



IMGC


ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

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

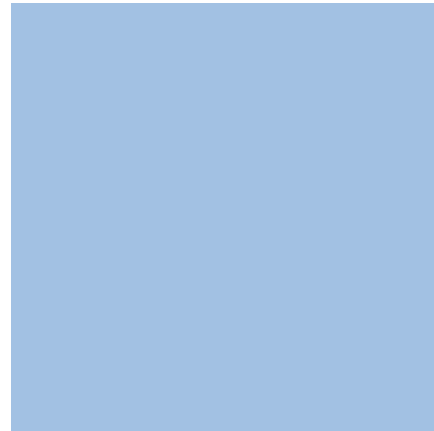


Le calcul des maçonneries endommagées et fissurées

Nathalie DOMEDE – LMDC – INSA de Toulouse



... dédié au diagnostic structurel



Application à un monument du 13^{ème} 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)

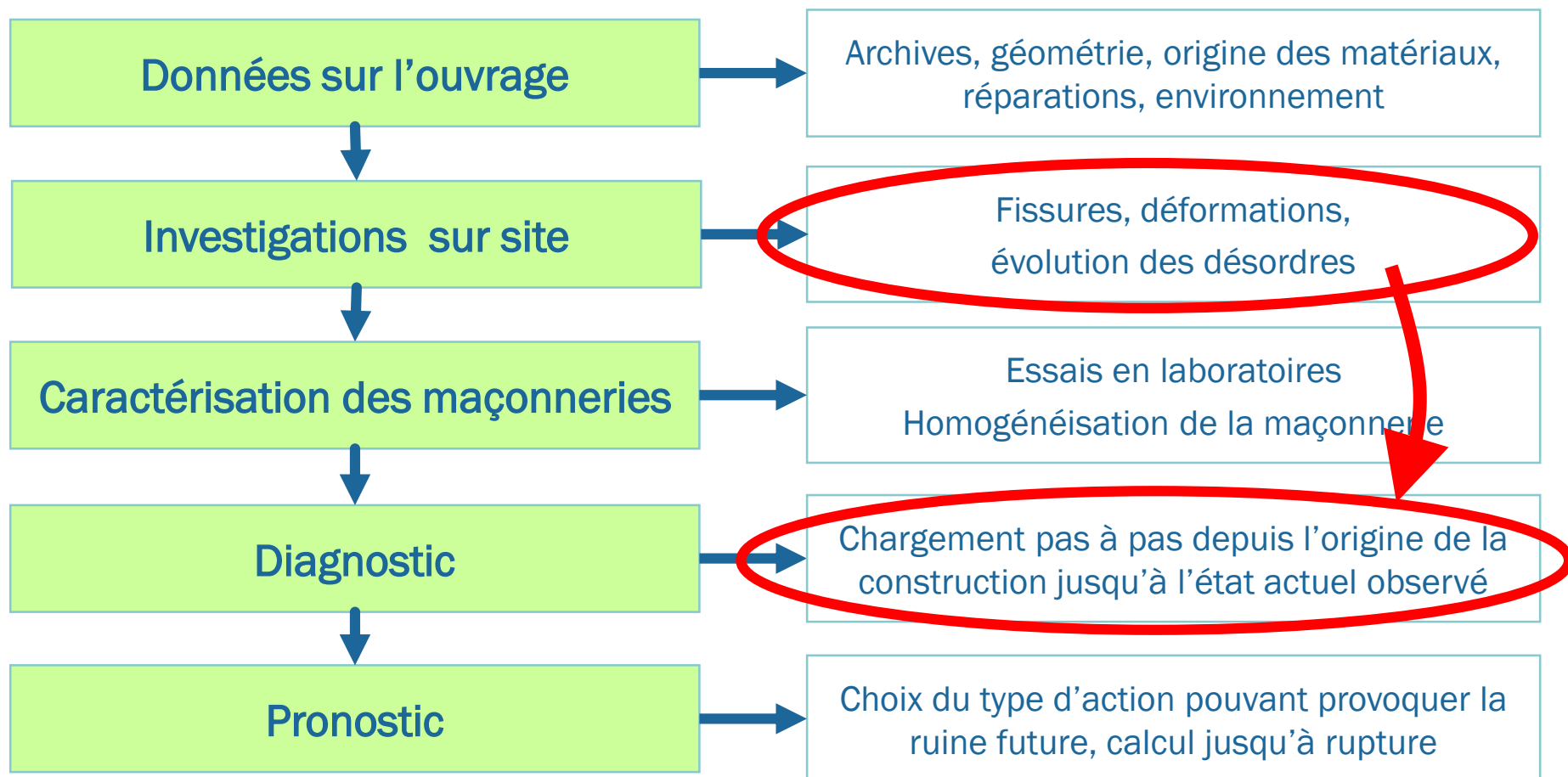
Ginger CEBTP (thèse de Thomas Parent)

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

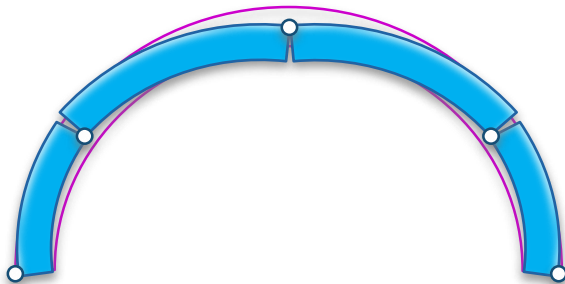
Méthodologie développée au LMDC



Méthodes de calcul existantes

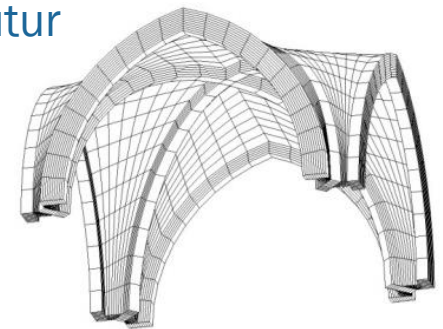
Analyse limite

- 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

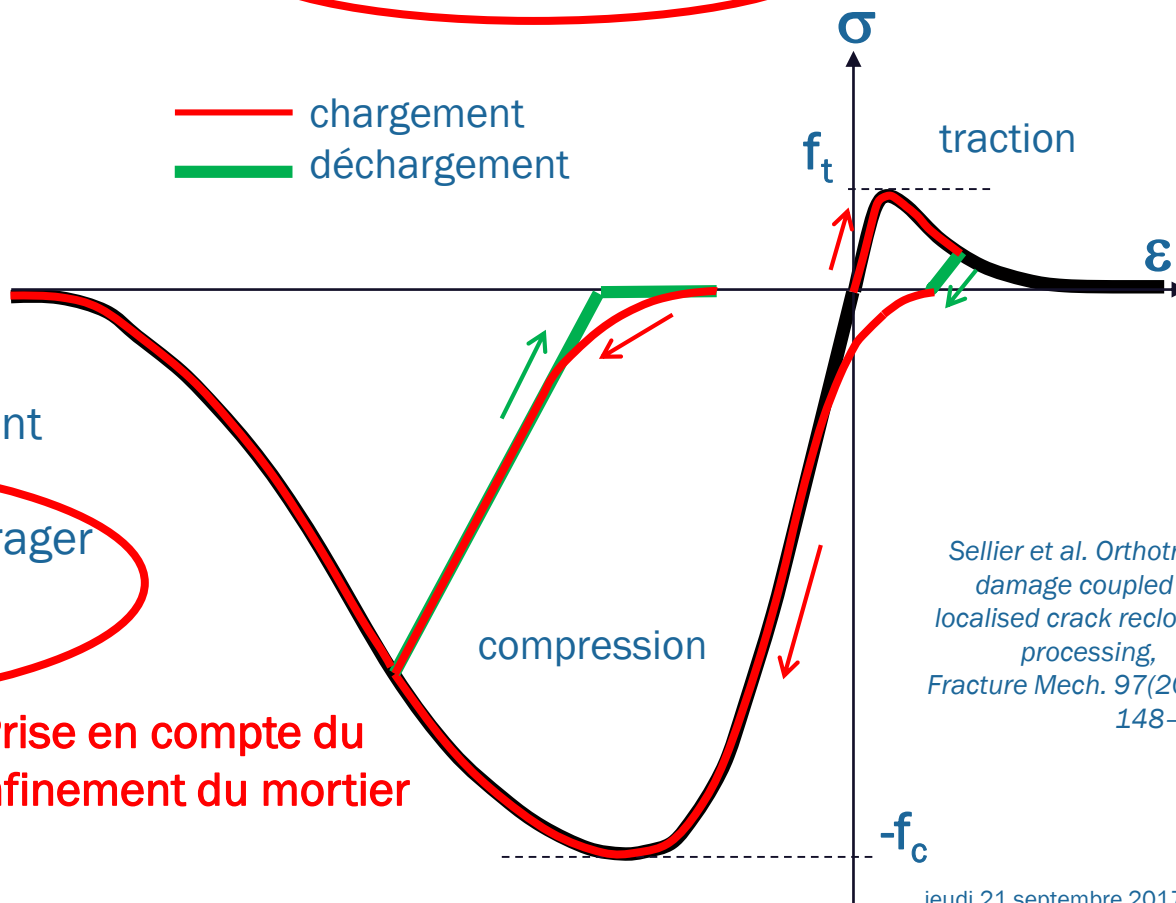
Critère de Drucker Prager

D_c variable d'endommagement

δ coefficient de Drucker Prager

β coefficient de dilatance

Prise en compte du
confinement du mortier



Sellier et al. Orthotropic damage coupled with localised crack reclosure processing, Eng. Fracture Mech. 97(2014) 148-167

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

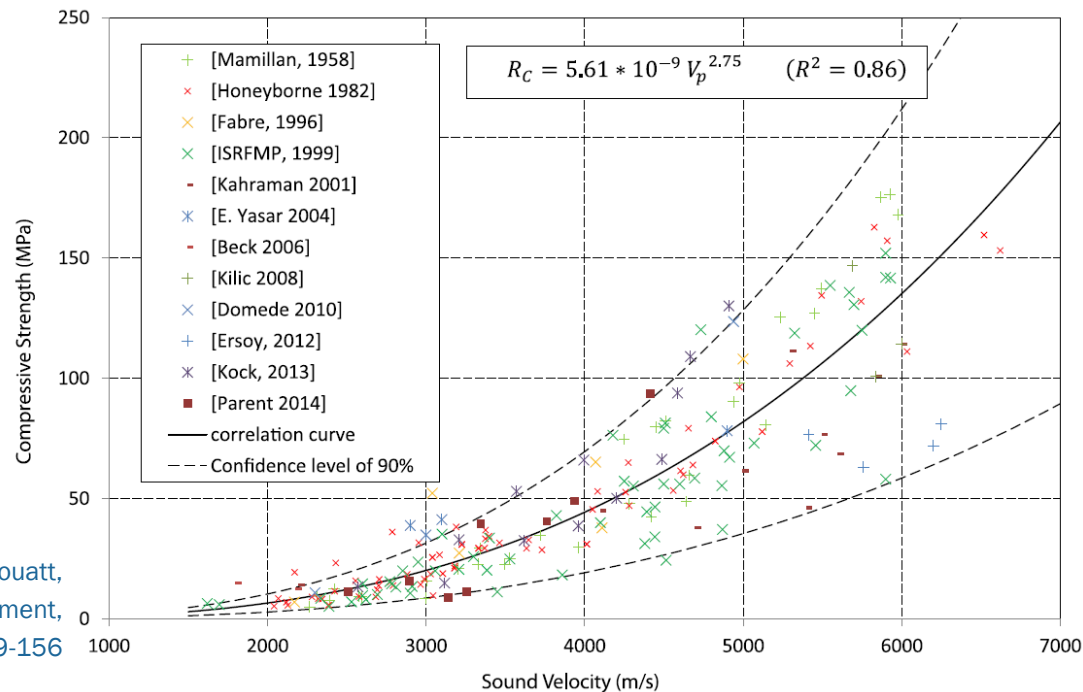
Besoin d'une méthode d'identification rapide et non destructive :

Vitesse du son V

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

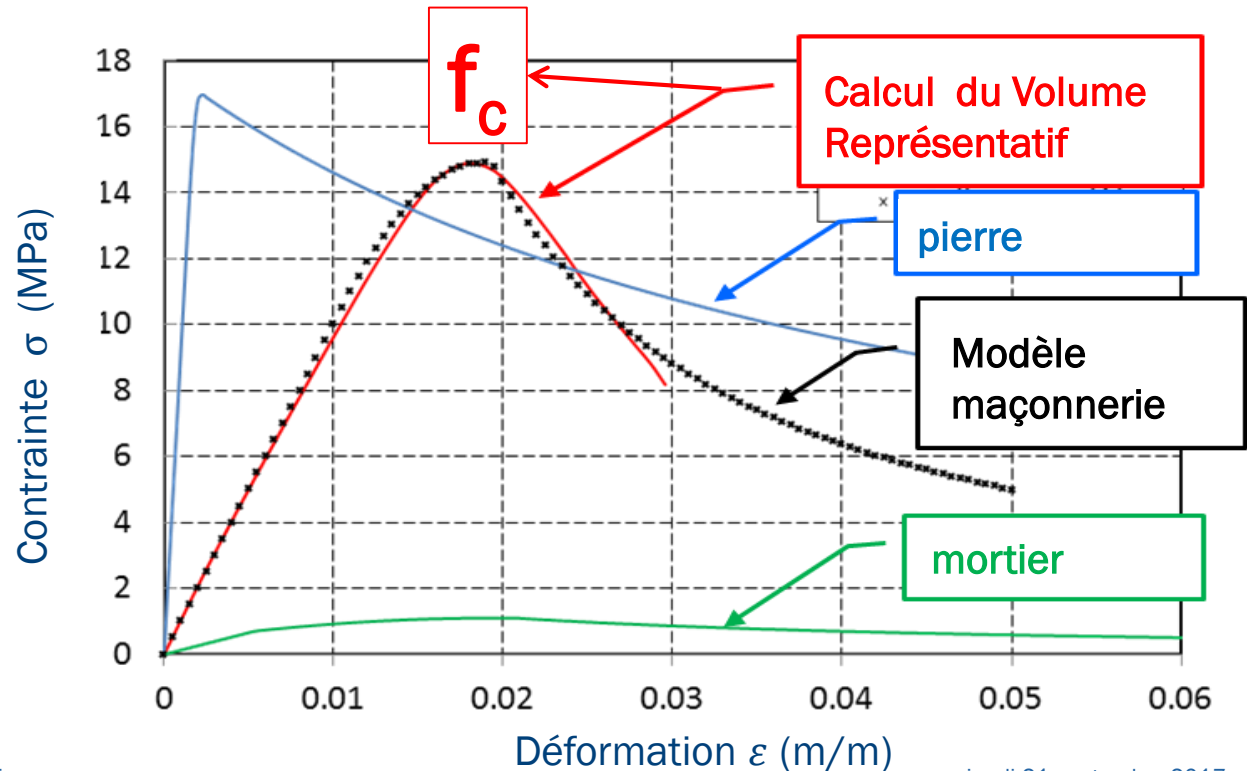
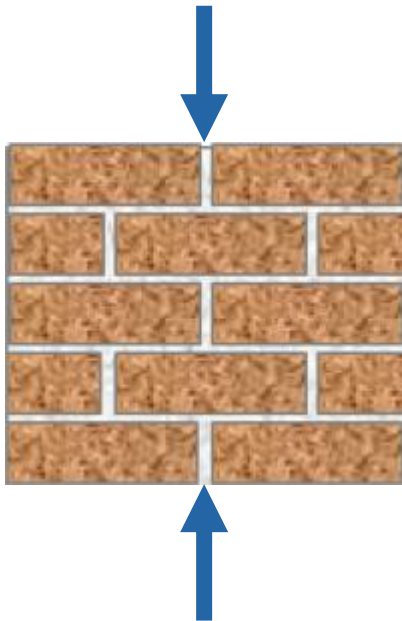
Parent, Domede, Sellier, Mouatt,

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

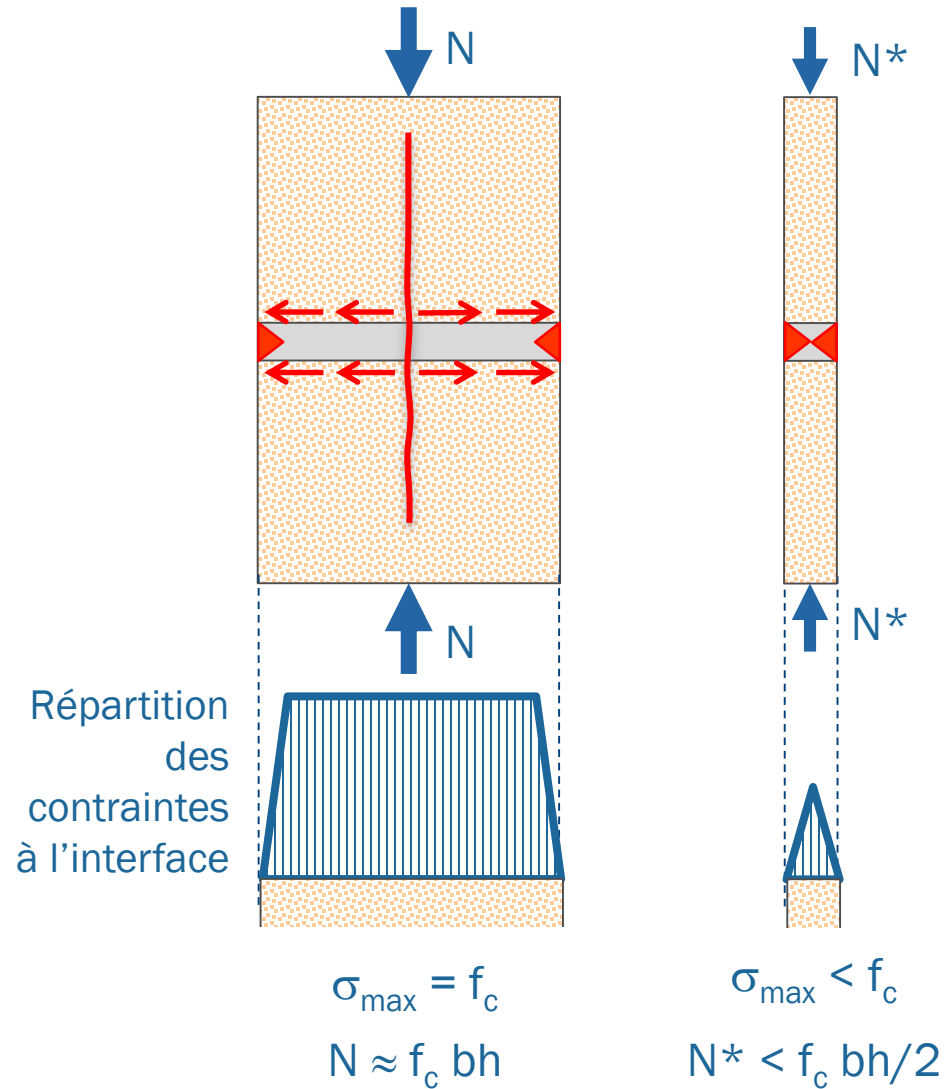


Homogénéisation en compression

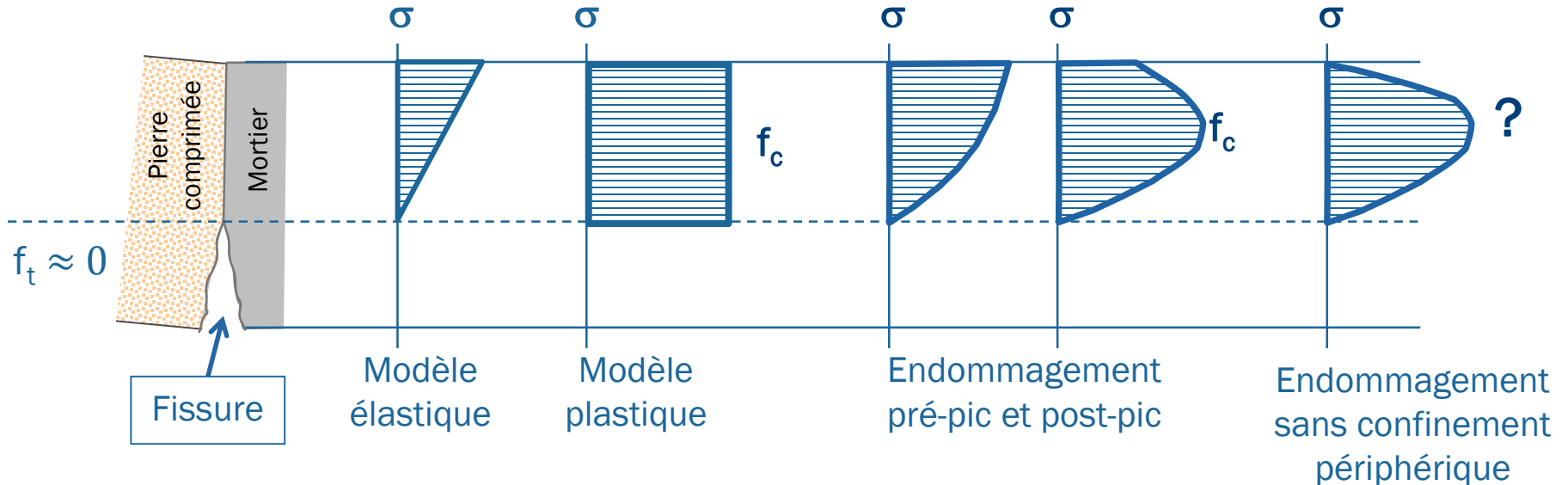
- La résistance en compression f_c de la maçonnerie est obtenue par calcul d'un muret, ou essai d'un muret ou abaques (essais ...)
- Cas des ouvrages anciens : $f_c(\text{pierre}) > f_c(\text{mortier})$
- $f_c(\text{maçonnerie})$ proche de $f_c(\text{pierre})$ grâce au **confinement du mortier**



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

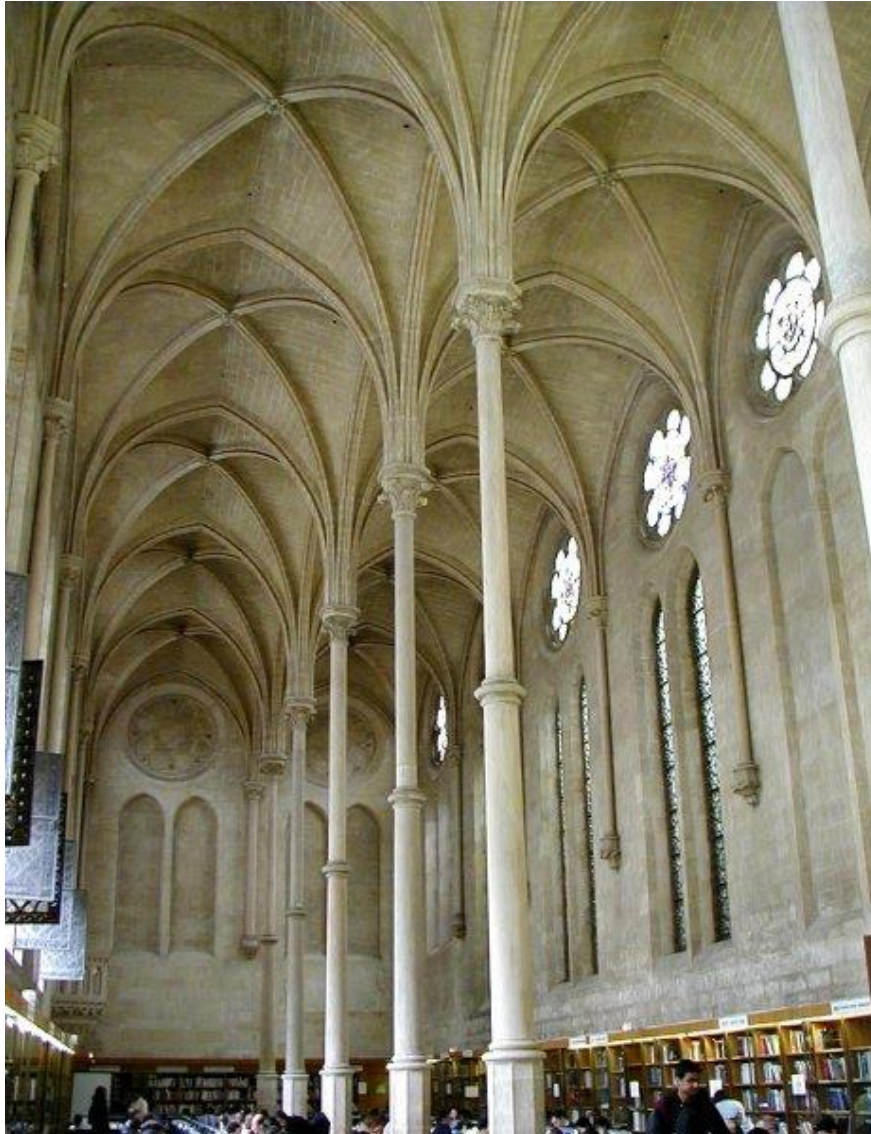
Marge de sécurité :

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

Pour l'étude de cas :

$$\chi = 2/3$$

$$\gamma_m = 2.9 \text{ à } 3.9$$

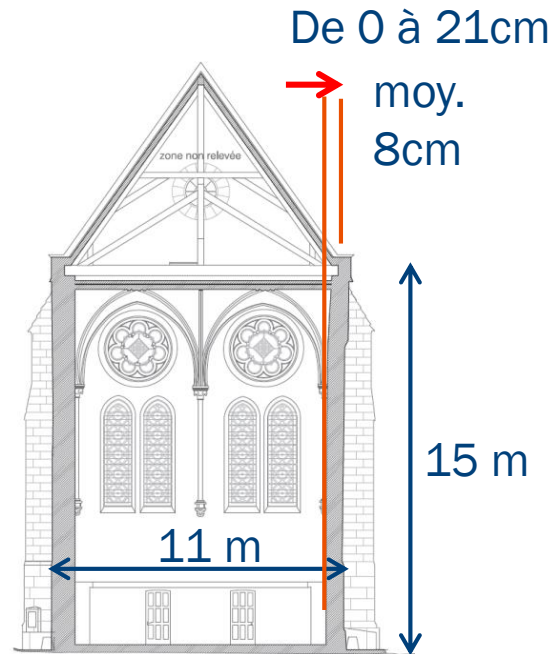
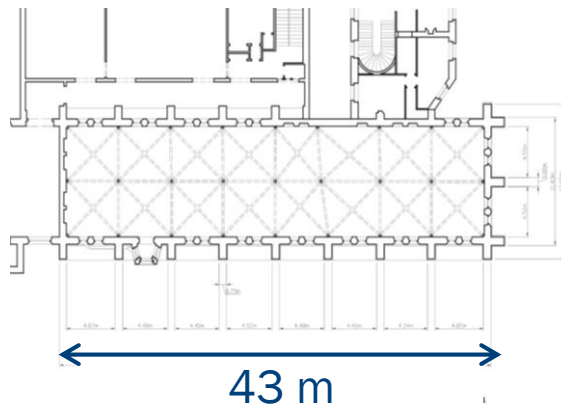


Application sur un monastère du 13^{ème} siècle

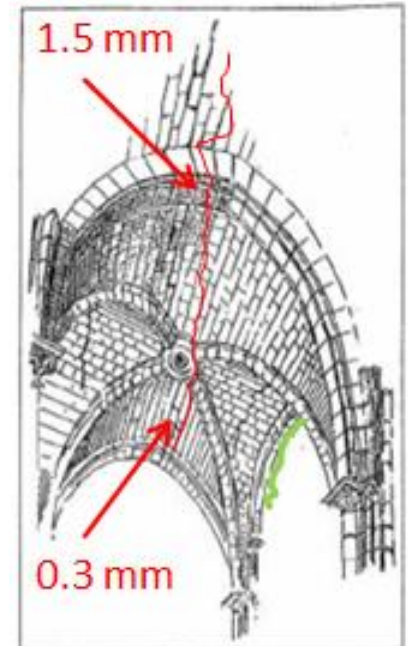
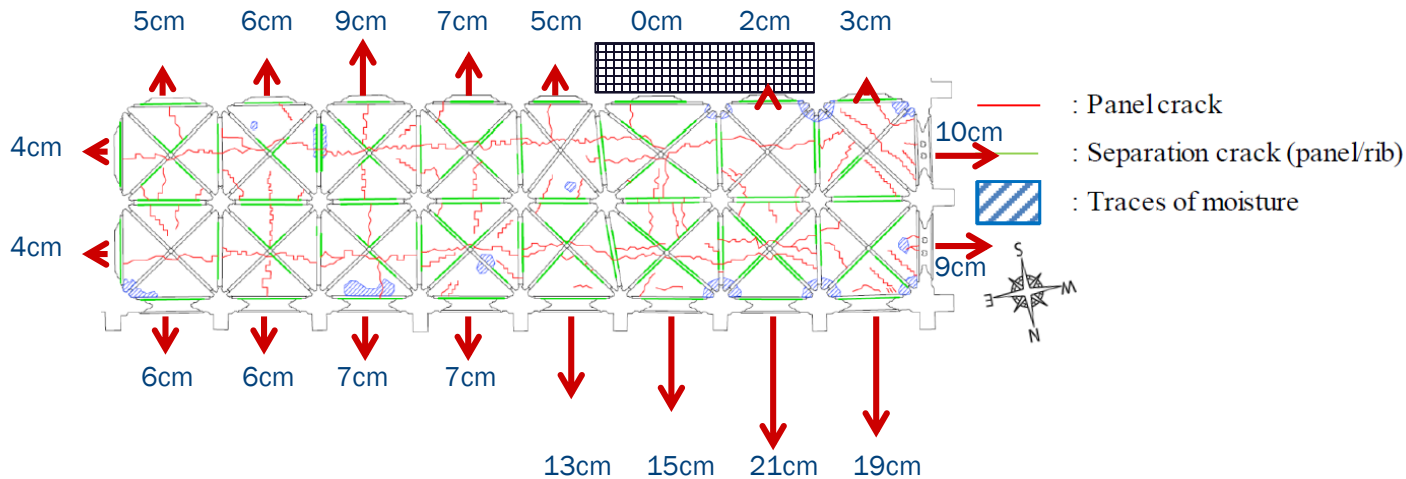
*Thèse de Thomas Parent
CIFRE GINGER-CEBTP*



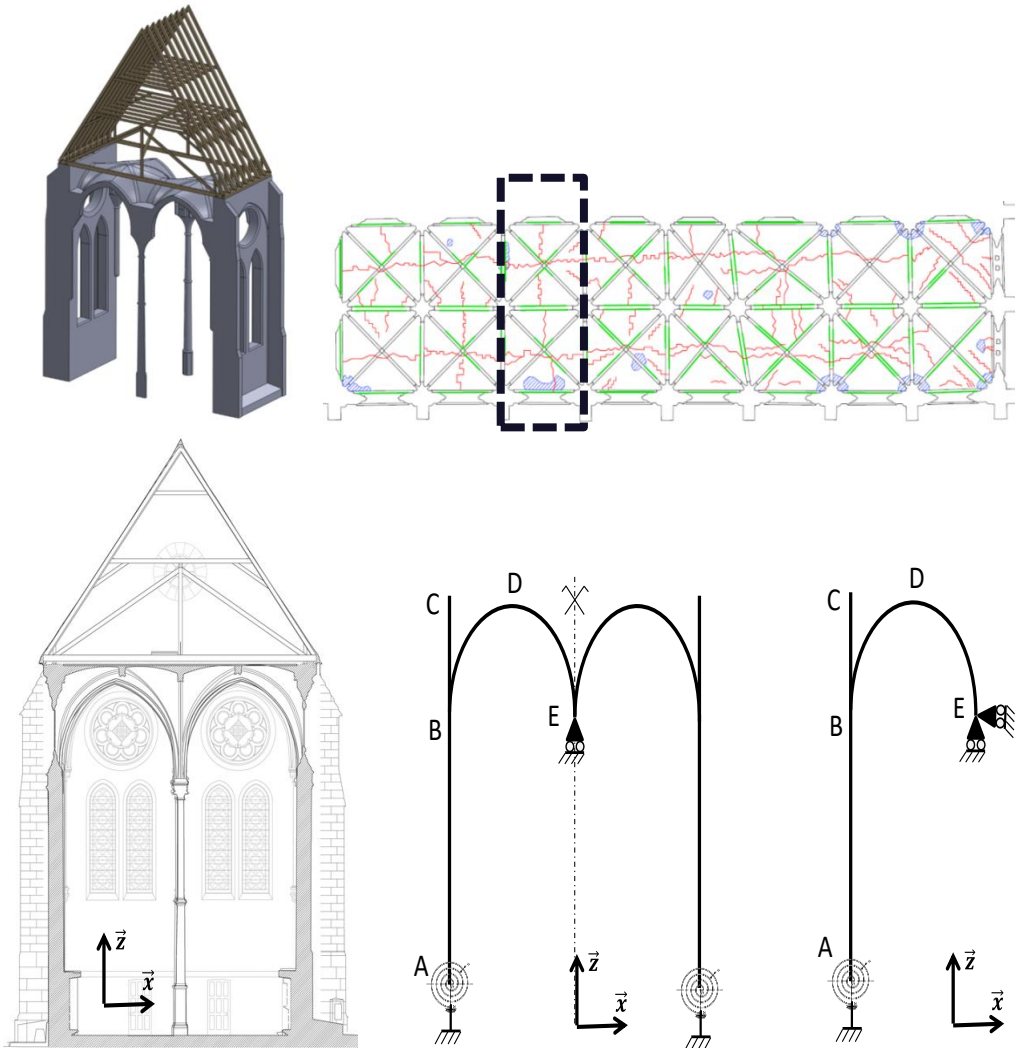
Investigations sur site



Ouvertures de fissures jusqu'à 1,5mm

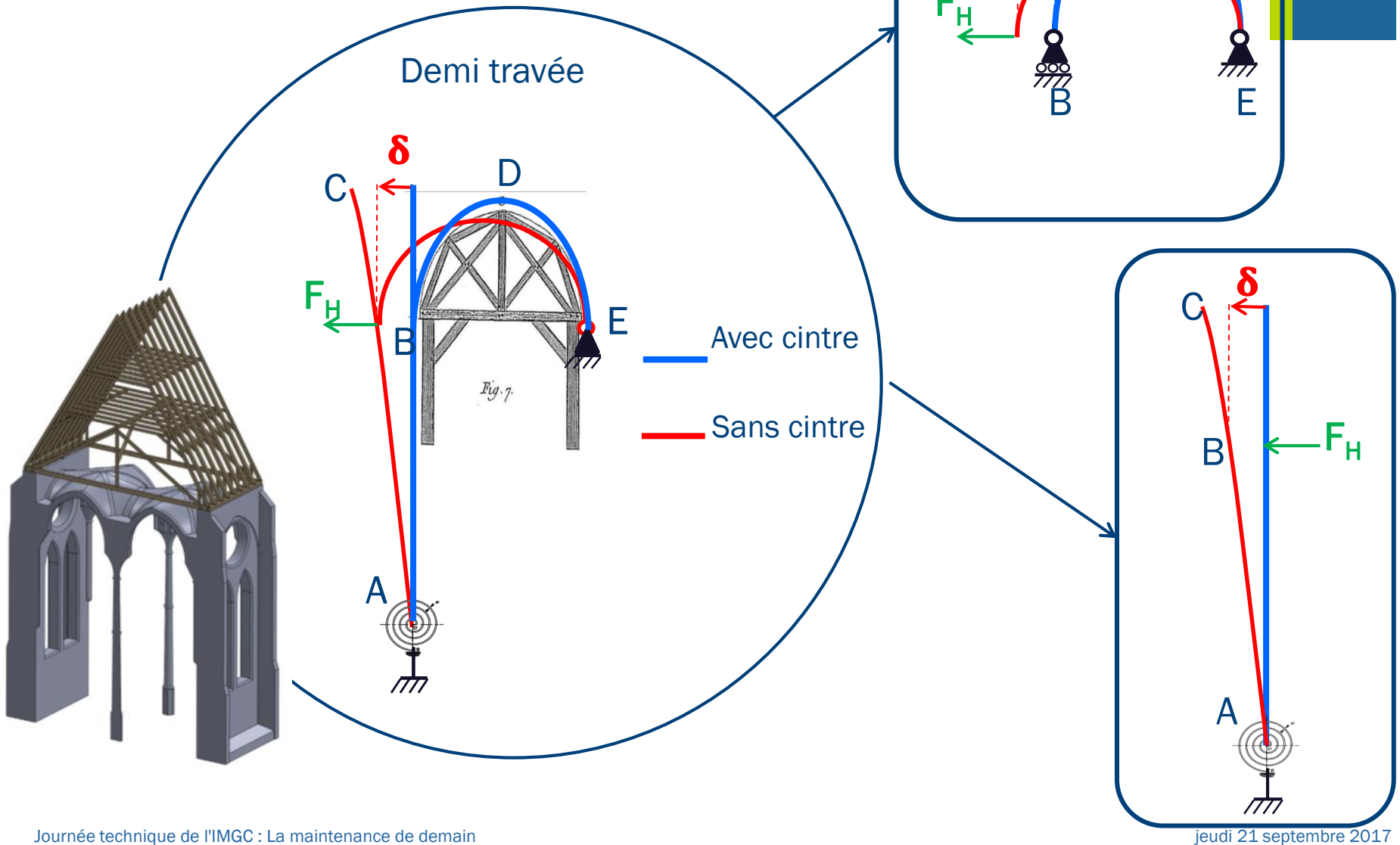


Analyse structurelle

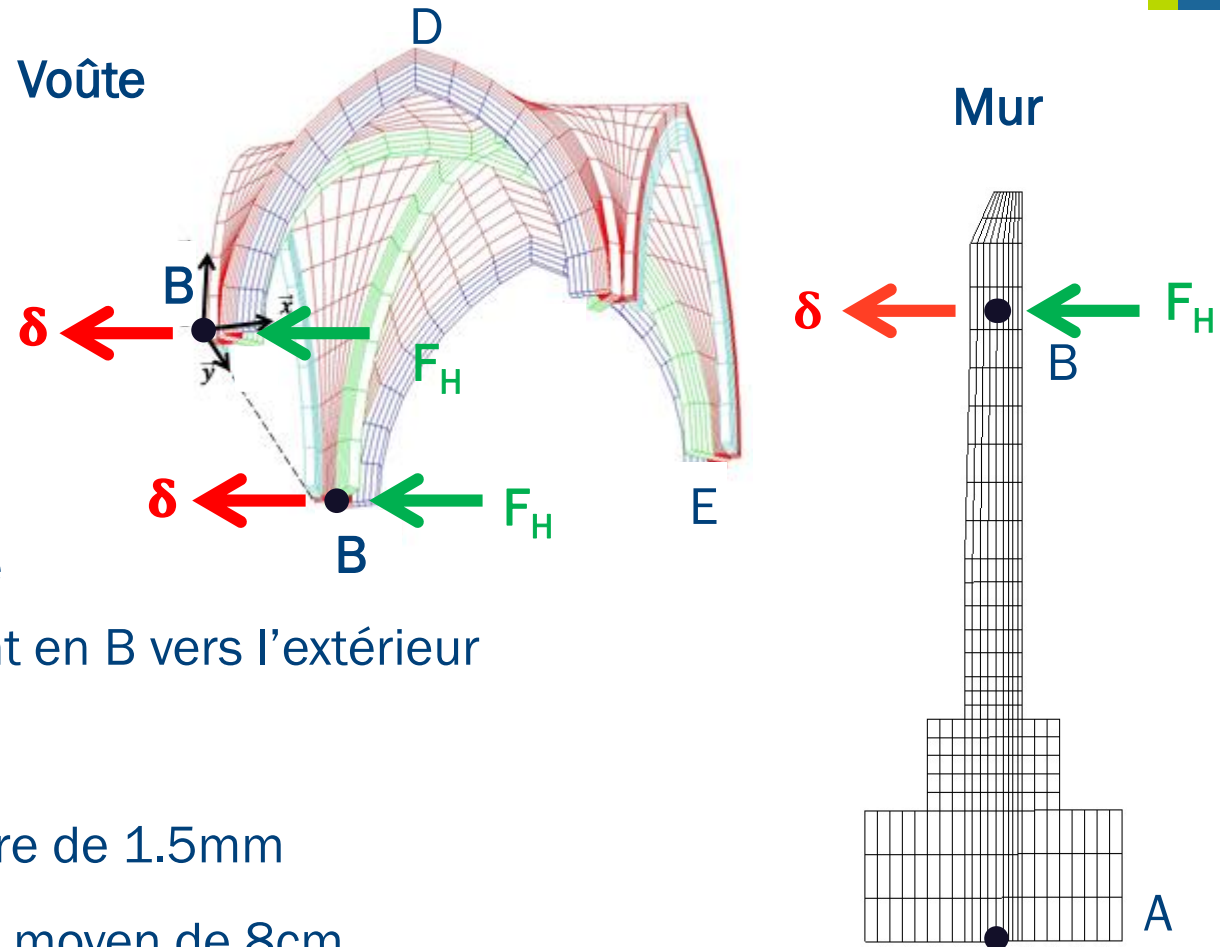


- Pas de charges appliquées
- Origine des fissures ?
 - Construction au 13^{ème} siècle
 - Déplacement / rotation des fondations
 - Fluage de la maçonnerie
- Maillage d'une trame en 3D
- Calcul depuis la construction sur cintre jusqu'à aujourd'hui

Deux calculs distincts



Calculs éléments finis 3D



Actions :

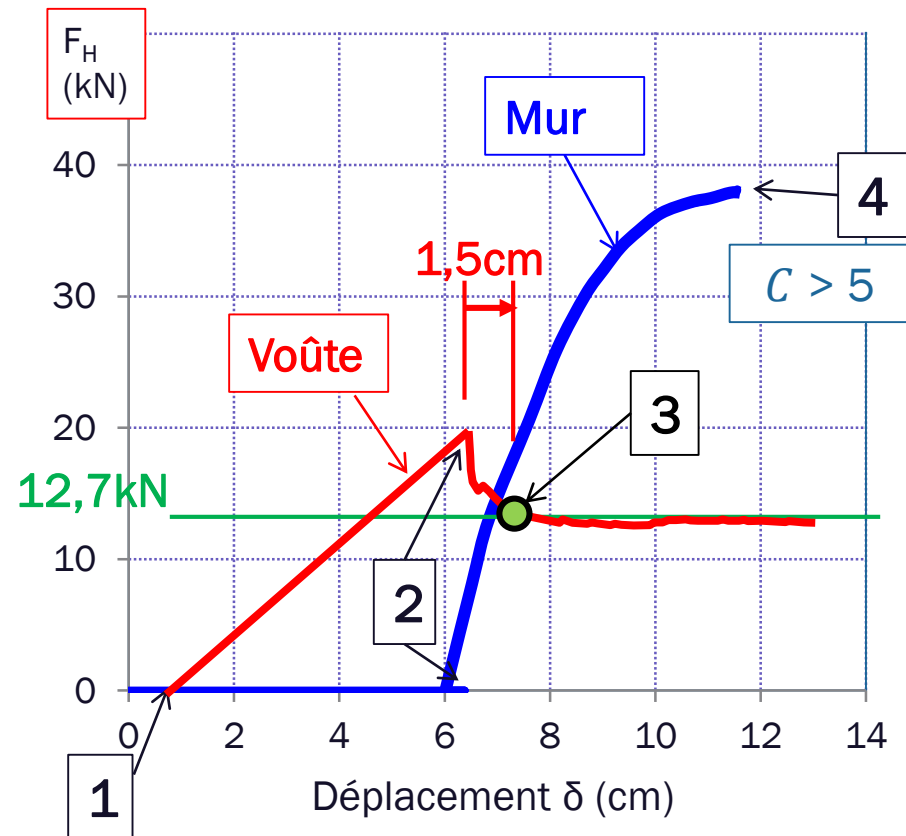
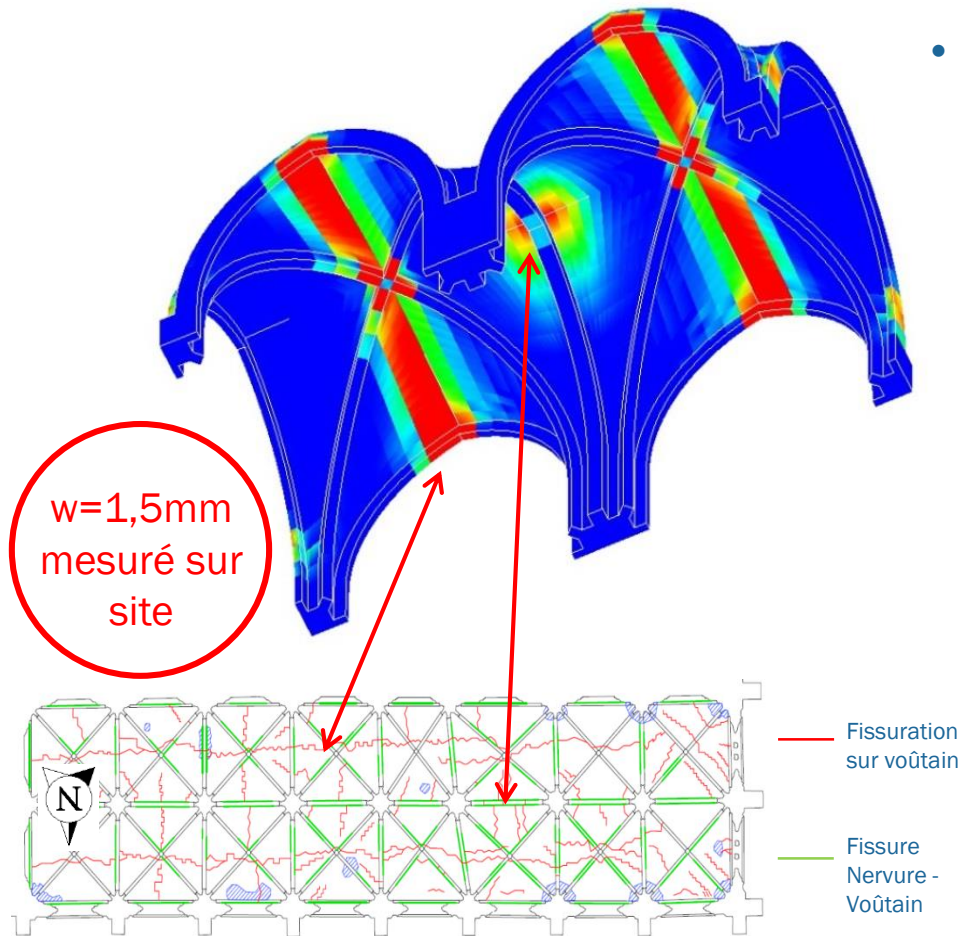
- Poids propre
- Déplacement en B vers l'extérieur

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