

# Essai de résistance au feu d'un mur de maçonnerie en pierre naturelle : étude de la courbure thermique et du mécanisme de rupture

Elodie DONVAL<sup>1,2</sup>, Duc Toan PHAM<sup>1</sup>, Ghazi HASSEN<sup>2</sup>, Patrick de BUHAN<sup>2</sup>, Didier PALLIX<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

<sup>2</sup> Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, 6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

<sup>3</sup> Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, 17 rue Letellier, 75015 Paris, France

**RESUME** La présente contribution décrit l'essai de résistance au feu d'un mur porteur en maçonnerie de pierre naturelle (calcaire de Saint-Vaast). Le mur a été exposé à un feu normalisé pendant 3h, avec une charge verticale maintenue constante pendant 2h30 puis progressivement augmentée jusqu'à rupture de la structure. A partir de cet essai et d'essais réalisés précédemment sur des murs du même type, il apparaît que le chargement mécanique a tendance à faire diminuer la courbure thermique du mur ainsi que sa résistance au feu. La métrologie mise en œuvre (capteurs LVDT et corrélation d'image) permet également de conjecturer un mécanisme de rupture du mur, qui semble rompre vers l'opposé du feu. Dans le cas d'un mur de façade, un tel mode de rupture pourrait alors ne pas être compatible avec l'évacuation des personnes et l'intervention des services de secours, ou menacer la stabilité des constructions avoisinantes.

**Mots-clefs** Pierre naturelle, Maçonnerie, Feu, Courbure thermique, Rupture

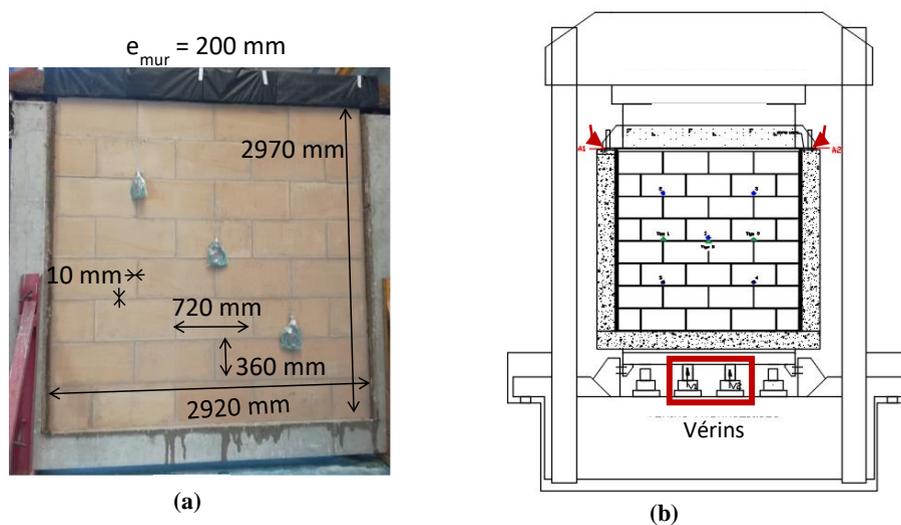
## I. INTRODUCTION

La pierre naturelle, matériau isolant, bas-carbone et réemployable à l'infini, redevient un matériau plébiscité par les architectes pour la construction neuve. Dans la pratique d'ingénieur, le texte de référence pour le dimensionnement en situation d'incendie des structures en maçonnerie au niveau Européen est l'Eurocode 6 dans lequel certaines valeurs tabulées sont données à titre indicatif (EN 1996-1-2, 2005). Cependant, contrairement aux autres types de maçonnerie, il n'existe aucune valeur tabulée pour l'évaluation de la résistance au feu des maçonneries en pierre naturelle. En l'absence de données, les valeurs très sécuritaires souvent adoptées pour ces structures ont tendance à rendre l'usage de la pierre naturelle plus complexe et à ne pas l'utiliser selon sa pleine capacité de résistance au feu. Dans ce contexte, une première campagne expérimentale sur deux murs en pierre naturelle au feu a été menée par le CSTB et le CTMNC sur

un mur non chargé mécaniquement et sur un mur chargé avec une force de compression constante tout au long de l'essai (voir (Pham et al., 2021) pour plus de détails). Une deuxième campagne expérimentale a été récemment réalisée sur un mur de même type que les essais précédents, mais avec un niveau et un trajet de chargement différents. La présente contribution décrit les principaux phénomènes observés lors de ce dernier essai, permettant d'alimenter des bases de données plus larges et de mieux comprendre le comportement au feu de telles structures.

## II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le mur testé lors de cet essai est composé de pierre de Saint-Vaast, une pierre très poreuse (40% de porosité ouverte), peu raide ( $E = 5$  GPa) et peu résistante ( $R_c = 5-7$  MPa), et de mortier à la chaux hydraulique naturelle NHL 3,5. Ses dimensions sont données sur la figure 1(a).



**FIGURE 1.** (a) Mur porteur testé et (b) portique de chargement

Ce mur est installé dans un portique de chargement, représenté sur la figure 1(b), permettant d'appliquer une charge verticale. Dans le cas présent, le chargement appliqué valait 125 kN/ml, ce qui correspond à 40 % de la charge limite du mur à température ambiante selon l'Eurocode 6 (EN 1996-1-2, 2005). Le mur est également exposé au feu sur l'une de ses faces. La température dans le four suit la courbe normalisée ISO 834.

Lors de l'essai, l'évolution des températures dans l'épaisseur du mur est suivie par un ensemble de thermocouples. Les déplacements, quant à eux, sont mesurés à la fois par des capteurs LVDT, des capteurs à fils et par la technique de corrélation d'image.

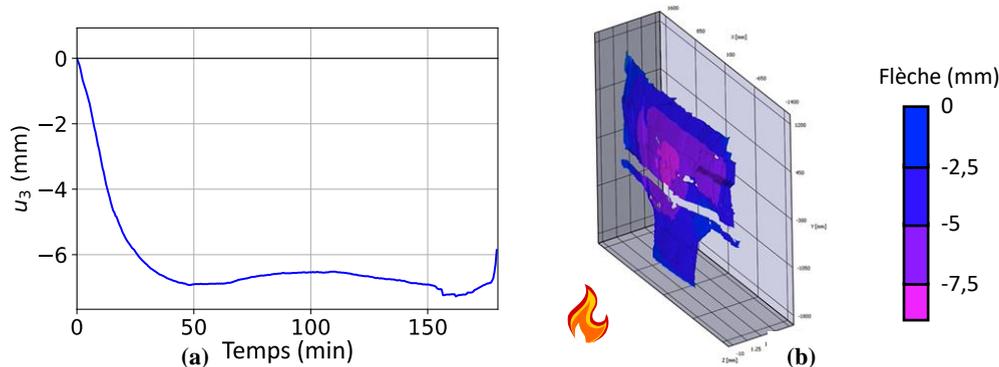
## III. RESULTATS

### A. Mesures thermiques

Les mesures thermiques, réalisées au moyen de thermocouples positionnés à différentes profondeurs dans la pierre, ont mis en évidence des paliers de vaporisation marqués qui témoignent de l'importance des phénomènes hydriques mis en jeu.

### B. Courbure thermique et fissuration lors de l'essai

Le gradient thermique observé dans la partie précédente conduit le mur à se courber vers le feu. Ce déplacement hors plan du mur, augmente lors des 30 premières minutes d'essai (Figure 2 (a)), puis reste quasiment constant. Le mur se courbe à la fois dans la direction horizontale et dans la direction verticale (figure 2 (b)).



**FIGURE 2.** (a) : Evolution du déplacement hors-plan mesuré par un capteur LVDT au centre du mur ;  
(b) : déplacement hors-plan observé par corrélation d'images après 60 min d'essai

En comparant cette déformée à de précédentes campagnes expérimentales menées sur des murs composés des mêmes matériaux par (Pham et al., 2021), il apparaît que plus le mur est chargé verticalement, plus sa courbure thermique est faible.

Des fissures verticales, débutant à l'interface entre pierre et mortier dans les joints verticaux et se propageant verticalement au travers des pierres, apparaissent pendant la première demi-heure d'essai et leur ouverture croît durant le reste de l'essai. Elles ne semblent en revanche pas menacer l'intégrité structurale du panneau.

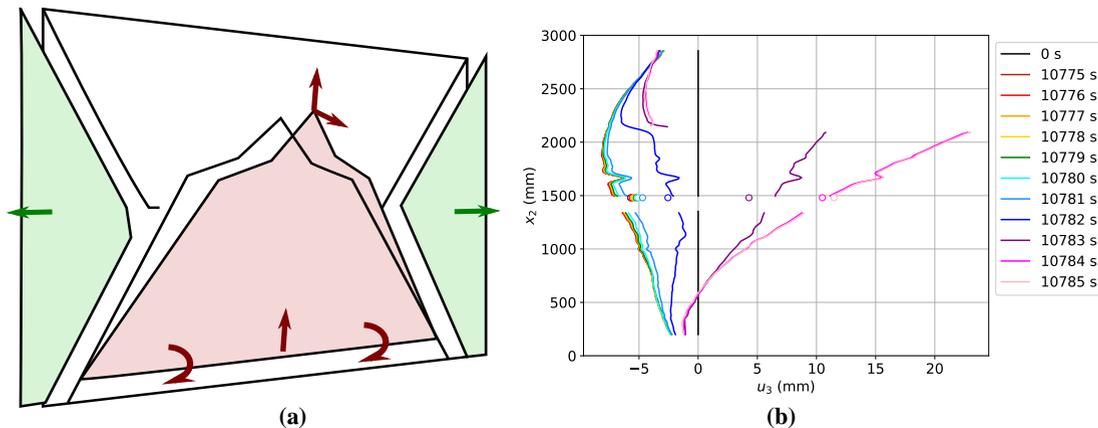
### C. Rupture : charge et mécanisme

Le chargement mécanique a été maintenu constant pendant les 150 premières minutes de l'essai. La résistance au feu du mur testé, sous une charge de 125 kN/ml (soit de 40 % de la charge limite à froid selon un calcul empirique suivant l'Eurocode 6 (EN 1996-1-1, 2005)), est donc supérieure à 150 min. Ce résultat peut être comparé à la précédente campagne expérimentale (Pham et al., 2021), lors de laquelle un mur non-chargé et un mur chargé à 65 % de la charge limite à température ambiante selon l'Eurocode 6 avaient été exposés au feu. La résistance au feu du mur non-chargée était alors supérieure à deux heures (durée prévue de l'essai) tandis que la résistance au feu du mur chargé était de 29 min.

Après 150 min d'essai, la charge mécanique a été progressivement augmentée jusqu'à la rupture, obtenue après 180 min d'essai pour une charge verticale de 250 kN/ml. Les déplacements mesurés par les capteurs LVDT et par corrélation d'images permettent de faire des hypothèses sur le mécanisme de rupture. Un schéma simplifié de celui-ci est donné sur la figure 3 (a). Le mur, qui présente pendant l'essai une courbure thermique vers le feu (abscisses négatives sur la figure 3 (b)), rompt vers l'opposé du feu (abscisses positives sur la figure 3 (b)).

Côté non-exposé, ces observations sont corroborées par l'observation des fissures diagonales apparaissant au moment de la rupture. Côté exposé, une caméra endoscopique permet de

montrer que la rupture est concomitante au fendage du troisième rang du mur dans son épaisseur.



**FIGURE 3.** (a) : Schéma du mode de rupture supposé ; (b) : mesures de déplacement par capteurs LVDT (cercles) et corrélation d'image (lignes continues) sur une droite verticale à mi-largeur du mur au moment de la rupture

#### IV. REMARQUES FINALES

- Malgré la faible teneur en eau des blocs de pierre, des paliers de vaporisation marqués ont été observés, ce qui témoigne de l'importance de la prise en compte des phénomènes hydriques dans la modélisation d'un tel essai.
- Augmenter le chargement mécanique conduit à la diminution de la courbure thermique.
- Diminuer le chargement mécanique augmente donc drastiquement la résistance au feu du mur. Ce résultat, qui paraît plutôt intuitif, est pourtant contraire aux résultats obtenus par (Byrne, 1979). Deux différences majeures peuvent expliquer cela : le type de blocs utilisés et l'élanement des murs.
- La rupture se produit vers l'opposé du feu. Ce type de rupture peut donc présenter un danger pour des équipes d'intervention se trouvant à l'extérieur du bâtiment.

Les perspectives relatives à cet essai portent sur le développement et la validation de modèles prédictifs concernant les transferts thermiques, la déformée et la résistance locale et globale d'un mur de maçonnerie en pierre naturelle exposé au feu.

#### REFERENCES

- Byrne, S.M., 1979. Fire resistance of load-bearing masonry walls. *Fire Technol.* 15, 180–188. <https://doi.org/10.1007/BF01983196>
- EN 1996-1-1, 2005. Eurocode 6 - Calcul des ouvrages en maçonnerie - Partie 1-1 : règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée.
- EN 1996-1-2, 2005. Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie. Partie 1-2 : Règles générales - Comportement au feu.
- Pham, D.T., Donval, E., Pinoteau, N., Pimienta, P., Pallix, D., 2021. Test of loaded and unloaded stone masonry walls exposed to fire (submitted). *Mater. Struct.*