



JOURNEES NATIONALES  
MAÇONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



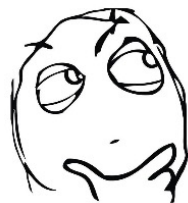
# Une approche d'ingénieur pour la justification de voutes en maçonnerie existantes

O. Moreno Regan

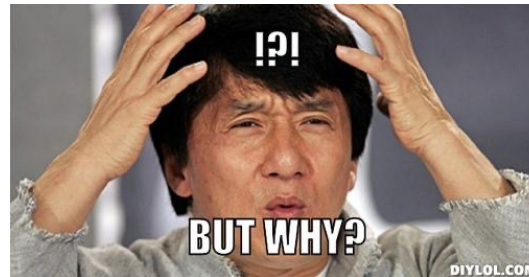


Pourquoi ça ne converge pas ?

(au-delà de  $\text{div} \underline{\underline{\sigma}} \neq 0$ )



## Pourquoi ça converge ?

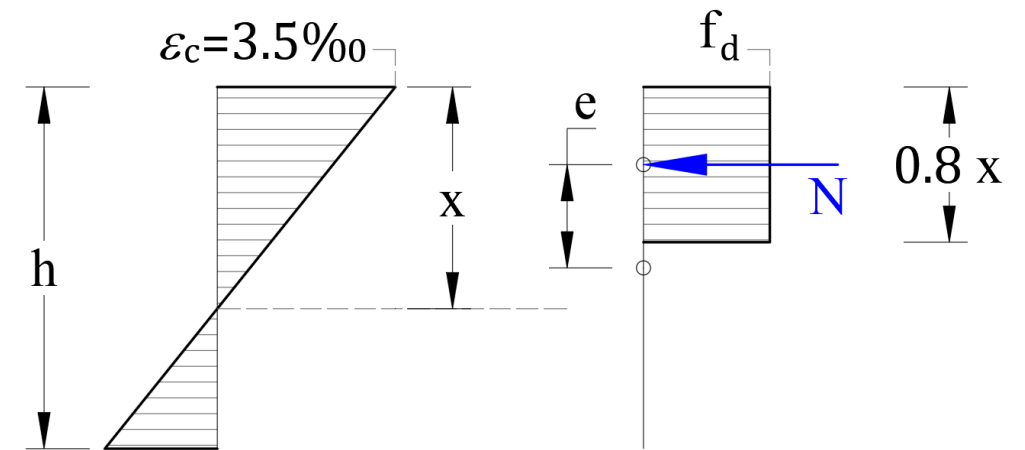
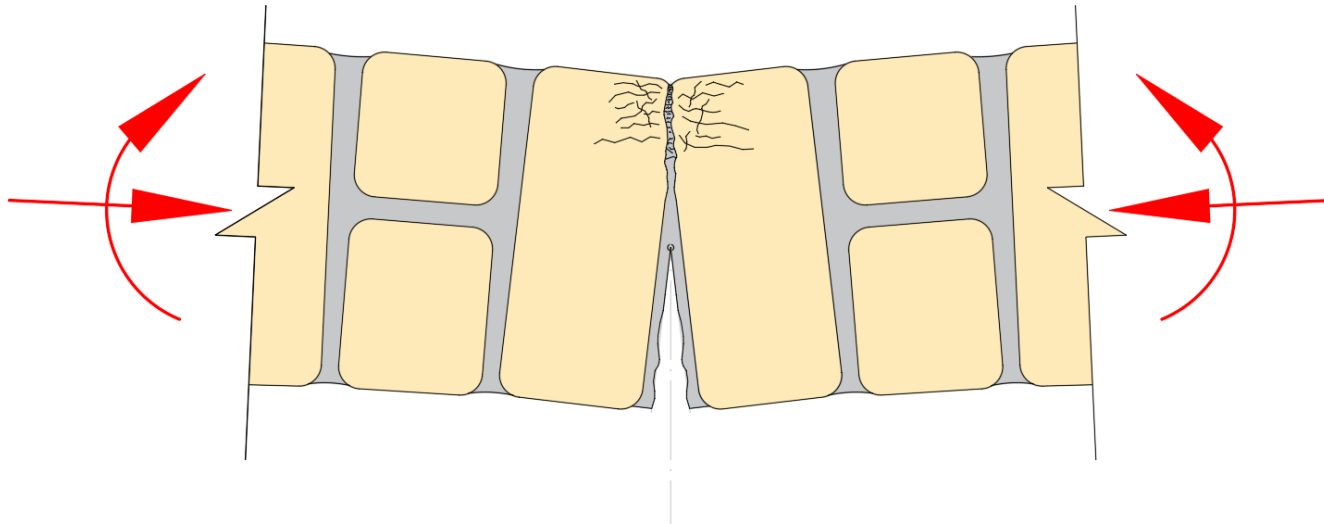


→ Proposer un critère pratique pour les modèle éléments finis non linéaires

# Deux modes de rupture



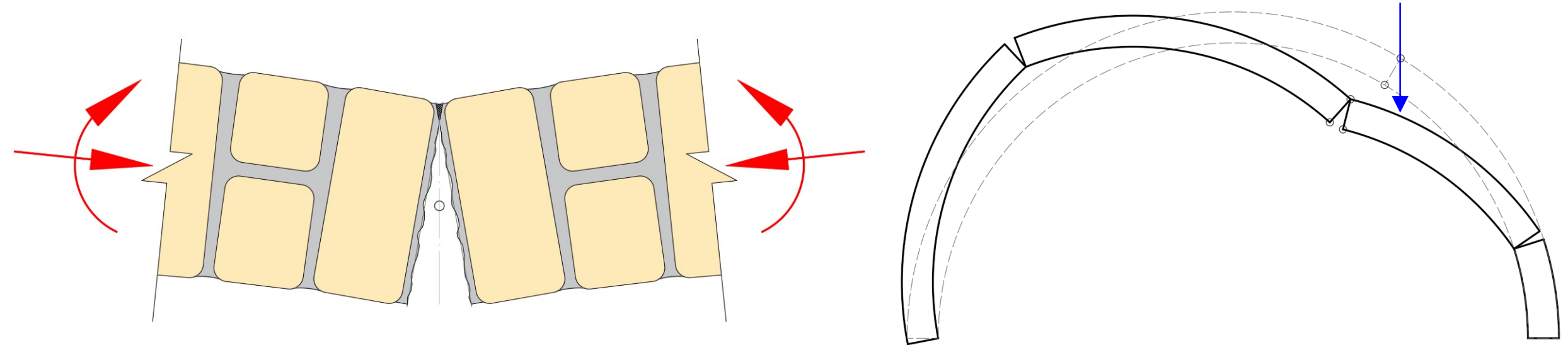
1) Ruine quand les contraintes atteignent la résistance à la compression (sans la formation d'un mécanisme)



# Deux modes de rupture



2) Ruine par la formation d'un mécanisme (perte d'équilibre) sans attendre la résistance à la compression

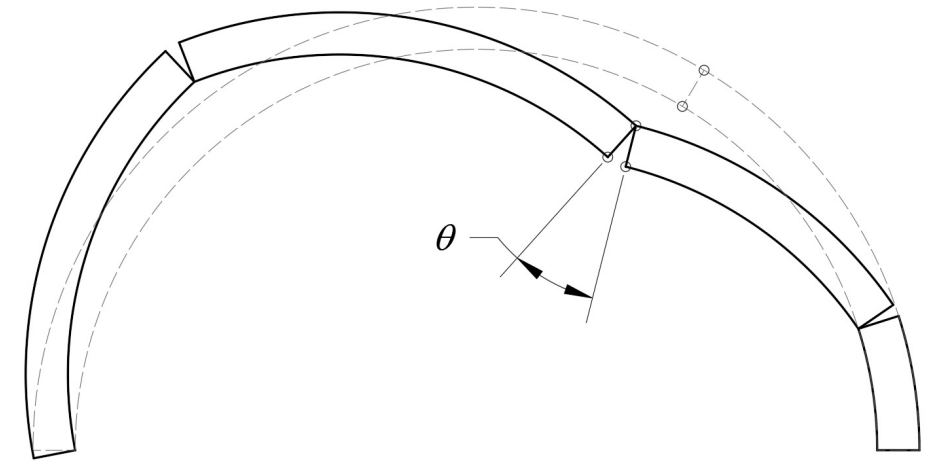
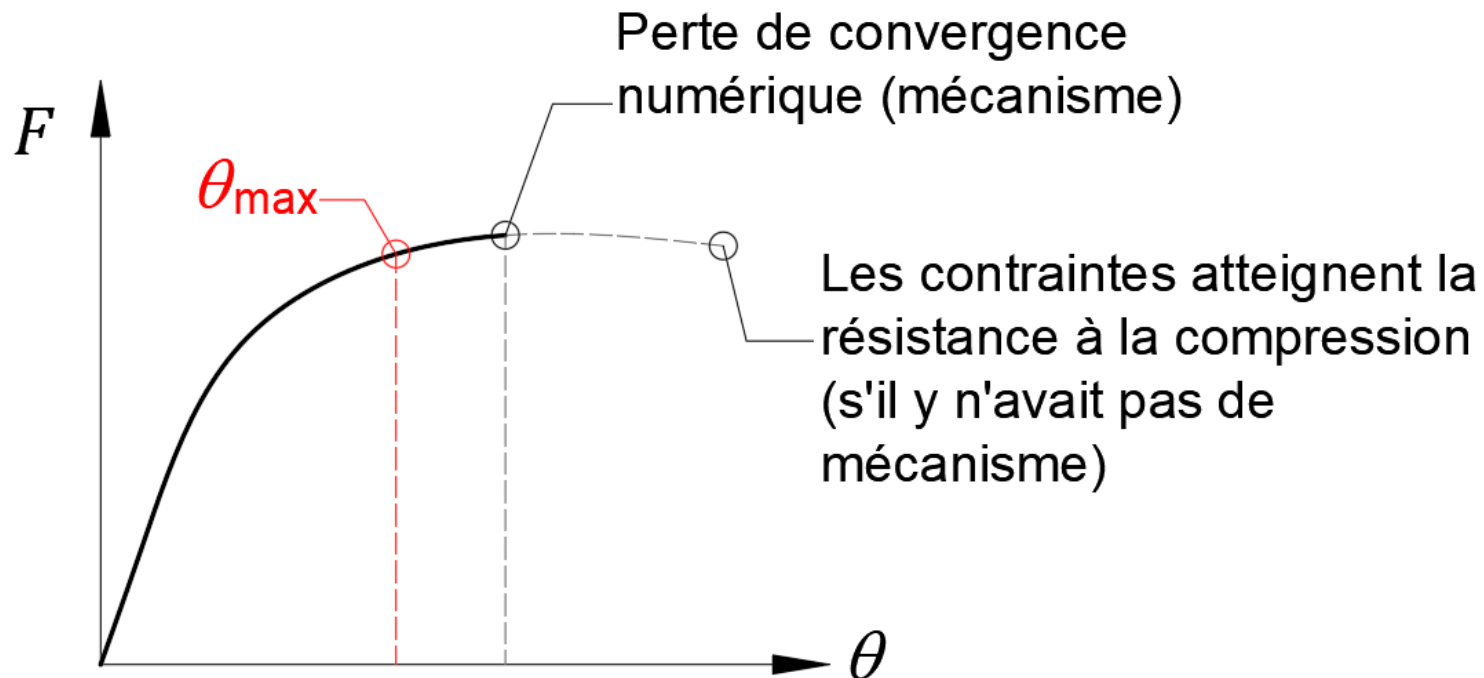


→ On ne poursuit la réflexion que sur ce mode

# Principe

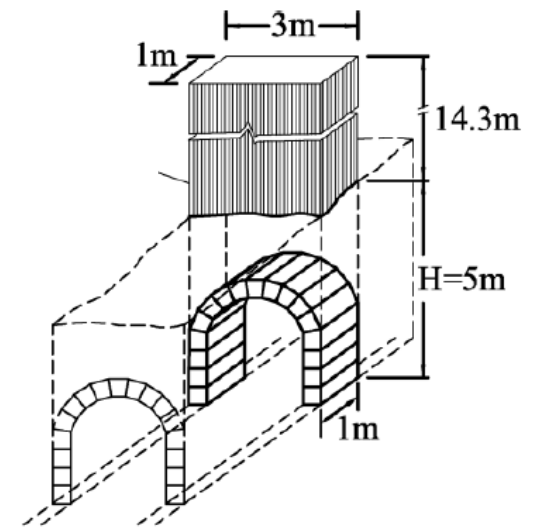
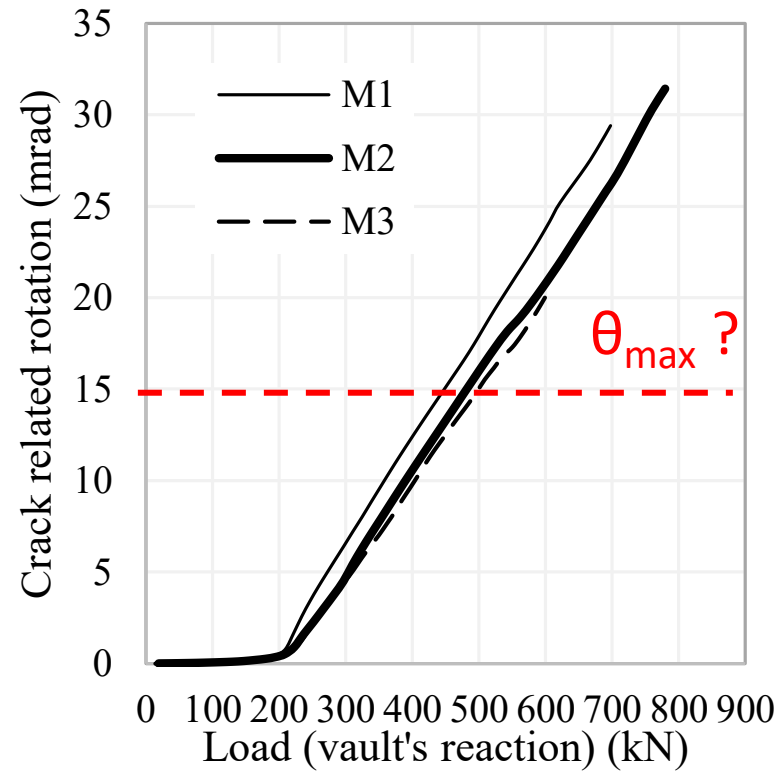
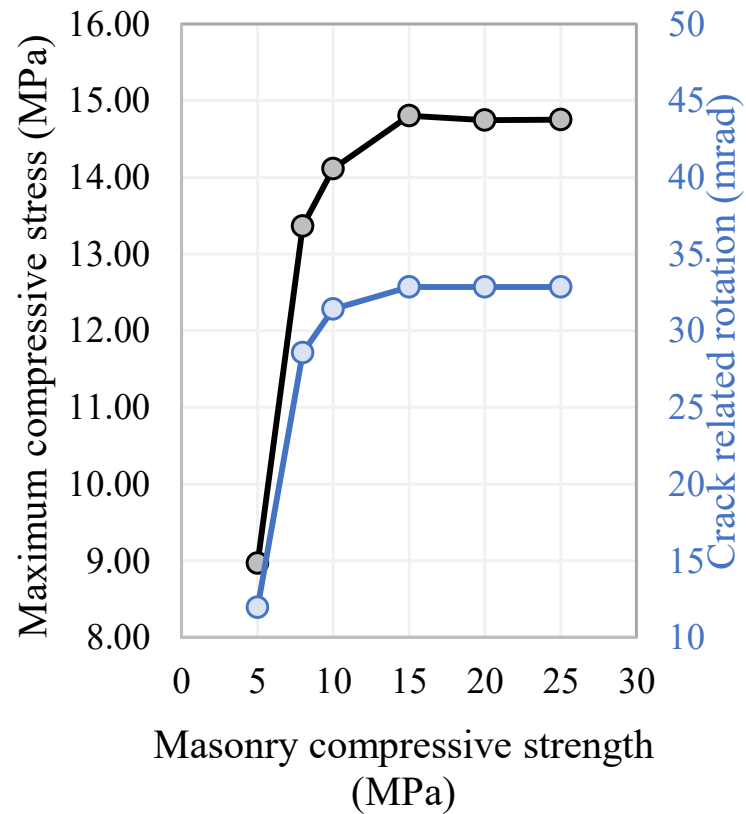


L'état limite ultime d'une voute en maçonnerie, occasionné par l'apparition d'un mécanisme, se produit lorsqu'au droit d'une des rotules la rotation excède une rotation maximale  $\theta_{\max}$ .



# Précédemment ...

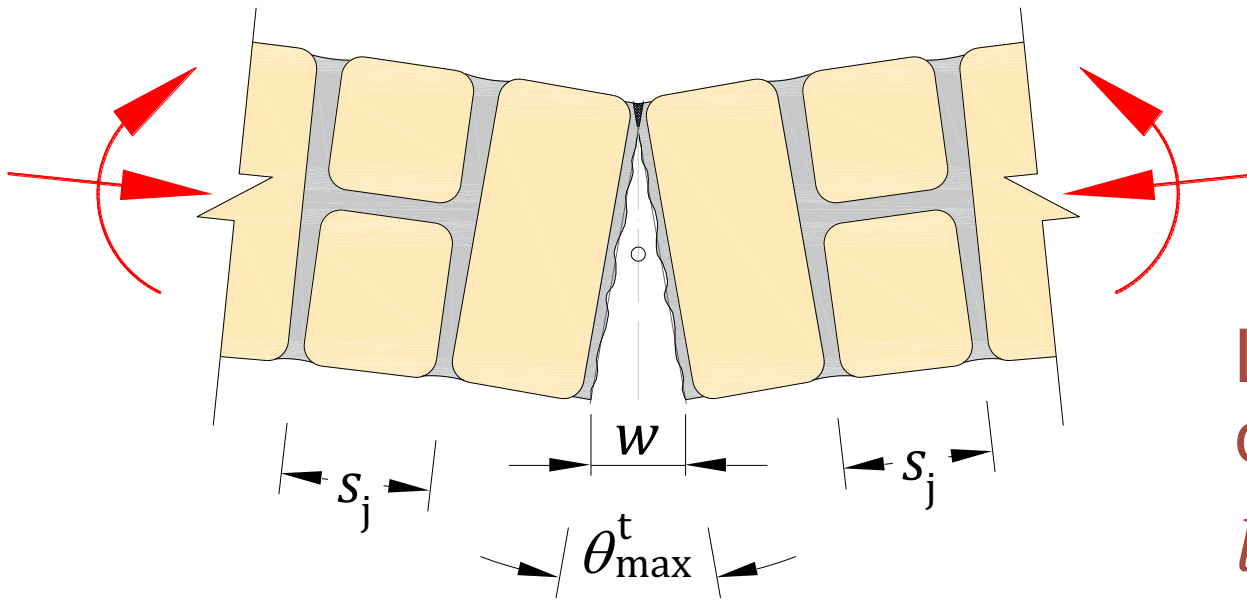
## Étude sur un ancien tunnel en Grèce



# Formulation



Ouverture de fissure :



$$w = l_{cs} \varepsilon_t$$

Longueur  
caractéristique

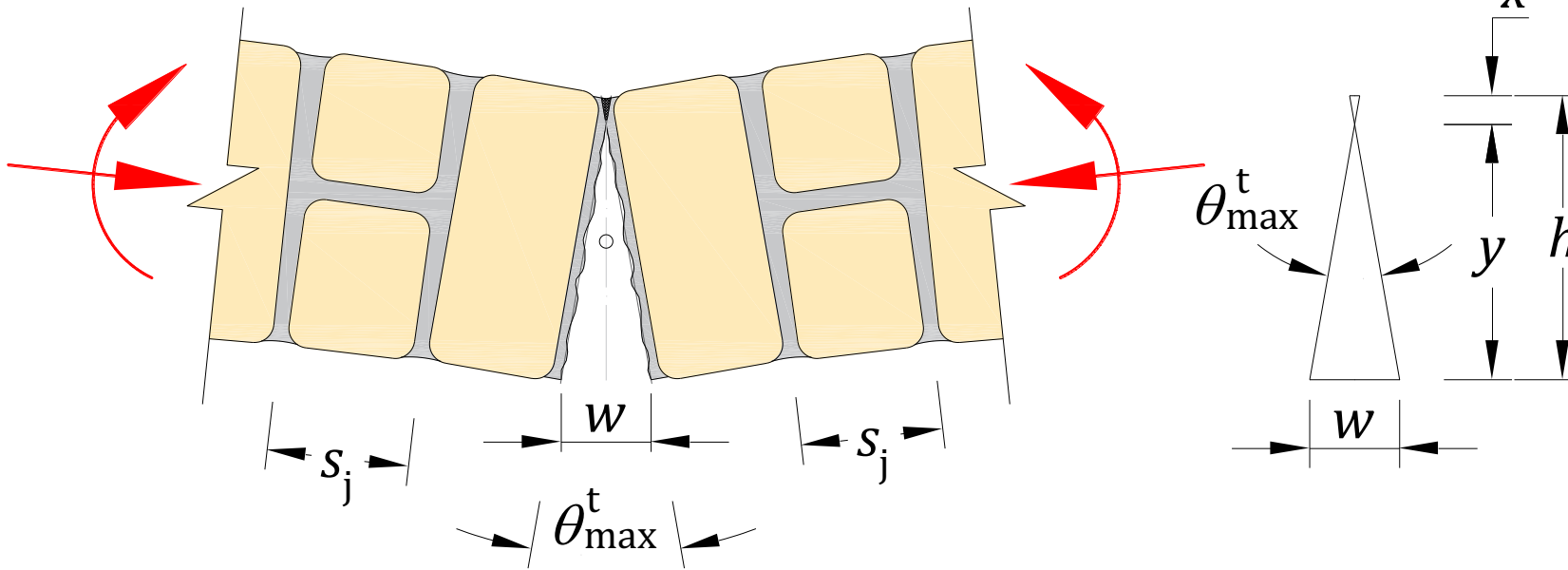
$$l_{cs} = s_j$$

Déformation en  
traction maximale  
autorisée

$$\varepsilon_t \approx 5 - 20\text{‰}$$



# Formulation



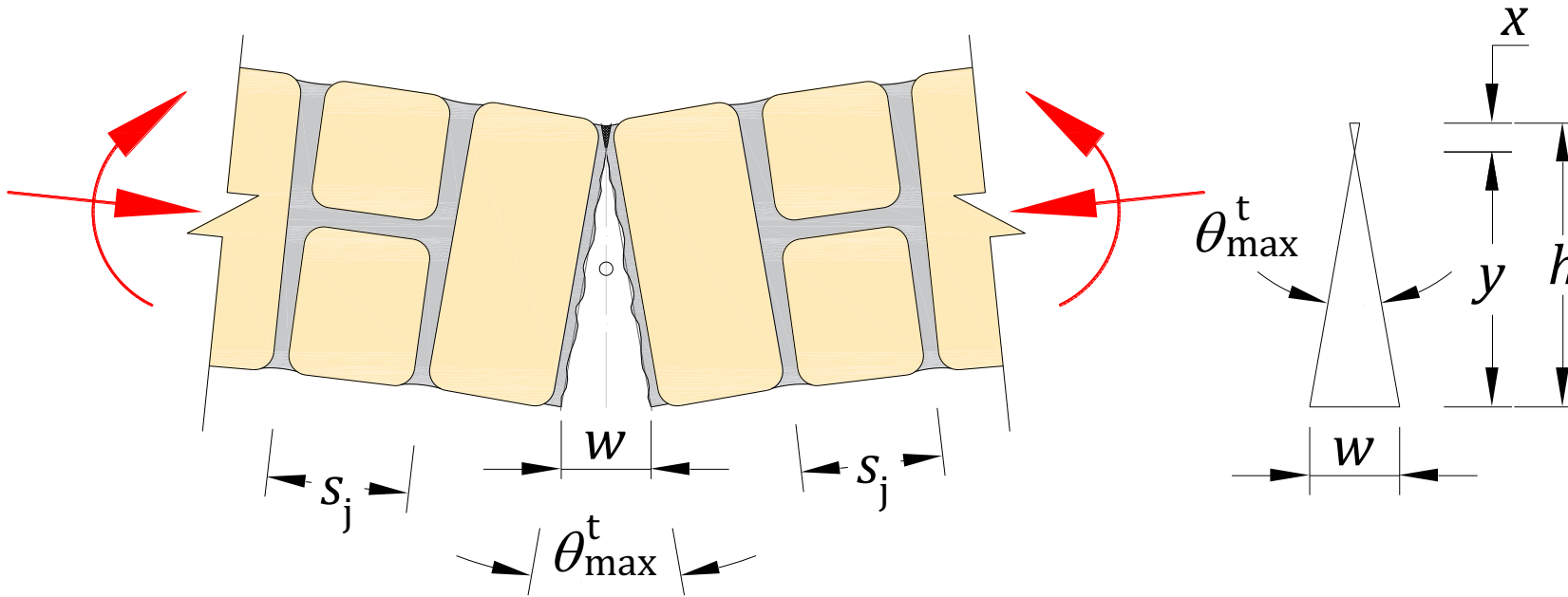
Hauteur de la fissure

$$y = h - x = \left(1 - \frac{x}{h}\right) h$$

Hauteur comprimée

$$x/h \approx 0,05$$

# Formulation



Rotation maximale

$$\theta_{\max}^t = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{w}{2y} \right)$$



L'idée n'est pas de trouver une solution exacte mais de proposer une limite sécuritaire.

La rotation maximale est définie en choisissant :

- La déformation maximale en traction  $\varepsilon_t$
- La hauteur comprimée maximale  $x/h$

$$\theta_{\max}^t = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{w}{2y} \right)$$





Photos : G. Viossanges



# Validation



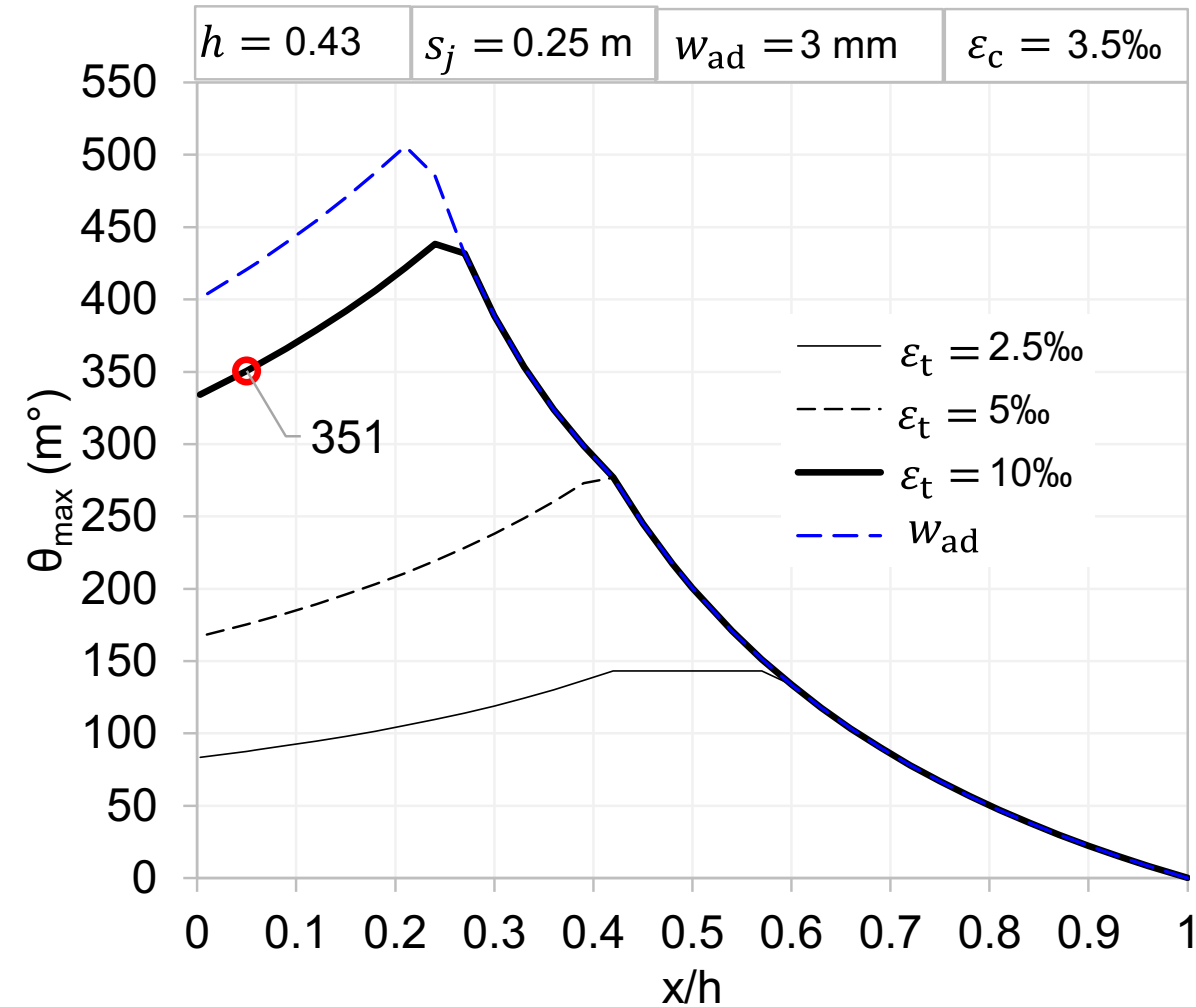
Photos : G. Viossanges

# Validation



Calcul de la rotation maximale :

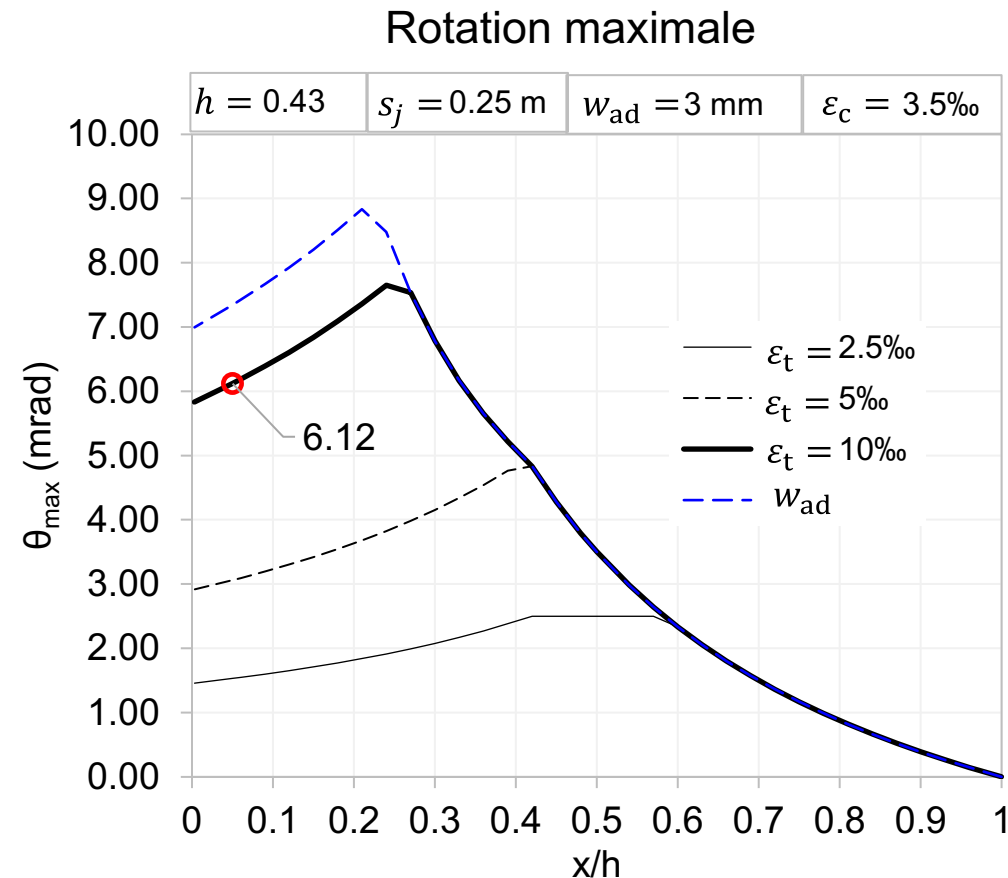
$$\theta_{\max}^t = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{w}{2y} \right)$$
$$= 2 \operatorname{atan} \left( \frac{0.25\text{m} \times 10\text{‰}}{2(1 - 0.05) \times 0.43\text{m}} \right) = 351 \text{ m}^\circ$$



# Validation



## Formule proposée



## EC2 béton armé (rotule plastique)

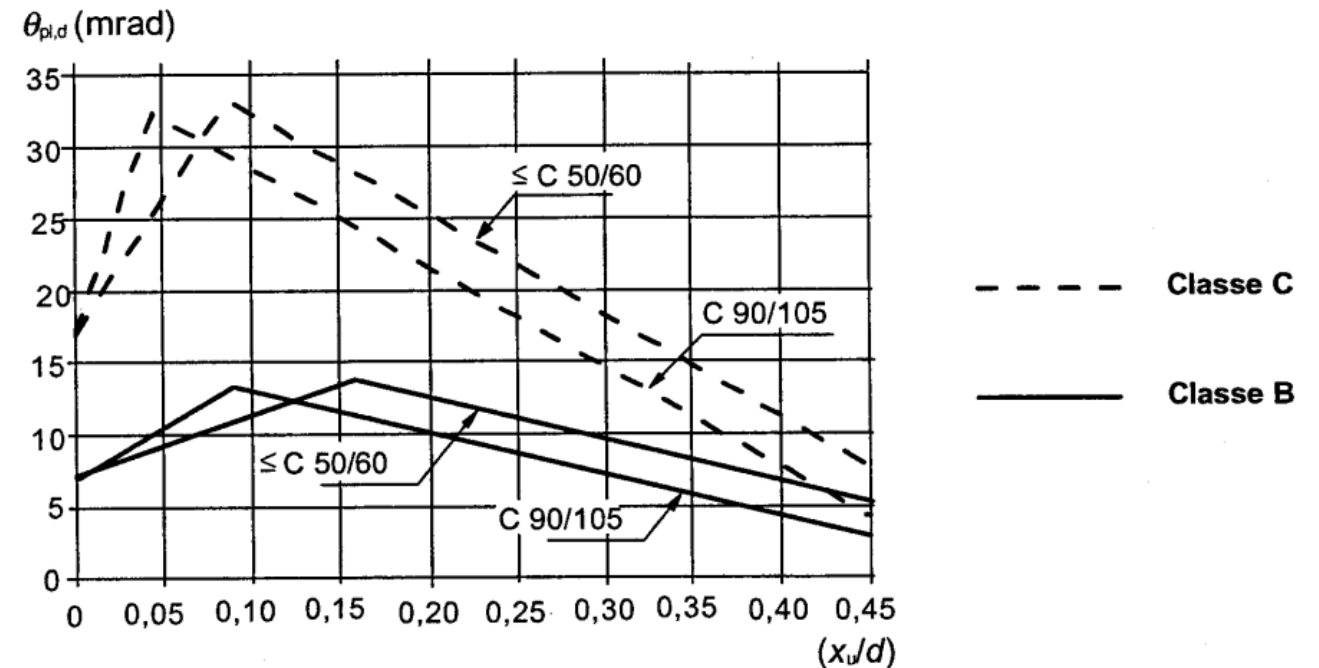


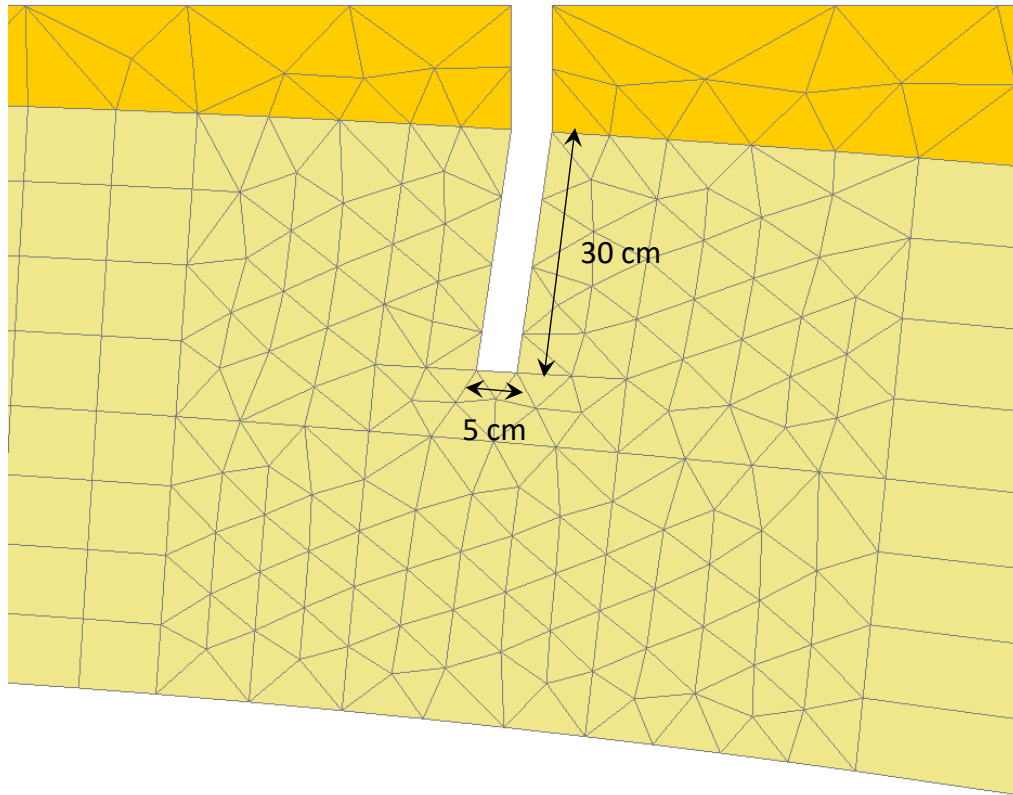
Figure 5.6N : Valeur de base de la rotation plastique admissible,  $\theta_{pl,d}$ , des sections de béton armé pour des armatures de classe B ou C. Les valeurs s'appliquent pour un élancement vis-à-vis de l'effort tranchant  $\lambda = 3,0$



# Validation



## Modèle Éléments finis non linéaire

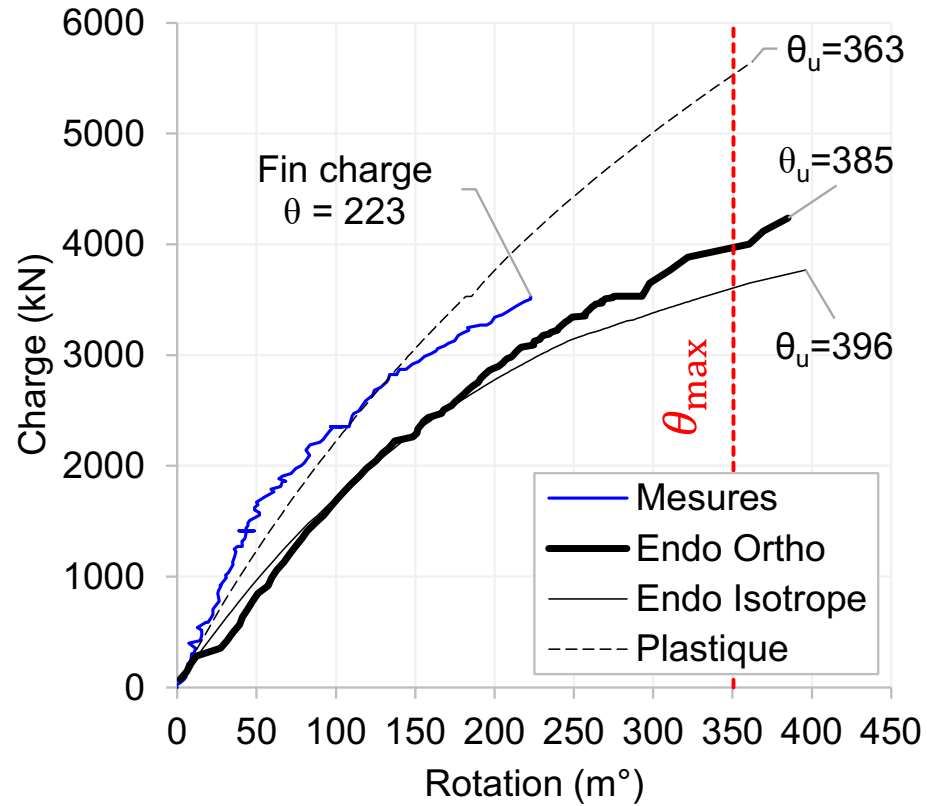




# Validation

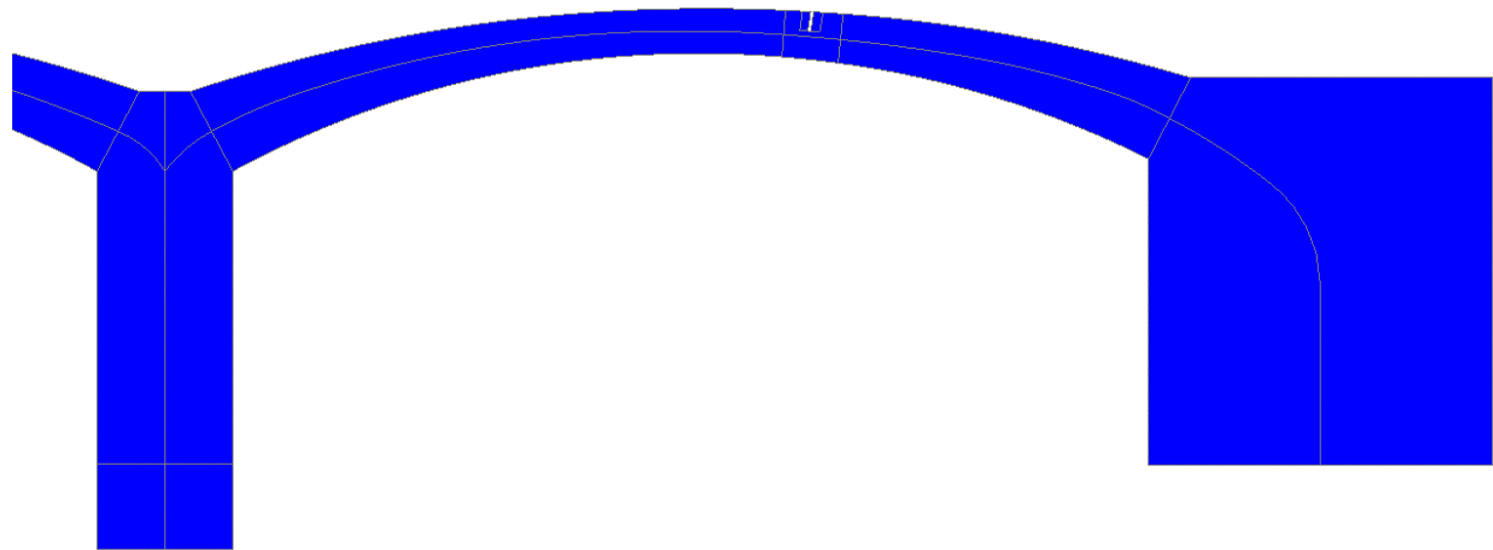


Rotation rotule (saignée)



CESAR-LCPC v2021 - DEMO

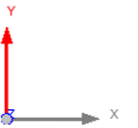
Modèle=4 - Nom du modèle=1er niveau - Solveur=MCNL - Increment=1/10



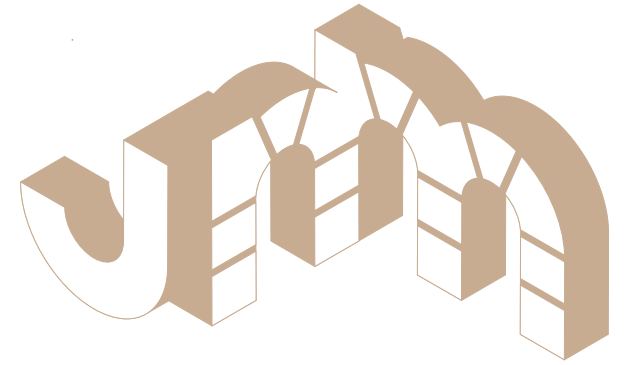
$|u|_{\max}=0.110\text{mm}$   $\epsilon_{1,t}=51.596\text{micro-def}$

CESAR-LCPC v2021 - DEMO

CESAR-LCPC v2021 - DEMO



CESAR-LCPC v2021 - DEMO



# Merci de votre attention

Contact :

Omar MORENO REGAN

[omar.moreno-regan@setec.com](mailto:omar.moreno-regan@setec.com)

Journées Nationales de la Maçonnerie

5ème édition | Bordeaux

12 et 13 juin 2025