



HAL
open science

Méthodologie d'analyse structurelle des maçonneries anciennes par la méthode des éléments discrets - Application au cas de l'église abbatiale de Sénanque

Marine Bagneris, Fabien Cherblanc

► To cite this version:

Marine Bagneris, Fabien Cherblanc. Méthodologie d'analyse structurelle des maçonneries anciennes par la méthode des éléments discrets - Application au cas de l'église abbatiale de Sénanque. Journées Nationales des Maçonneries, Jun 2021, Toulouse, France. hal-03255028

HAL Id: hal-03255028

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03255028>

Submitted on 9 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



METHODOLOGIE D'ANALYSE STRUCTURELLE DES MAÇONNERIES ANCIENNES PAR LA METHODE DES ELEMENTS DISCRETS - APPLICATION AU CAS DE L'EGLISE ABBATIALE DE SENANQUE

BAGNERIS, M.¹, CHERBLANC, F.²

Introduction

Les édifices cisterciens témoignent d'une grande maîtrise dans l'art de bâtir des structures maçonnées. Il peut ainsi paraître incongru d'interroger la stabilité de l'église abbatiale de Sénanque, l'une des trois « sœurs provençales » alors que près de huit siècles semblent en ériger la démonstration. Pour autant, les stigmates observables sur les constructions anciennes rappellent que ces dernières n'ont pas toujours été telles qu'elles se présentent à nos yeux. L'étude diagnostic, en plus d'une approche qualitative visant à expliciter la phénoménologie d'évolution d'une structure, doit pouvoir être étayée d'une approche quantitative à même de justifier des dimensionnements d'éventuelles solutions de confortement. Cette complémentarité des approches n'est pas triviale car aux nombreuses inconnues concernant les matériaux et leurs mises en œuvre s'ajoutent les effets environnementaux (infiltrations d'eau, séismes, ...) et humains (remaniements structuraux, restaurations, ...).

A partir d'un travail mené sur l'église abbatiale de Sénanque, nous proposons une méthodologie d'analyse structurelle convoquant les potentialités de la méthode des éléments discrets pour assister les choix d'interventions dans le contexte normatif des Eurocodes et le respect des qualités architecturales.

Modélisations

Les blocs de maçonnerie sont modélisés comme des éléments discrets rigides indépendants. La loi de contact entre les blocs prend en compte le frottement sec et une rigidité normale identifiée pour représenter un comportement élastique linéaire à l'échelle globale. Les calculs sont effectués sur la plateforme LMGC90 [1] basée sur la méthode Non-Smooth Contact Dynamic [2]. Deux modélisations d'une travée sont proposées (Figure 1) :

- La modélisation 2,5D correspond à une modélisation 2D où les propriétés de chaque bloc (masse, inertie, ...) et des joints (géométrie, rigidité, ...) ont été identifiées sur un modèle géométrique 3D. L'appareillage simplifié des blocs permet le calcul des lignes de pression.

¹ BAGNERIS, Marine, STONO, bagneris@stono.fr

² CHERBLANC, Fabien, STONO, cherblanc@stono.fr

- La modélisation 3D est enrichie d'un appareillage plus réaliste vis à vis du principe constructif de l'église en cherchant un compromis entre le niveau de discrétisation et le coût du calcul numérique. Il en résulte une description plus fine de la cinématique des blocs, des mécanismes d'ouverture des joints et des réseaux de forces transitant dans l'édifice.

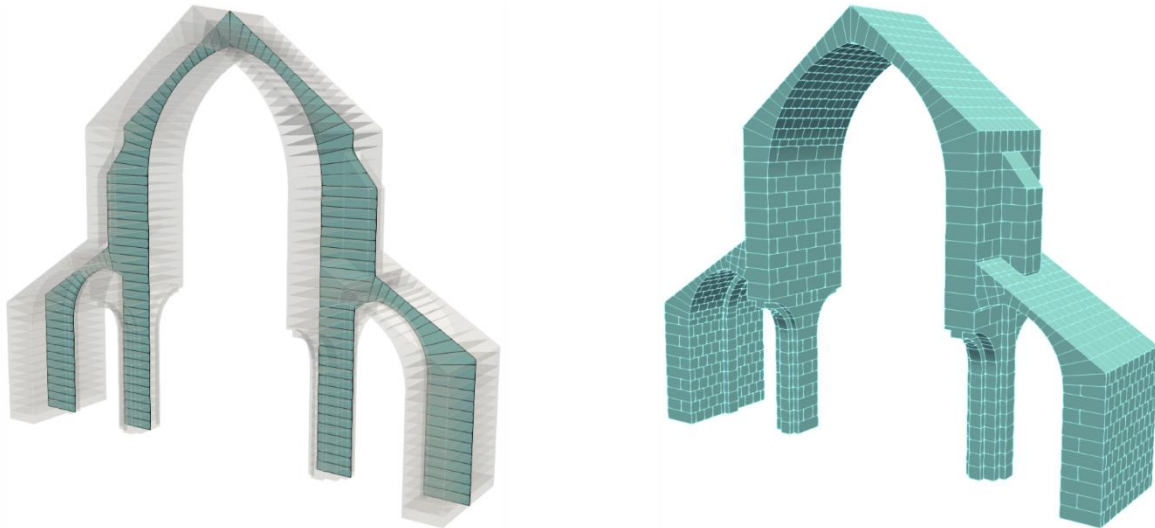


Figure 1 : Modélisations aux éléments discrets 2,5D et 3D

Sur la base des relevés effectués lors de l'étude diagnostic réalisée par le bureau d'études Equilibre Structures en 2019, les paramètres des modèles (rigidité, déplacements des conditions aux limites) ont été calés afin de retrouver les informations disponibles (tassements des appuis, dévers des murs, ouvertures des fissures).

Méthodologie d'analyse

En convoquant les éléments bibliographiques et les constats d'investigations *in situ*, nous proposons un phasage des simulations numériques selon trois temporalités en accord avec l'histoire du bâtiment.

Phase 1 – 1230 / 1974 : Depuis l'achèvement de la construction de l'église jusqu'aux travaux de démolition de la chapelle des dames et de la sacristie du XIX^{ème} adjacentes au bas-côté Est (Figure 2), l'église est restée près de 750 ans avec des conditions aux limites similaires. La consolidation du sol sous chargement a conduit à des tassements d'appui différentiels auxquels la structure s'est adaptée par la création de rotules attestées dans la littérature antérieure à 1974. Cette première phase révèle la tendance générale du comportement de la structure.

Phase 2 – 1974 / 2018 : Durant cette période, l'église n'est plus contrebutée sur le bas-côté Est (Figure 2). Cette deuxième phase illustre l'influence de la modification d'une condition aux limites et l'évolution du comportement de la structure dont la tendance générale a été amorcée en phase 1. L'état final de la phase 1 constitue l'état initial de la phase 2, ainsi les déplacements imposés au niveau des conditions aux limites sont conservés. Le calcul est poursuivi en supprimant la butée Est.

Phase 3 – 2019 : Cette dernière phase a pour objet de quantifier la descente de charges, opérée sous sollicitations statiques et sismiques, sur des contreforts proposés en confortement structurel au niveau du bas-côté Est. L'étude sous chargement sismique est basée sur la méthode par forces latérales [3]. Le principe est de représenter les

actions sismiques sous la forme d'un chargement extérieur pseudo-statique appliqué dans la direction transversale à l'église. Sans connaissance des propriétés du sol consolidé, une étude paramétrique est mise en œuvre pour chaque type de sollicitations, statique comme sismique afin de prendre en compte l'influence de la rigidité du terrain.

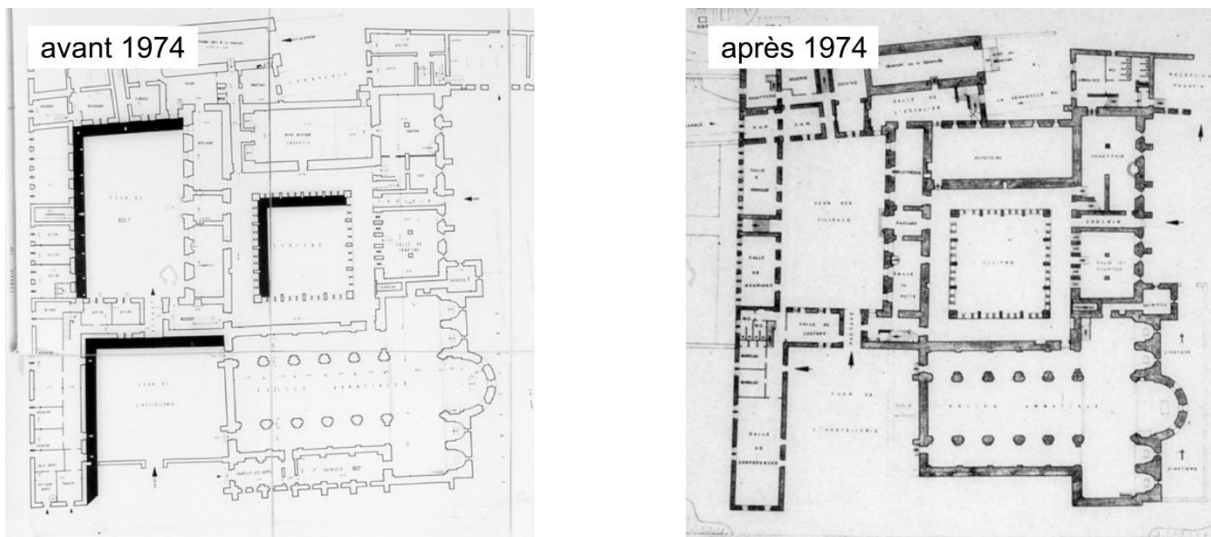


Figure 2 : Extraits de plans avant et après 1974 – Source Patrimage

Résultats et analyse

En phase 1, la bonne corrélation entre les déplacements calculés et mesurés *in situ* permet de valider le scénario de pilotage. L'analyse des lignes de pression fait apparaître des créations de rotules observées dans les voûtes. Bien que la marge de sécurité soit faible vis à vis de l'instabilité de la voûte de la nef, les mécanismes opérant lors d'une décompression totale ne sont pas observés. Le calcul des contraintes dans les joints montre un taux de travail permettant d'écarter le risque d'éclatement de la pierre par sur-contrainte.

Les déplacements et les lignes de pression calculés en phase 2 confirment que la suppression du contrebutement Est entraîne un dévers des murs gouttereau et bas-côté Est et conditionne l'apparition d'une rotule dans la voûte de la nef dont il n'est pas fait mention dans les études antérieures à 2018 (Figure 3). Le calcul des contraintes montre que le risque de sur-contrainte locale de la pierre ayant subi des infiltrations d'eau répétées doit être pris en compte.

En phase 3, on observe un comportement quasi-linéaire de la variation de la force sur le contrefort en fonction de la rigidité sous le collatéral. La valeur maximale est obtenue pour une rigidité nulle en fondation du pilier Est de la nef et du collatéral Est. Sous charges statiques, la modélisation 2,5D a tendance à surestimer l'action sur le contrefort de 10 % en moyenne par rapport à la modélisation 3D. L'action sismique est appliquée progressivement et la ruine est constatée à environ 20 % du chargement pseudo-statique. Le mécanisme de rupture est associé aux parties supérieures de l'édifice (murs gouttereaux et pilier de la nef) alors que le collatéral Est contrebuté par le contrefort reste en place. L'action sur le contrefort ne dépend pas significativement des conditions d'appuis au niveau des fondations. Avec la modélisation 3D, l'édifice peut supporter des actions sismiques plus importantes et la ruine est observée plus tardivement lors du chargement progressif. En conséquent, l'effort sur le contrefort est majoré de 15 % en moyenne avec la modélisation 3D.

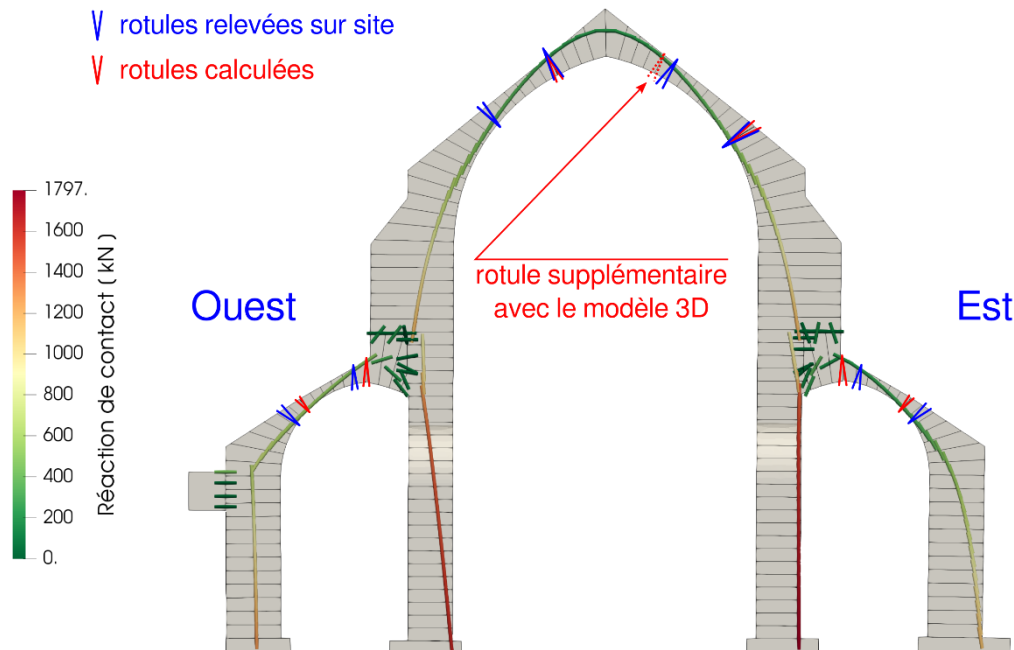


Figure 3 : Ligne de pression sur le modèle 2,5D – Identification des rotules relevées et calculées

Conclusion

La méthodologie d'analyse statique et sismique proposée est élaborée en fonction des modifications structurelles majeures de la vie de l'édifice. La comparaison des résultats obtenus selon les niveaux de description géométrique des modèles rappelle l'importance de l'arrangement morphologique de l'appareillage. La répartition des descentes de charges résultant de l'imposition de tassements différentiels illustre la grande capacité d'adaptation des structures maçonnées par réorganisation des réseaux de forces internes. Au regard de la limitation à réduire le comportement réel d'une église à une seule travée, la méthode des éléments discrets convient particulièrement à la simulation des propriétés remarquables et des faiblesses des structures maçonnées. Pour l'analyse sismique, le cadre normatif [3] ne se limite pas à la méthode des forces latérales. Une perspective de ce travail consiste à évaluer la pertinence de cette approche simplifiée vis à vis d'une analyse temporelle non-linéaire par simulation dynamique d'un modèle aux éléments discrets.

Remerciements

Ce travail s'appuie sur l'étude diagnostic du bureau d'études Equilibre Structures.

Références

- [1] Dubois, F. Mozul, R. *LMGC90*. CSMA 2013, 11e colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2013.
- [2] Jean, M. *The non-smooth contact dynamics method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, vol. 177, 235–257.
- [3] AFNOR. Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. NF EN 1998-1. AFNOR : Saint-Denis La Plaine, 2008.