



# IMGC

## ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

Journée Technique  
Vendredi 21 septembre 2017  
à l'Amphithéâtre AUGUSTE BRULÉ

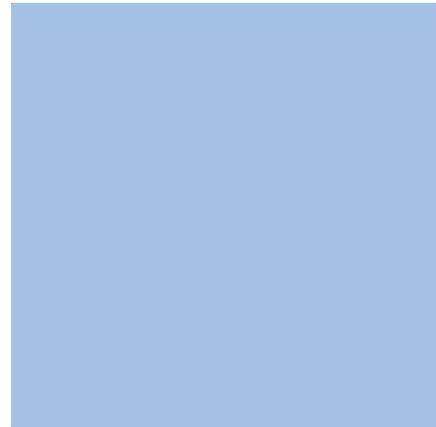


# Le calcul des maçonneries endommagées et fissurées

Nathalie DOMEDE – LMDC – INSA de Toulouse



# ... dédié au diagnostic structurel



## Application à un monument du 13<sup>ème</sup> siècle

Voutes gothiques

Maçonnerie de pierre calcaire

# Sommaire

- Méthodologie de diagnostic
- Méthodologie développée au LMDC
- Méthodes de calcul existantes
- Modélisation de la maçonnerie
- Application sur un monastère gothique

# Méthodologie de diagnostic

- Méthodologie développée au LMDC dans le cadre de contrats industriels avec

**SNCF** (thèse de Thomas Stablon)

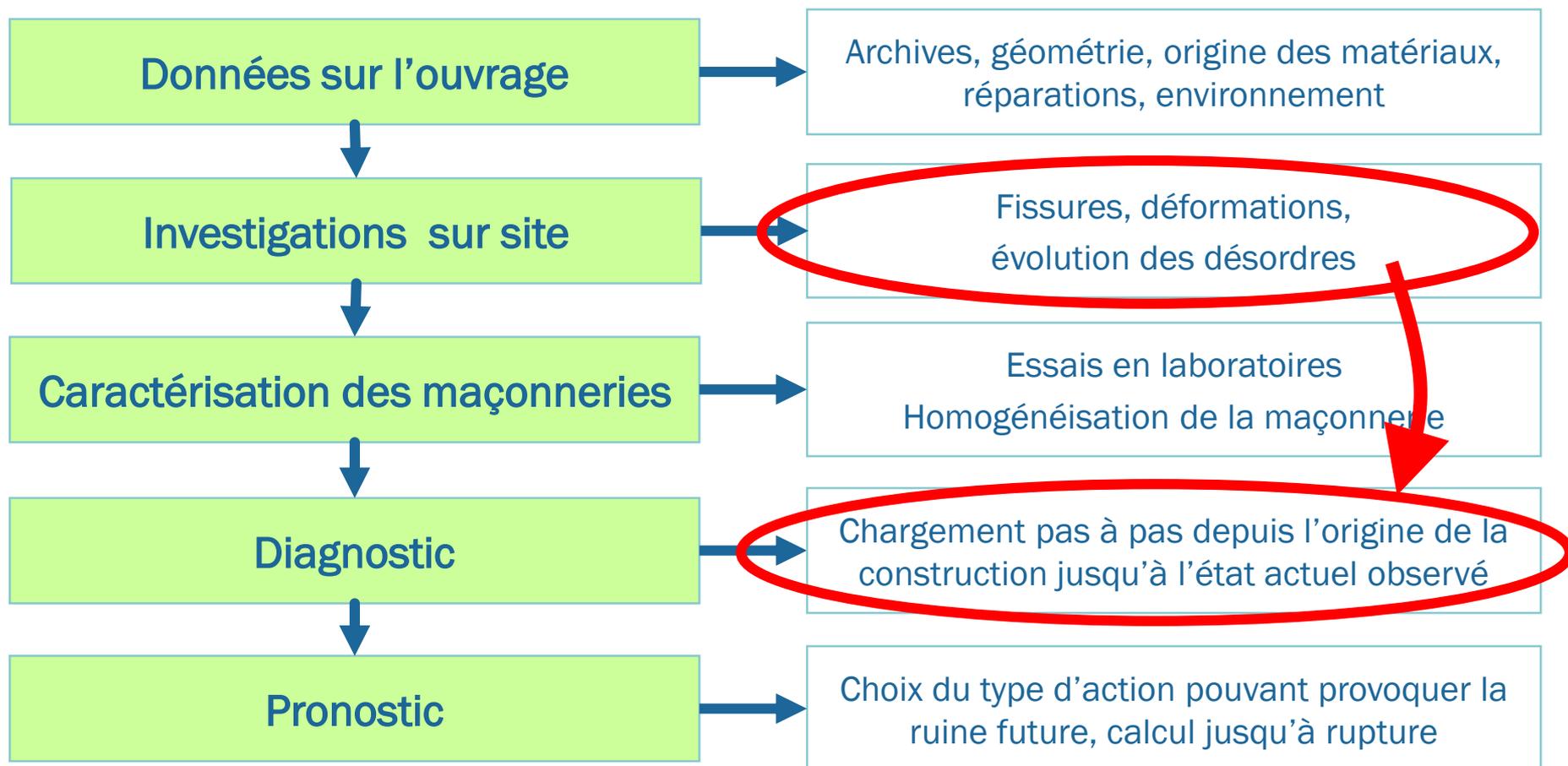
**Ginger CEBTP** (thèse de Thomas Parent)

en demande d'outils d'aide au :

- **DIAGNOSTIC** : cause des pathologies ?
  - **PRONOSTIC** : aptitude au service ? Marge de sécurité ?
- Méthodologie en 5 phases

Le calcul est un outil d'aide à l'analyse structurelle

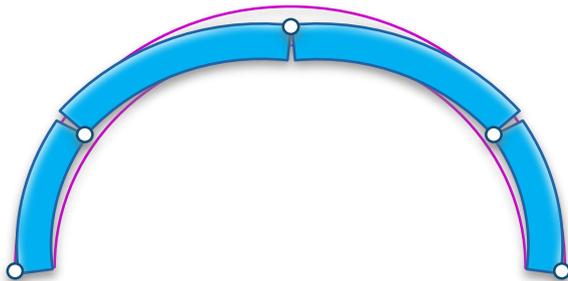
# Méthodologie développée au LMDC



# Méthodes de calcul existantes

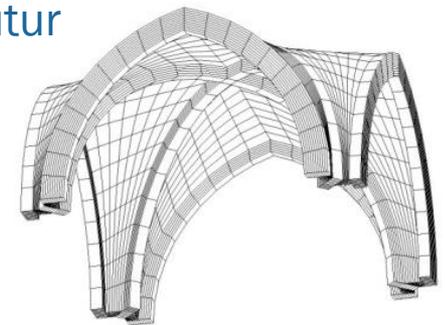
## Analyse limite

- Le schéma de fissuration est une hypothèse de calcul
- L'action est une force  $Q$
- $Q$  limite ?
- On n'explique pas l'état actuel observé
- Calcul 2D, équilibre limite 3D



## Calcul pas à pas

- Le schéma de fissuration est déterminé par le calcul
- Tout type d'action : force, déplacement, température, fluage, etc.
- Calcul pas à pas
- On peut expliquer l'état observé et chercher l'état futur
- Calcul 3D



# Modélisation de la maçonnerie

## En traction:

localisation de la fissuration

Critère de Rankine

$D_t$  variable d'endommagement

$w$  ouverture de fissure

Modèle d'Alain Sellier

## En compression:

Endommagement  
et plasticité

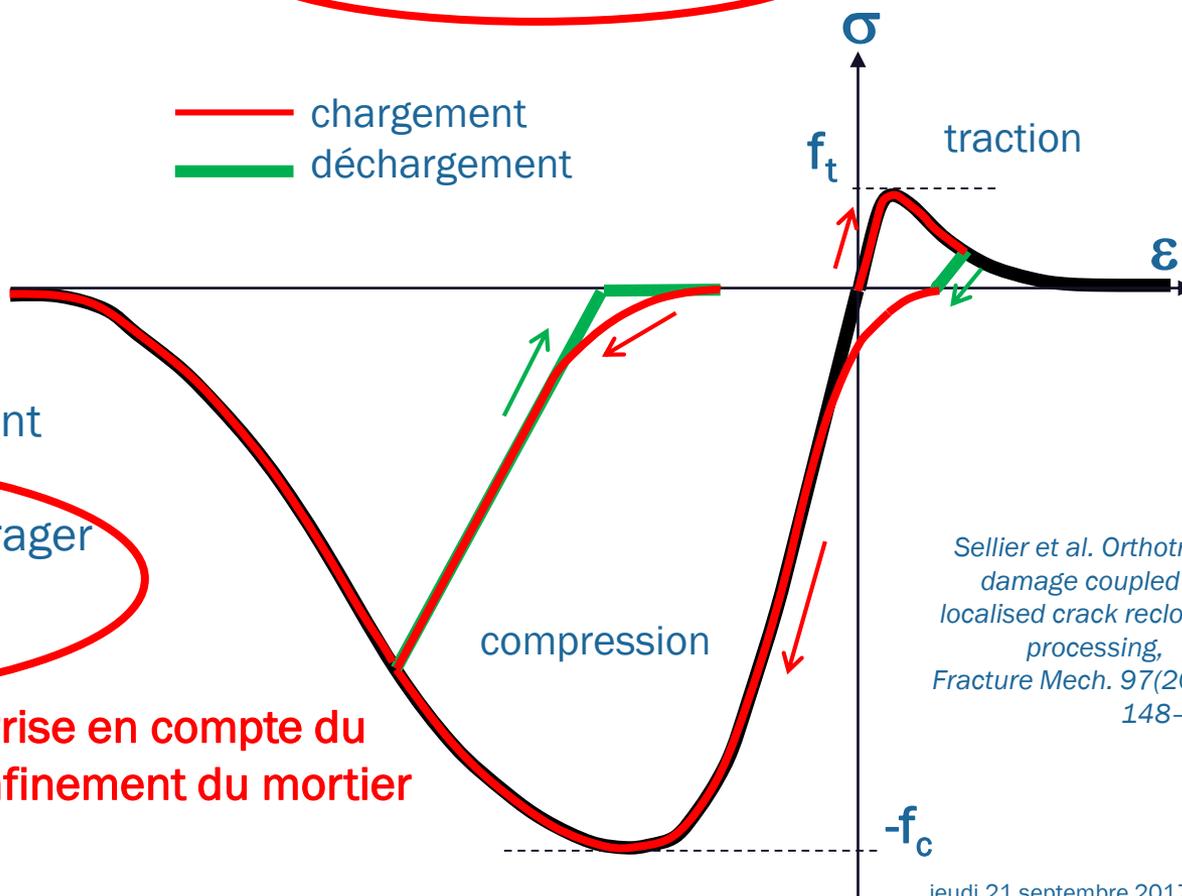
Critère de Drucker Prager

$D_c$  variable d'endommagement

$\delta$  coefficient de Drucker Prager

$\beta$  coefficient de dilatance

Prise en compte du  
confinement du mortier



# Détermination des paramètres



Deux types de matériaux :

- **Pierre calcaire**
- **Mortier de chaux**

Tests en laboratoire sur pierre, mortier et joint  
(compression, traction, physico-chimie)



# Variabilité des pierres

- Variabilité en fonction des zones de l'édifice
- Dispersion naturelle des caractéristiques

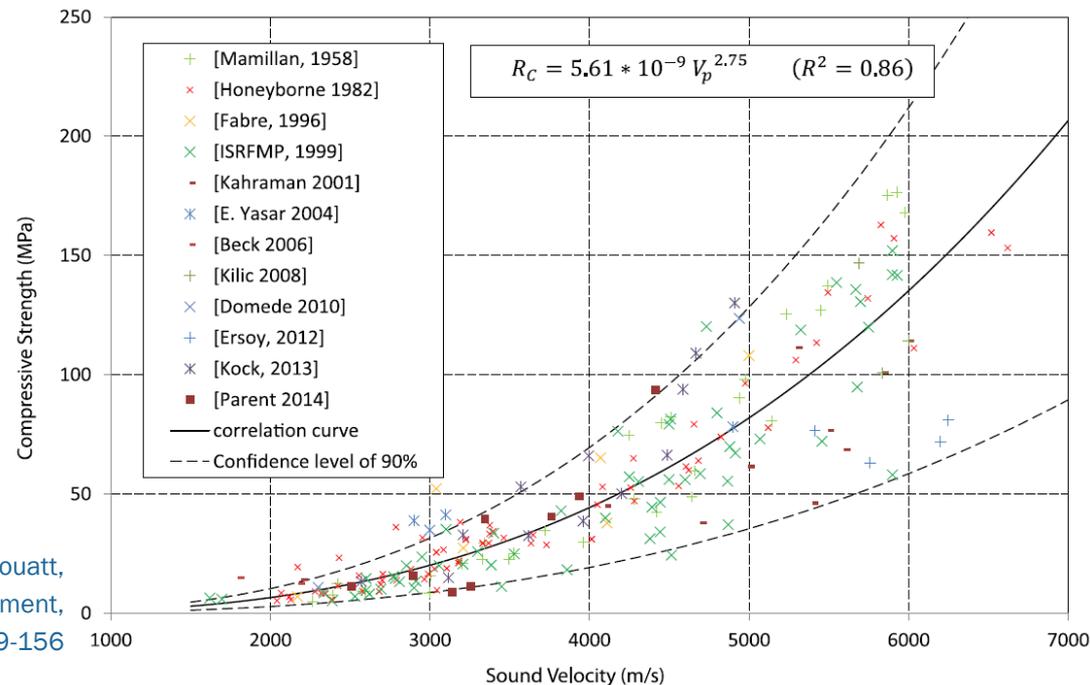
Besoin d'une méthode d'identification rapide et non destructive :

Vitesse du son  $V$

Couplée à des lois de corrélation  
 $V$  / masse volumique,  
 $V$  /  $f_c$ ,  $V$  /  $f_t$ ,  $V$  /  $E_{\text{young}}$ ,  $V$  /  $\nu$   
 établies sur 200 calcaires  
 différents (1150 échantillons)

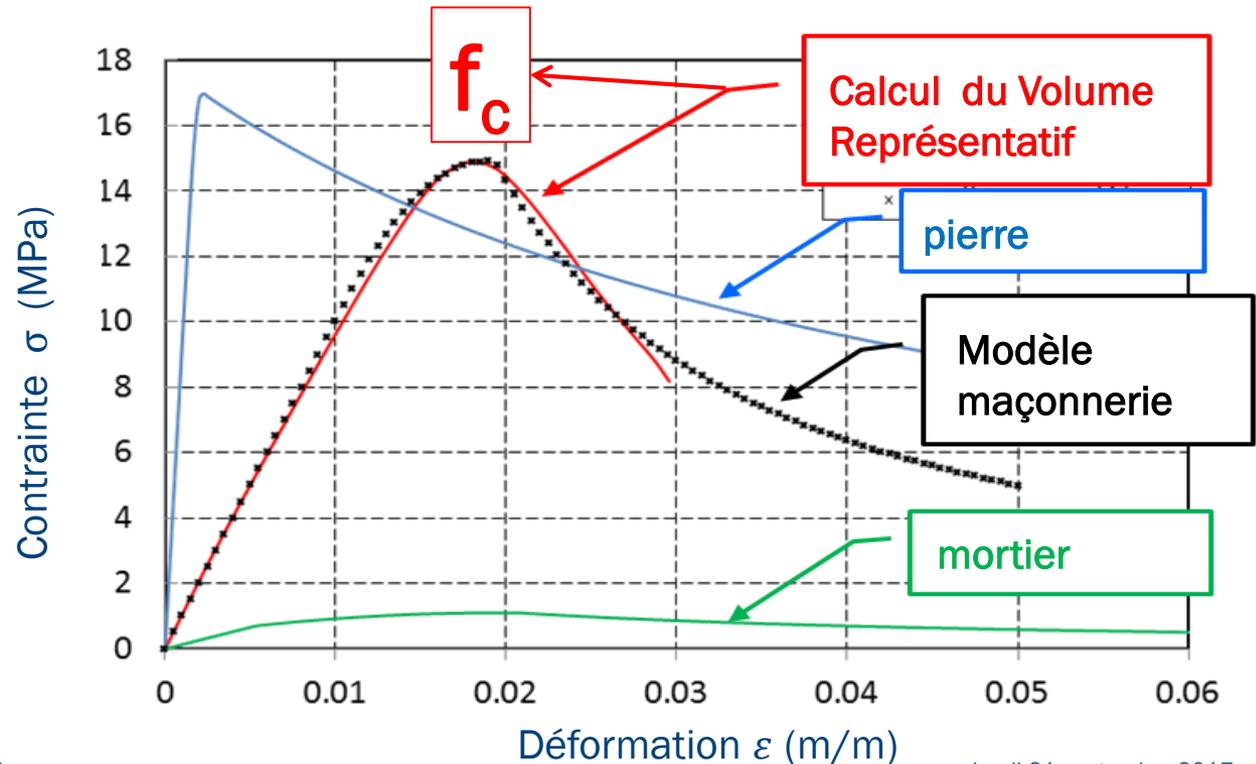
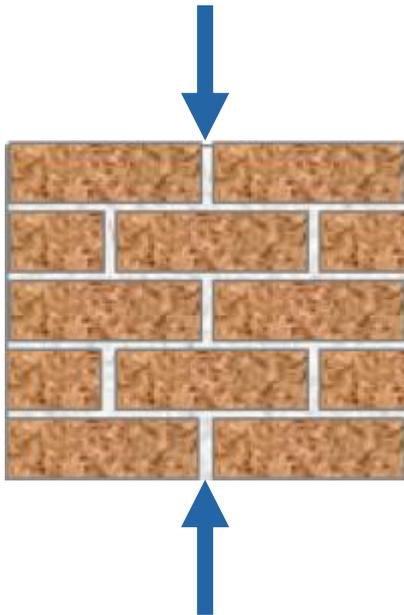
Parent, Domede, Sellier, Mouatt,

Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement,  
 Int. J. of Rock Mech. & Min. Sc. 79 (2015) 149-156

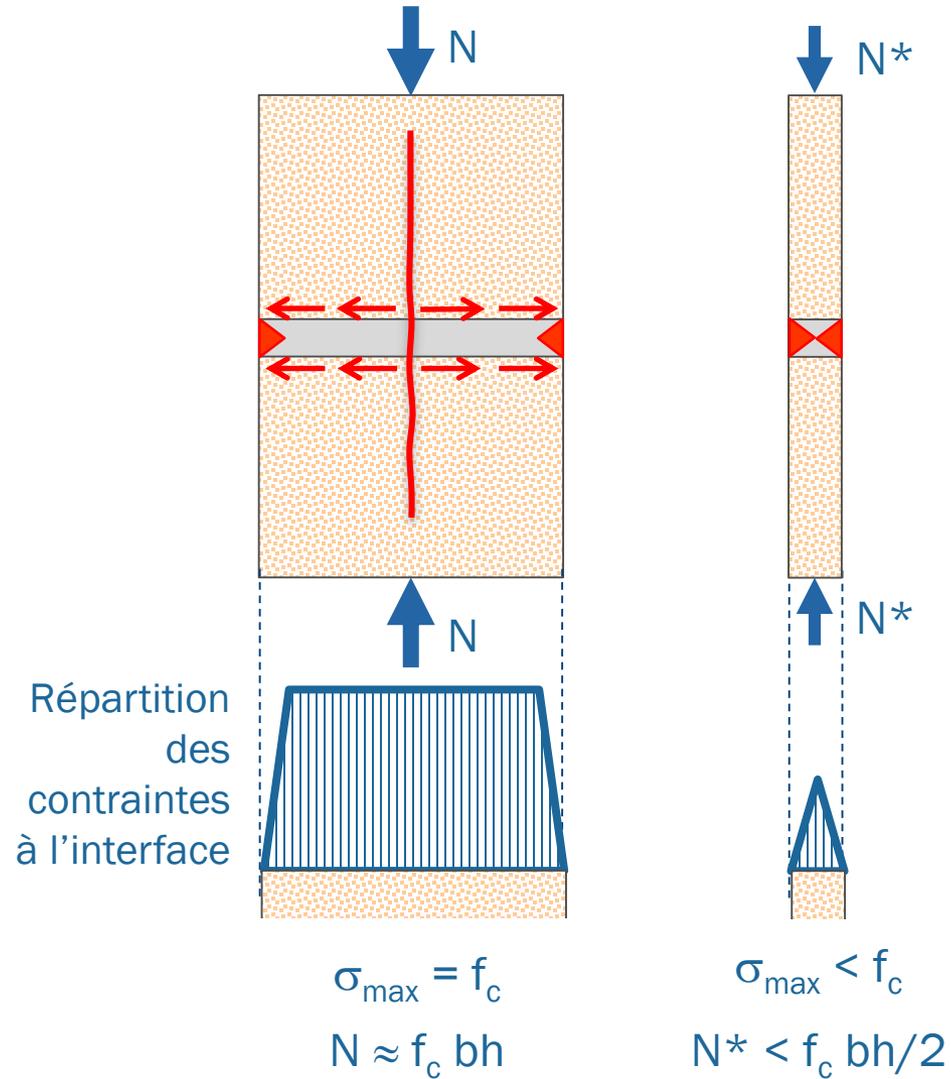


# Homogénéisation en compression

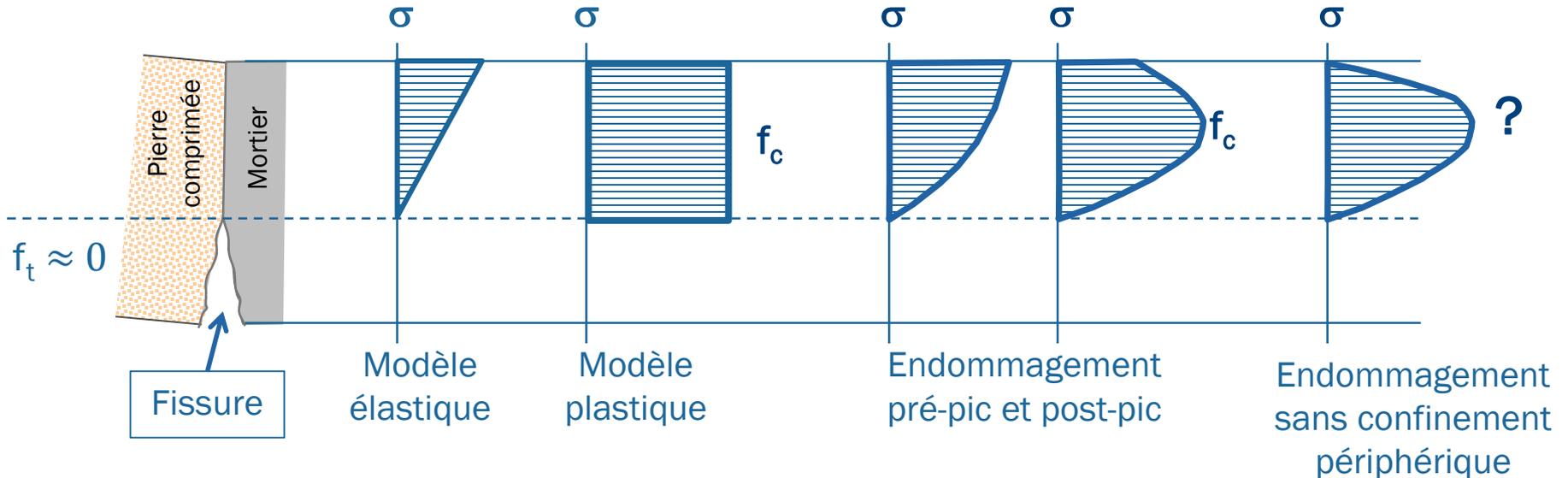
- La résistance en compression  $f_c$  de la maçonnerie est obtenue par calcul d'un muret, ou essai d'un muret ou abaqués (essais ...)
- Cas des ouvrages anciens :  $f_c(\text{pierre}) > f_c(\text{mortier})$
- $f_c(\text{maçonnerie})$  proche de  $f_c(\text{pierre})$  grâce au **confinement du mortier**



# Confinement du mortier comprimé



# Maçonnerie fléchie et fissurée



$$f_{\text{homogène}} = \chi \frac{f_c}{\gamma_m}$$

$\chi = 1$  structures massives  
 $\chi < 1$  structures minces

Marge de sécurité :

$$C = \frac{\sigma_{\text{max}}}{f_{\text{homogène}}}$$

Pour l'étude de cas :

$$\chi = 2/3$$

$$\gamma_m = 2.9 \text{ à } 3.9$$

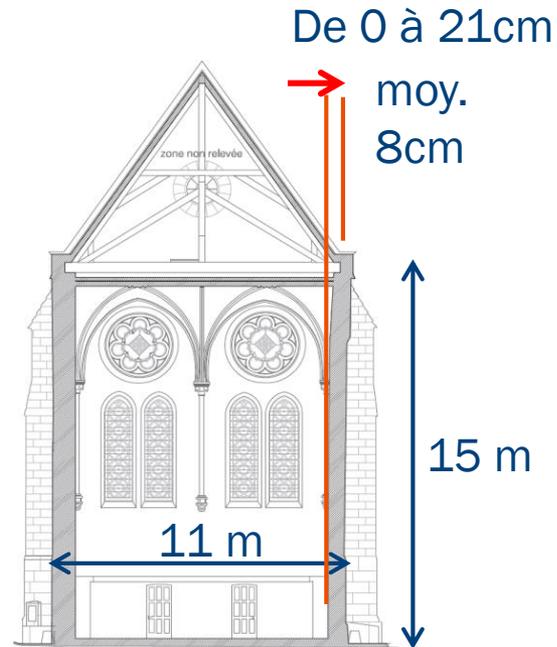
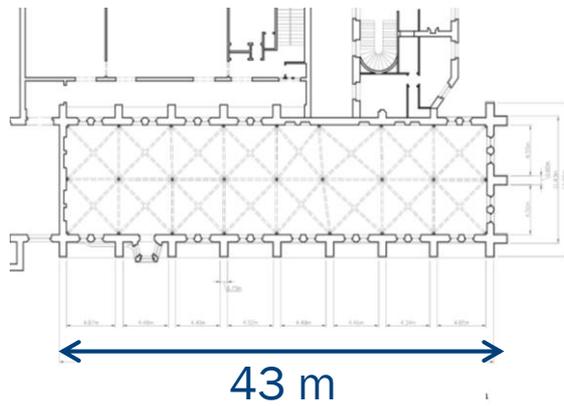


# Application sur un monastère du 13<sup>ème</sup> siècle

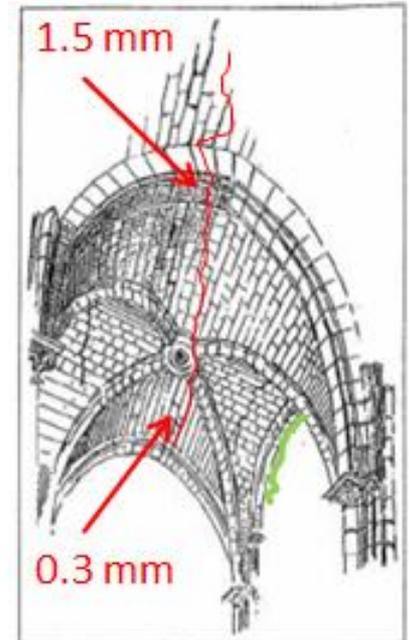
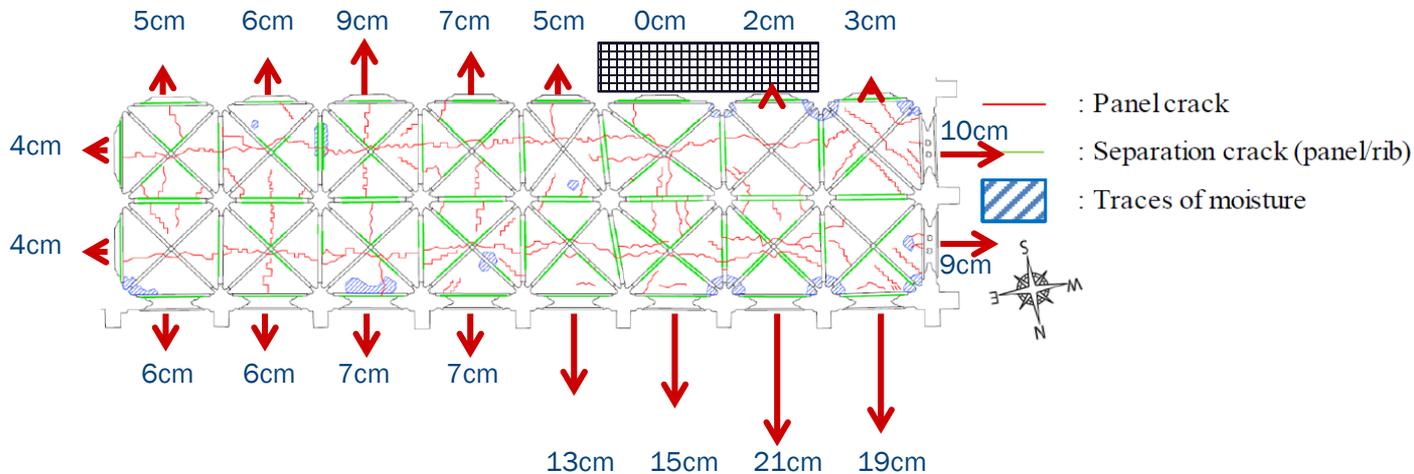
*Thèse de Thomas Parent  
CIFRE GINGER-CEBTP*



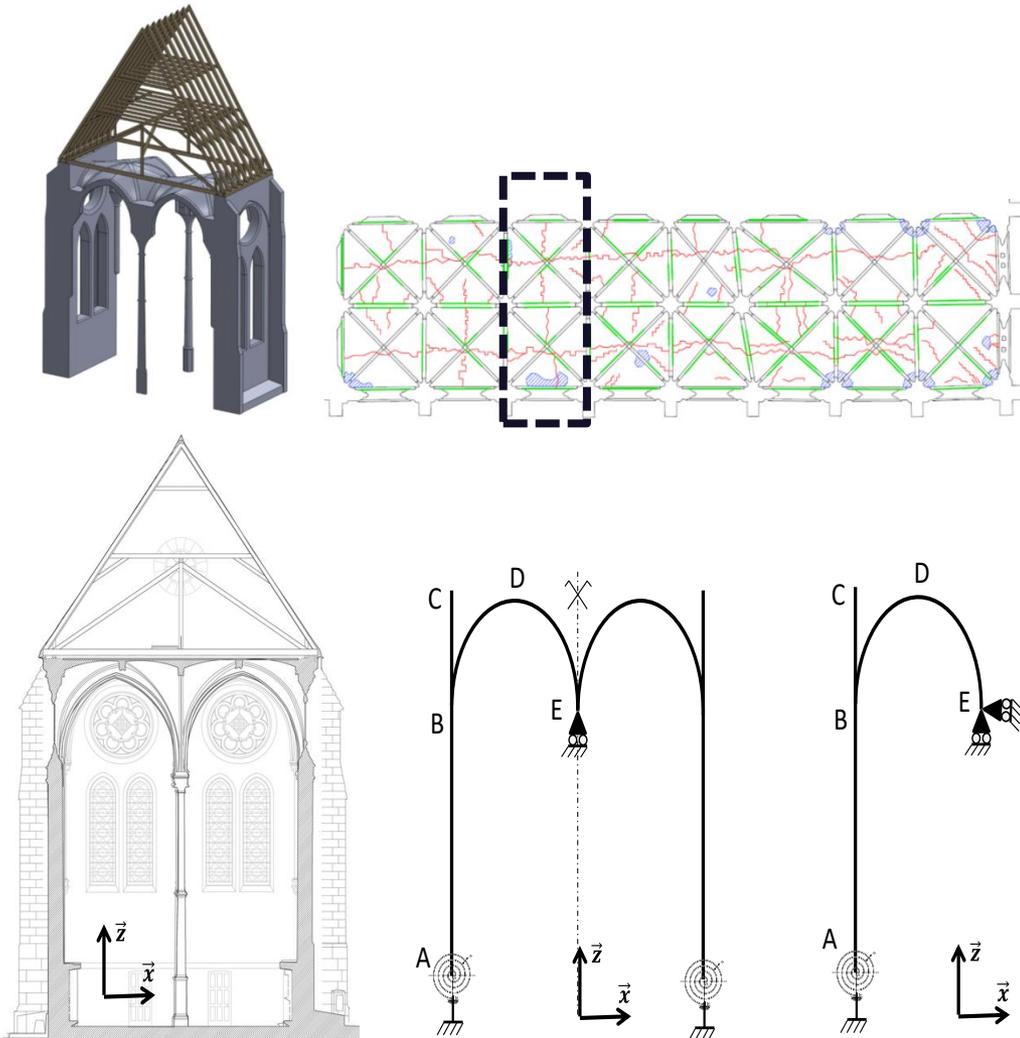
# Investigations sur site



Ouvertures de fissures jusqu'à 1,5mm

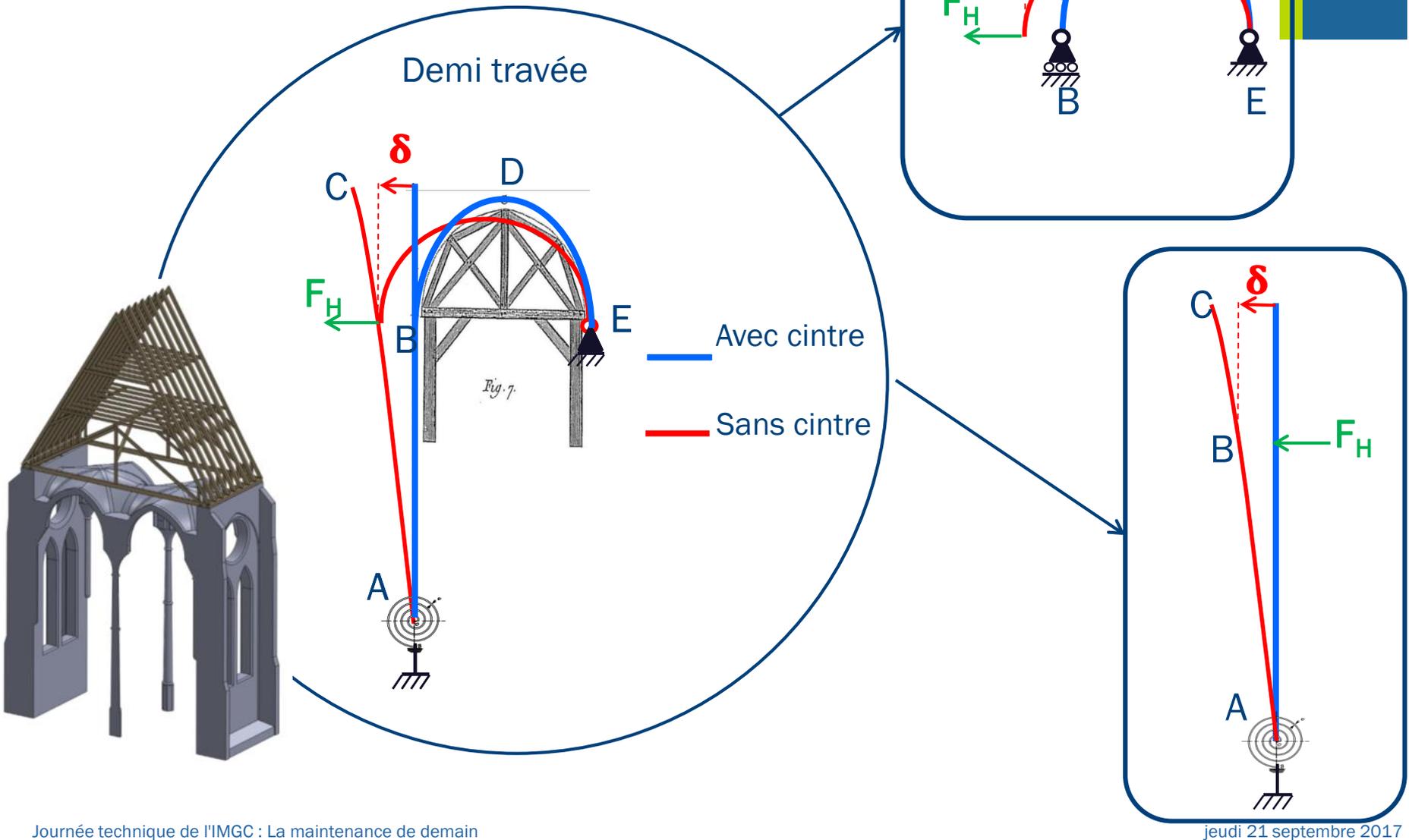


# Analyse structurelle

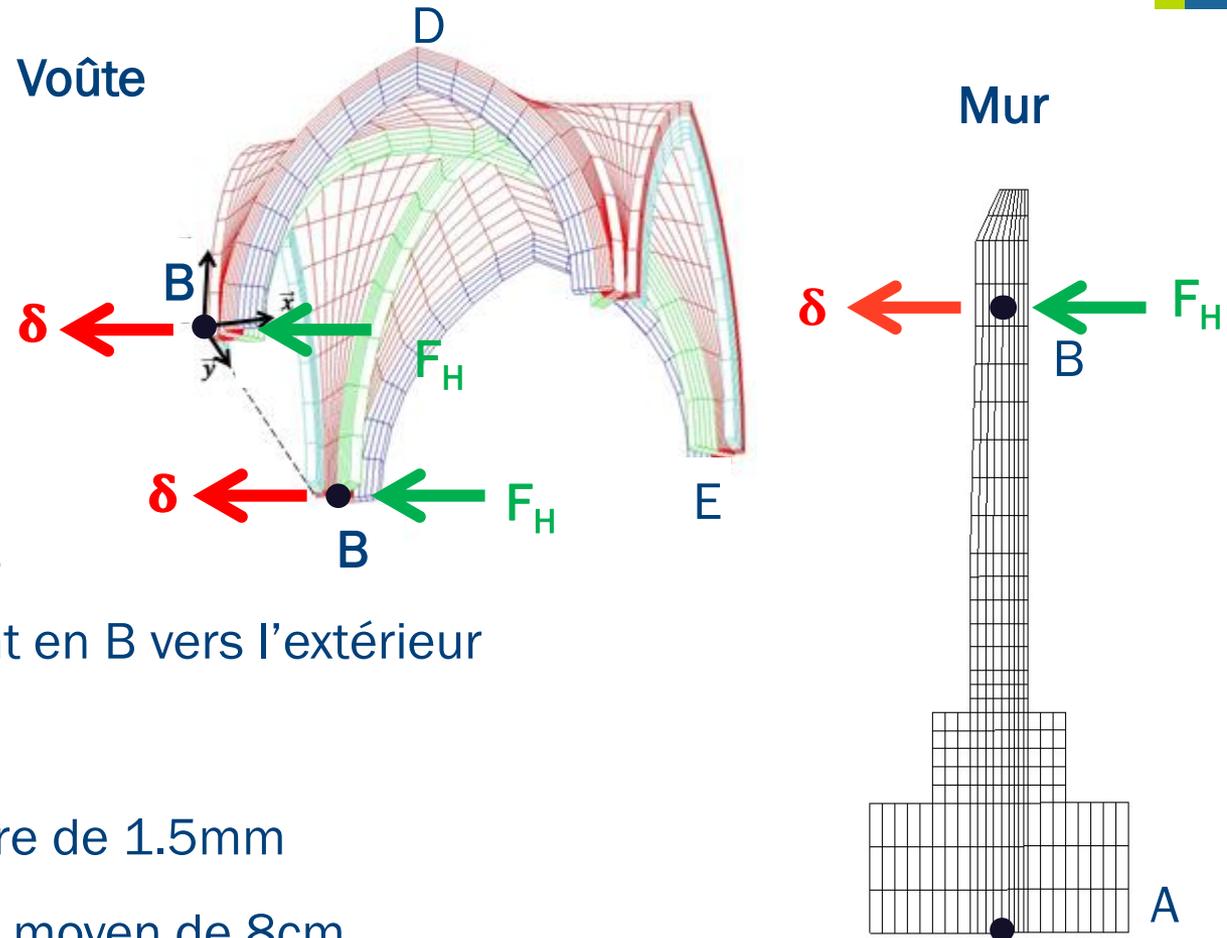


- Pas de charges appliquées
- Origine des fissures ?
  - Construction au 13<sup>ème</sup> siècle
  - Déplacement / rotation des fondations
  - Fluage de la maçonnerie
- Maillage d'une trame en 3D
- Calcul depuis la construction sur cintre jusqu'à aujourd'hui

# Deux calculs distincts



# Calculs éléments finis 3D



Actions :

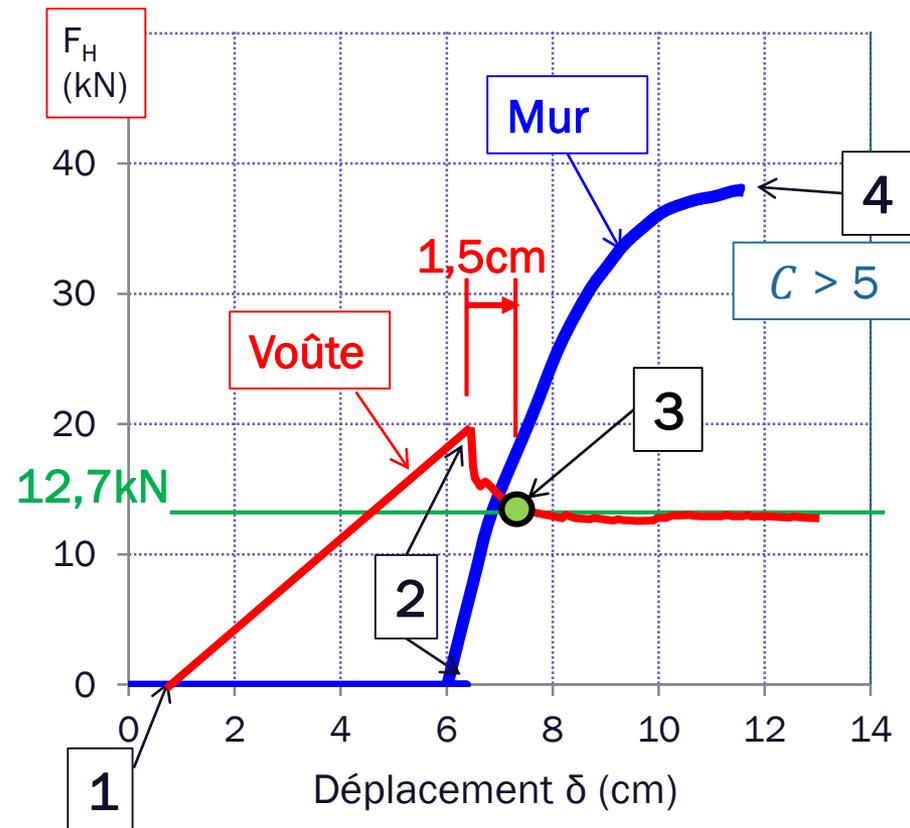
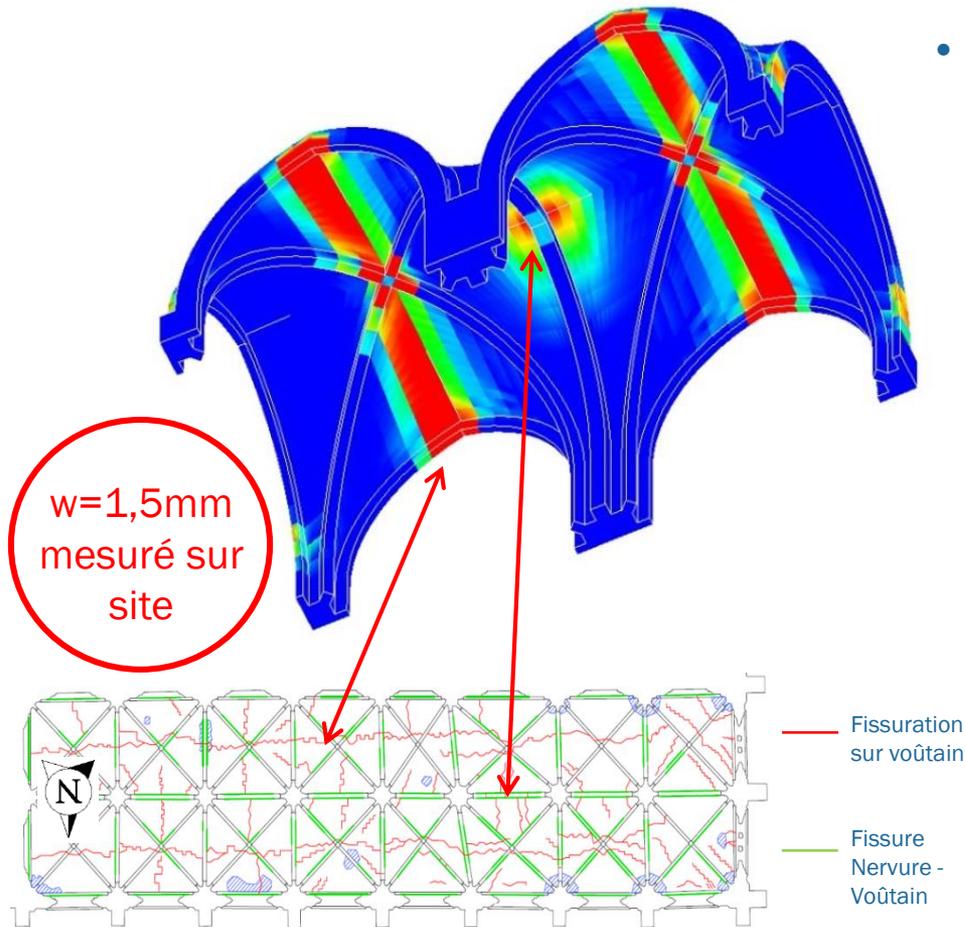
- Poids propre
- Déplacement en B vers l'extérieur

Situation actuelle :

- Voûte : fissure de 1.5mm
- Mur : dévers moyen de 8cm

# Résultats

- Actions :  
 1→2 = construction de la voûte  
 2→4 = déplacement en B jusqu'à arrêt du calcul
- Point 3 = situation actuelle  
 $w=1,5\text{mm}$  et  $\delta=7,5\text{cm}$



# Conclusion

Le calcul est l'une des étapes du diagnostic qui commence par une observation minutieuse des dommages actuels et de leur évolution.

La méthodologie proposée peut s'adapter à tout type d'ouvrage.

Elle permet d'expliquer les pathologies existantes puis d'évaluer l'aptitude au service et la marge de sécurité.

L'homogénéisation multi-échelle des maçonneries reste un sujet de recherche