



JOURNEES NATIONALES
MAÇONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



Méthode d'homogénéisation numérique du matériau maçonnerie appliquée au diagnostic post-incendie de Notre-Dame de Paris

Guenser, C., Morenon, P., Domede, N., Corn, S., Salgues, M.



Contexte

Incendie du
15/04/2019



[Boutrina, 2020]

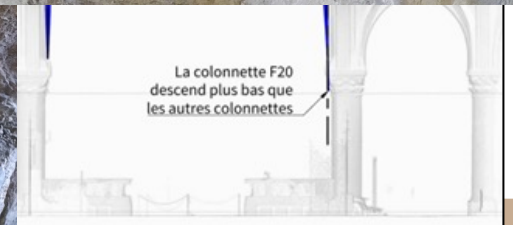


Outil de diagnostic structurel des
ouvrages maçonnés soumis aux
hautes températures



BRIGADE DE SAPEURS-POMPIERS DE PARIS

La colonnette F20
descend plus bas que
les autres colonnettes

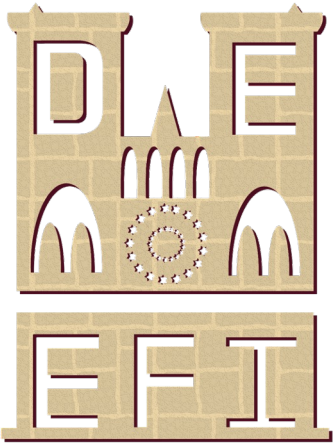


Images : ministère de l'Intérieur



Modèle hybride détaillé

[Ferrante et al., 2022]



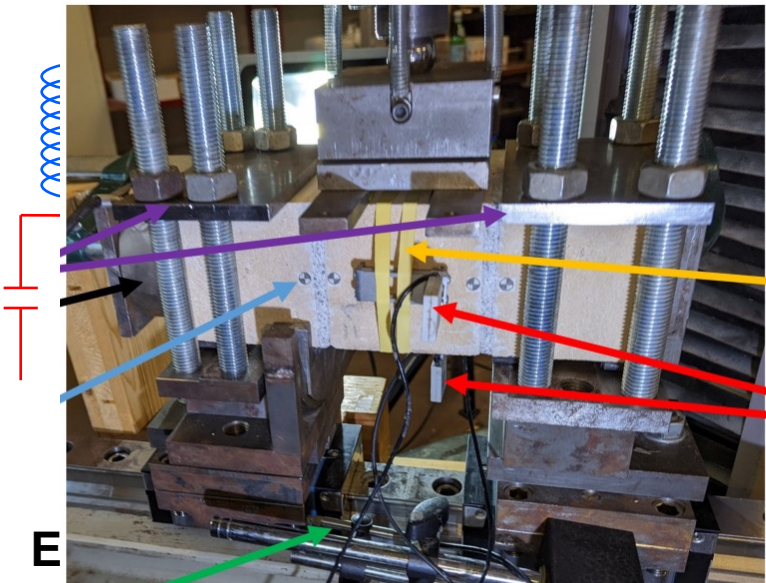
Caractérisation thermo-mécanique des matériaux

[Guenser, 2024]



Caractérisation mécanique de l'endosse

[Boukham, 2025]



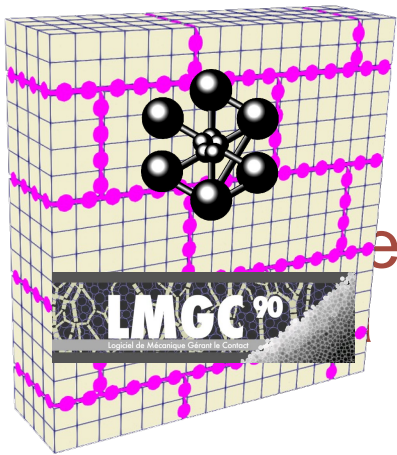
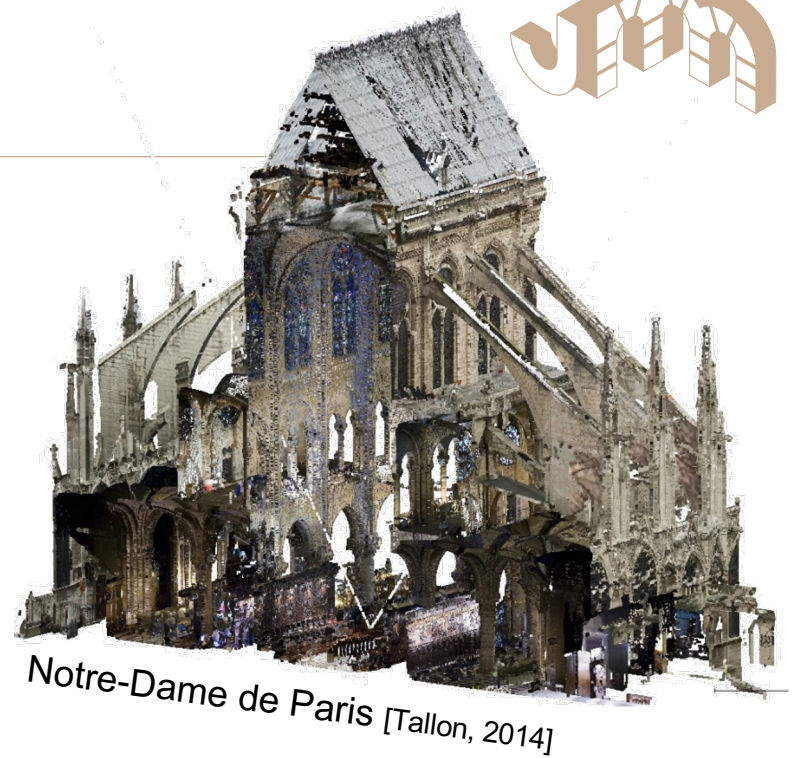
tionnal
esive
e
lel



Problématique



- ✓ Modélisation thermo-mécanique **avancée**, approche **détaillée** de la maçonnerie
- ✗ **Complexe**, **multi-matériaux**, de **petite échelle**

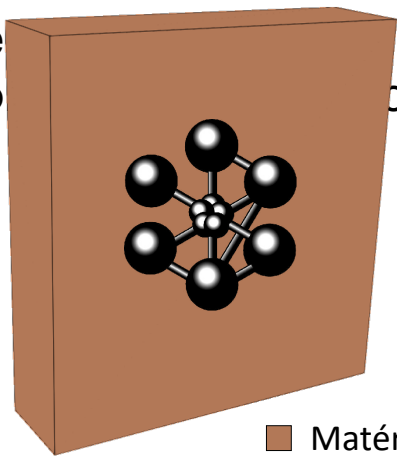


- Bloc (ENDO3D)
- Joint (FCZM)

Homogénéisation
Comment procéder à une simulation numérique à l'échelle de l'ouvrage ?



- Géométrie
- Non linéarité



complexe
points de mortier

- Matériau homogène (ENDO3D)

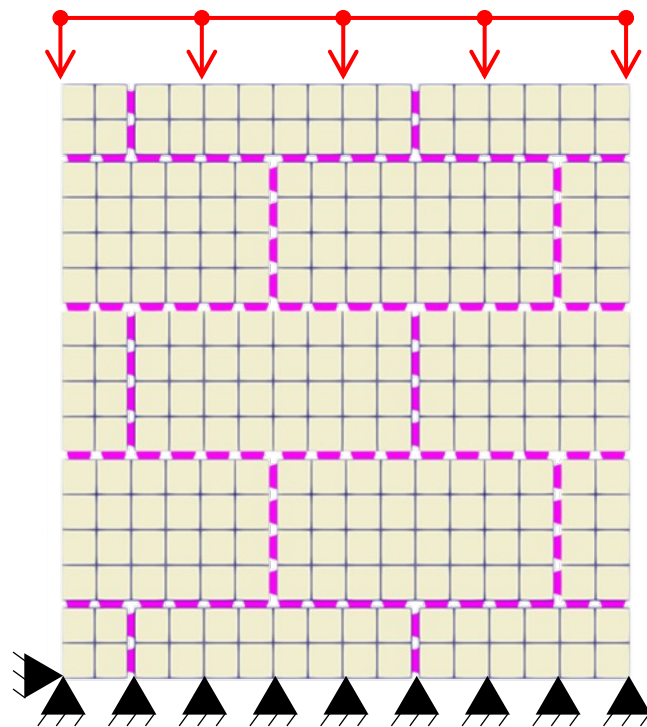
Méthode d'homogénéisation



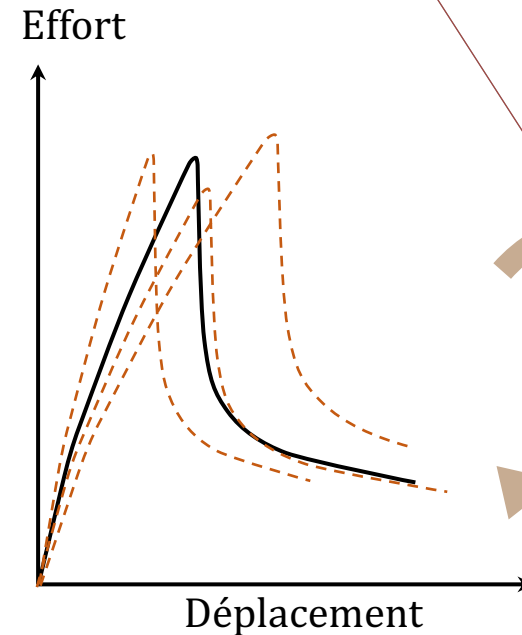
VER Multi-matériaux

Conditions limites

Sollicitations mécaniques

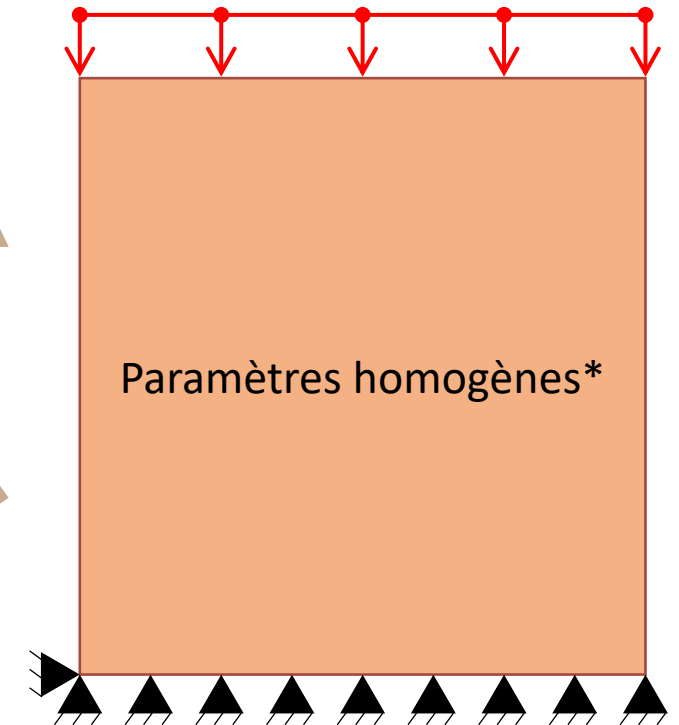


Calage des paramètres
homogènes par analyse inverse



VER Homogène

Paramètres homogènes*



*d'élasticité, d'endommagement, thermiques

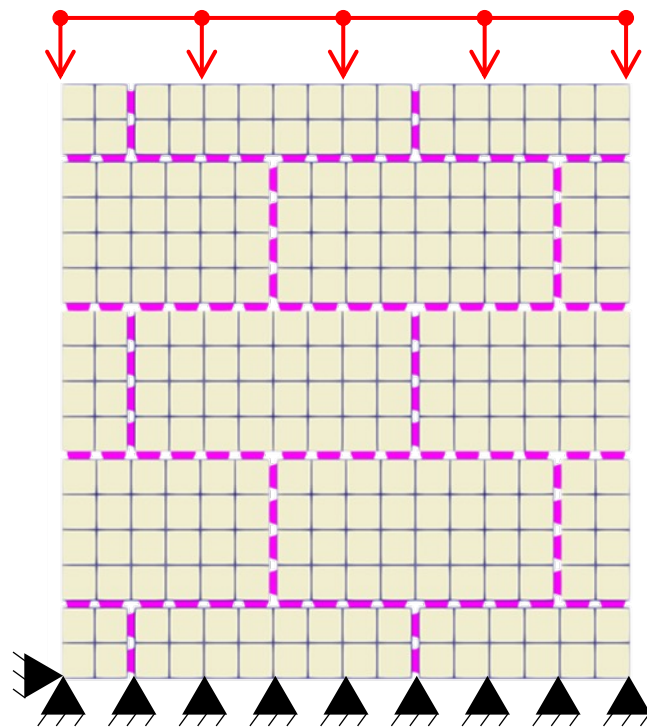
Méthode d'homogénéisation



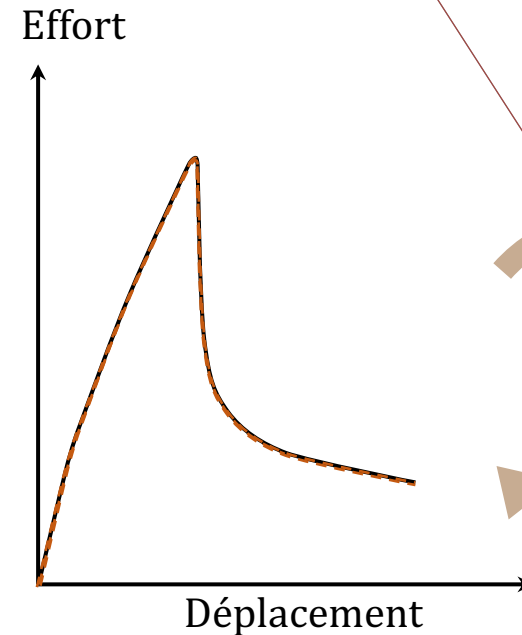
VER Multi-matériaux

Conditions limites

Sollicitations mécaniques

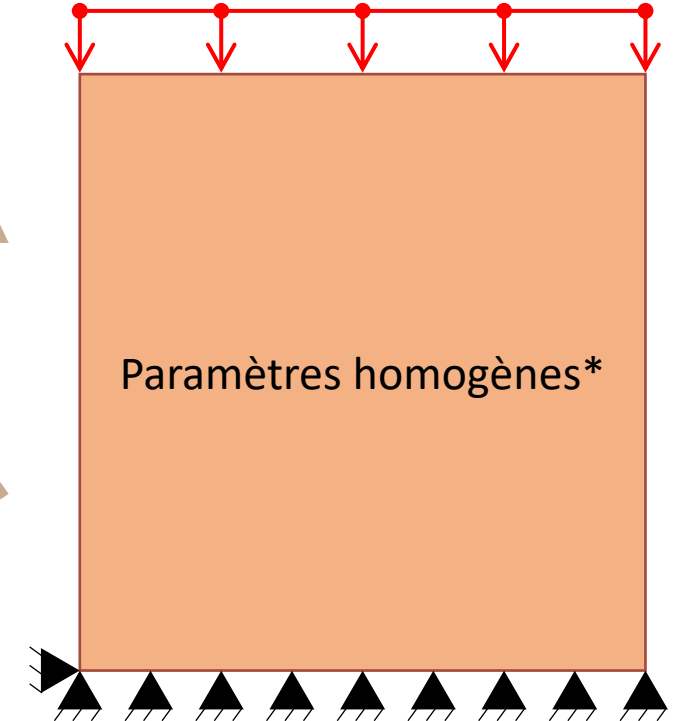


Calage des paramètres
homogènes par analyse inverse



VER Homogène

Paramètres homogènes*

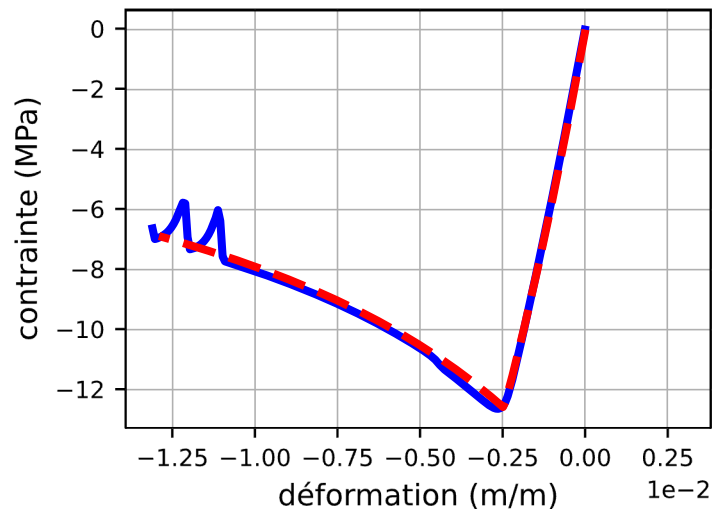
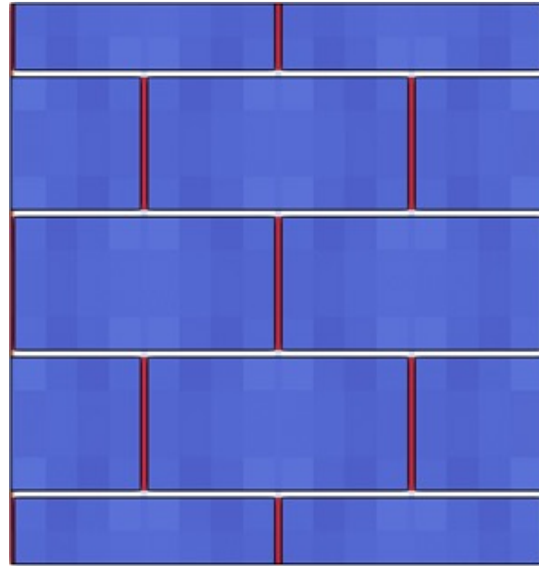
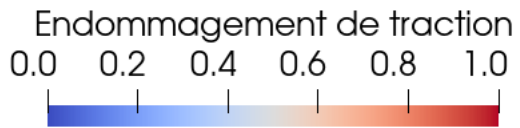


*d'élasticité, d'endommagement, thermiques

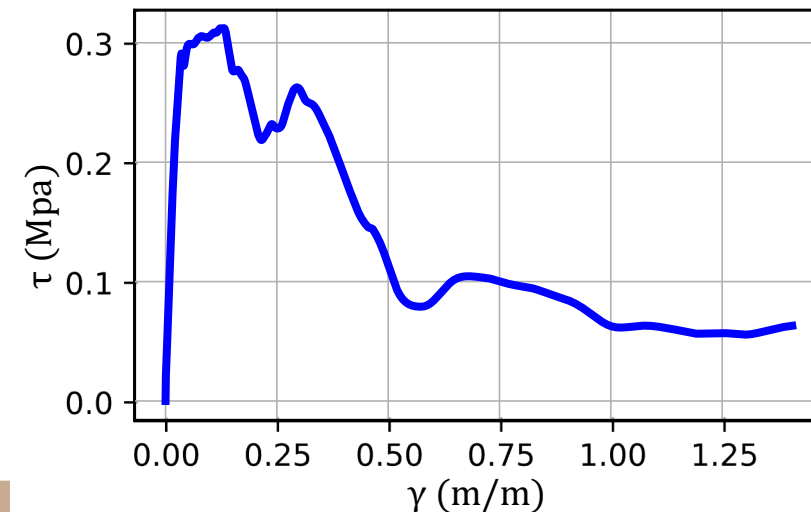
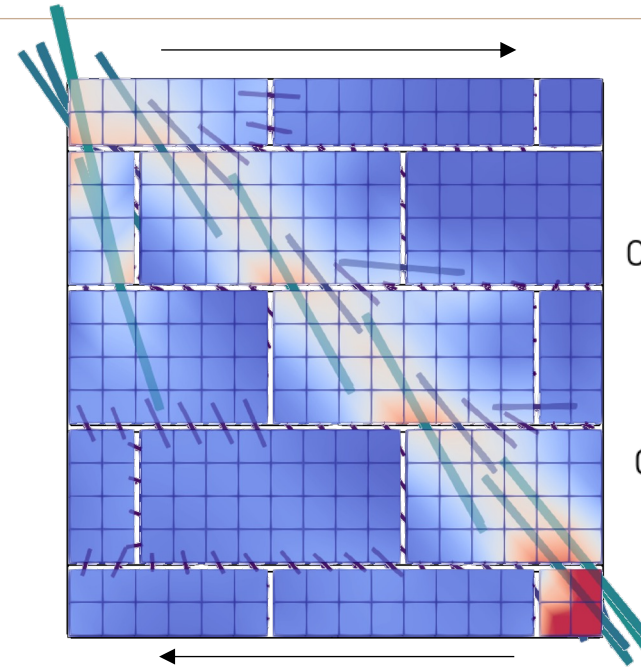
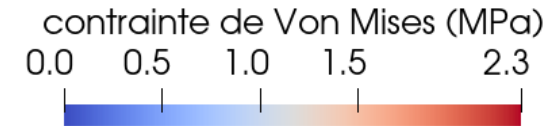
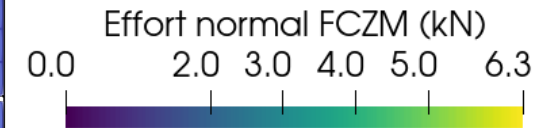
Résultats de l'homogénéisation



En compression



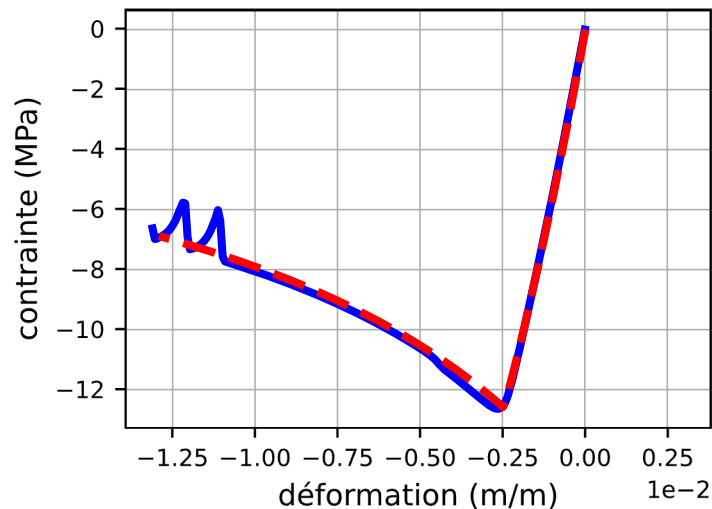
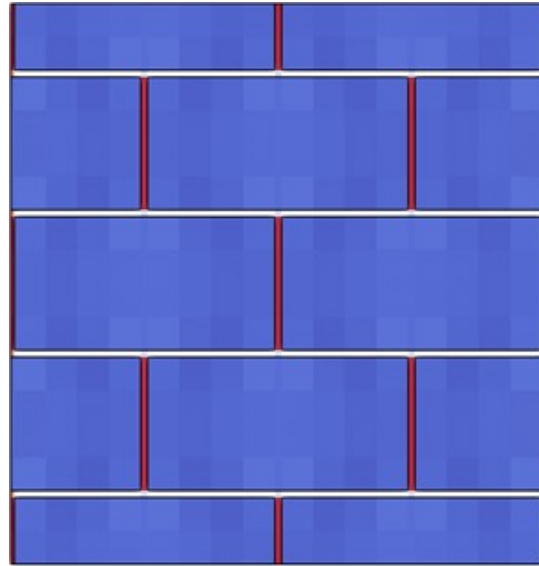
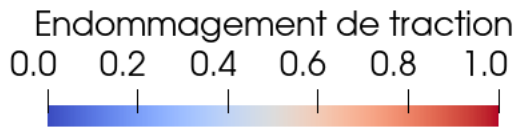
En cisaillement



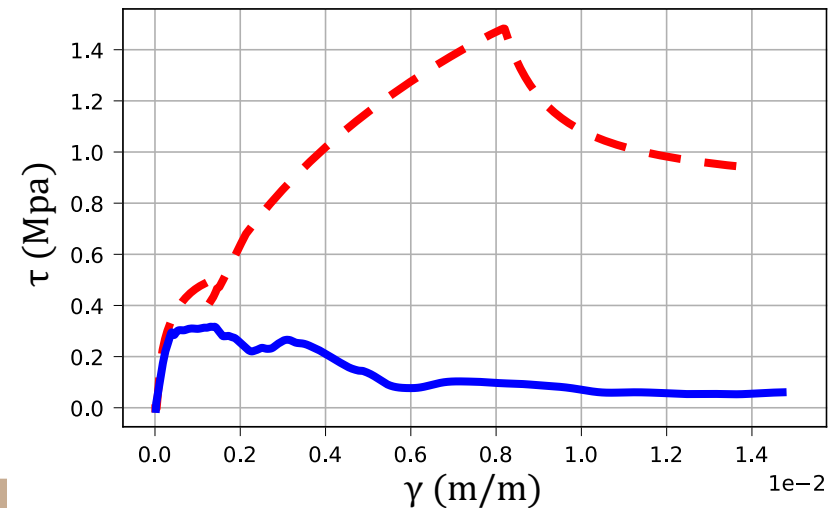
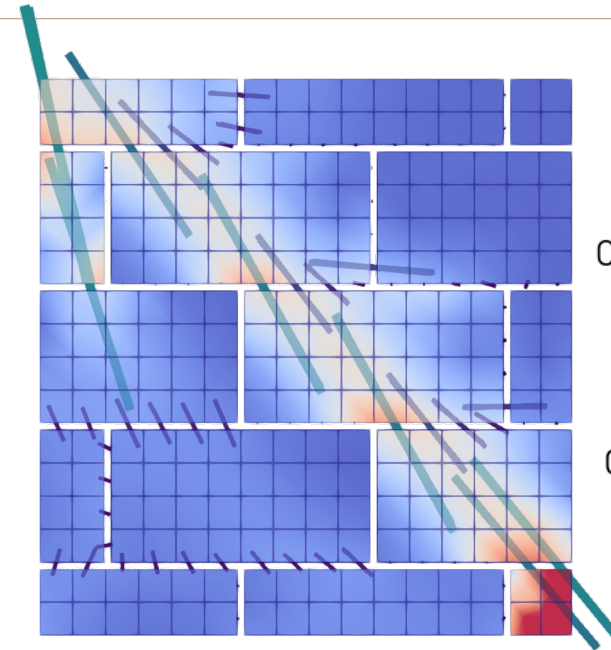
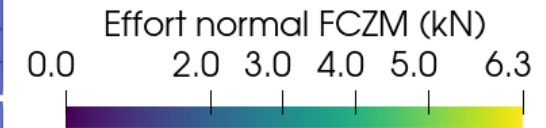
Résultats de l'homogénéisation



En compression



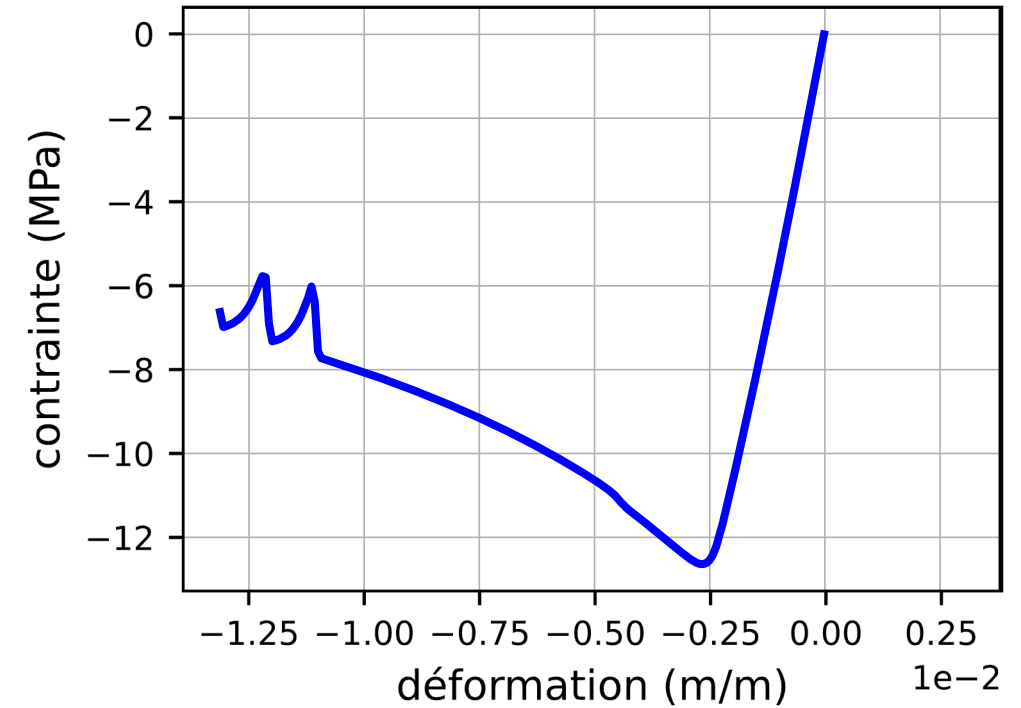
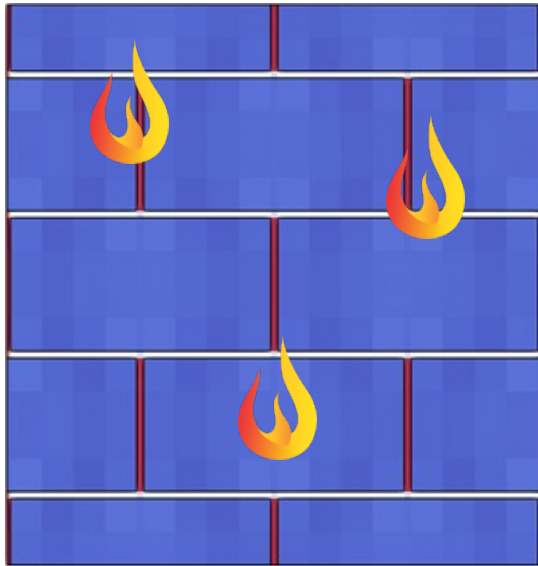
En cisaillement



Résultats de l'homogénéisation



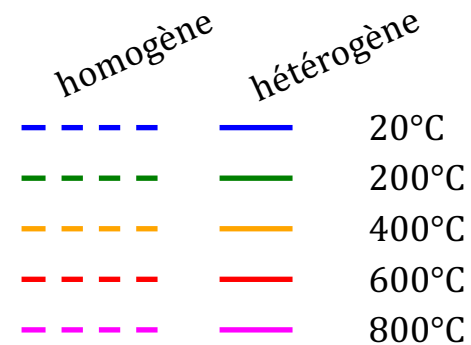
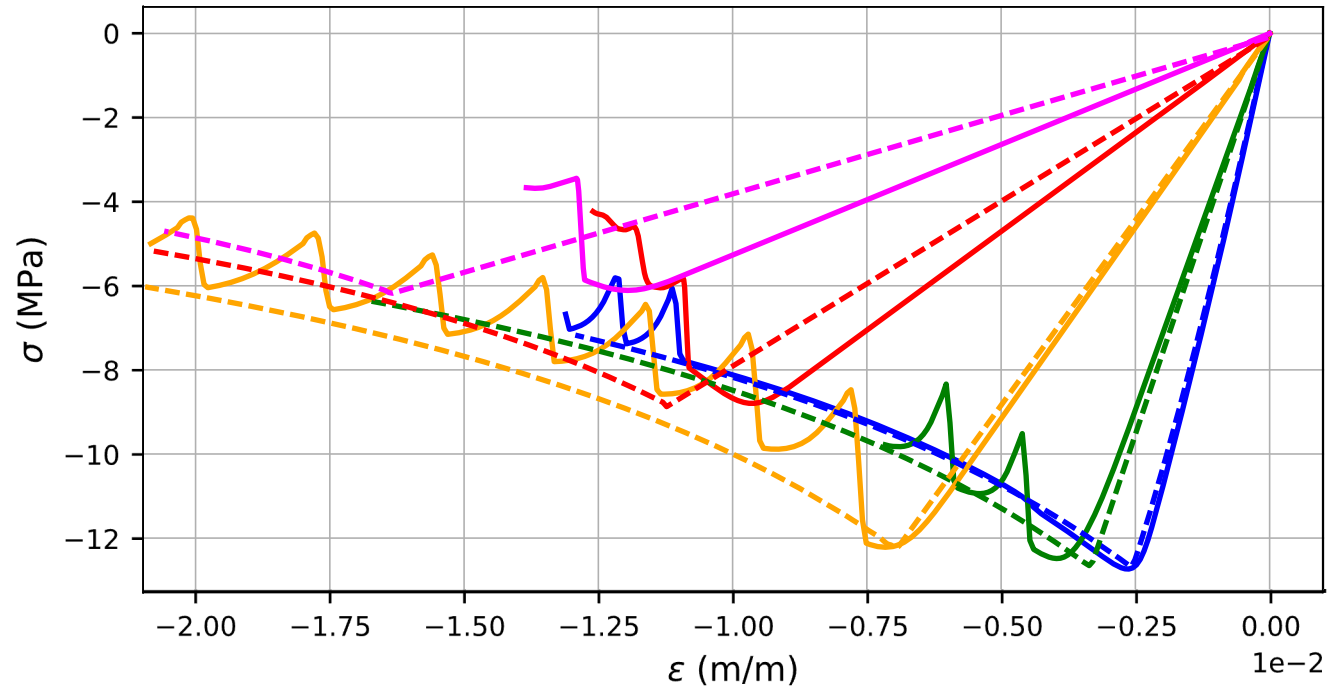
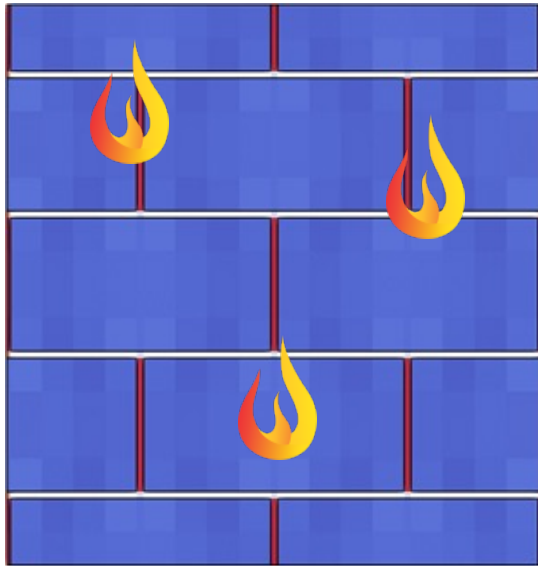
En température (cas de la compression)



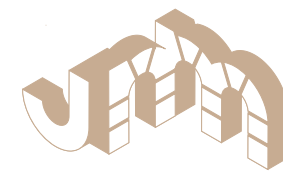
Résultats de l'homogénéisation



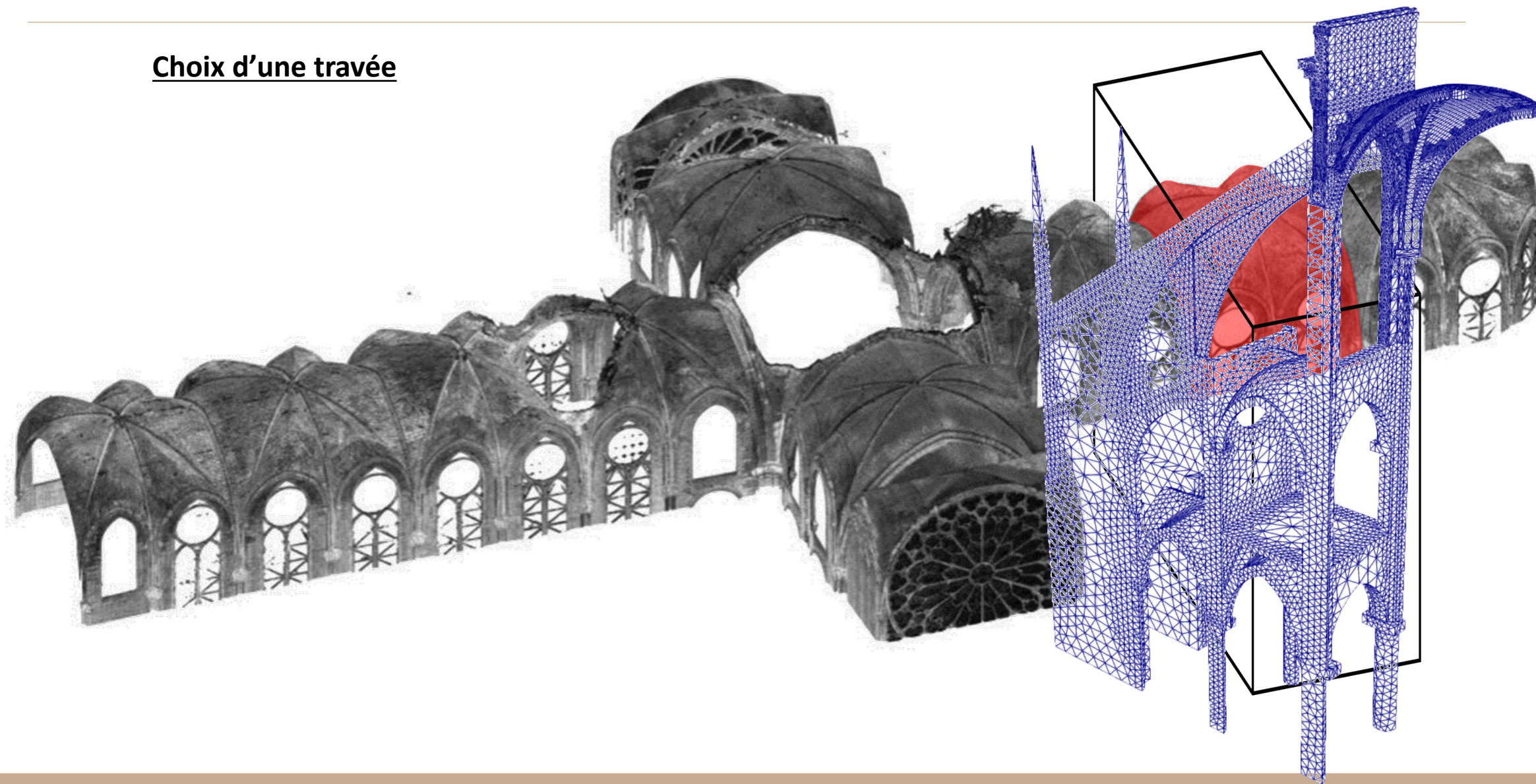
En température (cas de la compression)



Simulation à l'échelle de l'ouvrage



Choix d'une travée

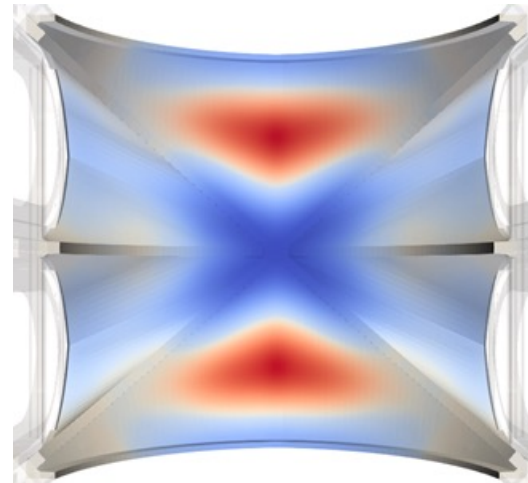
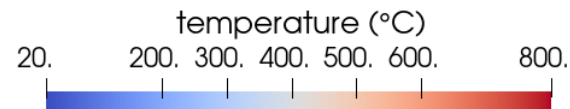
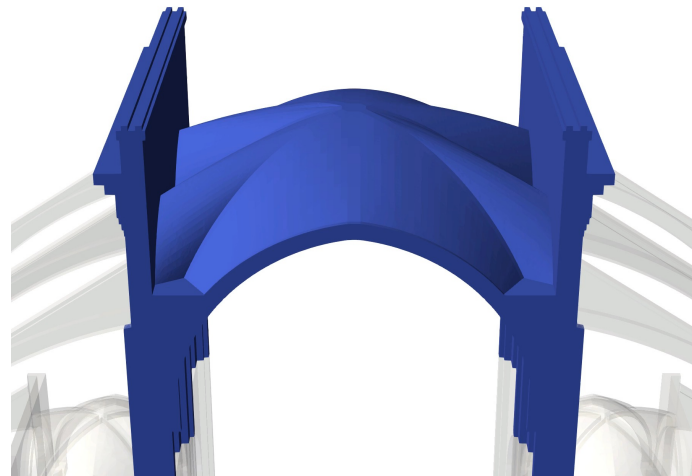


Simulation à l'échelle de l'ouvrage

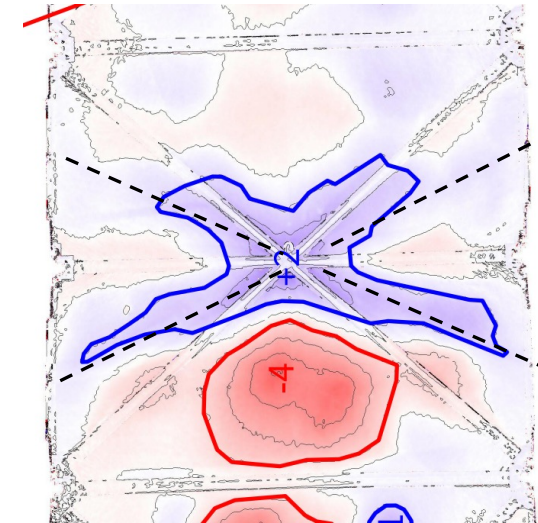


Comparaison des déplacements verticaux, avant et après incendie

numérique

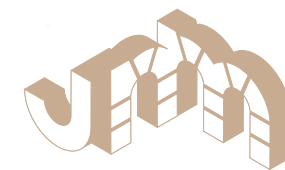


Mesures in-situ
[Bestrema, 2020]



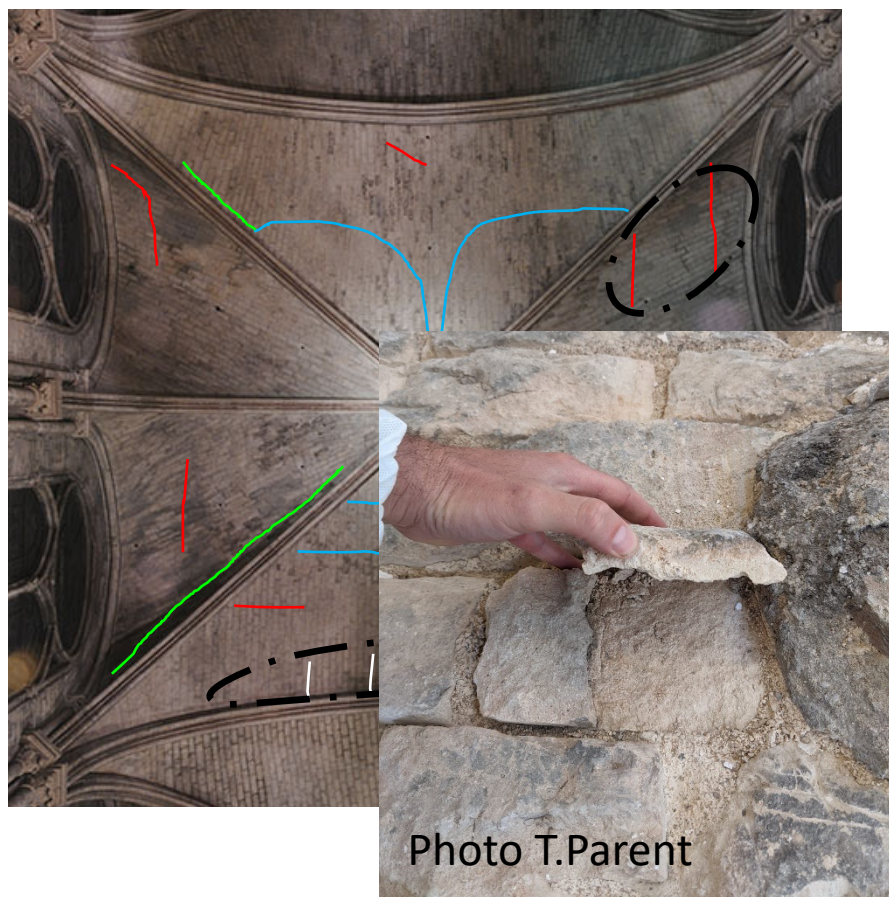
Vers le haut
Vers le bas
(cm)

Simulation à l'échelle de l'ouvrage

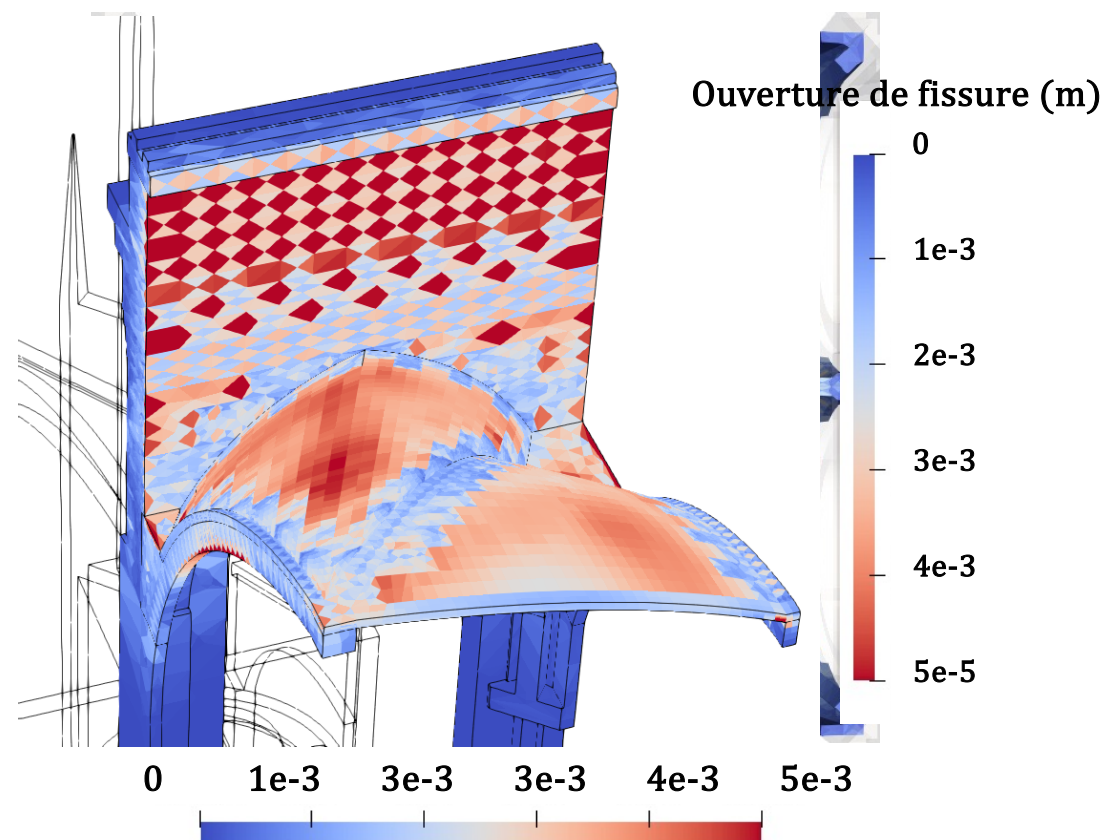


Comparaison des fissurations des voûtes hautes

Relevé de fissures



numérique

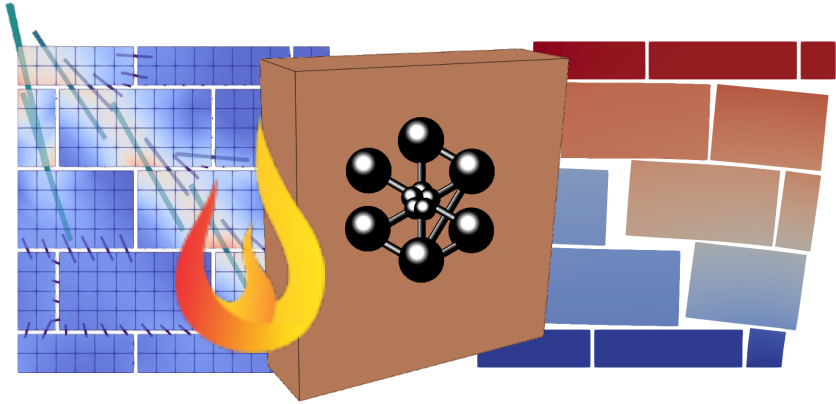


Conclusions



Une méthode numérique d'homogénéisation thermo-mécanique :

- Outil hybride **MEF/MED**
- Domaine **linéaire** et **non-linéaire**
- À **hautes températures**



- ☐ Vers un modèle EF plus adapté au **cisaillement**
- ☐ Homogénéisation en température avec un chauffage homogène
 - Introduire le **gradient thermique** dans l'homogénéisation



Merci de votre attention

Contact :

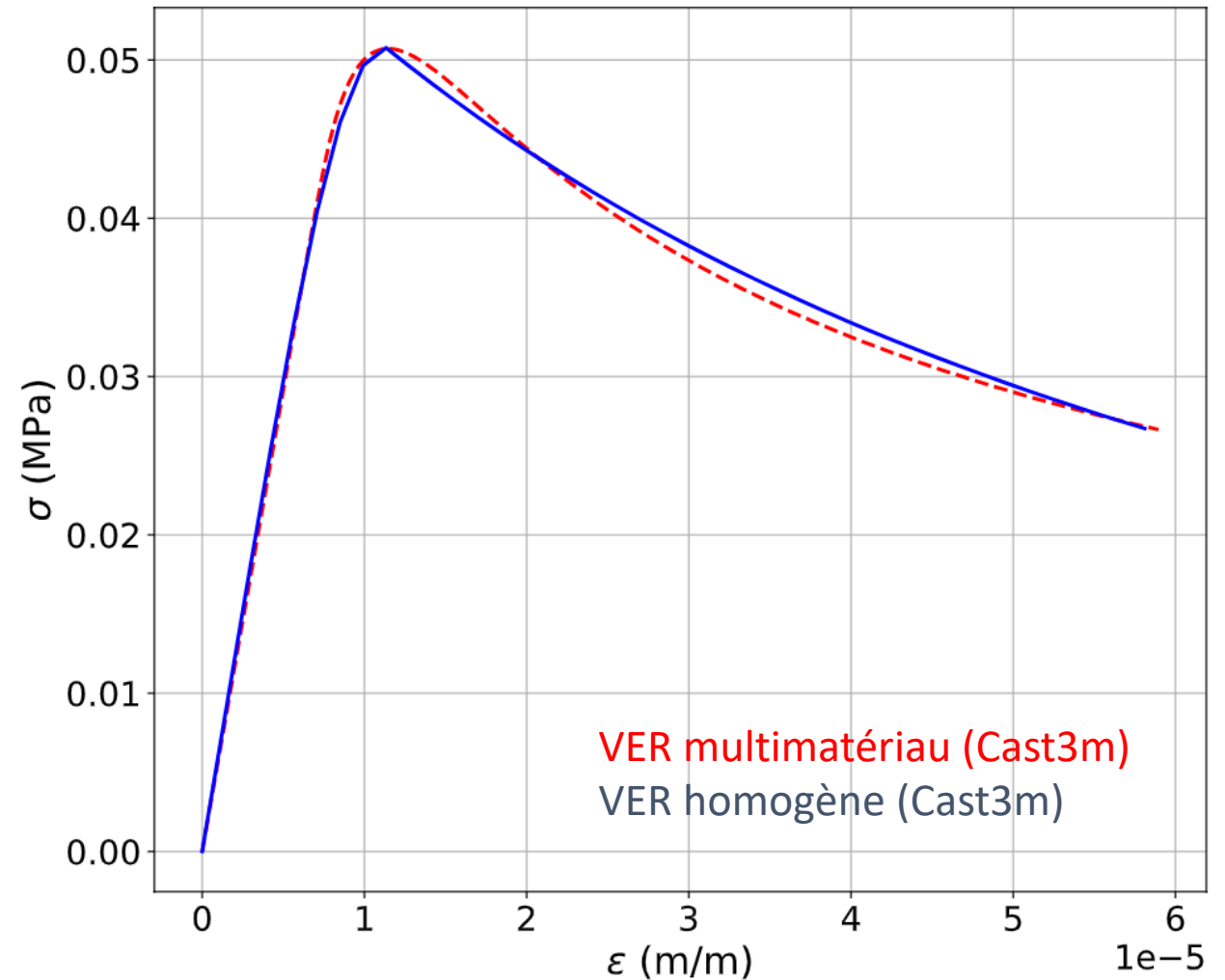
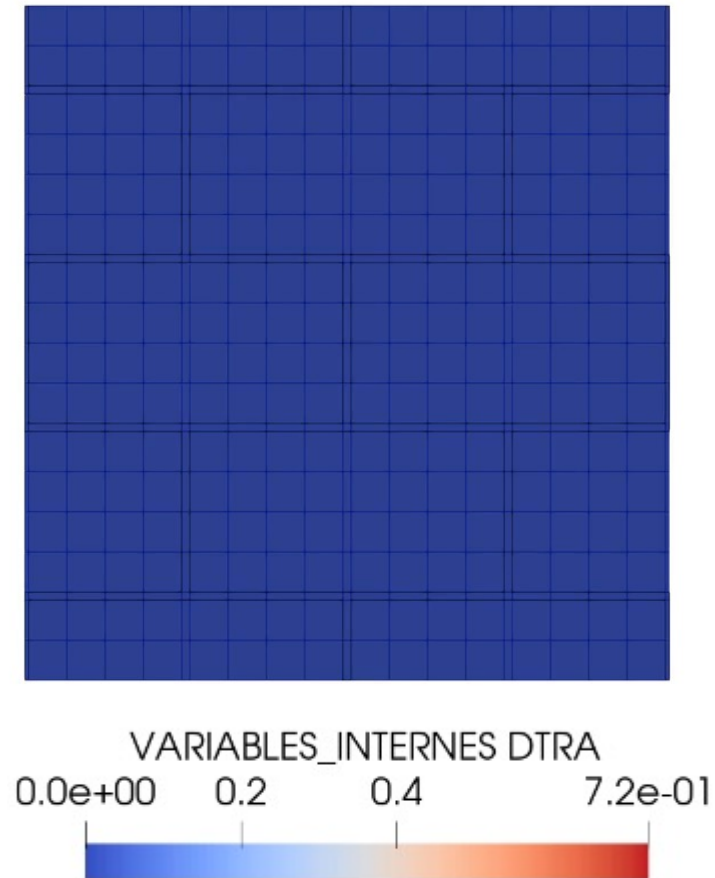
Colin GUENSER

colin.guenser@univ-amu.fr

Journées Nationales de la Maçonnerie

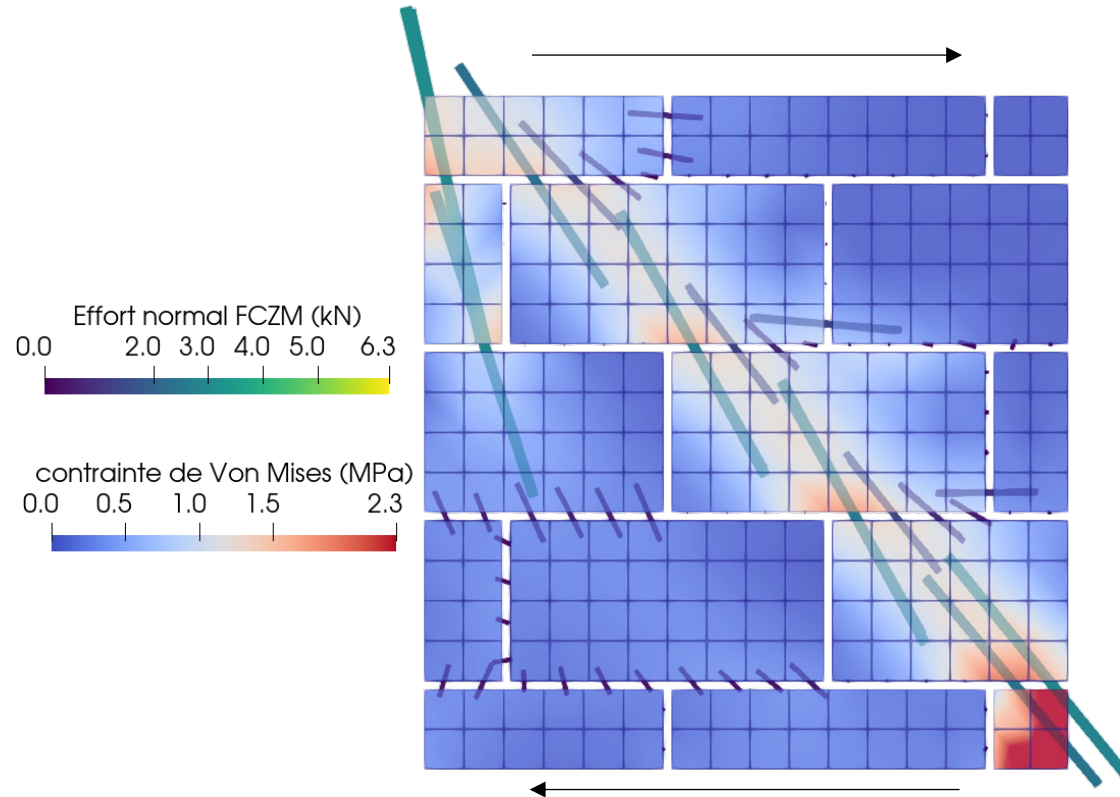
5ème édition | Bordeaux

12 et 13 juin 2025

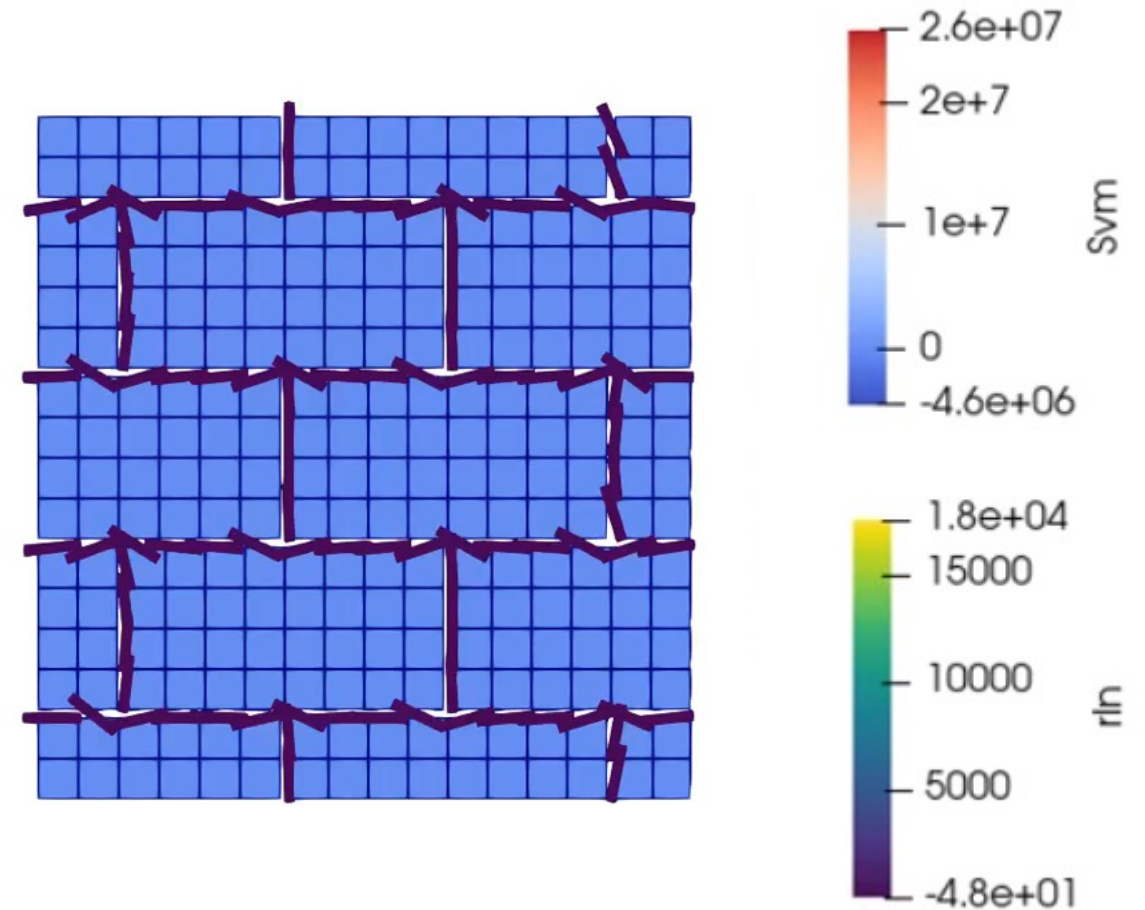




Type 1

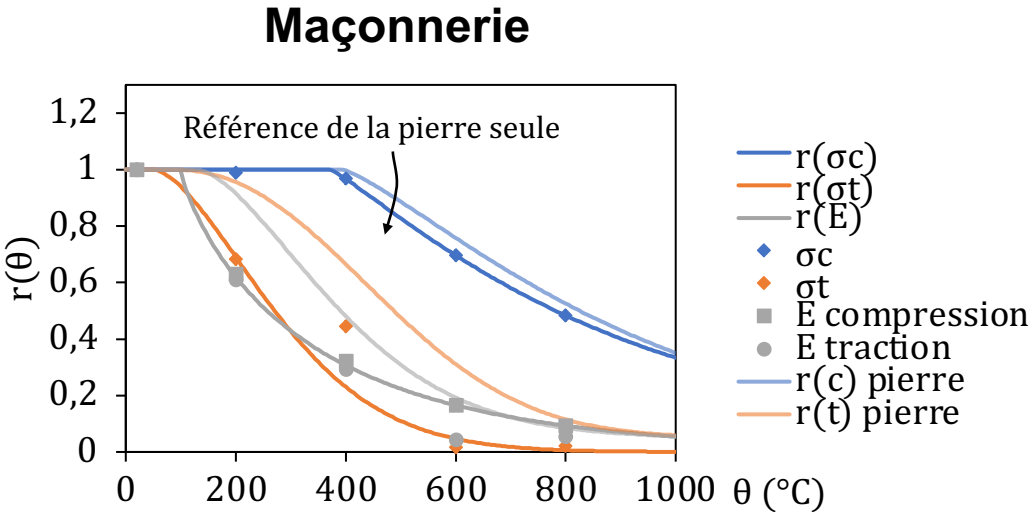
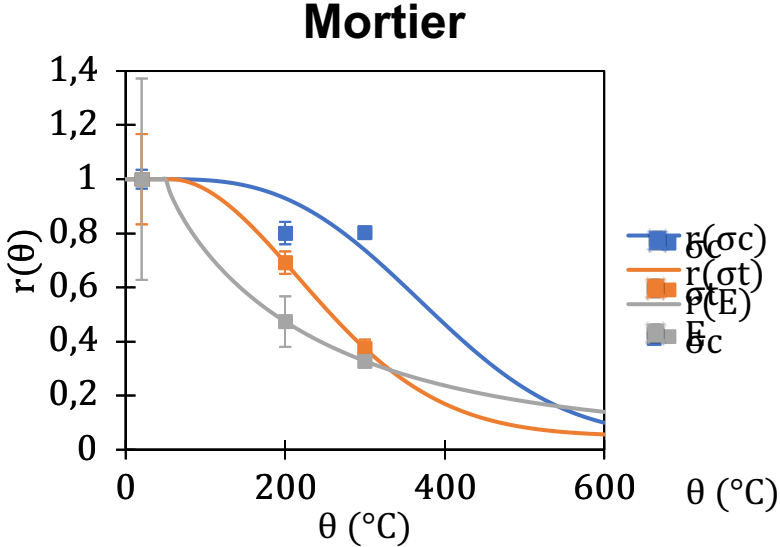
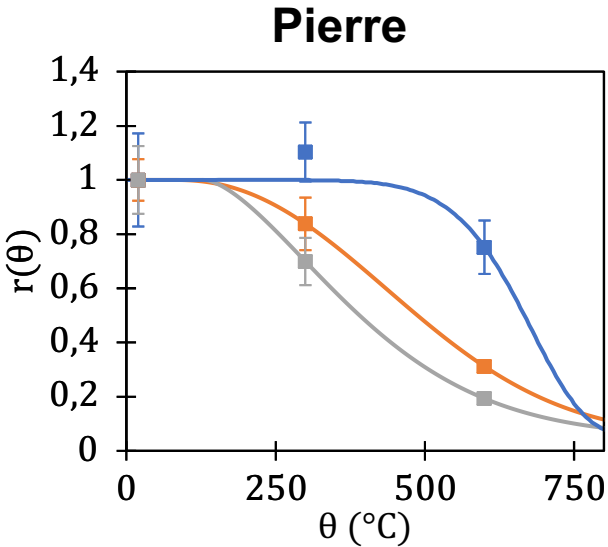


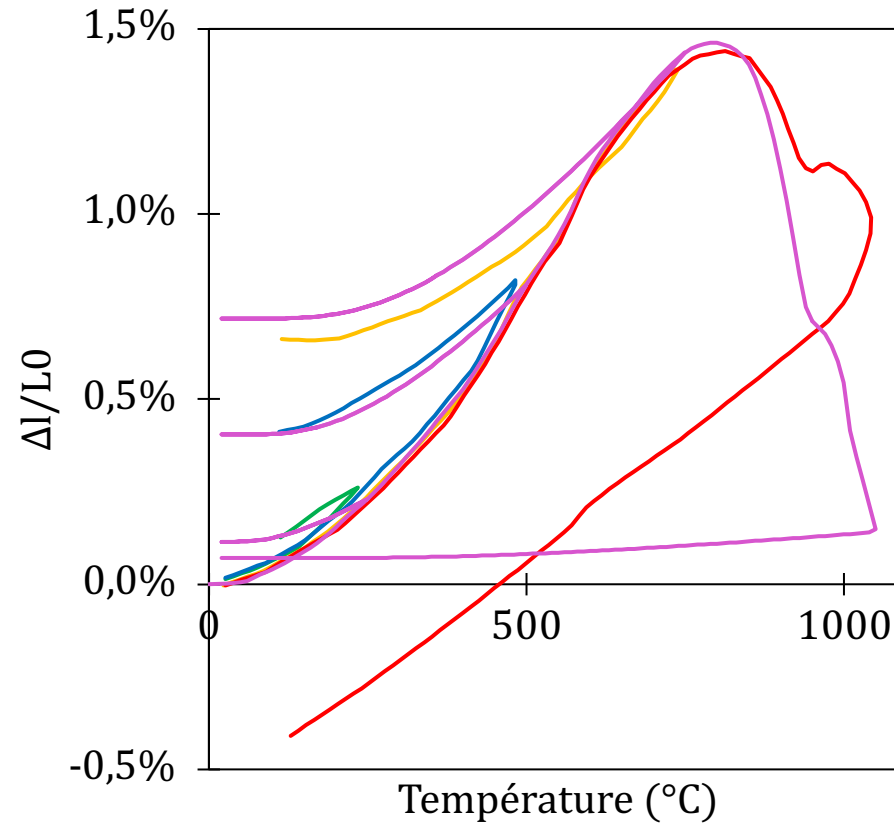
Type 2





Réducteurs thermiques ENDO3D	Températures caractéristiques	<i>TT0</i>
		<i>TT1</i>
	Coef. de non-linéarité	<i>MTT</i>
	Résidu final	<i>PTT</i>





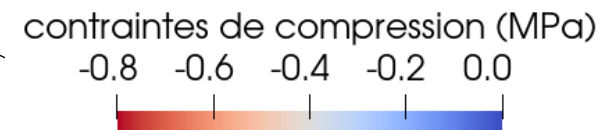
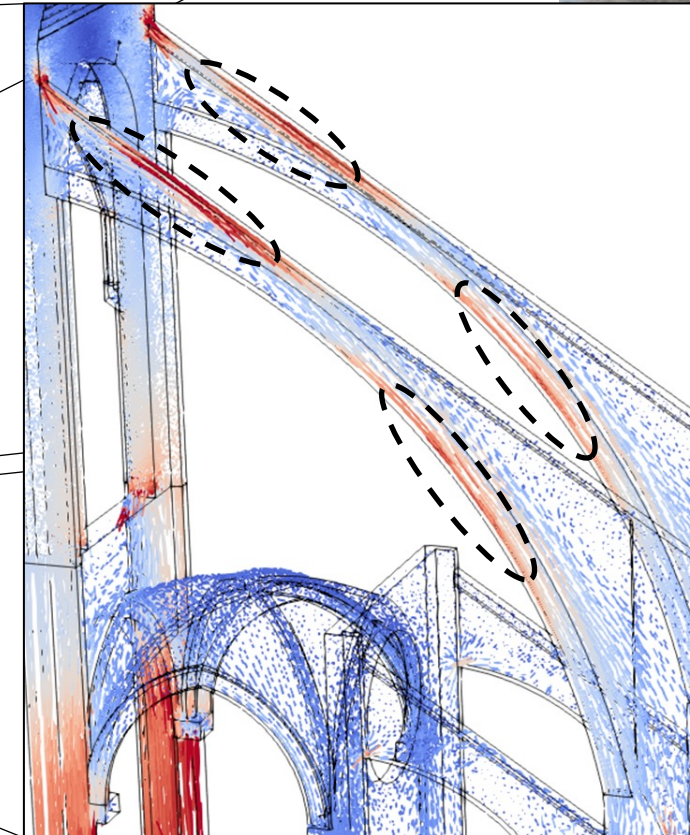
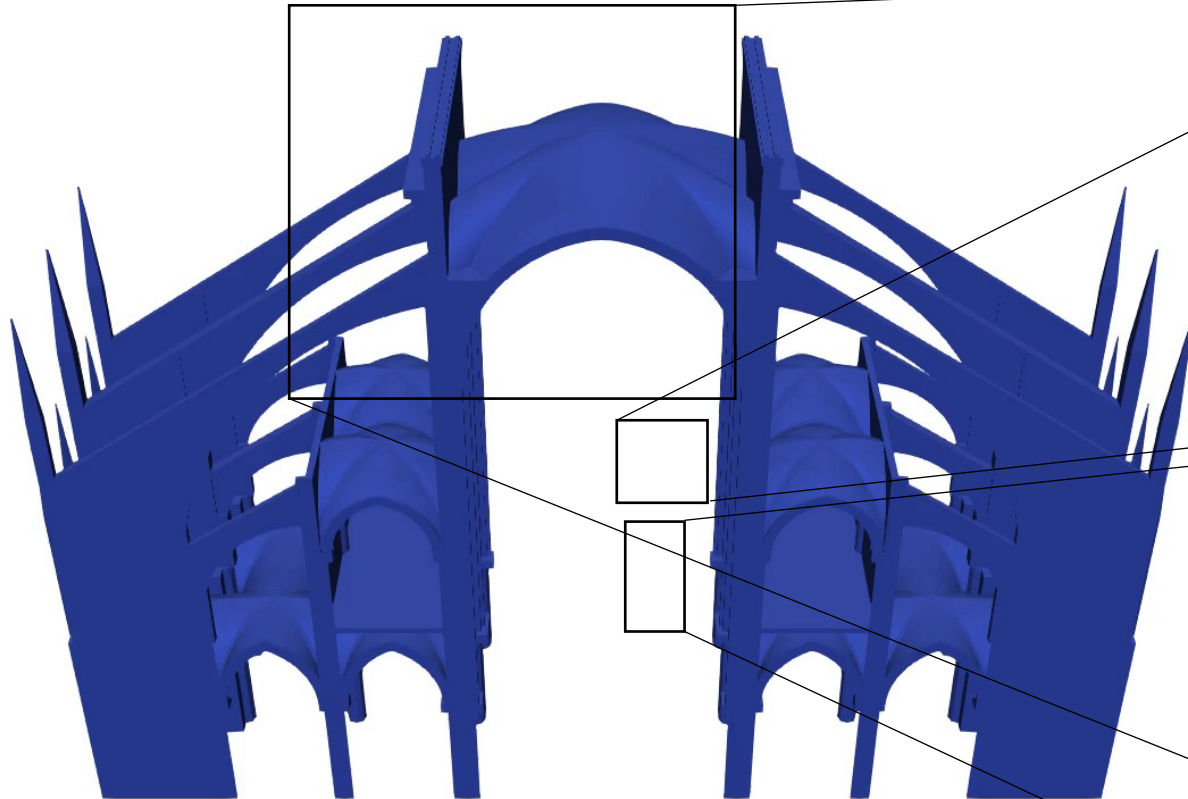
- Vigroux -cycle 250°C
- Vigroux -cycle 500°C
- Vigroux -cycle 750°C
- Vigroux -cycle 1050°C
- Modèle

$$ALFI = \begin{cases} ALF2 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{t_{\max}}{\theta_+} - 1\right)} + \frac{t_{\max}}{\theta_+} \right], & \text{si } \theta_- < t_{\max} \\ ALIN, & \text{si } \theta_- \geq t_{\max} \end{cases}$$

Annexes



État d'endommagement pré-incendie



Ligne de
poussée
passive



D'après [Heyman, 1995]