



JOURNEES NATIONALES  
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



## RESTAURATION DE LA CATHEDRALE NOTRE- DAME DE PARIS

—

## UN PARTENARIAT INEDIT DE RECHERCHE APPLIQUEE SUR LES ETUDES STRUCTURALES

Jonathan TRUILLET

Adjoint Science et Patrimoine de la Directrice Générale Déléguée

Etablissement Public chargé de la conservation et la Restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris (EPRNDP)



Stéphane MOREL

Coordinateur du groupe de travail Structures, chantier scientifique CNRS-MC Notre-Dame / RT MAESTRO

Université de Bordeaux, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), UMR 5295 CNRS



# Contexte : Opération de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris





## Deux enjeux :

Reconstruire à l'identique des ouvrages de maçonneries et de charpentes qui ne répondent pas aux standards normatifs actuels

Mobiliser des savoir-faire techniques pour réaliser des opérations d'ampleur inédite depuis la seconde guerre mondiale

## Une contrainte :

Réaliser le chantier en 5 ans



# Contexte : Opération de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris



Collaboration entre EPRNDP (MOA) et Chantier scientifique CNRS – Ministère de la Culture Notre-Dame

Chantier scientifique CNRS – MC Notre-Dame : 9 groupes de travail (plus de 150 chercheurs)

Pierre

Bois

Métal

Verre

Structures

Acoustique

Numérique

Décor

Emotion



## GT Structures

Evaluation structurale des éléments constitutifs de l'ossature porteuse de la cathédrale Notre-Dame de Paris comme les maçonneries de pierre et les charpentes bois.



*Interrogé par la MOE, dès le début du chantier, quant à la stabilité post-incendie des voûtes hautes de la cathédrale*









## GT Structures

*Mission d'accompagnement  
scientifique de l'ensemble MOA-MOE*

*Action de transfert consistant à mettre  
à disposition les technologies, outils de  
modélisation et savoir-faire  
universitaires dans un contexte  
d'ingénierie*

### **Problématique :**

Compatibilité des études scientifiques et techniques avec les délais contraints de l'opération de restauration



### **Solution proposée par le GT Structures :**

Mobiliser les ressources humaines et scientifiques disponibles dans les cellules de transfert ou les startups adossées aux laboratoires du GT et expertes dans la mise en œuvre des dernières modélisations mécaniques avancées développées dans ces laboratoires

# Mission d'accompagnement scientifique : *Convention R&D*



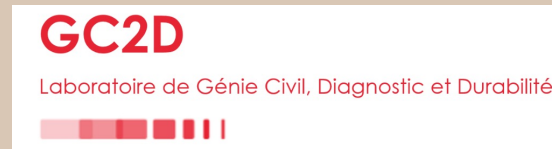
*Mission d'accompagnement scientifique de  
l'ensemble MOA-MOE*

*Phases : Diagnostic, Conception, Etudes  
d'exécution et Travaux*

**Partenariat Recherche et Développement  
partagé entre l'EPRNDP**

**et**

**un consortium scientifique spécialisé  
dans les études structurales**







## *Mission d'accompagnement scientifique de l'ensemble MOA-MOE*

*Phases : Diagnostic, Conception, Etudes d'exécution et Travaux*

**Partenariat Recherche et Développement  
partagé entre l'EPRNDP  
et  
un consortium scientifique spécialisé  
dans les études structurales**

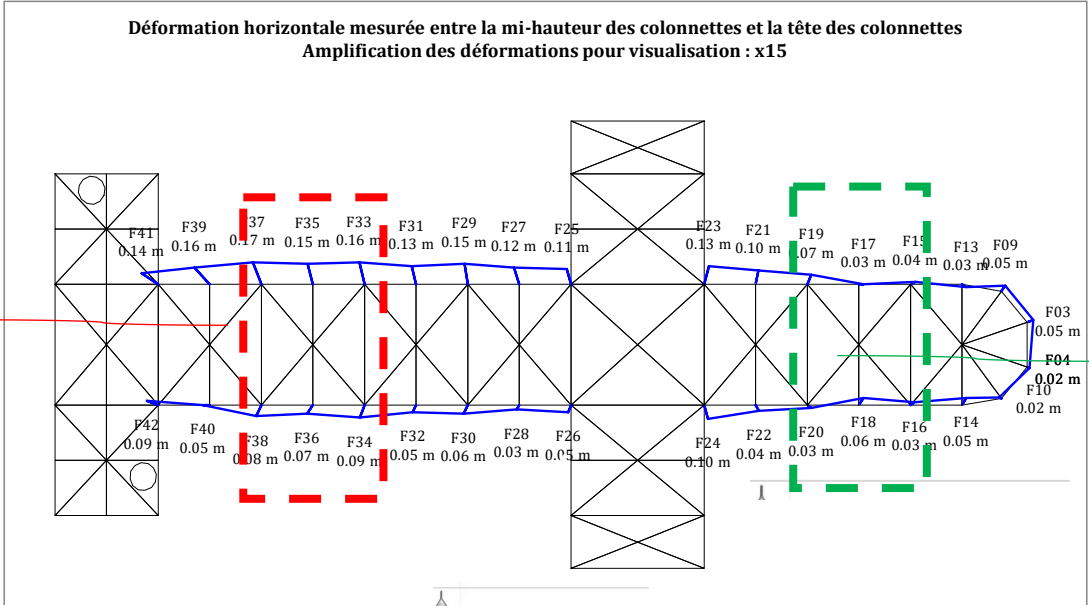
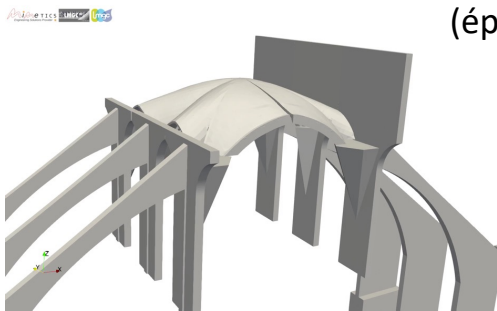
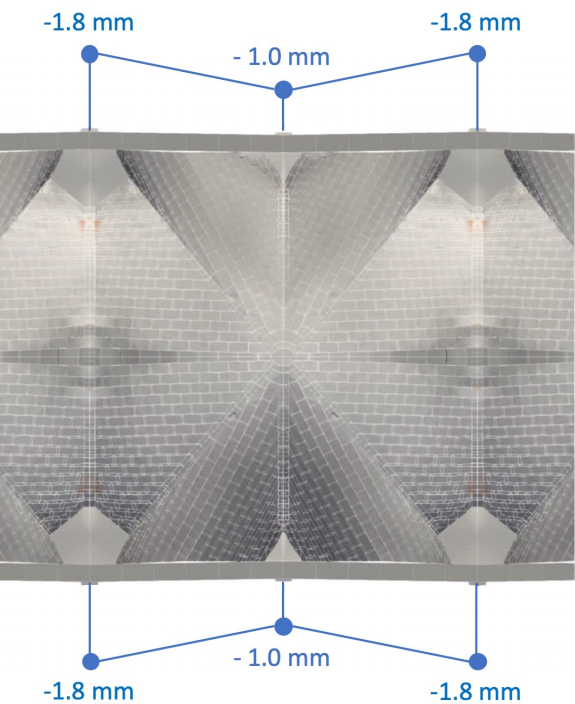
### **Différentes missions/études :**

- Etude de la stabilité post-incendie des voûtes
- Reconstruction en bois vert des charpentes (séchage en place des éléments structuraux)
- Compatibilité mécanique des solutions de confortement des maçonneries
- Analyse scientifique des travaux de restauration (DCE 3/transept et flèche, 5/nef et chœur et 6/beffroi nord)
- Participation à la rédaction du DCE Instrumentation
- Etude des interactions charpente-maçonnerie sur une travée du chœur
- Evaluation structurale des voûtes confortées (stabilité sous efforts de vent d'une travée du chœur)
- Protection incendie passive des voûtes

# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées : *État d'équilibre des voûtes à l'état initial (i.e., avant incendie)*

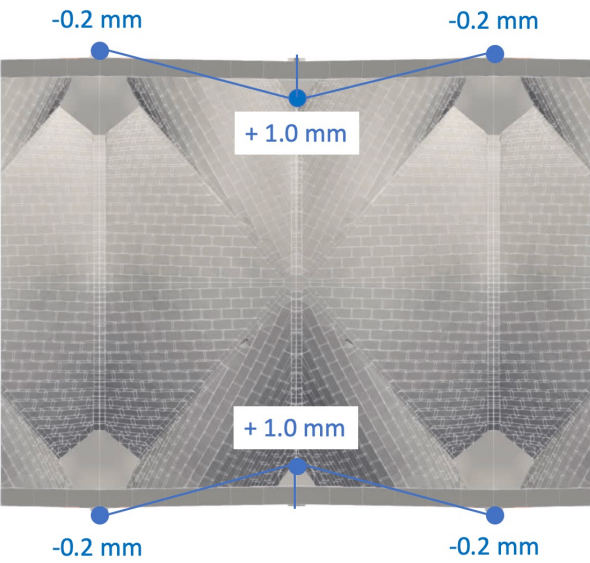
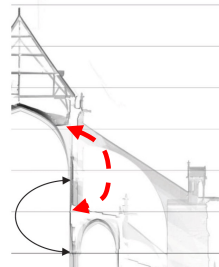


- Déplacements d'appuis simulés des voûtes cohérents (tendance) avec ceux mesurés in situ (BET BESTREMA).



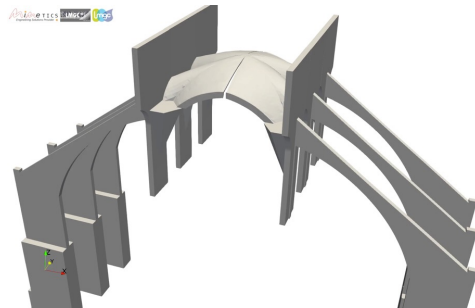
**Nef**  
(épaisseur des voûtain 19 à 24 cm)

*Ecartement des appuis opposés*  
—  
*Voûte en poussée passive*  
vs  
*Appuis en poussée active*



**Chœur**  
(épaisseur des voûtain 12 à 15 cm)

*Rapprochement des appuis opposés*  
—  
*Voûte en poussée active*  
vs  
*Appuis en poussée passive*



# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

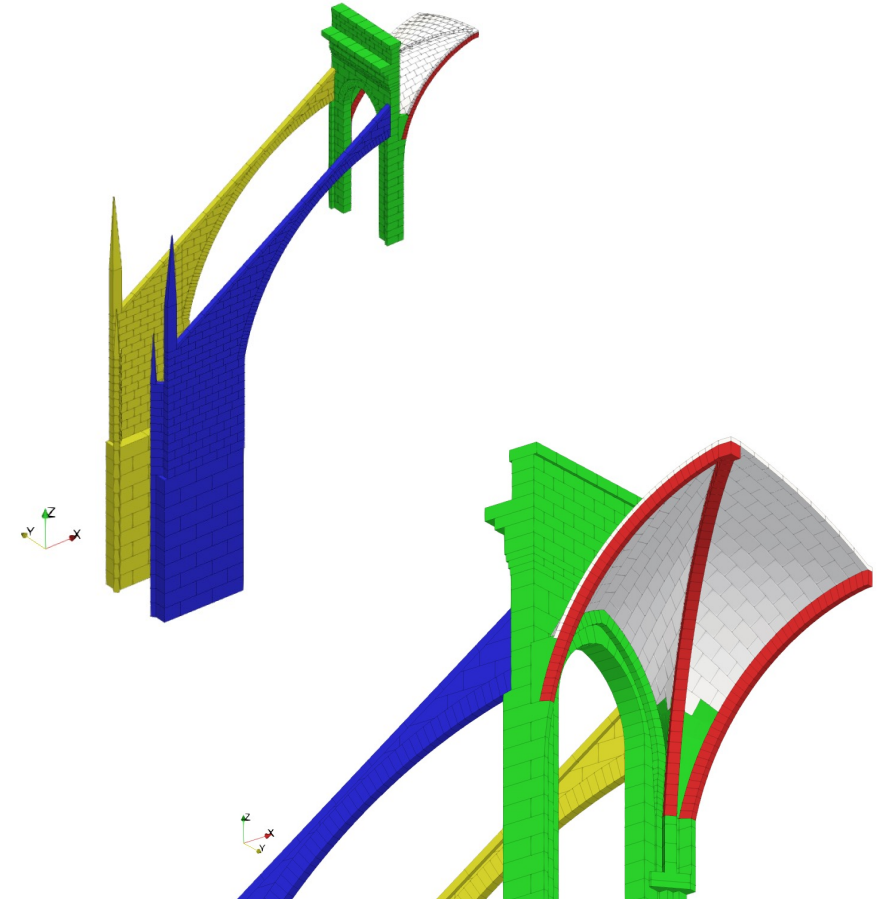
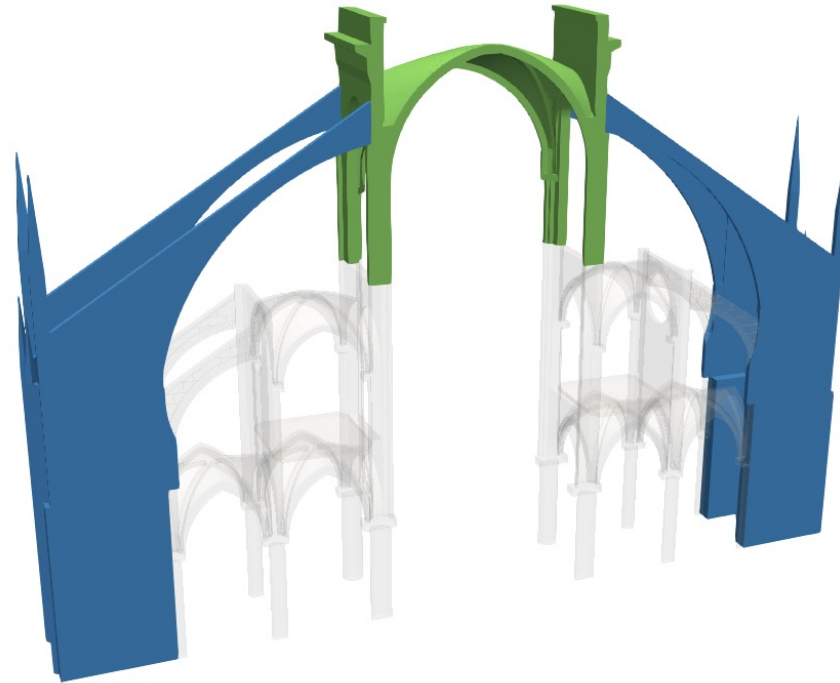
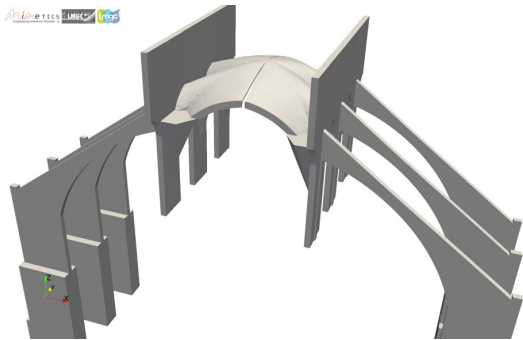
## *État d'équilibre des voûtes à l'état initial (i.e., avant incendie)*



- Importance de l'interaction mécanique entre voûtains latéraux et murs gouttereaux pour les voûtes du chœur

Considération de 2 sous ensembles :  
- ensemble voûte + murs gouttereaux  
- ensemble arc-boutant (culée + volée)

*Rapprochement des appuis opposés*  
—  
*Voûte en poussée active*  
vs  
*Appuis en poussée passive*





# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

## *Mécanismes engendrés pendant l'incendie et endommagement post-incendie*



- Impact des dilatations thermiques et dégradation des propriétés mécaniques

Evolution des déplacements verticaux mesurés in situ et simulés

Déformée et fissuration au cours de l'incendie

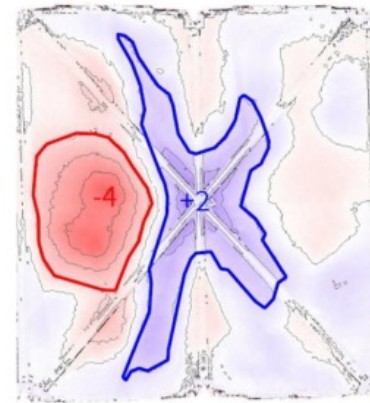
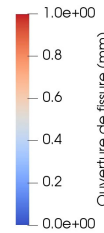
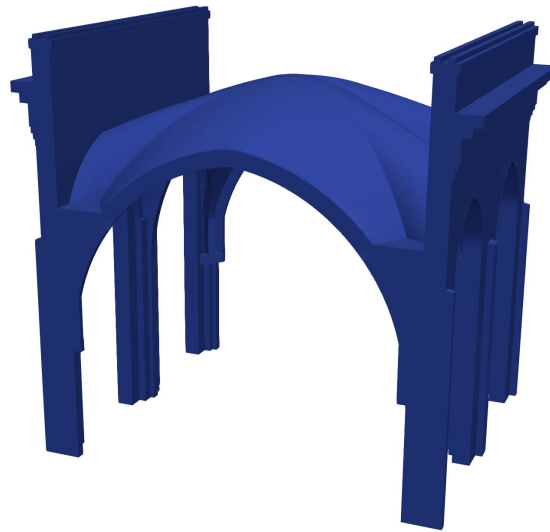
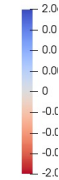
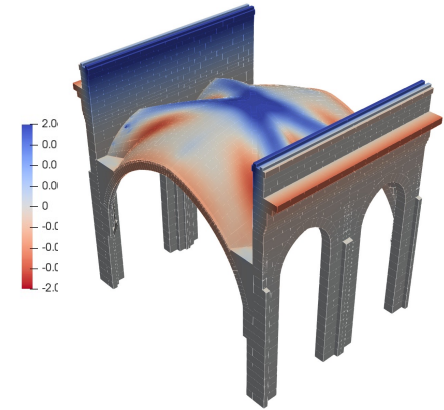
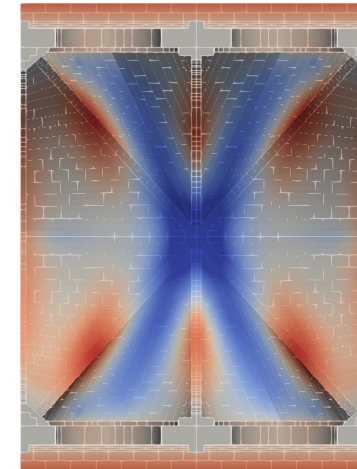
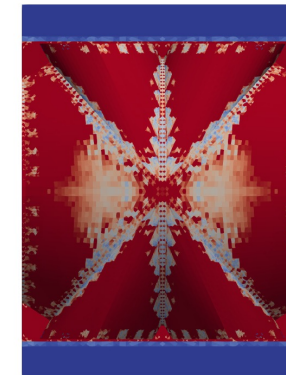
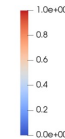
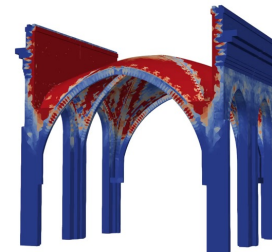


Image issue du rapport BESTREMA



Fissuration post-incendie (extrados et intrados)

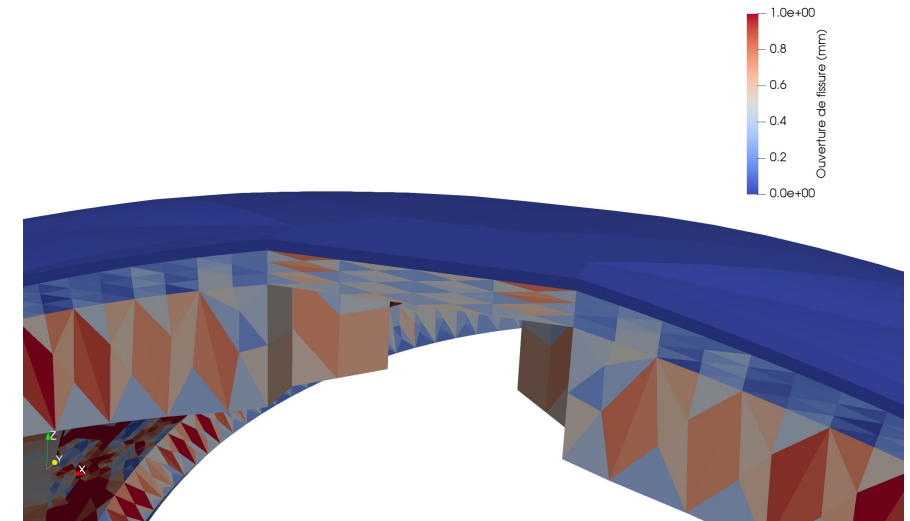
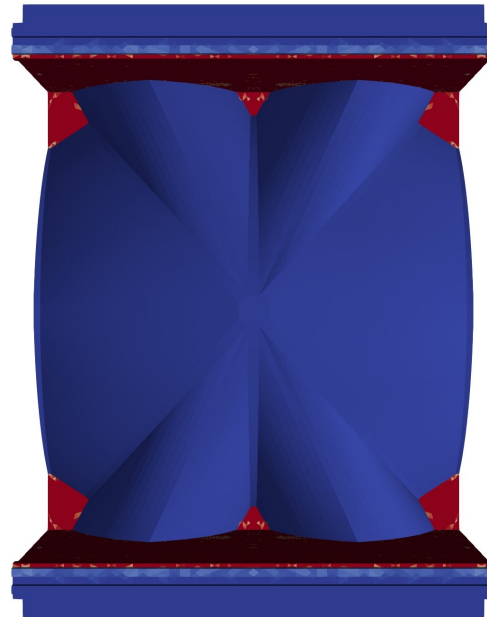
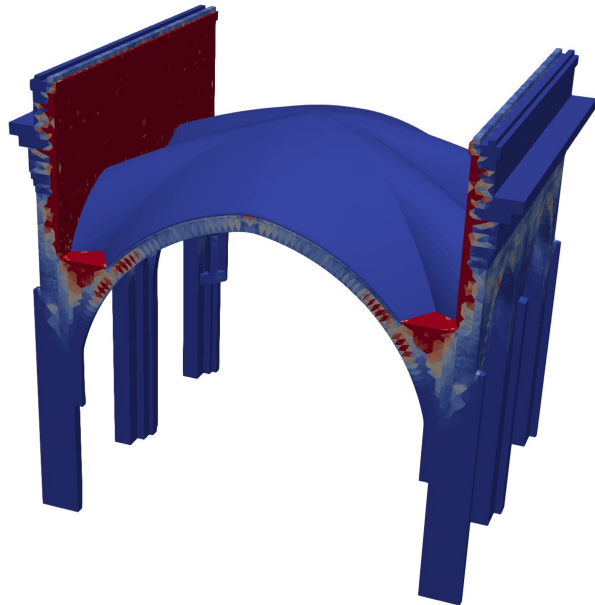


# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

## *Modélisation d'une travée confortée du chœur sous efforts de vent*



- **Modélisation de la solution de confortement (compatibilité mécanique)** : chape de chaux modifiée et fibrée (3 cm) disposée en extrados des voûtes en remplacement d'une même épaisseur de voûtain préalablement purgée



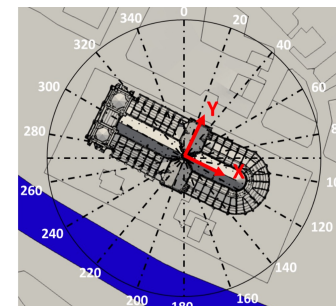
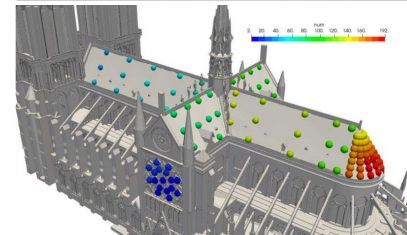
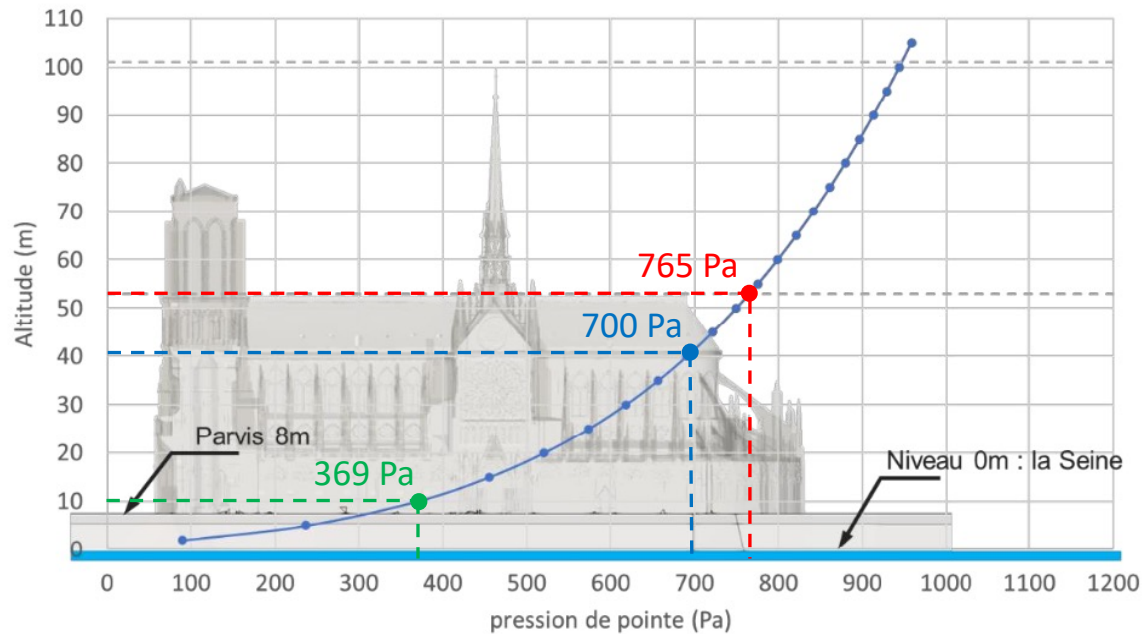
# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

## *Modélisation d'une travée confortée du chœur sous efforts de vent*

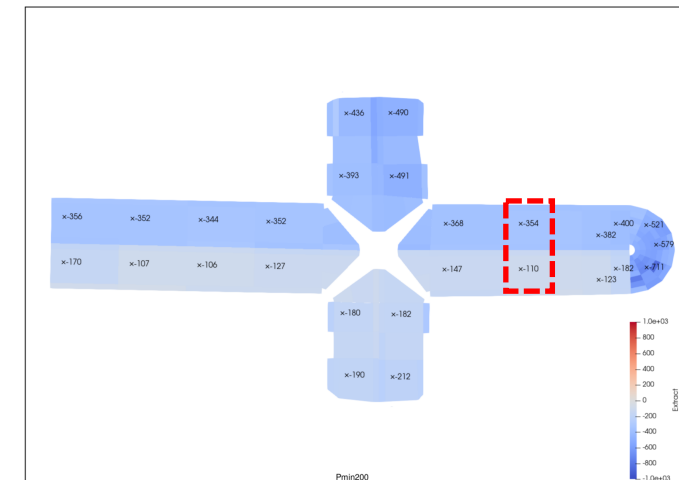
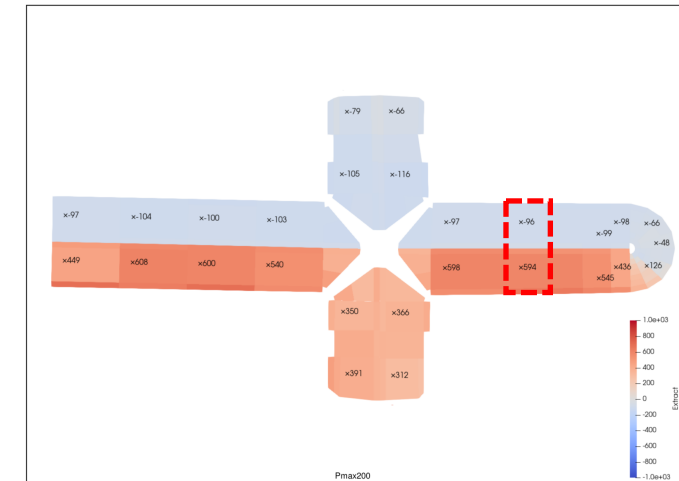


### ● Efforts de vent : Etude en soufflerie (CSTB)

Pression dynamique de pointe en fonction de l'altitude  
(Eurocode : Paris / zone 2, rugosité IV)



Pression de pointe maximale  
(BET BESTREMA)





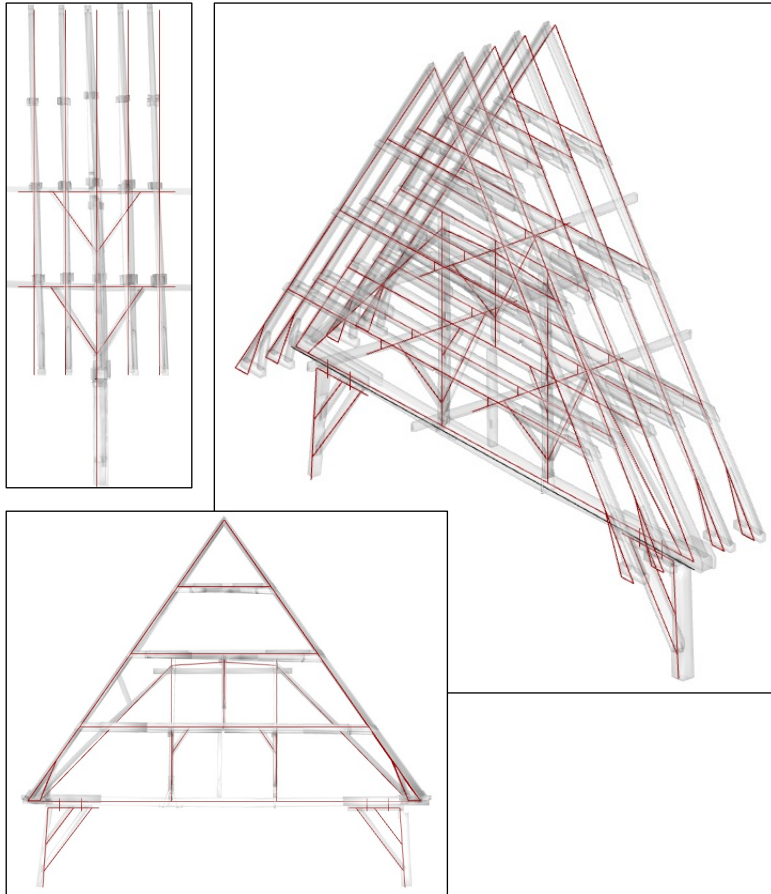
# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

## *Modélisation d'une travée confortée du chœur sous efforts de vent*



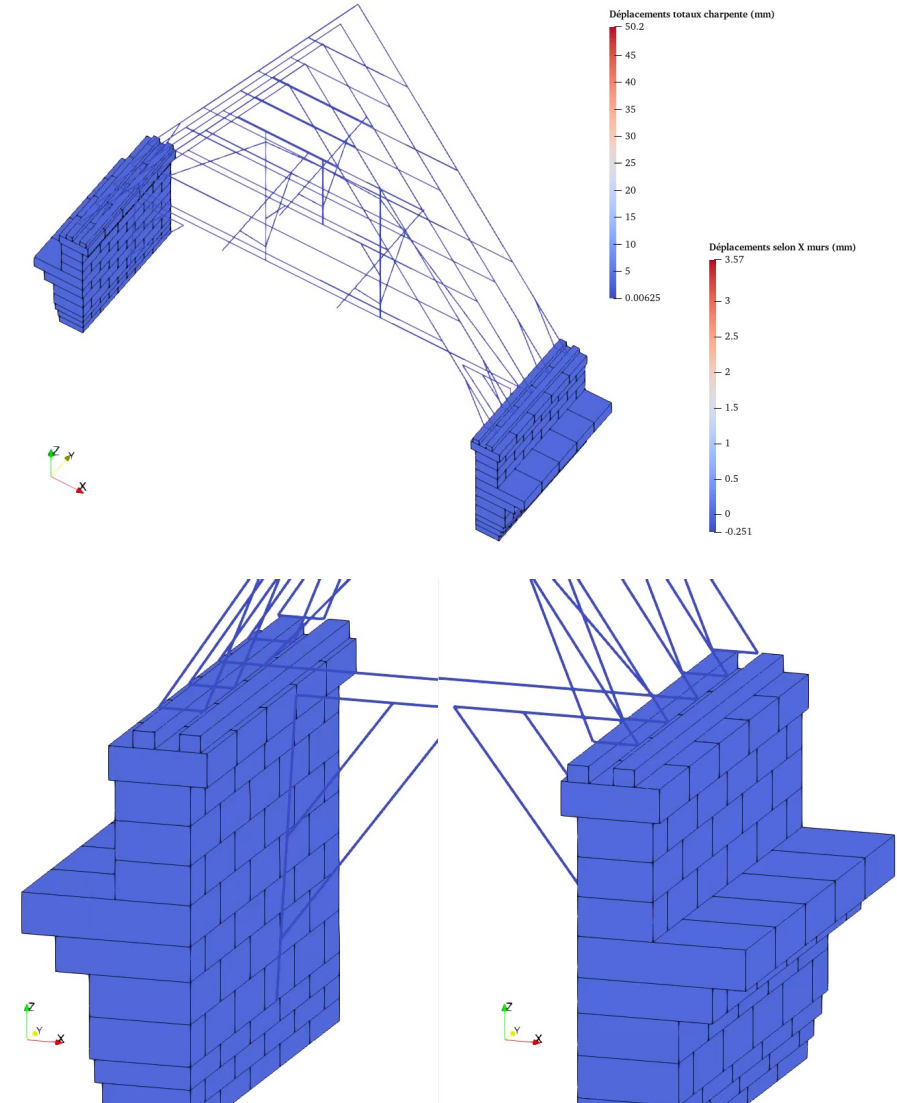
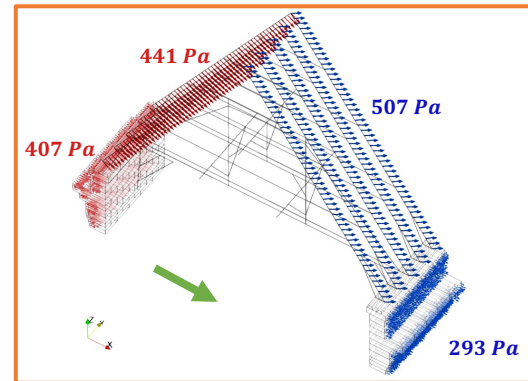
### • Interactions charpente-maçonnerie

Module de charpente  
(1 ferme principale et 4 chevrons formant ferme)



Chargement de vent appliqué  
de 0% à 150%

Cas 1 (Surpression Intérieure)

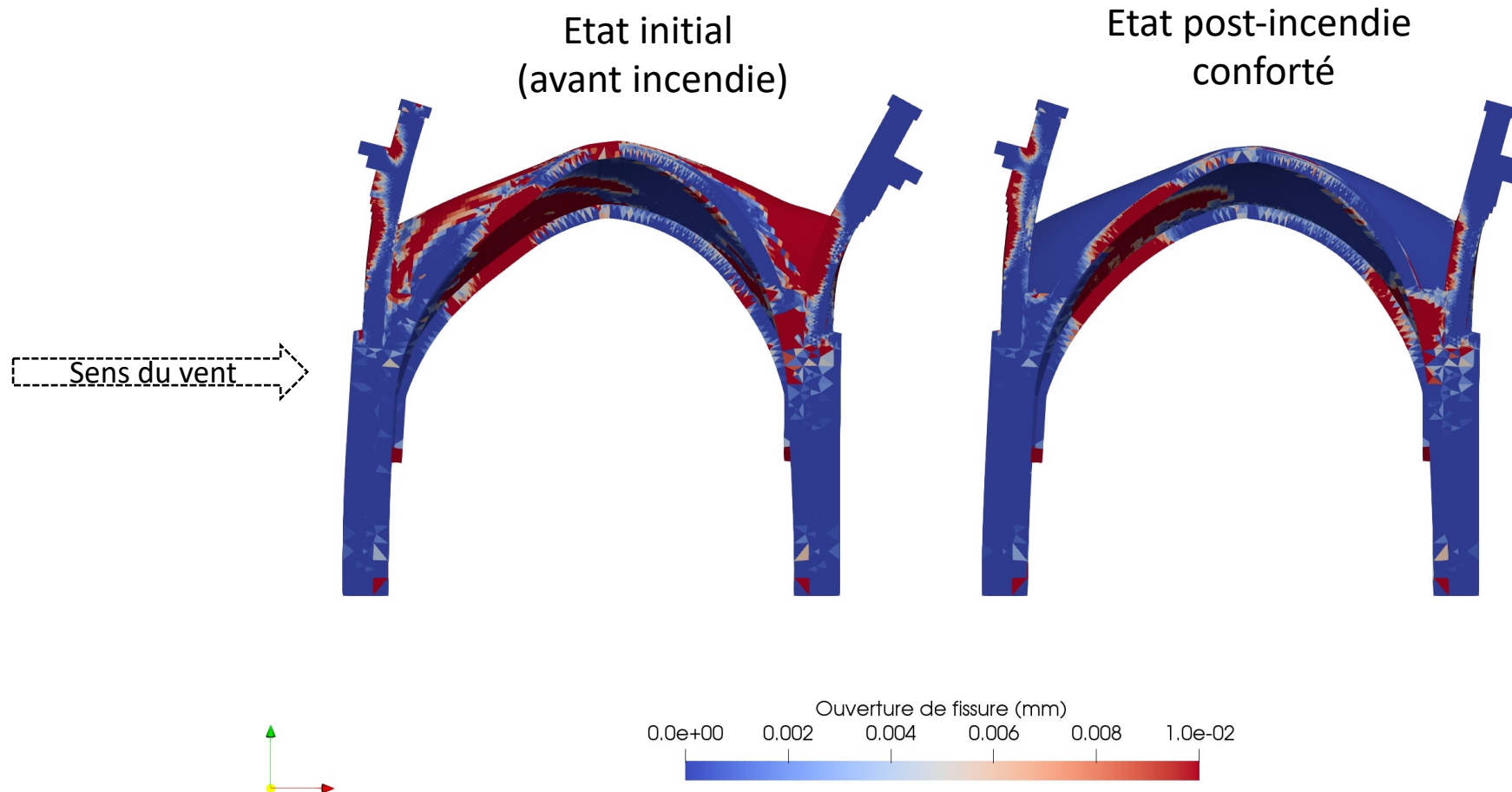


# Focus sur quelques éléments clés des études réalisées :

## *Modélisation d'une travée confortée du chœur sous efforts de vent*



- Comparaison entre état initial et état post-incendie conforté (130% d'efforts de vent)



# Conclusion : bilan et retour d'expérience



## Intérêts de l'accompagnement scientifique de l'opération de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Intérêt global : Meilleure compréhension du comportement mécanique de la cathédrale

### Ensemble MOA-MOE

#### MOE

**Confortation quant aux décisions à prendre en matière de :**

- **Restauration d'ouvrages complexes** comme les voûtes sexpartites de Notre-Dame (en lien avec leurs contrebutements)
- Reconstruction à l'identique des charpentes intégrant le **séchage en place des éléments structuraux**

#### MOA

- **Meilleure compréhension des problématiques structurales** liées à la restauration (**gain en efficacité des échanges avec la MOE**)
- **Vision scientifique des travaux de restauration** intervenant hors cadre réglementaire, aide à la préparation de la commission de sécurité
- **Des calendriers parfois difficilement compatibles**, compte tenu du rythme spécifique du chantier
- **Une anticipation** de la surveillance des ouvrages restaurés

### Consortium scientifique

- **Comparaison des différentes modélisations mécaniques avancées et méthodologies d'évaluation structurale** développées en laboratoire de recherche (benchmark et **fiabilisation des résultats**)
- Mise en œuvre de **méthodologies d'évaluation structurale pragmatiques du fait des délais contraints**
- Mise en lumière **des points d'amélioration** des modélisations mécaniques : enseignement sur les futurs développements en matière de recherche
- **Cadre administratif et juridique** permettant aux laboratoires et structures adossées de mener à bien les opérations de recherche et développement

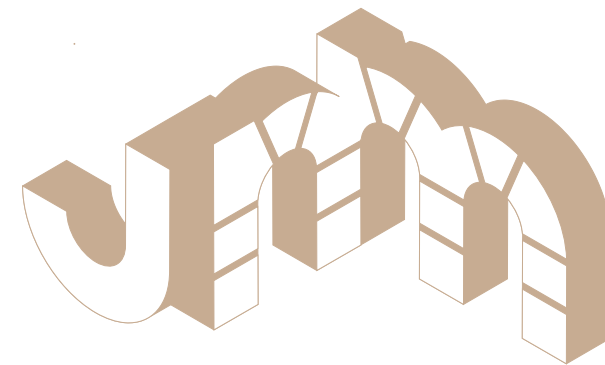


Poursuite de l'expérience du « chantier scientifique ND » via le

## **Réseau Thématique CNRS-MC MAESTRO**

« Appréhender les défis des grands monuments : MAtériaux, STRuctures, EnvirOnnements »  
(GdR 2210, 2025-2028)

RT adossé aux opérations de restauration des ouvrages  
du patrimoine monumental du ministère de la culture  
(cathédrales, abbayes, châteaux, hôtels particuliers, enceintes urbaines, ...)



# Merci de votre attention

Contact :

Jonathan TRUILLET, [jonathan.truillet@rndp.fr](mailto:jonathan.truillet@rndp.fr)

Stéphane MOREL, [stephane.morel@u-bordeaux.fr](mailto:stephane.morel@u-bordeaux.fr)

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