



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



Réponse dynamique d'un pont en maçonnerie avec différents niveaux de modélisation

CHAMBREUIL, C., EL MASRI, R., **GIRY, C.**, LOPEZ-CABALLERO, F., RAGUENEAU, F.



université
PARIS-SACLAY



CentraleSupélec

école
normale
supérieure
paris-saclay



Introduction



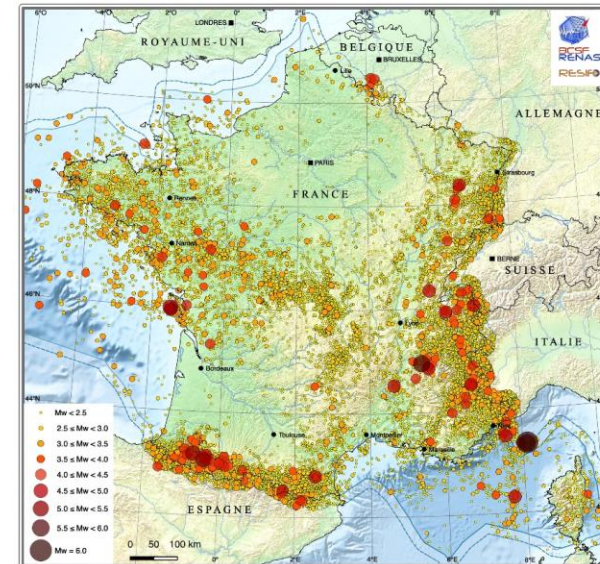
- ~18 000 ponts ferroviaires en maçonnerie en France dont la plus part ont été construits avant 1904
- Le comportement de ces ponts doit être compris pour améliorer le plan de gestion des risques
- En particulier, les récents séismes (Le Teil – 2019 ou La Laigne – 2023) rappellent que le risque sismique existe et doit être évalué



Viaduc de Cize-Bolozon [1]

Problématique

Étudier des modèles plus ou moins complexes de ponts en maçonnerie afin d'évaluer la vulnérabilité sismique de ces structures.



Sismicité instrumentales en France métropolitaine [2]

Modélisation d'un pont en maçonnerie

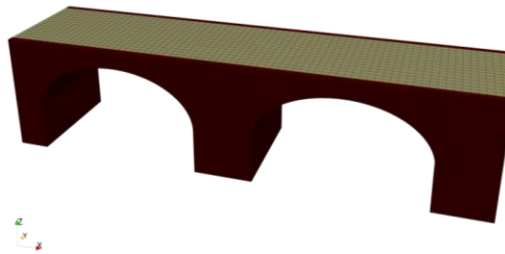


- Pont étudié

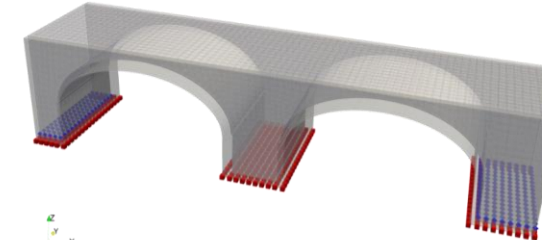


"Arc Bridge" - Turquie [3]

- Modèle éléments finis et conditions aux limites



Maillage [4]



Conditions aux limites [4]

- Modèles matériaux

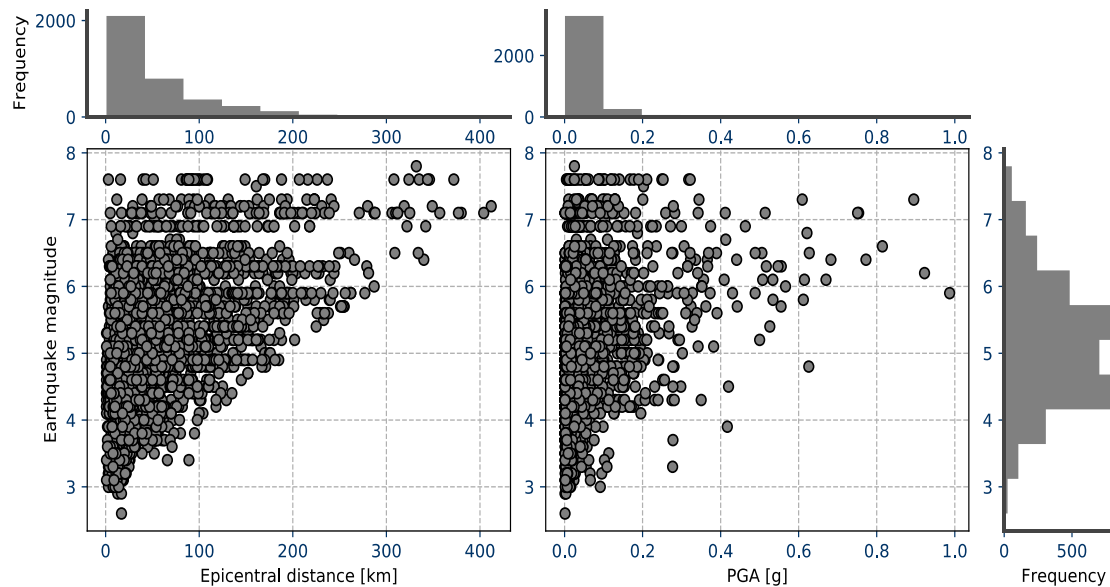
- Maçonnerie : élastique orthotrope (approche 1) – modèle d'endommagement (approche 2 et 3)
- Remplissage : élastique isotrope

- Modèle d'amortissement

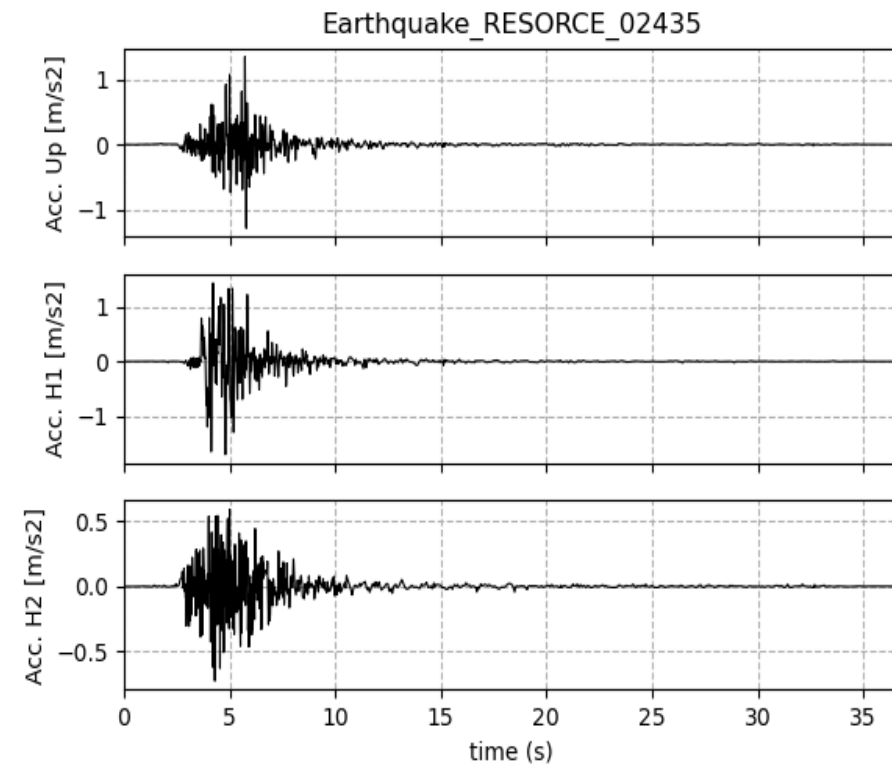
- Amortissement de Rayleigh avec $\xi = 5\%$ pour les modes 1 et 3

- Base de données RESORCE

- 5 800 signaux sismiques
- Magnitudes : $2,5 \leq M_w \leq 7,9$
- PGA : $0,01g \leq PGA \leq 0,98g$



Distribution des distances épicentrales, magnitudes et PGA pour la base de données RESORCE 2012 [5]

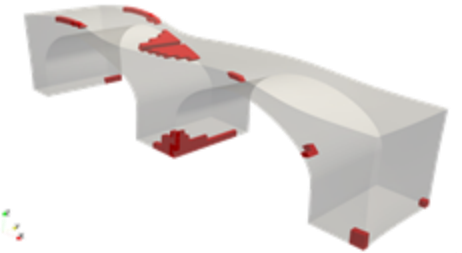


Exemple d'un enregistrement de la base de données RESORCE à trois composantes [5]

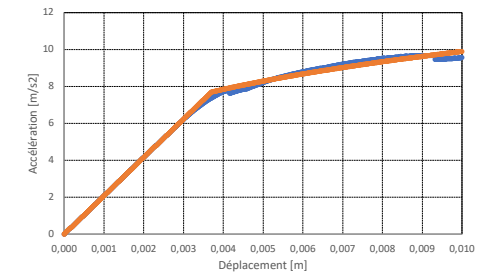
Différentes stratégies de modélisation



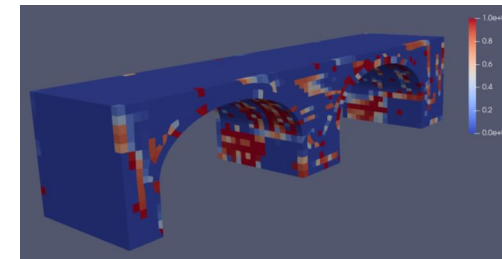
1. Analyse linéaire sur base modale – dommage faible à modéré



2. Analyse non linéaire sur base modale – dommage modéré



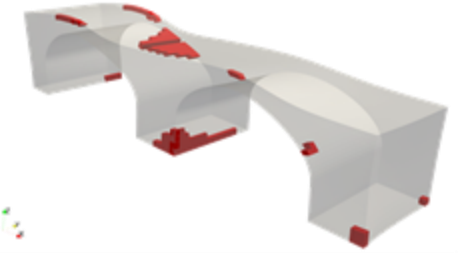
3. Résolution temporelle directe – dommage avancé



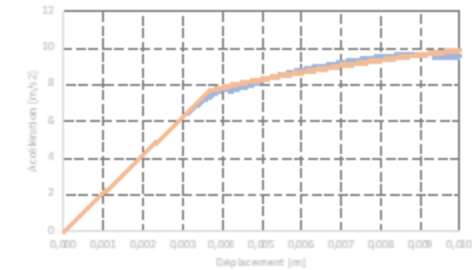
Différentes stratégies de modélisation



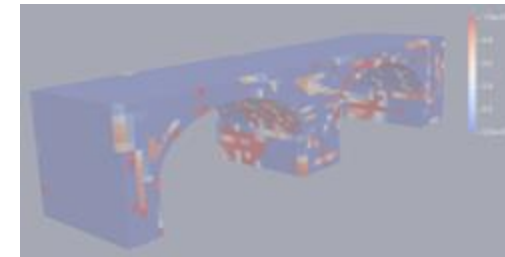
1. Analyse linéaire sur base modale – dommage faible à modéré



2. Analyse non linéaire sur base modale – dommage modéré



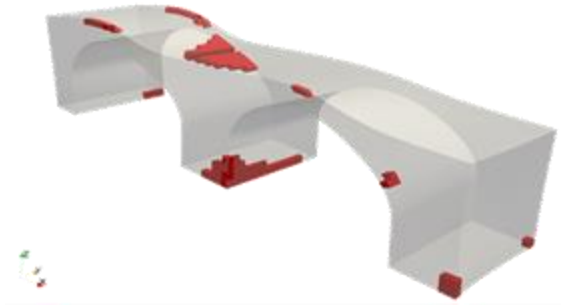
3. Résolution temporelle directe – dommage avancé



Définition d'un critère d'endommagement



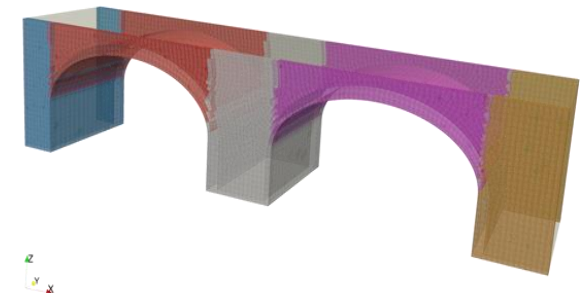
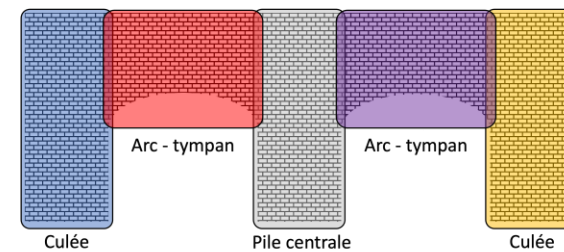
- Un critère de Rankine est considéré en post-traitement $f_{Rankine}(\sigma) = \max_I \sigma_I - f_t$
- Evaluation à chaque pas de temps du volume $V_{Rank.}$ des zones atteignant le critère de Rankine



Identification d'un endommagement potentiel sur un pont en maçonnerie avec les éléments dépassant le critère de Rankine représentés en rouge

- Critères d'endommagement local et global

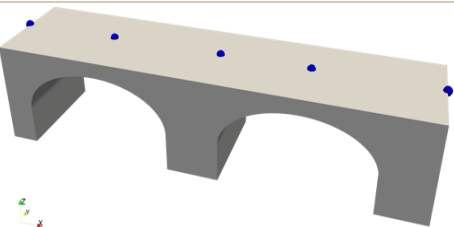
$$D_{I_{Rank.}} = \frac{V_{Rank.}}{V_{total}} \quad D_{I_{Rank.}}^{(i)} = \frac{V_{Rank.}^{(i)}}{V_{total}^{(i)}}$$



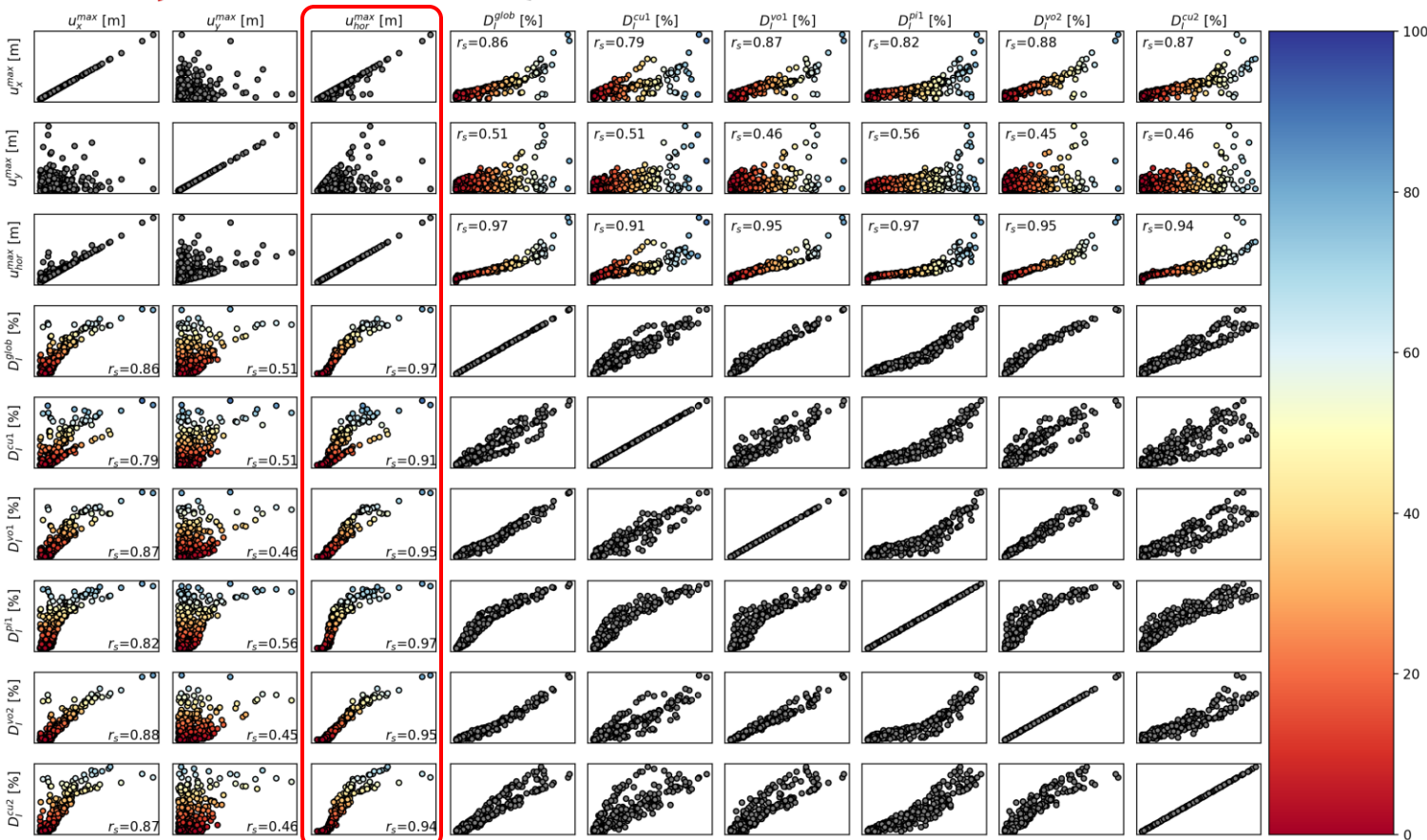
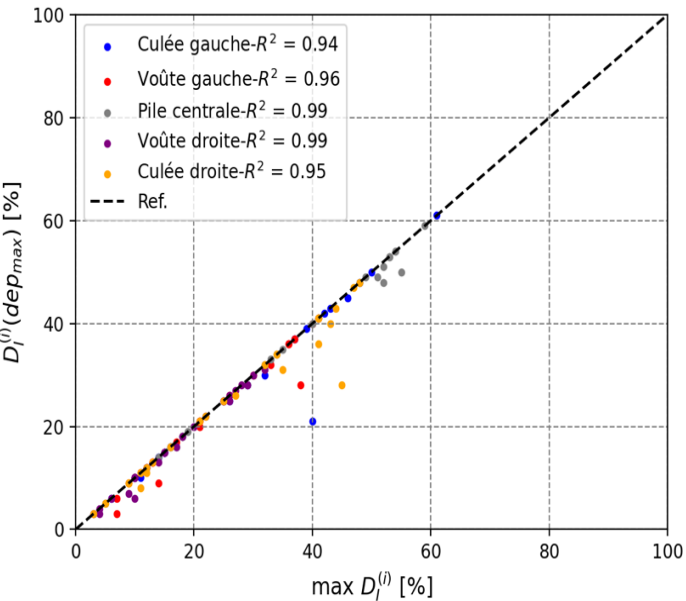
Définition de zones associées à des mécanismes d'endommagement du pont en maçonnerie [5]

Corrélation avec la réponse en déplacements

- Choix de 5 points le long du pont
- Analyse de corrélation



Points au niveau desquels sont récupérées les valeurs de déplacements [4]



Possibilité de post-traiter à l'instant du déplacement maximal et de travailler sur un critère en déplacement [4]

Modèle de fragilité



- Seuil du critère d'endommagement

- État d'endommagement (DS)
- Seuil d'endommagement (LS)

$$LS_i = 15\%, 30\%, 50\%$$

DS_0	$DS_i, i > 0$
--------	---------------

- Courbe de fragilité sismique

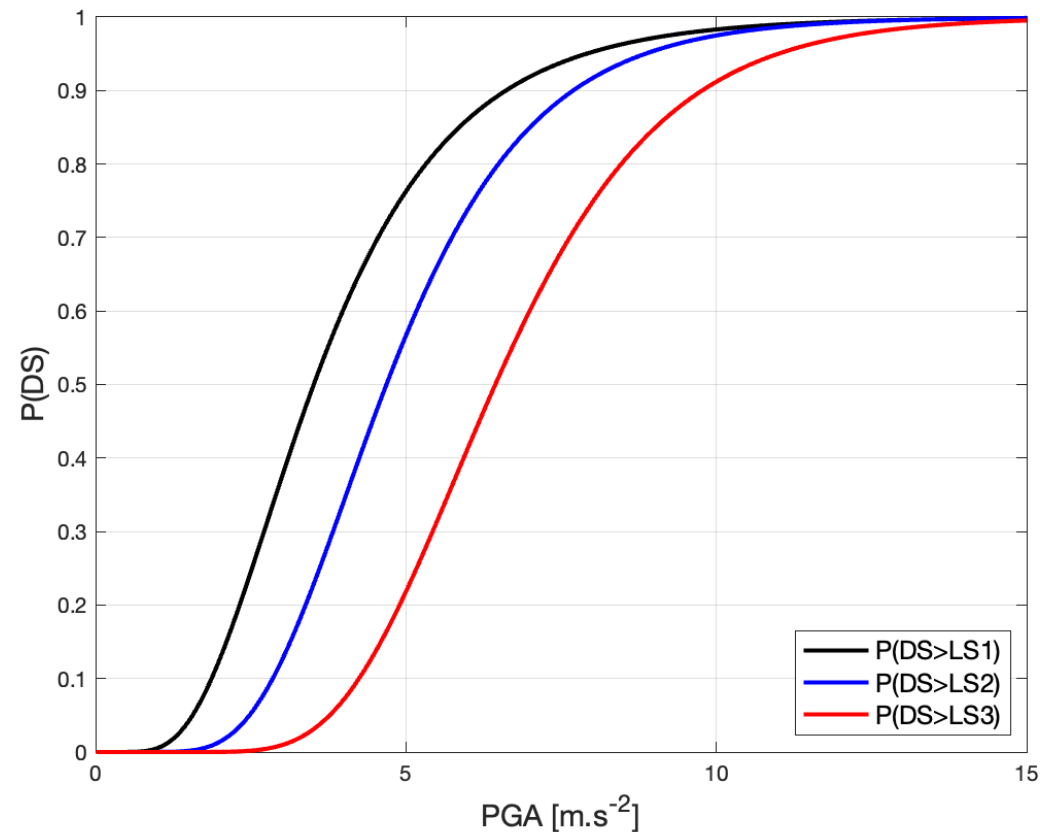
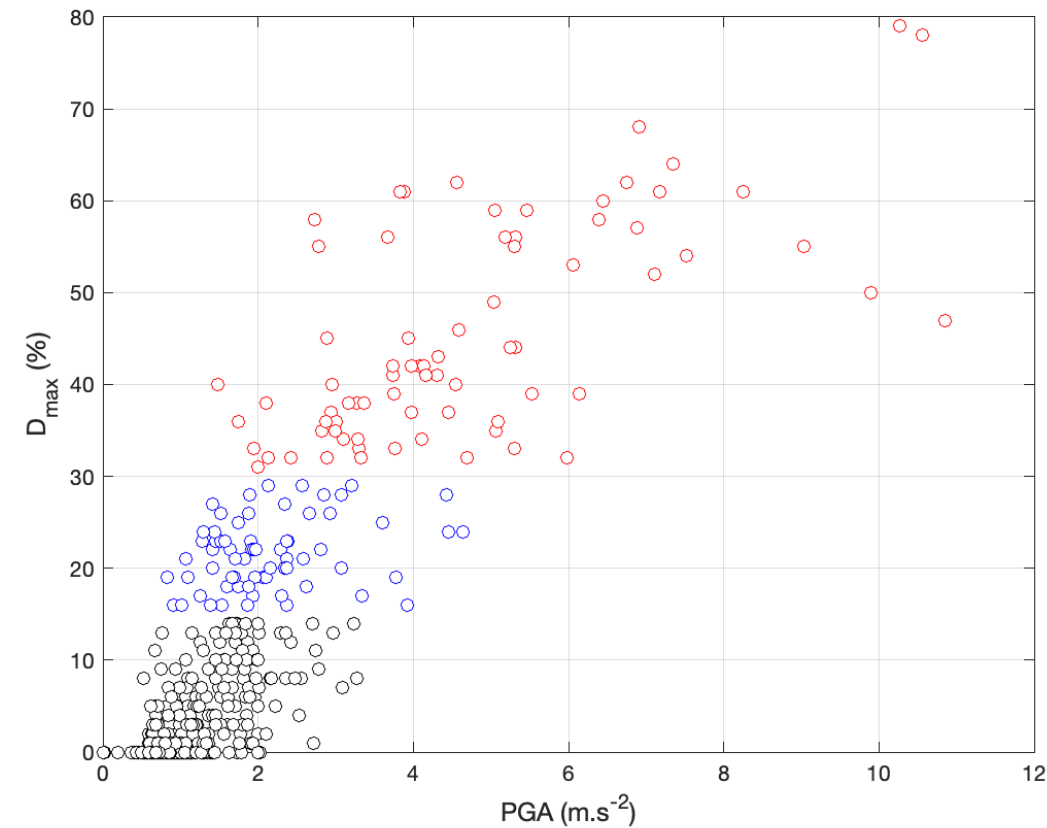
- Modèle logarithmique
- Identification des paramètres A_m et β

$$P_f(DM > LS|IM) = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \ln(A_m)}{\beta}\right)$$

Courbes de fragilité



- Seuil d'endommagement : LS1 = 15%, LS2 = 30%, LS3 = 50%
(% volume dépassant le seuil de Rankine)



$$A_{m_{LS1}} = 3.51 \text{ m/s}^2$$
$$\beta_{LS1} = 0.49$$

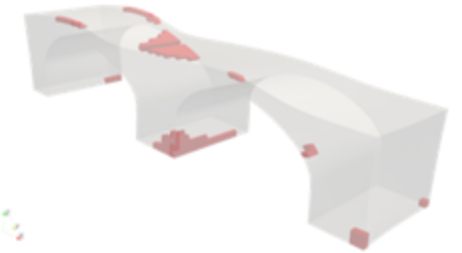
$$A_{m_{LS2}} = 4.69 \text{ m/s}^2$$
$$\beta_{LS2} = 0.39$$

$$A_{m_{LS3}} = 6.44 \text{ m/s}^2$$
$$\beta_{LS3} = 0.33$$

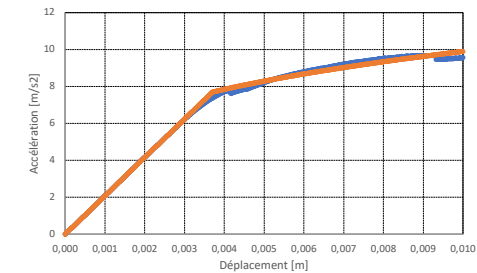
Différentes stratégies de modélisation



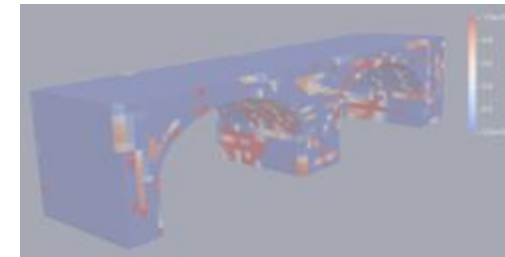
1. Analyse linéaire sur base modale – dommage faible à modéré



2. Analyse non linéaire sur base modale – dommage modéré



3. Résolution temporelle directe – dommage avancé



Analyse non linéaire sur base modale



• Cadre de modélisation Stocchi et al [7]

Hypothèse de non linéarités modérées
Découplage des énergies sur la base modale

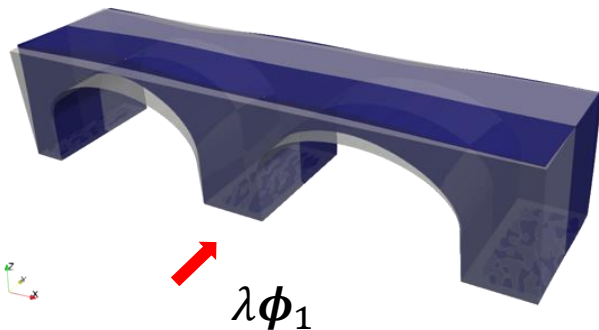
$$\begin{aligned}\Psi &= \sum_i \Psi_i(q_i, V_i) \\ \mathcal{T} &= \sum_i \mathcal{T}_i(\dot{q}_i) = \sum_i \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_i \dot{q}_i^2 = \sum_i \frac{1}{2} m_i \dot{q}_i^2 \\ \mathcal{D}_v &= \sum_i \frac{1}{2} c_i \dot{q}_i^2 \\ \mathcal{W}_{ext} &= - \sum_i \sum_k r_{ik} q_i \ddot{u}_{gk}\end{aligned}$$

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \frac{d\Psi_i}{dq_i} = \frac{d\mathcal{W}_{ext}}{dq_i}$$

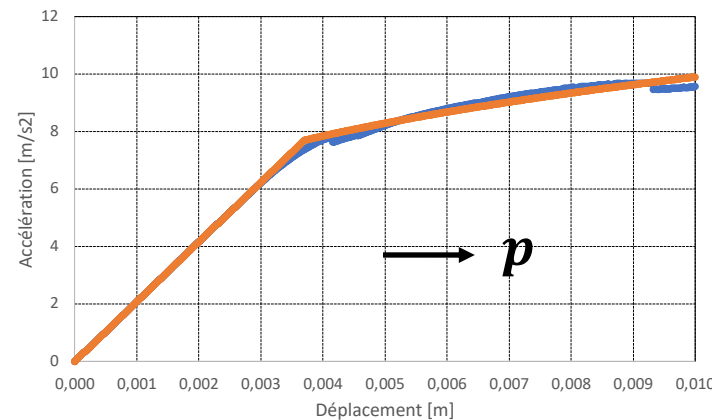
non linéaire

Chargement

Calcul non linéaire en poussée avec
modèle endommagement Mazars [6]



Courbe de réponse modale et identification

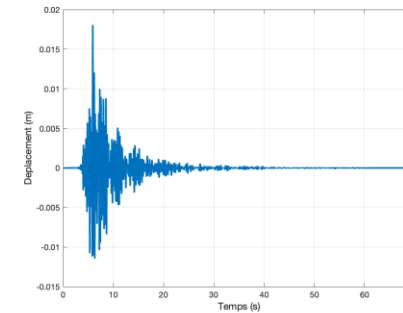


p : paramètres du modèle

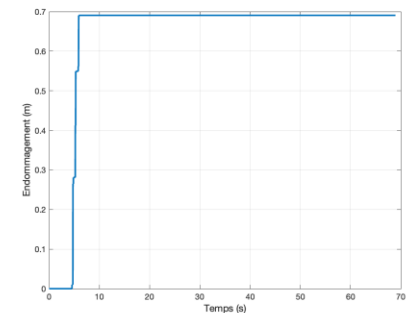


Résolution sur base modale avec mode non linéaire

Réponse modale



q_1



D_1

Analyse non linéaire sur base modale



- Modèle non linéaire modale

Modèle **d'endommagement** modal

$$\Psi_i = \frac{1}{2} (1 - D) \omega_i^2 q_i^2$$

$$D = d_{\infty} \left(1 - \left(\frac{Y_0}{Y} \right)^b \right)$$

$$\mathbf{p} = \{Y_0, d_{\infty}, b\}$$

Indicateur de dommage

Etat de dommage lié à la chute de fréquence : $\Delta f = \frac{f_0^i - f_D^i}{f_0^i}$

f_0^i : fréquence initiale

f_D^i : fréquence du mode endommagé

$$\Delta f = 1 - \sqrt{1 - D}$$

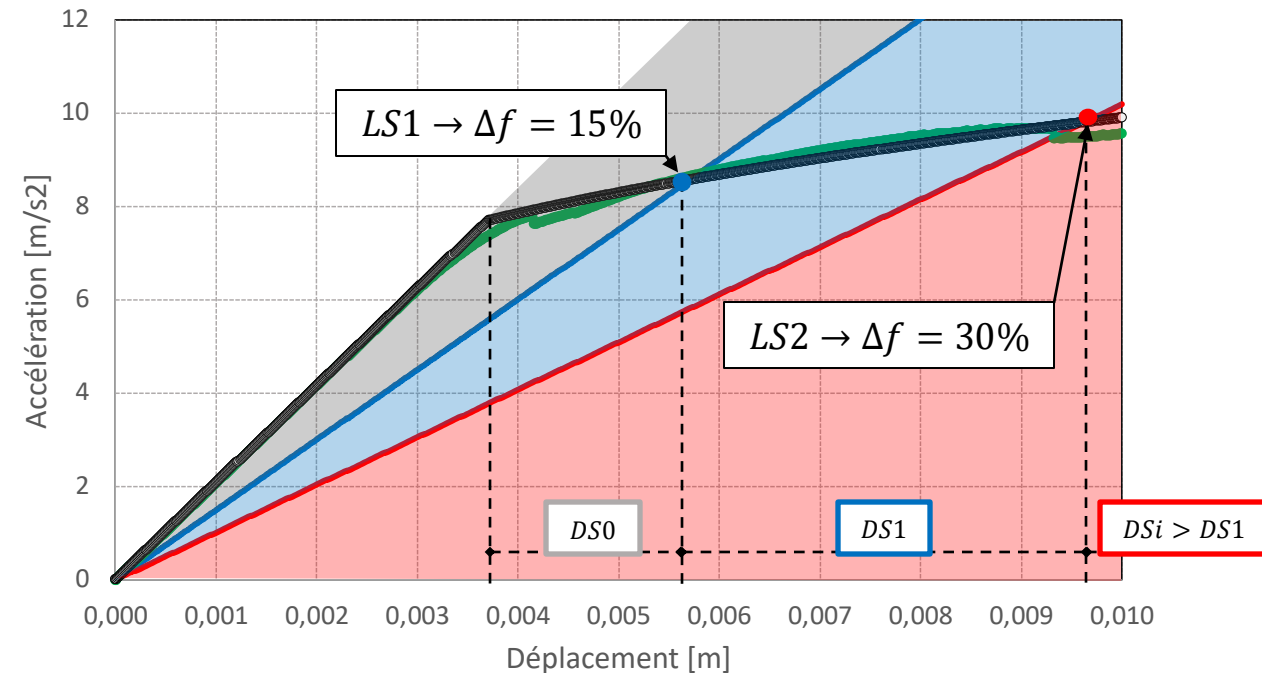
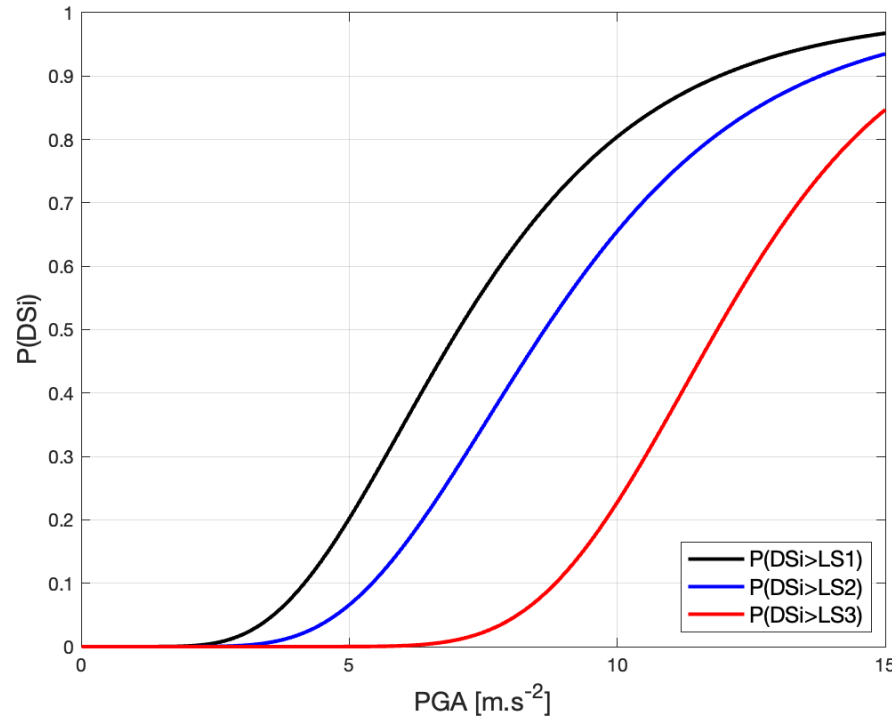
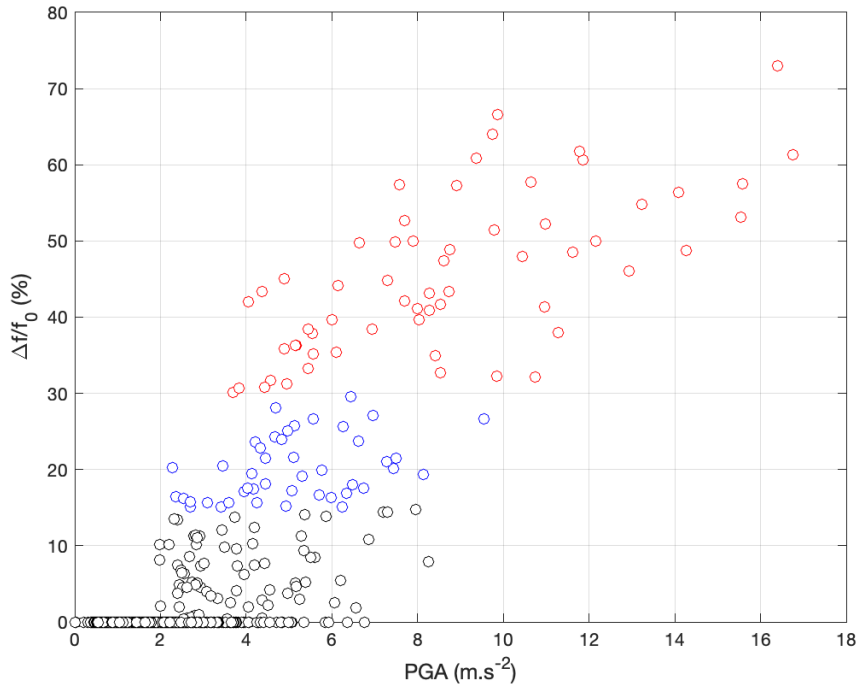


Illustration de l'état de dommage pour un mode non linéaire

Courbe de fragilité



- Paramètres des modèles de fragilité : LS1 = 15%, LS2 = 30%, LS3 = 50%
(% chute de fréquence)



$$A_{m_{LS1}} = 7.04 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_{LS1} = 0.41$$

$$A_{m_{LS2}} = 8.64 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_{LS2} = 0.36$$

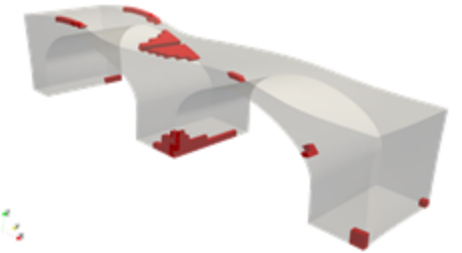
$$A_{m_{LS3}} = 11.87 \text{ m/s}^2$$

$$\beta_{LS3} = 0.23$$

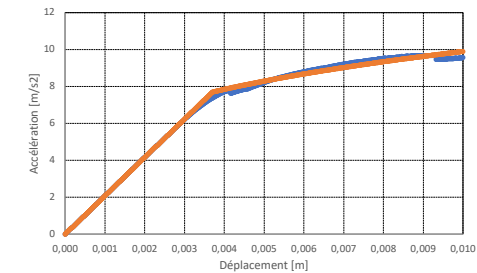
Différentes stratégies de modélisation



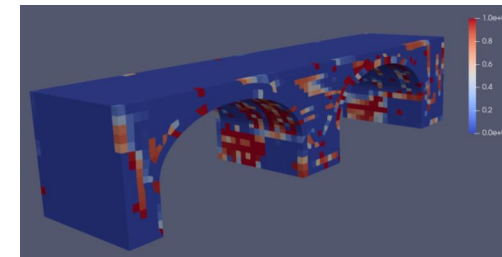
1. Analyse linéaire sur base modale – dommage faible à modéré



2. Analyse non linéaire sur base modale – dommage modéré



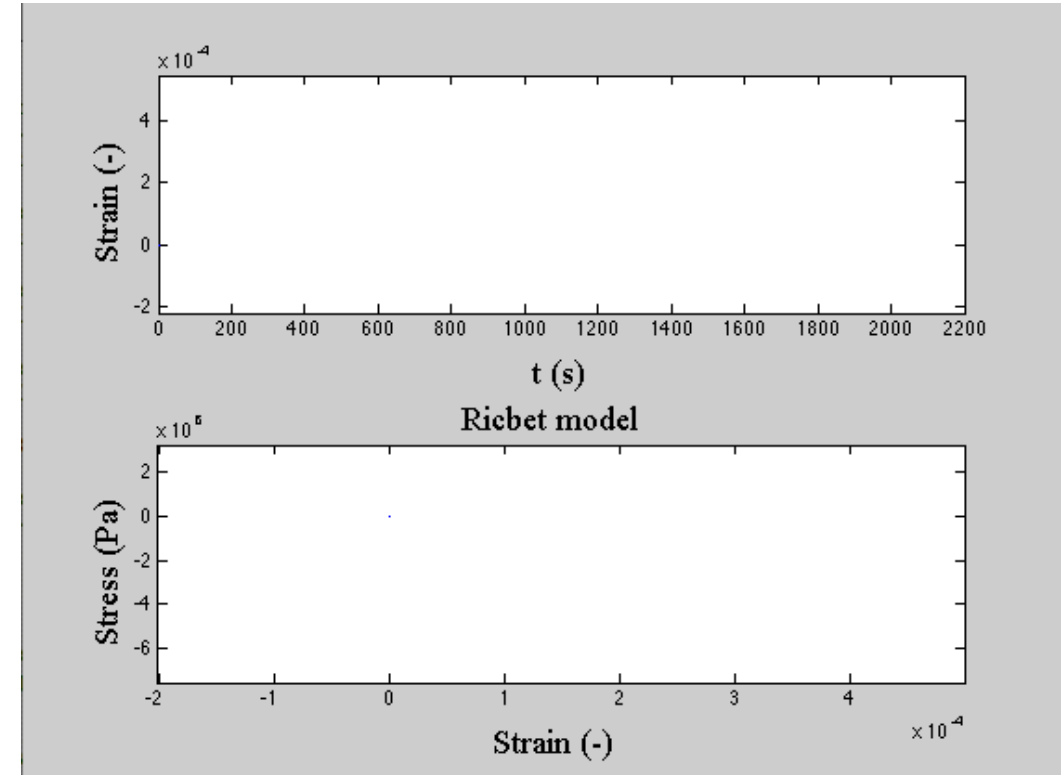
3. Résolution temporelle directe – dommage avancé



Modèles matériaux non-linéaires



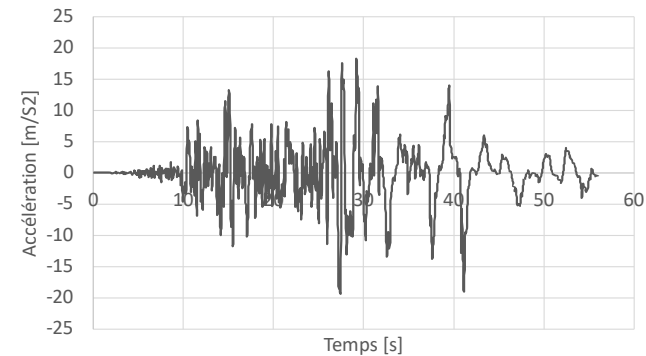
- 2 modèles de comportement non linéaire
 - Modèle de Mazars [7]
 - Endommagement (compression / traction)
 - Modèle Richard Ragueneau [9]
 - Endommagement (traction)
 - Frottement (traction)
 - Refermeture (effet unilatéral)



Analyses non-linéaires



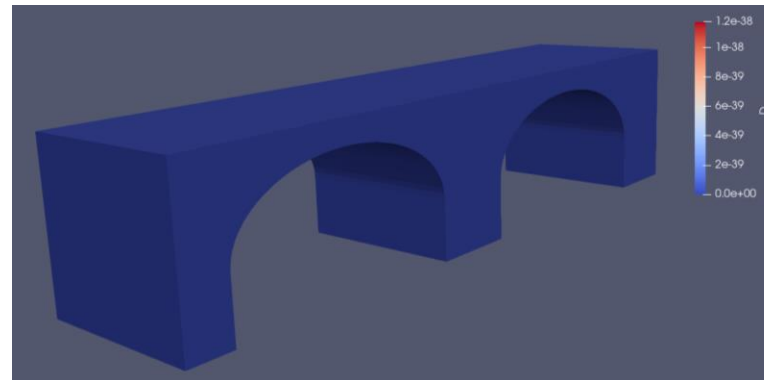
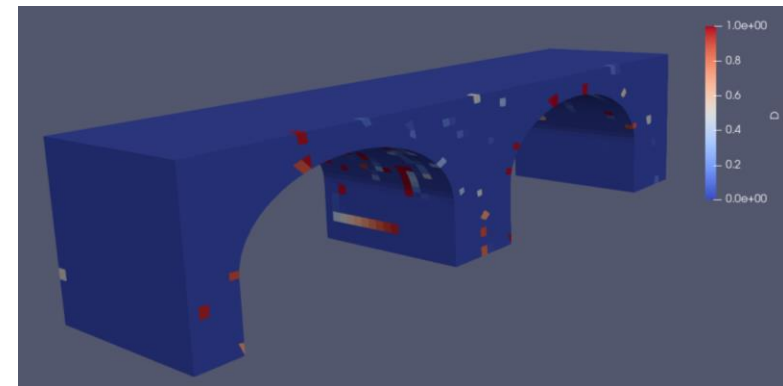
- Modèles de Mazars et de RICBET



Analyse temporelle non linéaire

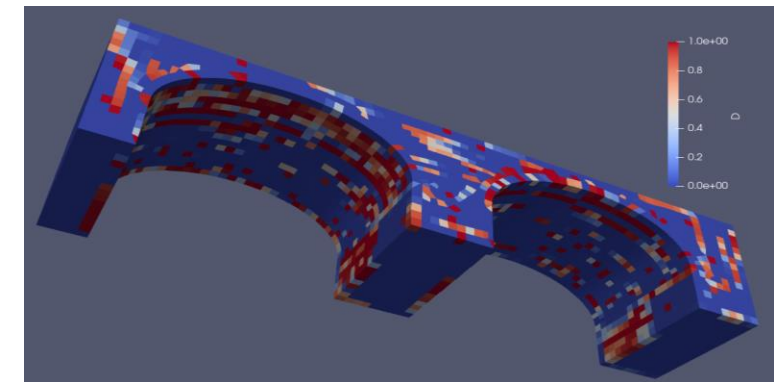
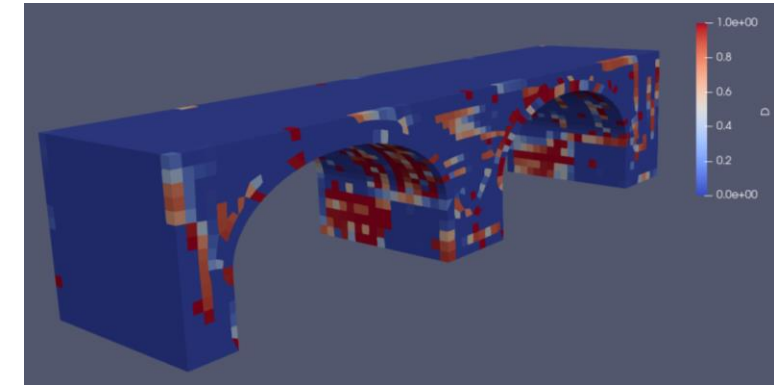
Mazars

Richard & Ragueneau



Dissipation plus importante pour Richard & Ragueneau
→ endommagement plus faible

- Mazars – signal amplifié $\times 2$



Possibilité localisation et suivi dommage

Conclusions et perspectives



- **Conclusions**

- Développement de stratégies pour évaluer des courbes de fragilité à partir de calculs élastiques et de calculs non linéaires sur base modale
- Des calculs non-linéaires temporels peuvent être effectués à l'aide de modèles plus ou moins complexes pour analyser plus en détail les zones endommagées et les mécanismes de défaillance associés.

- **Perspectives**

- Étude du développement des non linéarités et dissipation en fonction du choix du modèle de comportement matériau non-linéaire
- Prise en compte d'un état initial et d'aléa combiné sur la réponse sismique et la fragilité



- [1] Département de l'Ain. « Le viaduc de Cize-Bolozon ». <https://patrimoines.ain.fr/n/le-viaduc-de-cize-bolozon/n:1196>
- [2] BCSF RENASS, Le Bureau Central Sismologique Français. « La sismicité instrumentale de la France métropolitaine sur la période 1962-2020 ». <https://www.franceseisme.fr/sismicite.html>
- [3] Hokelekli, E., & Yilmaz, B. N. (2019). *Effect of Cohesive Contact of Backfill with Arch and Spandrel Walls of a Historical Masonry Arch Bridge on Seismic*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 926-937.
- [4] Giry, C. (2024). *Évaluation de la vulnérabilité sismique de ponts en maçonnerie*. Rapport Projet Dolmen.
- [5] Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., Şenyurt, M., Azari Sisi, A., Ay, B. Ö., Traversa, P., ... & Godey, S. (2014). *Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE)*. Bulletin of earthquake engineering, 12, 311-339.
- [6] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2020). *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*.
- [7] Mazars, J. (1986). *A description of micro-and macroscale damage of concrete structures*. Engineering fracture mechanics, 25(5-6), 729-737.
- [8] Stocchi, A., Giry, C., Capdevielle, S., Zentner, I., Nayman, E., & Ragueneau, F. (2021). *A simplified non-linear modelling strategy to generate fragility curves for old masonry buildings*. Computers & Structures, 254, 106579.
- [9] Richard, B. & Ragueneau, F. (2013). *Continuum Damage Mechanics Based Model for Quasi Brittle Materials Subjected to Cyclic Loadings: Formulation, Numerical Implementation and Applications*. In: Engineering Fracture Mechanics 98, pp. 383–406. issn: 00137944. doi: 10 . 1016 / j . engfracmech.2012.11.013.



Merci de votre attention

Contact :

clotilde.chambreuil@ens-paris-saclay.fr

cedric.giry@epf.fr

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