

IMGC

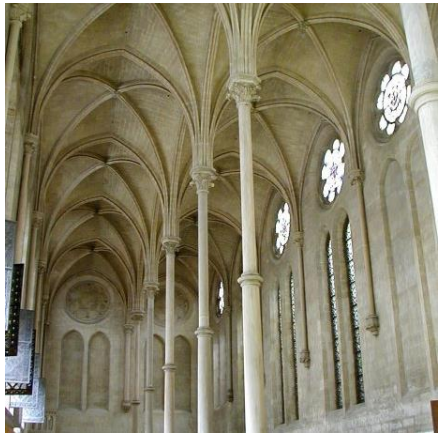
# ADAPTATION DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE AUX NOUVELLES CONDITIONS DE SERVICE

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 13ème 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)

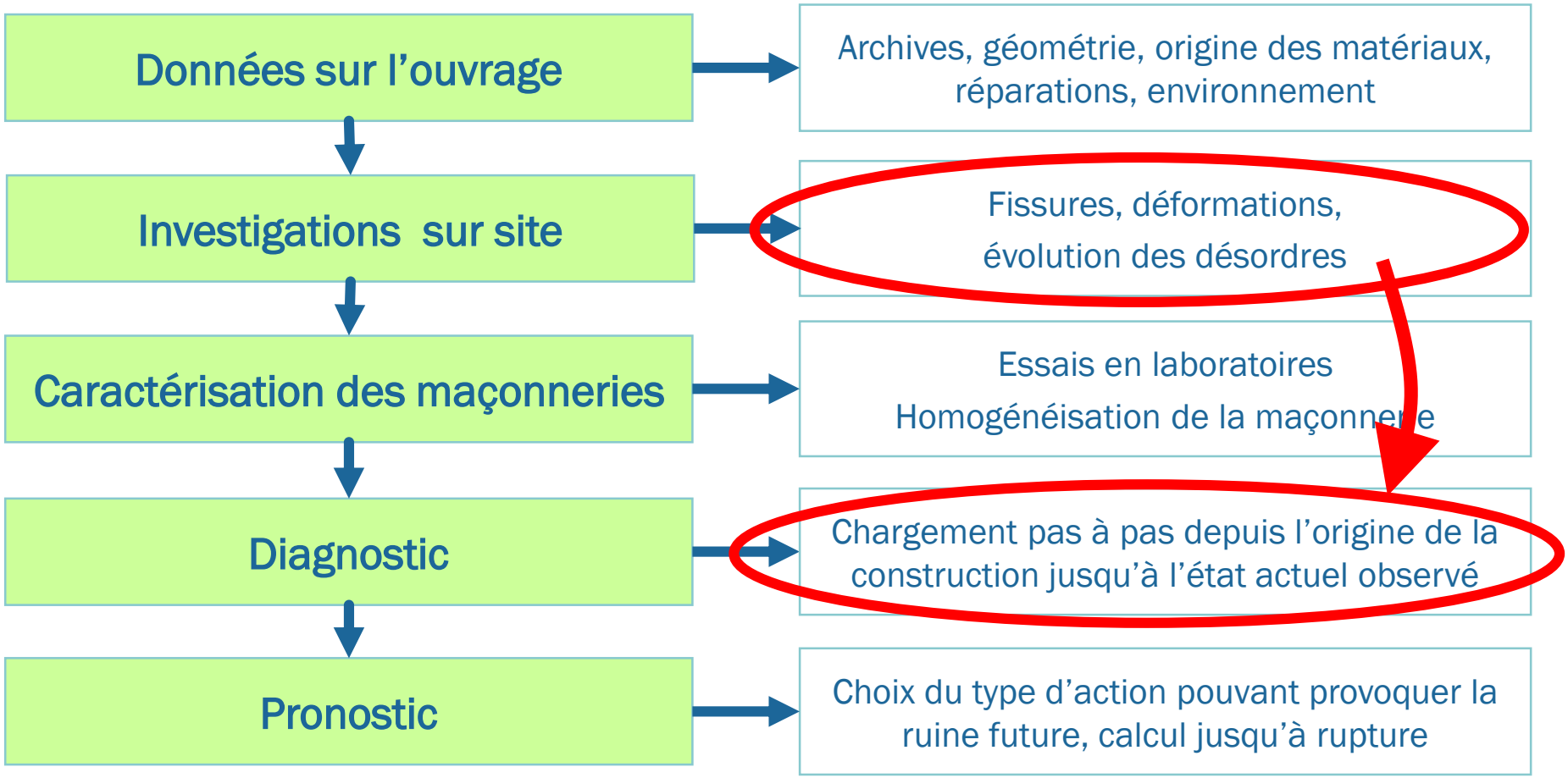
  en demande d'outils d'aide au :

  - **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

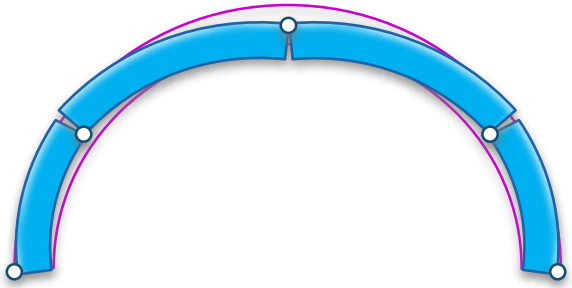
# Méthodologie développée au LMDC



# Méthodes de calcul existantes

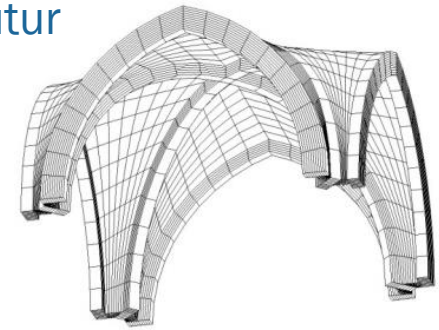
## Analyse limite

- 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

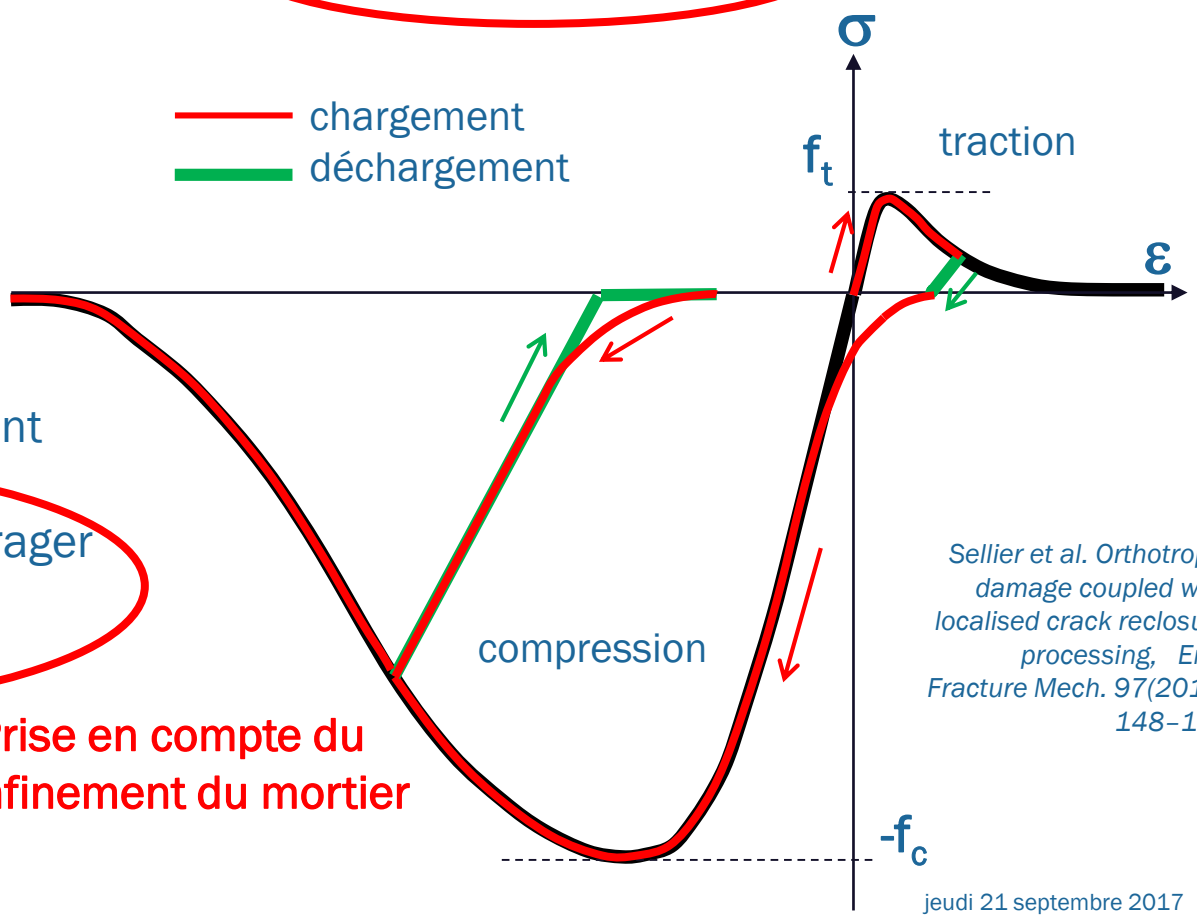
**w ouverture de fissure**

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**




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

**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)



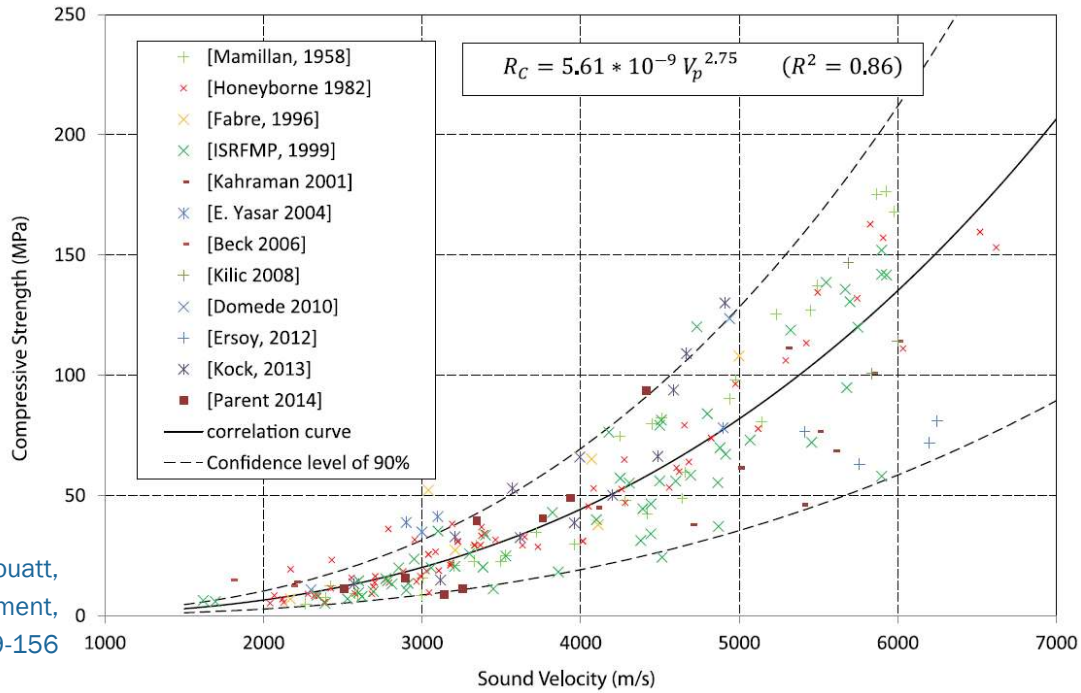
# Variabilité des pierres

- 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

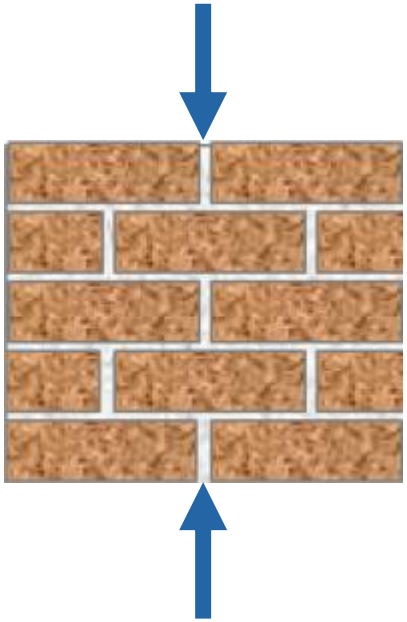
Couplée à des lois de corrélation V / masse volumique, V / $f_c$ , V / $f_t$, V / $E_{young}$, V / $\nu$ établies sur 200 calcaires différents (1150 échantillons)

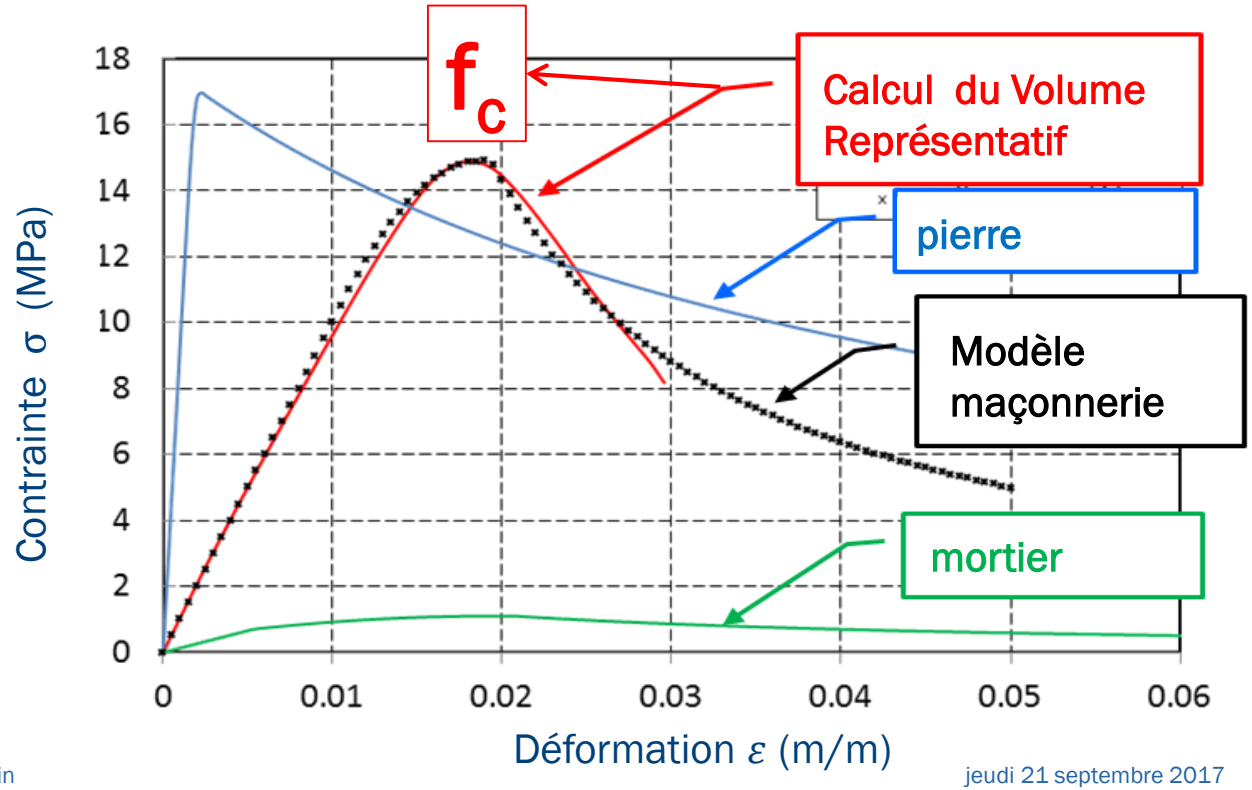



Parent, Domede, Sellier, Mouatt,
Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement,
Int. J. of Rock Mech. & Min. Sc. 79 (2015) 149-156

# Homogénéisation en compression

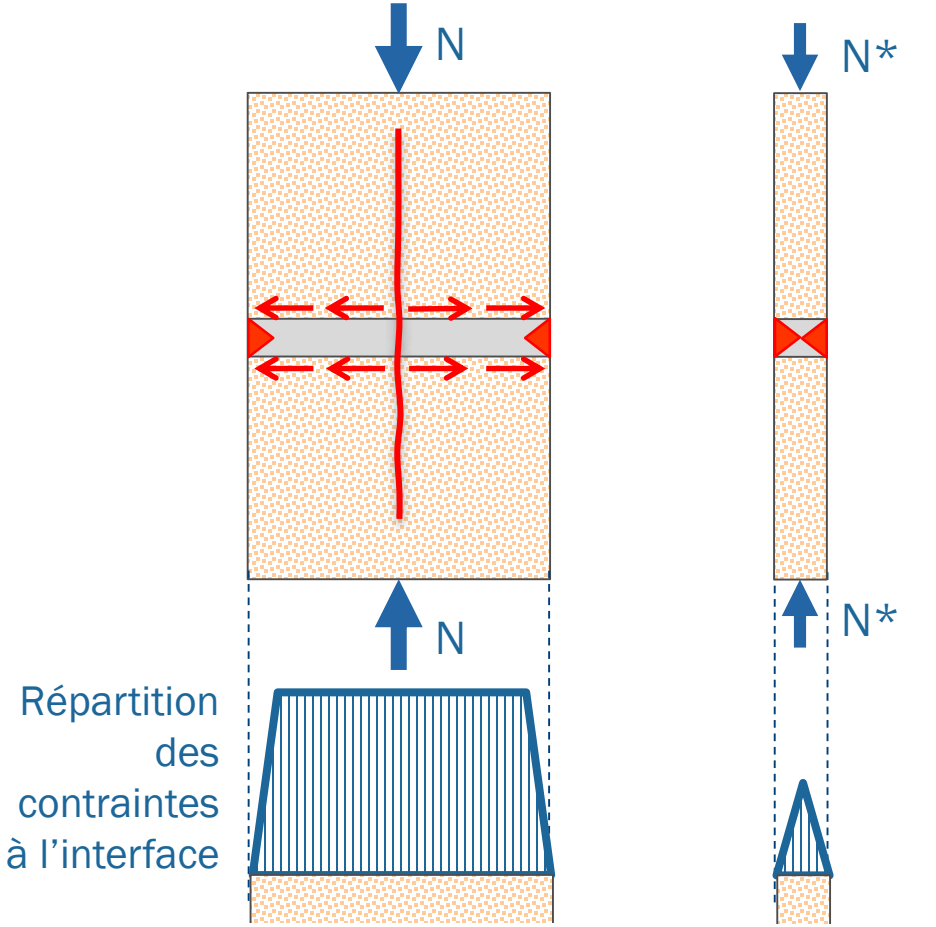
- La résistance en compression $f_c$ de la maçonnerie est obtenue par calcul d'un muret, ou essai d'un muret ou abaques (essais …)
- Cas des ouvrages anciens : $f_c$(pierre) > $f_c$(mortier)
- $f_c$(maçonnerie) proche de $f_c$(pierre) grâce au **confinement du mortier**





# Confinement du mortier comprimé





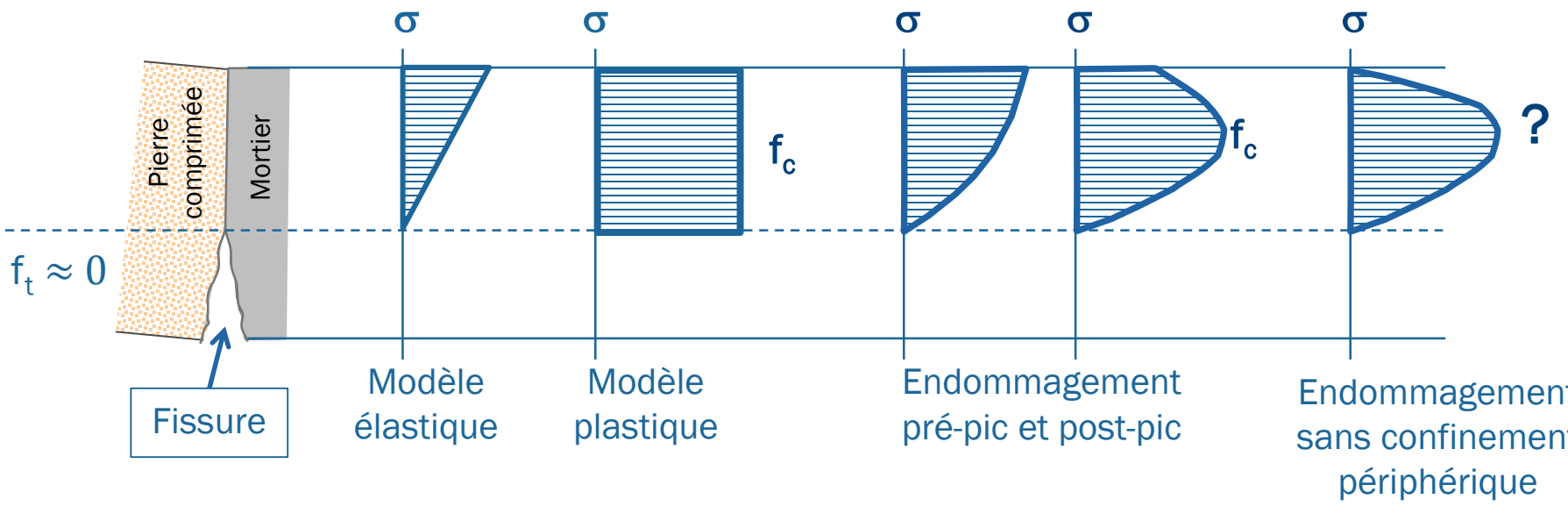

$\sigma_{max} = f_c$

$N \approx f_c\ bh$

$\sigma_{max} < f_c$

$N^* < f_c\ bh/2$

# Maçonnerie fléchie et fissurée




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

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

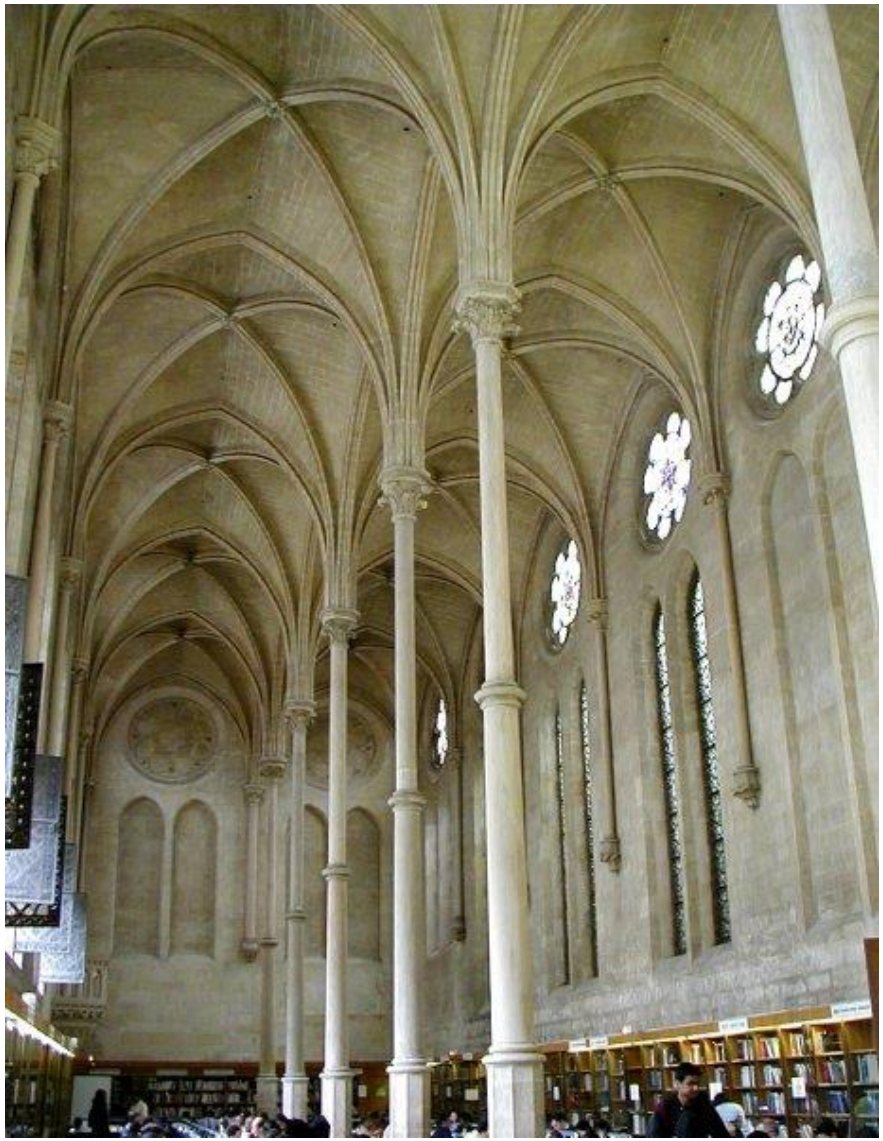
Marge de sécurité :

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

Pour l'étude de cas :

$\chi$ = 2/3

$\gamma_m = 2.9$ à $3.9$

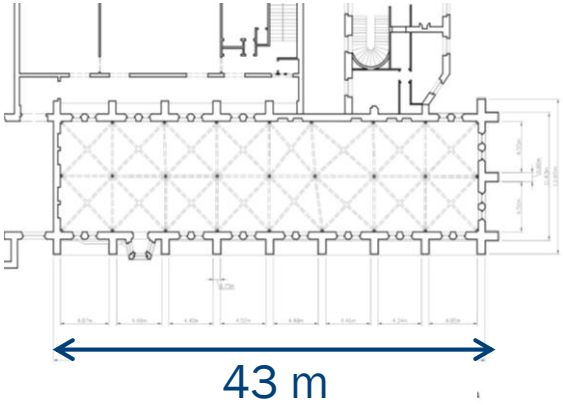


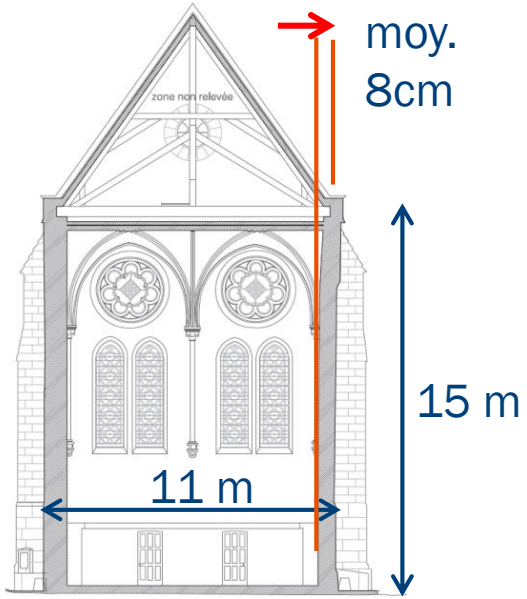
# Application sur un monastère du 13ème siècle

*Thèse de Thomas Parent*
*CIFRE GINGER-CEBTP*

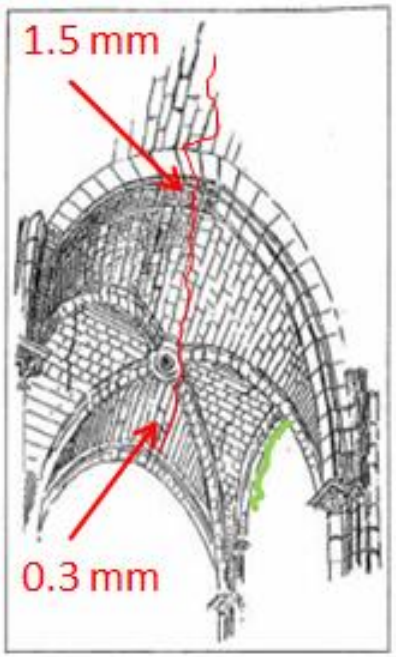


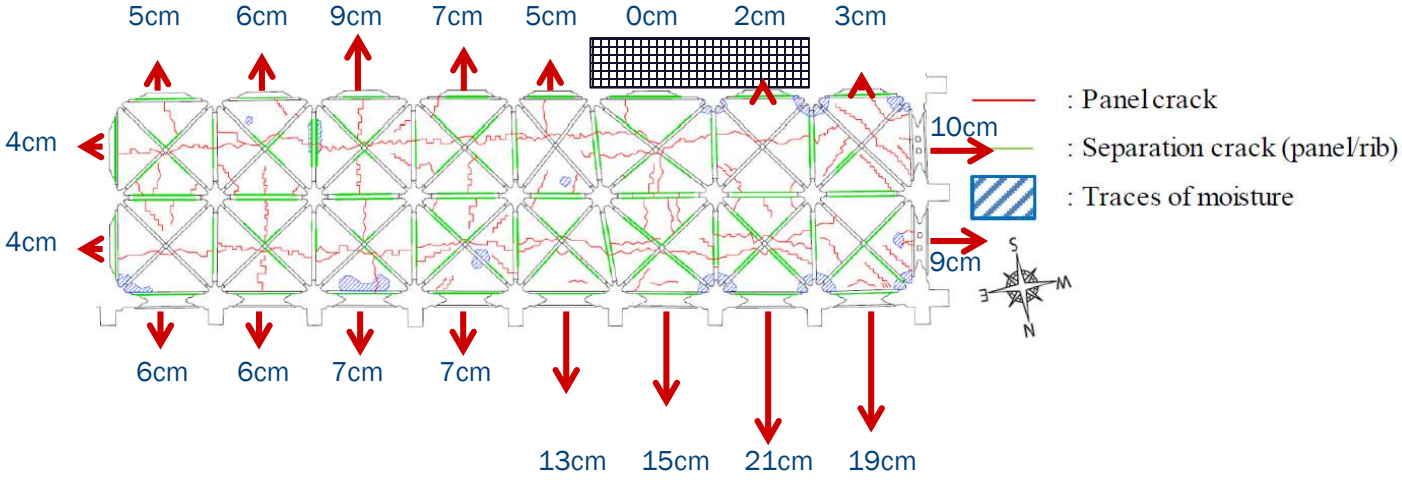
# Investigations sur site



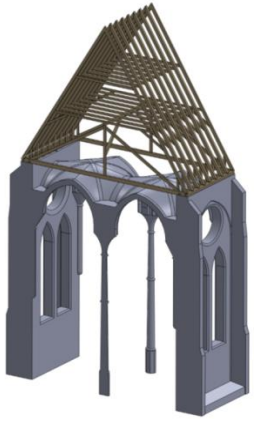



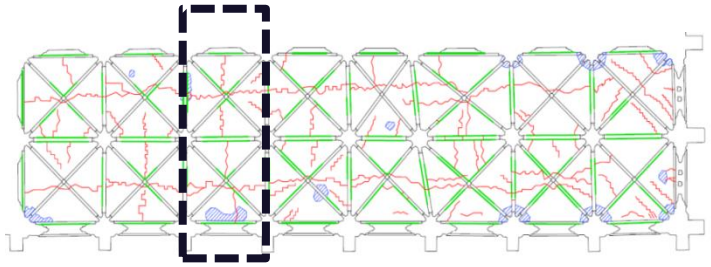

Ouvertures de fissures jusqu'à 1,5mm

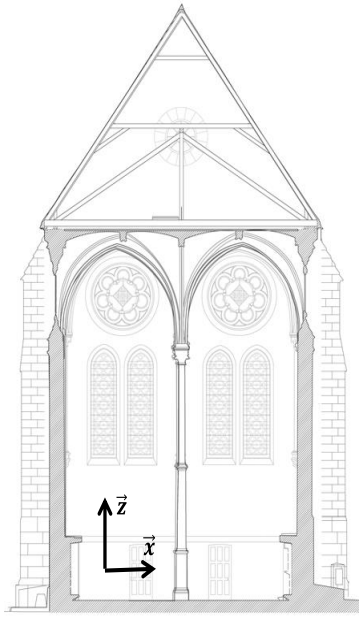


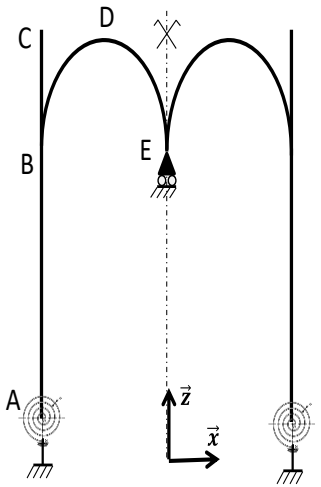



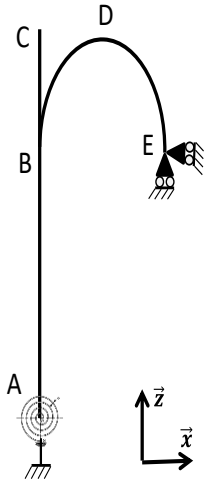
# Analyse structurelle





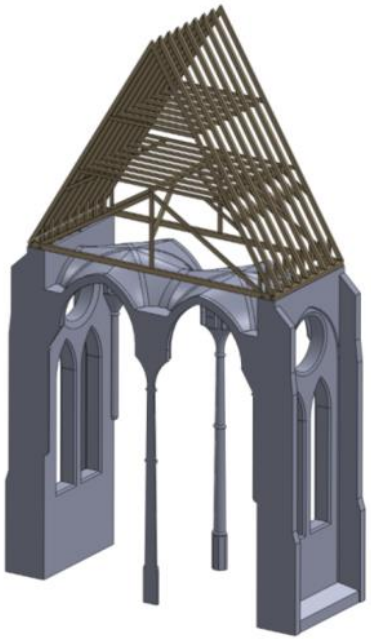


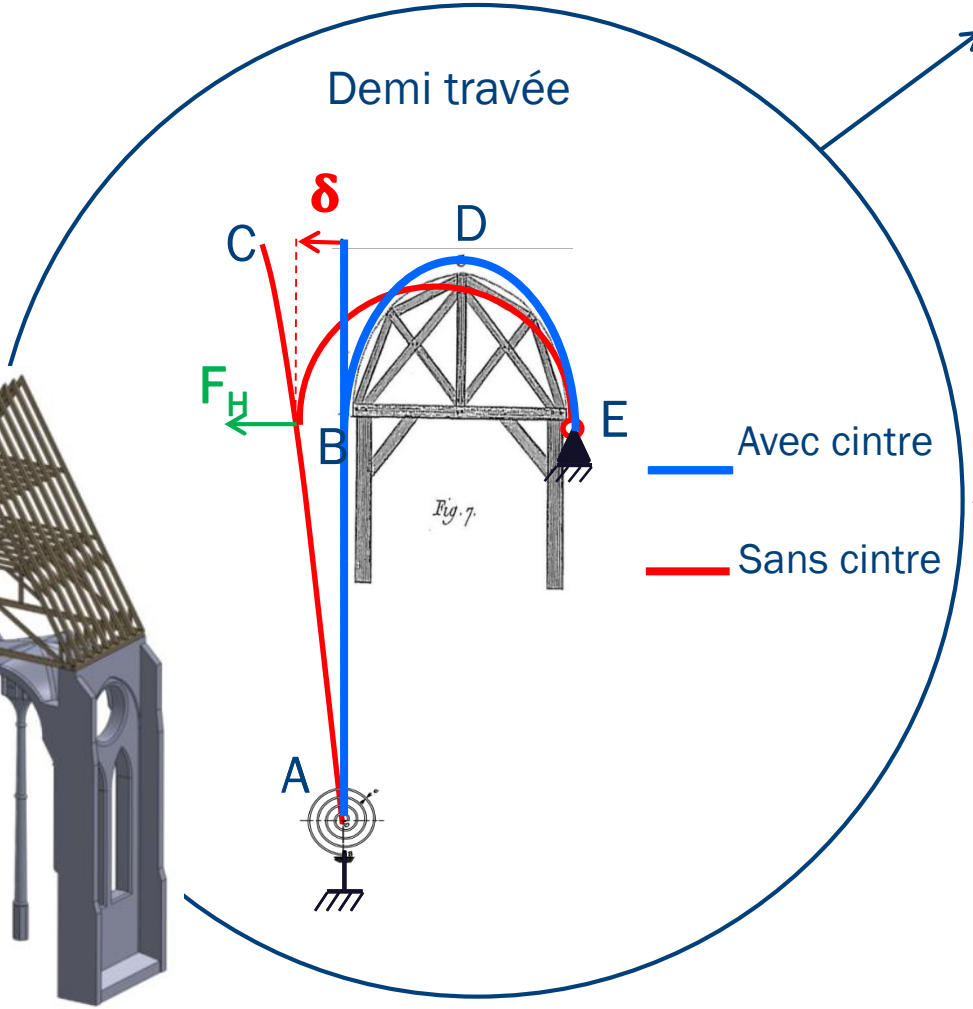



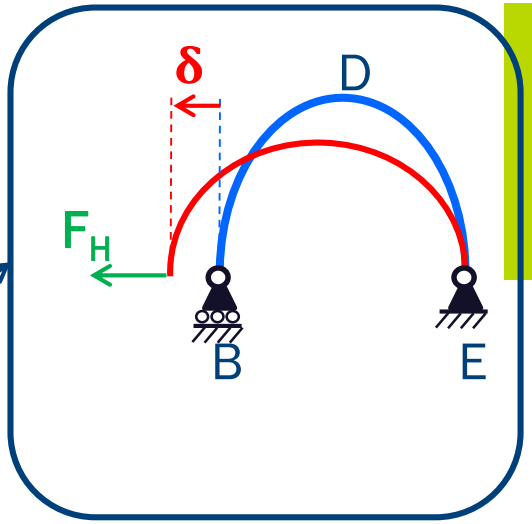



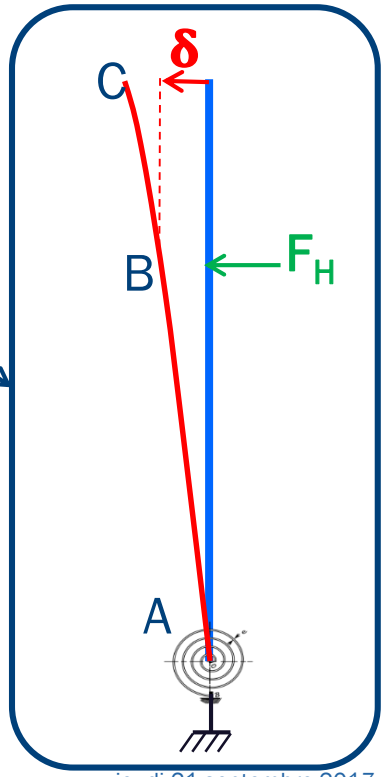

- Pas de charges appliquées
- Origine des fissures ?
  - Construction au 13ème siècle
  - Déplacement / rotation des fondations
  - Fluage de la maçonnerie
- Maillage d'une trame en 3D
- Calcul depuis la construction sur cintre jusqu'à aujourd'hui

# Deux calculs distincts

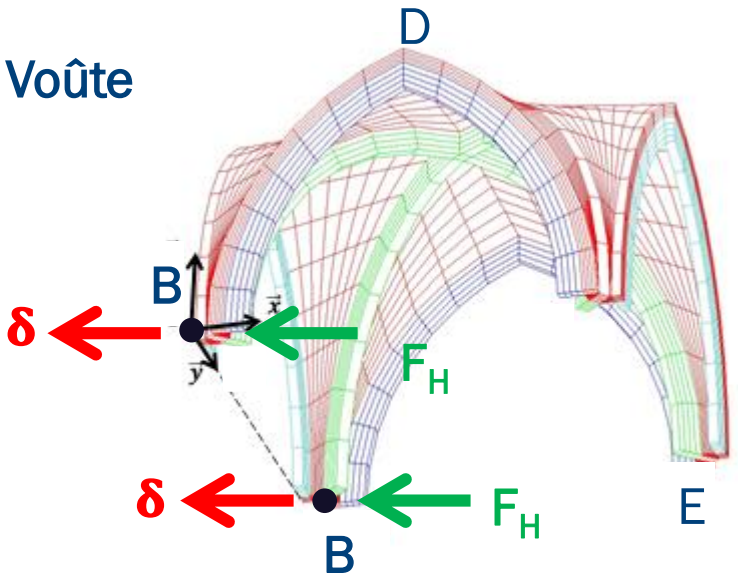


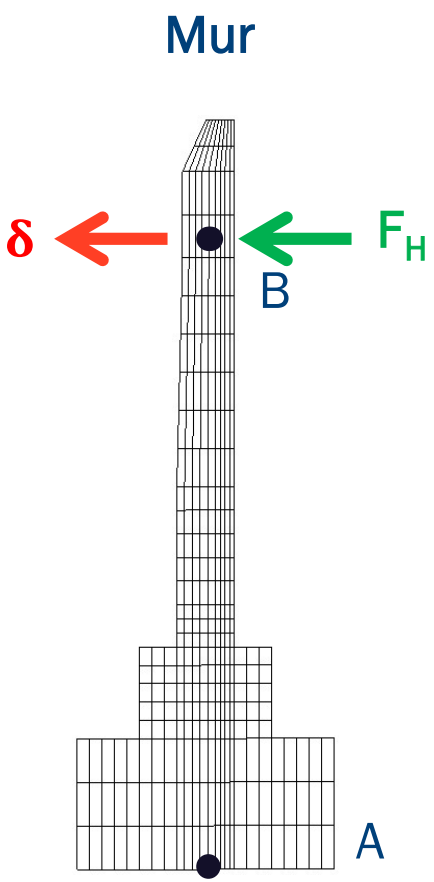


# Calculs éléments finis 3D




Actions :

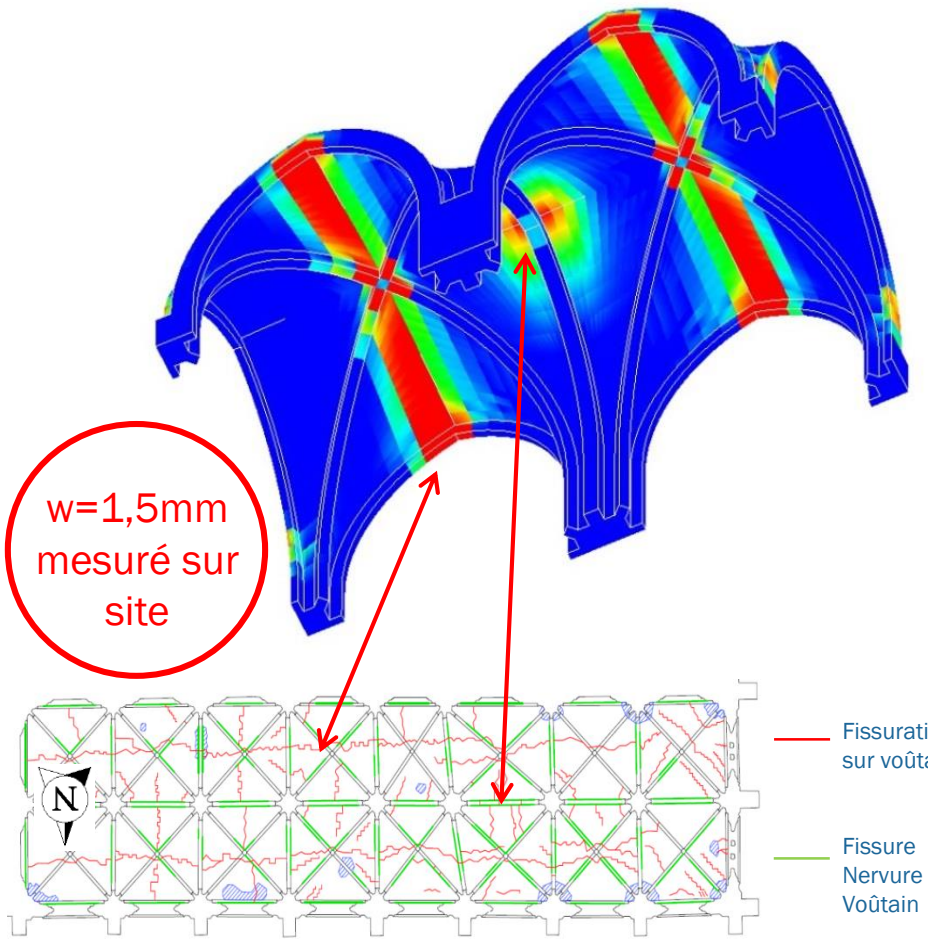
- Poids propre
- Déplacement en B vers l'extérieur

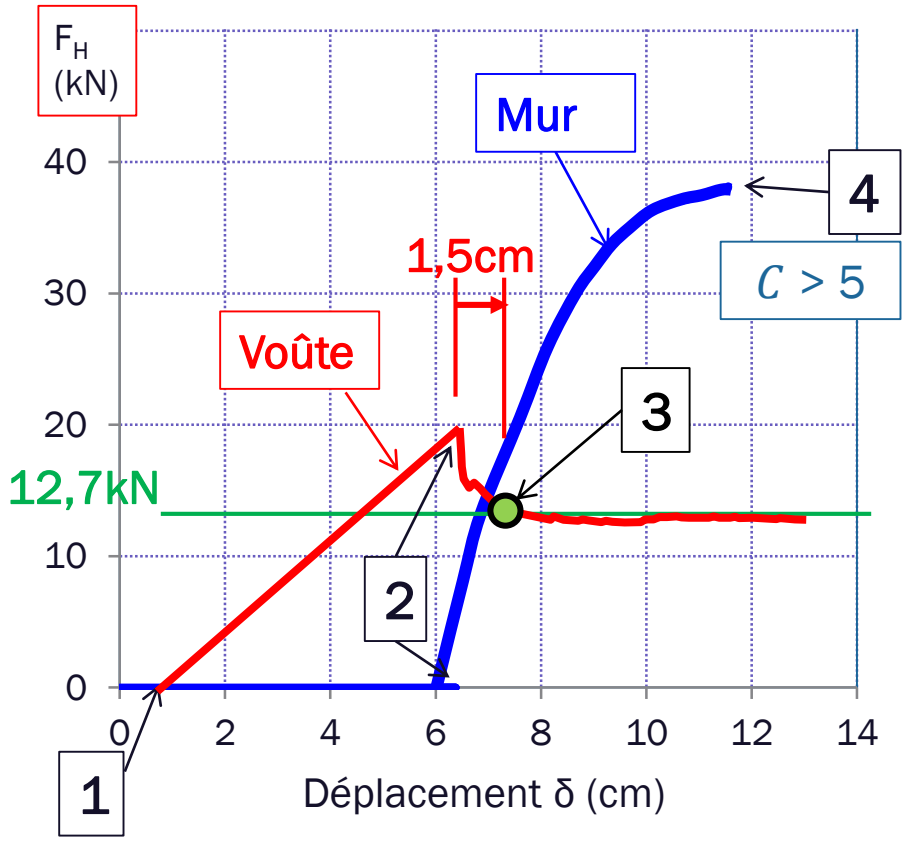
Situation actuelle :

- 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=1,5mm et **δ**=7,5cm



# 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