

CALCUL 3D D'UNE EGLISE EN INTERACTION SOL STRUCTURE

Fliscounakis Agnès, Strains/INSA Rennes,

agnes.fliscounakis@strains.fr

Cespedes Xavier, Strains,

xavier.cespedes@strains.fr

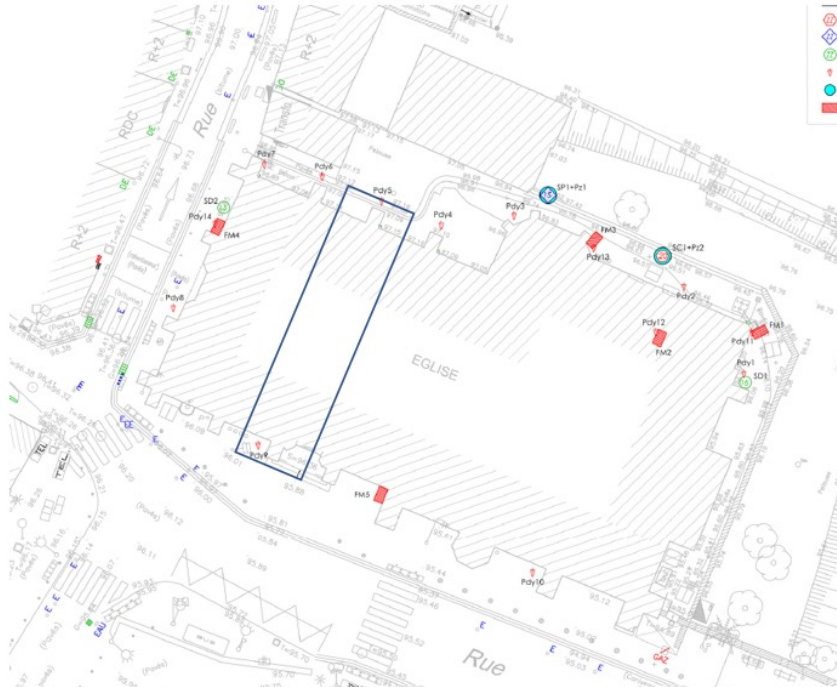


Problématique 1/2



Photographies de fissures ayant fait l'objet de reprises de maçonneries selon [17]

Problématique 2/2



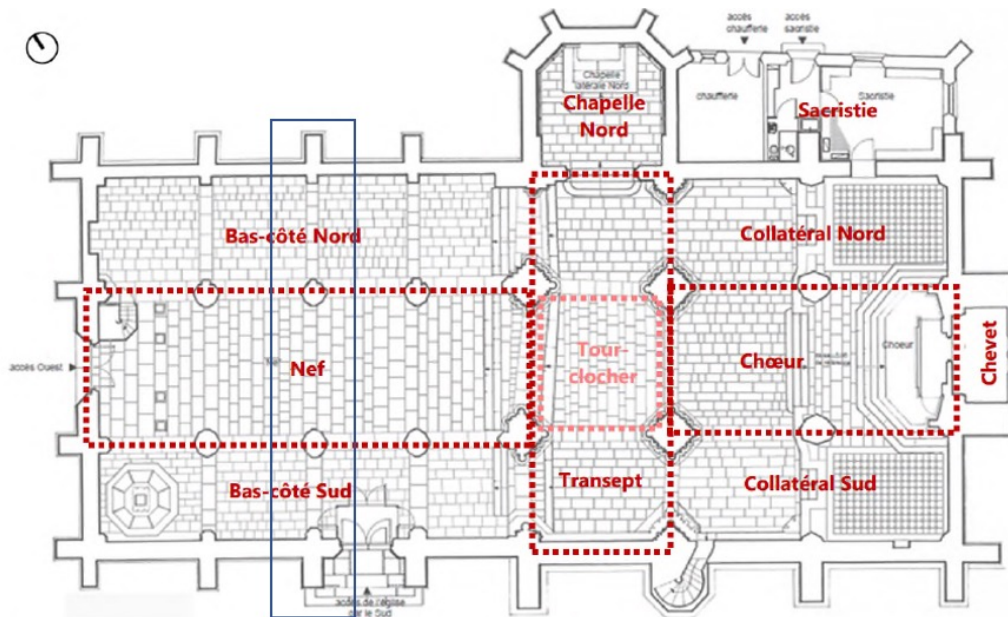
Sondage	Façade concernée	Profondeur fondation supposée (m/TN)	Terrains supposés en fondation	Résistance nette du terrain sous la fondation qnet		Taux de travail ELS Q _{ELS} (MPa)
				Profondeur (m/TN)	Qnet (MPa)	
SP1	Façade Nord - Chapelle	2.1 (extension : chapelle)	Remblais sableux	3	0.37	0.14
			Argiles sableuses	6	1.11	0.40
Pdy1	Façade Est - Sacristie	1.5 (extension : sacristie)	Argiles sableuses	1.4	0.19	0.06
Pdy11				1.4	0.19	0.06
Pdy2	Façade Nord - Chapelle	2.1 (extension : chapelle)	Argiles sableuses	2.0	0.55	0.18
Pdy13				2.0	2.40	0.80
Pdy3				2.2	0.36	0.12
Pdy4	Façade Nord - Bas-côté Nord	2.0	Limons sableux	2.2	0.55	0.18
Pdy5				2.0	0.36	0.12
Pdy6				2.0	0.36	0.12
Pdy7				2.0	0.36	0.12
Pdy14	Façade Ouest	2.0	Limons sableux	2.2	0.55	0.18
Pdy8				2.2	0.55	0.18
Pdy9	Façade Sud - Bas-côté Nord	2.4	Limons sableux	2.4	0.55	0.18
Pdy10				2.4	0.73	0.24

Démarche proposée

- Retrouver le fonctionnement de la tranche de l'édifice la plus critique avec interaction sol structure
- Expliquer l'origine des désordres observés
- Evaluer la marge par rapport à la ruine dans l'état actuel
- Construire une solution de renforcement
- Evaluer la marge par rapport à la ruine après ajout des renforts

Calcul à la rupture

Calcul élastoplastique



Digital Structure: Innover pour s'adapter

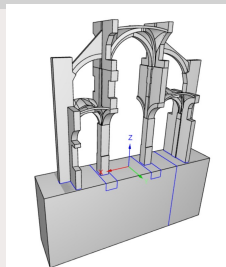
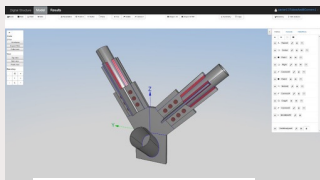
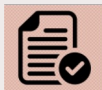
04/09/2025

STRAINS

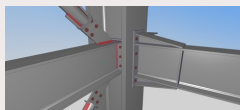
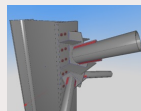
5



II



CAO
dédiée



Algorithme d'optimisation,
Calcul à la rupture, Point
intérieur, Grands
déplacements, GPU

16 publications
scientifiques
dans des
journaux à fort
impact
des dizaines de
présentations en
conférence

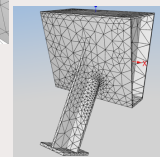
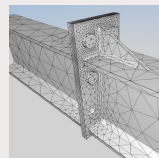
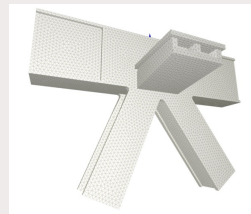
- Validation Access Files:
1. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 2. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 3. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 4. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 5. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 6. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 7. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 8. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 9. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 10. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 11. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 12. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 13. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 14. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 15. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.
 16. H. K. Hsu, "Validation of the Eurocode 3 design rules for the design of steel structures," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-10, 1996.

Eurocode 3
calcul des structures en acier
partie 1-8 : calcul des assemblages

Adéquation
entre les
méthodes
proposées et
le contexte
normatif

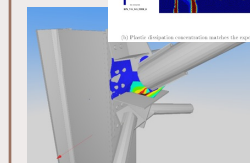
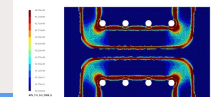
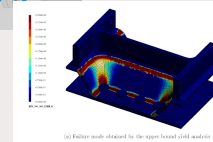
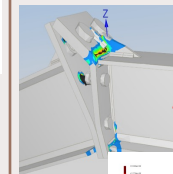
Veille et contexte
normatif:

- Groupes de travail:
CNC2M, AFGC,
FIB
- PN Dolmen
- Validation Access
Steel



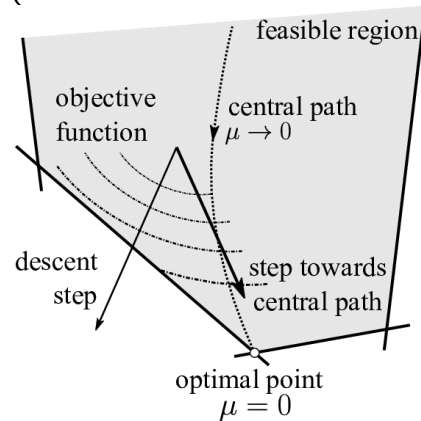
Un maillage intelligent
affiné au niveau des
zones d'intérêt

Des mécanismes
Lisibles
Physiques
Pédagogiques



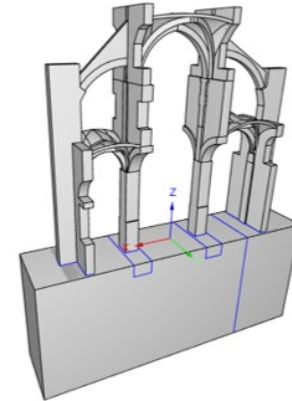
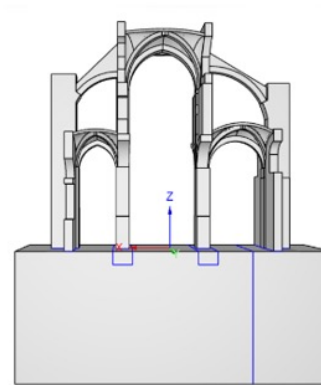
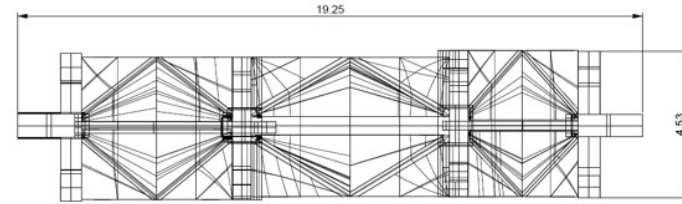
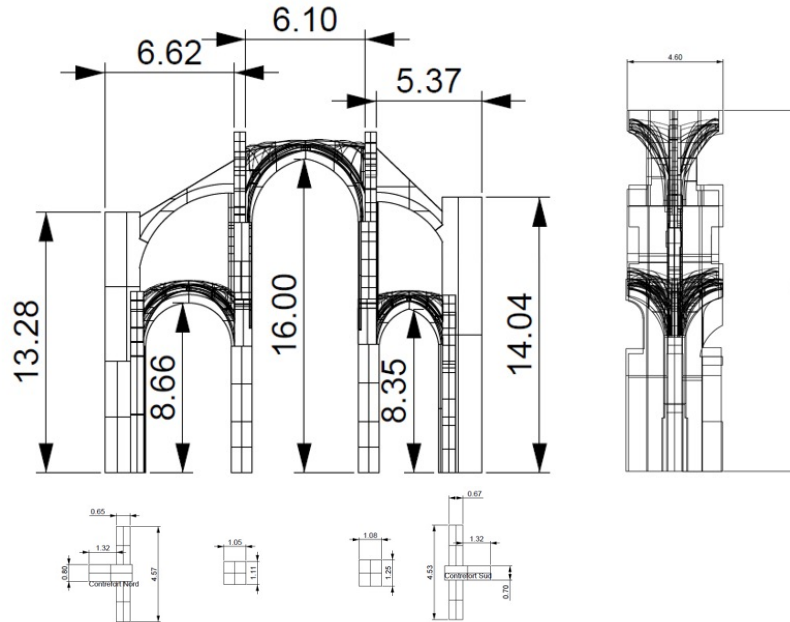
DS Masonry un outil dédié au calcul des structures en pierre naturelle

- Matériau pierre, critère de Rankine 3D
$$\begin{cases} \sigma_3 \geq -f_c \\ \sigma_1 \leq f_t \end{cases}$$
- Sol, critère Mohr coulomb 3D tronqué
$$\begin{cases} \sigma_1(1 + \sin(\varphi)) - \sigma_3(1 - \sin(\varphi)) \leq 2C\cos(\varphi) \\ \sigma_3 \geq -f_c \\ \sigma_1 \leq f_t \end{cases}$$
- Tirant, critère 1D $|\sigma| \leq f_y$

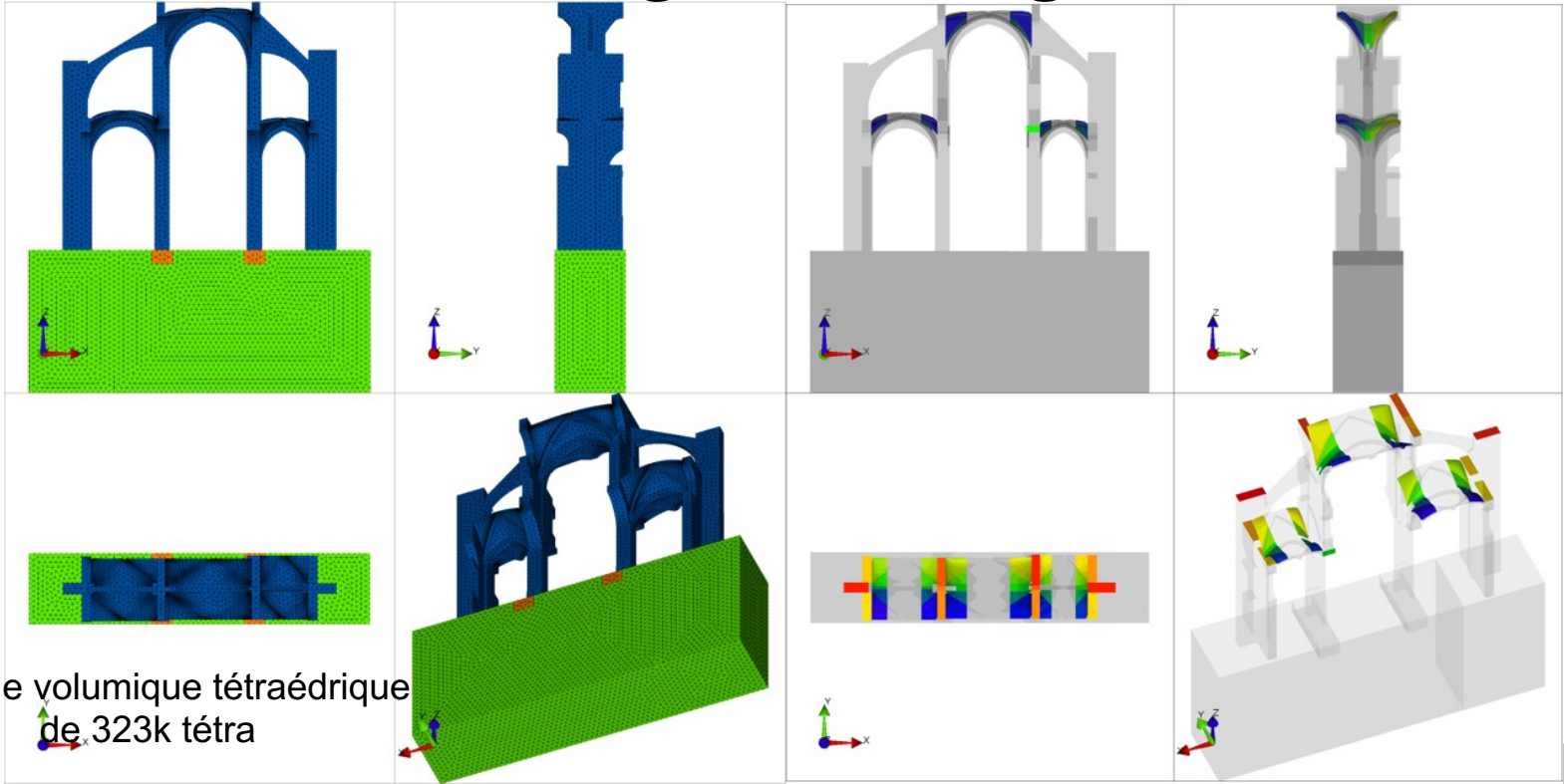


Principe général des méthodes de type point intérieur selon [20]

Le modèle Géométrique



Résultats- Maillage et chargements



Résultats- Comprendre le fonctionnement actuel 1/3

04/09/2025

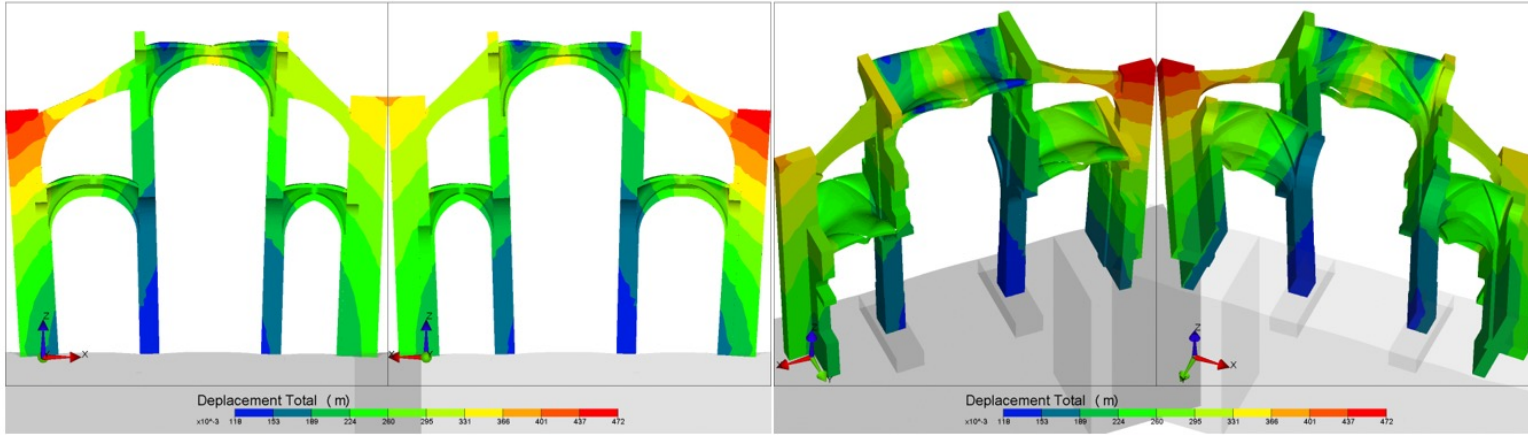


Figure 5: Déplacements latéraux des contreforts dus au caractère meuble et à la plastification du sol en pieds.

Résultats- Comprendre le fonctionnement actuel 2/3

La plastification en traction donnée par le calcul numérique est cohérente avec l'état de fissuration relevé lors du diagnostic (Figure 6).

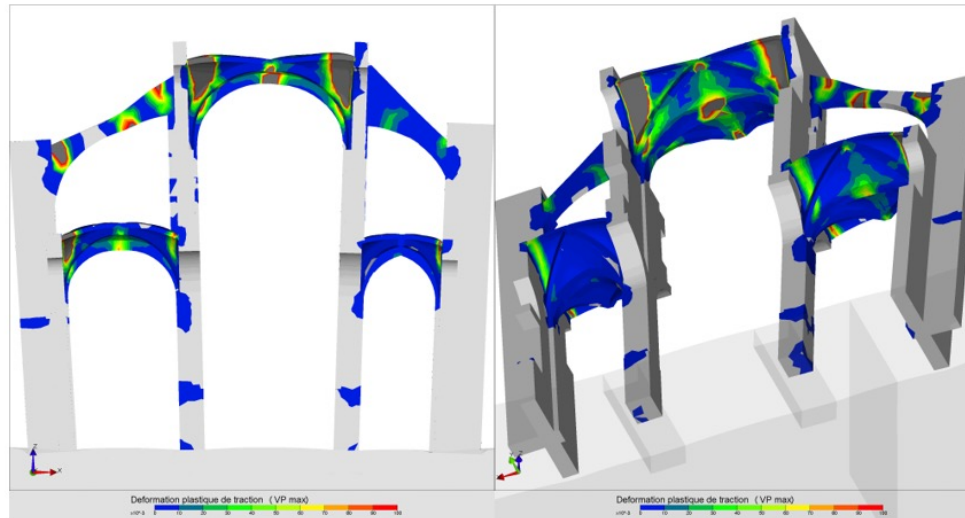


Figure 6: Déformations plastiques de tractions (valeur propre maximale du tenseur des déformations plastiques)

Résultats- Comprendre le fonctionnement actuel 3/3

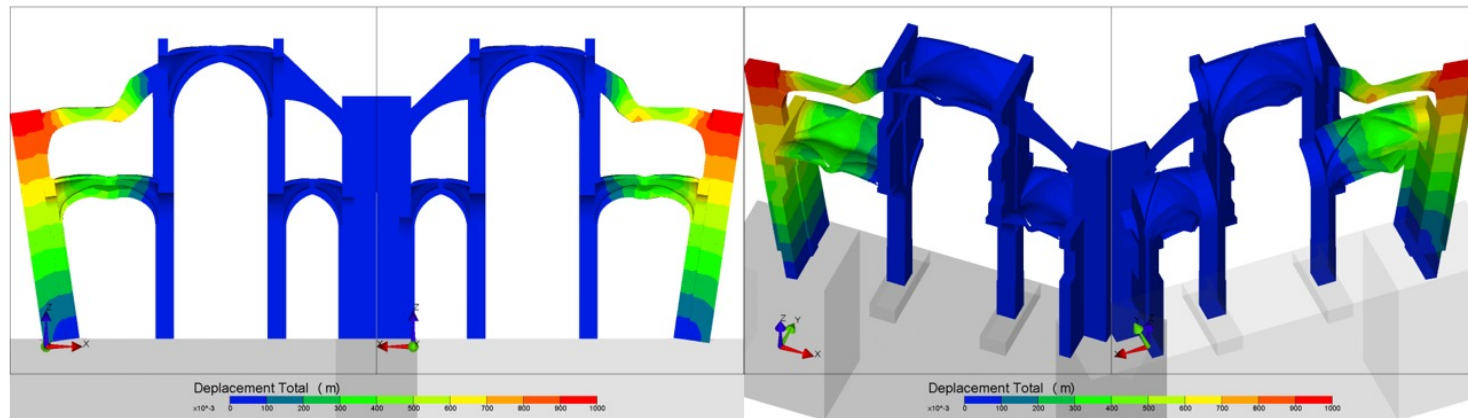


Figure 7: Mode de ruine obtenu pour l'église : la plastification du sol en pied côté nord engendre le basculement du contrefort

Le nouveau mode de ruine obtenu est un tassement vertical du contrefort nord pour un coefficient d'amplification de 1.45. Ce coefficient ne satisfait pas l'exigence réglementaire (1.89).

Résultats - Construire une solution de renforcement

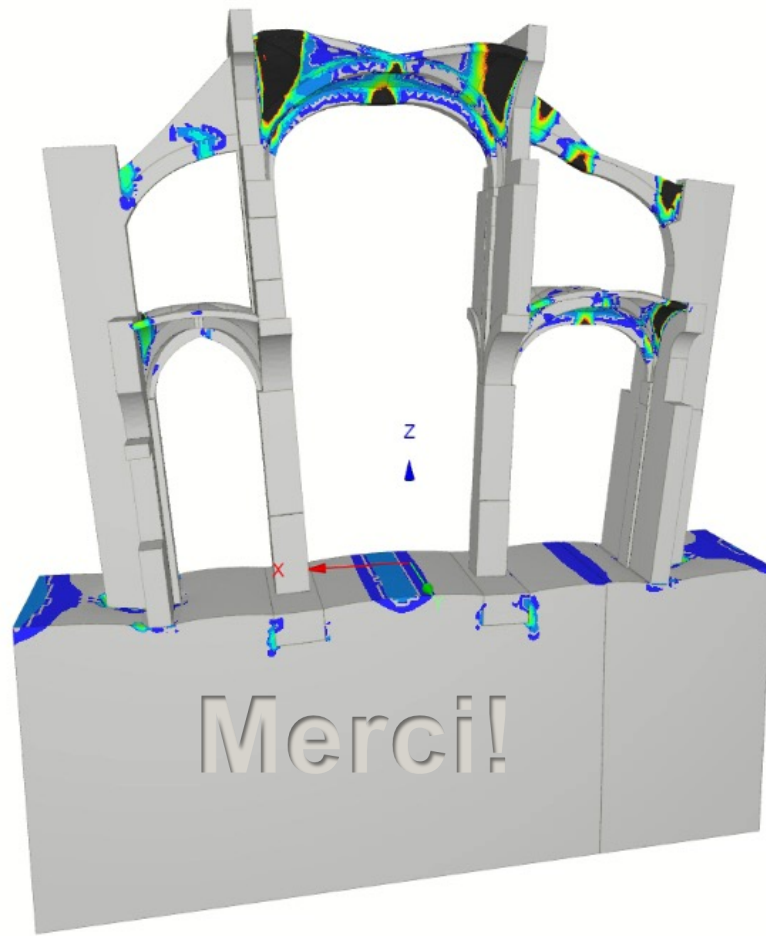


Résultat	Sans tirant	Avec tirant	Remarques
Déplacement Horizontal Max (cm)	30 cm	6 cm	Opposition au phénomène de basculement latéral.
Flux de contrainte de compression (kPa)	-	-	Diminution du flux en partie extérieure des contreforts avec un flux plus important au niveau des colonnes
Déformation plastique de traction (fissuration)	Fissuration massive supérieure à 100×10^{-3} au niveau des rotules des voûtes et arcs boutants	Inférieure à 10×10^{-3} excepté dans les arcs boutants	Amélioration significative
Contrainte dans le sol			Pas d'effet notable
Déplacement dans le sol (cm)	De l'ordre de 20cm	De l'ordre de 20cm	Pas d'effet notable
Plastification du sol en compression	Amorce de plastification sous les contreforts avec déformation de l'ordre de 500×10^{-3} côté nord	Plastification très faible (moins de 100×10^{-3}) et sur des zones très localisées	Effet notable
Efforts verticaux en pieds (kN)	+10% d'effort côté nord	-	
Moment en pied (kN.m)	Côté Nord : 147 kN.m, côté sud : 163 kN.m	Côté Nord : 18 kN.m, côté sud : 89 kN.m	Nette diminution du moment en pied côté nord

Le nouveau mode de ruine obtenu est un tassement vertical du contrefort nord pour un coefficient d'amplification de 1.9. Ce coefficient satisfait, sans aucune marge, l'exigence réglementaire (1.89).

Conclusions

- Apport d'un calcul physique pour comprendre les phénomènes à l'œuvre
- Calcul à la rupture : donne accès aux marges par rapport à la ruine sans retracer l'historique de l'ouvrage
- Difficulté à traiter rigoureusement la géométrie de l'ouvrage
- Apport d'un récent travail de fond sur la méthode de résolution: division par 10 des temps de calcul
- Méthode généralisable à tous les type d'édifices maçonnés en interaction sol-structure



- 1.Hugues Vincent, Mathieu Arquier, Jeremy Bleyer, Patrick de Buhan. (2018). Ultimate limit state design of three-dimensional reinforced concrete structures: A numerical approach, Computational Modelling of Concrete Structures.
- 2.Hugues Vincent, Mathieu Arquier, Jeremy Bleyer, Patrick de Buhan. (2018). Yield Design Based Numerical Analysis of Three-dimensional Reinforced Concrete, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
- 3.Vincent, Hugues. (2018). Développement d'un modèle de calcul de la capacité ultime d'éléments de structure (3D) en béton armé, basé sur la théorie du calcul à la rupture, thesis.
- 4.Chadi El Boustani, Jeremy Bleyer, Karam Sab, Mathieu Arquier, Mohammed Khalil Ferradi. (2019). Analyse des structures par optimisation convexe : application aux charpentes métalliques, 14ème colloque national en calcul des structures, CSMA 2019.
- 5.El Boustani, Chadi. (2020). Innovative optimization-based numerical methods for modeling the non-linear behavior of steel structures, thesis.
- 6.Chadi El Boustani, Jeremy Bleyer, Mathieu Arquier, Mohammed Khalil Ferradi, Karam Sab. (2020). Elastoplastic and limit analysis of 3D steel assemblies using second-order cone programming and dual finite-elements. Engineering Structures.
- 7.Chadi El Boustani, Jeremy Bleyer, Mathieu Arquier, Karam Sab. (2020). Extending interior-point methods to nonlinear second-order cone programming: Application to finite-strain elastoplasticity. International Journal for Numerical Methods in Engineering.
- 8.Chadi El Boustani, Jeremy Bleyer, Mathieu Arquier, Mohammed Khalil Ferradi, Karam Sab. (2020). Dual finite-element analysis using second-order cone programming for structures including contact. Engineering Structures.
- 9.Chadi El Boustani, Jeremy Bleyer, Karam Sab. (2021). Limit Analysis of Complex 3D Steel Structures Using Second-Order Cone Programming, Direct Methods - Methodological Progress and Engineering Applications, pp.45-62.
- 10.Agnès Fliscounakis, Chadi El Boustani. (2022). Local Mesh Refinement for Displacement-Based and Equilibrium-Based Finite Elements, CIGOS 2021.
- 11.Agnès Fliscounakis, Mohammed Khalil Ferradi, Mathieu Arquier. (2022). Externally prestressed concrete: anchor block 3D yield design, IABSE Symposium Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures.
- 12.Agnès Fliscounakis, Mathieu Arquier, Mohammed Khalil Ferradi, Xavier Céspedes. (2023). Assessing 3D Concrete Structures at ULS with Robust Numerical Methods.
- 13.Mohammed-Khalil Ferradi, Agnès Fliscounakis, Mathieu Arquier, Jeremy Bleyer, (2023). Elastoplastic and limit analysis of reinforced concrete with an equilibrium-based finite element formulation, Computers & Structures.
- 14.Mohammed-Khalil Ferradi, Agnès Fliscounakis, Xavier Céspedes, (2024). Steel optimization for reinforced concrete using an equilibrium-based formulation, Structural and Multidisciplinary Optimization.
- 15.Agnès Fliscounakis, Mathieu Arquier, Mohammed-Khalil Ferradi, (2024). 3DLimit Analysis of reinforced concrete with sliding along smeared cracks, Computers and Structures ,2024.
- 16.Anne-Sophie Colas, Thomas Stablon. Évaluation structurale et conception de réparation des ouvrages d'art en maçonnerie. AFGC, Paris, 2022.
- 17.Diagnostic de la nef et de la sacristie de l'Eglise Saint Didier, AEGIS, 2025
- 18.Jean Salençon. Yield design. John Wiley & Sons, 2013.
- 19.Kanno Y, Nonsmooth Mechanics and Convex Optimization, CRC Press, (2011).
- 20.Bleyer, Jeremy, Advances in the simulation of viscoplastic fluid flows using interior-point methods. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, . (2017).