



JOURNEES NATIONALES
MACONNERIE

5ème édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025



Modélisation structurelle d'une voute annulaire

VENZAL,V, PEYRARD,J

AIA
INGENIERIE

AIA
LIFE DESIGNERS

Contexte de l'étude



FORT DE SOCOA

- Construit à partir de 1627 et remanié par Vauban et Ferry à partir de 1693
- Inscrit MH depuis 2009



© Teddy Bear photos

MISSIONS

- Etude structurelle globale du fort et des bâtiments annexes
- Solutions de confortement
- Approche sismique
- Etudes géotechniques et vulnérabilité de la falaise (Géolithe)



© Géolithe

Focus tour et voûte annulaire



TOUR

- Conception militaire
- Peu de pathologies sur les ouvrages en pierre
- Estimation de la vulnérabilité sismique
- Planchers intermédiaires bois

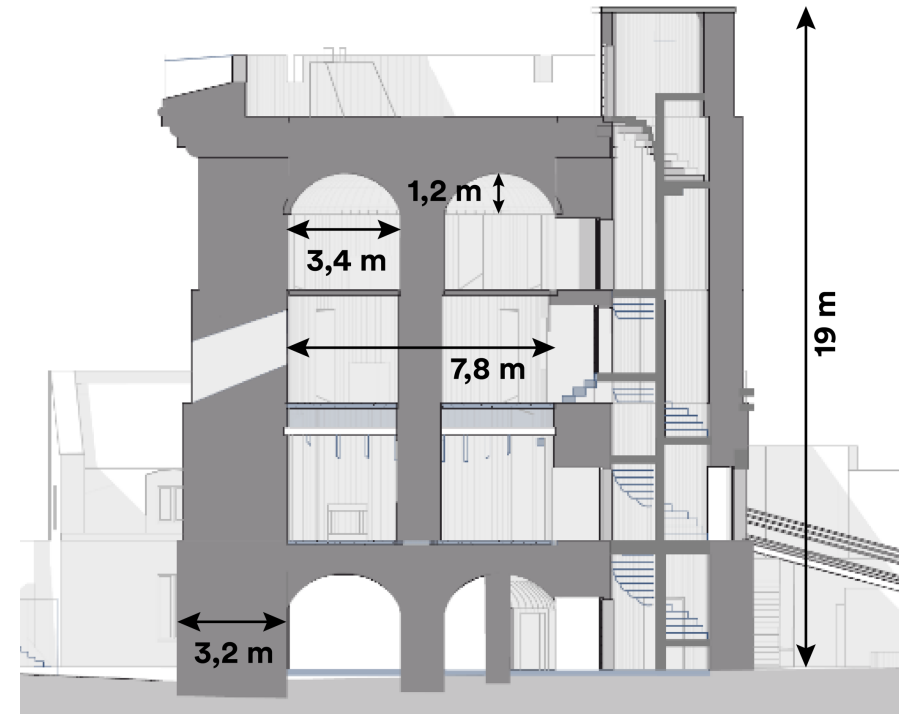


© Geolithe

VOUTES ANNULAIRES

- 2 voûtes (PH RDC et PH R+3)
- Aucune pathologie identifiée
- Estimation de la vulnérabilité sismique (approche R&D)

Diamètre fort : 14 m

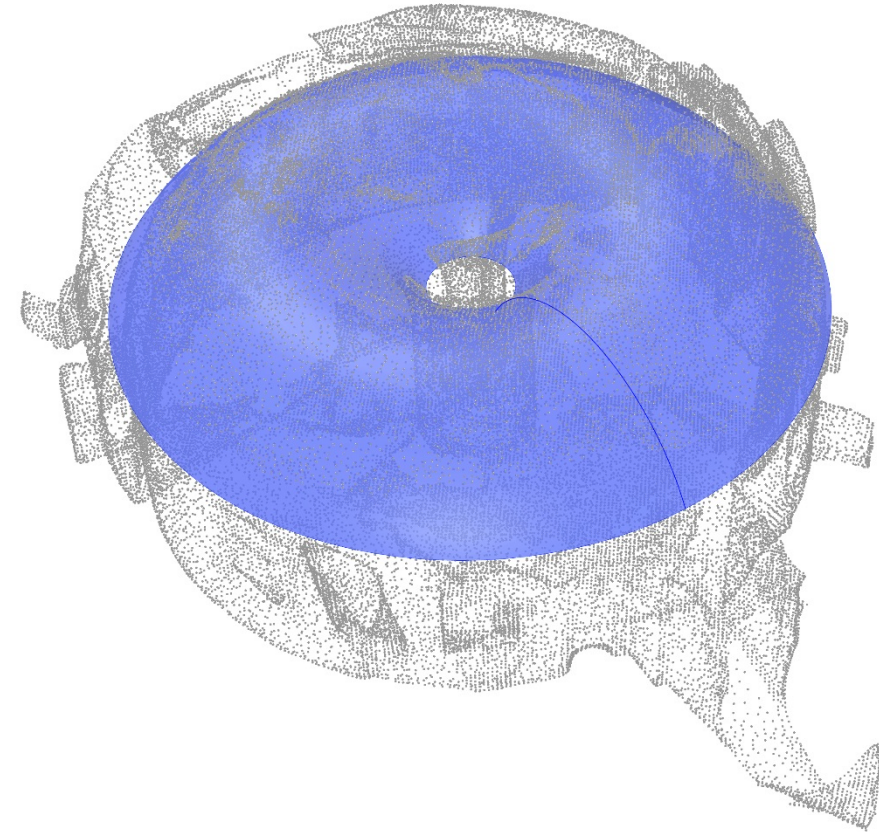


© Catherine Matveieff

Stratégie d'étude

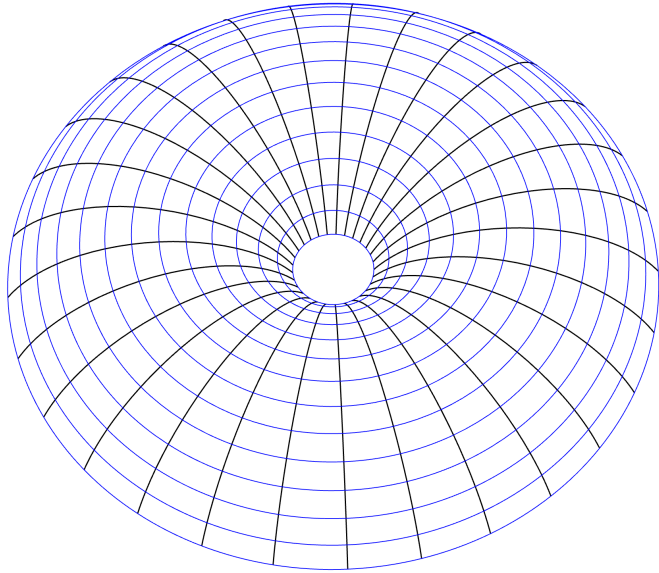


Vue de l'intrados de la voute annulaire

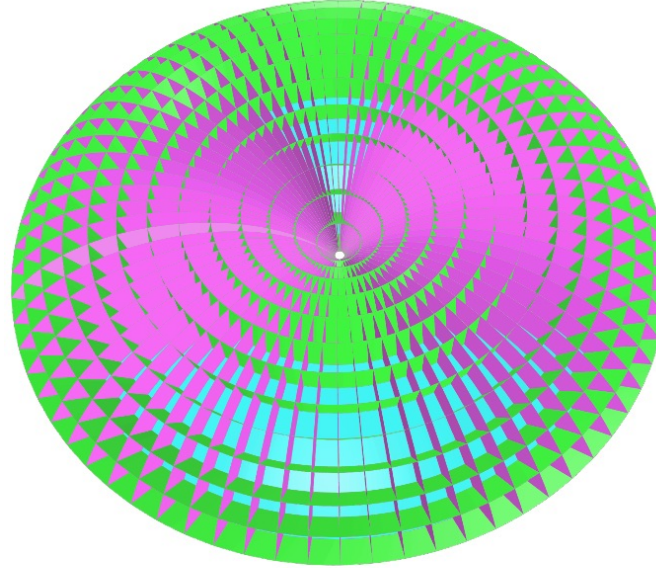


Superposition de la géométrie fondamentale et de la voute annulaire

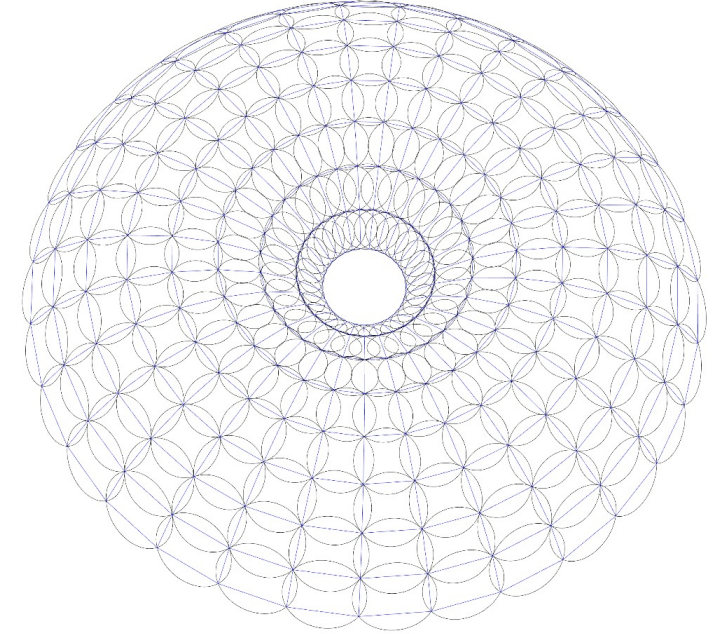
Principes stéréotomiques



*Méridiens et **Parallèles***

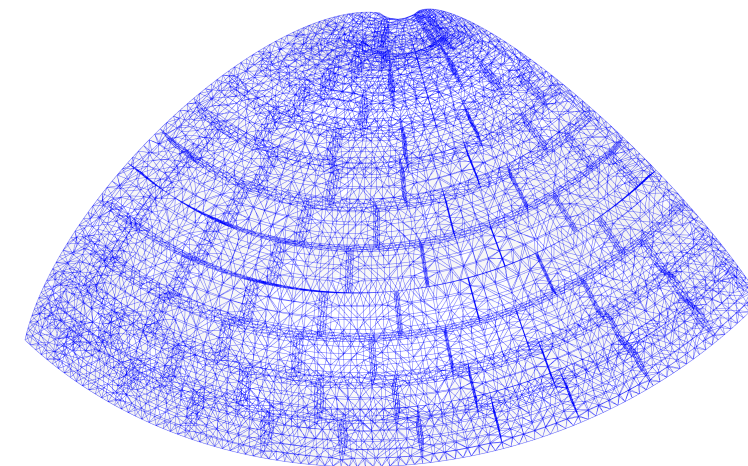
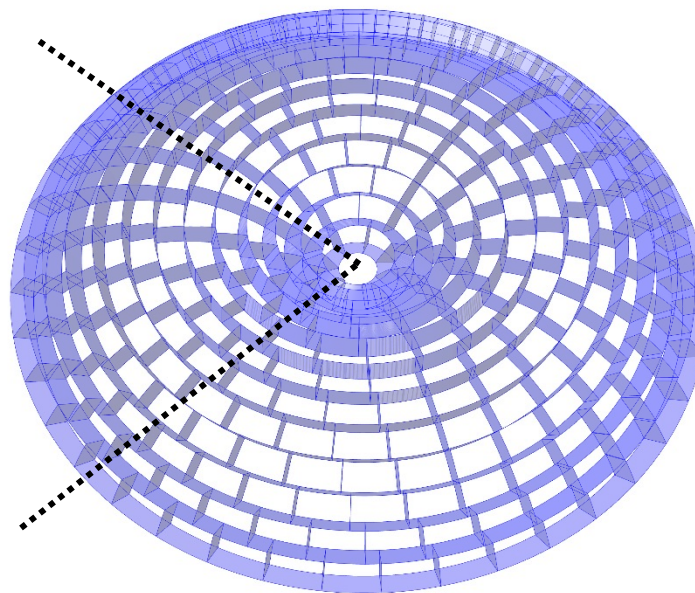
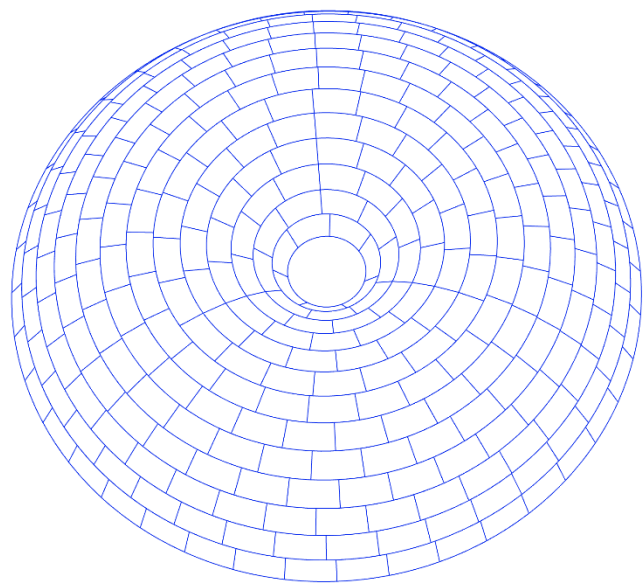
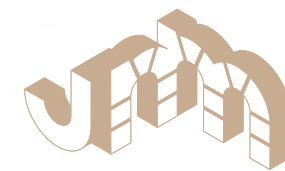


Orthogonalités des joints et de l'intrados



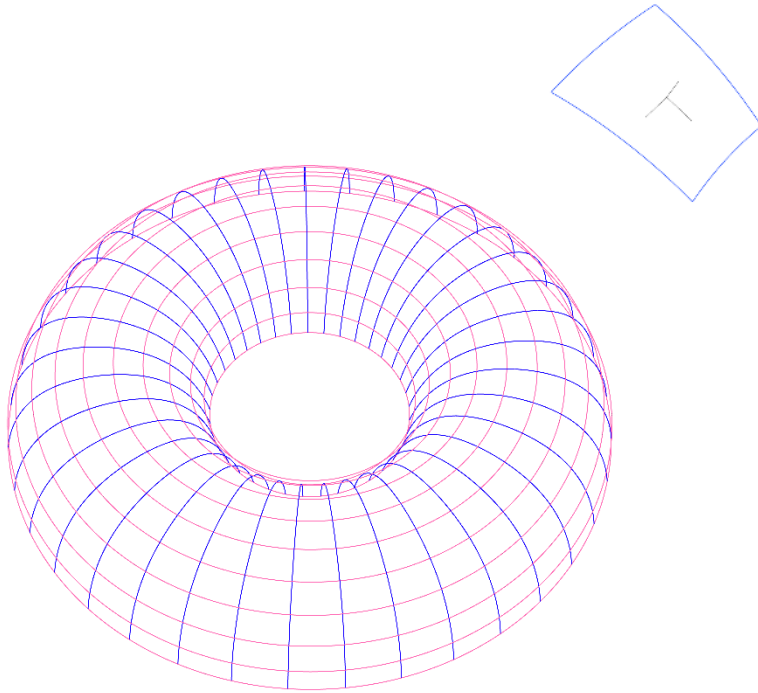
Planéité des faces intrados/extrados des blocs

Génération de l'appareillage

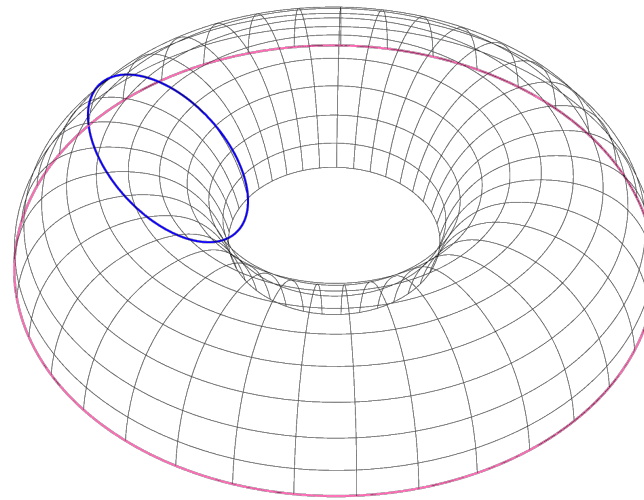


*Sélection d'un quart de voute pour le
calcul élément discret*

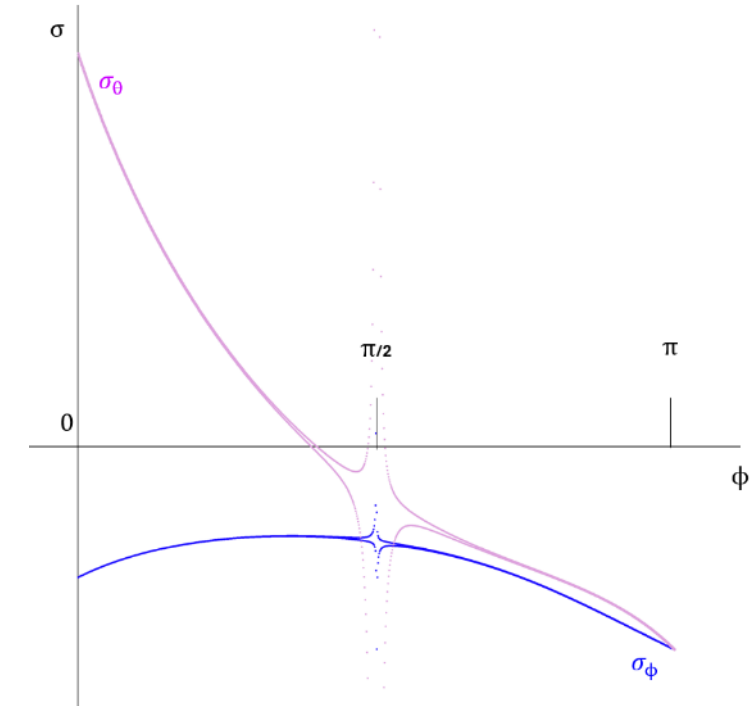
Analyse Structurale Membrane



Contraintes dans la direction des méridiens σ_ϕ et des parallèles σ_θ

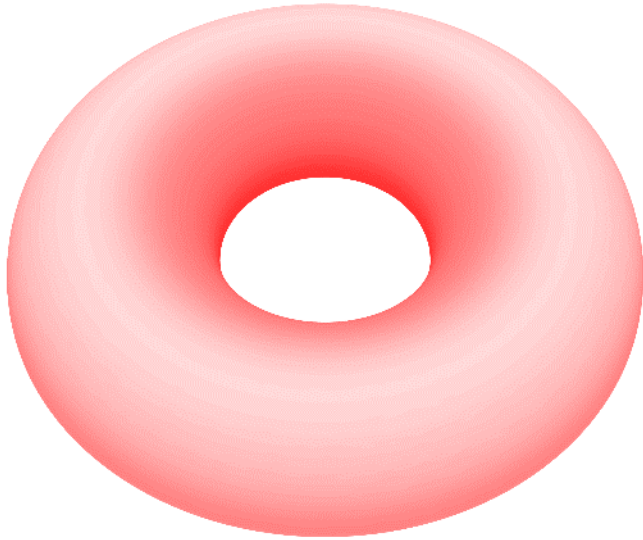


Évolution des rayons de courbure r_1 et r_2

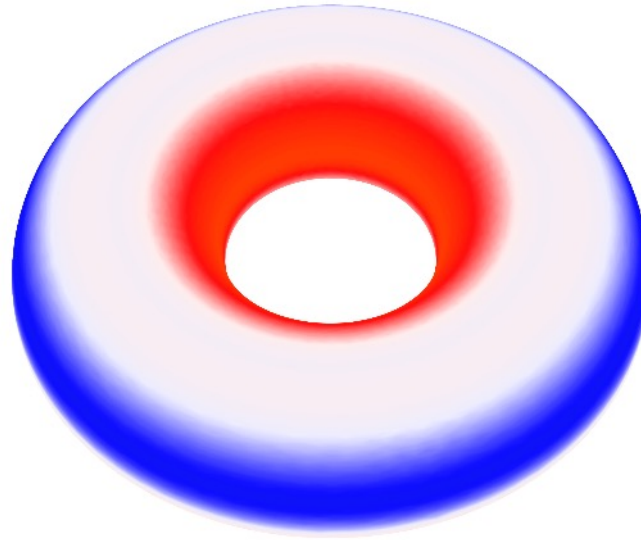


$$\frac{\sigma_\phi}{r_2} + \frac{\sigma_\theta}{r_1} = -\sin(\phi) \frac{p}{t}$$

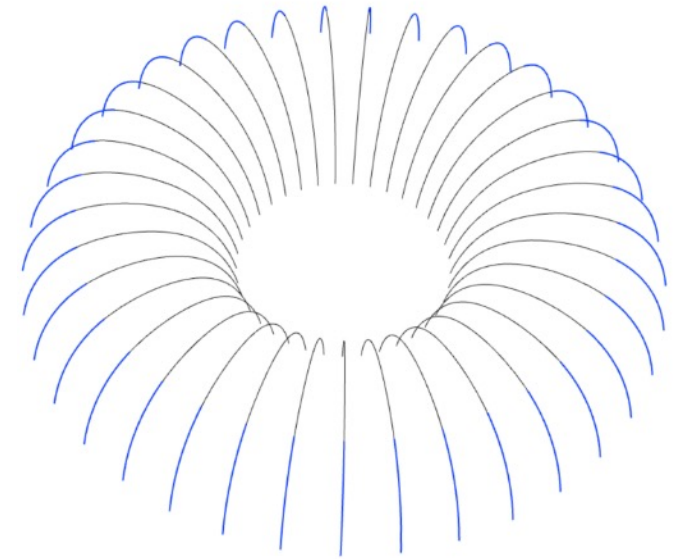
Analyse Structurelle Membrane



*Contraintes dans la direction des
méridiens (Modèle EF)*

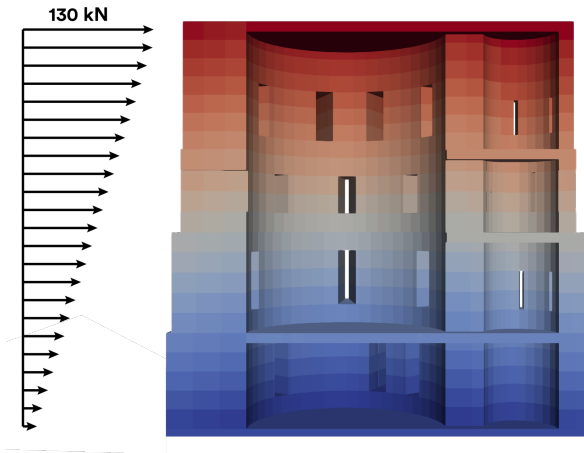


*Contraintes dans la direction des
parallèles (Modèle EF)*

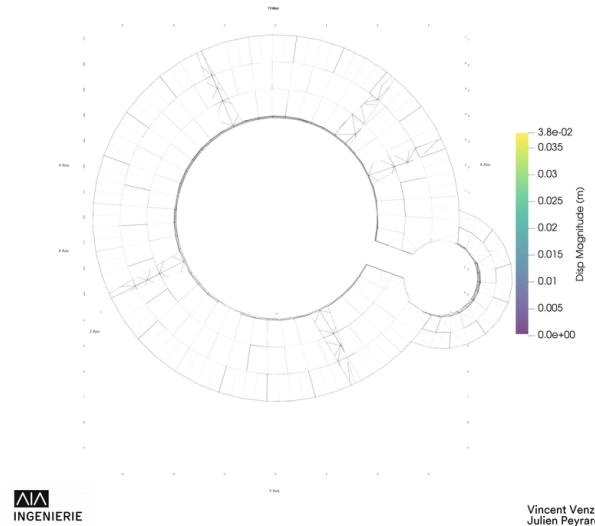


Facies de fissurations attendus

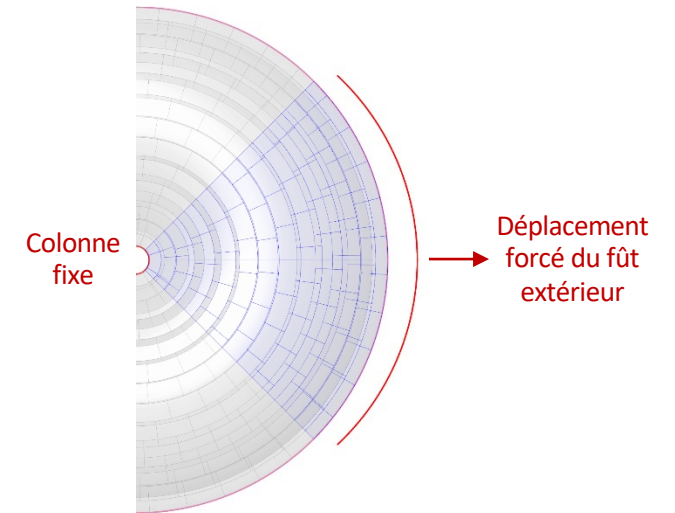
Estimation des efforts sismiques



Estimation des efforts statiques par la méthode des forces latérales

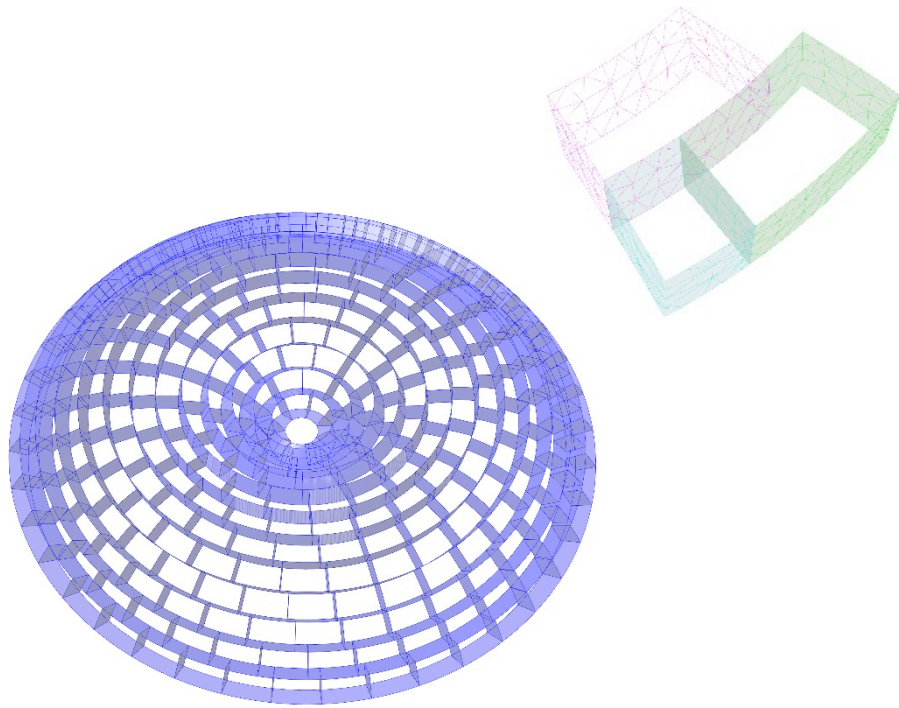


*Estimation des déplacements sur un modèle global
Déplacement latéral max = 3,2 cm*



*Application des déplacements relevés à la voute annulaire
Hypothèse défavorable : le fût extérieur de la tour se déplace de 3,2 cm tandis que la colonne centrale reste fixe*

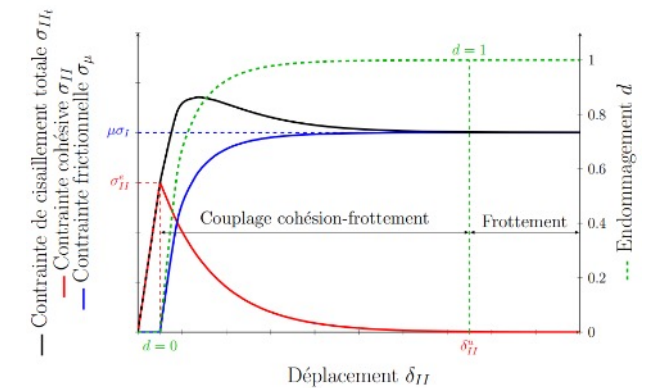
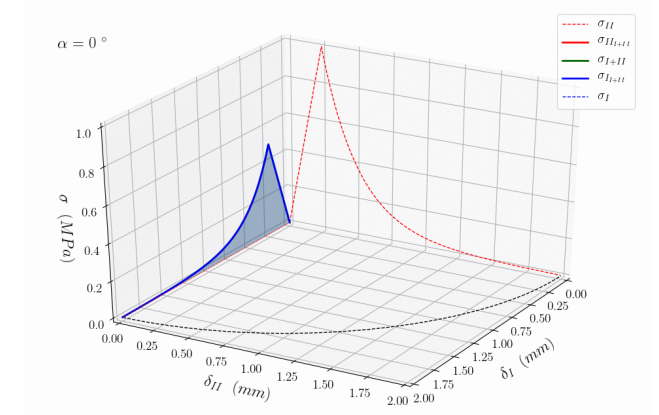
Stratégies de modélisation



Modélisation ED avec blocs étendus déformables



Fissuration interfaciale de la maçonnerie



Loi FCZM

Hypothèses de calcul



PROPRIÉTÉS DE LA MAÇONNERIE

ANALYSES IN SITU

PIERRE

- Calcaire gris type Pierre de Bidache
- $\rho = 2730 \text{ kg/m}^3$
- $R_c = 79 \text{ Mpa}$ (essais)



HYPOTHÈSES DE CALCUL

BLOC ÉTENDU

- $\rho = 2730 \text{ kg/m}^3$
- $E_{be} = 18,4 \text{ Gpa}$ (EC6)
- $F_d = 6,6 \text{ Mpa}$ (EC6)

MORTIER

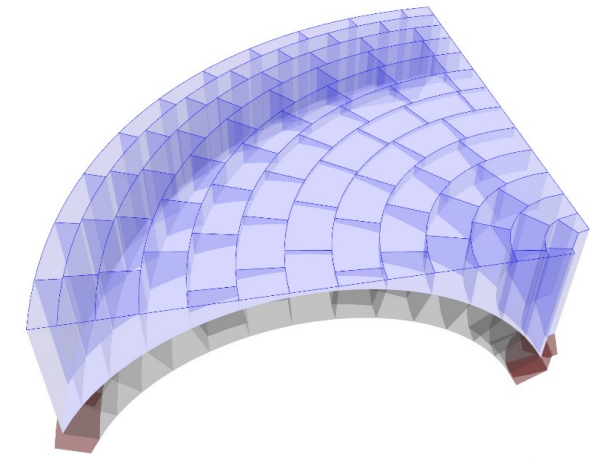
- Analyse par spectromètre ICP
- Mortier peu cohésif à base de chaux aérienne ou faiblement hydraulique



MODÈLE DE ZONE COHÉSIVE (FCZM)

- Propriétés cohésives et frictionnelles classiques d'un mortier de chaux
- Endommagement initial du joint de 60 %

EFFORTS ET CL APPLIQUÉS À LA VOUTE DE 30 CM D'ÉPAISSEUR



Effort vertical (remblai (1800 kg/m^3), CE (400 kg/m^2), dallage pierre pierre 10 cm)

Appuis rigides

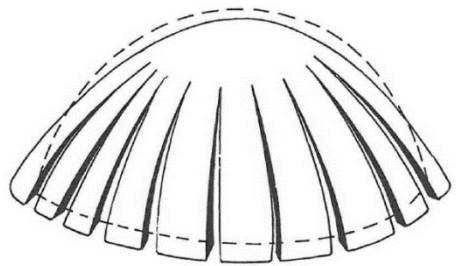
Conditions de symétrie

OBJECTIF : Vérifier la stabilité de la voute et la reprise des efforts verticaux malgré le déplacement imposé de la ceinture extérieure

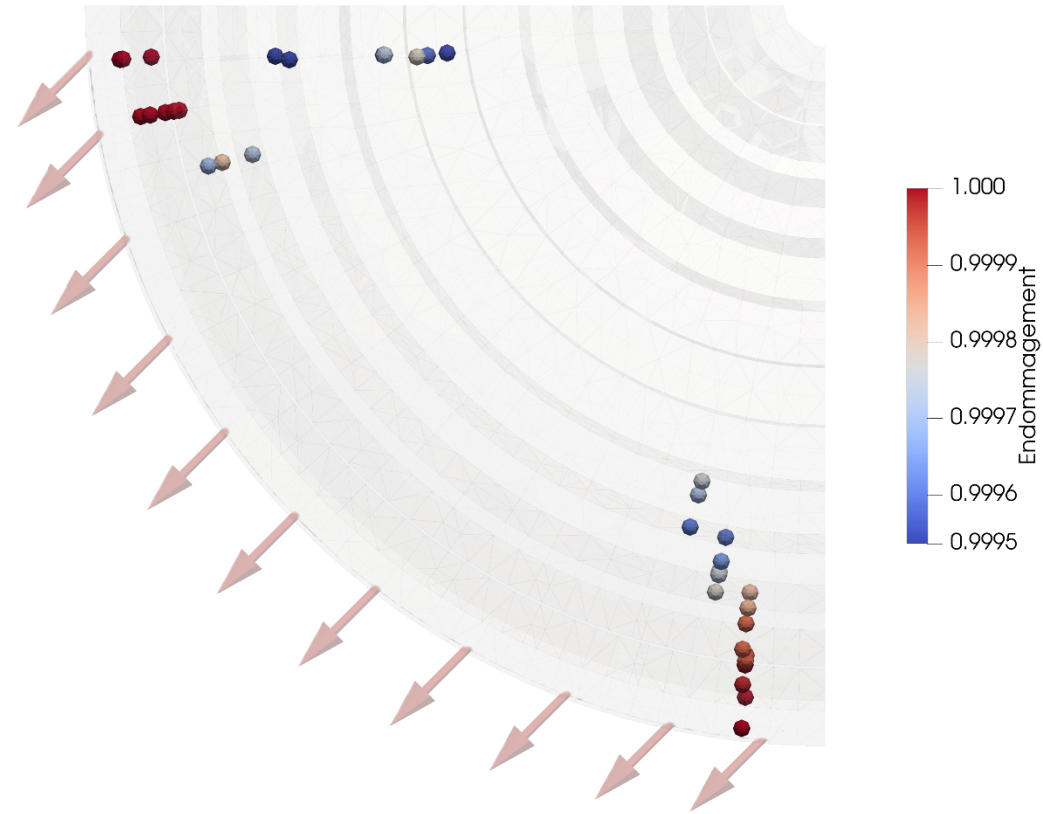
Cinématique de ruine



Initiation de la fissuration le long
des méridiens



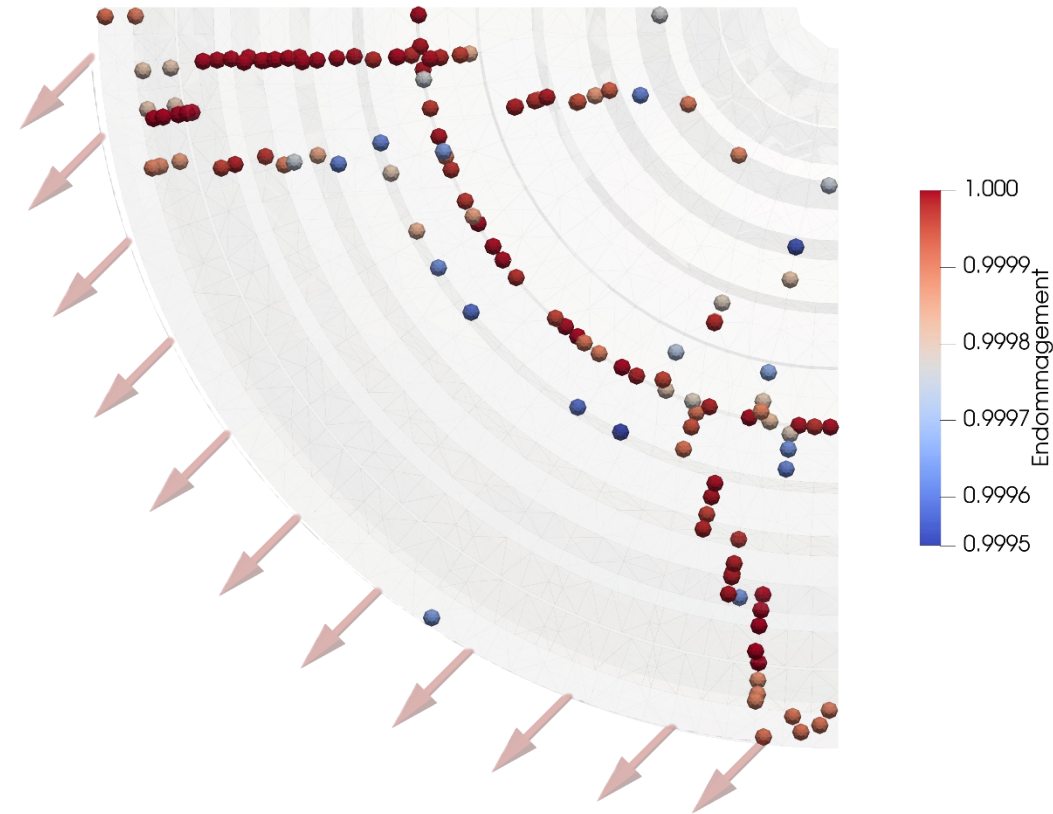
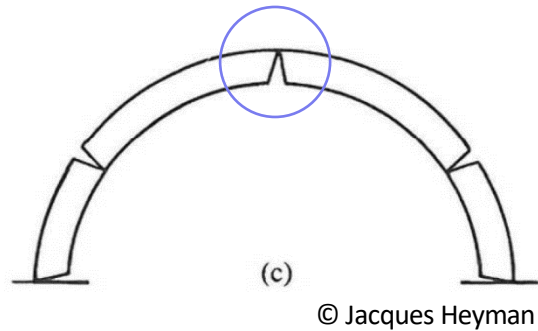
© Jacques Heyman



Cinématique de ruine



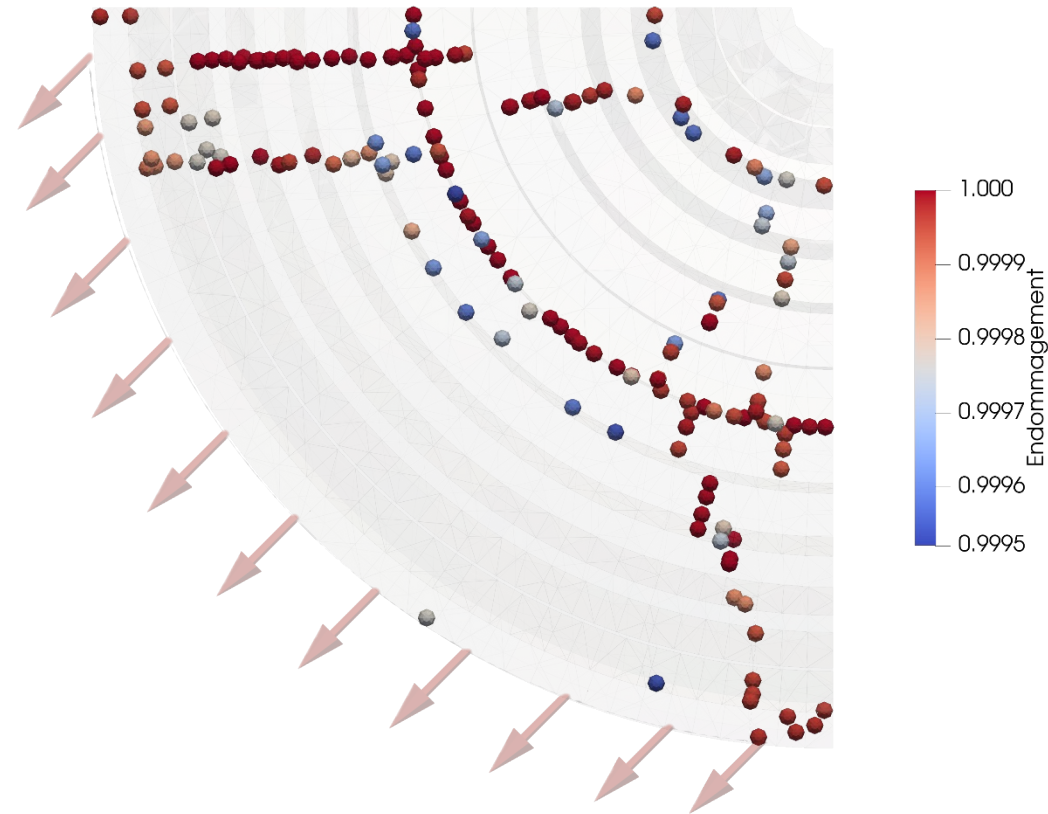
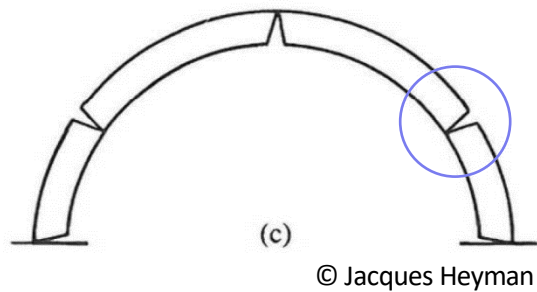
Première rotule à la clé
(intrados) le long du
parallèle



Cinématique de ruine



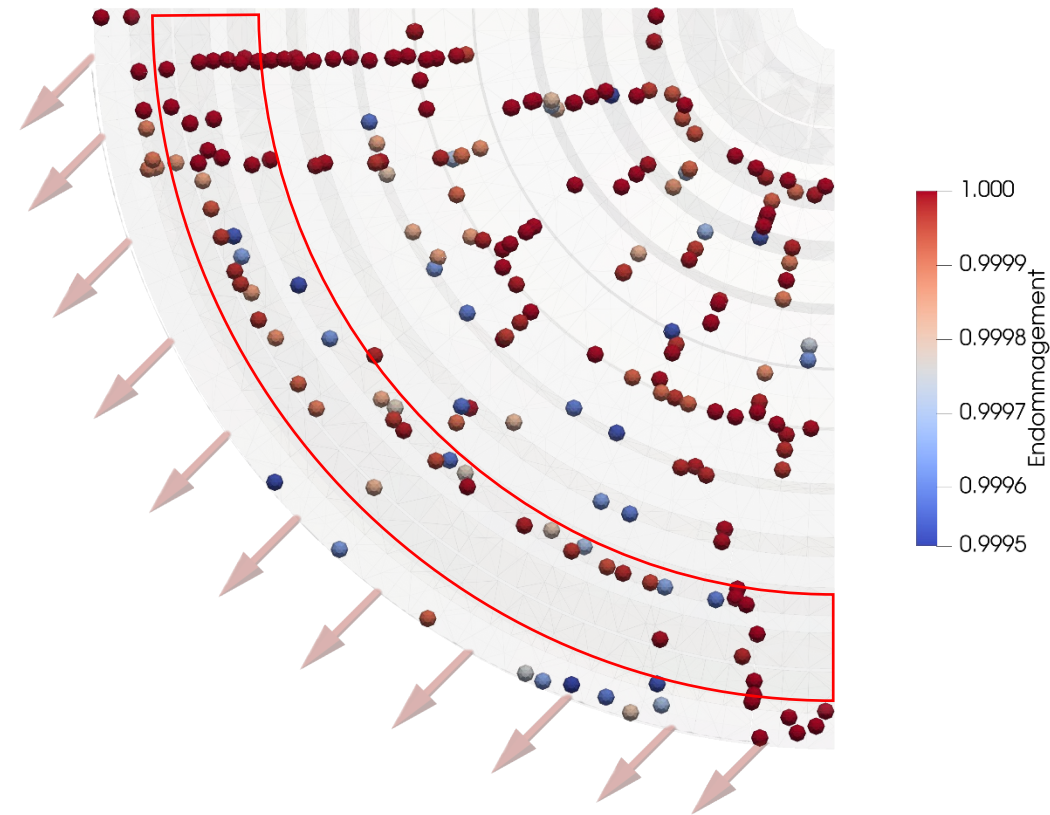
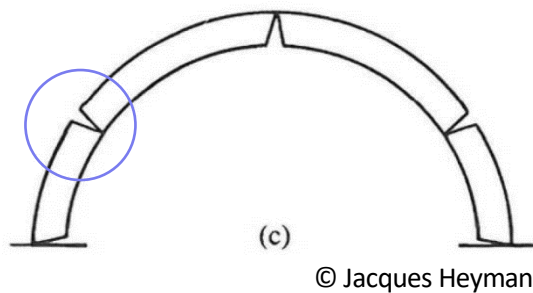
Deuxième rotule au rein intérieur
(extrados) le long du parallèle



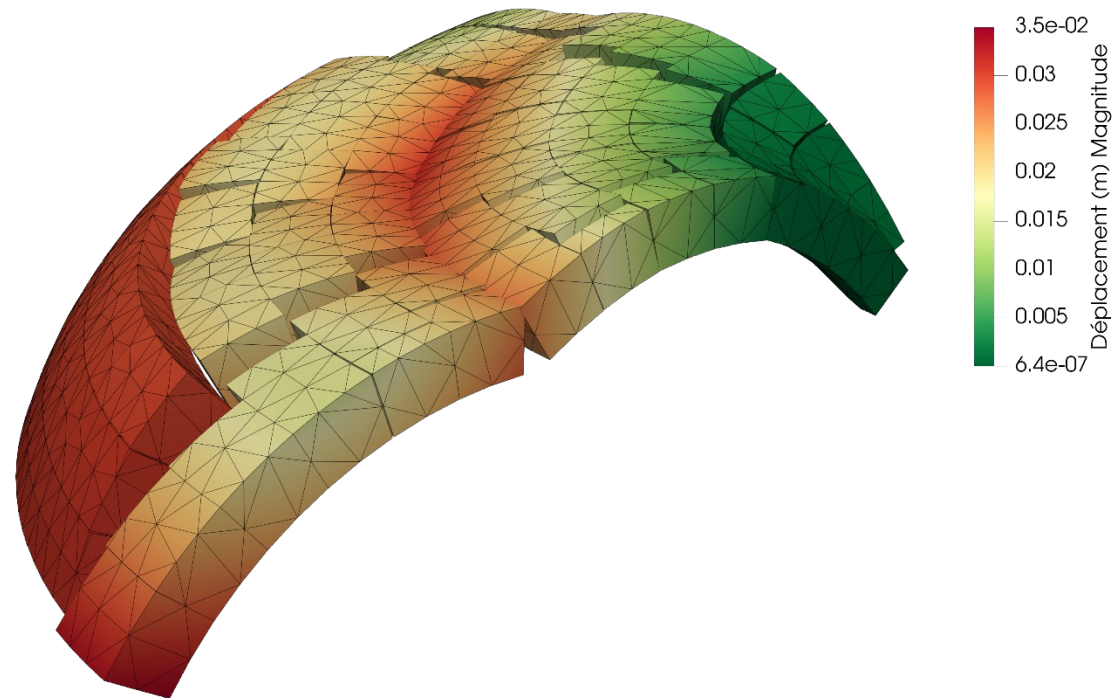
Cinématique de ruine



Troisième rotule au rein extérieur
(extrados) le long du parallèle



Champs de déplacement



Déformations x15

Champs de contraintes



$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = 6,6 \text{ MPa}$$





Merci de votre attention

Contact :

VENZAL, V. - v.venzal@a-i-a.fr

PEYRARD, J. - j.peyrard@a-i-a.fr



Journées Nationales de la Maçonnerie
5ème édition | Bordeaux
12 et 13 juin 2025