

# Évaluation de la santé structurelle du clocher de l'église Sainte-Marie Madeleine à Massy

E. Bridoux<sup>1</sup>, C. Chambreuil<sup>1,3</sup>, C. Giry<sup>2,3</sup>, A. Montabert<sup>1,3,@</sup>, H. Rostagni<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> École Normale Supérieure Paris-Saclay, Département Génie Civil et Environnement, Gif-sur-Yvette, France

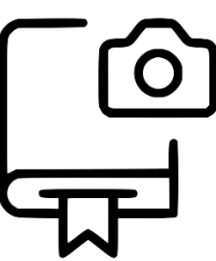
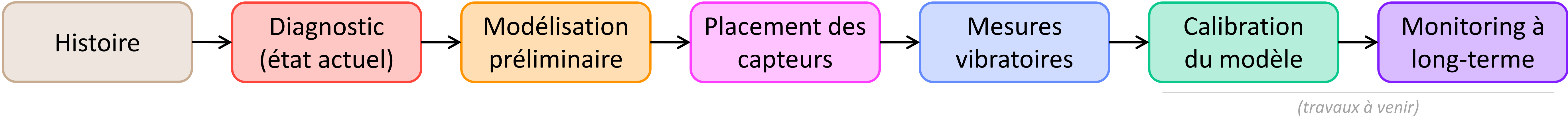
<sup>2</sup> EPF École d'Ingénieurs, Cachan, France

<sup>3</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, ENS Paris-Saclay, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS), Gif-sur-Yvette, France

Contact: arnaud.montabert@ens-paris-saclay.fr



Le futur **passage du métro** sous le clocher de l'Église Sainte-Marie Madeleine de Massy (Essonne) soulève des **enjeux de conservation** patrimoniale, en raison des **vibrations anthropiques** qu'il pourrait générer. Ce projet vise à définir une **méthodologie** permettant d'évaluer l'**état structurel initial du clocher** avant la mise en place d'une stratégie de surveillance (SHM) afin de suivre son comportement dynamique et d'en assurer la préservation.



## Histoire

MassyStoric, Archives municipales de Massy

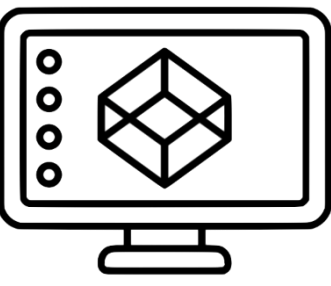
XIII <sup>e</sup> siècle	Construction de l'église et du clocher accolé
XVII <sup>e</sup> siècle	Effondrement/reconstruction de la nef
1920	Église partiellement classée MH
1944	Bombardements alliés, destruction de la nef
2011	Restauration du clocher isolé
2026	Passage du métro sous l'édifice



## Diagnostic de l'état actuel

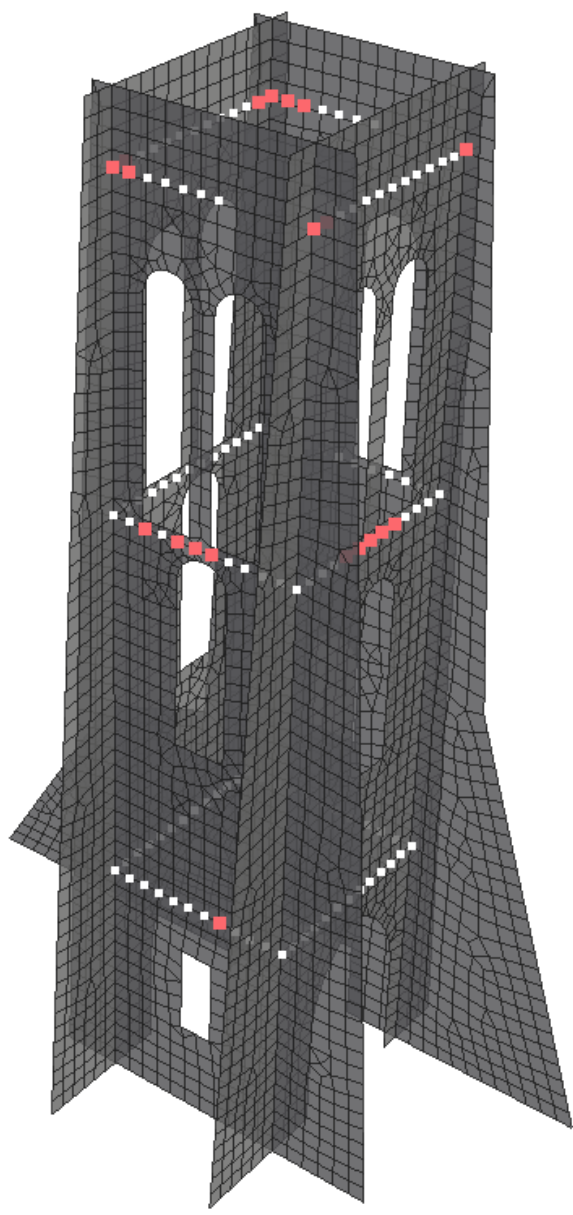
Rupnik et al., 2017

Relevé photogrammétrique pour une **reconstruction de la géométrie** à partir de photographies  
Prises de vue en 2 cercles concentriques autour du clocher



## Modélisation préliminaire

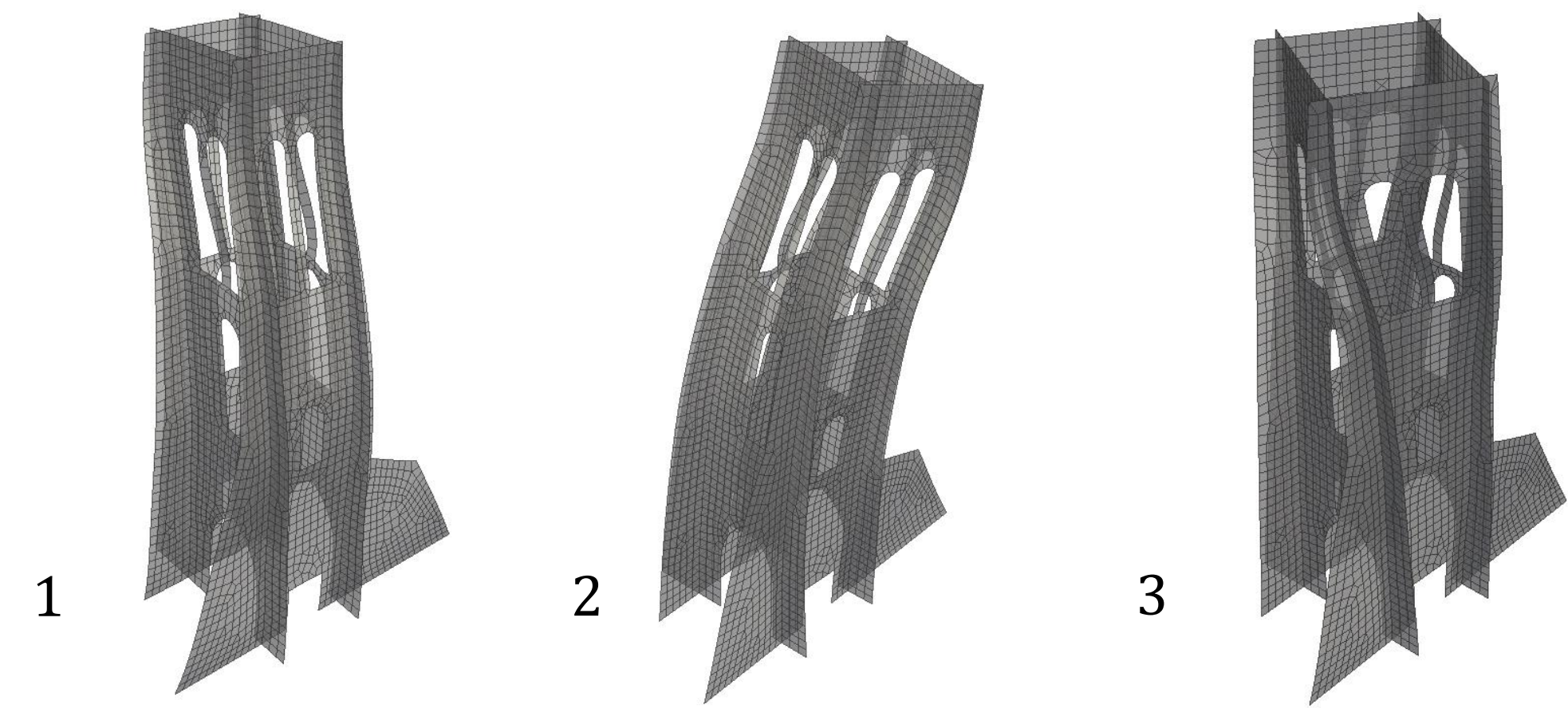
Modèle éléments finis basé sur le relevé photogrammétrique (dimensions, connexions)  
Modélisation progressive de la géométrie et des éléments maçonnés du clocher



Maillage du clocher sur Cast3M  
Nœuds en blanc : candidats potentiels pour l'OSP  
Nœuds en rouge : positions optimales des 20 capteurs

## Analyse modale numérique

Hyp. matériau homogène, comportement élastique linéaire  
Détermination des fréquences et modes propres



$f_1 = 2.35$  Hz  
Mode de flexion suivant l'axe X  
 $f_2 = 2.90$  Hz  
Mode de flexion suivant l'axe Y  
 $f_3 = 5.49$  Hz  
Mode de torsion



## Placement optimal des capteurs (OSP)

Kammer, 1991

Nœuds candidats liés aux contraintes pratiques (accessibilité, intégration patrimoniale, sécurité)

**Maximisation de l'information** modale avec un nombre **limité** de capteurs (MAC, discernabilité)  
Méthode de décomposition modale effective

		MAC					
1	100	0.8566	50.92	99.03	16.98		100
2	0.8566	100	0.5729	0.1693	83.15		100
3	50.92	0.5729	100	53.16	8.561		100
4	99.03	0.1693	53.16	100	13.41		100
5	16.98	83.15	8.561	13.41	100		100
	1	2	3	4	5		

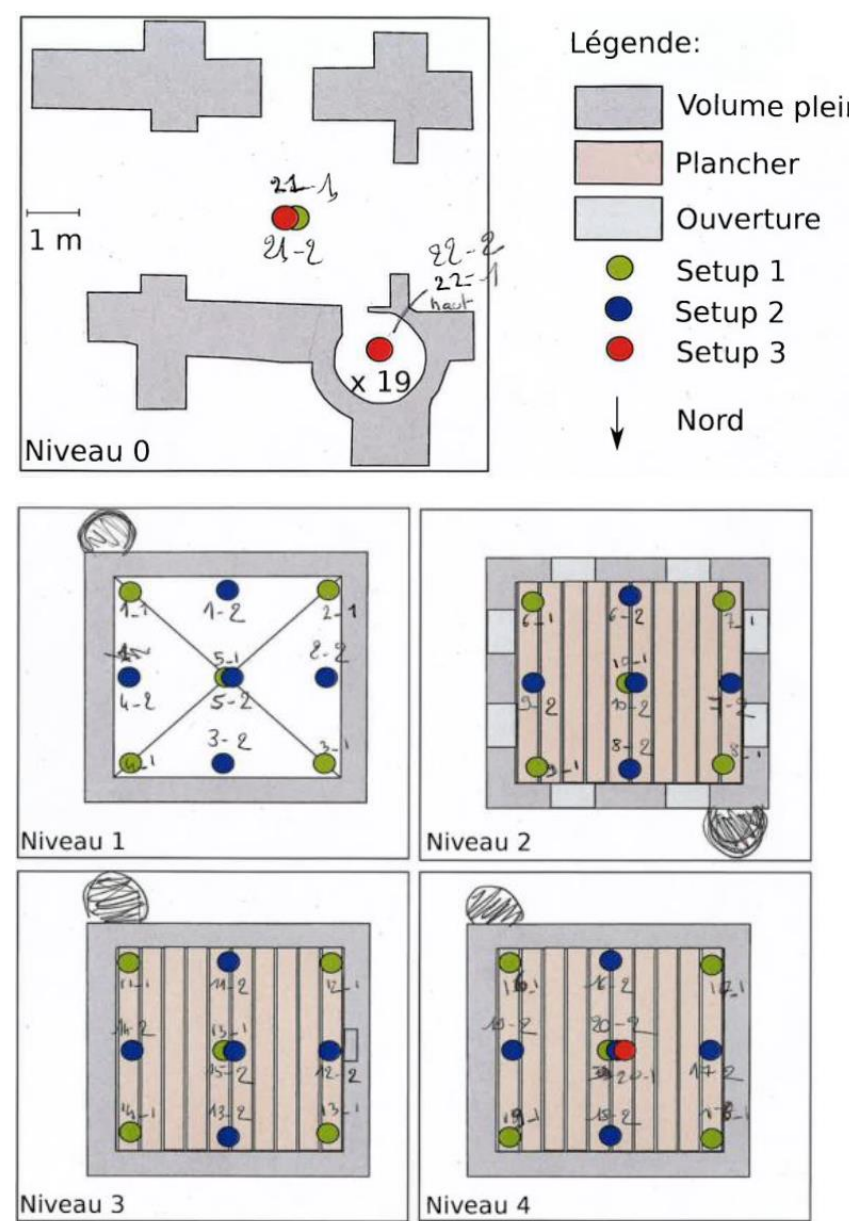
Exemple donné avec 20 capteurs disponibles



## Mesures de vibrations ambiantes

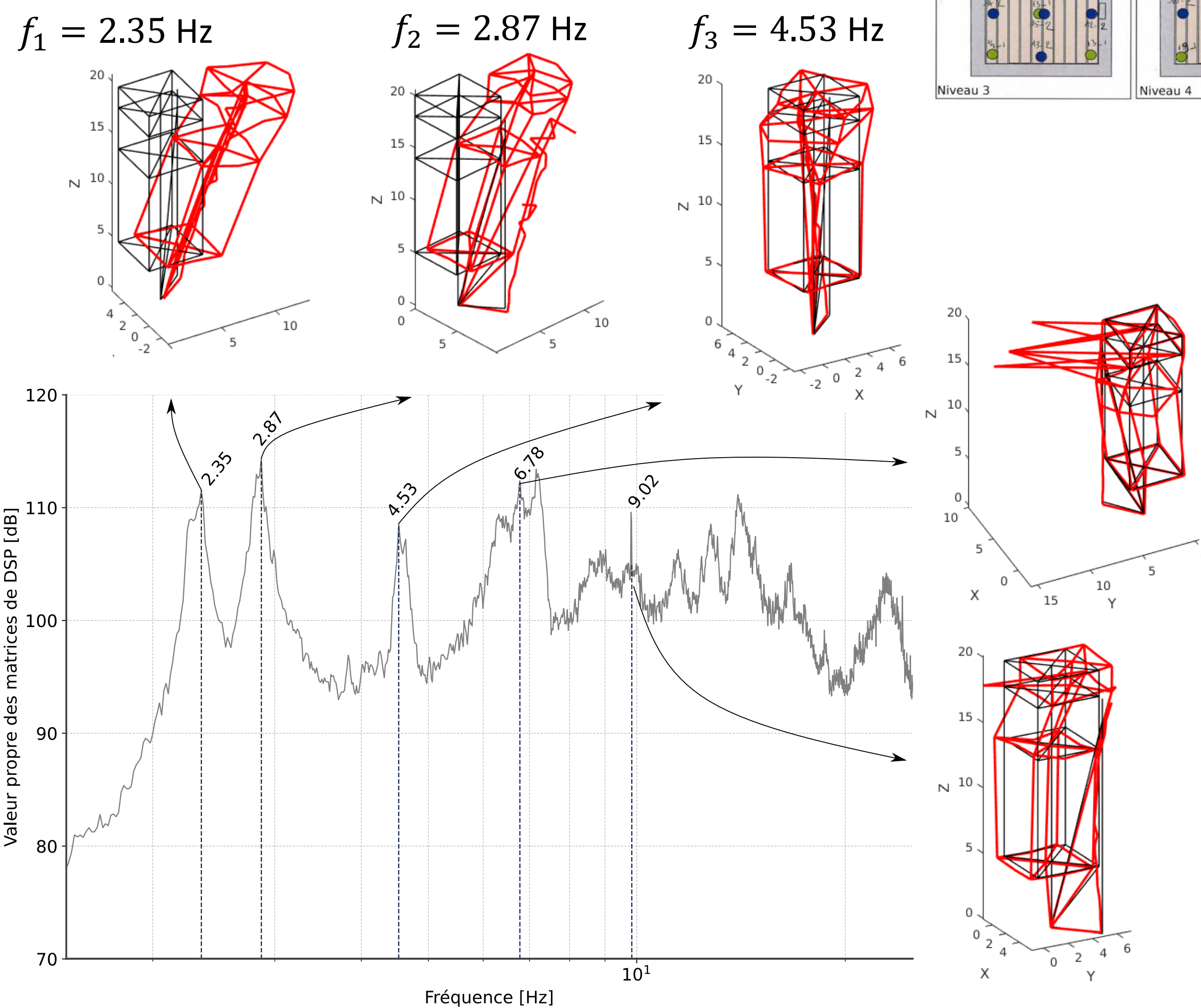
Brinker et al., 2000

**Campagne d'essais in-situ** avec excitation ambiante (vent, trafic, etc.)  
Capteurs : 22 SmartSolo (vélocimètres), 4 setup



## Analyse modale opérationnelle (OMA)

Identification modale par EFDD



En vue d'une instrumentation à long terme du clocher, les premières étapes de modélisation et mesures ont permis d'identifier correctement ses caractéristiques dynamiques principales et d'identifier les futures positions stratégiques pour l'enregistrement.

**Prochaine étape** : installation du dispositif de surveillance et suivi en continu avant le passage du premier métro.

### Références

Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2000). Output-only modal analysis by frequency domain decomposition. Proceedings of ISMA25: 2000 International Conference on Noise and Vibration Engineering, 717-723.  
Kammer, D. C. (1991). Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 14(2), 251-259.  
Rupnik, E., Daakir, M., Pierrot Deseilligny, M. (2017). MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. Open geospatial data, software and standards, 2, 1-9.

### Remerciements

Pietro Meriggi pour son aide pour la création du nuage de points.  
ASNR-BÉRSSIN pour le prêt des capteurs SmartSolo.



JOURNÉES NATIONALES  
MAÇONNERIE

5<sup>ème</sup> édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025

