

Évaluation du phasage constructif d'une travée de la cathédrale Notre-Dame de Paris

David Johanny Gomez Diaz¹, Stéphane Morel¹, Thomas Parent¹ et Frédéric Dubois².

¹Universit  de Bordeaux, Institut de Mécanique et d'Ingénierie-Bordeaux (I2M), Dépt. Génie Civil et Environnemental (GCE), Bordeaux, 33000, France

²LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

Journées Nationales de la Maçonnerie, 5 me Edition – Bordeaux : 12 et 13 de Juin 2025. Contact: david.gomez-diaz@u-bordeaux.fr

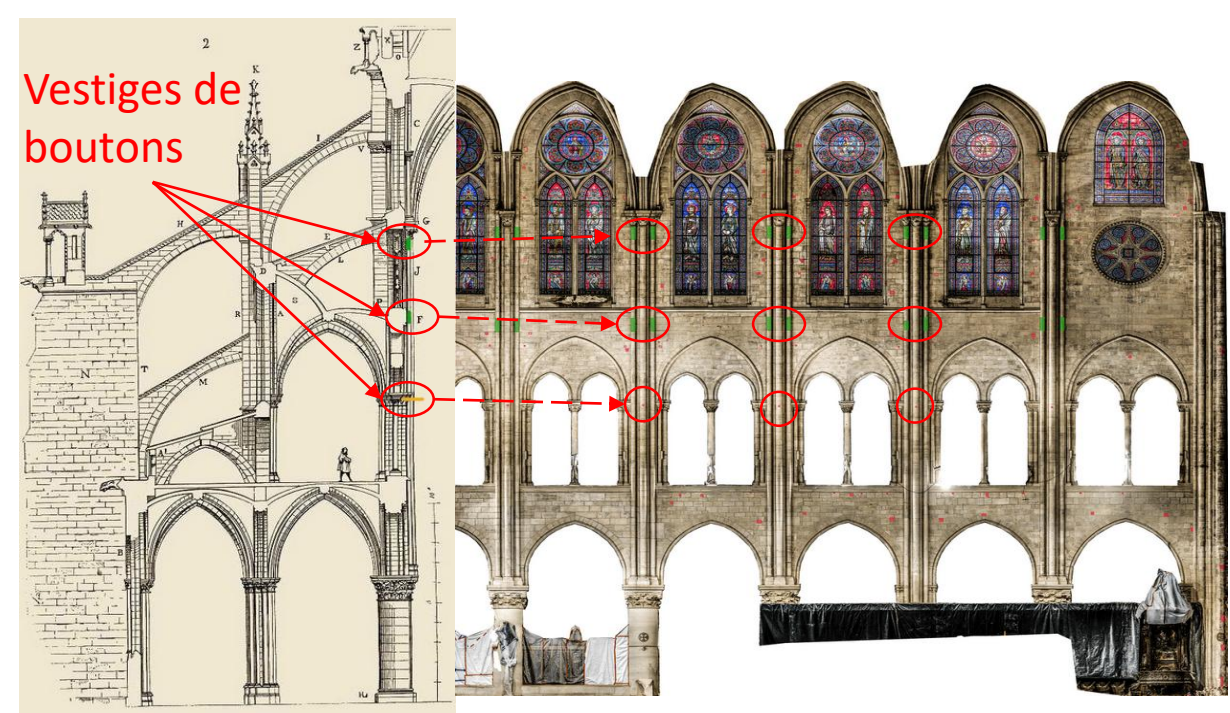
Contexte et objectifs

La cathédrale Notre-Dame de Paris incarne les ambitions gothiques du XII e siècle, mais les méthodes techniques employées restent peu connues. Le projet **ANR ALTIOR** développe une modélisation mécanique innovante du chantier gothique, en s'appuyant sur les avancées en calcul de structures en maçonnerie comme la **méthode des éléments discrets (MED)**. L'approche bloc à blocs ou « **Block-based models (BBM)** » et en particulier la méthode « **Non Smooth Contact Dynamics (NSCD)** », permet de simuler les matériaux hétérogènes (pierre/mortier) et les non-linéarités spécifiques à la maçonnerie. Cette approche offre un outil numérique pour :

- ✓ Modéliser les phases successives de construction.
- ✓ Analyser les interactions avec les étaiements temporaires.
- ✓ évaluer la stabilité structurelle selon divers scénarios.
- ✓ Confronter l'hypothèse par observations archéologiques.

Objectif

Identifier l'impact du phasage de construction sur la stabilité structurelle d'une travée gothique à l'aide d'une modélisation numérique avancée.

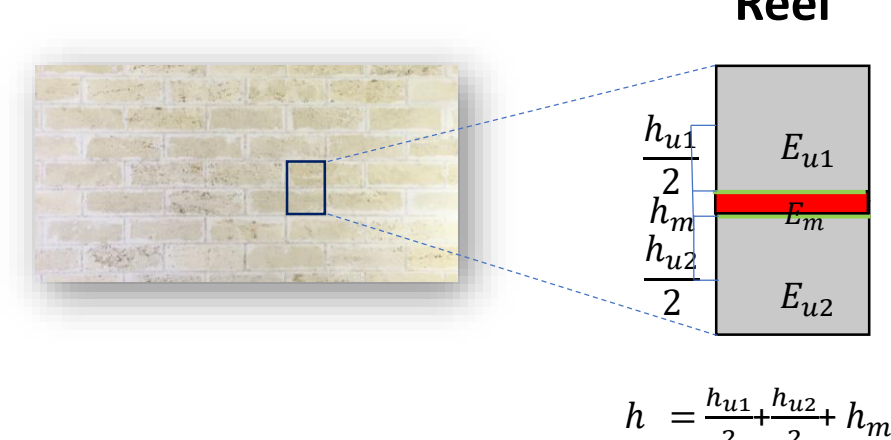


[Hartmann-Virnich, 2024]

Approche de modélisation

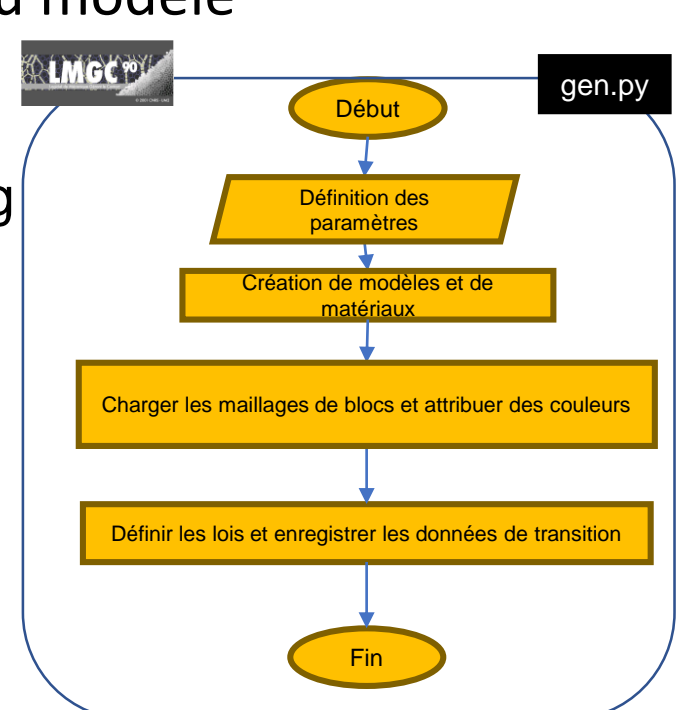
Approche bloc à bloc (BBM)

Modèle réel

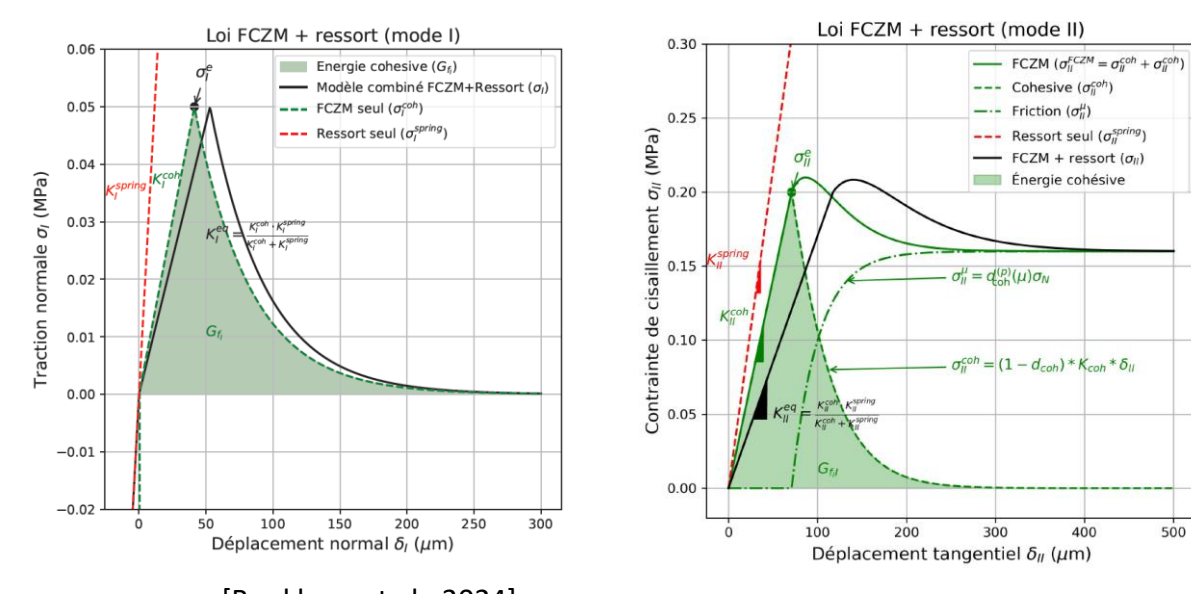


Algorithme de génération du modèle

- ✓ Blocs rigides
- ✓ Loi de contact FCZM + spring pour les blocs



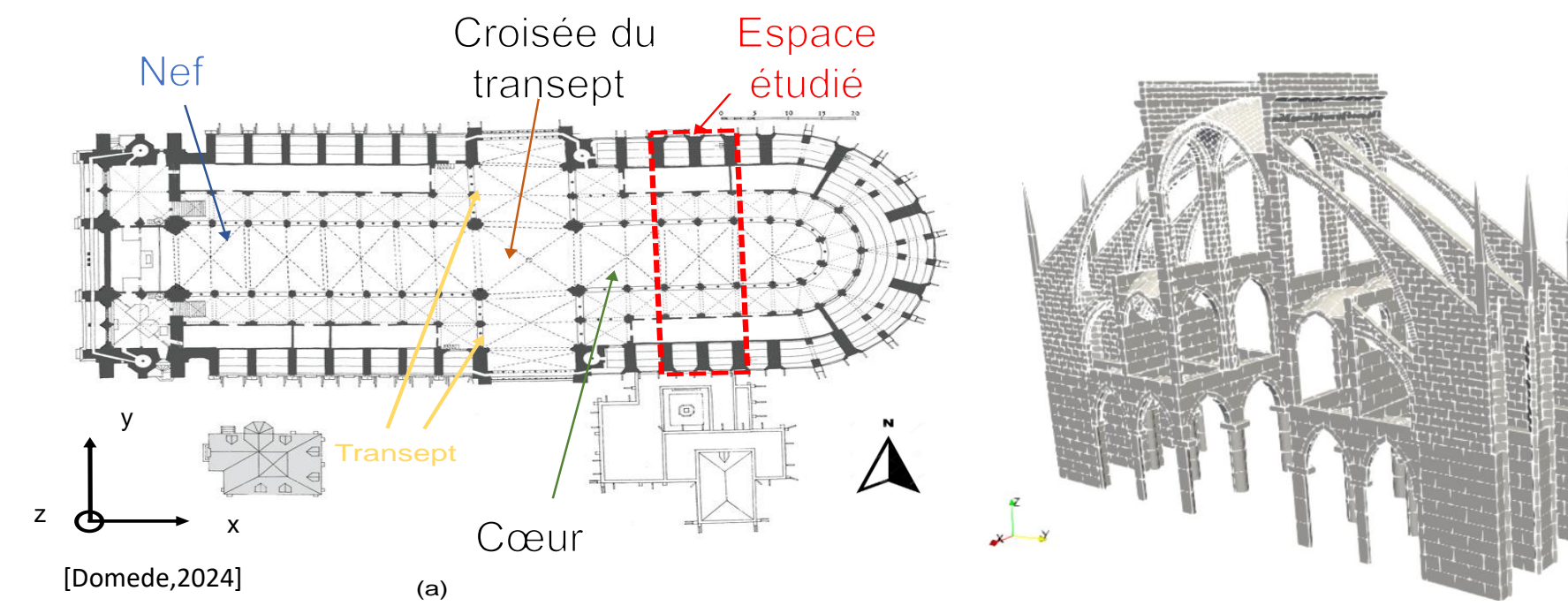
Loi FCZM+spring



[Boukham et al., 2024]

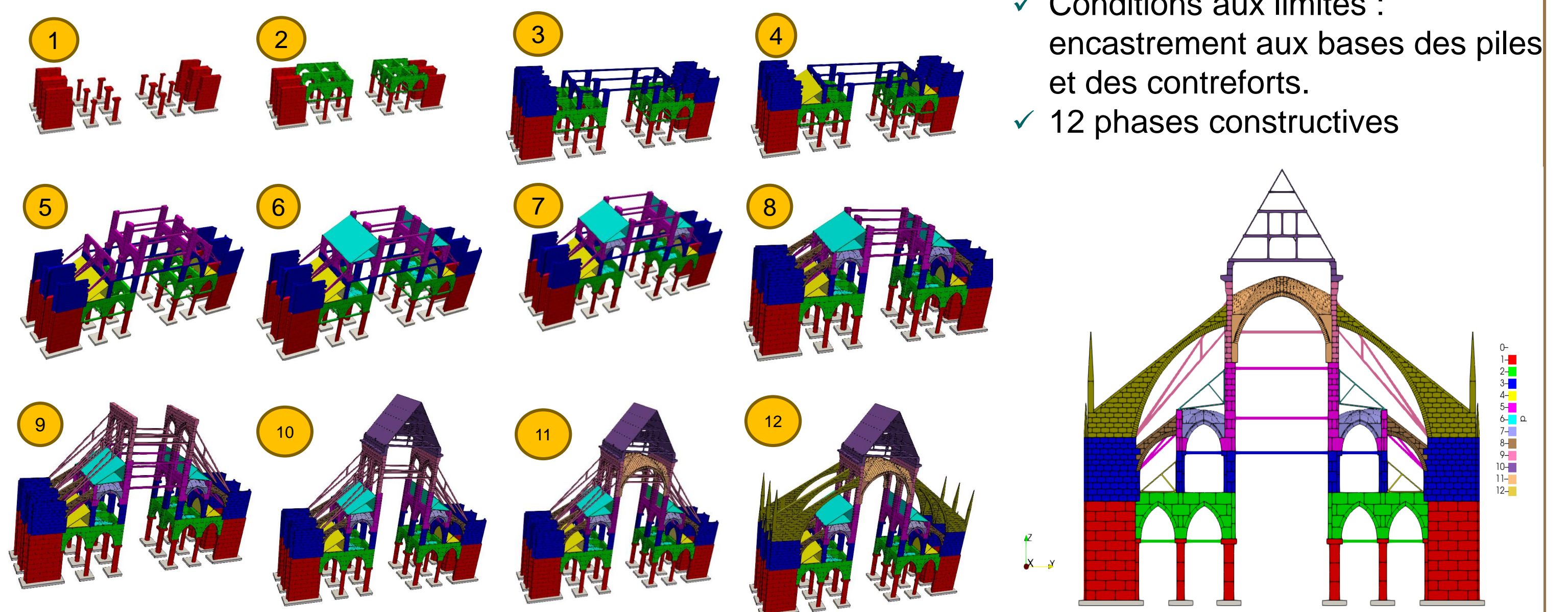
Recherche d'un phasage constructif

Géométrie et Matériaux



- ✓ 6384 blocs
- ✓ 11 matériaux liés aux éléments

Phasage constructif réalisé sur LMGC90

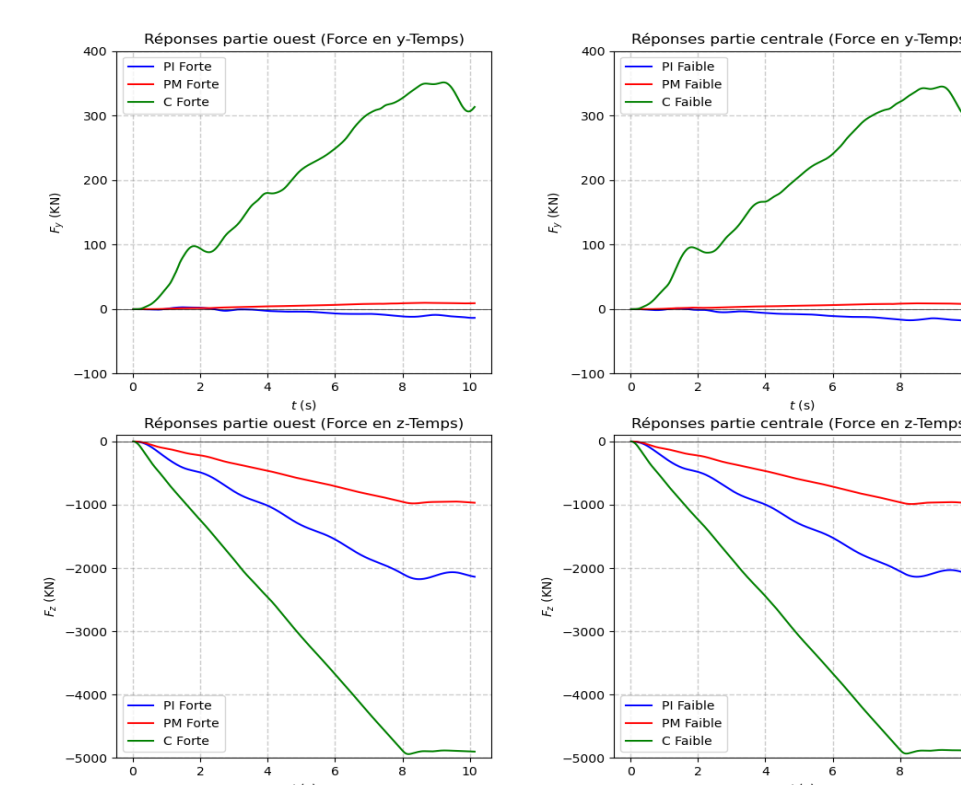


- ✓ Conditions aux limites : encastrement aux bases des piles et des contreforts.
- ✓ 12 phases constructives

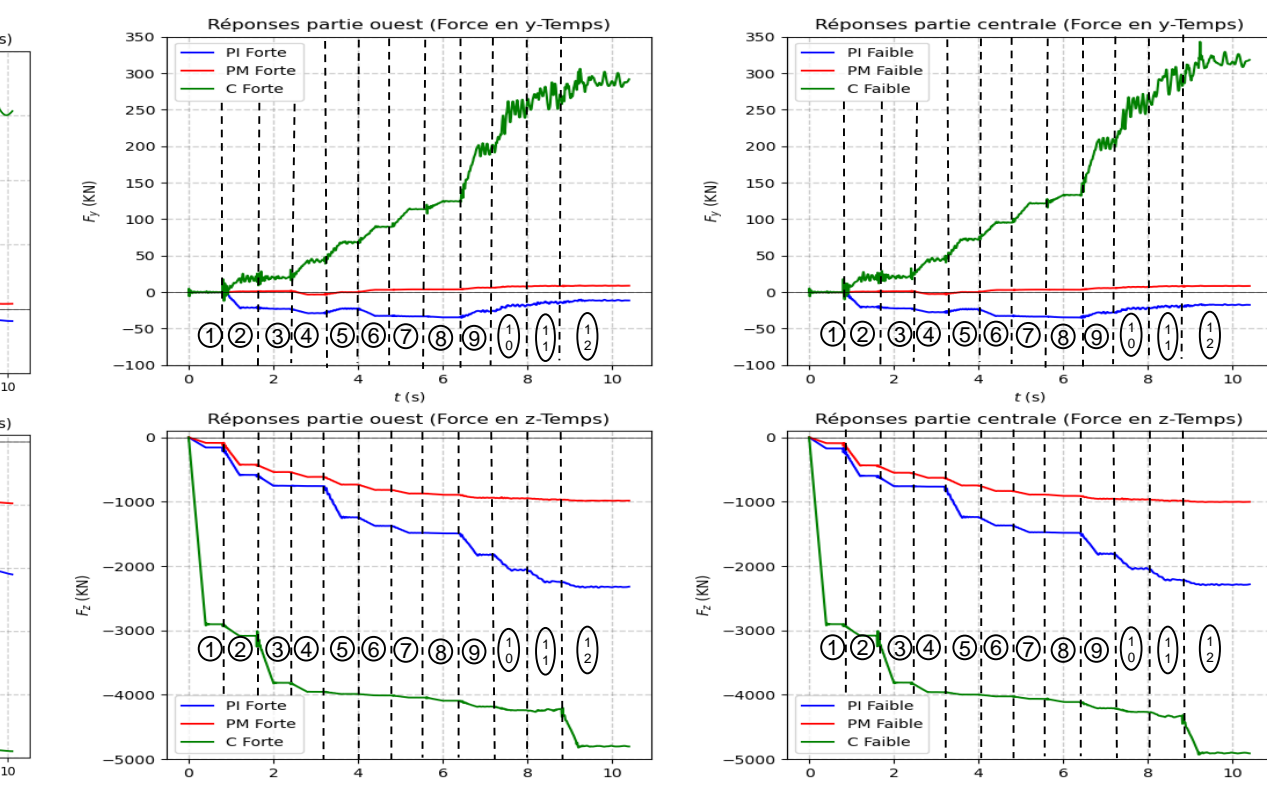
Résultats

Réactions aux appuis

Sans phasage constructif



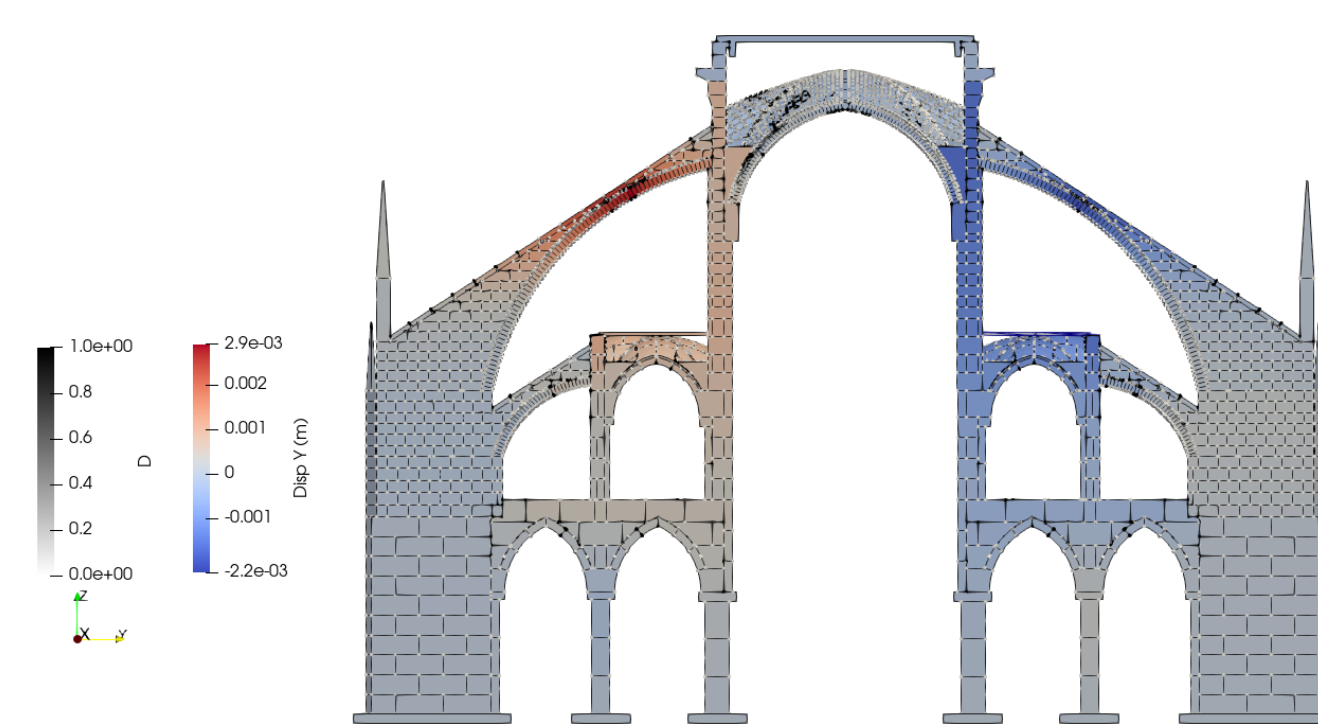
Avec phasage constructif



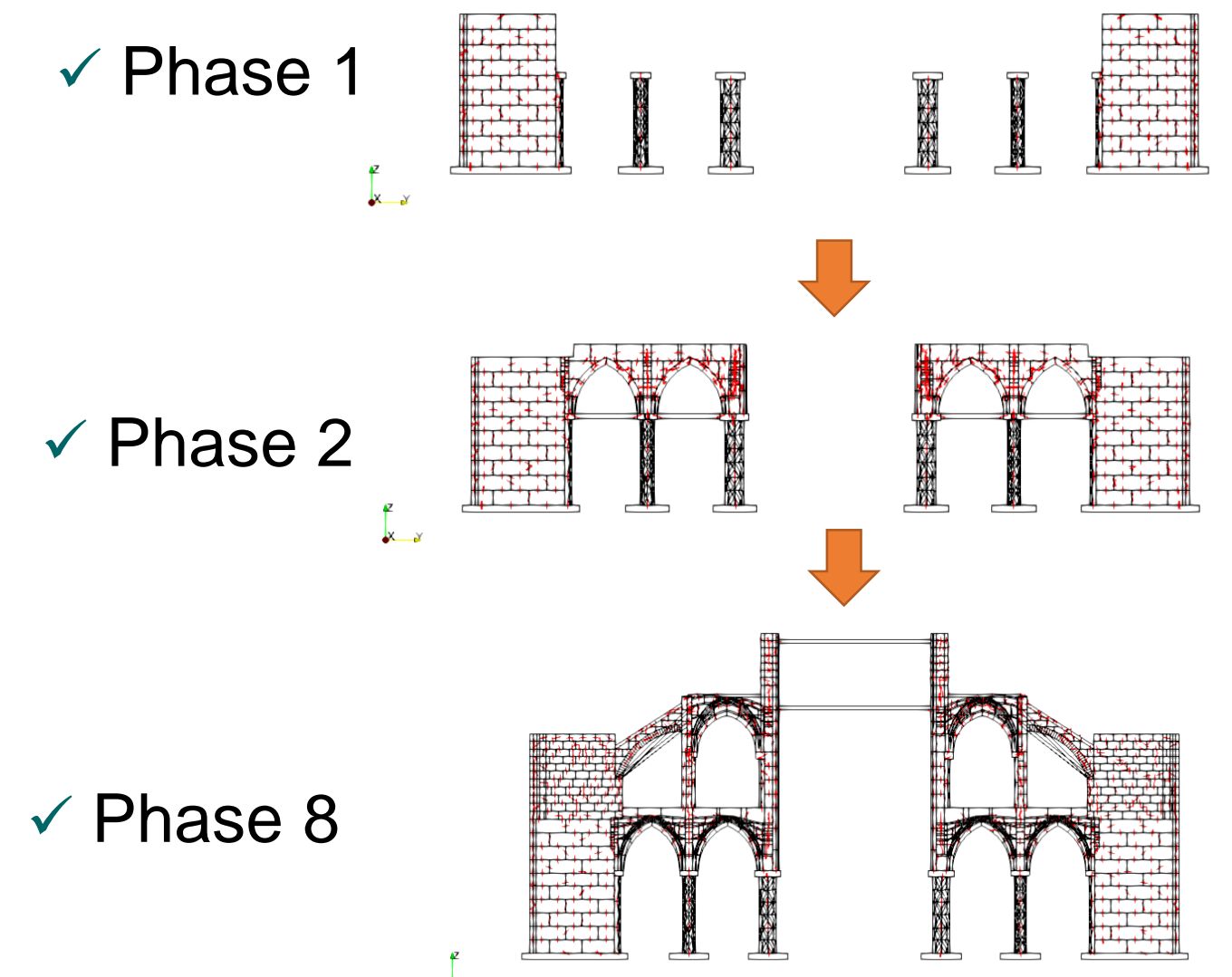
- ✓ à chaque phase de construction l'état d'équilibre mécanique est assuré.

Endommagement sur la travée

- ✓ Les arcs-boutants présentent des endommagements et déplacements importants.

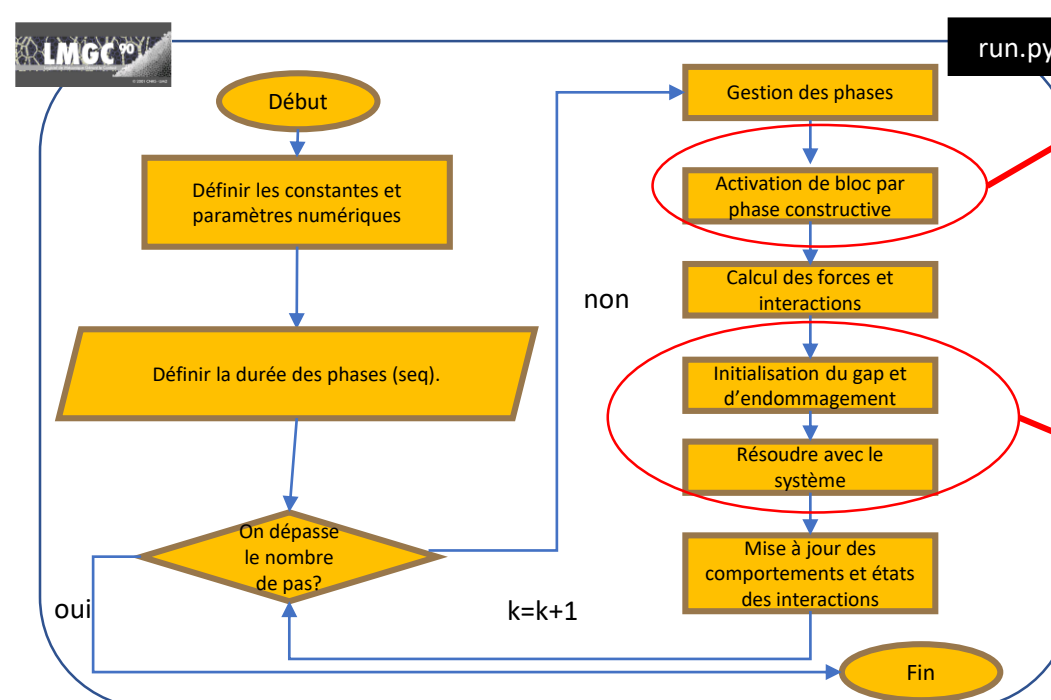


Lignes de pression



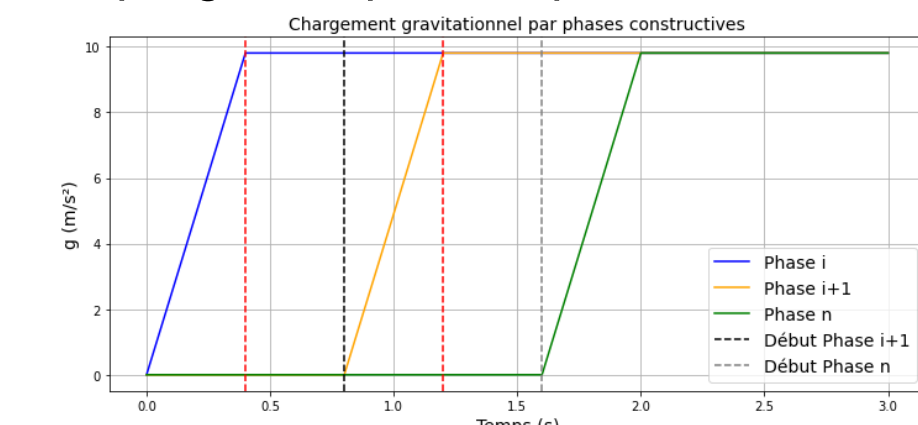
Pilotage du phasage constructif

Algorithme itératif des phases constructives



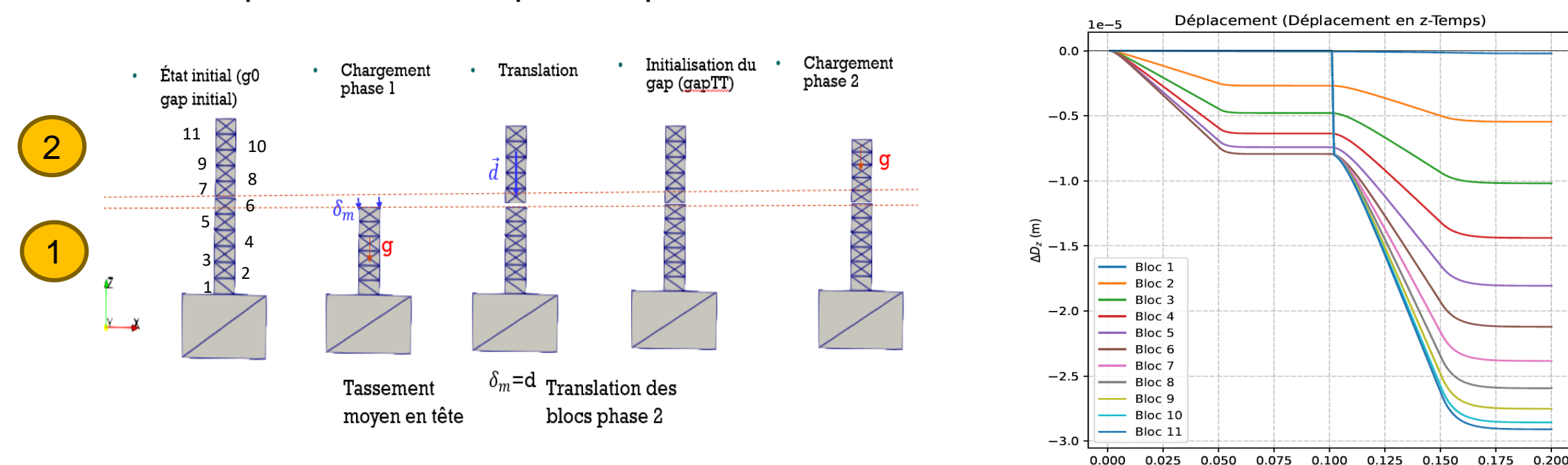
Activation de la nouvelle phase

- ✓ Activation progressif puis un palier



Gestion des tassements entre phases

- ✓ à chaque phase i : translation des éléments et initialisation des variables d'interface pour tenir compte des tassements et déplacements des phases précédentes



Conclusions

- ✓ Les étapes constructives ont une influence majeure sur les  tats de déformation et d'endommagement des éléments structurels. De sorte qu'il faut mettre en évidence le rôle des dispositifs de maintien temporaire nécessaires à la construction (butoirs, tirants).
- ✓ Le phasage constructif proposé met en évidence une stabilité de la structure sous poids propre à chaque phase.

Perspectives

- ✓ évaluer différents scénarios de contrebutement initial de la cathédrale Notre-Dame de Paris.
- ✓ évaluer l'impact du vent sur la stabilité de l'édifice à chaque phase constructive.
- ✓ établir un critère de stabilité pertinent pour évaluer la marge de sécurité de l'ouvrage.
- ✓ étendre l'étude à d'autres cathédrales (Chartres, Bourges et Amiens) présentant d'autres typologies permettant d'expliquer la quête de la hauteur.

Références

- [Hartmann-Virnich, 2024] A. Hartmann-Virnich. Ogives et doubleaux de Notre-Dame. Tracés d' pure et de positionnement. Bulletin Monumental, 2024, 182 (4), pp.353-360. (halshs-04934659)
- [Boukham et al., 2024] A. Boukham, V. Venzal, T. Parent, S. Morel, F. Dubois et B. Solbes (2024). 3d hybrid modeling approach combining the finite and discrete element methods : Validation based on masonry shear wall tests. 289:112638.
- [Dome  et al., 2024] N. Dome , T. Parent, C. Guenser, A. Boukham, P. Morenon, et A. S. Issa-Ibrahim, « Mechanical characterisation of the stones of Notre-Dame de Paris by in situ acoustic velocity measurement », Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 175, p. 105671, mars 2024, doi: 10.1016/j.ijrmm.2024.105671



JOURNEES NATIONALES
MAÇONNERIE

5 me édition – Bordeaux

12 et 13 Juin 2025

