



**HAL**  
open science

## Murs en pierre précontraints

Marine Bagnéris, Fabien Cherblanc

► **To cite this version:**

Marine Bagnéris, Fabien Cherblanc. Murs en pierre précontraints. Journées Nationales de la Maçonnerie, Ecole Centrale de Lyon, Jun 2023, Lyon, France. hal-03980042

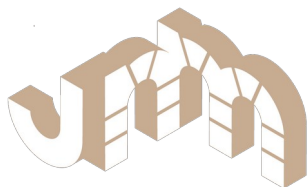
**HAL Id: hal-03980042**

**<https://hal.science/hal-03980042v1>**

Submitted on 9 Feb 2023

**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.



## MURS EN PIERRE PRECONTRAINTS

*BAGNERIS, M.<sup>1</sup>, CHERBLANC, F.<sup>2</sup>*

### Introduction

Le matériau pierre mis en œuvre dans le respect de ses potentialités structurelles, connaît un regain d'intérêt, généralement motivé par des raisons écologiques, auprès des architectes et des maîtres d'ouvrage. Ce retour en scène doit toutefois répondre à de nouvelles exigences car bien que les travaux de nos prédécesseurs soient une source d'inspiration, chaque époque bâtit selon les contraintes architecturales, techniques et économiques de son temps. Il est ainsi demandé aux structures en pierre d'être élancées, de porter des grands franchissements, d'interagir avec d'autres matériaux (charpentes acier, voiles béton armé, ...) pour contribuer au contreventement d'un bâtiment ou encore de répondre à des ambitions formelles très lointaines de l'optimum de compression.

Le recours à la précontrainte par post-tension est une solution technique à même de concilier certains de ces impératifs. L'étude du comportement mécanique d'une maçonnerie de pierre précontrainte suscite de nombreuses questions au cours du processus de conception en termes de choix de méthodes et d'outils de modélisation, de critères de résistance et des données d'entrée (paramètres matériaux, coefficients de sécurité). Nous proposons d'en discuter en se référant à deux projets ; un mur voile ondulant en zone sismique (Figure 1) et un gymnase de grande hauteur (Figure 2).



Figure 1: Chai Delas Frères – C.F. Svenstedt Architecte – Tain l'Hermitage – 2019

1 BAGNERIS, Marine, [STONO](mailto:stono), [bagneris@stono.fr](mailto:bagneris@stono.fr)

2 CHERBLANC, Fabien, [STONO](mailto:stono), [cherblanc@stono.fr](mailto:cherblanc@stono.fr)



Figure 2: Gymnase Alain Mimoun – Artibal Architectes – Issy les Moulineaux – 2022

### Modélisations et outils

L'analyse du comportement mécanique des maçonneries s'appuie sur différentes approches numériques telles que les modélisations aux éléments finis par des éléments plaques ou volumiques (Code-Aster) ou la modélisation aux éléments discrets (LMGC90). Chacune de ces approches donne accès à un niveau de finesse croissant en lien avec la complexité du modèle géométrique à construire (Figure 3).

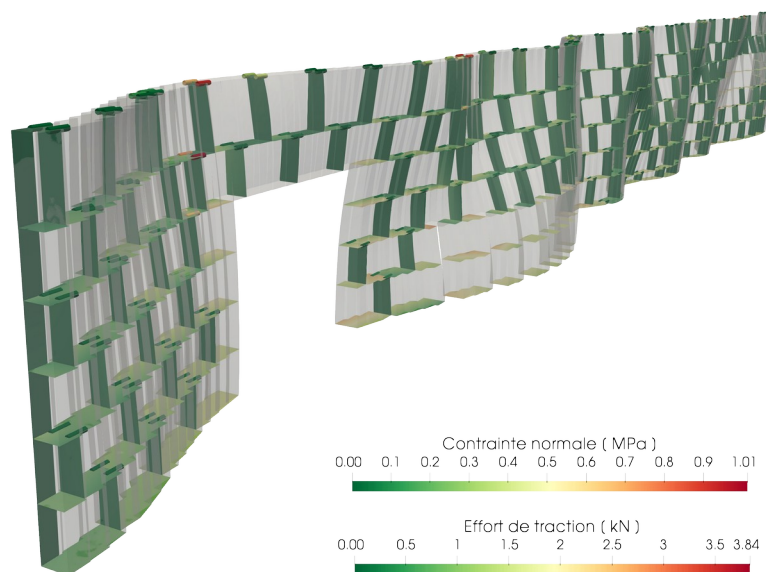


Figure 3: Chai Dela Frères - Modèle aux éléments discrets - LMGC90

L'intégration d'autres structures (charpente métallique, voile béton armé, ...) dans la modélisation du bâtiment peut contraindre et orienter le choix d'une modélisation. Une modélisation mixte d'éléments plaques et poutres en éléments-finis est par exemple plus aisée à mettre en œuvre (Figure 4) qu'une modélisation convoquant des éléments volumiques et poutres. Dans le cas d'une approche aux éléments discrets, l'interaction entre les blocs de maçonnerie et une structure métallique 3D n'est pas directement possible dans LMGC90. Il devient alors nécessaire de coupler le solveur aux éléments discrets avec un solveur externe aux éléments finis.

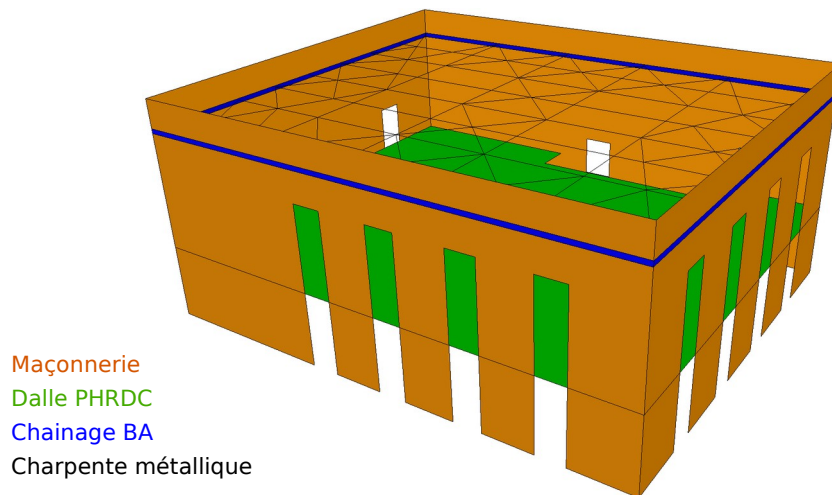


Figure 4: Gymnase Alain Mimoun - Modèle aux éléments-finis (plaques + poutres) - Code-Aster

Enfin, l'enrichissement du modèle par l'introduction de la précontrainte ajoute un niveau de complexité. Lorsque la précontrainte est générée par un élément rectiligne (gymnase Alain Mimoun, Figure 2), celle-ci est introduite dans la modélisation par 2 forces ponctuelles égales et opposées appliquées aux points d'ancrage des tirants. Si la précontrainte est imposée par un câble dont la trajectoire est courbe (mur voile de la maison Delas, Figure 1), il est nécessaire de calculer l'équilibre du câble, puis d'introduire l'ensemble des actions générées par le câble le long de son parcours dans le modèle de la maçonnerie. Les câbles étant beaucoup plus souples que la maçonnerie, le couplage entre les comportements des 2 structures est négligé en considérant que les actions des câbles sont constantes quelles que soient les déformations de la maçonnerie. Cette opération peut être réalisée en utilisant le modèle de comportement des câbles de précontrainte développé dans Code-Aster pour l'analyse du béton précontraint, ou par une procédure de pré-traitement des chargements mécaniques développée pour LMGC90.

### Critères de résistance

Le dimensionnement d'une maçonnerie se réfère aux critères exposés dans l'Eurocode 6 (EC6) : pour chaque type de sollicitation (compression, cisaillement, flexions horizontale et verticale), la valeur de la résultante ou du moment maximum admissible par la maçonnerie est déterminée en fonction des caractéristiques des éléments (pierre et mortier) et de son niveau de compression verticale. Cette vision macroscopique de la maçonnerie est bien adaptée à une modélisation aux éléments-finis par des éléments plaques.

Si une modélisation volumique aux éléments finis est nécessaire, le choix du critère de résistance est plus délicat. Alors que le niveau de compression peut être simplement comparé à la résistance en compression proposée par l'EC6, des critères plus élaborées (Drucker-Prager, Hoek&Brown, Fluendo3D [1]) doivent être introduits pour analyser des états de contraintes plus complexes. Cependant, l'adéquation de ces critères aux ouvrages en maçonnerie reste une question ouverte dans les milieux académiques et leur acceptation dans le domaine de l'ingénierie nécessite encore un transfert technologique.

Dans le cas d'une approche aux éléments-discrets, l'état de compression des joints (contrainte maximale, excentrement de la résultante) permet de remonter à des informations compatibles avec les critères de l'EC6. La loi d'interaction de type Signorini-Coulomb entre blocs rigides implique que le coefficient de frottement

gouverne la résistance de la maçonnerie aux sollicitations de cisaillement ou de flexion verticale. Des lois plus élaborées et des modèles de blocs déformables renvoient aux commentaires sur les critères évoqués ci-dessus.

### Paramètres et données

La connaissance de la rigidité d'une maçonnerie n'est pas nécessaire pour la justification d'un mur droit selon l'EC6. Cependant, cette caractéristique devient indispensable lors du dimensionnement en contexte sismique pour déterminer les fréquences propres et la charge sismique à partir du spectre de réponse élastique. De plus, si la maçonnerie est en interaction avec d'autres structures impliquant des matériaux différents, les différentiels de rigidité gouvernent la répartition des charges entre ces différentes structures. Des travaux récents [2] se sont intéressés à la caractérisation expérimentale du comportement mécanique de murs appareillés à l'échelle du joint et de la maçonnerie. Les différentes estimations du module d'Young (Tableau 1) montrent une grande variabilité, la valeur la plus faible mesurée à l'échelle du mur serait l'estimation la plus fiable. La surestimation proposée par l'EC6 reste une approche sécuritaire. Toutefois, les modes constructifs contemporains utilisent des appareillages de blocs de grandes dimensions. L'influence de l'appareil sur la rigidité de la maçonnerie est une autre question ouverte.

Tableau 1 : Module d'Young d'une maçonnerie (pierre de Frontenac + joint NHL3.5)

Valeur recommandée par l'Eurocode 6	2,9 GPa
Expérimentation à l'échelle du joint + homogénéisation [3]	9,7 GPa
Expérimentation à l'échelle du mur [3]	1,3 GPa

La recherche d'optimum structurel peut conduire à utiliser des pierres aux propriétés mécaniques remarquables que jaloueraient certains bétons à hautes performances. Toutefois, la formule empirique de calcul de la résistance en compression de la maçonnerie proposée par l'EC6 limite la résistance de la pierre à 75 MPa. Là encore, ne faudrait-il pas encourager l'actualisation des campagnes expérimentales ?

Enfin, les résistances des maçonneries sont pondérées par un coefficient de sécurité dont la valeur dépend de la fiabilité sur la résistance et du contrôle sur la qualité de l'exécution. Une récente mise à jour de l'Annexe Nationale a eu pour conséquence de supprimer le niveau de contrôle présentant le coefficient le moins pénalisant. Quels sont les arguments d'un tel durcissement qui pénalise la justification de structures dont le patrimoine bâti témoigne de la durabilité ?

### Conclusion

Le retour d'expérience de projets est prétexte aux partages de questions ouvertes à la communauté scientifique et technique dans l'objectif de justifier le besoin de développement des savoirs et de transfert technologique.

### Références

- [1] Sellier, A., Casaux-Ginestet, G., Buffo-Lacarrière, L., Bourbon, X. Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing, Part 1: constitutive laws, Engineering Fracture Mechanics, 2013, vol. 97, p.148-167.
- [2] Dubois, F. Mozul, R. LMGC90. CSMA 2013, 11e colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2013
- [3] Venzal, V. Modélisation discrète du comportement mécanique des ouvrages maçonnés en pierre. Aspects expérimentaux - Analyse énergétique. Thèse de doctorat. : Université de Bordeaux, 2020.