



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



Analyse simplifiée de la vulnérabilité sismique de la chambre des cloches de six clochers au Mugello, Italie

R. YANEZ CHURA^{1,2,3,*}, C. GIRY^{2,4}, A. MONTABERT², E. D. MERCERAT⁵, H. LYON-CAEN¹, M. LANCIERI⁶

1 Laboratoire de Géologie de l'ENS, UMR 8538, PSL University/CNRS, Paris, France.

2 Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, UMR 9026, Paris-Saclay University/CNRS, Gif-sur-Yvette, France.

3 Department of Civil Engineering, Roma Tre University, Rome, Italy.

4 EPF École d'Ingénieurs, Cachan, France.

5 CEREMA Méditerranée, project team MOUVGS, 500 route des Lucioles, Valbonne, France.

6 Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations, IRSN/PSE-ENV/SCAN/BERSSIN, Fontenay-aux-Roses, France.

*yanez@geologie.ens.fr



école
normale
supérieure
paris-saclay

université
PARIS-SACLAY

ROMA
TRE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI

epf
ENGINEERING SCHOOL
Creating the future together

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

ASNR



ANR ACROSS

Le projet ANR ACROSS* : comprendre les séismes historiques du Mugello (Italie)

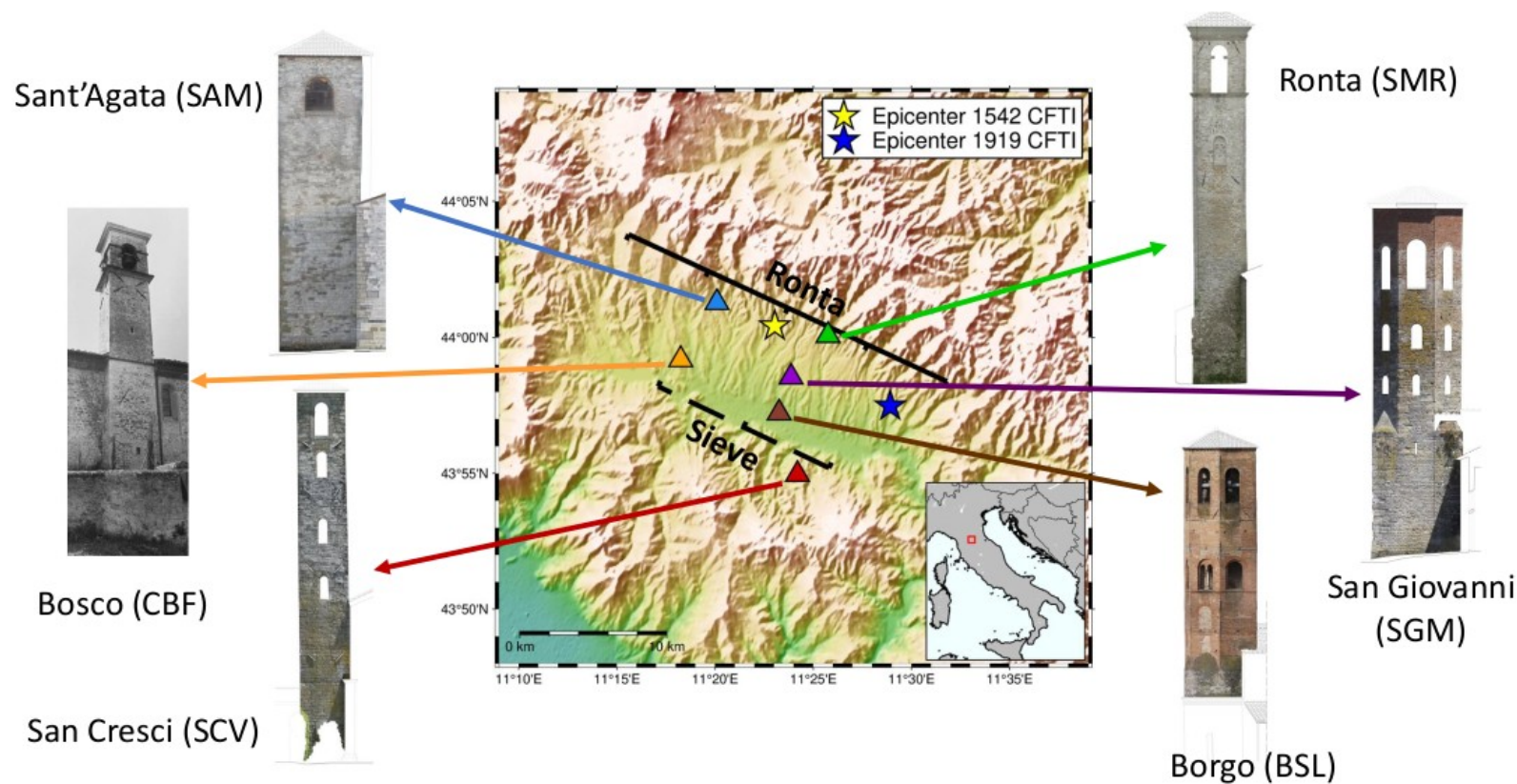


Les clochers : des « sismomètres de pierre »

Objectif : comparer les dommages historiques (archives) avec ceux simulés (modèles numériques), pour en déduire l'intensité du mouvement du sol (PGV)

* <https://across-project.github.io/>

Six clochers en maçonnerie dans le bassin du Mugello

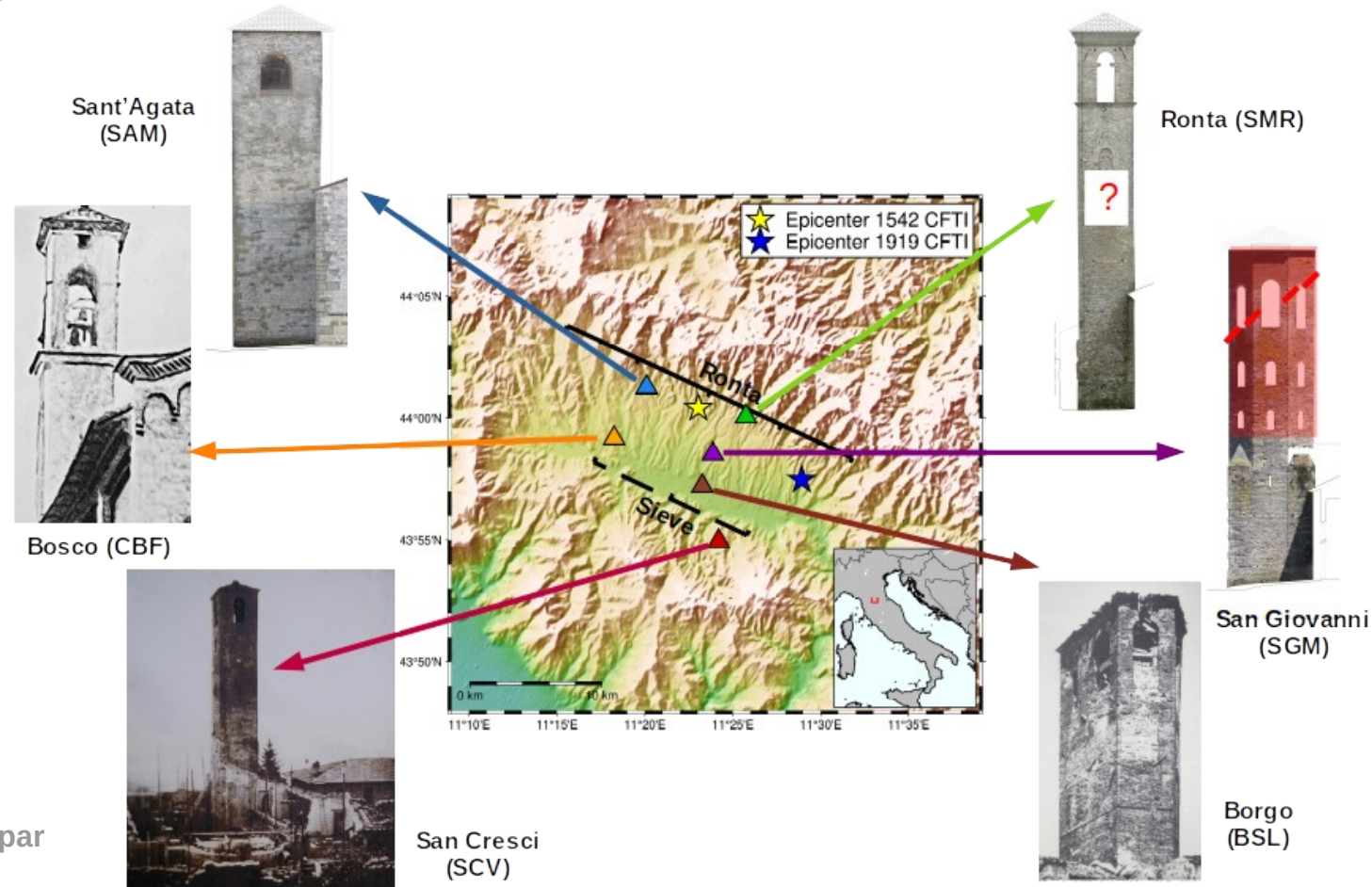


Deux séismes historiques : 1542 (Me 5.9) et 1919 (Me 6.3)

Séisme du Mugello 1919 (Me 6.3)



Dommages concentrés sur les chambres des cloches^{*}



* recherche des archives par
C. Ciuccarelli (INGV)



- 1) Construire des modèles numériques des clochers
- 2) Identifier les paramètres modaux via OMA
- 3) Calibrer les modèles avec PSO + SIMPLEX
- 4) Évaluer la vulnérabilité sismique des chambres des cloches via des courbes de fragilité

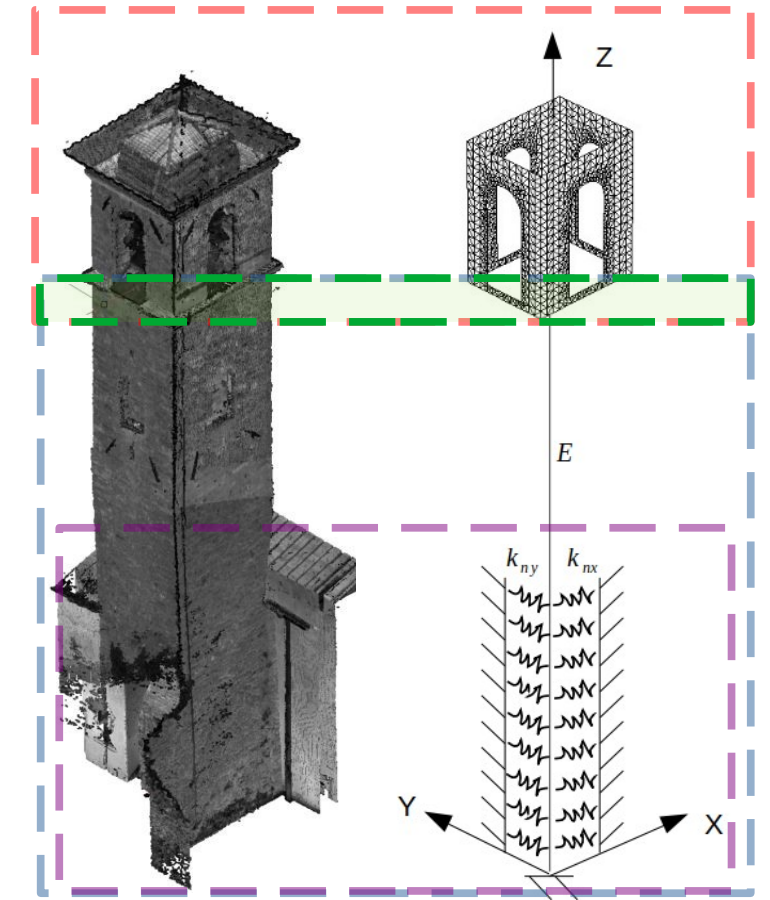
Modèles mixtes



But : reproduire les dommages avec un temps de calcul raisonnable

Éléments finis (FEM) :

- type **plaque** pour la chambre des cloches
- type **poutre** pour les étages inférieurs
- **liaison rigide** entre les deux parties
- **interaction élastique** avec reste d'église



Nuage de points du clocher de Ronta (gauche) et modèle associé (droite)

Analyse Modale Opérationnelle*



Capteurs : CMG-40T sismomètre large bande



Méthode : *Enhanced Frequency Domain Decomposition*
(Michel 2007)

Clocher	Flex. 1 [Hz]	Flex. 2 [Hz]
<i>Borgo</i> (BSL)	1.5	2.4
<i>San Giovanni</i> (SGM)	2.3	2.4
<i>San Cresci</i> (SCV)	2.0	2.3
<i>Ronta</i> (SMR)	2.1	2.3
<i>Sant'Agata</i> (SAM)	2.6	2.9
<i>Bosco</i> (CBF)	2.1	3.2

Fréquences des deux premiers modes de flexion identifiées par OMA
(Mercerat 2024, Montabert 2022)

* OMA

Calibration des modèles



But : identifier le triplet (E, k_{nx}, k_{ny}) qui minimise l'écart entre les modes numériques et expérimentaux

Réalisée en deux étapes :

1) Optimisation globale par essaim particulaire (PSO) sur modèle poutre



2) Optimisation locale par algorithme simplex sur modèle mixte



Fonction coût



Minimiser

$$err_{tot} = \alpha err_{freq} + \beta err_{MAC}$$

avec

$$err_{freq} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{|freq_{exp_i} - freq_{num_i}|}{freq_{exp_i}} \right)$$

écart en fréquence

$$err_{MAC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 MAC_i}{n}$$

écart en déformée

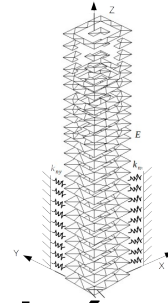
*MAC = Modal Assurance Criterion

$$MAC_i = MAC(\vec{\phi}_{exp_i}, \vec{\phi}_{num_i}) = \frac{(\vec{\phi}_{exp_i} \cdot \vec{\phi}_{num_i})^2}{|\vec{\phi}_{exp_i}|^2 |\vec{\phi}_{num_i}|^2}$$

1) Optimisation globale : PSO



Modèle poutre

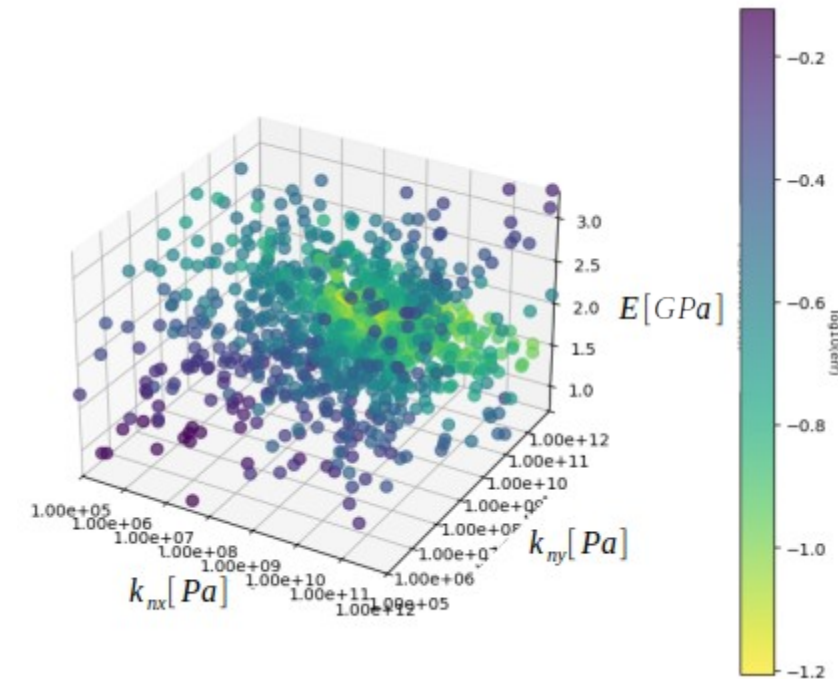
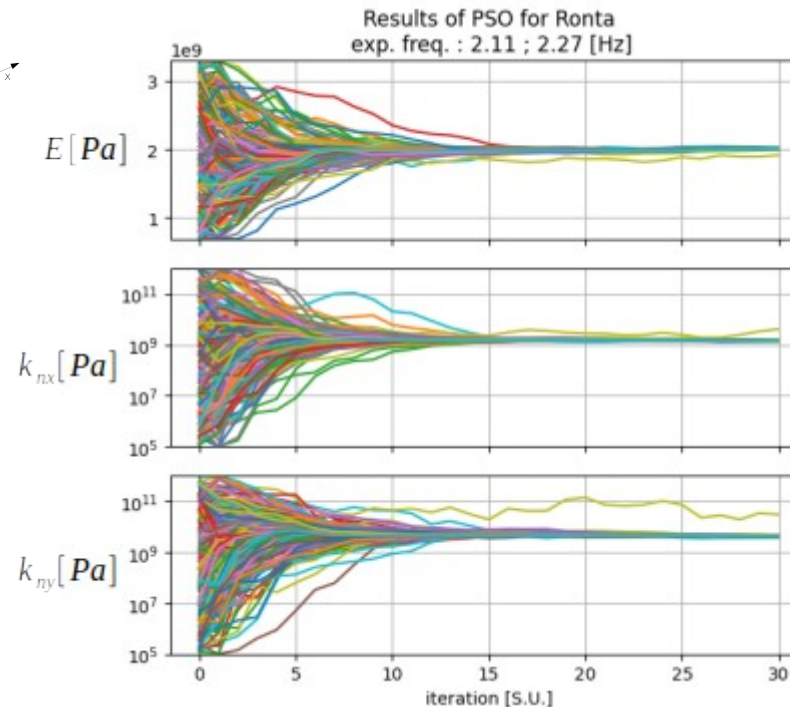


Optimums recherchés
entre les bornes :

$$E \in [690, 3300] \text{ MPa}$$

$$k_{nx} \in [10^5, 10^{12}] \text{ Pa}$$

$$k_{ny} \in [10^5, 10^{12}] \text{ Pa}$$



Trajectoire des particules pour Ronta (gauche) et variation spatiale de la fonction coût (droite)

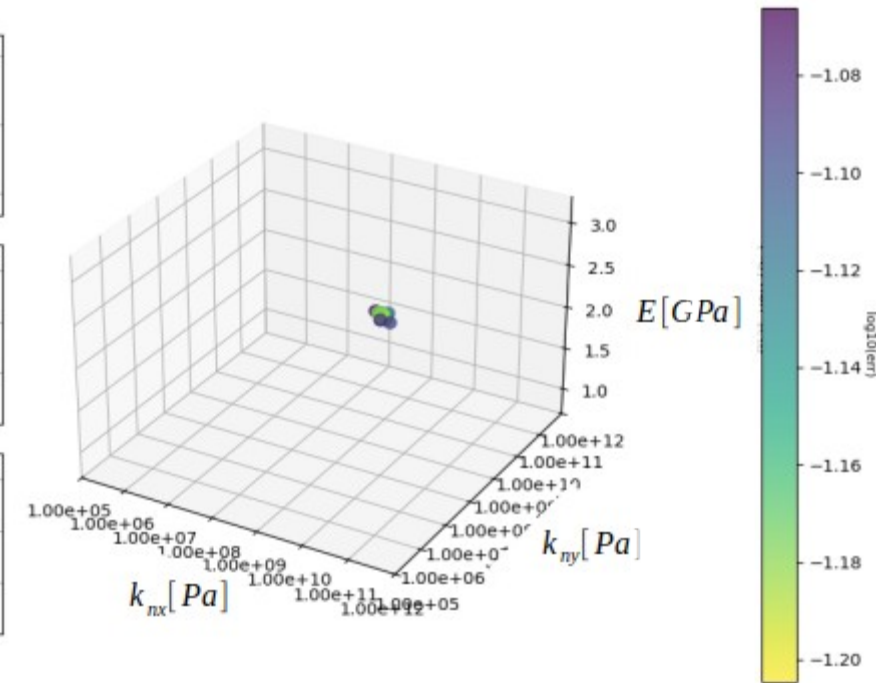
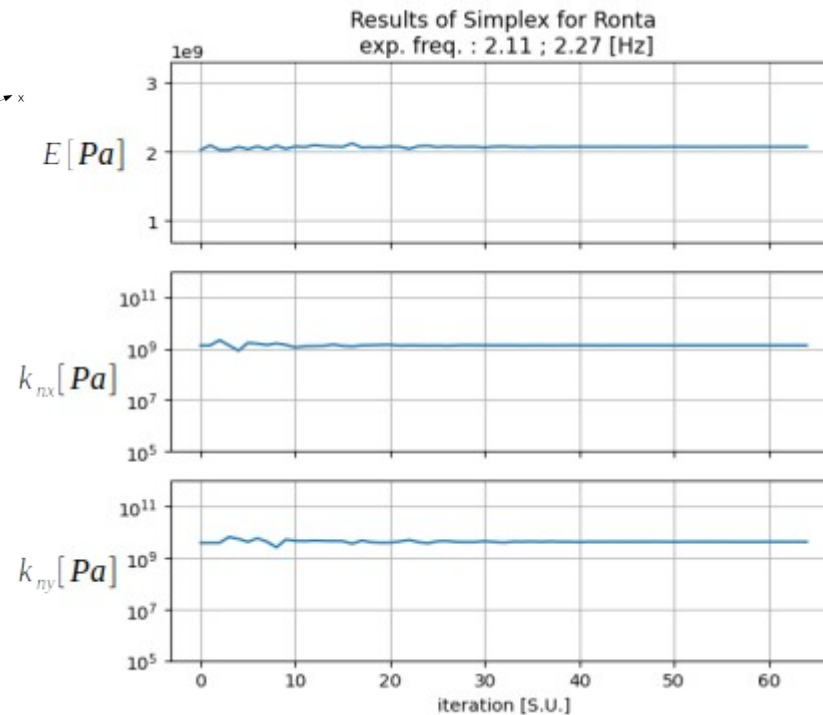
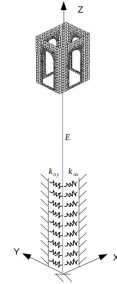
200 particules

2) Optimisation locale : Simplex



Modèle mixte

Point départ égal
au minimum trouvé
dans l'étape 1



Trajectoire d'optimisation pour Ronta (gauche) et variation spatiale de la fonction coût (droite)

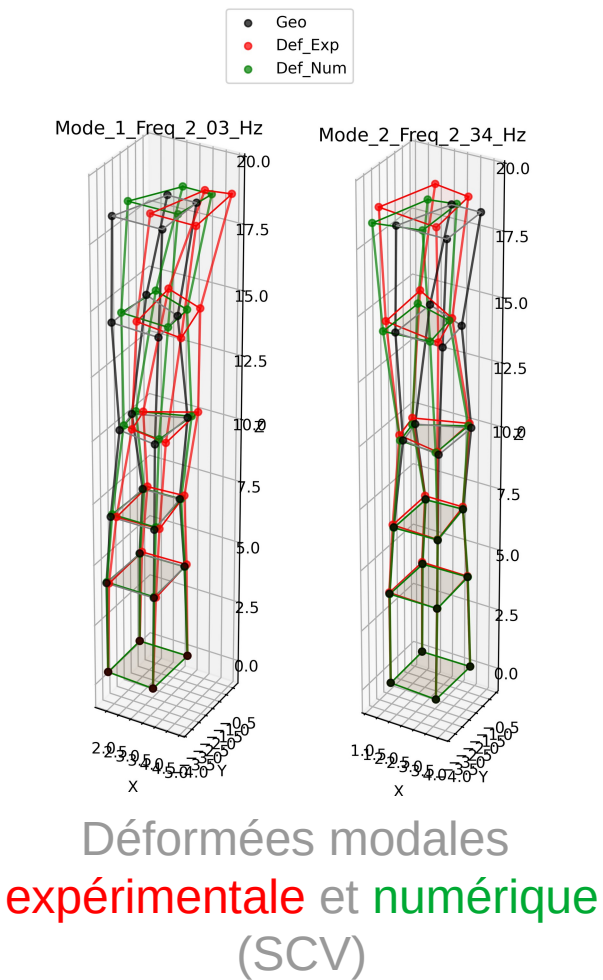
Résultats calibration des modèles



Paramètres

Clocher	E [MPa]	k_{nx} [Pa]	k_{ny} [Pa]
BSL	3017	3,44e7	3,39e6
SGM	1653	8,73e6	5,32e7
SCV	3266	1,96e8	3,96e7
SMR	2071	1,32e9	4,21e9
SAM	1585	4,53e7	1,77e8
CBF	2350	1,85e8	7,50e9
Clocher	MAC_1	MAC_2	err_{tot}
BSL	0,93	0,86	0,043
SGM	0,46	0,45	0,218
SCV	0,61	0,56	0,167
SMR	0,85	0,84	0,062
SAM	0,97	0,95	0,017
CBF	0,96	0,94	0,020

Erreurs



Définition des états de dommage (DS)



Echelle élément

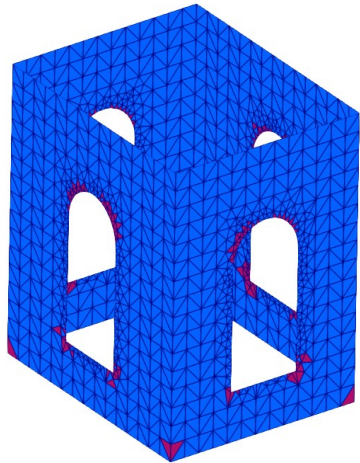
Critère de dommage : dépassement de la limite élastique^{*}

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \langle \sigma_i \rangle} > f_t$$

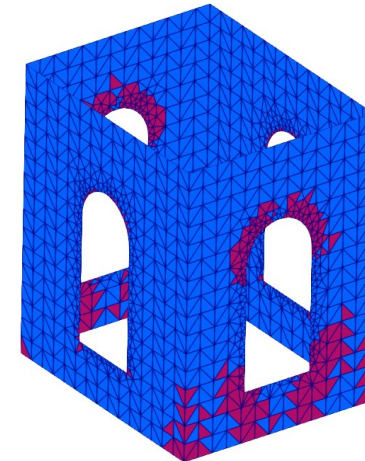
Echelle structure

DS = 1 si > 5 % de la surface « endommagée »

DS = 0



DS = 1

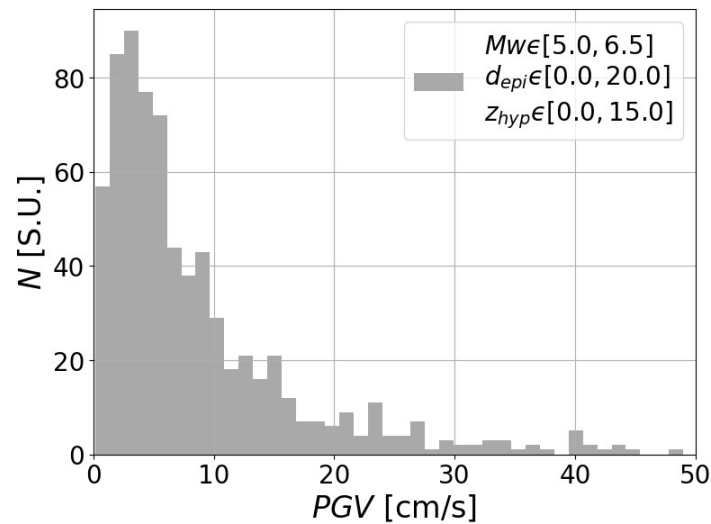


^{*} D'après les guides de la normative italienne, valeurs basées sur la qualité de la maçonnerie

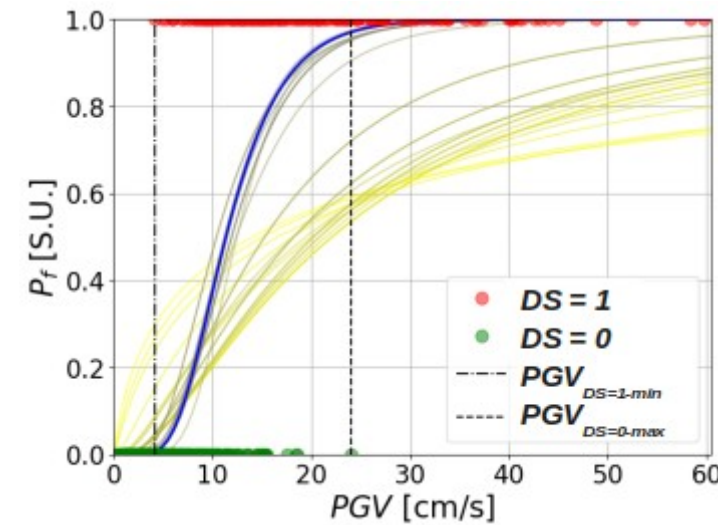
Courbes de fragilité



Simulations avec 715 signaux sismiques réels*



Distribution de la vitesse maximale
du sol des signaux

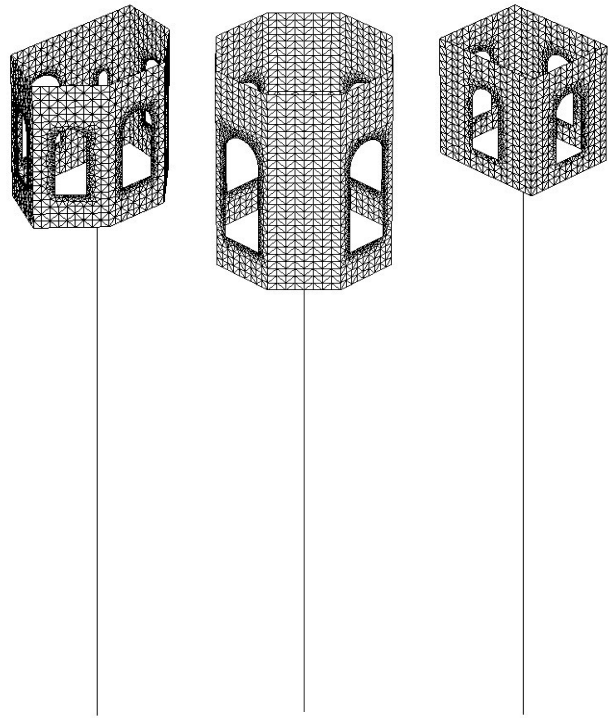


Convergence de la courbe de fragilité pour SCV

Ajustement des courbes log-normales par maximum de vraisemblance

* Signaux venant des bases de données ESM, CESMD et NIED (K-NET et KiK-net)

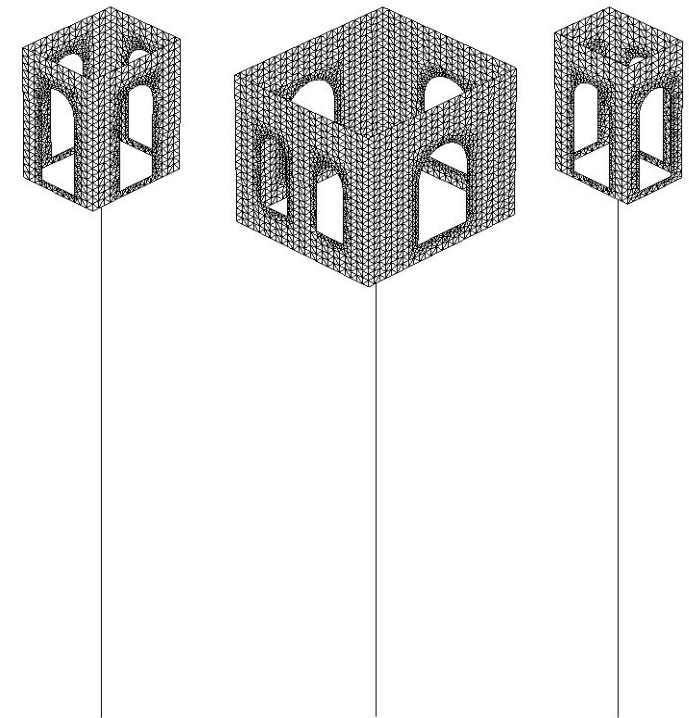
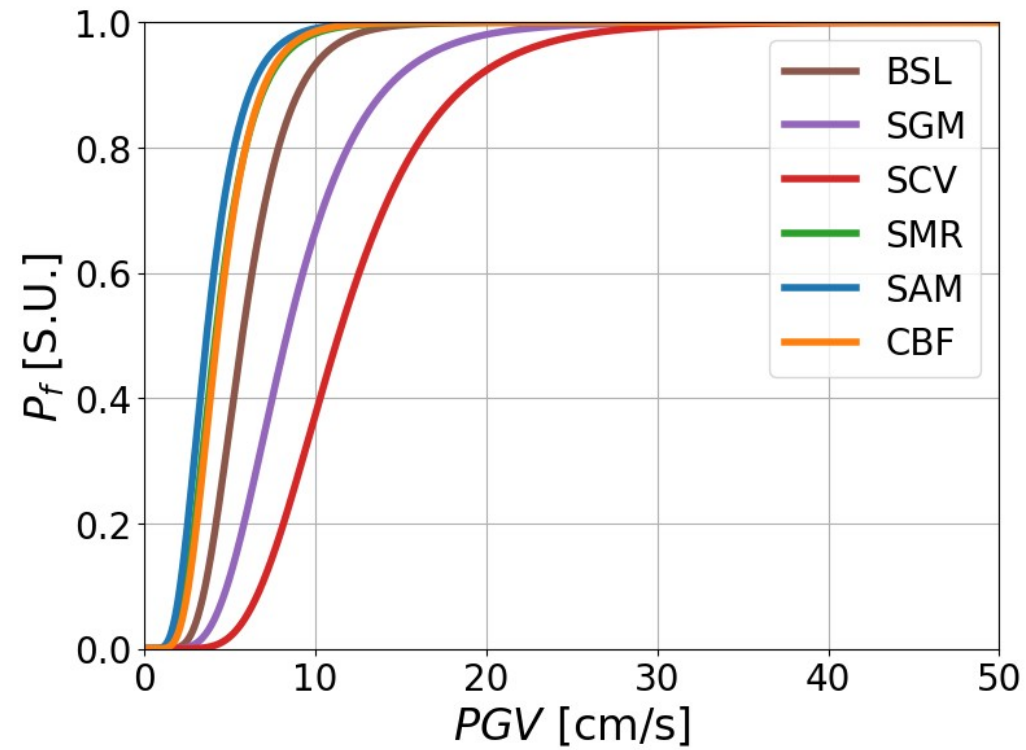
Courbes de fragilité



BSL

SGM

SCV



SMR

SAM

CBF

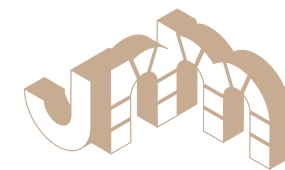
Conclusions



- 1) San Cresci : chambre des cloches la moins vulnérable (meilleure qualité de maçonnerie, petites ouvertures)
- 2) Combinaison OMA + PSO (modèle simple) + Simplex (modèle complexe) = gain de temps considérable
- 3) Calculs dynamiques linéaires pour des états de dommages faibles = gain de temps considérable

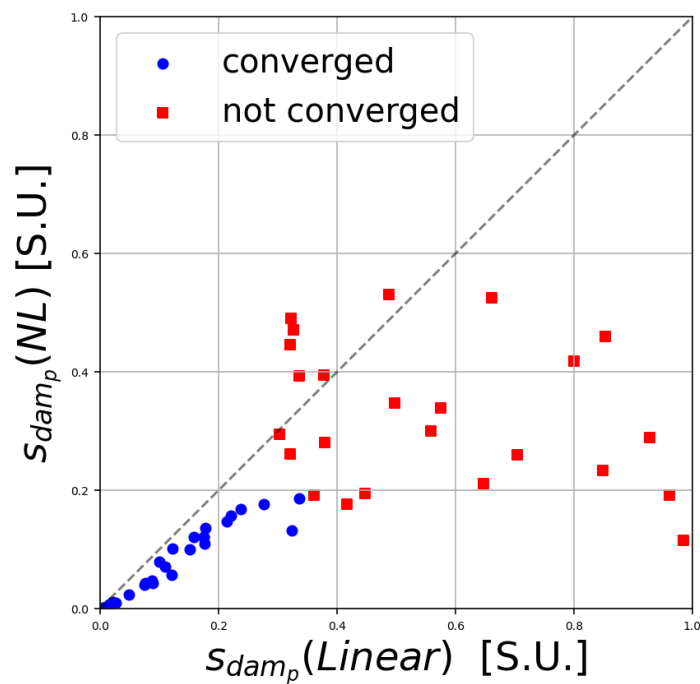
Perspectives : seuil de 5 % à vérifier par calculs non linéaires

Vérification préliminaire du seuil

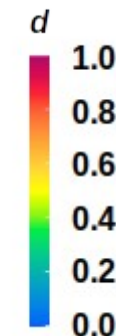
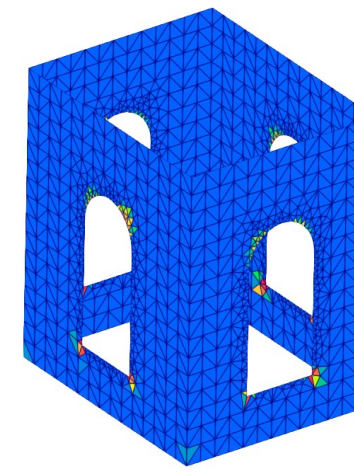
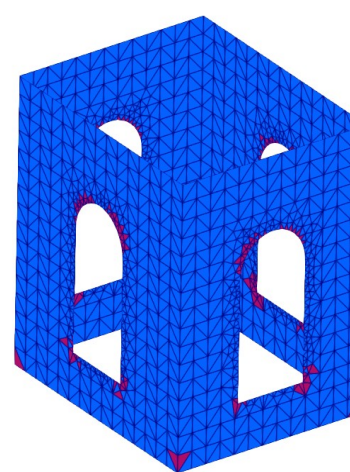


Echelle structure

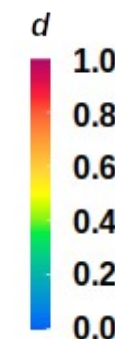
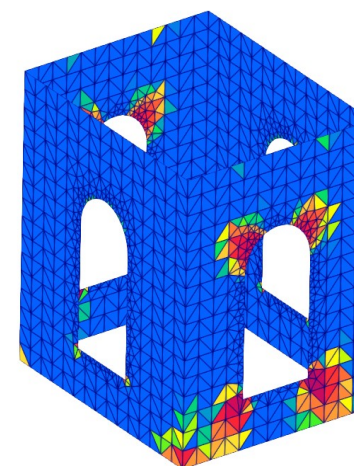
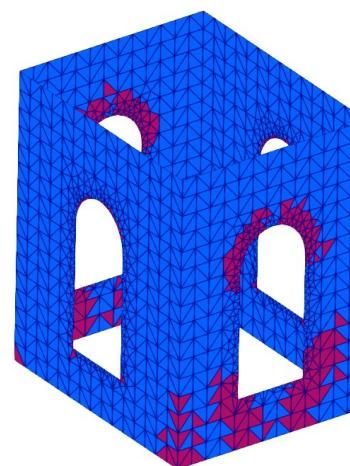
DS = 1 si $> 5\%$ de la surface « endommagée »



DS = 0



DS = 1



Linéaire

Non linéaire



Merci de votre attention

Contact : yanez@geologie.ens.fr

Journées Nationales de la Maçonnerie
5ème édition | Bordeaux
12 et 13 juin 2025