



**HAL**  
open science

## **Poutre de grande portée en pierre précontrainte**

Marine Bagnéris, Olivier Chastel, Fabien Cherblanc, Julien Debraux, Frédéric Dubois, Vincent Huon, James Langevain, Rémy Lart, Olivier Thomas

### ► **To cite this version:**

Marine Bagnéris, Olivier Chastel, Fabien Cherblanc, Julien Debraux, Frédéric Dubois, et al.. Poutre de grande portée en pierre précontrainte. Journées nationales maçonnerie, IFSTTAR, Mar 2018, Marne la Vallée, France. hal-02079510

**HAL Id: hal-02079510**

**<https://hal.science/hal-02079510>**

Submitted on 26 Mar 2019

**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.

## POUTRE DE GRANDE PORTÉE EN PIERRE PRÉCONTRAINTE

*BAGNERIS M.<sup>1</sup>, CHASTEL O.<sup>2</sup>, CHERBLANC F.<sup>3</sup>, DEBRAUX J.<sup>4</sup>, DUBOIS F.<sup>5</sup>,  
HUON V.<sup>5</sup>, LANGEVAIN J.<sup>4</sup>, LART R.<sup>4</sup>, THOMAS O.<sup>6</sup>*

### Introduction

L'exploration des potentialités structurales et techniques du matériau pierre a connu des sursauts majeurs, comme en témoignent les projets du Pavillon du Futur [4] à Séville, l'Eglise de Padre Pio à San Giovanni Rotondo ou la passerelle Inachus [3] à Beppu. Les méthodologies mises en œuvre pour leur justification demeurent l'apanage d'une ingénierie d'exception qui s'avère généralement peu communicante dans la littérature scientifique. A l'inverse, les travaux expérimentaux dédiés à la compréhension du comportement mécanique sont menés à petite échelle sur des géométries simples [7, 5]. Le travail présenté propose de réunir les compétences de tailleurs de pierre, d'ingénieurs et de chercheurs pour étudier le comportement d'une poutre de grande portée en pierre massive précontrainte. Un compromis entre minimisation de matière et soucis esthétique conduit à une géométrie complexe réalisée par machine à commande numérique et taille manuelle (Figure 1). Des essais expérimentaux sont menés à l'échelle du matériau et à celle de la structure dans le double objectif de les caractériser et de discuter la prédictibilité des modélisations numériques.

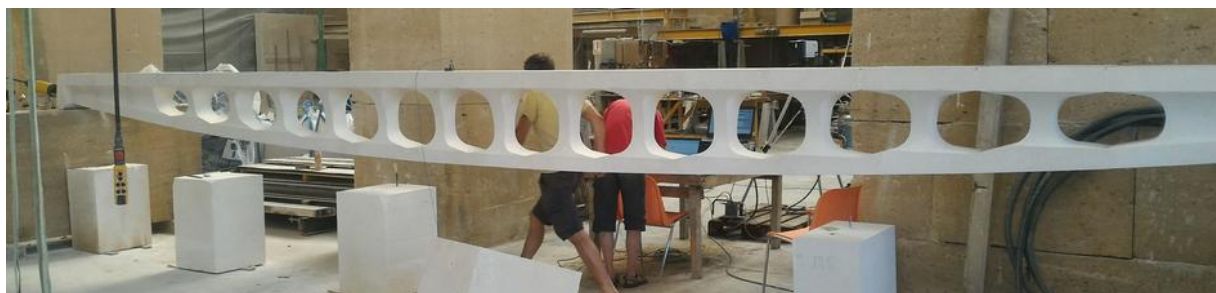


Figure 1 : Poutre en pierre massive précontrainte – 10m de portée.

1 BAGNERIS Marine, UMR 3495 MAP CNRS/MCC et Stono, [marine.bagneris@marseille.archi.fr](mailto:marine.bagneris@marseille.archi.fr)

2 CHASTEL Olivier, Process Stone, [contact@processtone.com](mailto:contact@processtone.com)

3 CHERBLANC Fabien, Stono, [cherblanc@stono.fr](mailto:cherblanc@stono.fr)

4 DEBRAUX Julien, LANGEVAIN James, LART Rémi, Le Grain d'Orge, [contact@legraindorge.com](mailto:contact@legraindorge.com)

5 DUBOIS Frédéric, HUON Vincent, LMGC, Université de Montpellier, CNRS,  
[frederic.dubois@umontpellier.fr](mailto:frederic.dubois@umontpellier.fr), [vincent.huon@umontpellier.fr](mailto:vincent.huon@umontpellier.fr)

6 THOMAS Olivier, LSIS/INSM, Arts et Métiers ParisTech, Lille, [olivier.thomas@ensam.eu](mailto:olivier.thomas@ensam.eu)

## Description

La poutre franchit 10m de portée entre appuis, présente une section variable avec une hauteur maximale de 60cm à l'axe de symétrie et pèse 1500 kg. Elle est composée de 19 voussoirs en pierre calcaire d'Anstrude précontraints par un câble d'acier (diamètre = 15.2 mm) courant dans la membrure inférieure (Figure 2). Le câble est tendu à 102 kN à l'aide d'un vérin hydraulique à l'une des extrémités de la poutre. En membrure inférieure, une feuille de plomb est intercalée entre voussoirs successifs, collée ponctuellement à la résine époxy pour des facilités de montage. En membrure supérieure, le joint, rempli de résine, présente 2 cales de plomb.

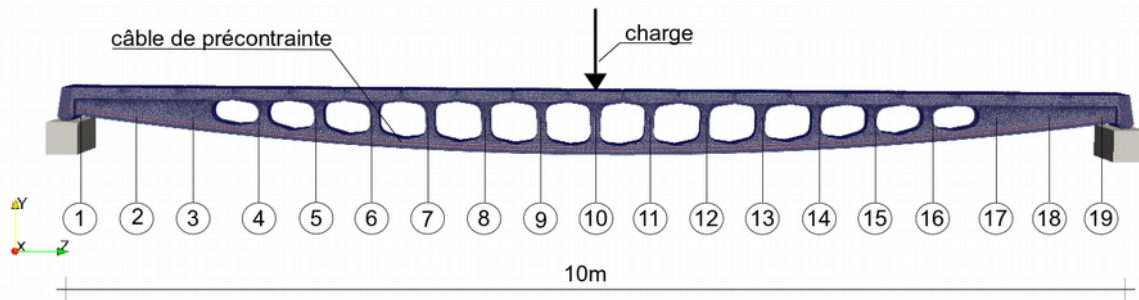


Figure 2 : Poutre en pierre massive précontrainte – nomenclature.

## Essais expérimentaux

### Comportement dynamique : Analyse modale

Le comportement dynamique a été étudié par une analyse modale expérimentale afin de déterminer les fréquences et modes propres de la poutre. Le dispositif couple un marteau d'impact comportant un capteur de force piézoélectrique, un vibromètre laser et du matériel d'acquisition et de traitement du signal. L'identification des 7 premières fréquences propres expérimentales à l'aide d'une analyse modale numérique a permis d'identifier un module d'Young apparent  $E = 22.6$  GPa. Cette valeur, plus faible que celle mesurée directement sur des échantillons de calcaire d'Anstrude [6], traduit la souplesse apportée par les joints.

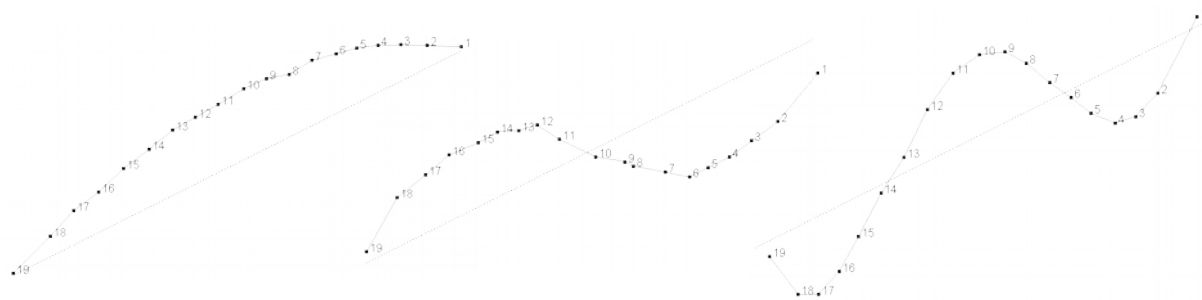


Figure 3 : 3 premiers modes propres de vibration dans le plan vertical

### Comportement statique : Flexion simple

Un essai de flexion 3 points est pratiqué jusqu'à la ruine de la poutre. L'intensité de la charge ponctuelle et la flèche sont mesurées par lectures directes sur un dynamomètre et un comparateur. La rupture par flexion des montants 8 et 9 est observée pour une charge de 12 kN. La ruine totale de la poutre est atteinte à 14.18 kN (Figure 6). Dans l'objectif de tester un protocole d'acquisition et d'analyse par corrélations d'images, la phase de chargement est suivie par 2 caméras CCD. Les résultats seront présentés ultérieurement.

## Modélisations numériques

### Modélisation de l'action du câble

La trajectoire du câble est rectiligne à l'intérieur de chaque voussoir pour des raisons pratiques de percement. Cependant, la courbure imposée par la membrure inférieure impose des changements de direction aux passages des joints. L'effet « poulie » qui résulte de l'action d'un câble sur deux voussoirs adjacents est modélisé avec frottement, ce qui se traduit par une force ponctuelle avec des composantes normale et tangentielle au trajet du câble. La perte de tension par frottement cumulée d'un bout à l'autre de la poutre est estimée à 7900 N. Il en résulte une dissymétrie dans le chargement qui se répercute sur les contraintes calculées (Figures 4 et 5)

### Modélisation par un élément continu

La poutre est modélisée par un élément continu déformable sans prendre en compte la présence des joints. Le critère de Hoek & Brown est choisi pour prédire la rupture du matériau. La ruine est initiée par flexion des montants verticaux dans les voussoirs 8 et 9 pour une charge de 12.4 kN (Figures 4 et 6).

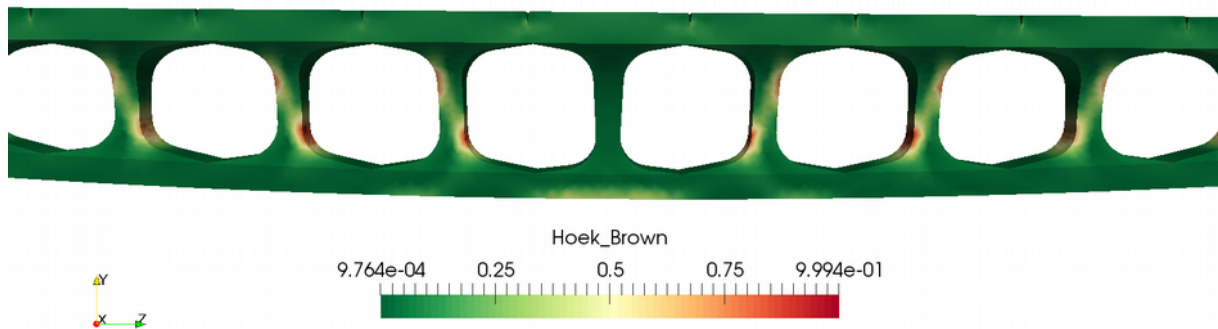


Figure 4 : Modèle continu de la poutre – Initiation de la ruine à 12800 N.

### Modélisation par des éléments discrets

Les voussoirs sont modélisés par des éléments discrets déformables. Entre chaque voussoir, une loi d'interaction de type Signorini-Coulomb est considérée. Les calculs sont effectués sur la plateforme LMGC90 [1] basée sur la méthode Non-Smooth Contact Dynamic [2]. Pour une charge de 13.5 kN, la ruine est initiée par l'ouverture du joint de la membrure inférieure entre les voussoirs 10 et 11 et le poinçonnement dans le joint de la membrure supérieure (Figures 5 et 6).

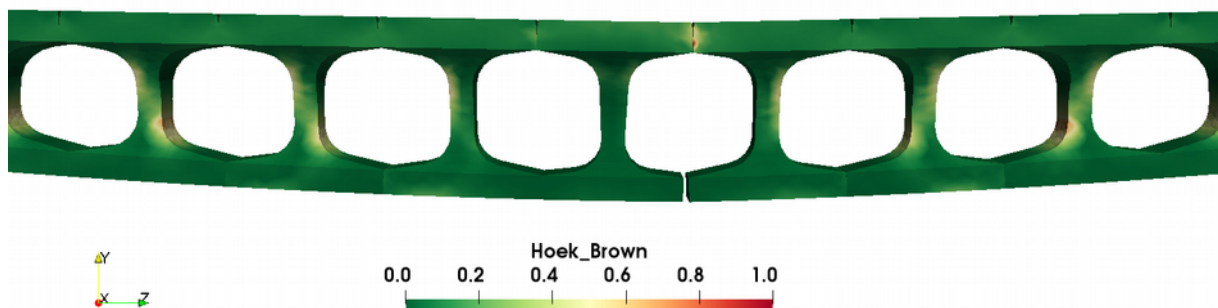


Figure 5 : Modèle discret de la poutre – Initiation de la ruine à 13500 N.

## Discussion

Le point faible récurrent dans la modélisation des maçonneries concerne la description du joint. La réalité de la réalisation est à mi-chemin entre le modèle continu et le modèle discret. Toutefois, le mode de rupture observé

expérimentalement s'apparente aux résultats de la simulation du modèle continu. L'emploi de la résine époxy aux caractéristiques mécaniques supérieures à celles de la pierre pourrait être à l'origine de cette prévalence bien qu'il y ait lieu de s'interroger sur la pénalisation introduite par ce type de joints. La caractérisation du module d'Young sous faibles excitations dynamiques explique la bonne corrélation des résultats en début de chargement ; des non-linéarités apparaissent au-delà de 6kN. Nous noterons que la géométrie de la poutre n'est pas optimale et qu'une évolution permettrait d'améliorer ses potentialités.

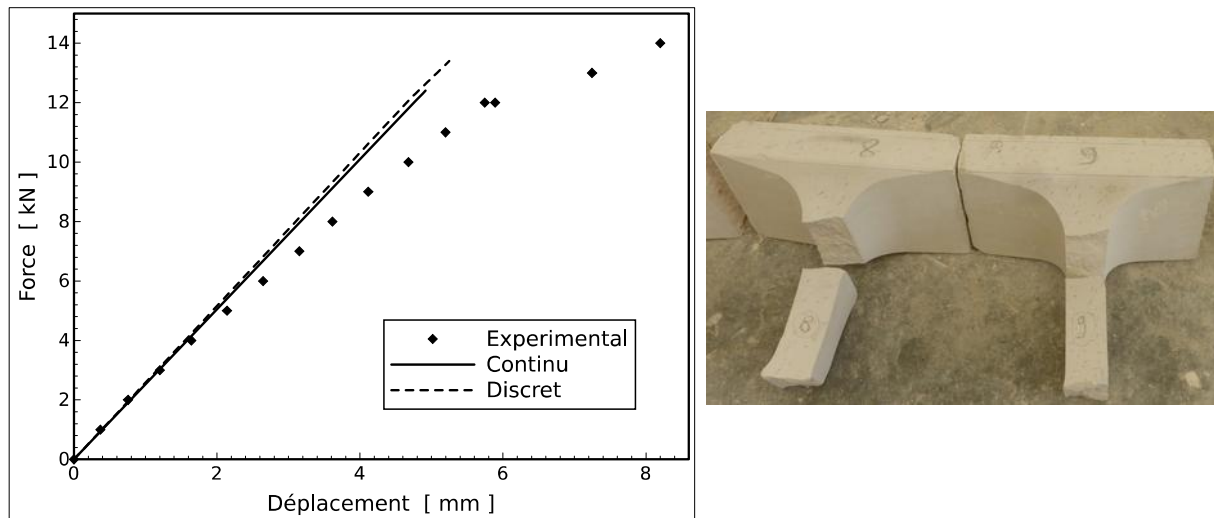


Figure 6 : Comparaison expérimental et numérique.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les Compagnons du Tour de France Des Devoirs Unis et Stéphane Launay, ingénieur commercial chez Polytec France pour leur investissement dans le projet.

## 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. In: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, vol. 177, p. 235–257.
- [3] Kawaguchi M., Granite Pedestrian Bridge, Beppu, Japan, Structural Engineering International, 1996, p. 148-149.
- [4] Lenczner E.A.R., The design of the stone facade to the Pavilion of the Future, Expo '92, Seville, Structural Engineer, 1994, n°72.
- [5] Leroux Y., Projet PPI (Plafond Plancher Intelligent) – Prototype de poutres modulables précontraintes, Institut Supérieur de Recherche et de Formation aux Métiers de la Pierre, Rodez, 2014.
- [6] Lion M., Influence de la température sur le comportement poromécanique ou hydraulique d'une roche carbonatée et d'un mortier. Études expérimentales. Doctorat de l'Université de Lille, 2004.
- [7] Omikrine Metalssi O., Douthe C., Presepi M., Mondardini L., Brocato M., Experimental study on reinforced stone beams, Engineering Structures, 2013, vol. 54, p. 1–8.