

Étude du Comportement Thermomécanique des Murs en Maçonneries de Pierres Calcaires

Armita OBAEI¹, Javad ESLAMI¹, Anne-Lise BEAUCOUR¹, Dashnor HOXHA², Albert NOUMOWE¹, Pierre PIMIENTA³

¹ CY Cergy Paris Université, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil

² Université d'Orléans

³ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

RESUME

L'étude du comportement au feu des maçonneries en pierre calcaire revêt une importance cruciale, d'autant plus que peu d'études scientifiques ont abordé cette problématique à l'échelle structurelle. Dans ce contexte, une partie du projet ANR POSTFIRE, adopte une approche intégrant à la fois des expérimentations et des simulations numériques, afin d'analyser le comportement thermomécanique des maçonneries en pierre calcaire exposés à des températures élevées. Les résultats expérimentaux, montrent des déformations hors plan symétriques avec une flèche orientée vers la source de chaleur pour tous les murs durant le chauffage. L'ajout d'une charge mécanique pendant le chauffage réduit le déplacement hors plan. La modélisation thermomécanique par la méthode des éléments finis, en considérant l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des pierres en fonction de la température, met en évidence l'importance cruciale des propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité ainsi que des conditions aux limites sur le schéma déformé du mur et l'intensité de déplacement.

Mots-clés Maçonneries ; Pierre calcaires ; Résistance au feu ; Comportement Thermomécanique ; Modélisation.

I. INTRODUCTION

La maçonnerie est un système de construction ancien et largement utilisé qui consiste en l'assemblage de blocs ou d'unités de maçonnerie individuelles, généralement en pierre, en brique ou en béton, avec ou sans l'utilisation de mortier. Les pierres calcaires, un matériau fréquemment employé dans la maçonnerie, ont été couramment utilisées par le passé en raison de leur disponibilité et de leur facilité de taille. Les pierres calcaires sont des roches sédimentaires principalement composées de carbonate de calcium.

Les structures en maçonnerie ont été bien étudiées lors de chargement statique et dynamique, mais la compréhension du comportement des maçonneries en pierre exposées au feu est limitée [1]. Le feu représente une menace significative pour les bâtiments, nécessitant une compréhension approfondie des endommagements thermiques et du comportement mécanique des maçonneries en pierres à haute température.

En cas d'incendie, les murs en maçonnerie subissent une flexion thermique due au chauffage d'une face, créant un gradient thermique à travers leur épaisseur [2]. En conséquence, un phénomène de flexion thermique se produit en raison de la différence d'expansion thermique entre les deux faces du mur. Comme la face exposée à la chaleur se dilate plus rapidement que la face opposée restée froide, le mur a tendance à se courber en direction de l'incendie [3]. Cette courbure thermique, combiné à la dégradation des matériaux, peut entraîner l'instabilité du mur [4]. À des températures

élevées, des transformations physiques et chimiques affectent les propriétés des unités de maçonnerie et des mortiers [5]. La décarbonatation de la calcite, par exemple, provoque une contraction de la pierre calcaire au-delà de 700 °C, réduisant les propriétés mécaniques de la face exposée et pouvant causer des dommages même après l'incendie [6].

Différents auteurs ont employé les méthodes expérimentales pour évaluer la résistance au feu des maçonneries. Byrne [7] a fourni les premières preuves expérimentales de la flexion thermique des murs en maçonnerie de briques d'argile, réalisant des expériences variées sur des murs de différentes dimensions. Shields et al. [8] ont étudié la déformation thermique d'un panneau de maçonnerie non chargé à mi-échelle de 1 m² selon la norme BS-476. Lavery et al. [9] ont testé des murs en briques de béton à l'échelle réduite, exposés à divers niveaux de charge et d'incendie, expliquant les phénomènes de déformation thermique. Nguyen et Meftah [10] ont investigué la réponse thermomécanique des murs creux en blocs de maçonnerie en argile, mettant en évidence l'observation d'un phénomène d'écaillage au cours de leur étude expérimentale.

Concernant les murs en pierre calcaire, la recherche dans ce domaine est relativement limitée. Une étude récente menée par Pham et al. [11] et Donval [12], s'est concentrée sur l'investigation du comportement thermomécanique d'un type de mur en maçonnerie en pierre calcaire. L'étude a impliqué deux tests d'incendie, révélant l'apparition d'une flèche thermique dans les murs, influencé par la charge mécanique. De plus, les chercheurs ont examiné les schémas de fissuration dans les murs, qui commencent généralement dans les joints verticaux et se propagent verticalement à travers les blocs.

Très peu d'investigations numériques ont abordé la simulation de la réponse thermomécanique des maçonneries soumises au feu. Gnanakrishnan et al. [13] ont développé un modèle d'éléments finis simplifié en déformation plane avec des résultats surestimés en raison de l'omission de la non-linéarité géométrique, de la fissuration du matériau et de la composante de déformation transitoire. La déformation transitoire, dans le contexte de hautes températures, se réfère à la réduction de la déformation thermique due à la présence de chargement, ce qui diminue la déformation totale. Prendre en compte cette déformation dans les modèles de murs sous charge peut avoir un impact significatif sur les résultats. Dhanasekar et al. [14] ont présenté un modèle à éléments finis 2D mettant en évidence le flambement thermique dans les murs de maçonnerie, avec une validation satisfaisante par rapport à des essais. Cependant, la composante de déformation transitoire a été négligée. Cela peut conduire à des résultats inappropriés dans l'analyse des murs en maçonnerie sous charge. Nadjai et al. [15] ont développé un modèle micro 2D basé sur la méthode des éléments finis tenant compte des non-linéarités géométriques et matérielles, et des propriétés matérielles dépendantes de la température. Nguyen et Meftah [16] ont validé numériquement une maçonnerie en blocs d'argile creux soumise au feu avec un modèle micro 3D non linéaire dans Cast3M. Leur modèle a pris en compte des critères d'écaillage basés sur l'écrasement, le détachement et le flambage, et a été validé par rapport aux observations expérimentales.

Parmi les études, la littérature existante manque de données complètes sur les réponses thermomécaniques des murs en pierre calcaire à l'exposition au feu qui souligne le besoin d'investigations systématiques pour comprendre le comportement de ces matériaux dans de telles conditions. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est d'étudier le comportement thermomécanique de différents murs en pierre calcaire lors d'incidents, par deux approches expérimentale et modélisation. Dans le cadre de cette étude, les résultats des essais de chauffage de six murs construits avec différentes pierres calcaires de différentes résistances seront présentés. De

plus, la modélisation comprendra une analyse de l'effet des conditions aux limites sur les résultats obtenus. Une partie de résultats expérimentaux de ce travail est présentée dans un autre article [17].

II. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

La partie expérimentale de cette étude explore le comportement de maçonnerie en pierre calcaire lors d'incendies à travers des six essais de résistance au feu, réalisés au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Trois types de pierre calcaire, de différentes résistances, ont été examinés. Deux murs ont été construits pour chaque type de pierre calcaire, avec des mortiers adaptés à chaque pierre, et ont été soumis à un scénario incendie avec et sans chargement mécanique pendant le chauffage. Cette étude étudie également l'impact du chargement mécanique pendant l'incendie, examine les déplacements du mur dans les trois directions, et analyse le comportement post-incendie des murs.

Les pierres calcaires utilisées sont issues des carrières de Saint-Leu, Tervoux et Massangis et possèdent respectivement les résistances en compression de 7,3 ; 37,2 et 102 MPa. Pour chaque type de pierre un mortier adapté a été formulé en accord avec la norme NF DTU 20.1 2020 [18]. Cette norme définit, pour la maçonnerie en pierre naturelle, le dosage en liant du mortier en fonction de la résistance en compression de la pierre. Elle exprime les dosages en liant pour 1m³ de sable sec. Pour se rapprocher des mortiers historiques à faible hydraulicité ; les mortiers sont formulés principalement à base de chaux hydraulique naturelle NHL 2 et NHL 3,5. Le ciment Super Blanc CEM II/ 42,5 N est par ailleurs utilisé pour atteindre la résistance en compression recherchée. Les trois mortiers sont confectionnés avec du sable siliceux de classe granulaire 0-2. La résistance des mortiers de Saint-Leu, Tervoux et Massangis a été mesurée respectivement après 4, 2 et 3 mois.

TABLEAU 1. Caractéristiques des pierres calcaires et les mortiers testées et conditions expérimentales

Mur	Pierre	Résistance en compression de la pierre (MPa)	Mortier	Durée de la maturation	Résistance en compression du mortier (MPa)	Chargement	Charge résiduelle
1	Saint-Leu	7,3 ± 1	350 kg NHL2	4 mois	0,5 ± 0,05	Non-chargé – 14 tonnes (0,23 MPa)	105 tonnes (1,75 MPa)
2						Chargé – 36,3 tonnes (0,61 MPa)	102 tonnes (1,75 MPa)
3	Tervoux	37,3 ± 1	250 kg NHL3,5 + 100 kg Ciment	2 mois	1,5 ± 0,15	Non-chargé – 30 tonnes (0,5 MPa)	>200 tonnes (3,3 MPa) Pas rupture
4						Chargé – 141 tonnes (2,35 MPa)	200 tonnes (3,3 MPa)
5	Massangis	102,4 ± 6	200 kg NHL3,5 + 150 kg Ciment	3 mois	7 ± 3	Non-chargé – 26 tonnes (0,43 MPa)	>375 tonnes (6,25 MPa) Pas rupture
6						Chargé – 375 tonnes (6,25 MPa)	>375 tonnes (6,25 MPa) Pas rupture

Pour étudier l'influence de la charge mécanique à haute température, des tests ont été réalisés sur des murs avec et sans chargement mécanique pendant le chauffage. La charge verticale en compression pour les essais chargés était fixée à 50% de la charge admissible de la maçonnerie, conformément à l'Eurocode, tenant compte de la résistance à la compression de la pierre, de son mortier et de la géométrie du mur. Après l'incendie, pour évaluer la résistance résiduelle, tous les murs ont été soumis à une charge mécanique jusqu'à la rupture un jour après le refroidissement. La charge imposée aux murs, représentant la charge résiduelle, est présentée dans le [TABLEAU 1](#).

Les murs ont été construits avec des blocs (ou demi-blocs) de pierre mesurant 0,72 (0,36) m de longueur, 0,36 m de hauteur et 0,2 m d'épaisseur, liés ensemble par une couche de mortier de 0,01 m. Les murs ont une largeur de 2,92 m, une hauteur de 2,97 m et une épaisseur de 0,2 m. Placés dans un cadre en béton armé, les murs étaient équipés d'une bande d'isolant de 0,6m sur leurs côtés latéraux pour assurer une isolation thermique. Une couche de mortier de 0,02 m a été appliquée sur la partie inférieure, tandis qu'une couche de mortier de 0,055 m a été appliquée sur le dessus ([FIGURE 1](#)). Les murs sont exposés à une montée en température selon la courbe ISO 834-1 pendant 120 minutes, la température a atteint 1050°C sur la surface exposée du mur.

Le suivi de la température durant le chauffage a été réalisé par neuf thermocouples à l'intérieur du four, cinq thermocouples sur la surface non exposée, et des thermocouples intégrés dans les blocs. Trois blocs (nommés Bloc A, B et C) ont été instrumentés avec six thermocouples chacun, à différentes profondeurs du côté exposé, à 1 cm, 2 cm, 5 cm, 8 cm, 12 cm et 17 cm. Cinq transducteurs différentiels à variation linéaire (LVDT) ont été placés sur le côté non exposé pour mesurer le déplacement hors plan du mur et deux capteurs à fils ont enregistré le déplacement vertical du mur entre la poutre supérieure et le cadre. La technique de corrélation d'images numériques (DIC) a également été employée pour obtenir les champs de déplacement dans trois directions.

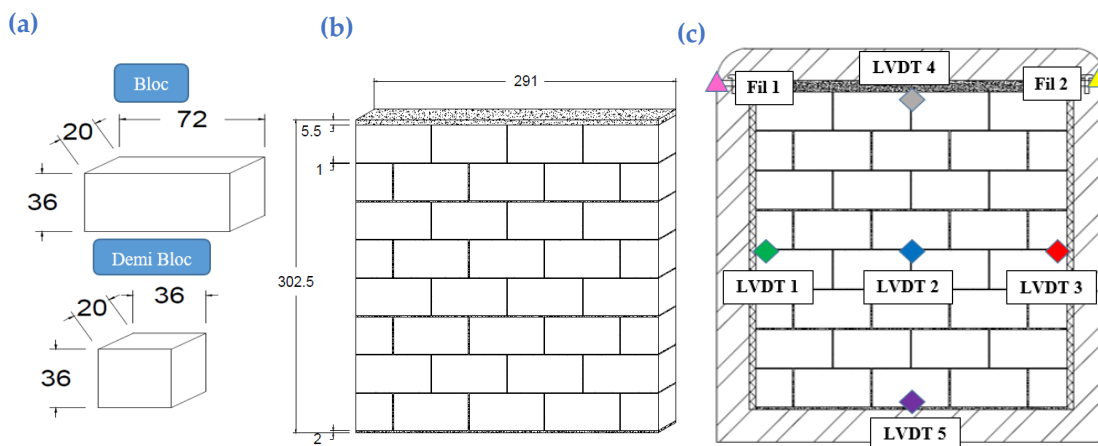


FIGURE 1. (a) Dimensionnement des blocs ; (b) dimensionnement le mur ; (c) le mur dans un cadre de béton armé avec le positionnement des blocs instrumentés par les thermocouples et les LVDTs

II-I. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La [FIGURE 2-a](#) présente l'évolution de la température dans l'épaisseur du mur lors des tests de chauffage des deux murs chargés et non-chargés de Tervoux. Une dispersion relativement importante, autours de 100 °C, a été constaté pour les températures enregistrées à un et deux cm de

la surface chauffée. Cela peut être lié à la des différences de position des thermocouples par rapport à leur position théorique. Vu le gradient thermique étant très élevé proche de la surface chauffée, une variation d'un ou deux mm des thermocouples de la surface chauffée peut impacter les résultats de façon considérable. Ce comportement et ces résultats ont été observés pour les 6 murs. De plus, en comparant les profils de température des murs, nous avons remarqué que la température à travers l'épaisseur des murs en Massangis était plus élevée que celle des murs en Tervoux et Saint-Leu. Ces résultats sont cohérents avec les valeurs de conductivité thermique de chaque type de pierre, où Massangis a la conductivité thermique la plus élevée, suivie de Tervoux et de Saint-Leu [19].

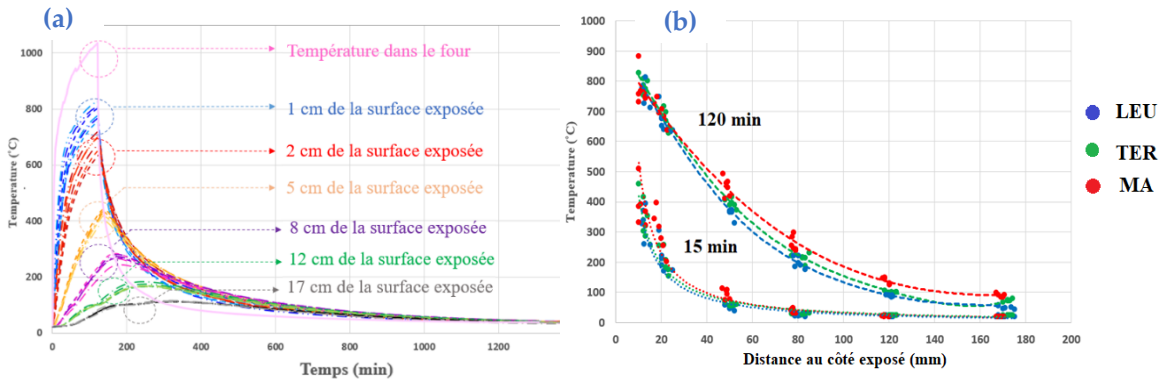


FIGURE 2. (a) Températures mesurées dans l'épaisseur du mur pour les murs du TERVOUX pendant le chauffage et refroidissement ; (b) La comparaison des profils de la température pour les trois pierres

La [FIGURE 3-a](#) illustre les déformations hors plan pour le mur de Tervoux non chargé déterminées sur la surface non exposée par la technique DIC. Les résultats révèlent un déplacement symétrique vers le feu, avec deux axes de symétrie suivant les axes X et Y passant par le centre du mur. Le déplacement le plus important se produit au centre du mur, diminuant vers les bordures. La position exacte des LVDTs est présentée dans la [FIGURE 1](#), et les résultats indiquent que le LVDT placé au milieu du mur a enregistré le déplacement hors-plan maximal.

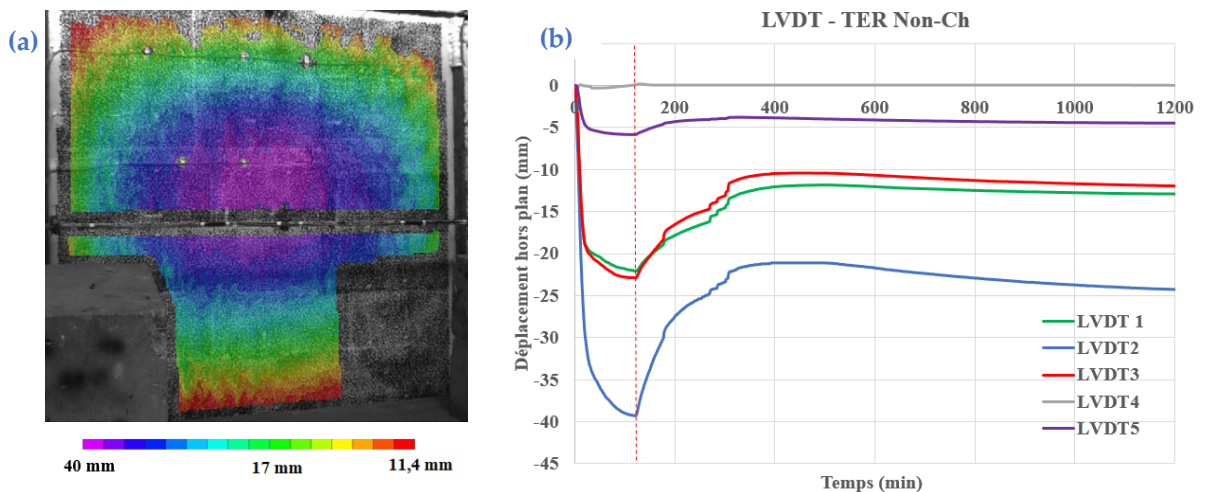


FIGURE 3. (a) Le contour du déplacement hors-plan sur le côté non exposé après 120 minutes de chauffage ; (b) l'évaluation du déplacement hors-plan dans le cas de Tervoux Non Chargé

De plus, les murs non chargés présentent généralement un déplacement hors-plan plus élevé par rapport aux murs chargés. Exception faite du mur Saint-Leu, où la différence de charge entre les

tests non-chauffé et chauffé est minimale. Le déplacement hors-plan augmente initialement, puis diminue par la suite dans la phase de refroidissement. À la fin de la phase de chauffage, la déflexion maximale est observée pour le mur non chargé de Tervoux (39 mm), suivi du mur non chargé de Massangis (32,7 mm), tandis que le mur chargé de Massangis montre la plus petite déflexion (9 mm). Ces observations montrent également la formation d'une courbure vers la source de chaleur.

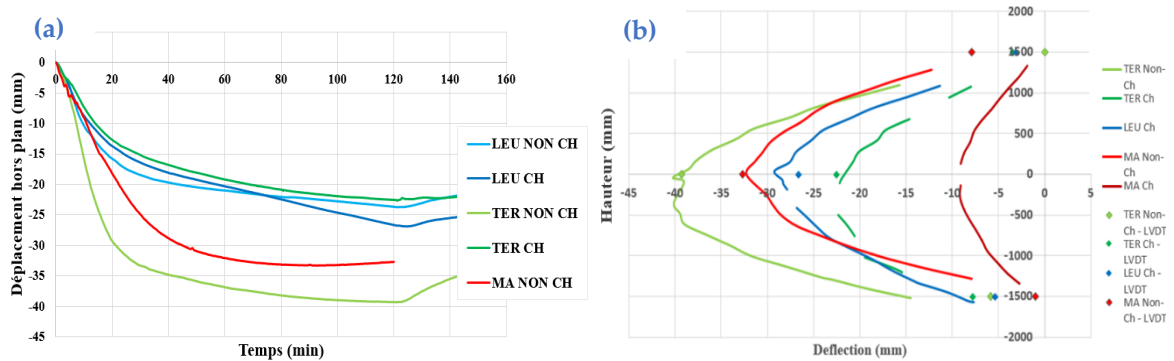


FIGURE 4. (a) L'évaluation du déplacement hors-plan obtenu par LVDT au centre du mur pendant le chauffage dans les murs ; (b) Profils de déformation le long de la hauteur à mi-largeur des murs à la fin du chauffage par les résultats des LVDTs et la DIC

Au début de la phase de refroidissement, les murs présentent une diminution du déplacement hors-plan, avec une réversibilité variant entre 45 % et 94 % pour tous les murs, sauf pour les murs de Massangis, qui montrent une réversibilité quasiment totale.

En résumé, après avoir observé les murs pendant deux semaines après l'essai, les fissures observées et la dégradation du côté exposé des murs peuvent être expliquées par la partie du mur qui a été exposée à des températures dépassant 730°C , comme le montre la [FIGURE 2](#) (et la [FIGURE 5](#)). Environ 10 mm du mur ont atteint des températures supérieures à 730°C , déclenchant une réaction de décarbonatation qui a libéré du CO_2 et du CaO . Au contact de l'humidité, ces substances ont réagi pour former de la Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, provoquant une expansion du matériau et potentiellement des fissures. Ce phénomène est progressif et se développe sur plusieurs jours suivant l'essai. Cette dégradation, associée à la réversibilité des déplacements hors plan observés dans les murs, met en évidence l'interaction complexe entre les effets thermiques, les propriétés des matériaux et le comportement structural dans des conditions d'incendie.

III. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique réalisée a pour objectif l'étudier l'influence des propriétés thermomécanique des pierres ainsi que les conditions aux limites sur le déplacement hors plan des murs, lors des essais de chauffage. Ainsi, des calculs thermomécaniques par méthode des éléments finis ont été réalisés à l'aide de Code-Aster (www.code-aster.org), un logiciel de simulation numérique en mécanique des structures développé par la société EDF (Electricité de France). La modélisation thermomécanique a été réalisée uniquement pour les murs chargé et non chargé en pierre de Tervoux.

III-I. MODÉLISATION THERMIQUE

La modélisation thermique effectuée repose sur la réalisation d'un bilan d'énergie, et l'expression de la loi de Fourier conduit à l'équation générale de conduction de la chaleur dans un corps supposé homogène :

$$\vec{\nabla} \cdot [\lambda(T) \vec{\nabla} T] + P(\vec{r}) = \rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Où T : température en K ; λ : conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$; ρ : masse volumique en kg.m^{-3} ; P : énergie produite au sein même du matériau en W.m^{-3} (pas considérée dans cette étude numérique) ; C_p : capacité thermique massique en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Les paramètres thermiques utilisés dans la modélisation (capacité thermique spécifique et conductivité thermique) sont fonction de la température [19].

En ce qui concerne les conditions aux limites thermiques, une condition aux limites de convection a été considérée sur les deux surfaces exposées et non exposées. La surface chauffée est exposée à la courbe de chauffage enregistrée dans le four avec un coefficient de convection $H=200 \text{ W.m}^{-2}$ et la surface non chauffée est exposée à une température constante de 25°C avec un coefficient $H=5 \text{ W.m}^{-2}$.

La FIGURE 5 présente la comparaison entre les températures mesurées expérimentalement et celles prédites numériquement lors de chauffage pour les deux murs de Tervoux. En général, les températures prédites sont en bon accord avec les températures mesurées pour toute la durée d'exposition.

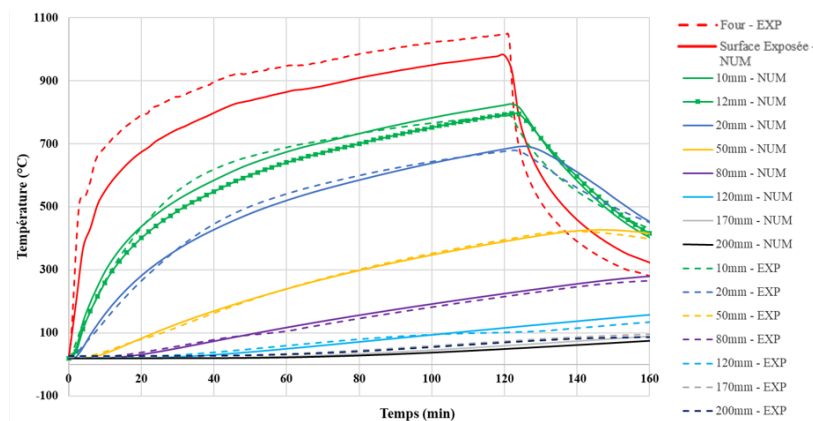


FIGURE 5. Températures mesurées dans l'épaisseur du mur dans les essais du Tervoux et avec la modélisation

III-II. MODÉLISATION MÉCANIQUE

Afin d'évaluer l'effet des conditions aux limites ainsi que les propriétés thermomécaniques des pierres sur le comportement global des murs exposés à des températures élevées, une loi de comportement thermoélastique a été considérée. L'impact de la présence de joints de mortier sur le comportement global de murs a été tout d'abord évalué en considérant deux modèles : l'un en prenant en compte les blocs en pierre et le mortier ainsi que leurs propriétés en fonction de la température (hétérogène), et l'autre modèle considère les propriétés de la pierre pour l'ensemble du mur (homogène) (FIGURE 6). En considérant la condition de symétrie, uniquement un quart du mur a été modélisé.

Les deux modèles ont considéré les mêmes conditions aux limites. Les résultats de déplacement hors plans ont montré l'absence d'une différence significative entre les deux modèles. Par conséquent, on peut conclure que la présence d'un joint de mortier d'un centimètre entre les blocs dans un mur de 3 mètres n'a pas d'influence notable sur le comportement global du mur lorsqu'il s'agit de la modélisation thermoélastique.

Pour examiner l'effet des conditions aux limites, la suite de la modélisation a pris en compte le modèle homogène.

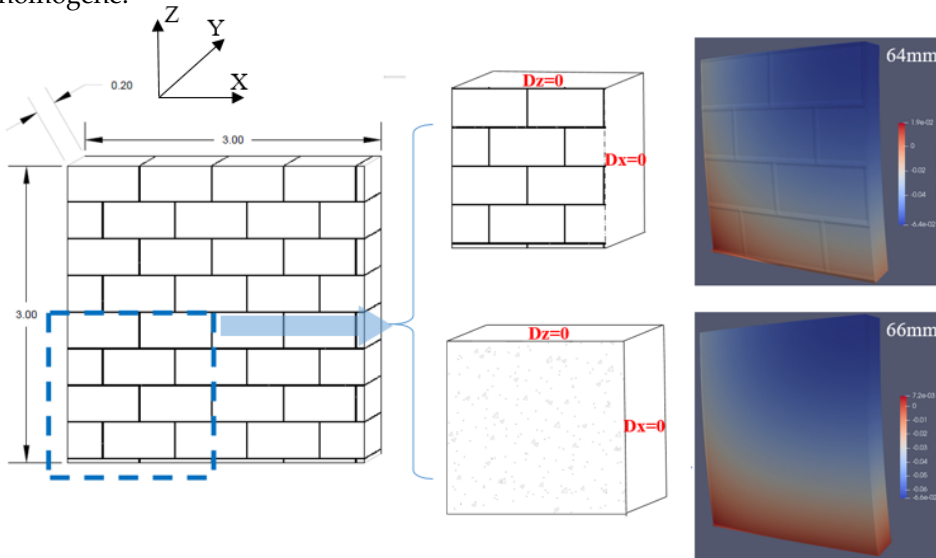


FIGURE 6. Modélisation d'un quart du mur avec et sans les joints de mortier pour évaluer l'effet des joints mortiers

Les murs ont été montés dans un cadre en U et une poutre est placée sur la surface supérieure du mur. La poutre supérieure est bloquée selon les trois directions, tandis que le cadre a la possibilité de se déplacer verticalement. Pour évaluer l'impact des conditions aux limites, trois configurations ont été comparées en modélisant un demi-mur avec la condition de symétrie en X imposée sur la surface verticale au milieu du mur ([FIGURE 7](#)) :

- Configuration I : La surface supérieure du mur a été bloquée dans les trois directions (X, Y et Z), tandis que la surface inférieure a été bloquée uniquement dans les directions X et Y et libre en direction Z ([FIGURE 7- a, Config.I](#)).
- Configuration II : Les déplacements ont été bloqués dans les trois directions sur la ligne centrale de la surface supérieure du mur, ainsi que dans les directions X et Y sur la ligne centrale de la surface inférieure ([FIGURE 7- a, Config.II](#)).
- Configuration III : Les mêmes conditions aux limites de la deuxième configuration sont imposées sur les deux lignes frontales (les lignes communes entre les surfaces et la surface chauffée) ([FIGURE 7- a, Config.III](#)).

L'objectif de considérer ces trois configurations est d'évaluer l'impact des conditions aux limites sur la distribution et la valeur du déplacement hors plans maximal du mur. Par ailleurs, l'influence de la perte de module de l'élasticité de la pierre avec la température sur le comportement thermomécanique des murs a été évalué en considérant deux distributions différentes des modules en fonction de la température, E1 les modules déterminés en résiduel et E2 à chaud. La baisse de module en fonction de la température est plus importante pour les essais à chaud. Les schémas de la déformé d'un mur non chargé à la fin de phase de chauffage pour les différentes configurations sont présentés sur la [FIGURE 7](#). La configuration I présente un schéma de déformé excentré qui s'éloigne du schéma symétrique observé expérimentalement.

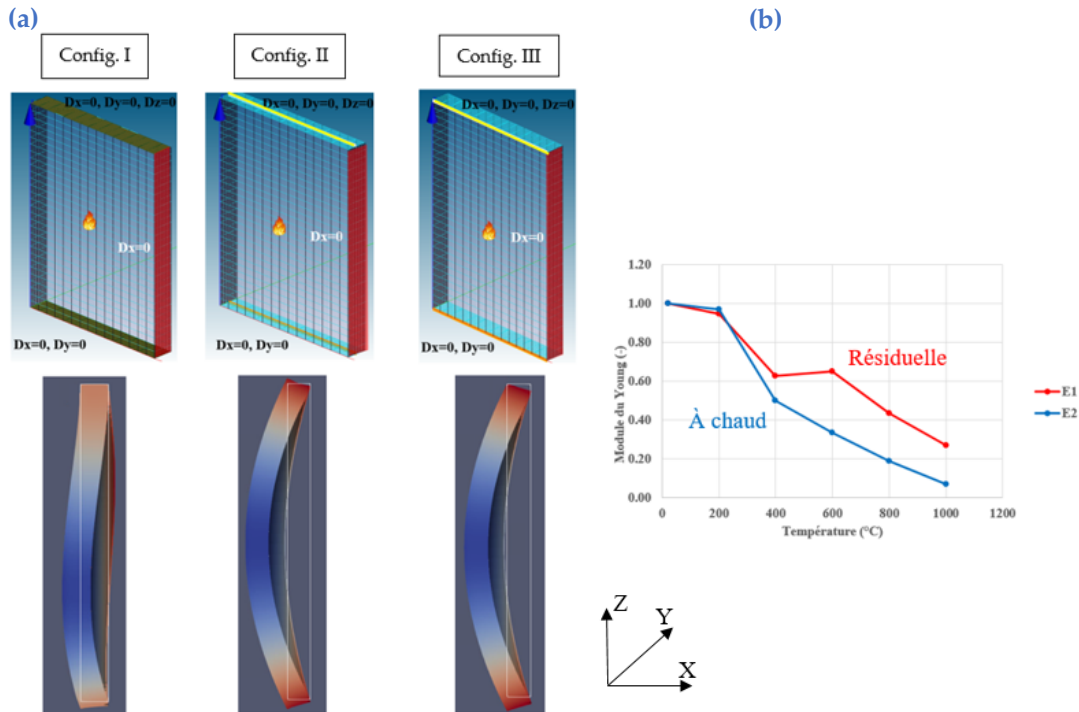


FIGURE 7. (a) Les 3 configurations et la déformée du mur après le chauffage ; (b) L'évolution du module du Young résiduel (E1) et à chaud (E2) en fonction de la température

Le [TABLEAU 2](#) présente les valeurs de déplacement hors plan maximal du mur à la fin de la phase de chauffage pour les trois configurations avec les deux courbes d'évolution de module d'élasticité. Il est à noter que les valeurs de la configuration I sous-estime largement le déplacement hors plan enregistré lors des essais de chauffage. Pour les deux autres configurations les schémas de déformé sont quasiment similaires et correspondent au schéma observé expérimentalement. Cependant, le déplacement hors plan est surestimé par ces deux configurations. Ces résultats montrent que pour reproduire le schéma de déformé obtenu expérimentalement il faudrait laisser la possibilité de rotations aux deux surfaces de contact supérieure et inférieure. Cependant, la surestimation de déplacement par les deux configurations II et III indique que cette rotation n'est pas complètement libre. En effet la présence de la couche de mortier entre le mur et le cadre pourrait contribuer à une adhérence entre le mur et cadre et ainsi à une rotation partiellement empêchée des surfaces de contact.

Pour modéliser le mur chargé en pierre de Tervoux, la configuration III a été considérée avec une contrainte de 2,35 MPa appliquée à la surface inférieure du mur, simulant la charge appliquée par des vérins sous la poutre inférieure du cadre. La différence importante de déplacement hors plan mesurée entre le mur chargé et non chargé n'a pas pu être reproduit par la modélisation. Cette divergence entre les résultats expérimentaux et numériques peut être expliquée en partie par le fait que la charge mécanique est appliquée numériquement sur toute la surface de contact tout au long du chauffage malgré la rotation de celle-ci. En effet à cause de la rotation de la surface inférieure du mur, au cours du chauffage, la surface de contact entre le cadre et le mur se réduit. En d'autres termes, il y a une progression du décollement du mur par rapport au cadre, du côté de la surface non chauffée vers la surface chauffée. Ceci mène à une excentricité de charge et par conséquent à une augmentation de la contrainte sur le côté chauffé de mur.

TABLEAU 2. Comparaison des déplacements entre l'essai expérimental et les configurations modélisées

Condition aux limites	Déplacement hors plan maximum (mm)	Écart expérimentale - numérique
<i>Tervoux Non chargé (Exp)</i>	39	-
<i>Tervoux Chargé (Exp)</i>	22,5	-
Config I , Non chargé- E1	19	0,49
Config II , Non chargé- E1	53	1,36
Config II , Chargé- E1	51	2,67
Config III , Non chargé- E1	52	1,34
Config I , Non chargé- E2	15	0,38
Config II , Non chargé- E2	42	1,08
Config III , Non chargé- E2	42	1,08

Pour modéliser d'une part l'adhérence entre le mur et le cadre et d'autre part l'excentricité de chargement mécanique au cours de chauffage, un système de ressorts a été utilisé (FIGURE 8). Il y a 336 ressorts sur la surface supérieure du mur, simulant la couche supérieure de mortier. Chaque ressort est un élément discret avec une extrémité bloquée en X, Y et Z et l'autre extrémité fixée sur la surface supérieure du mur. De plus, il y a 336 ressorts sur la surface inférieure avec une longueur de 2 cm pour simuler la couche de mortier entre le mur et la poutre inférieure. Il faut noter que la poutre modélisée est une poutre rigide qui peut se déplacer verticalement (FIGURE 1-c).

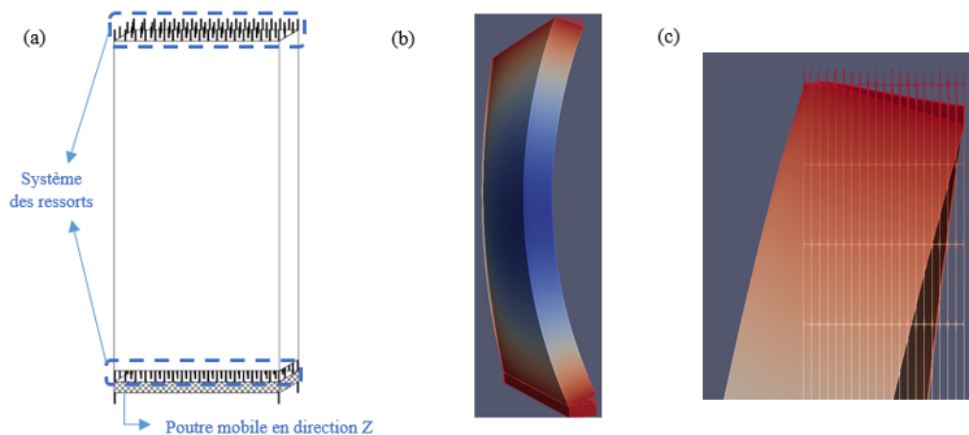


FIGURE 8. (a) Le schéma du mur modélisé avec le système des ressorts, le schéma déformé du mur (b) non chargé et (c) chargé après le chauffage

La rigidité des de ressorts est déterminée en considérant l'épaisseur de chaque couche de mortier et le module de Young du mortier. Un comportement élastique en compression et élastique parfaitement plastique en traction a été considéré pour l'ensemble des ressorts (FIGURE 9-b). Il est à noter que les ressorts situés du côté exposé du mur travaillent en compression et les autres ressorts en traction.

Une résistance en traction de 2 MPa a été fixée, la [FIGURE 9-a](#) compare l'évolution du déplacement expérimental et numérique hors plan avec les ressorts au centre de la surface non exposée pour un mur en pierre de Tervoux chargé et non chargé. En prenant en compte le système de ressorts les résultats numériques se rapprochent des résultats expérimentaux dans le cas du mur non chargé et nous avons obtenu une différence plus significative entre le mur chargé et non chargé. Cependant, le déplacement hors plan dans le cas du mur chargé est encore surestimé par la modélisation. Cette divergence entre le résultat numérique et expérimental pourrait être réduit en prenant en compte le fluage thermique transitoire.

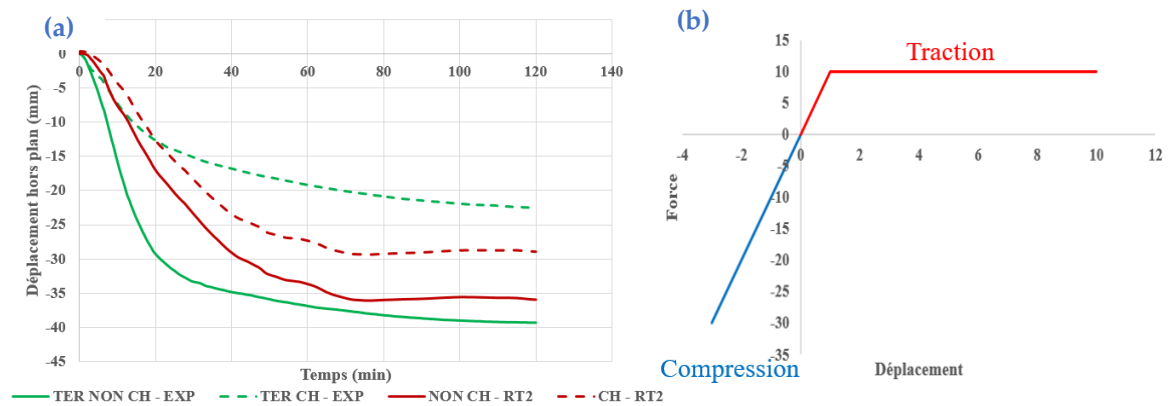


FIGURE 9. (a) Comparaison du déplacement hors plans au centre du mur entre les essais et la modélisation ; (b) Modèle de comportement des ressorts

IV. CONCLUSION

Cette étude approfondit notre compréhension du comportement thermomécanique des murs en pierre calcaire face aux incendies, en combinant des essais expérimentaux à l'échelle 1 et des simulations numériques. La phase expérimentale met en lumière sur l'influence du chargement et, du module de Young des pierres calcaire sur l'amplitude de la déformée thermique. Il est important de noter que l'ensemble des six murs testés ont résisté pendant deux heures de chauffage sans rupture ; seule une dégradation des matériaux due à la température a été observée. De plus, pour l'ensemble des six murs, seulement une partie des déplacements hors plan était réversible, ce qui est une information importante pour le dimensionnement de la capacité portante résiduelle des structures après incendie.

En outre, la modélisation par éléments finis en 3D de mur en maçonnerie souligne l'importance des conditions aux limites lors de l'essai thermique ainsi que des valeurs des propriétés mécaniques en fonction de la température. Nos recherches futures intégreront les interactions entre le mortier et la pierre pour enrichir la compréhension des mécanismes d'endommagement, enrichissant ainsi nos connaissances sur le comportement des maçonneries en pierre en conditions de température élevée.

V. REMERCIEMENT

Les auteurs expriment leur gratitude envers les partenaires du projet POSTFIRE pour les discussions techniques fructueuses, notamment la société ROCAMAT pour avoir fourni les blocs de calcaire et érigé les murs, ainsi que l'équipe du CSTB impliquée dans la réalisation des tests. Des remerciements spéciaux à M. Charuel, M. Cruz et L. Gontier. Nous remercions également l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour son soutien financier, ouvrant la voie à une collaboration

scientifique avec le CY Cergy Université, le CTMNC, ROCAMAT, le LRMH, le CSTB et l'Université d'Orléans.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] S. Russo, F. S. (2013). Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties. *Fire Saf. J.* 55, 69–86.
- [2] Cooke, G. (1988). Thermal bowing and how it affects the design of fire separating constructions. *Fourth Int. Fire Conf. 22–24, March* (pp. pp. 230-236). Church College Cambridge: Interflam 88.
- [3] A. Nadjai, M. O. (2006). Compartment Masonry Walls in Fire. *Fire Technology*, 211-231.
- [4] Lawrence S, G. N. (1987). The fire resistance of masonry walls, an overview. *First Natl Struct Eng Conf Melb*, (pp. pp. 8-26).
- [5] Ingham, J. P. (2009). Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. *Materials Characterization* 60, 700-709.
- [6] Martin Vigroux, J. E.-L. (2021). High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials*.
- [7] Byrne. (1979). Fire resistance of load-bearing masonry walls. *Fire Technology*, 15:180-8.
- [8] Shields T, O. D. (1988). Thermal bowing of a model brickwork panel. *Dublin. Int. Brick/Block Mason. Conf*, (pp. (pp. 846-56)). Dublin.
- [9] Laverty D, N. A. (2000). Modelling of thermo-structural response of concrete masonry walls subjected to fire. *Appl Fire Sci*, pp. 10:3–19.
- [10] Nguyen T-D, M. F. (2012). Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: experimental analysis. *Fire Safty*, pp. 52:55–64.
- [11] 12. Pham, D. T., Donval, E., Pinoteau, N., Pimienta, P., Pallix, D. (2022). Test of loaded and unloaded natural stone masonry walls exposed to fire, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 55/9, November 2022, art. 229
- [12] 13. Donval, É. (2024). Résistance au feu des murs de maçonnerie en pierre naturelle. PhD thesis.
- [13] Gnanakrishnan N, L. R. (1989). Some aspects of the fire performance of single leaf masonry construction . *International Symposium on Fire Engineering for Building Structures and Safety*, 89/16, (pp. pp. 93–99). Melbourne.
- [14] Dhanasekar M, C. V. (1994). A numerical model for thermal bowing of masonry walls. *Tenth Int. Bric kBlock Masonary Conf*. Calgari.
- [15] Nadjai A, O. M. (2003). A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures. *Fire Materails*, 27:163–82.
- [16] Nguyen T-D, M. F. (2014). Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. *Fire Safty*, pp. 66:35–45.
- [17] 18. Pierre Pimienta; Armita Obaie; Elodie Donval; Duc Toan Pham; Albert Noumowe; Javad Eslami; Dashnor Hoxha. (2023). Fire behaviour of limestone masonry during and after fire, *IFireSS 2023 – International Fire Safety Symposium*. Rio de Janeiro, Brazil.
- [18] 20.1, N. D. (2020). *Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – parois et murs*.
- [19] Ayoub Daoudi, J. E.-L. (2024). Experimental characterication of physical, thermaln transport and mechanical properties of 13 French limestones, *Building Engineering*.