



JOURNEES NATIONALES  
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



# ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE DE LA RESTAURATION DE LA FLECHE SAINT-MICHEL DE BORDEAUX

*A. SANTANGELO <sup>1</sup>, O. VIGOUREUX <sup>2</sup>, N. CHEVAL <sup>3</sup>,  
S. MOREL <sup>4</sup>, J.-C. MINDEGUIA <sup>4</sup>, T. PARENT <sup>4</sup>, P. TAFOREL <sup>5</sup>, F. DUBOIS <sup>6</sup>*



1



2



3



4



5



6

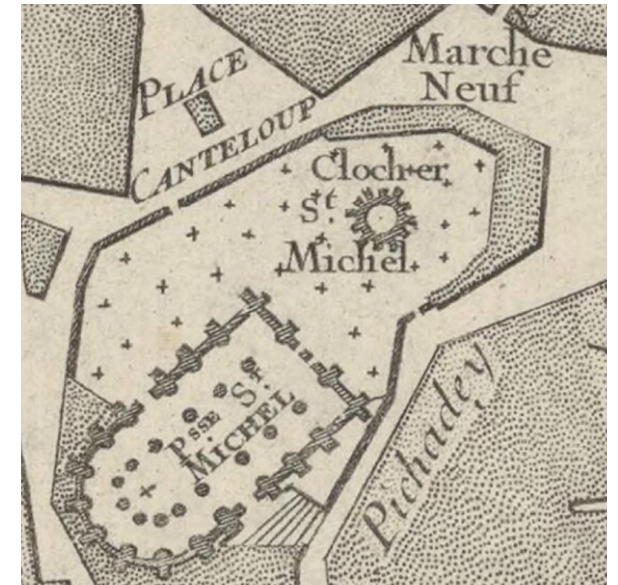
# Flèche Saint-Michel



Eglise et clocher de Saint-Michel à Bordeaux  
Léo Drouyin, gravure à l'eau-forte, 1866,  
dessin réalisé avec Jules de Verneilh

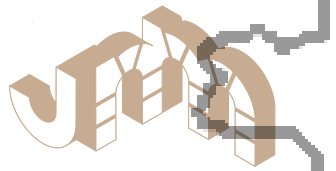
## Repères Historiques

- **Campanile** (clocher indépendant) **de la basilique Saint-Michel**, constitué d'une tour hexagonale surmontée d'une flèche
- Construction entre le XIVe et XVIe siècles par l'architecte Jean Lebas
- Reconstruction de la flèche dans sa forme actuelle (*dodécagone*) et chemisage des piles par l'architecte Paul Abadie au XIXe siècle (1865)
- Ouvrage classé au titre des **Monuments Historiques** en 1846
- Ouvrage listé au **patrimoine mondial de l'UNESCO** en 1999  
(site des Chemins de Saint-Jacques-de-Compostelle )
- Propriété de la ville de Bordeaux  
(*Maître d'Ouvrage*)



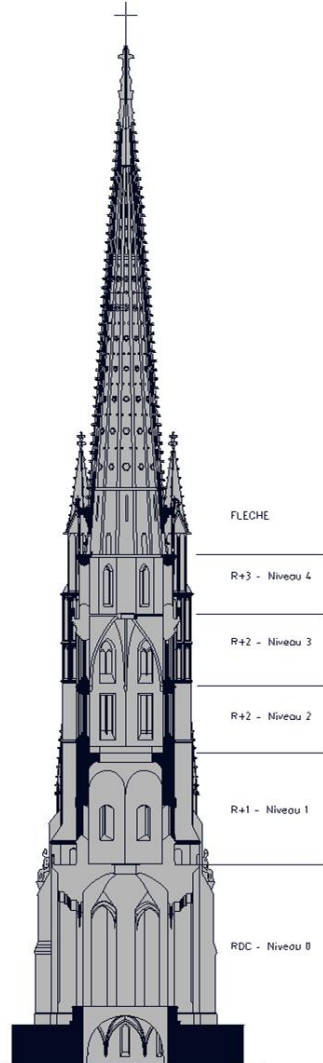
source BnF / Gallica

# Flèche Saint-Michel

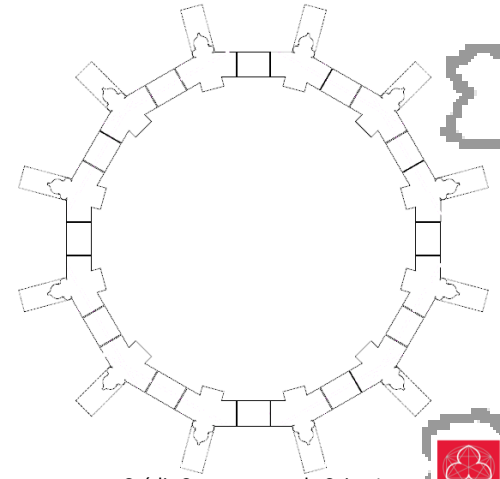


## Structure

- Ensemble **Tour** (52 m) + **Flèche** (55 m) surmontée d'une croix culminant à 112 m
- Flèche montée selon une **section dodécagonale**
- Sommets du dodécagone formés par des **nervures simples** et **nervures à crochets** (*alternance toutes les 3 assises*)
- Arêtes constituées par des **panneaux** de maçonnerie (*30 cm d'épaisseur en moyenne pour une hauteur régulière de 33cm*)
- Panneaux perforés de **petits oculi polylobés** en partie basse et de 3 séries **d'ouvertures oblongues** courant sur 4 à 5 assises (*1,30 à 1,65 m de haut*) et occupant plus ou moins la largeur totale des panneaux en partie supérieure
- Flèche réalisée en **pierre de taille** (pierre calcaire dite « *bâtarde du Périgord* ») jointoyée avec un mortier de chaux
- Flèche surmontée par un **fleuron** massif de près de 22 tonnes et une croix maintenue par une **enrayure métallique** située 13 m en dessous du fleuron et scellée dans la maçonnerie



Crédit Agence Goutal



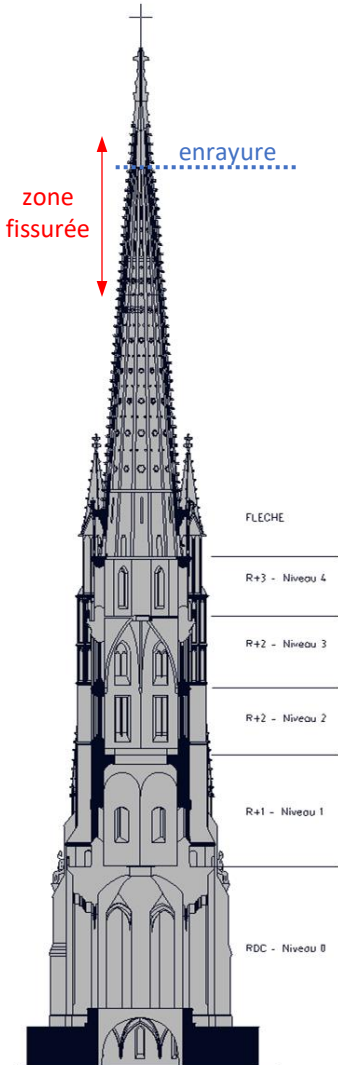
Crédit Compagnons de Saint-Jacques



Crédit photo Equilibre Structures



# Pathologies



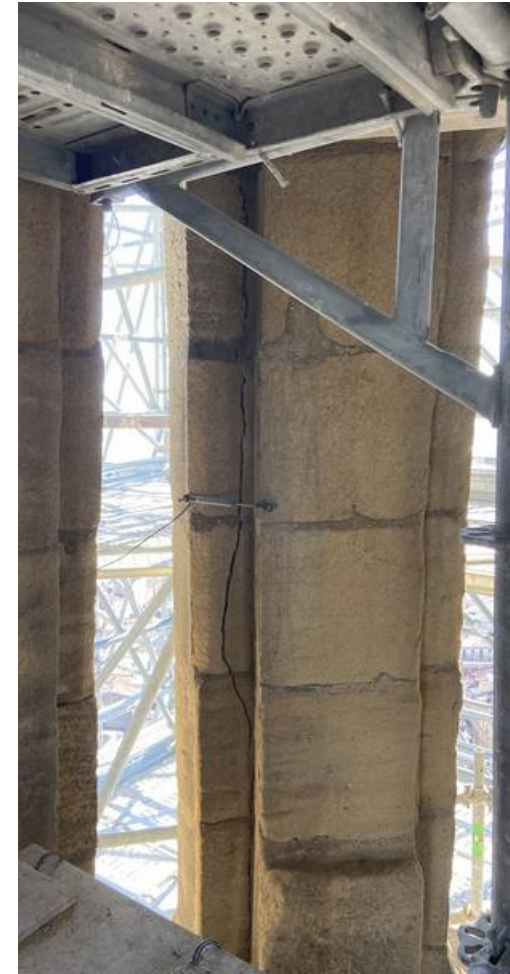
Fissuration des chemisages de piles en partie basse (flambement des parements) (**Tour**)

Fissuration en partie sommitale (**Flèche**)

- **Fissuration importante et sévère** en partie haute localisée dans le **quart Nord-Est**
- **3 fissures principales** de **13 à 14 m** de hauteur & plusieurs fissures secondaires localisées à proximité des nervures (face externe)
- **1 fissure traversant** jusqu'à la face interne **sur 3 à 4 m** de hauteur



**suivi de l'ouvrage** puis  
**Travaux de Restauration  
& de Confortement**



Crédit photo I2M, S. Morel



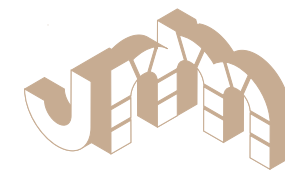
# Pathologies



Crédit photo I2M, S. Morel

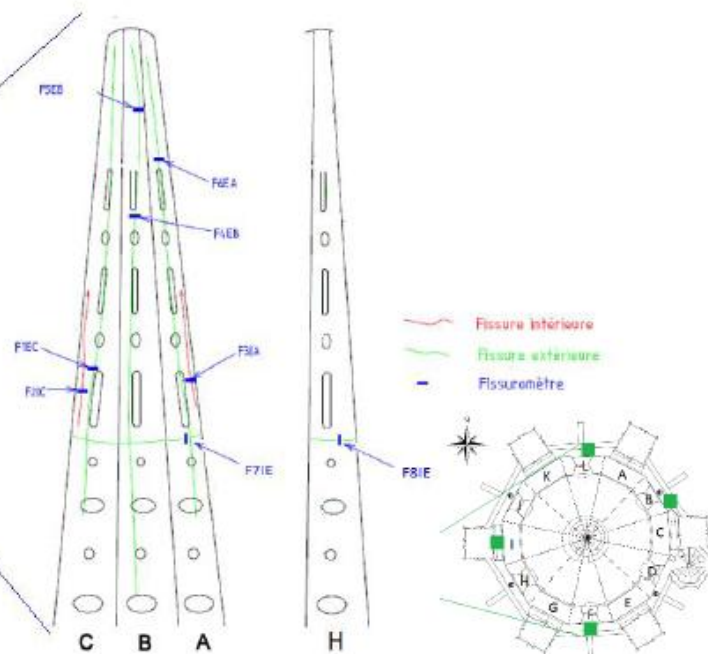
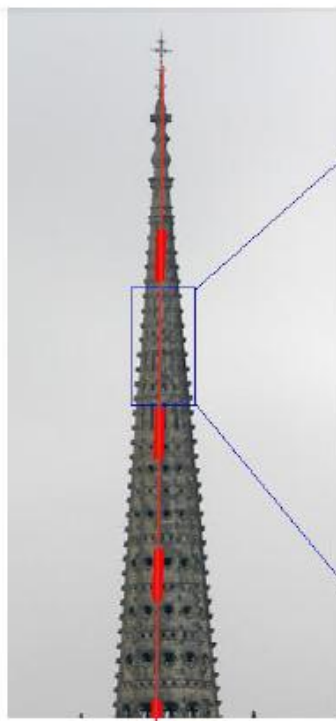


# Suivi métrologique de l'ouvrage : cinématique & évolution des pathologies

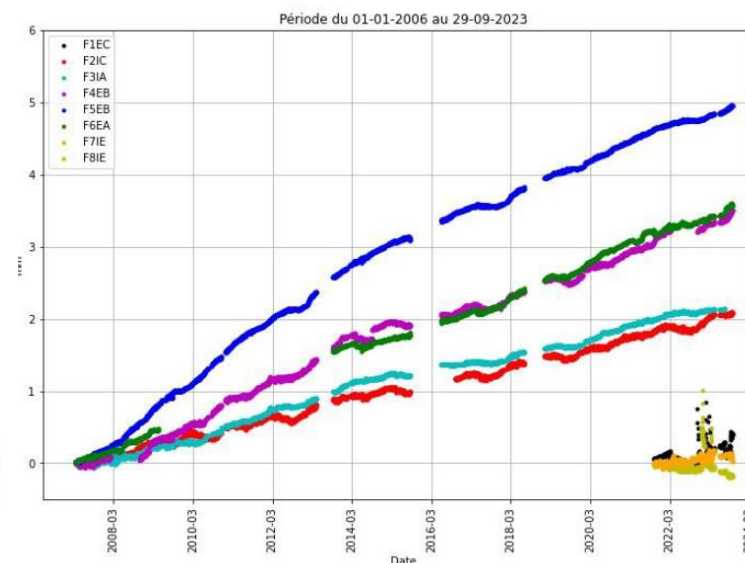


## Instrumentation

- Température
- Suivi fissurométrique (suivi des désordres)
- Suivi topographique & inclinométrique / pendule laser (suivi du mécanisme)

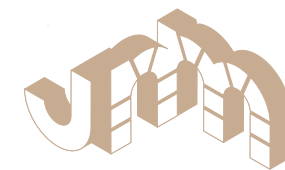


Rapport d'instrumentation, Sites



Crédit photo I2M, S. Morel

# Travaux de Restauration & de Confortement



**MOA :** Bordeaux Métropole, Service Bâtiments Culturels et Culturels

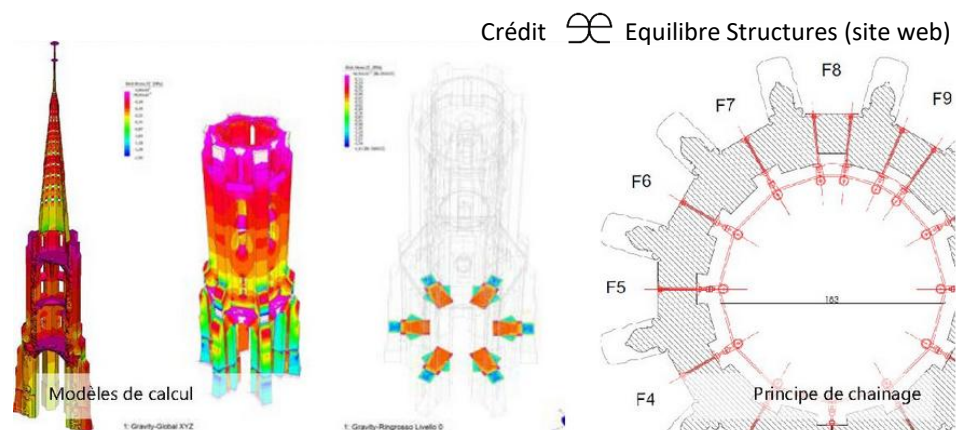
**MOE :** ACMH Agence GOUTAL, Architecture et Patrimoine  
& BET Equilibre Structures [*phases DIAG & MOE*]

**Début :** 2013 / **Fin :** 2025

**Objectif des travaux :** restauration de la tour présentant des altérations classiques de la maçonnerie & confortement de la partie flèche

→ **identification de l'origine des désordres**

→ **validation d'une solution de confortement**



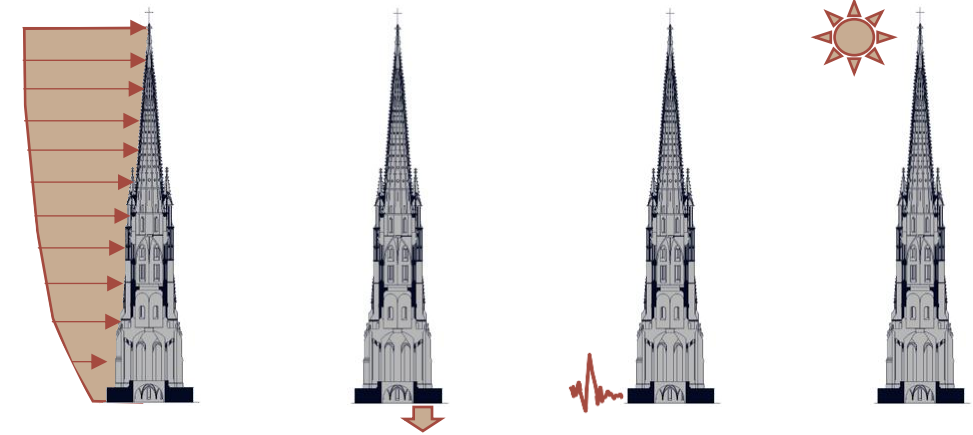


## Evaluation de différentes sources potentiellement à l'origine des désordres

- ~~Efforts de vent~~
- ~~Tassement d'appuis~~
- ~~Sollicitations dynamiques / vibratoires~~
- Sollicitations thermiques journalières

### → hypothèses

- (i) chargements thermiques journaliers  
= **moteur de la fissuration**
- (ii) effet « cliquet » rendant impossible la re-fermeture des fissures (accumulation de débris de pierre favorisée par l'angle du parement externe de la flèche)  
= **rôle de catalyseur**
- (iii) corrosion de l'enrayure du mât de la croix  
= **initiation de la fissuration**

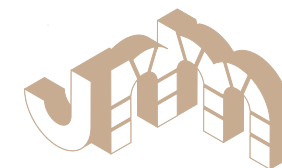


### → Hypothèses à valider & à conforter via accompagnement scientifique

Validation des hypothèses à la limite de l'expertise du BET  
→ recours à des approches de modélisation avancées nécessaire (accompagnement scientifique)



# Accompagnement Scientifique



► Convention de **Recherche et Développement partagés**  
relative à l'évaluation structurale de la flèche Saint-Michel de Bordeaux

► Convention conclue entre :

- **Bordeaux Métropole** (A. SANTANGELO & P. DELLA LIBERA)
- **l'Université de Bordeaux / I2M** (S. MOREL, J.C. MINDEGUIA, T. PARENT)
- **MiMeTICS** (P. TAFOREL)



} *consortium scientifique*

► spin off adossée au **LMGC / Université Montpellier** (F. DUBOIS)



► Etude à destination de :

- la **MOA : Bordeaux Métropole**
- la **MOE : Agence GOUTAL** (O. VIGOUREUX) & **BET Equilibre Structures** (N. CHEVAL)



► Etude **co-construite avec la MOE** et en **complément de l'expertise du BET**

► Etude composée de trois parties :

- identification des sources mécaniques de la fissuration de la partie sommitale de la flèche
- étude de la solution de confortement par chainage passif proposée par le BET
- établissement d'un protocole de suivi et d'instrumentation de la flèche

} *Étude menée majoritairement  
en phase travaux ...  
[Octobre 2023 – Mars 2024]*

# Stratégie de Modélisation



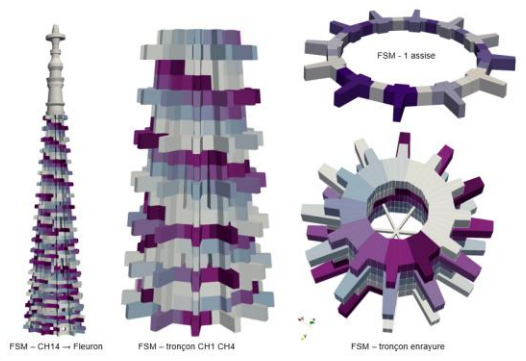
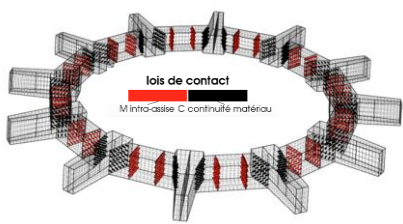
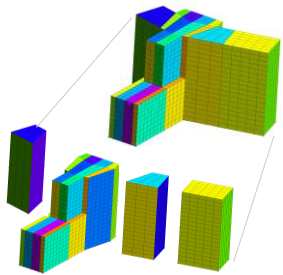
## Construction d'un modèle géométrique adapté à la stratégie de modélisation



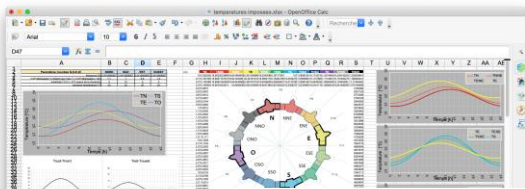
### Construction des modèles de calculs

cellule périodique

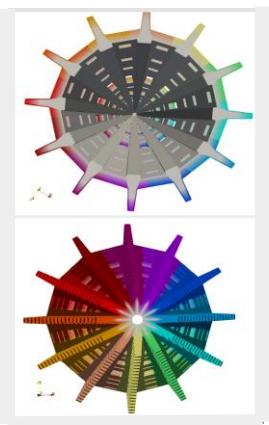
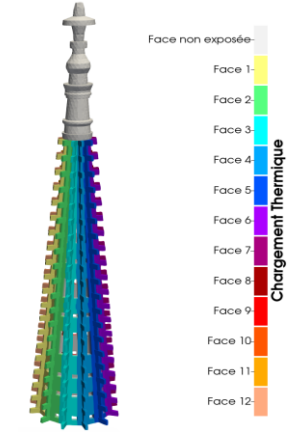
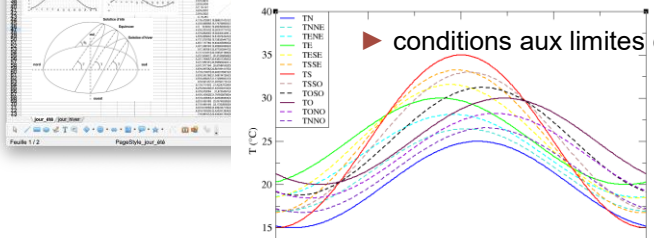
assemblage



données / relevés



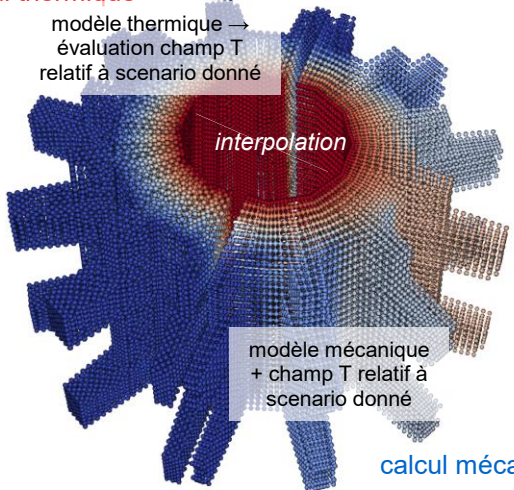
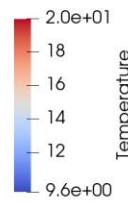
conditions aux limites calcul thermique



scenario

calcul thermique

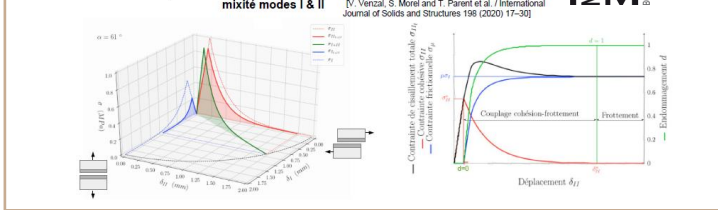
modèle thermique → évaluation champ T relatif à scenario donné



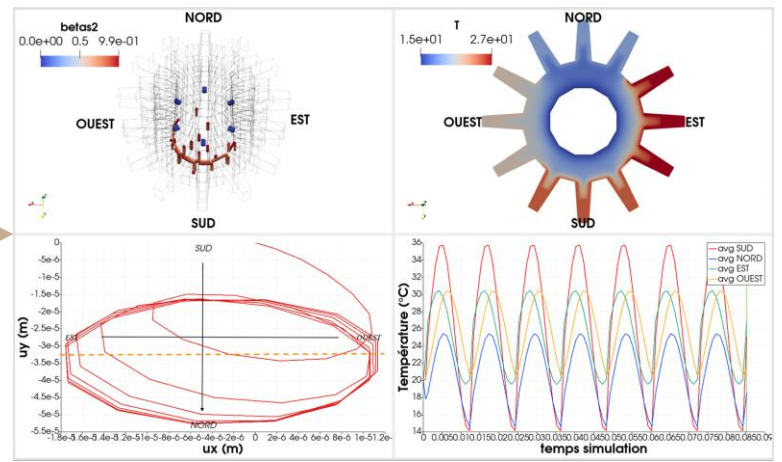
modèle mécanique + champ T relatif à scenario donné

calcul mécanique

### Calibration des modèles



Réponse scenario



Construction de scenarii thermiques sur la base de l'analyse des données



Gestion des Simulations



Évolution du scenario



Analyse (endommagement / trajectoire) & comparaisons aux données métrologiques

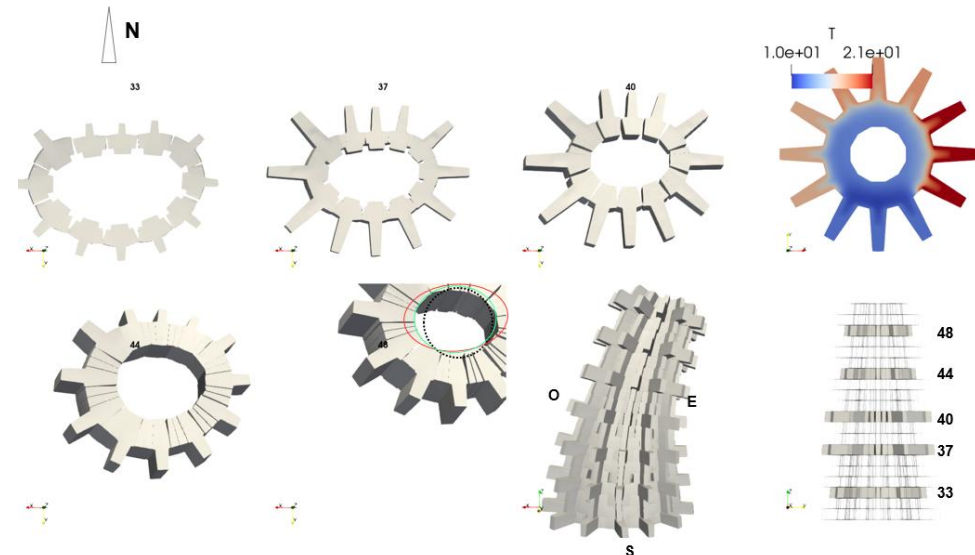
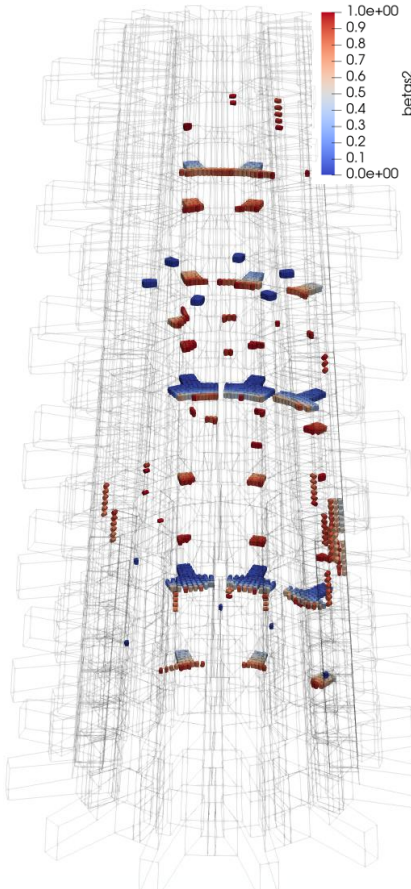
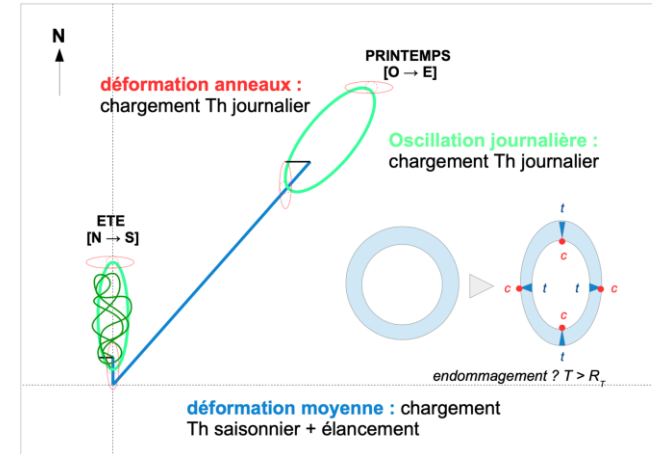


# Comportement de la flèche & endommagement



## Comportement nominal / Signature cinématique

- ▶ **déformation moyenne** relative à un contexte thermique **saisonnier**
- ▶ comportement **oscillatoire** autour de la **déformation moyenne** relatif au contexte thermique **journalier**
- ▶ déformations annulaires plus ou moins marquées dépendant du contexte thermique **journalier** & de la **localisation** dans la structure
- ▶ impact d'autres facteurs (masse du fleuron, élancement de la flèche, ouvertures oblongues, etc) sur la cinématique de la flèche non étudié



## Fissuration d'origine multifactorielle

- ▶ nervures proéminentes + crochets = **échangeur thermique**
- ▶ **origine / initiation** : corrosion de l'enrayure
- ▶ **moteur** : excitations thermiques journalières pathologiques
- ▶ **facteur aggravant** : effet diaphragme induit par l'enrayure
- ▶ **catalyseur** : effet « cliquet » ? non pris en compte

Changement du mode de fixation de l'enrayure  
**en phase travaux** (annulation des efforts radiaux)

# Solution de confortement



CH = fibre de carbone  
+ résine époxy



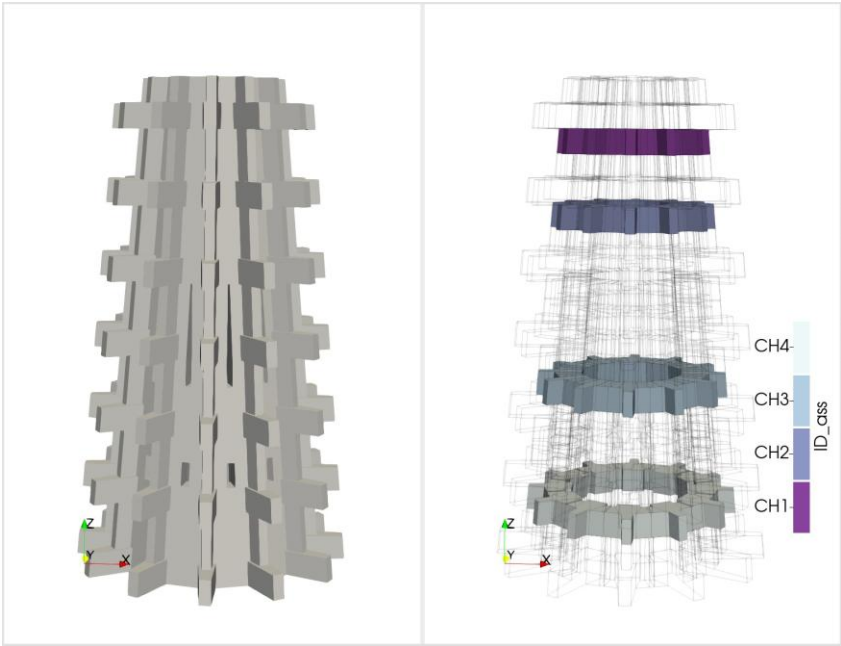
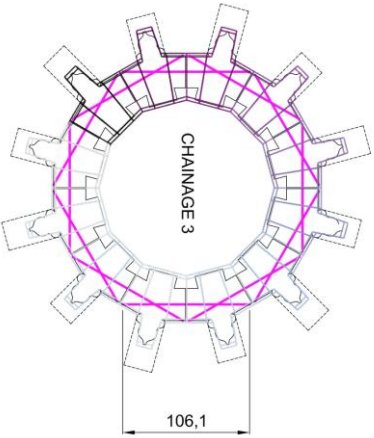
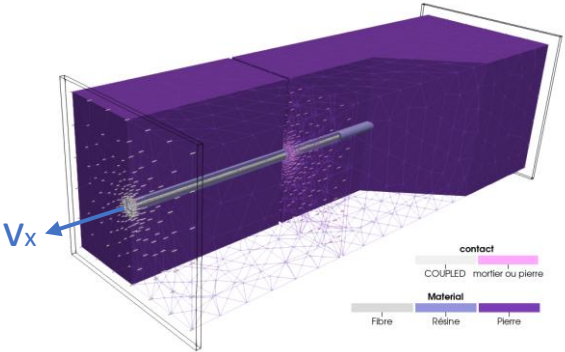
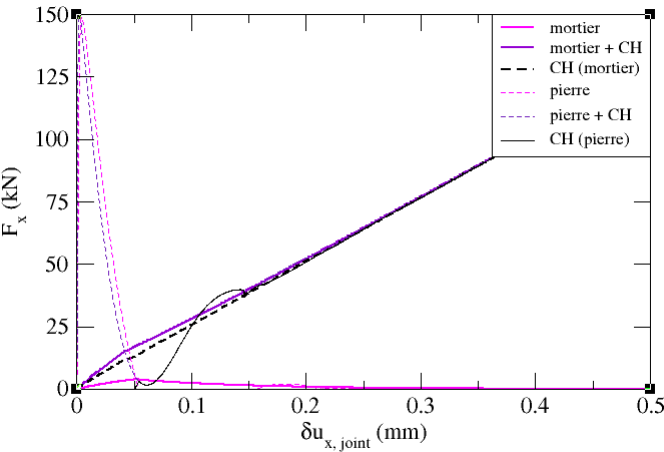
- ▶ comportement mécanique de la solution de confortement [VER]
- ▶ comportement mécanique de la structure chaînée [tronçons]
- ▶ **compatibilité** de la solution de renforcement avec le fonctionnement de l'ouvrage ?
- ▶ **prévention** de l'initiation du phénomène de fissuration
- ▶ **limitation** de la propagation des fissures
- ▶ **sécurisation** de l'ouvrage fissuré

Mise en évidence via la modélisation difficile / Solution néanmoins prometteuse compte tenu de la réponse du VER

## Compatibilité mise en évidence

- Augmentation de la performance des joints de mortier
- Limitation des ouvertures de fissure (blocs et joints de mortier)
- Peu ou pas peu d'impact sur la rigidité effective de l'ouvrage
- Optimisation du dimensionnement des chaînages

Comportement VER



Comportement tronçon



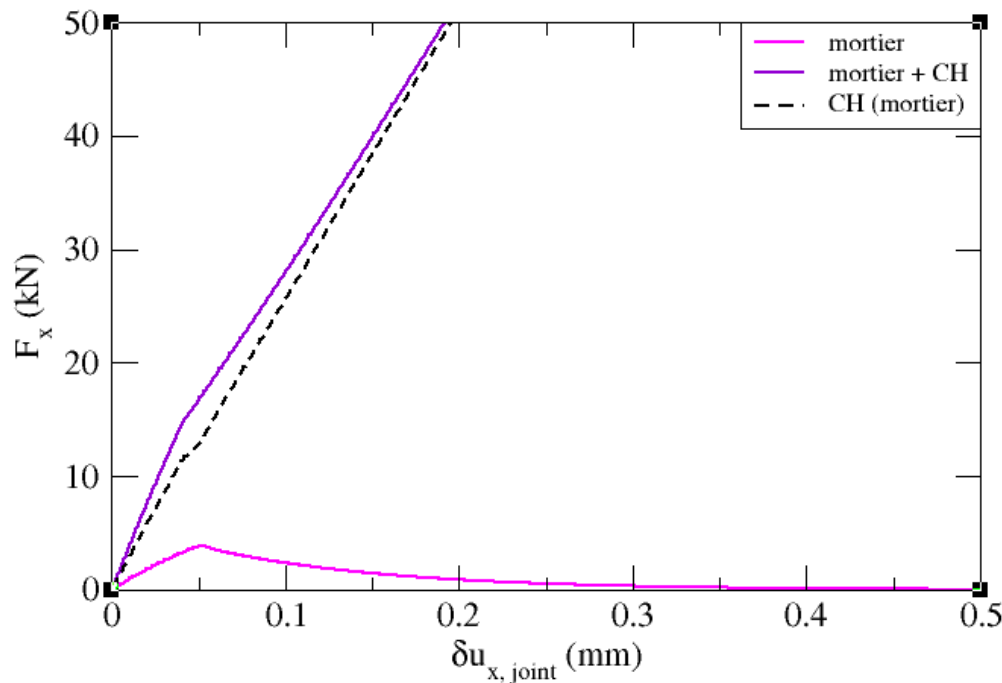
# Solution de confortement



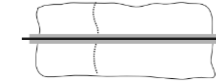
## ► interface « mortier »



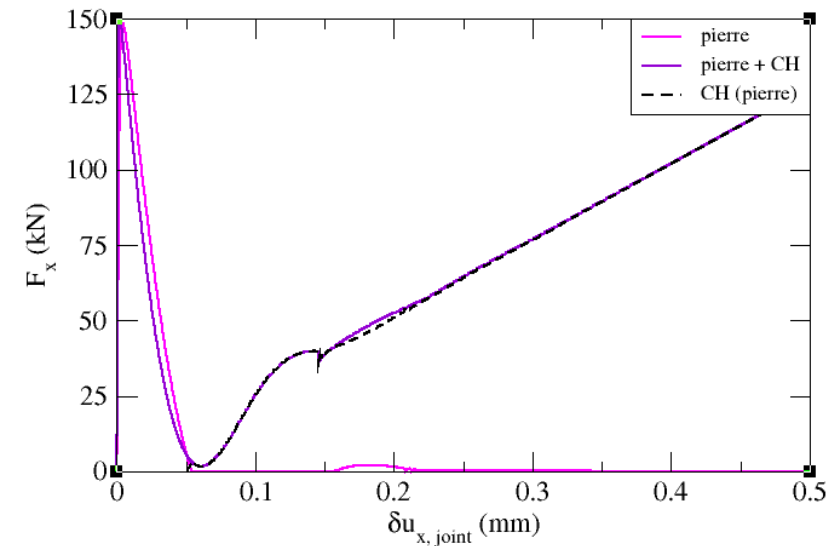
- le renforcement par fibre de carbone induit une légère rigidification de l'assemblage chaîné
- le renforcement par fibre de carbone permet au joint de mortier de tolérer des déplacements plus importants tout en continuant à transmettre des efforts



## ► interface « pierre »



- le renforcement par fibre de carbone n'impacte pas le comportement des blocs (pas de rigidification)
- pas d'impact du chaînage sur la réponse en fissuration de la pierre
- la réponse du chaînage intervient après fissuration des blocs (mise en charge progressive du chaînage en fonction du niveau d'endommagement du bloc)



# Bilan de l'Accompagnement pour l'opération FSM



## Points clés

- ▶ **Complémentarité** entre le **diagnostic initial** réalisé par la **MOE** et approche scientifique mise en œuvre pour valider les hypothèses et les solutions de confortement
- ▶ **Etude menée en étroite collaboration** (*environ 15 réunions de travail en phase travaux sur la période*) permettant :
  - i) **l'adaptation des travaux de modélisation (agilité)**  
(*sur la base des échanges autour de l'analyse des résultats hebdomadaires*)
  - ii) **l'appropriation et l'assimilation par la MOE** des résultats en continu
  - iii) la possibilité pour la MOE d'**adapter les dispositions constructives** et/ou **solutions de confortement** à mettre en œuvre en cours d'étude
- ▶ Contribue à **diminuer les risques** de l'opération de restauration
- ▶ Aide à la **définition du suivi métrologique** (et possiblement à l'interprétation des données mesurées)





# Merci de votre attention

## Contacts :

Paul TAFOREL, MiMeTICS : [ptaforel@mimetics-engineering.fr](mailto:ptaforel@mimetics-engineering.fr)

Stéphane MOREL, I2M : [stephane.morel@u-bordeaux.fr](mailto:stephane.morel@u-bordeaux.fr)

Olivier VIGOUREUX, Agence GOUTAL : [Olivier.Vigoureux@mgoutal.fr](mailto:Olivier.Vigoureux@mgoutal.fr)

Nicolas CHEVAL, Equilibre Structures : [n.cheval@equilibre-structures.fr](mailto:n.cheval@equilibre-structures.fr)

Andréa SANTANGELO, Bordeaux Métropole : [a.santangelo@bordeaux-metropole.fr](mailto:a.santangelo@bordeaux-metropole.fr)

Frédéric DUBOIS, LMGC : [frederic.dubois@umontpellier.fr](mailto:frederic.dubois@umontpellier.fr)

Jean-Christophe MINDEGUIA, I2M : [jean-christophe.mindeguia@u-bordeaux.fr](mailto:jean-christophe.mindeguia@u-bordeaux.fr)

Thomas PARENT, I2M : [thomas.parent@u-bordeaux.fr](mailto:thomas.parent@u-bordeaux.fr)

Journées Nationales de la Maçonnerie

5ème édition | Bordeaux

12 et 13 juin 2025