



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

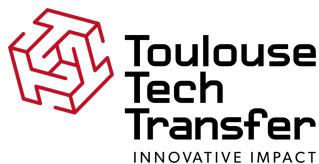
12 et 13 Juin 2025



Cathédrale Notre-Dame de Paris : Analyse et modélisation des effets de l'incendie sur la maçonnerie

*Chantier scientifique CNRS – Ministère de la culture
Notre-Dame*

**MORENON PIERRE, MINDEGUIA J.-C., MOREL S.,
PARENT T., NOUGAYREDE P., TAFOREL P., DUBOIS F., COLAS A.-S., GARNIER D.**





- **Au lendemain de l'incendie** : besoin d'un **diagnostic structurel** de l'ouvrage pour apporter un éclairage complémentaire aux ACMH
- **Objectif de ce travail** : **comprendre** les effets de l'incendie sur la structure pour le diagnostic et l'étude des solutions de renforcement
- **Méthodologie mise en place**
 - 1) Rassembler les **données existantes** et **pertinentes** pour le diagnostic structurel
 - 2) Réaliser des **investigations complémentaires** in situ et en laboratoire pour nourrir un modèle numérique
 - 3) Réalisation des **calculs numériques** puis comparaison des sorties du modèle avec les observations et les mesures pertinentes

- Analyse des données post-incendie : ce dont on dispose / ce que l'on observe

Parties de voûtes
effondrées



Photo : LCPP

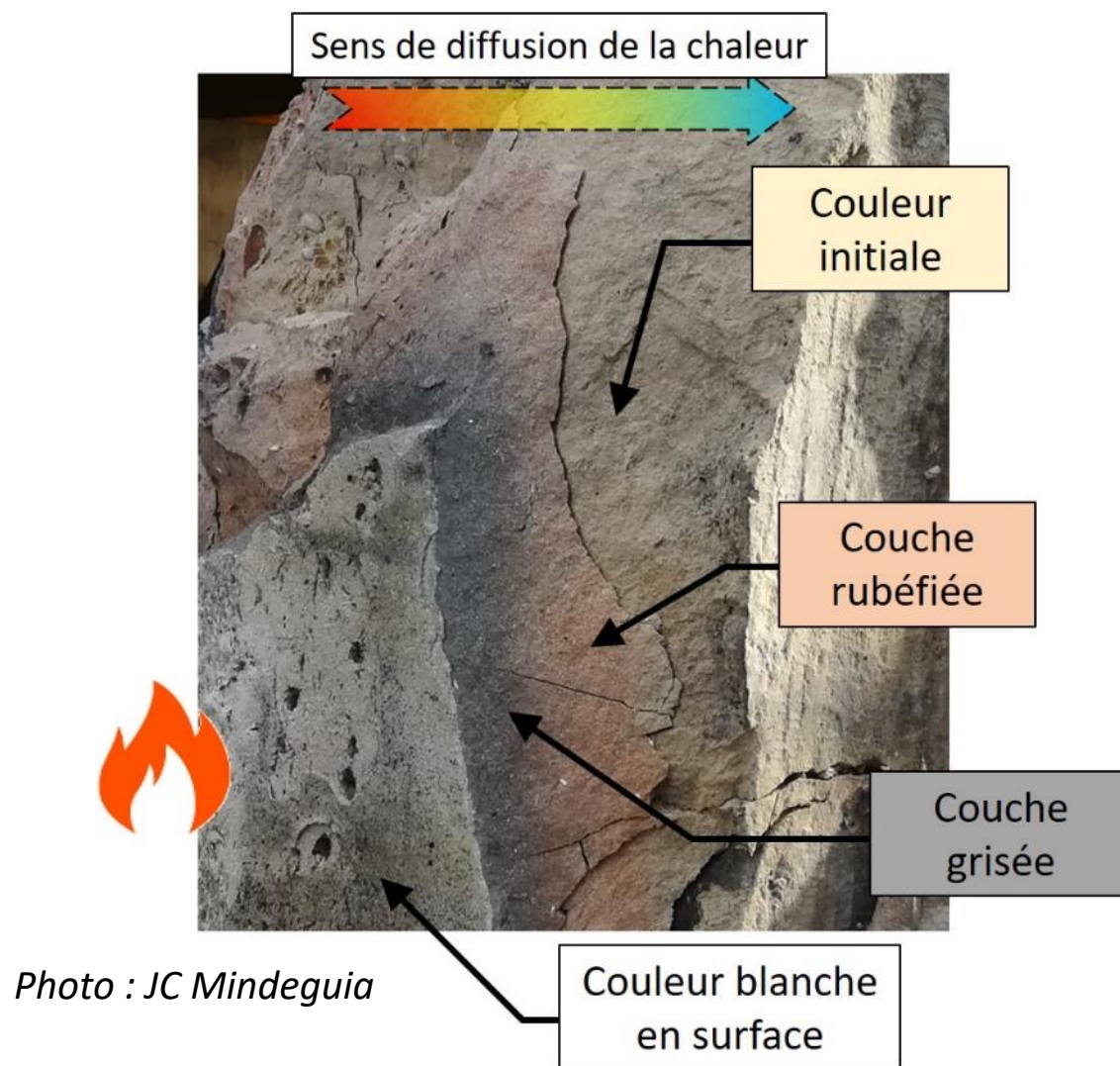


Photo : JC Mindeguia

➤ Analyse des données post-incendie : ce dont on dispose / ce que l'on observe



➤ Analyse des données post-incendie : ce dont on dispose / ce que l'on observe



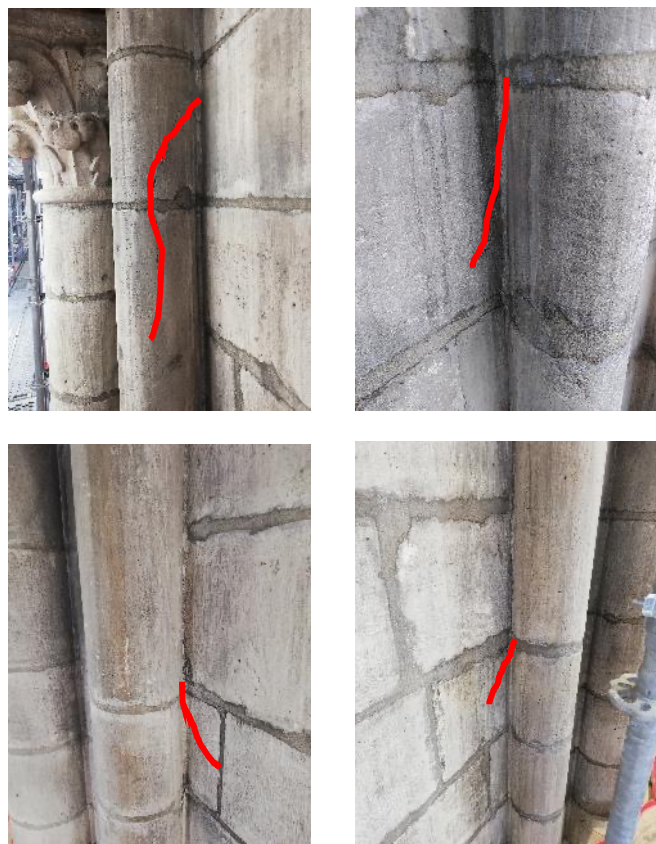
Carotte pignon Sud, LRMH, BPE, Mars 2021



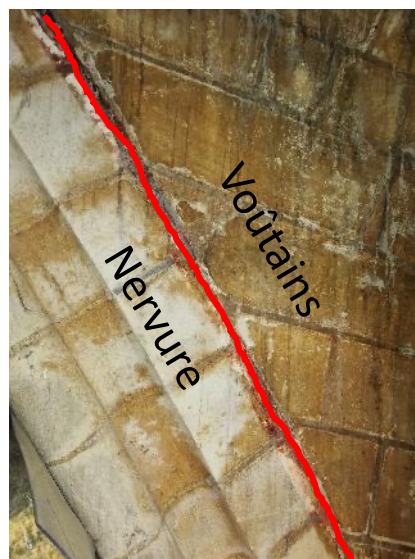
Carotte voûte Chœur, JC Mindeguia

➤ Analyse des données post-incendie : ce dont on dispose / ce que l'on observe

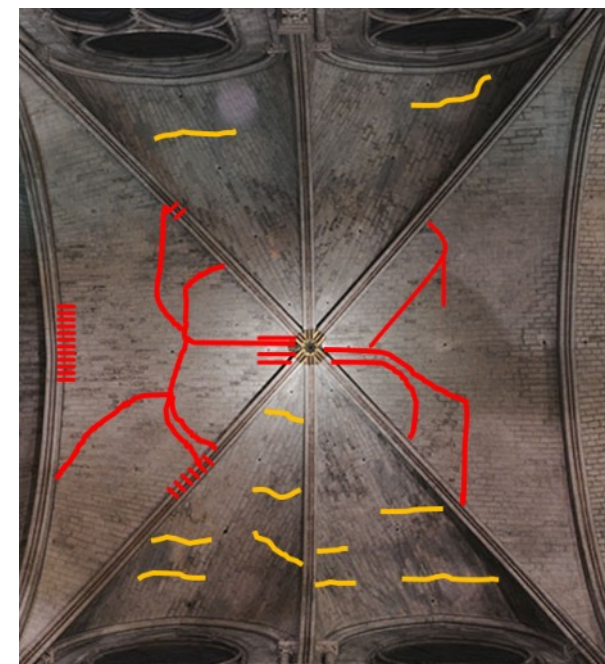
Fissures Zone colonnettes



Fissures Nervure / Voûtains



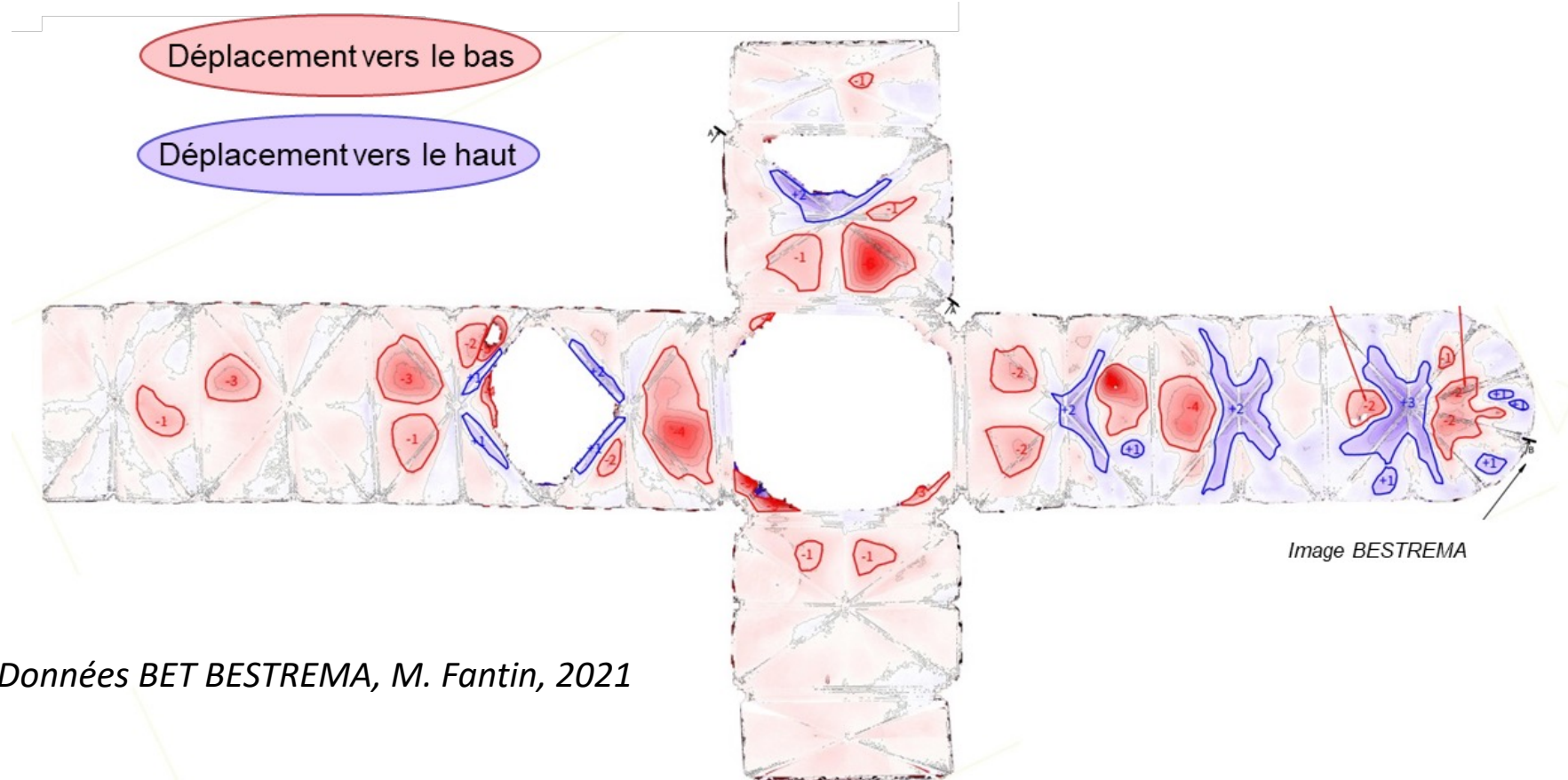
Fissures traversantes Voûtains



Relevé in situ réalisé par le
GT Structures sur la voûte
CH15-18 du chœur
avril 2022

- Analyse des données post-incendie : ce dont on dispose / ce que l'on observe

Déplacements verticaux (cm) voûtes avant/après incendie



Données BET BESTREMA, M. Fantin, 2021



➤ Que cherche-t-on à comprendre ?

- Comment l'incendie a-t-il sollicité le contrebutement ?
- Comment expliquer la présence de tous les types de fissures observées ?
- Le cas échéant, est-ce que cet endommagement est préjudiciable à la stabilité des voutains ?

...normes...
...règles de calcul...

Notre stratégie

Construction et validation d'un
modèle de calcul
thermomécanique avancé

➤ Sur quelles données doit se construire le modèle proposé ?

Méthodologie construite autour d'échanges entre le GT « Structures » et la MOE

- Géométrie 3D
- Propriétés matériaux
- Lois de comportement matériaux
- Chargement thermique

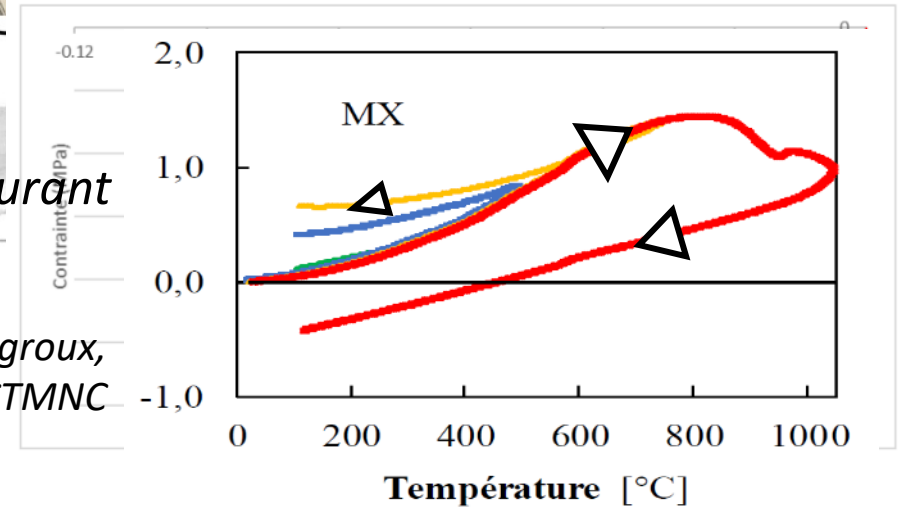
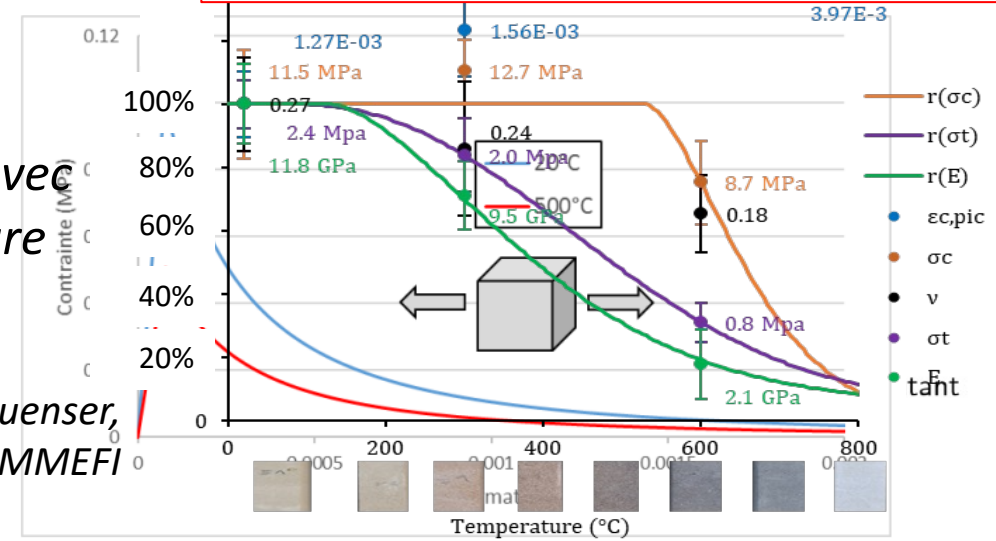
Dégradation
irréversible avec
la température

Travaux thèse Colin Guenser,
LMDC Toulouse, ANR DEMMEFI

Dilatation
thermique durant
l'incendie

Travaux thèse Martin Vigroux,
Cergy / CTMNC

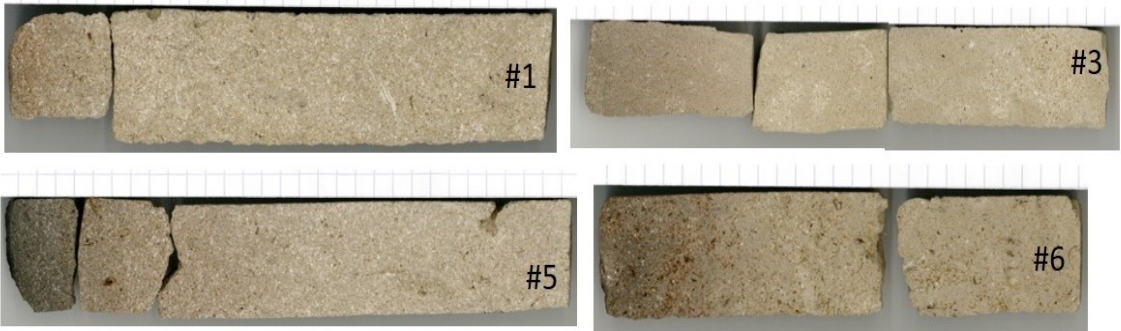
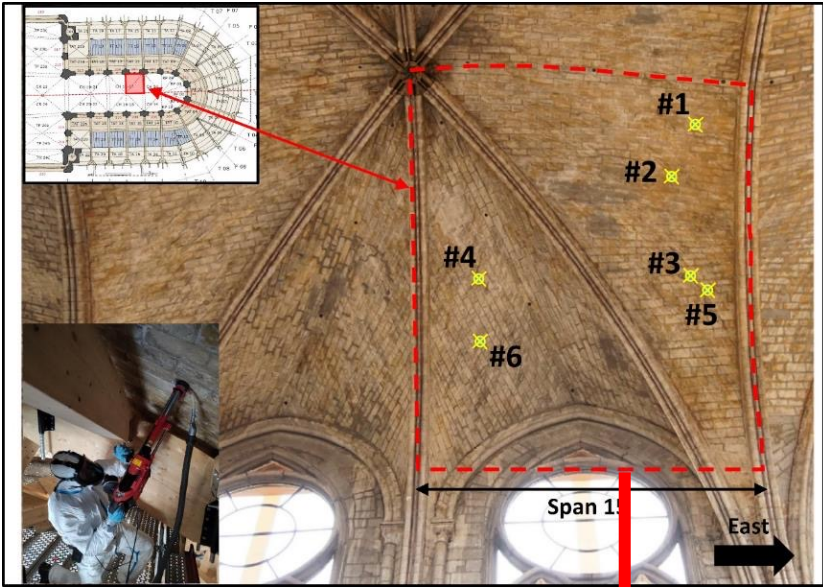
Eléments finis avec loi plastique-endommageable
anisotrope développée au LMDC Toulouse



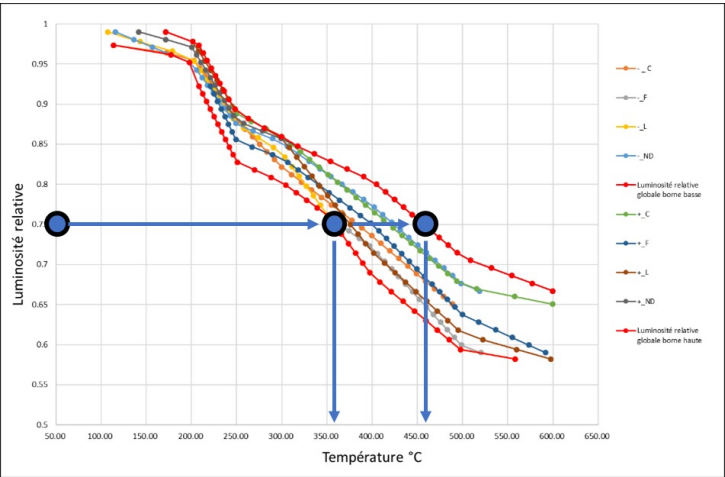
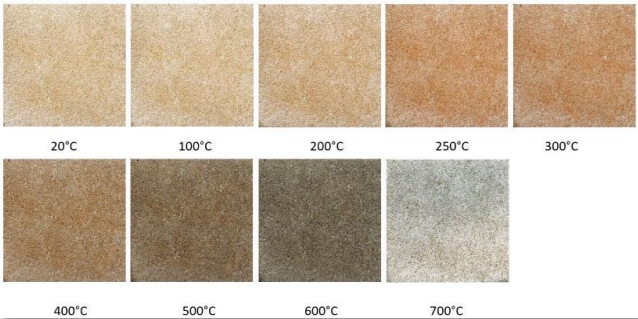


➤ Etude *a posteriori* du champ thermique dans les voutains du chœur (voûte CH15-18)

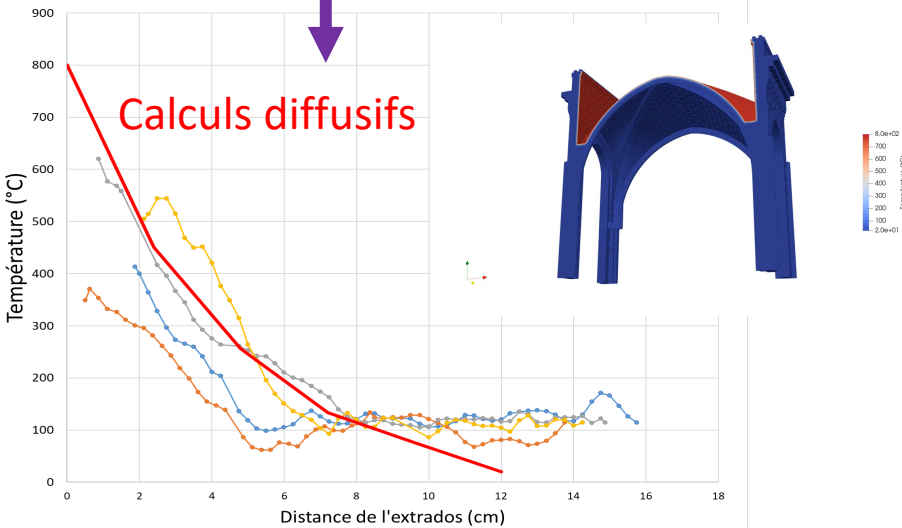
Carottes extraites de la voûte du chœur



Calibration de la luminance en laboratoire (I2M)



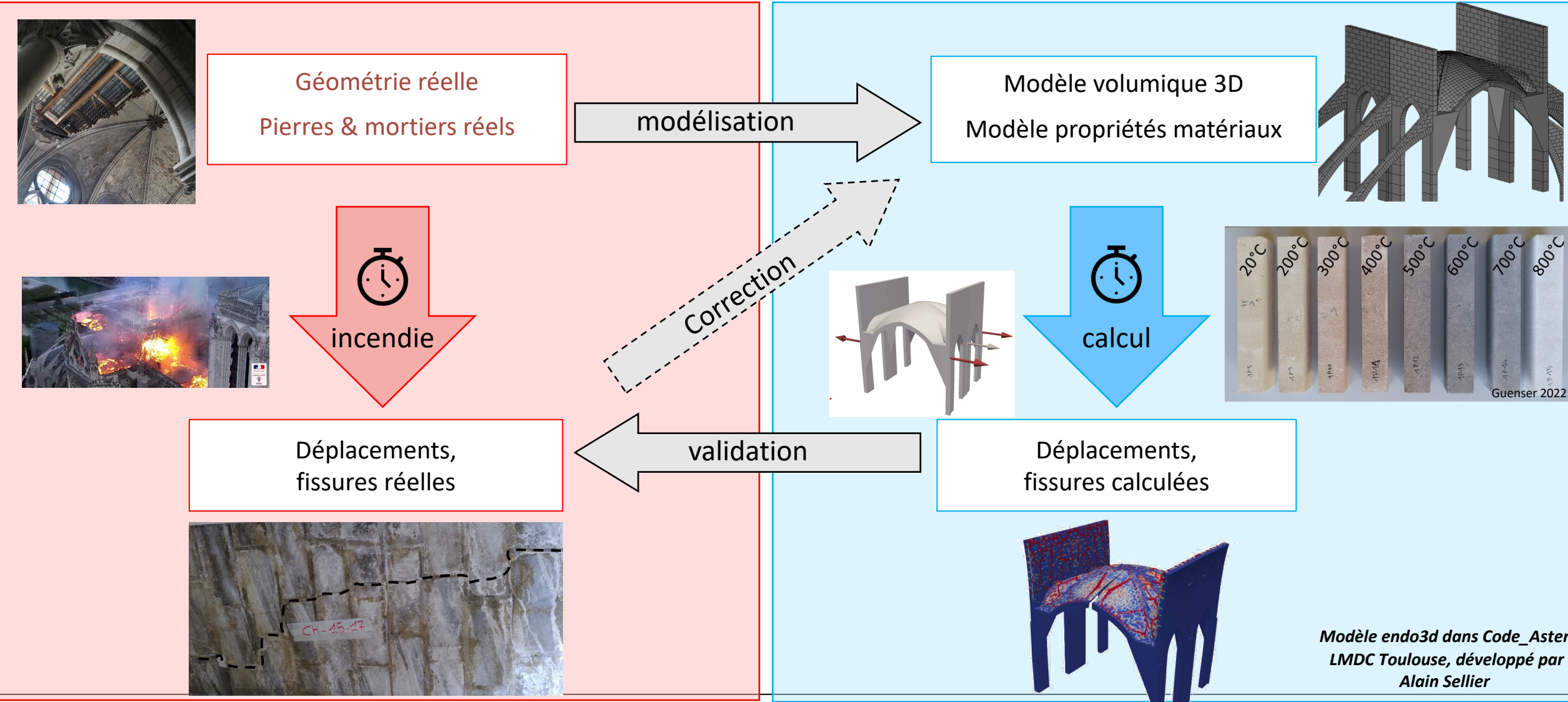
Calculs diffusifs





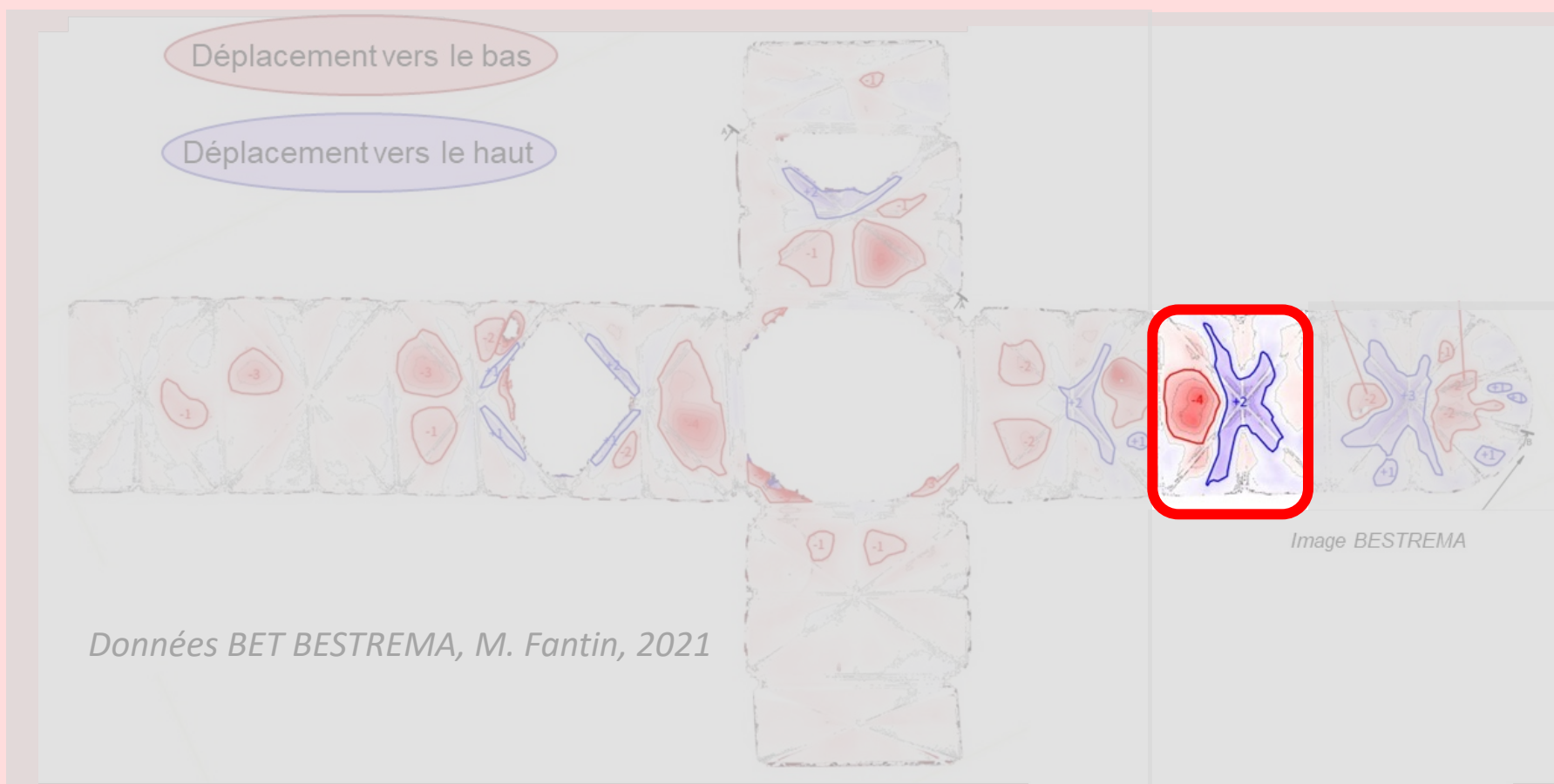
Réalité concrète

Jumeau numérique virtuel



Réalité concrète

Déplacements verticaux (cm) voûtes avant/après incendie

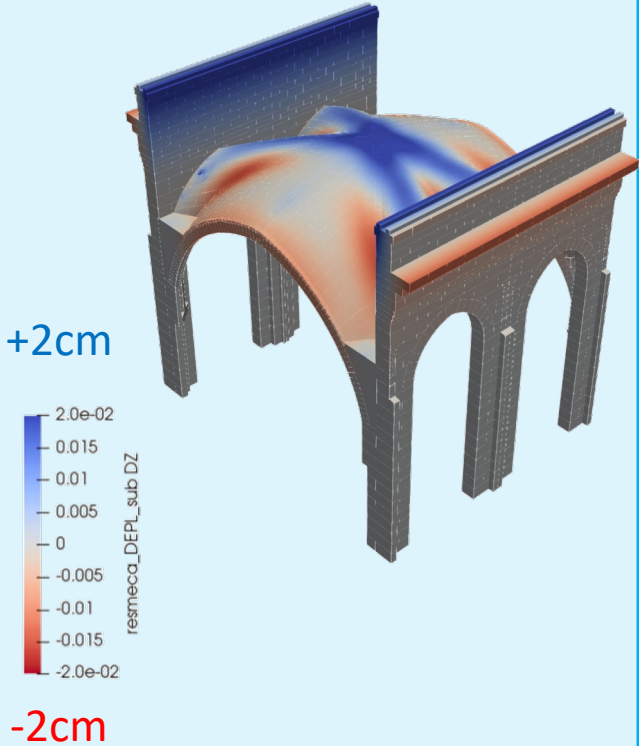
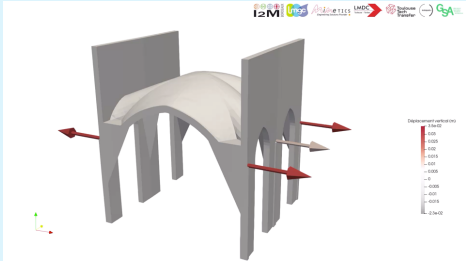
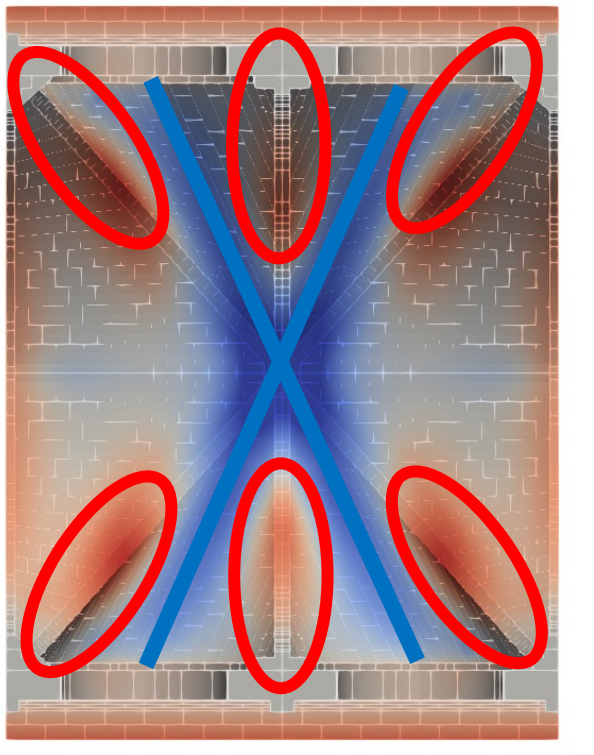
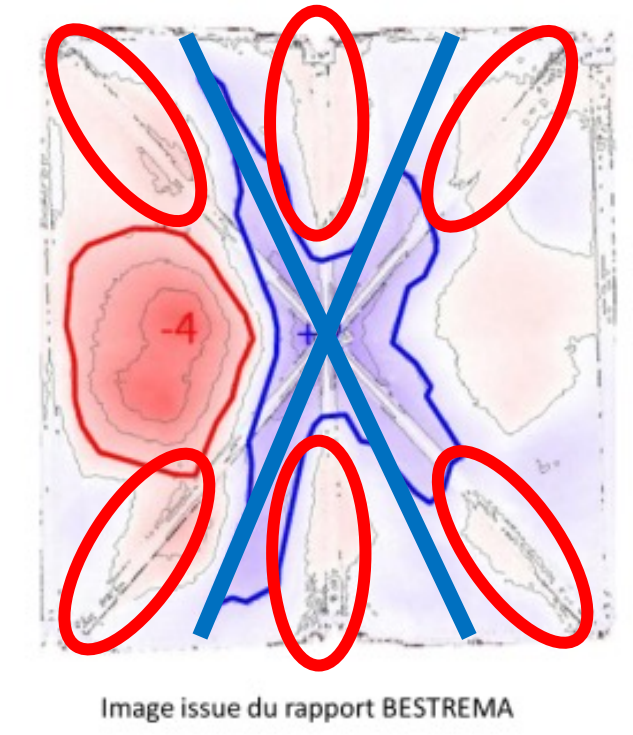




Réalité concrète

Jumeau numérique virtuel

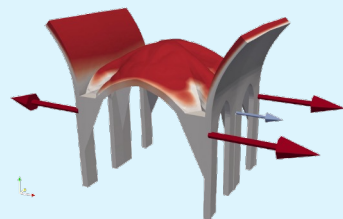
Déplacement vertical de la voûte



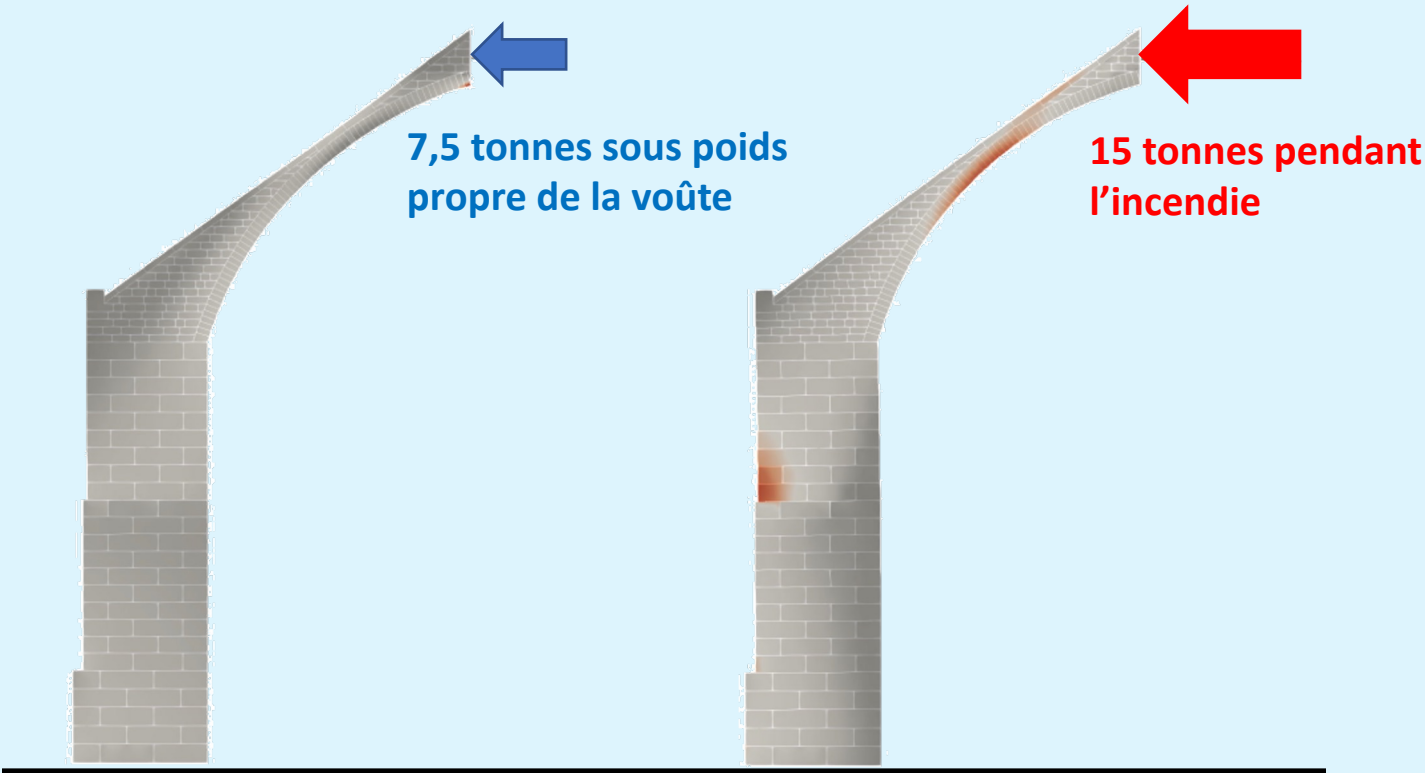
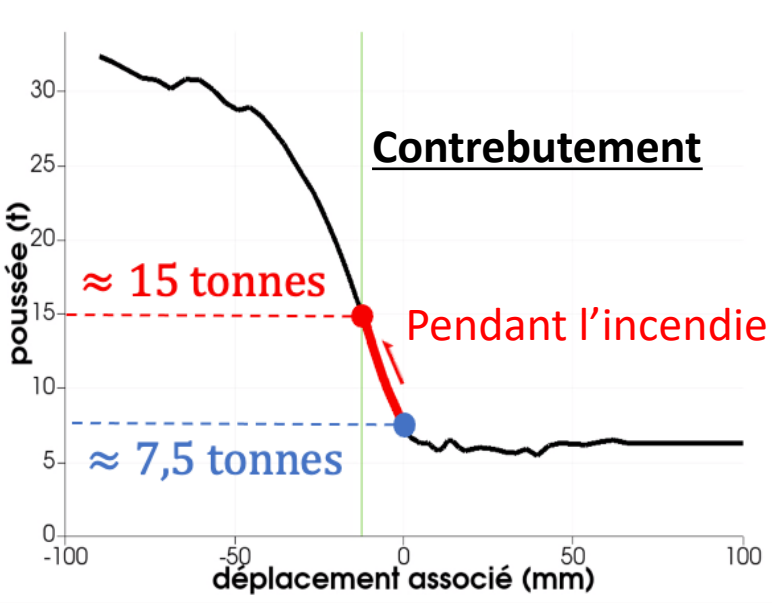
Réalisme du modèle sur les déplacements verticaux



Jumeau numérique virtuel



Poussée dans les contrebutelements ?



Pas d'instabilité dans les contrebutelements durant l'incendie

Modèle LMGC90 Montpellier

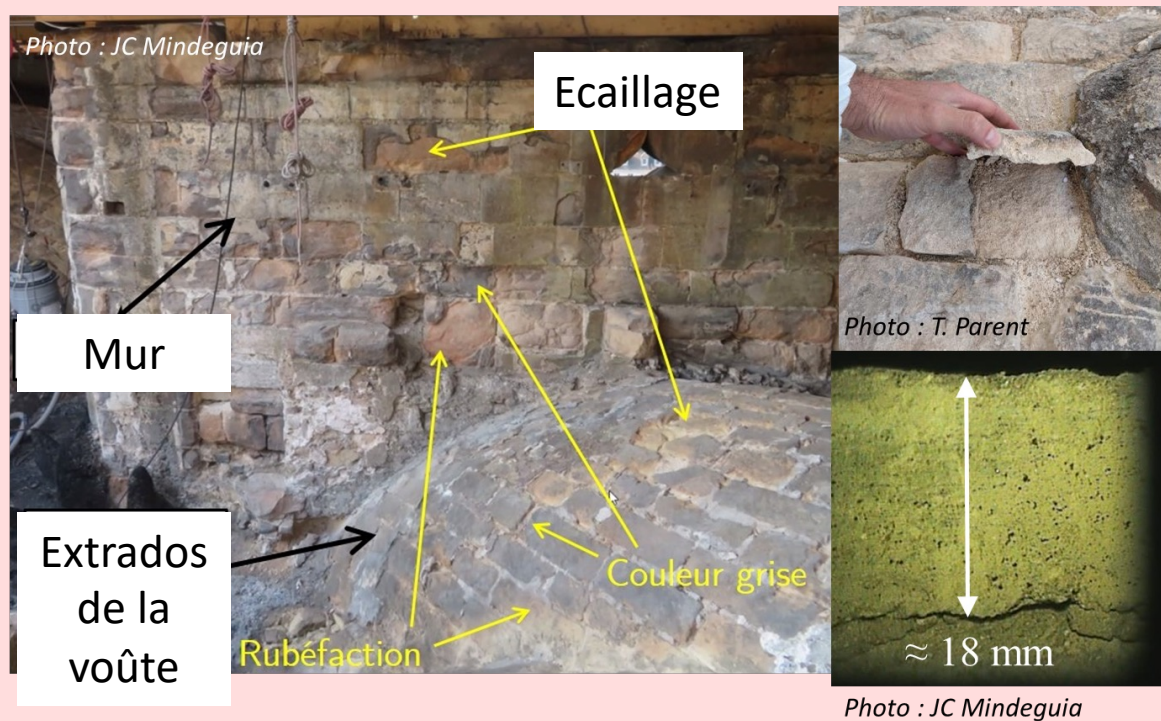
Jumeau numérique virtuel

**Fissuration obtenue
par le modèle pendant
l'incendie**

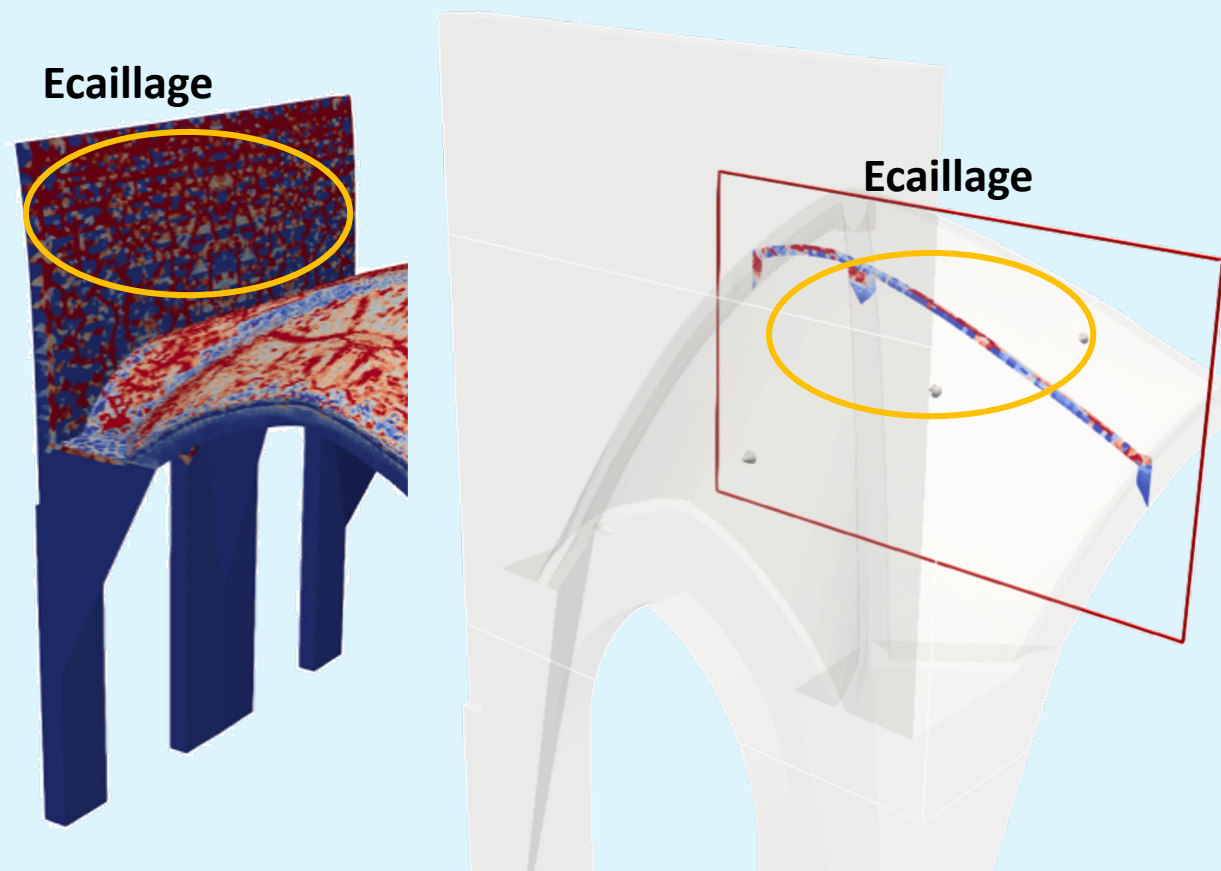
**(déplacements
amplifiés 10x)**



Réalité concrète

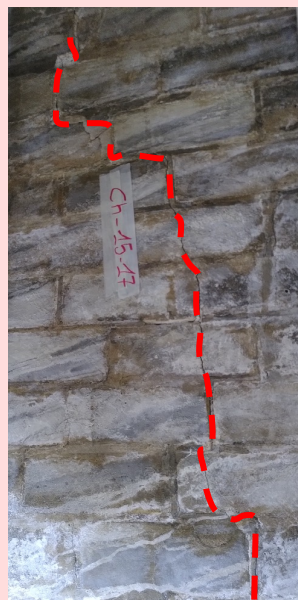
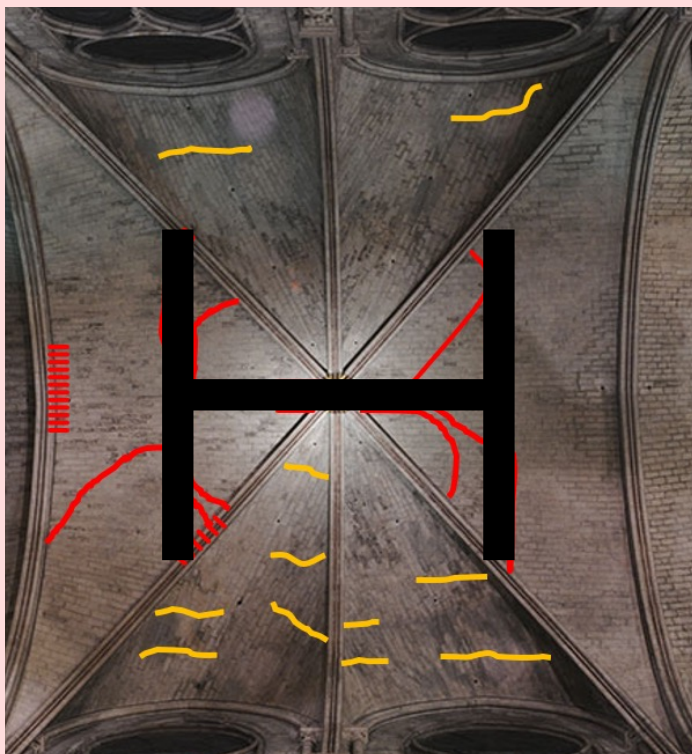


Jumeau numérique virtuel



Réalité concrète

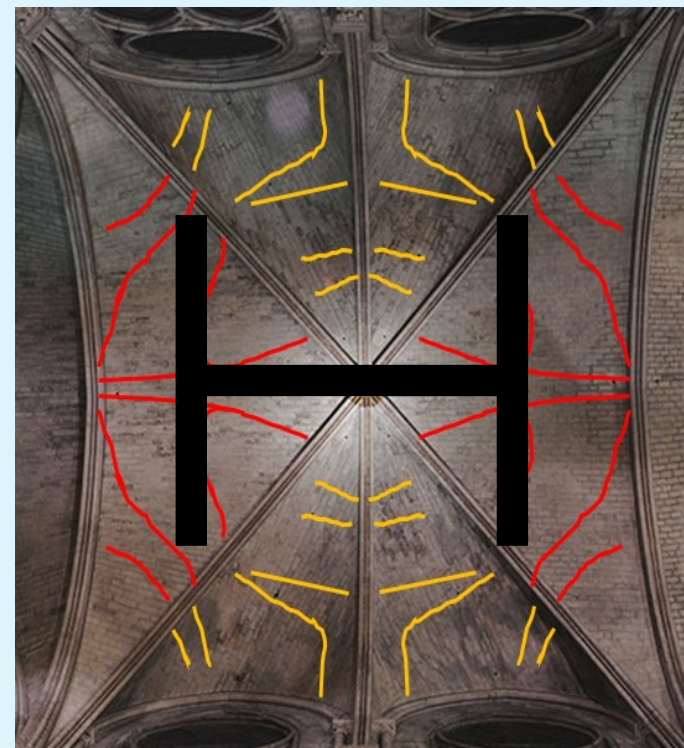
Fissures traversantes Voûtains



Relevé in situ réalisé par le
GT Structures sur la voûte
CH15-18 du chœur
avril 2022

Jumeau numérique virtuel

Fissuration obtenue par le calcul sur l'intrados de la voûte



Réalité concrète

Fissures Nervure / Voûtains



Jumeau numérique virtuel

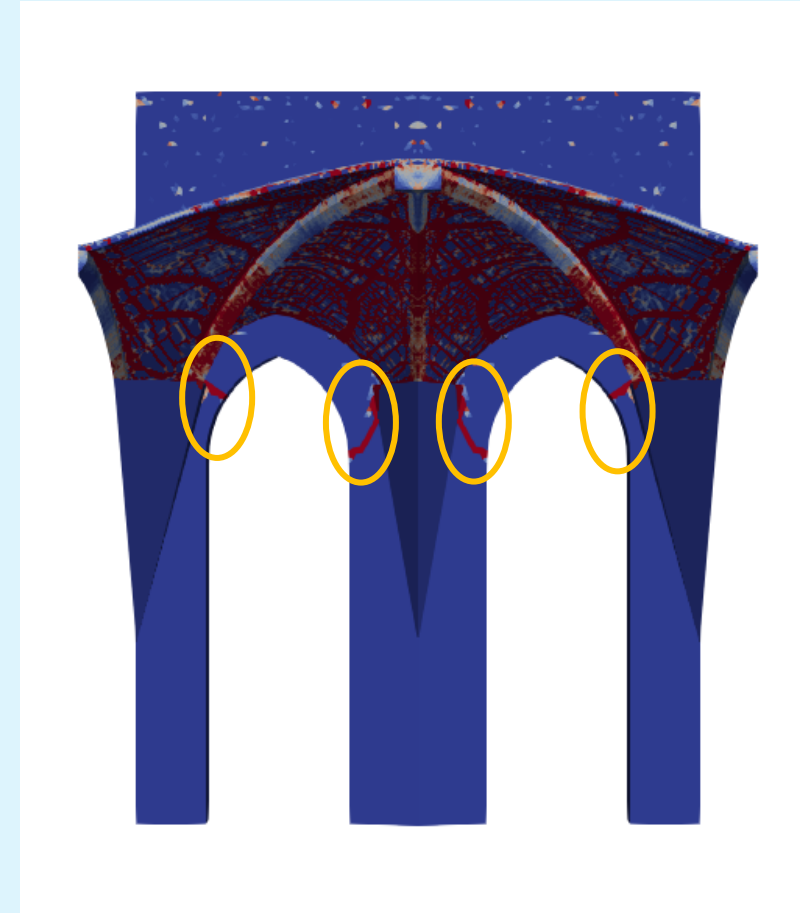


Réalité concrète

Fissures Zone colonnettes



Jumeau numérique virtuel



Conclusion de l'étude numérique

- **Réalisme du calcul** qui permet de reproduire les déplacements/fissurations *in situ*
- **Pas d'instabilité de la structure** pendant l'incendie ou après refroidissement

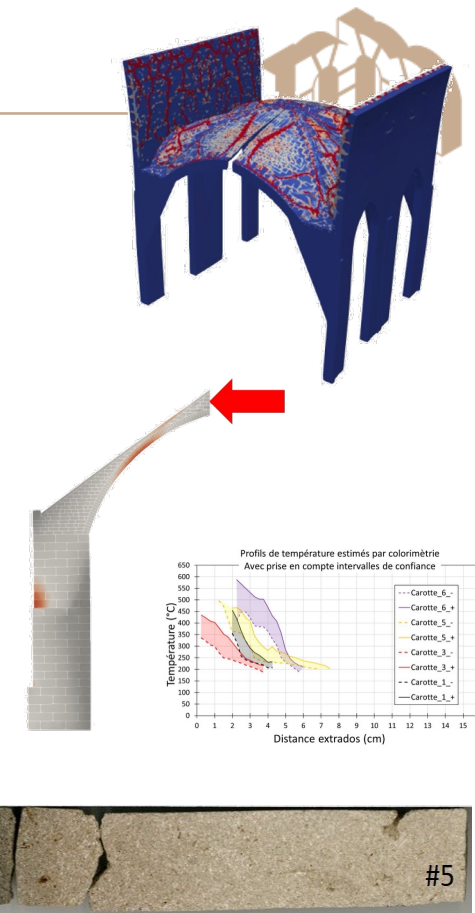
Conclusion sur la méthodologie

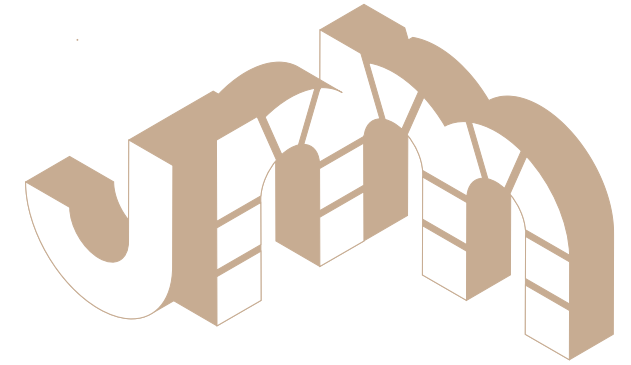
Objectif de ce travail : **comprendre** les effets de l'incendie sur la structure pour le diagnostic et l'étude des solutions de renforcement

- ✓ **Vérification de la compréhension** des principaux phénomènes physiques ayant lieu pendant l'incendie par **reproduction dans un jumeau numérique**
- ✓ **Validation de la méthodologie** en 3 étapes : données, investigations, calcul

Perspectives

- **Outil** numérique pouvant **compléter** les méthodes existantes de diagnostic
 - Pour l'étude des **solutions de renforcement** (purges, reprises, chape)
 - Pour l'interaction avec les **parties reconstruites** comme la charpente ou des panneaux de voûtaïns





Merci de votre attention

Contact :

Pierre Morenon LMDC Toulouse

morenon@insa-toulouse.fr

+33 7 86 14 80 69



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