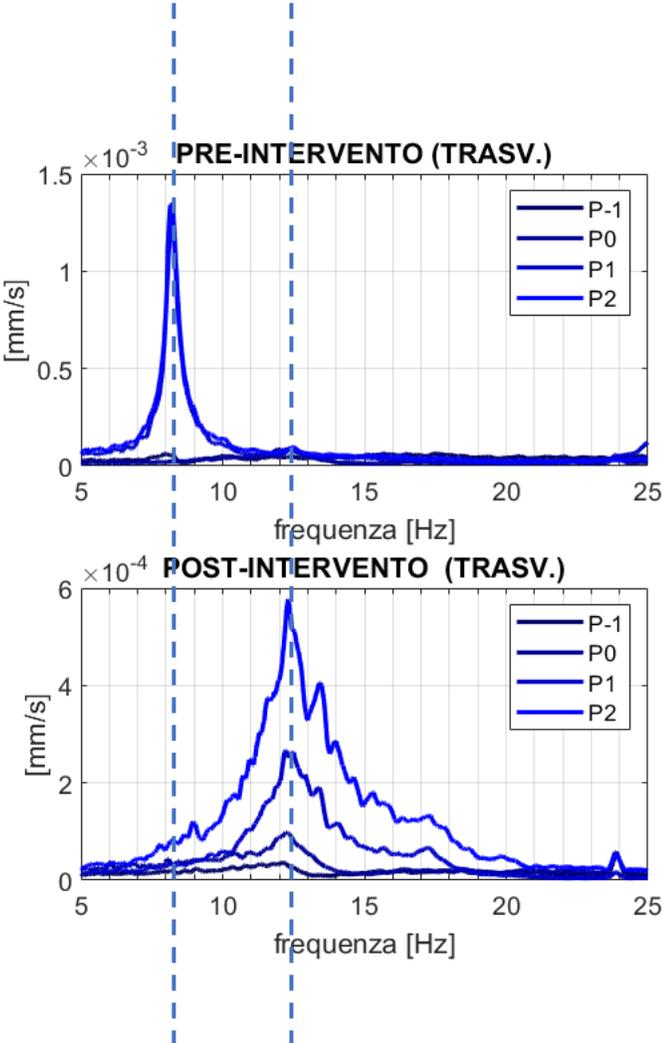
Calibration des modèles numériques: existant ou après construction.



$$f_0 = 2.18 \text{ Hz}$$



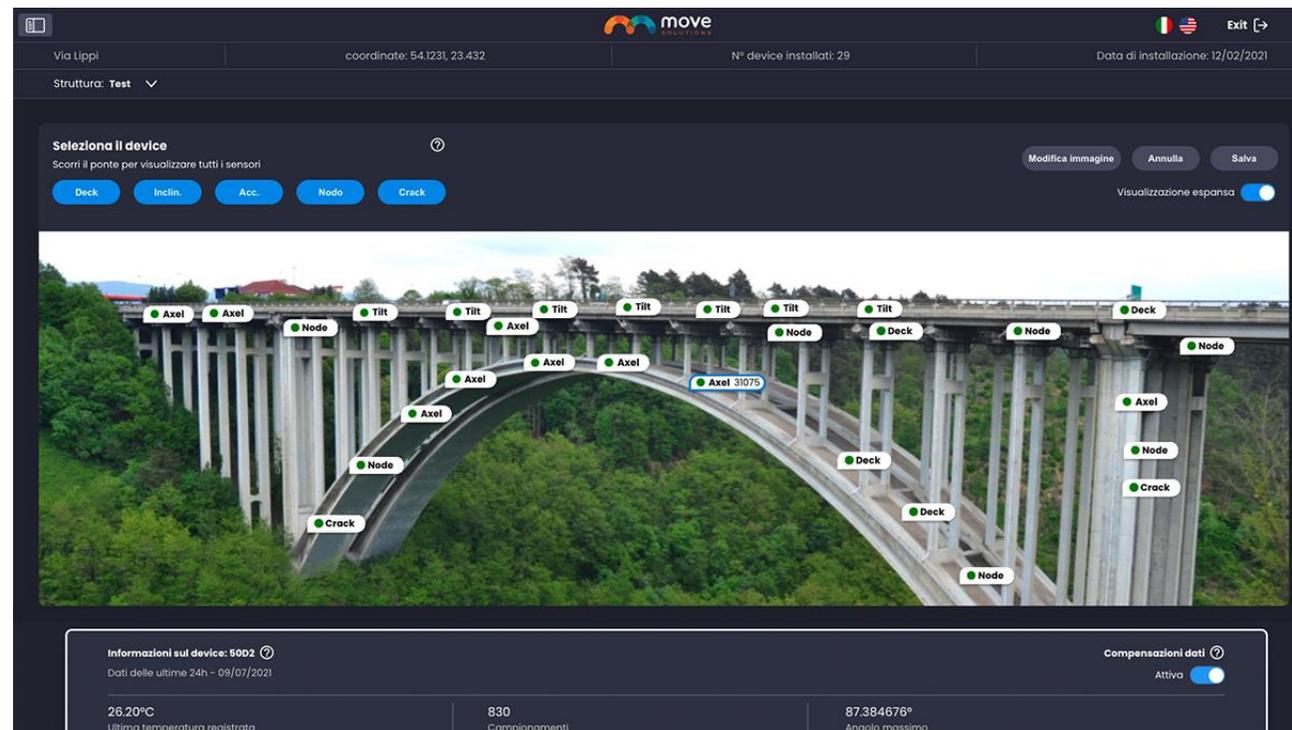
Quantifier une intervention sur des structures existantes



Contrôle de santé des structures sur le long terme

Après avoir identifié les principaux modes de vibration de la structures (photographie à un instant t de l'état de la structure) et en répétant la mesure au court du temps on pourra étudier:

- son vieillissement
- l'impacts des changements thermiques et environnementaux



Autres applications

- Tests dynamiques sur les ponts et passerelles,
- Vérifier la tension appliquée sur un câble/suspente,
- Environnementales...



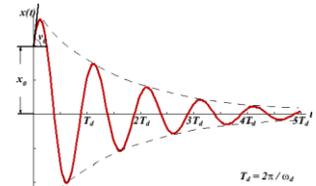
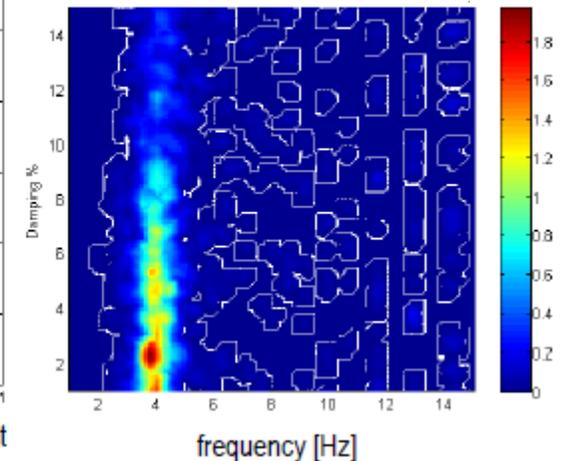
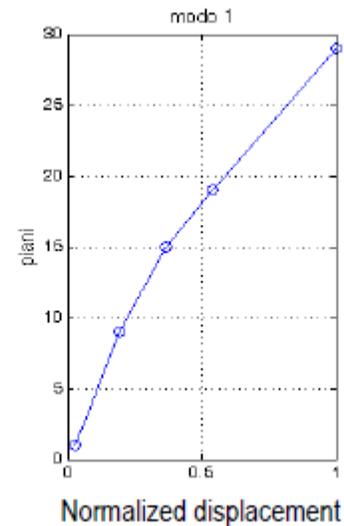
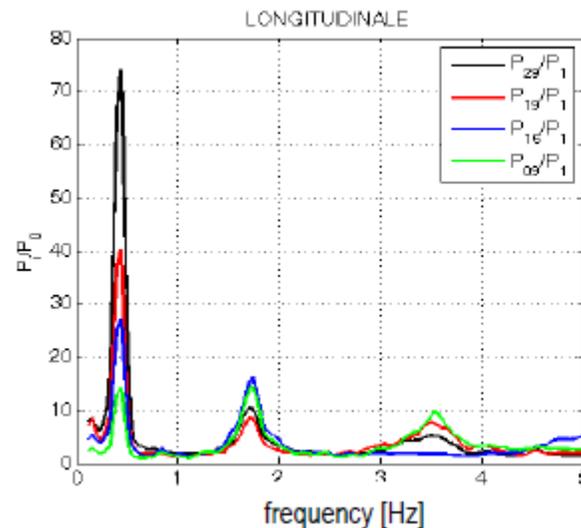
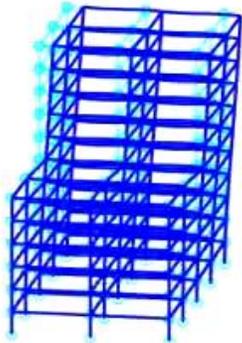
Que mesure-t-on ?

Paramètres mesurés

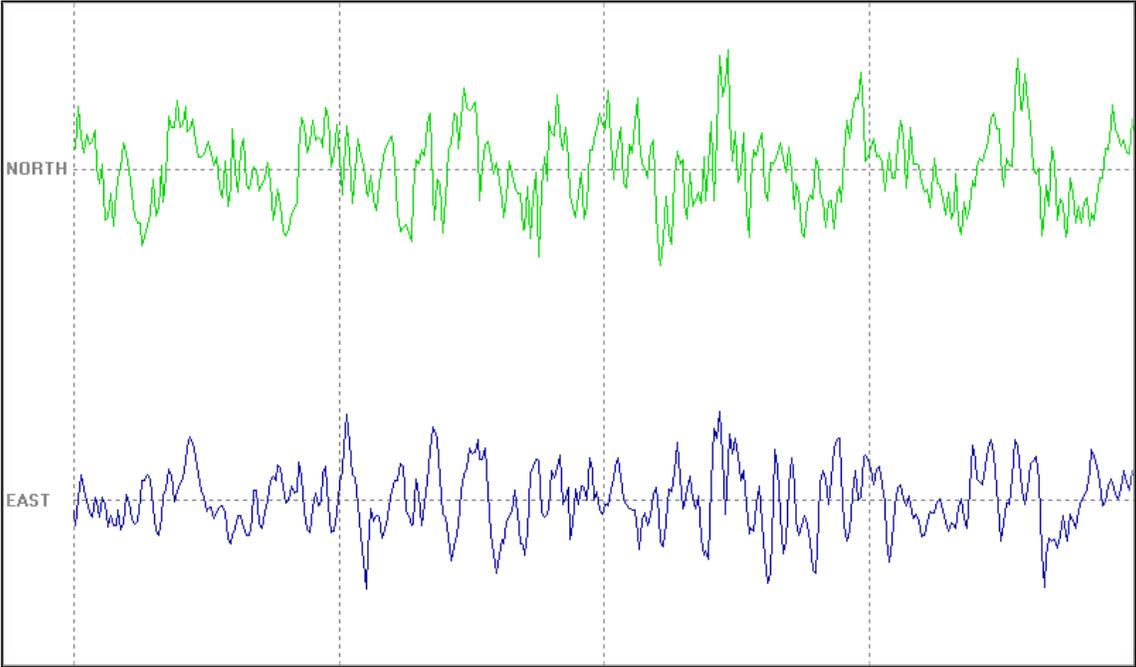
Le comportement dynamique d'une structure est décrit par:

- Ses fréquences modales (ou fréquences de résonance):
flexions, torsions, rocking
- Ses déformées modales
déformation de la structure à une fréquence modale donnée
- Son amortissement modal
pourcentage d'énergie perdue pour chaque cycle de vibration

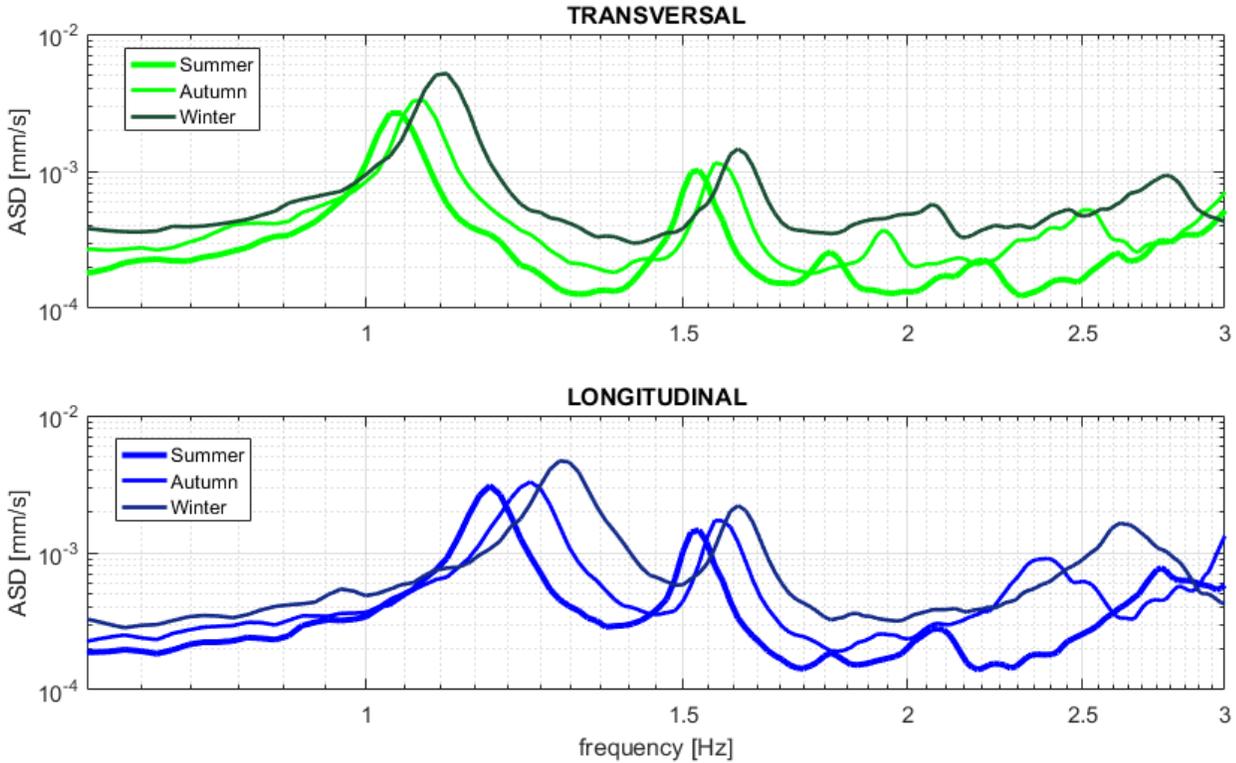
frG.txt mode 1 1.726688 Hz



Transformée de Fourier



Domaine temporel

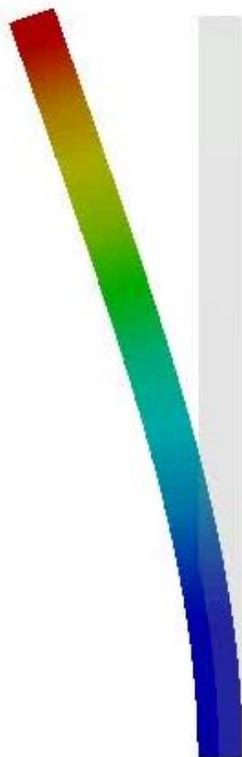


Domaine fréquentiel

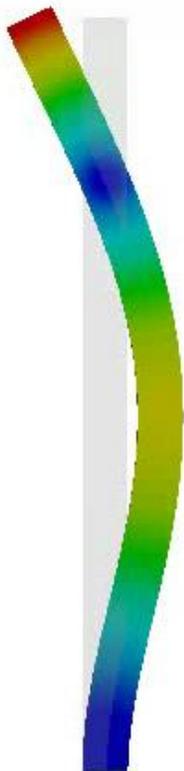


Fréquences modales (flexions, torsions)

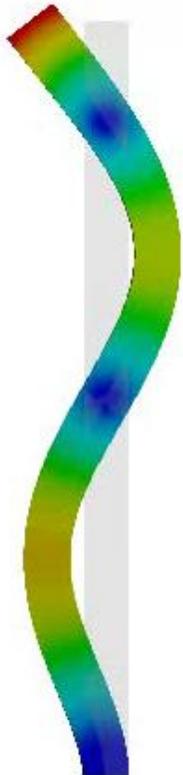
f_0



f_1



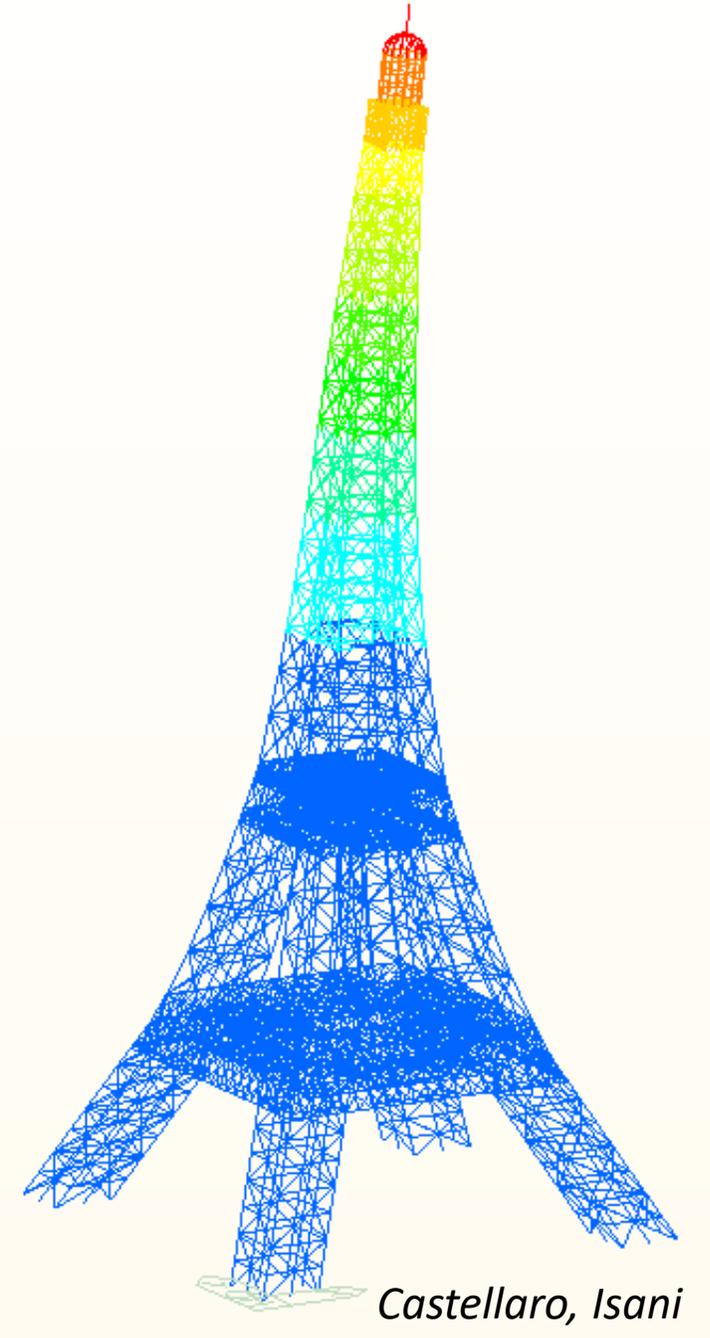
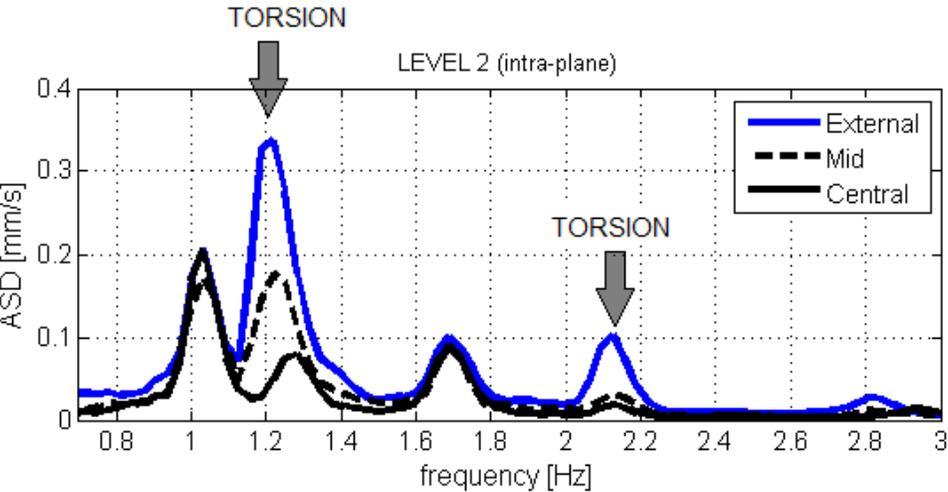
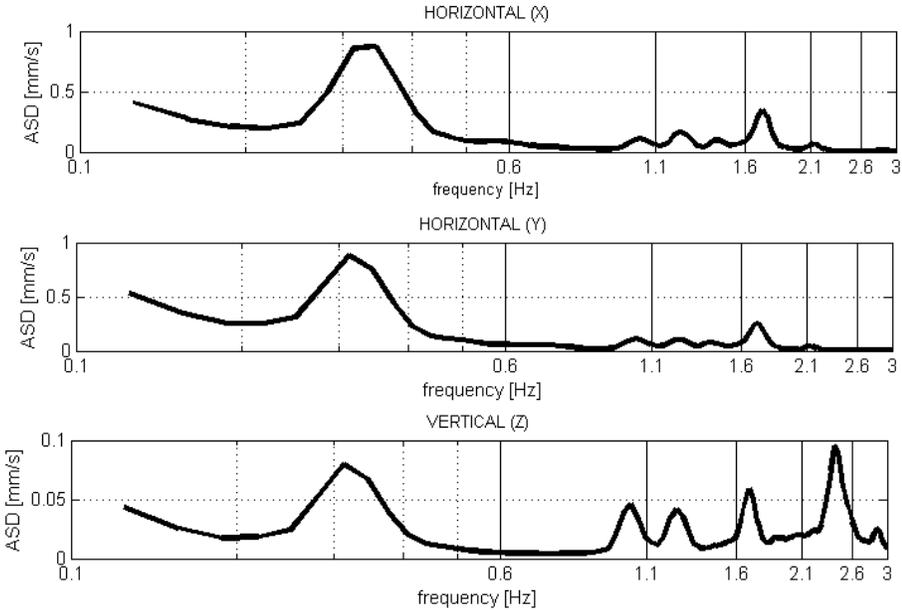
f_2



$T1, T2, T3 \dots$



Différence entre flexion et torsion



Fréquences modales = succession de modes

SLENDER BEAM

THICK BEAM

$$\frac{f_3}{f_0} = \left(\frac{7}{1.2}\right)^2 \approx 34$$

$$\frac{f_2}{f_0} = \left(\frac{5}{1.2}\right)^2 \approx 17$$

$$\frac{f_1}{f_0} = \left(\frac{3}{1.2}\right)^2 \approx 6.3$$

$$\frac{f_0}{f_0} = 1$$

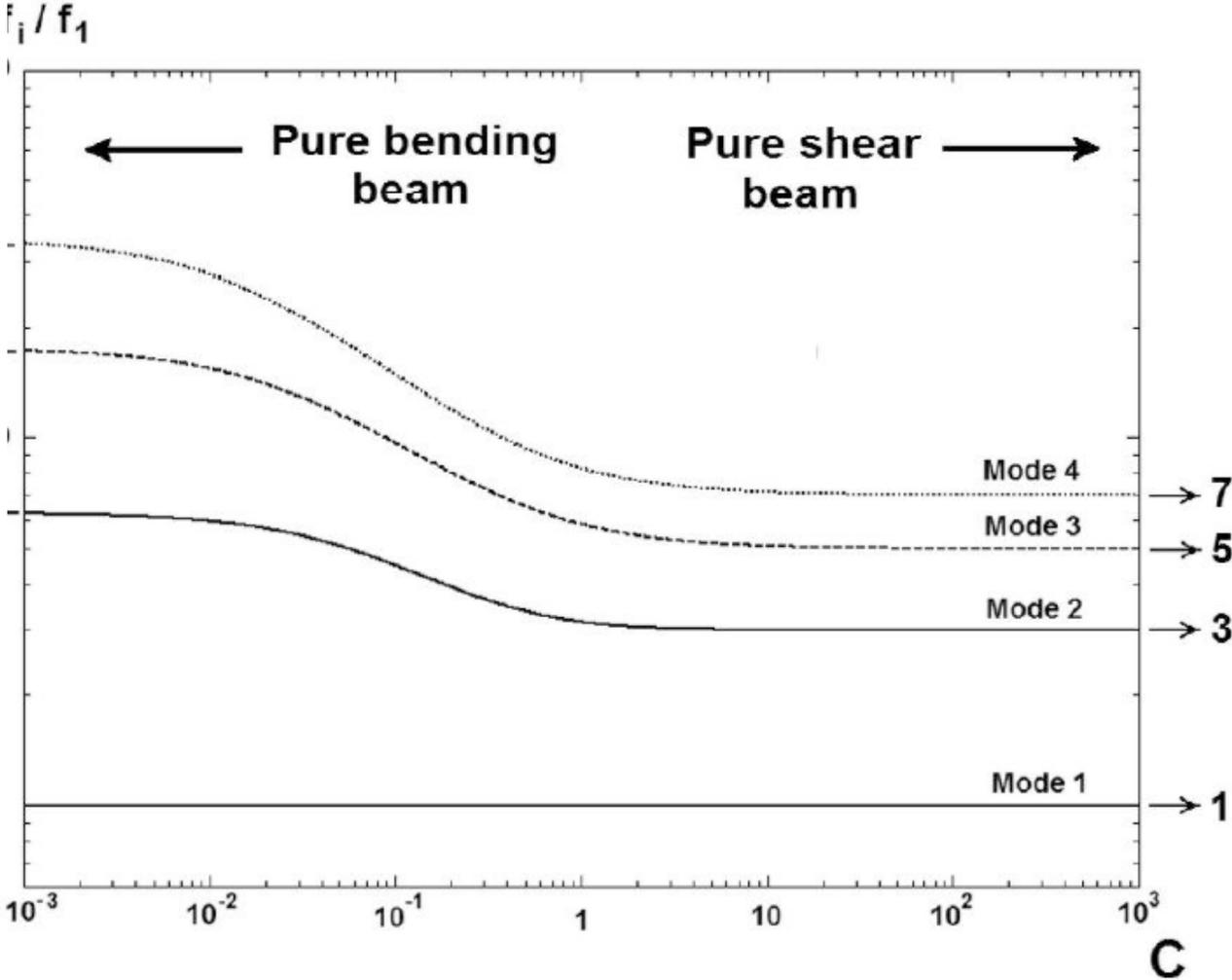


Figure 1: ratio f_k/f_1 according to the value of C



Déformées modales

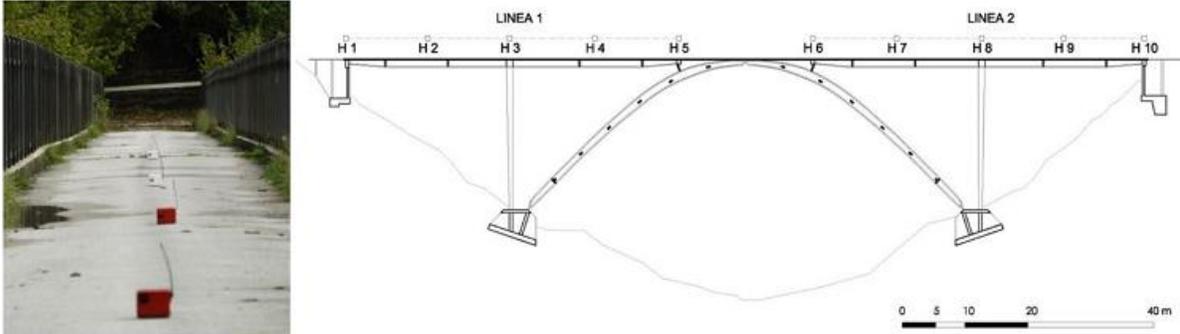
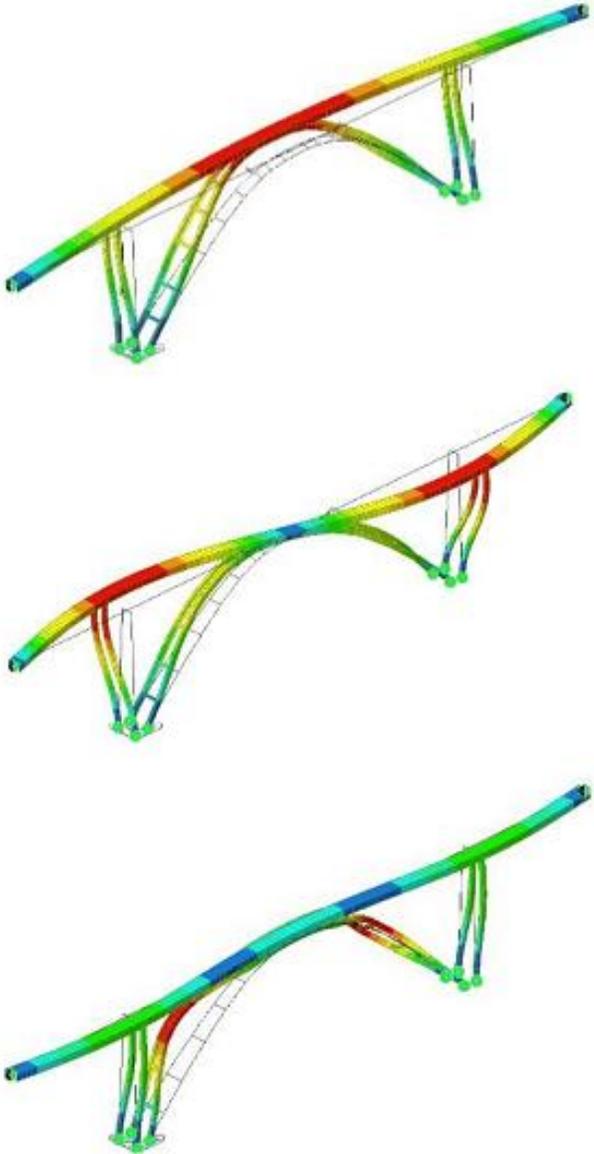
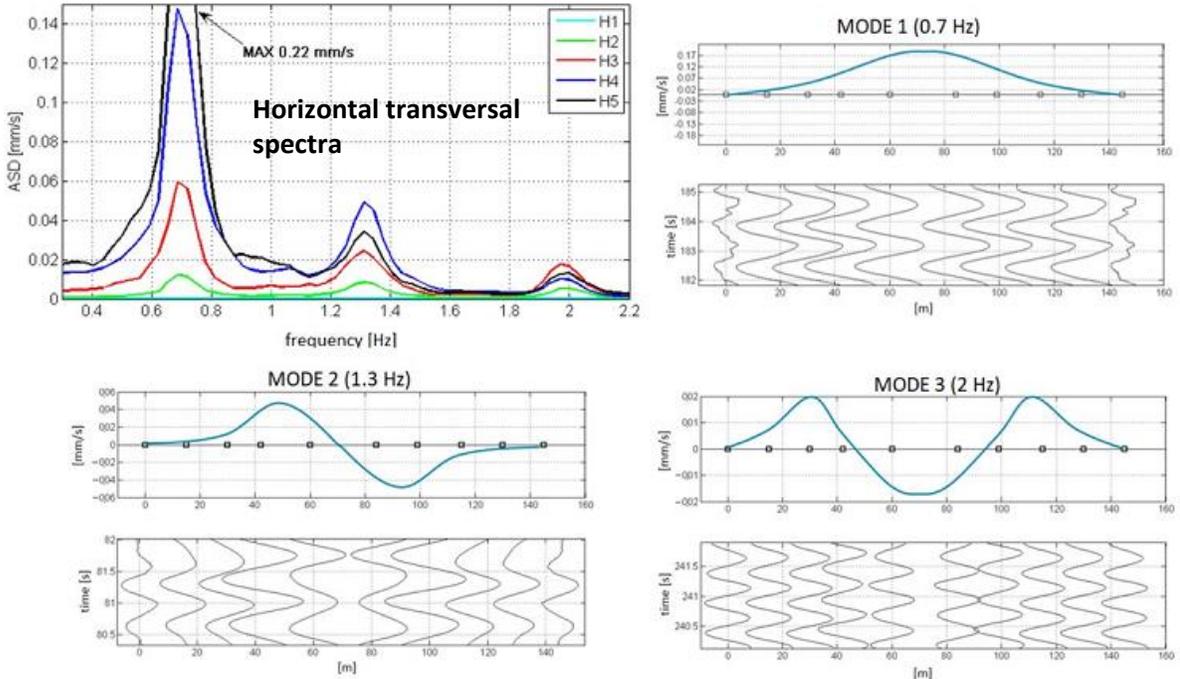
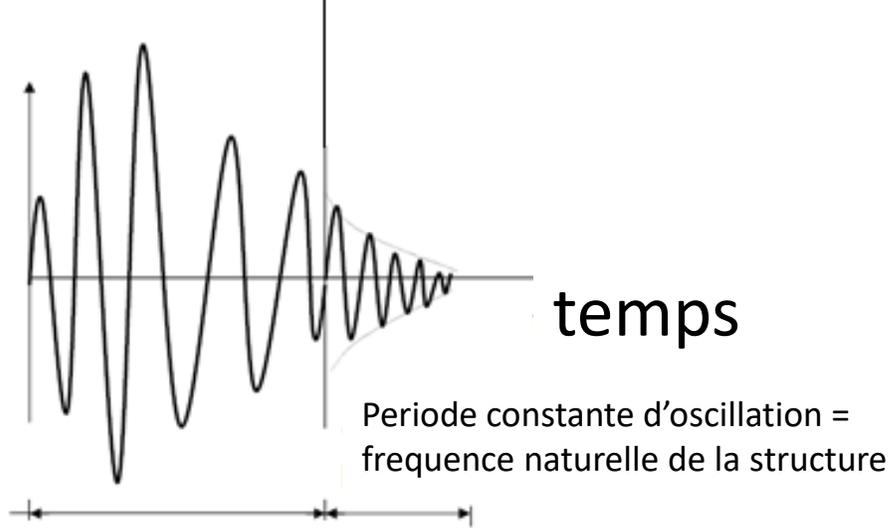


Figure 5. Location of the ambient vibration measurements along the bridge.

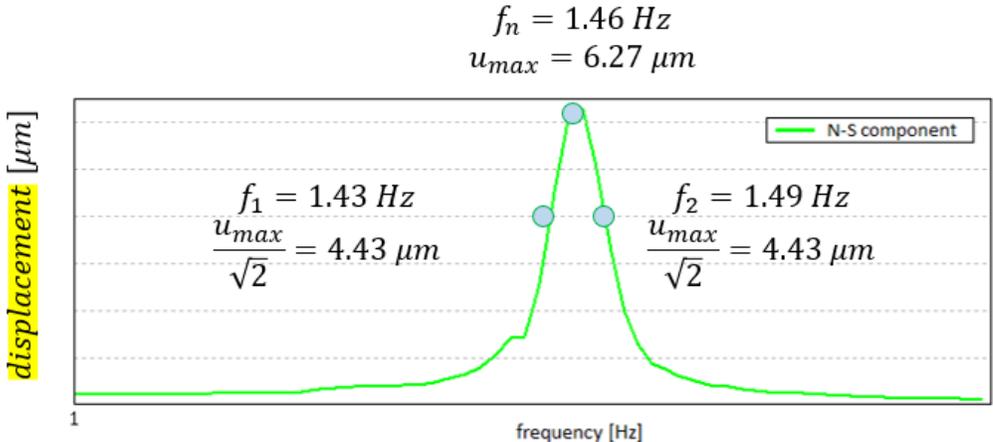


Amortissement modal

Oscillations forcées Oscillations libres



Oscillations de periodes variables



Chopra (1995)

$$\zeta = \frac{f_2^2 - f_1^2}{4f_n} = \frac{1.49^2 - 1.43^2}{4 * 1.46} = 0.03 = 3\%$$

Méthode des demi-maxima sur le spectre de déplacement (Chopra 1995)



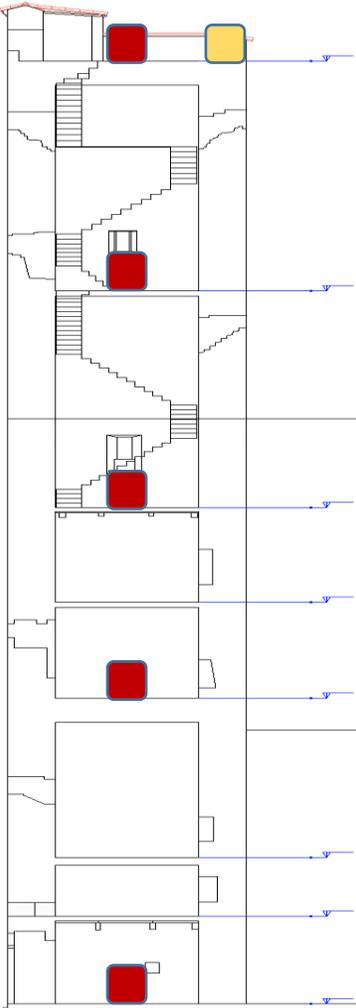
Avec quels instruments et comment ?

Capteurs 3D

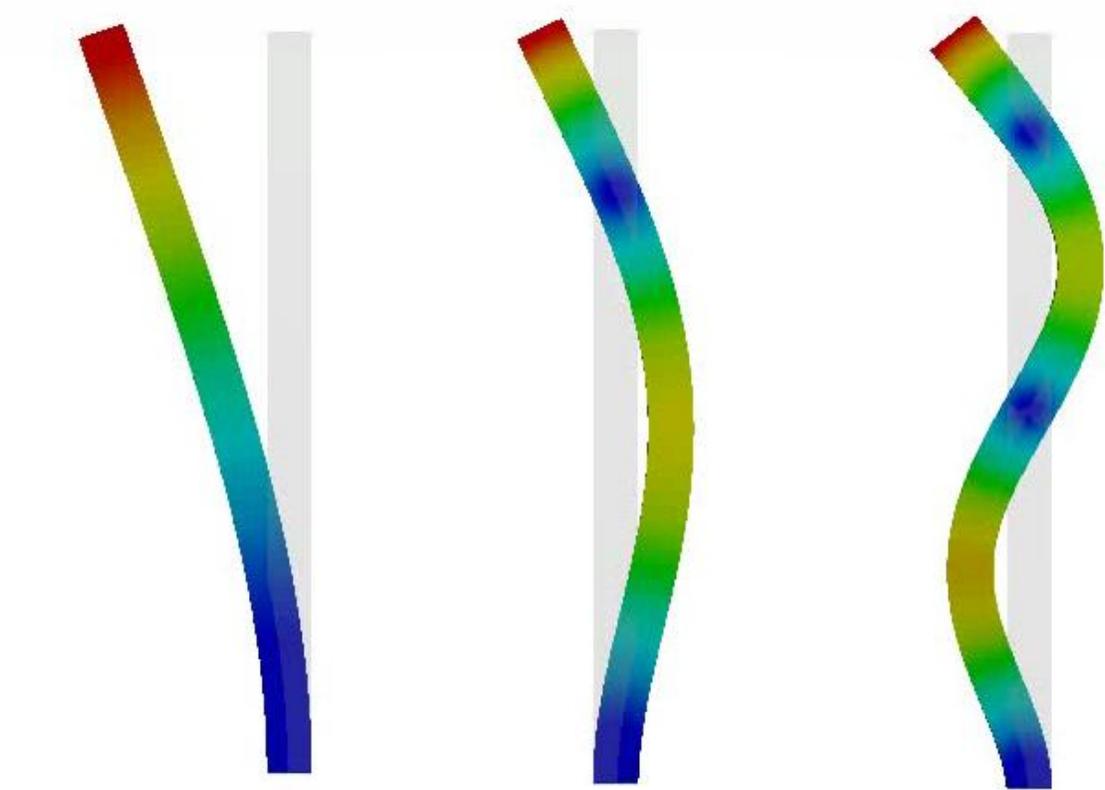
- Un seul capteur 3D est suffisant pour:
 - Fréquences modales
 - Amortissements
- Plusieurs capteurs avec synchronisation temporelle seront nécessaires pour obtenir les déformées modales.
- Il est important de savoir où placer les capteurs afin d'avoir une interprétation intuitive des résultats!



Exemple d'acquisition dans un bâtiment



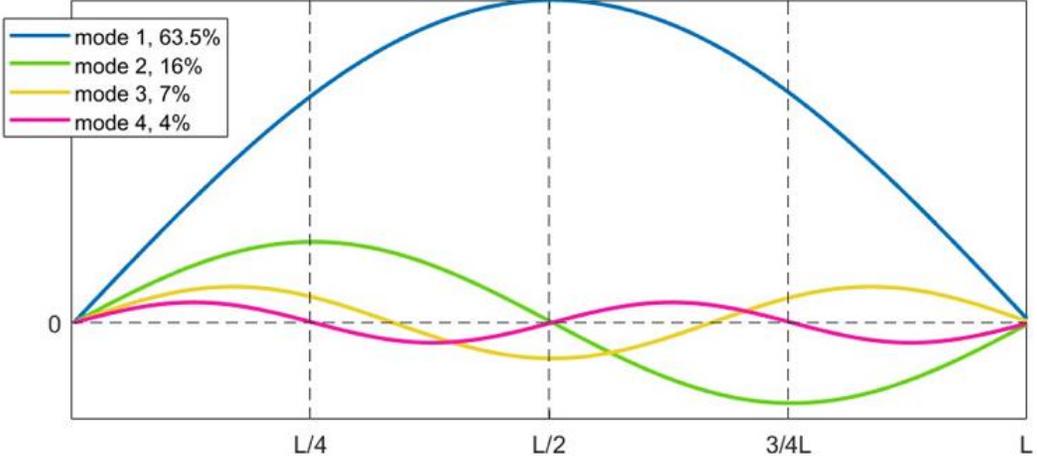
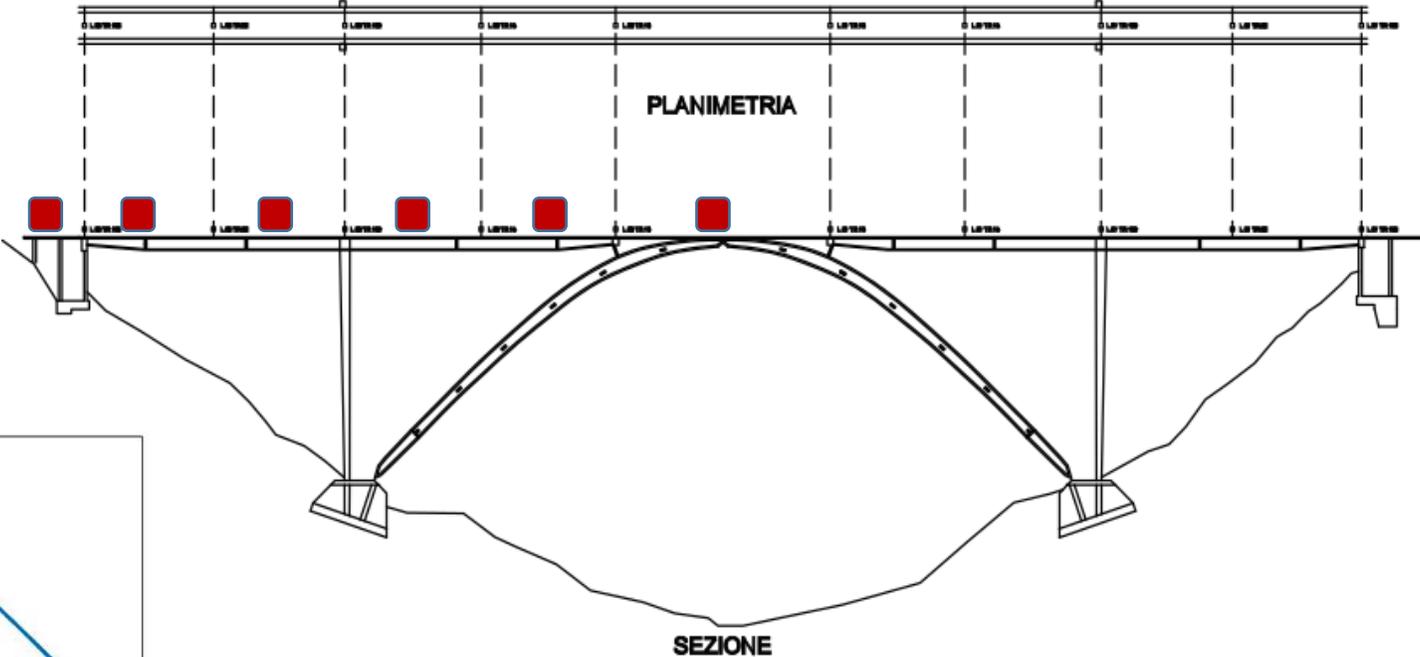
Flexions horizontales



Torsions



Exemple d'acquisition sur un pont



Quatre premiers modes de flexion (verticale et transversale) pour une poutre encastree (longueur L). Le pourcentage indique le pourcentage de masse implique dans chaque mode.



Quel type de capteur ?

Interféromètre



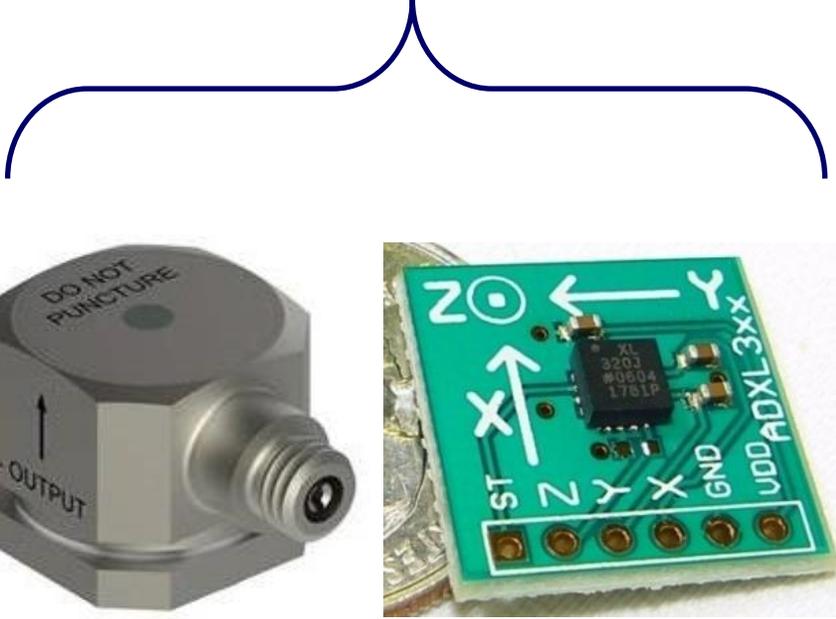
x

Velocimètre



v

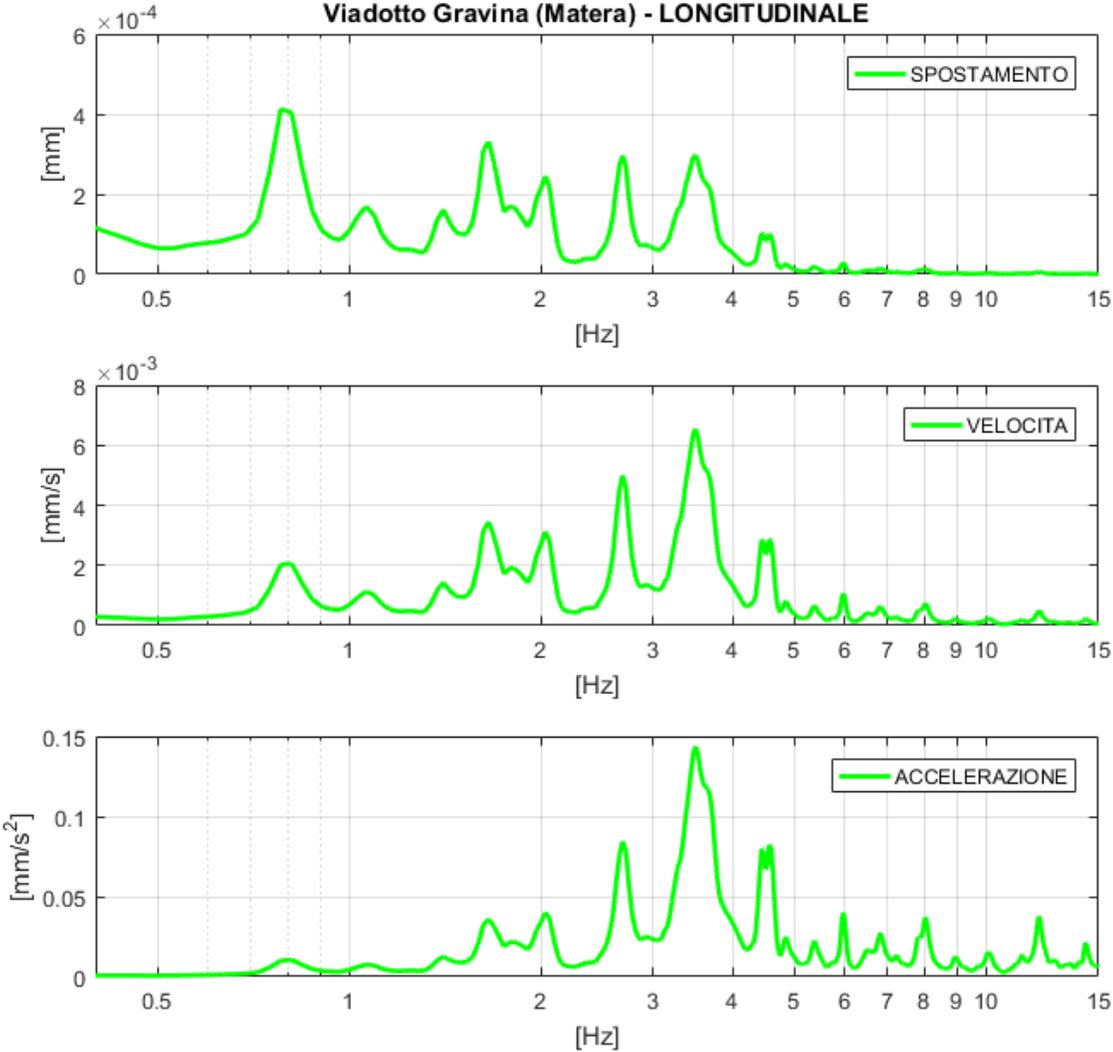
Accéléromètre



a



L'important est de savoir ce que l'on mesure...



DISPLACEMENT SPECTRUM

$$\times 2\pi f$$

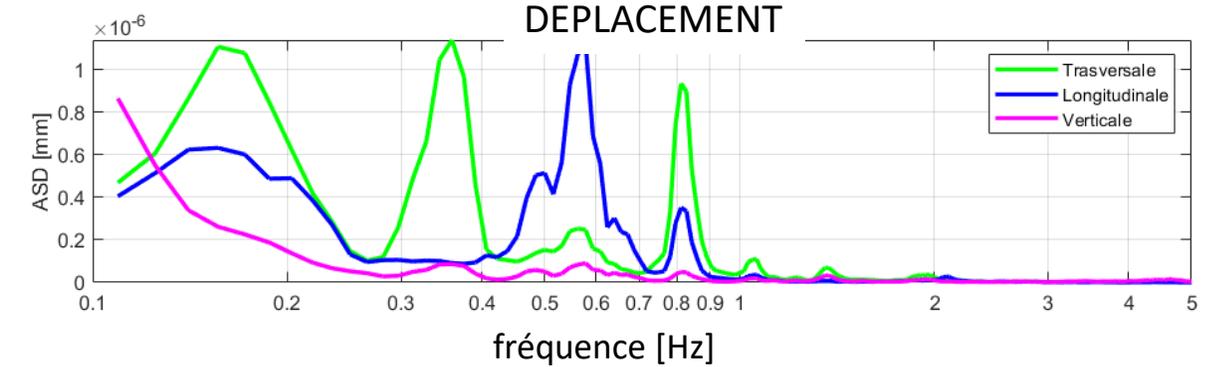
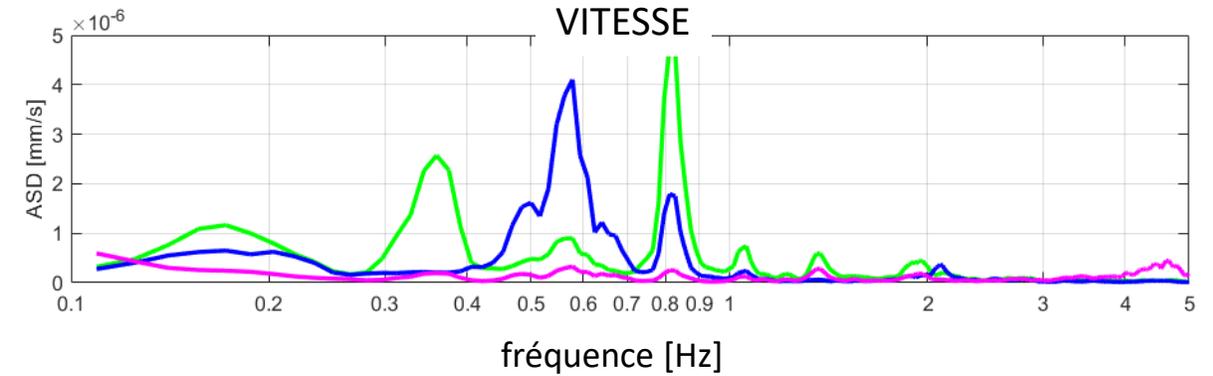
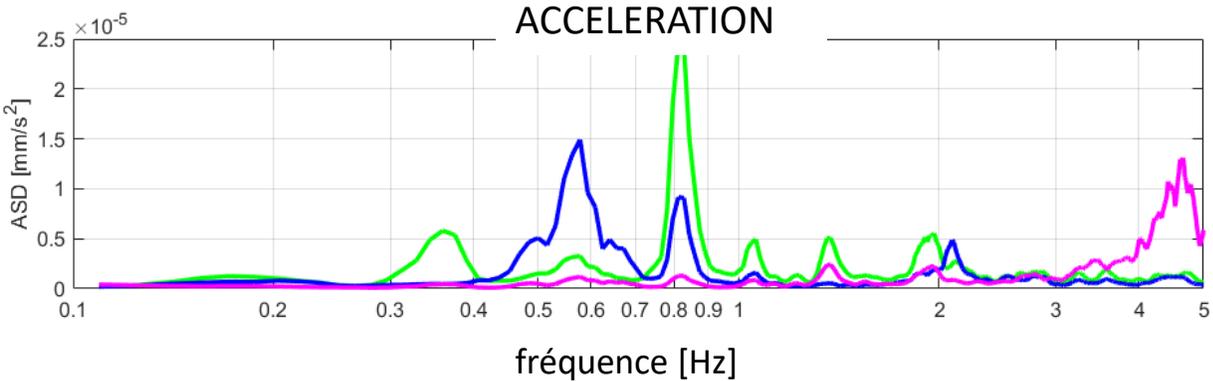
VELOCITY SPECTRUM

$$\times 2\pi f$$

ACCELERATION SPECTRUM



Afin d'éviter de louper des modes!



[Castellaro and Isani, FastTimes, 2019]

Variations des fréquences modales dans le temps

#SHM

Vieillessement et endommagement

Selon les Eurocode, la variation du module de Young dans le temps est:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} E_{cm}$$

$E_{cm}(t)$ et $f_{cm}(t)$ sont le module d'élasticité sécant et la résistance moyenne du béton à l'instant t .

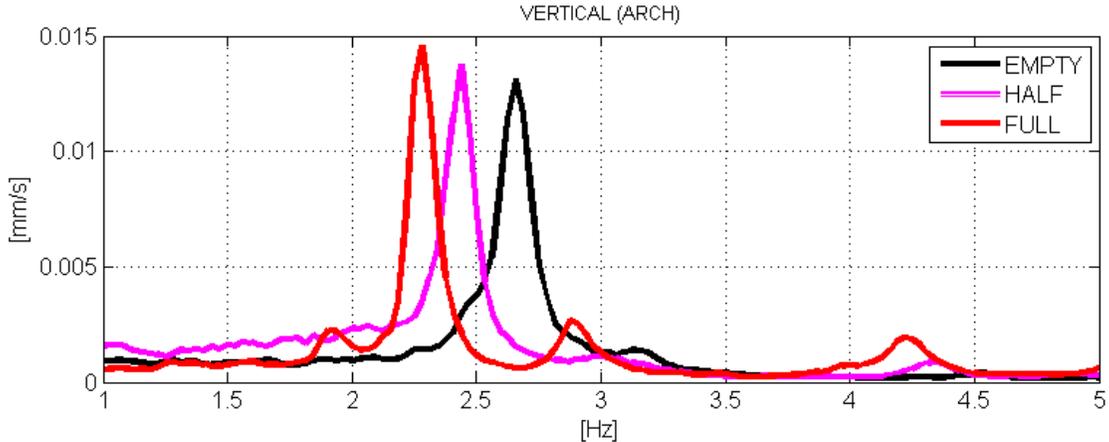
E_{cm} et f_{cm} sont le module d'élasticité et la résistance moyenne après 28 jours.

Après 10 ans, le module d'élasticité augmente de 1,2 fois (20%) par rapport à la valeur nominale après 28 jours de séchage.



Variations thermiques et environnementales

Octobre
2015



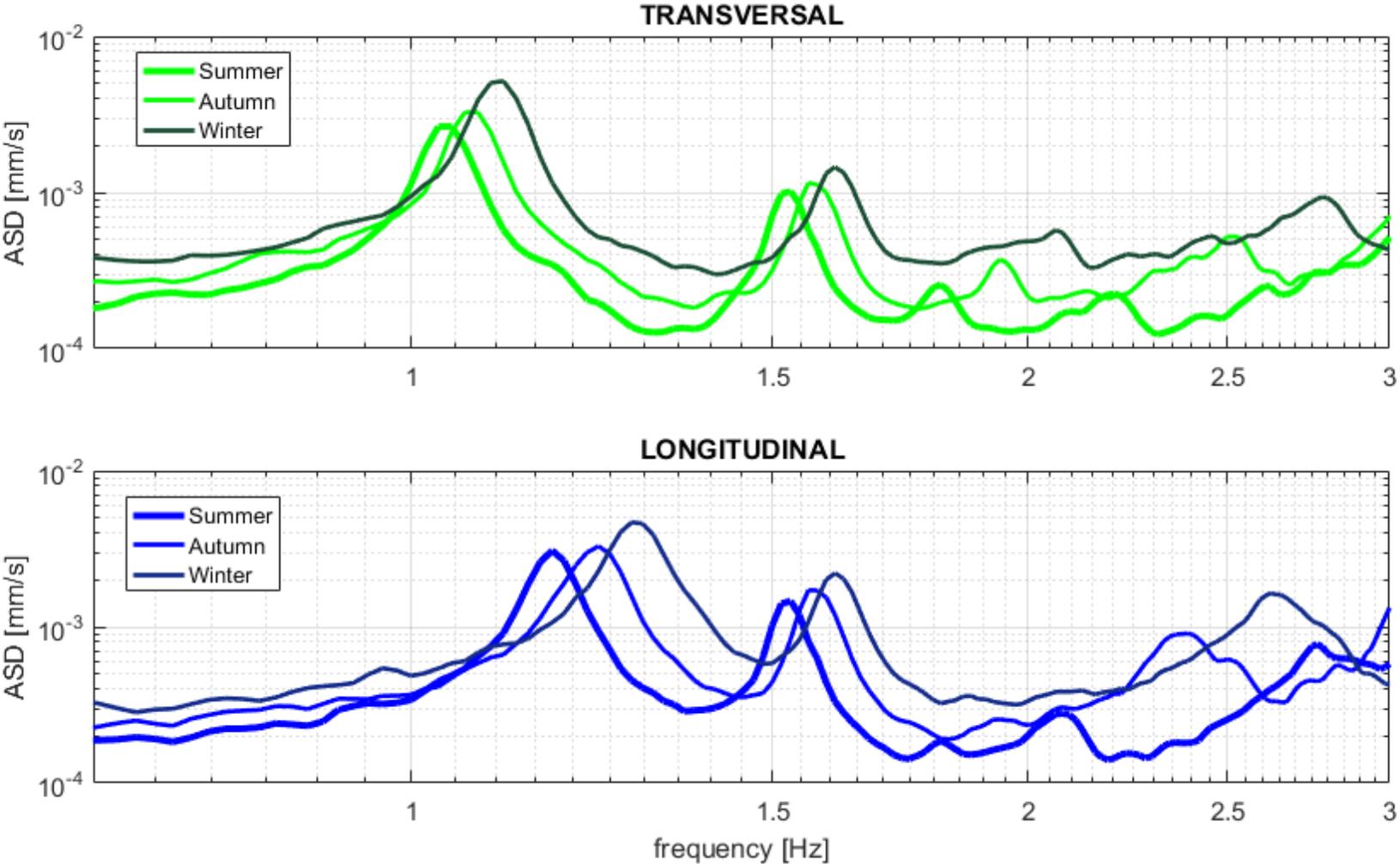
Fevrier
2016



Mai
2016

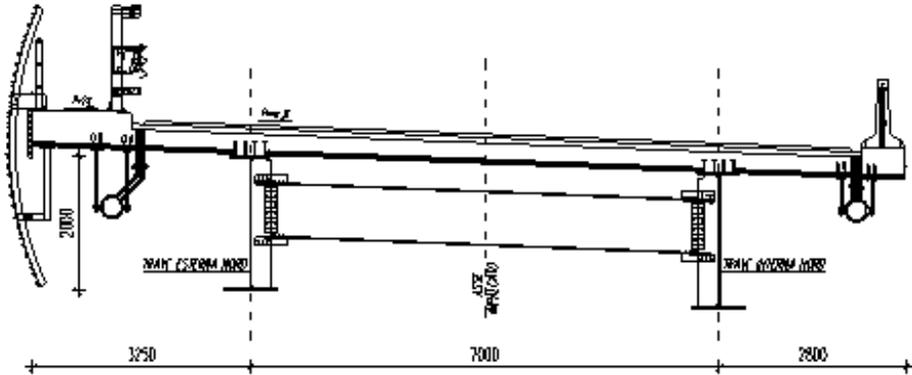


Variations thermiques et environnementales

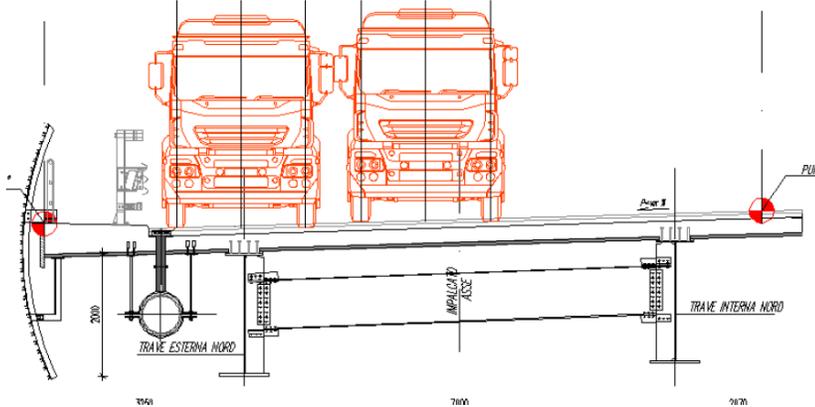


Variation de masse

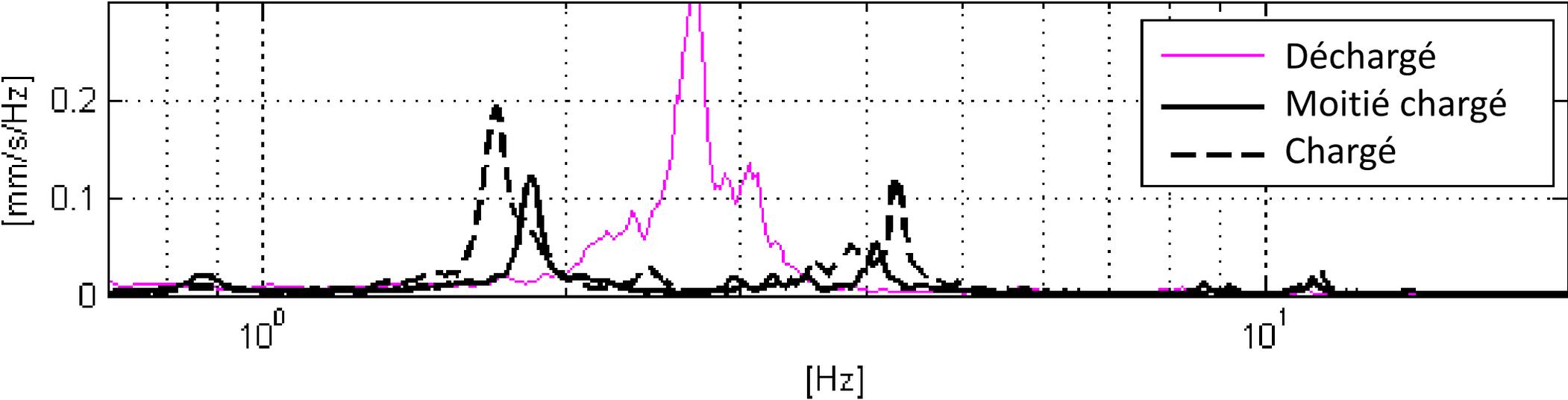
Charge permanente



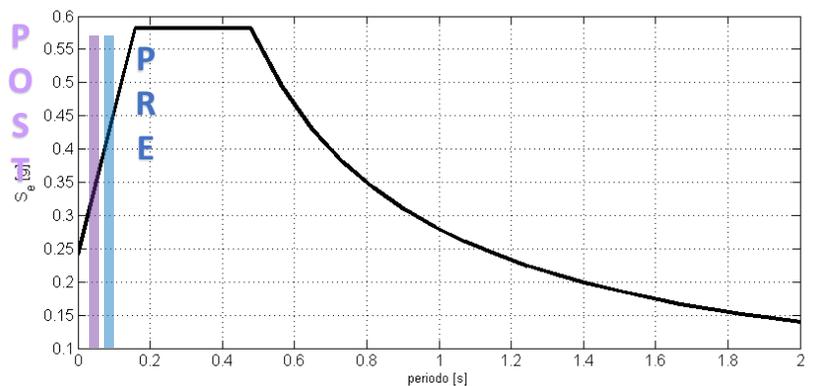
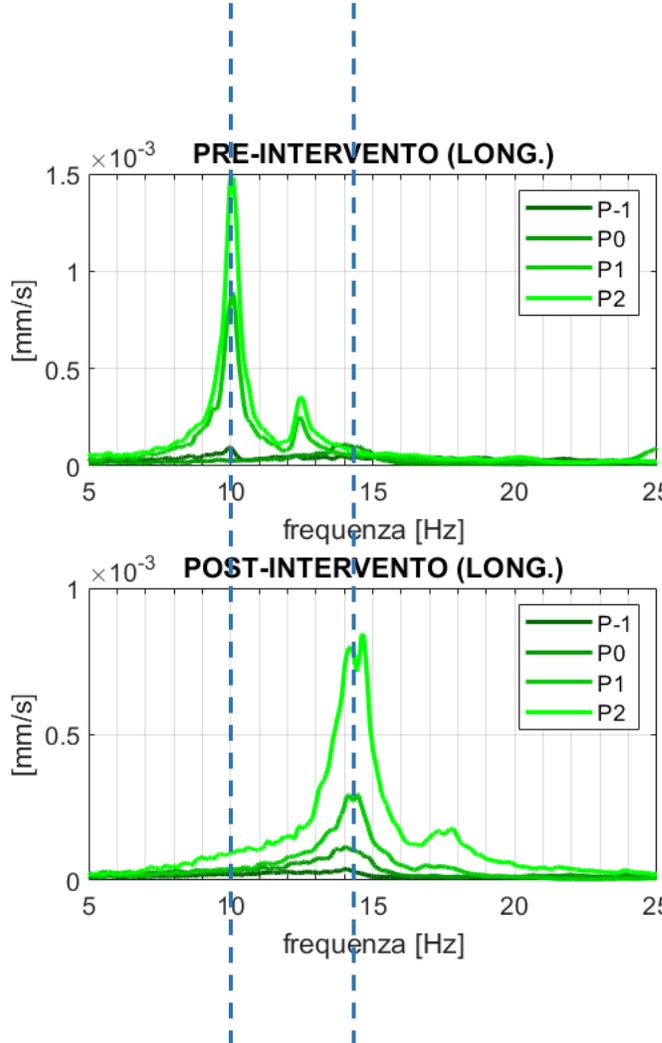
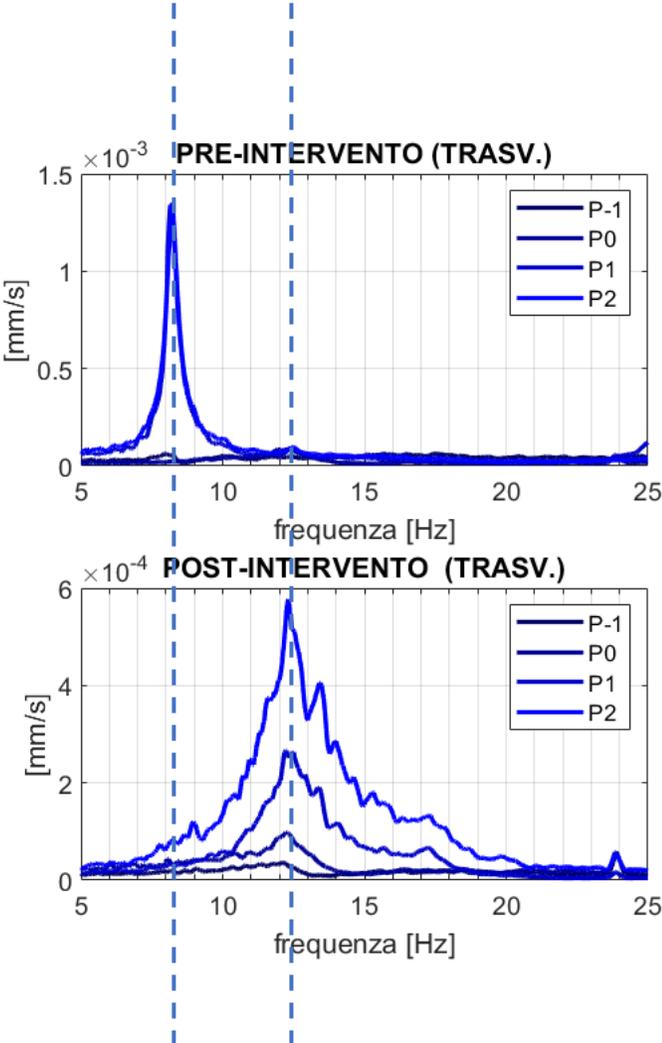
Charge variable



VERTICALE

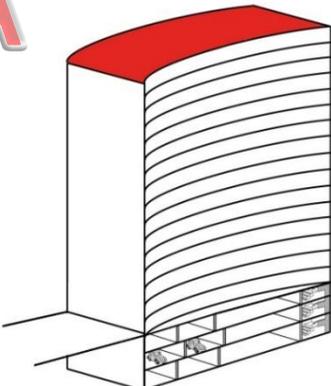


Variation de rigidité



Variation de masse et rigidité

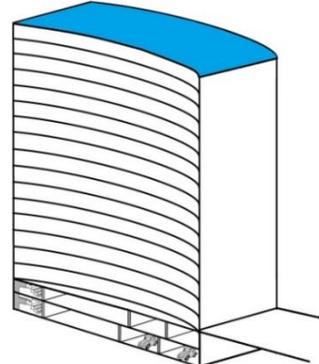
A



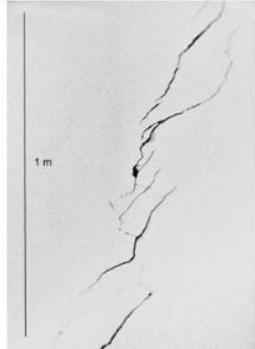
TOWER A

TOWER B

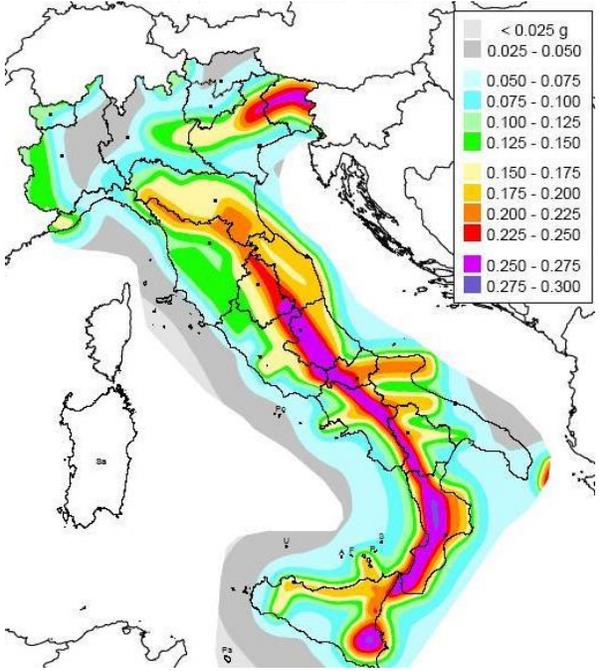
B



1 m

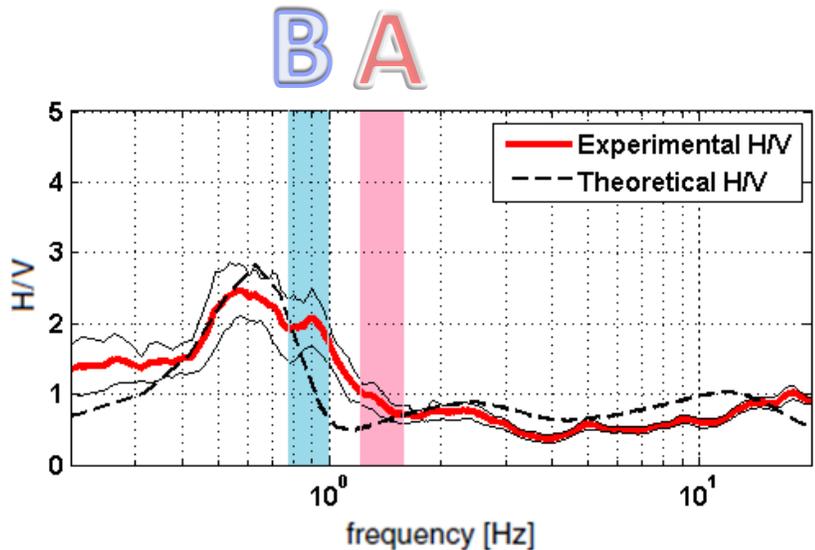
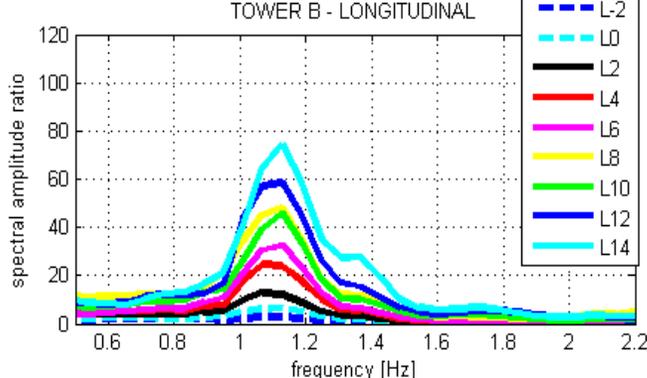
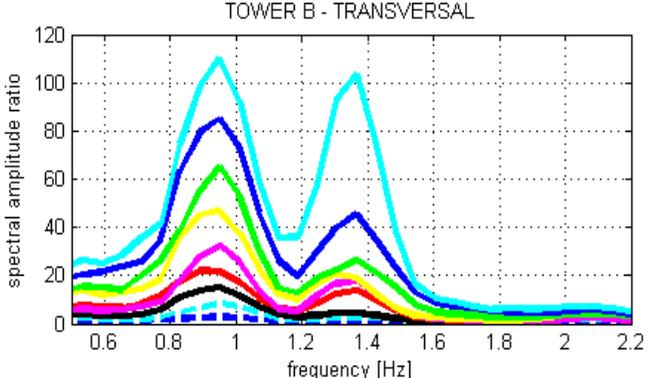
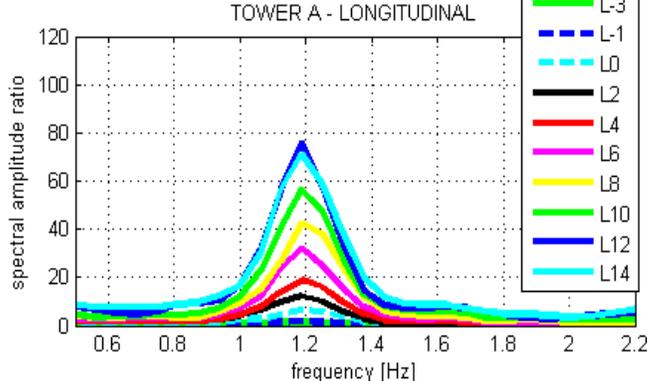
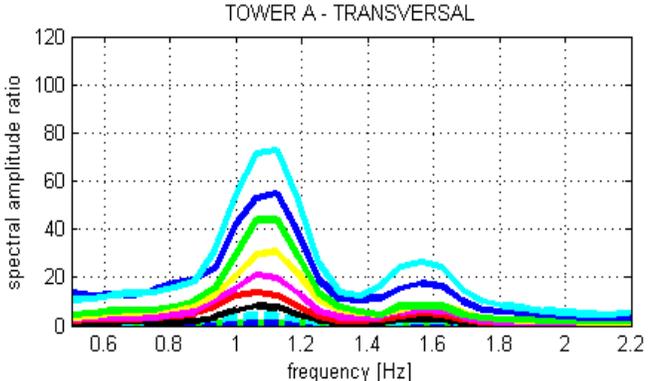


COMMON CENTRE



[Castellaro et al., Bull. Earth. Eng., 2013]

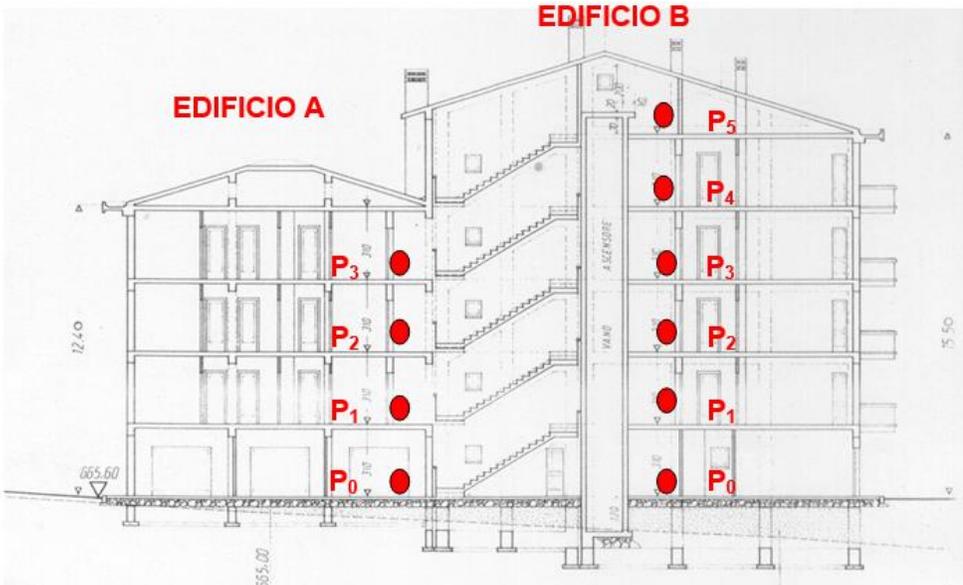
Variation de masse et rigidité



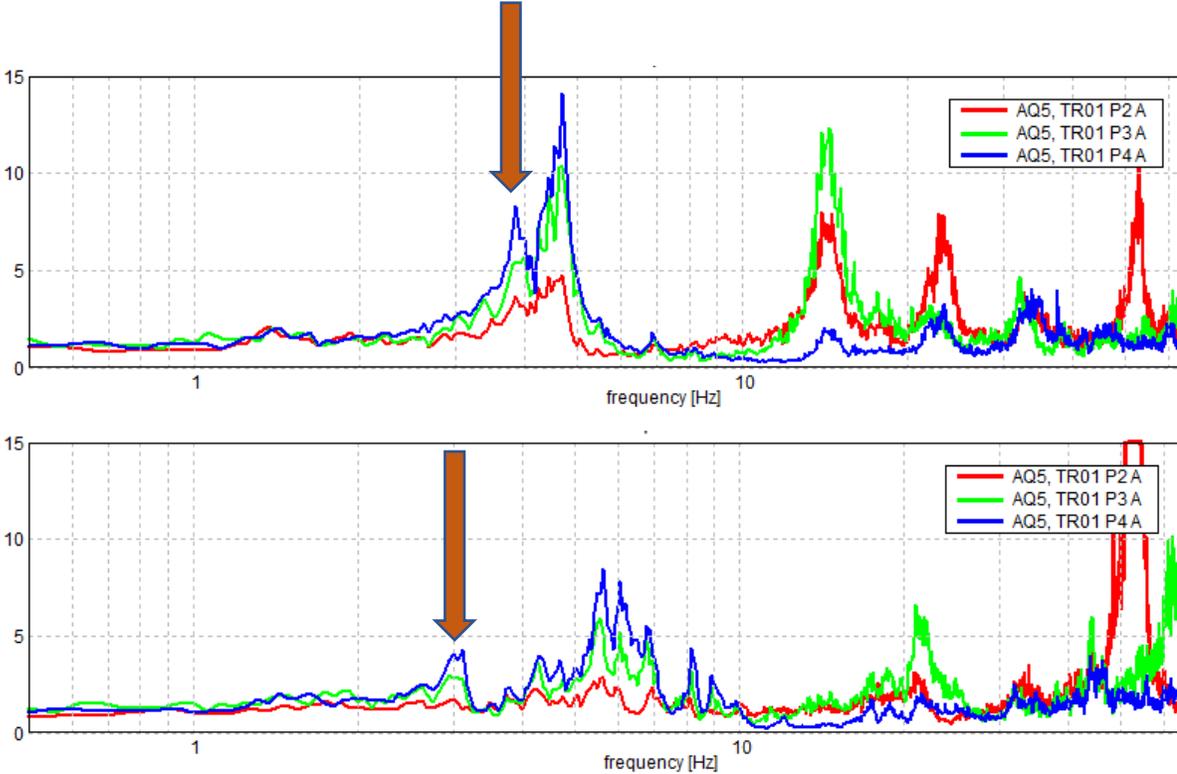
[Castellaro et al., Bull. Earth. Eng., 2013]

Structures complexes

Interactions entre les structures

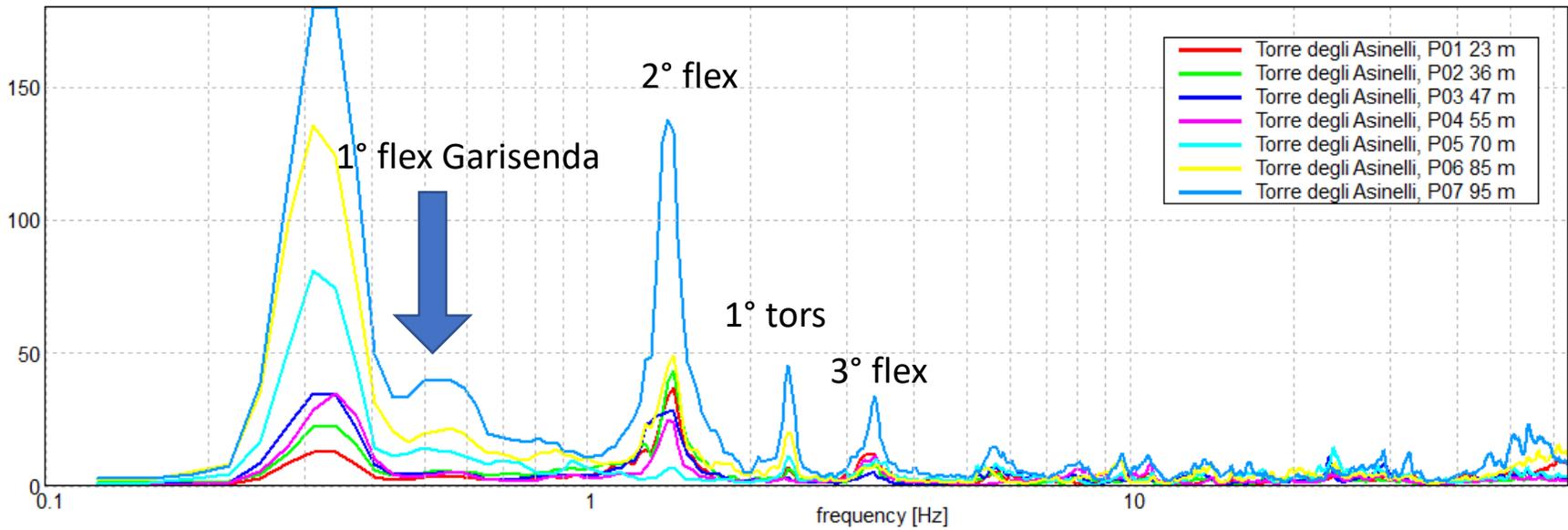


Edifice B dans les mesures sur l'edifice A



Interactions entre les structures

1° flex



- Torre degli Asinelli, P01 23 m
- Torre degli Asinelli, P02 36 m
- Torre degli Asinelli, P03 47 m
- Torre degli Asinelli, P04 55 m
- Torre degli Asinelli, P05 70 m
- Torre degli Asinelli, P06 85 m
- Torre degli Asinelli, P07 95 m



Table 6
The properties of the soil surrounding the tower and the spring constants adopted in the finite element model.

DICAM, UniBo

Model name	Finite element	Base conditions	P-Δ	T _{1f} (s)	T _{2f} (s)	T _{3f} (s)	T _{1,t} (s)
1D-FB	Beam	Fixed base	No	3.37	0.73	0.28	—
1D-SS	Beam	Soil-structure interaction	No	3.58	0.79	0.31	—
1D-SS-PD	Beam	Soil-structure interaction	Yes	3.68	0.79	0.31	—
2D-FB	Shell	Fixed base	No	3.48	0.79	0.30	0.34
2D-SS	Shell	Soil-structure interaction	No	3.69	0.85	0.33	0.34
2D-O-SS-PD	Shell	Soil-structure interaction	Yes	3.69	0.83	0.34	0.40

0.3 Hz 1.3 Hz 3 Hz 2.4 Hz



Solutions proposées par GEOREVA

Suricat, station sismique portable et tout-en-un

Suricat



14 x 8 x 6 cm

Idéale pour des analyses modales rapide:

- **3 canaux vélocimétriques** avec plage dynamique et sensibilité ajustable : ± 5 mm/s à ± 100 mm/s
- **3 canaux accélérométriques** (± 2 g ou ± 6 g)
- Fréquence d'échantillonnage de 256 Hz à 4 kHz
- **Canaux auxiliaire** pour GPS ou trigger
- **Synchronisation temporelle via GPS**
- **Détection d'évènements sur seuil**
- **Adapté pour l'analyse vibratoire avec logiciel dédié pour la Circulaire 86**





Idéale pour la surveillance à long terme sans fils:

- **Coût contenu**
- **Différents types de capteurs autonomes:** tiltmètres, accéléromètres, vélocimètres, vibromètres...
- **Facilité d'installation et batteries longue durée**
- **Communication des données par LoRa et 4G**
- **Visualisation des données via interface web**
- **Mis en place de seuil d'alarme (email, sms)**
- **Algorithme d'identification des modes de vibration et de leurs suivi**





Idéale pour de la surveillance précise sur sites sensibles à long terme:

- **Gamme complète de capteurs 3D filaires à haute sensibilité (accéléromètres et vélocimètres)**
- **Différents types de centrale d'acquisition** en fonction de la structure à étudier
- **Accès aux données en continu**
- **Logiciel de traitement**
- **Détection d'évènements sur seuil**
- **Alarmes**



CONCLUSION

- **L'analyse modale opérationnelle des structures est une technique passive, rapide et non intrusive.** Elle permet d'obtenir les principaux paramètres dynamiques d'une structure à un instant t . Sa répétition dans le temps permettra de suivre l'évolution de ces paramètres (**SHM**).
- Méthode déjà utilisées et efficace pour **calibrer les modèles numériques**.
- Le type d'instrumentation est aujourd'hui assez libre, un ou des **capteurs 3D** sont préférables afin de bien identifier les différents modes.
- Une compréhension de la dynamique de la structure à étudier sera nécessaire afin de **bien placer les capteurs** et faciliter l'interprétation.
- Toute variation importante des paramètres dynamiques n'est pas forcément liée à un changement intrinsèque des propriétés mécaniques de la structure mais peut être due à des **changement thermiques ou environnementaux**.
- Les structures complexes ou connectées entre elles induisent des **artefacts** dans l'interprétation.
- **Georeva** peut vous aider dans le choix de l'instrumentation à mettre en place en fonction du type de structures et du type de résultats souhaités.





info@georeva.eu

j.magnon@georeva.eu