

PROJET B2M : RESISTANCE AU FEU DE MACONNERIES EN BRIQUES DE TERRE CRUE

Pimienta P¹, Pestana J¹, Malara A¹, Mazari S¹, Ghalem A¹, Georges N¹, Sakji S¹, Blasone M¹, Touzard I², Crété E²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

² Ecole Nationale Supérieure de l'Architecture de Grenoble (ENSAG)

³ Centre International de la Construction en Terre (CRAterre)

RESUME Cette étude expérimentale, menée dans le cadre du projet B2M soutenu par l'ADEME, porte sur le comportement au feu de murs en maçonnerie de terre crue soumis à des sollicitations thermiques et mécaniques. Quatre types de briques ont été testés. Trois grandes séries d'essais ont été réalisées : des essais mécaniques en compression sur demi-briques et couples de demi-briques jusqu'à 600 °C ; un essai comparatif de résistance au feu sur quatre voiles de 1,40 m × 1,40 m et deux essais de résistance au feu sur des murs porteurs en briques moulées et extrudées. Les résultats ont montré un bon comportement mécanique des briques jusqu'à 600 °C. Les quatre voiles ont satisfait aux critères EI (étanchéité et isolation thermique) pendant deux heures. Les deux murs testés sous chargement ont satisfait aux critères de résistance mécanique, d'étanchéité et d'isolation thermique, obtenant ainsi le classement REI 120. Un phénomène de délaminage partiel a été observé sur l'une des briques après 20 minutes. Les mesures de température ont révélé un gradient thermique marqué dans les briques. Les déformations hors plan sont restées très faibles, bien que le mur en briques extrudées (BTE) ait présenté un déplacement plus important que le mur en briques moulées (BTM). Enfin, les essais post-incendie ont mis en évidence une capacité portante résiduelle supérieure aux attentes.

Mots-clés : terre crue, brique, maçonnerie, haute température, résistance au feu, résistance mécanique

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la construction, les matériaux bio- et géo-sourcés, et en particulier la terre crue, connaissent un regain d'intérêt en raison de leurs avantages environnementaux et de leur potentiel pour des bâtiments durables. Ces matériaux, utilisés depuis des siècles dans des constructions traditionnelles, sont aujourd'hui redécouverts pour leurs propriétés thermiques, acoustiques et leur faible empreinte carbone. Cependant, malgré ces atouts, le comportement au feu de la terre crue, en tant que matériau de construction, reste largement méconnu et a fait l'objet de peu d'expérimentations. Le besoin de satisfaire aux exigences de sécurité incendie, notamment dans certains bâtiments tels que ceux accueillant du public, constitue un frein au développement de son emploi dans la construction.

Le travail de recherche présenté ici est réalisé dans le cadre du projet B2M. Ce projet a été financé par le Gouvernement dans le cadre du plan France 2030 opéré par l'ADEME. Il vise à apporter de nouvelles connaissances sur le comportement au feu des maçonneries en briques de terre crue afin

de mieux intégrer ces matériaux dans des projets de construction tout en garantissant leur sécurité face au feu.

Quatre natures de briques sont étudiées dans le cadre du projet B2M : une brique de terre moulée (BTM), deux de terre comprimée (BTC) et une de terre extrudée (BTE).

Le programme de travail est constitué de 4 principales tâches complémentaires : caractérisation mécanique des briques et des doublets à haute température ; essai de comportement au feu préliminaire sur 4 murets ; essais normalisés de résistance au feu sur 4 murs pour le classement REI et analyse des résultats et établissement d'une Appréciation de laboratoire (APL).

Nous présentons dans cet article les travaux réalisés dans les 3 premières tâches expérimentales.

Les quatre types de briques étudiés sont classés selon leur mode de fabrication. Les désignations, dimensions et compositions des briques et des mortiers sont données dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Désignations, dimensions et compositions des briques et des mortiers

	BTM Moulée	BTE Extrudée	BTCa Compressée artisanale	BTCi Compressée industrielle
Dimensions (L x l x H) (cm)	28,5 x 13,5 x 9	26 x 12,5 x 7,2	29,5 x 14 x 9,5	31,5 x 15 x 9,5
Composition de la brique	Terre argileuse Paille hachée 15 %	Terre limoneuse argileuse Copeaux de bois	Terre argileuse Sable clapicette	Terre Sables
Composition du mortier	Obtenu par ajout de sable à la terre de la brique (1T / 1,5 S)	Obtenu par ajout de sable à la terre de la brique (1T / 2,5 S)	Obtenu par ajout de sable à la terre de la brique (1T / 4 S)	Obtenu par ajout de sable à la terre de la brique (1T / 3 S)

Une illustration de ces briques est présentée dans la figure 1.

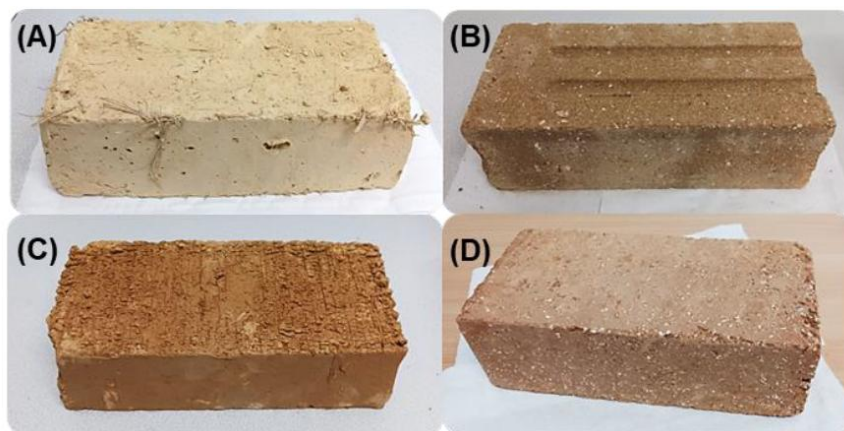


FIGURE 1. Photographies des 4 briques étudiées, BTM (A), BTCi (B), BTE (C) BTCa (D)

II. CARACTERISATION MECANIQUE DES BRIQUES ET DES DOUBLETS A HAUTE TEMPERATURE

Le programme des essais de caractérisation mécanique des briques et des doublets à haute température est présenté dans le tableau 2. Les essais ont été réalisés sur des demi-briques et des doublets de demi-briques (2 demi-briques assemblées avec du mortier). Des photographies d'exemples d'éprouvettes sont présentées dans la figure 2.

En complément des essais précédents, des essais de résistance à la compression résiduelle ont été réalisés sur des demi-briques prélevées sur les quatre murets ayant été exposés à la courbe de température normalisée ISO 834-1 pendant une durée de deux heures. La description détaillée de ces essais sur murets est présentée dans le paragraphe suivant. Les résultats de ces essais de résistance en compression résiduelle figurent dans la dernière ligne du tableau 2, et sont commentés à la fin de ce paragraphe.

TABLEAU 2. Programme des essais de caractérisation mécanique à haute température. Les valeurs (par exemple 4 / 0) désignent respectivement les nombres de briques simples et de doublets testés

Température	BTM	BTE	BTCa	BTCi
20 °C	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2
150 °C	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2
300 °C	2 / 2	2 / 2	2 / 2	4 / 2
600 °C	2 / 2	2 / 2	2 / 2	2 / 2
Après 2 h ISO 834-1	4 / 0 1,3 MPa	4 / 0 3,3 MPa	4 / 0 1,7 MPa	4 / 0 3,2 MPa



FIGURE 2. exemples d'éprouvettes destinées aux essais de caractérisation mécanique à haute température. De gauche à droite : demi-brique avant essai, demi-brique après essai à 300 °C, doublet avant essai, doublet après essai à 300 °C

Les éprouvettes ont été chauffées à des températures cibles de 150 °C, 300 °C et 600 °C à l'aide d'un four électrique, selon une rampe de température lente de 2 °C/min. Ce faible taux de chauffage a été choisi afin d'assurer une homogénéité thermique maximale au sein des éprouvettes et de limiter les gradients thermiques pouvant engendrer des contraintes mécaniques.

Les éprouvettes chauffées à 150 °C et 300 °C ont été testées à chaud, après avoir atteint la température cible et après un palier thermique de 2 heures. En revanche, celles chauffées à 600 °C ont été testées à froid, après un palier de 2 heures suivi d'un refroidissement lent à l'intérieur du four. Cette procédure a été adoptée afin de garantir la sécurité des opérateurs lors de la manipulation des éprouvettes à haute température.

Les figures 3 et 4 présentent respectivement l'évolution des résistances à la compression en fonction de la température d'exposition, mesurées sur des demi-briques et sur des assemblages de deux demi-briques.

À température ambiante (20 °C), les quatre types de briques testés affichent des résistances à la compression comprises entre 1 et 4 MPa. Les résultats montrent des tendances distinctes selon la température d'exposition, ce qui indique que l'effet thermique sur la résistance mécanique dépend de la nature des terres utilisées ainsi que des procédés de fabrication. Il est toutefois notable que, pour l'ensemble des échantillons, les résistances mesurées à 600 °C sont égales ou supérieures à celles obtenues à 20 °C.

L'analyse des essais réalisés sur les doublets confirme ces observations, avec des évolutions générales similaires à celles observées sur les demi-briques.

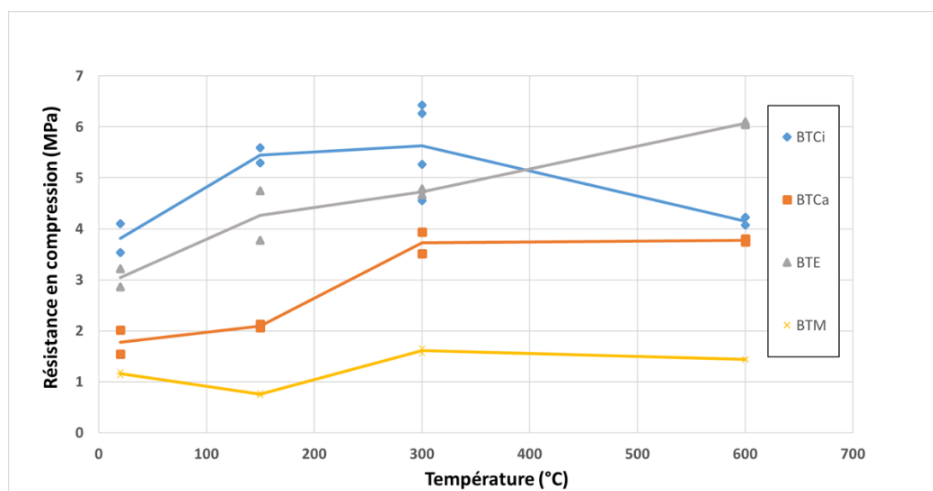


FIGURE 3. Résistances en compression moyennes déterminées sur les demi-briques en fonction des températures d'exposition des éprouvettes

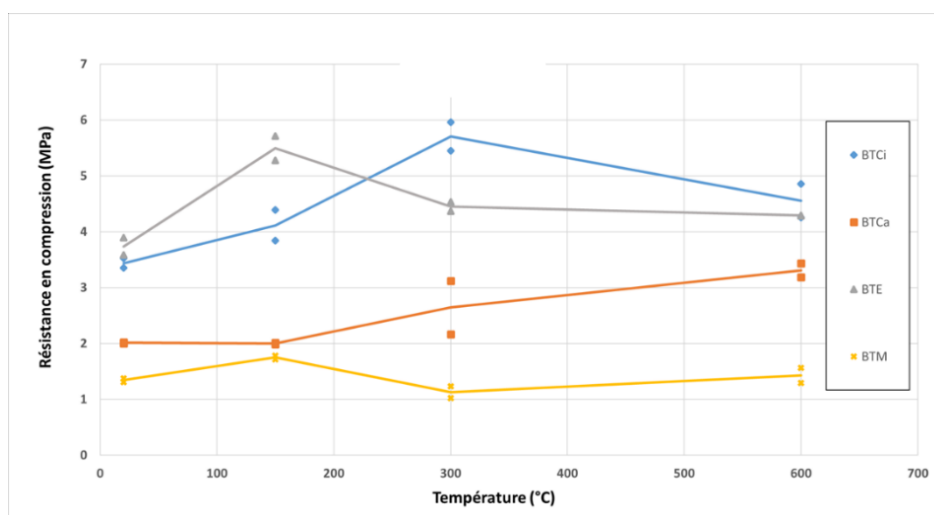


FIGURE 4. Résistances en compression moyennes déterminées sur les doublets de demi-briques en fonction des températures d'exposition des éprouvettes

Cependant, il n'a pas été possible d'établir de relations claires entre le comportement mécanique à haute température et les caractéristiques des matériaux, telles que leur nature, leur composition minéralogique ou leurs propriétés initiales.

La figure 5 (à gauche) présente des photographies de briques extraites des quatre murets ayant été exposés à la courbe de température normalisée ISO 834-1 pendant deux heures. Les températures maximales atteintes en fonction de la profondeur sont indiquées de manière approximative. Des colorations noires et grises sont visibles sur certaines briques, en particulier sur la brique extrudée (BTE). Ces teintes sont attribuées à la carbonisation des matières organiques (fibres végétales, etc.) incorporées dans la terre crue. Par ailleurs, la surface exposée au feu présente une coloration rosée, indiquant la transformation de la terre crue en terre cuite sous l'effet de la température élevée.

La figure (à droite) compare les résistances résiduelles à la compression mesurées sur des demi-briques après exposition à la courbe ISO 834-1 pendant deux heures, avec celles obtenues sur des demi-briques non exposées. Les résultats montrent une légère diminution des résistances après exposition, mais les valeurs restent proches, suggérant une bonne tenue mécanique des matériaux après sollicitation thermique.

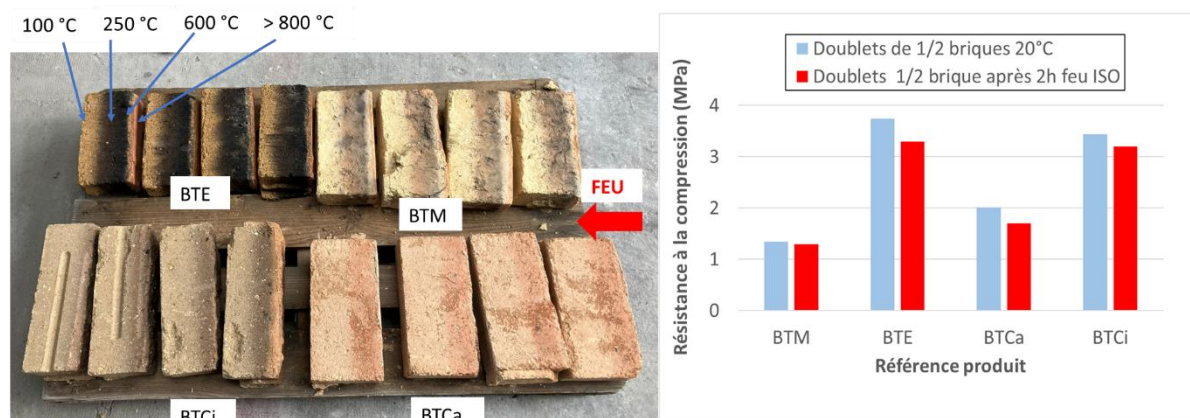


FIGURE 5. À gauche : briques extraites des quatre murets après exposition à la courbe de température normalisée ISO 834-1 pendant deux heures. À droite : résistances à la compression mesurées sur demi-briques à température ambiante et après exposition à la courbe thermique.

III. ESSAI DE COMPORTEMENT AU FEU PRELIMINAIRE SUR 4 MURETS

Un essai de comportement au feu a été réalisé sur quatre murets de 1,4 m x 1,4 m, avec une épaisseur égale à celle des briques. Les murets ont été exposés à la courbe de température ISO 834-1 pendant 2 heures. Cet essai avait pour principal but de permettre une première analyse du comportement des 4 types de maçonneries et l'optimisation du programme d'essai de la phase suivante. Les 4 murets étaient instrumentés de thermocouples avec des points de mesures dans les briques et dans le mortier aux profondeurs, depuis la face exposée, suivantes : 15, 30, 50, 75 et 100 mm. La figure 6 présente les photographies des 4 murets avant et après essai.

Le principal résultat de cet essai est que les 4 murets ont résisté à une exposition au feu pendant 2 heures. L'observation la plus marquante concerne le muret en briques BTCi, sur lequel un

délaminage partiel a été observé (visible en bas à droite de la photographie). Ce phénomène s'est produit après environ 20 minutes d'exposition : une couche de matériau d'environ 4 à 5 cm d'épaisseur s'est détachée et est tombée au pied du muret.

La photographie de droite illustre également la coloration des quatre types de briques après exposition. Des différences nettes dans les profils de coloration sont observées. À la fin de l'essai, des fissures verticales ont été relevées sur les murets :

- BTM : 2 fissures verticales importantes
- BTE : 2 fissures fines
- BTCa : 1 fissure large
- BTCi : 6 fissures, dont 3 larges

Les températures mesurées, qui varient naturellement avec la profondeur, ont montré peu de différences significatives selon la nature des briques. Les températures relevées dans le mortier étaient généralement légèrement inférieures à celles mesurées dans les briques.

Ces résultats ont été complétés par les mesures de déplacement hors plan, qui varient également selon la nature des briques (figure 7). Tous les murets ont présenté un déplacement hors plan modéré orienté vers la source de chaleur. Le muret en briques BTE a montré un déplacement maximal de 22 mm au centre, tandis que les murets en briques BTCa et BTM ont atteint respectivement 13 mm et 12 mm. Le muret en briques BTCi a présenté une évolution rapide du déplacement durant les 20 premières minutes, jusqu'au moment de l'observation du délaminage. Au-delà de cette période, la courbe de déplacement est restée à un niveau relativement bas.

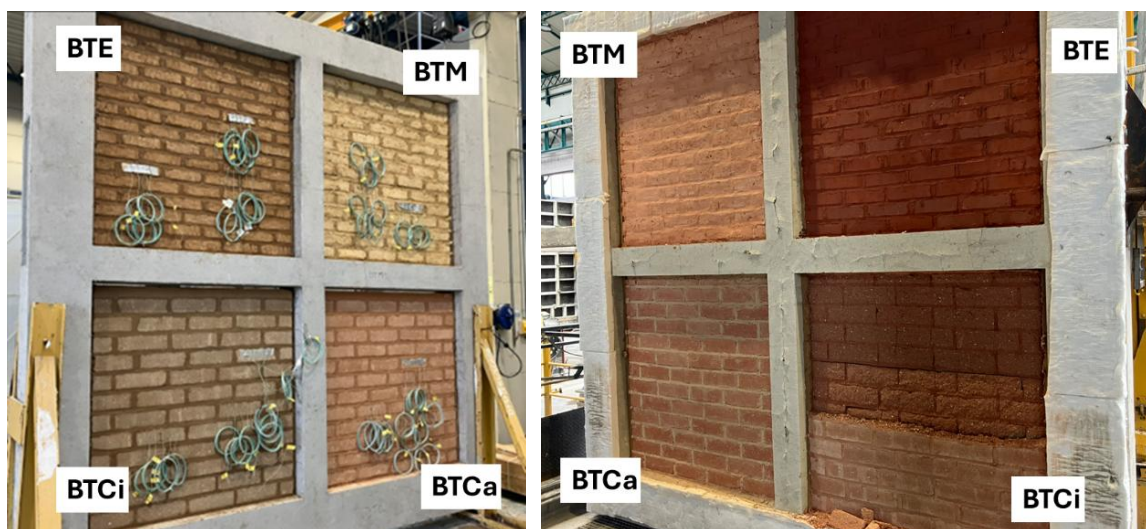


FIGURE 6. Photographies des 4 murets. A gauche : avant essai ; face non exposée au feu avec l'instrumentation des thermocouples. A droite : après 2 heures d'exposition au feu ISO 834-1 ; faces exposées.

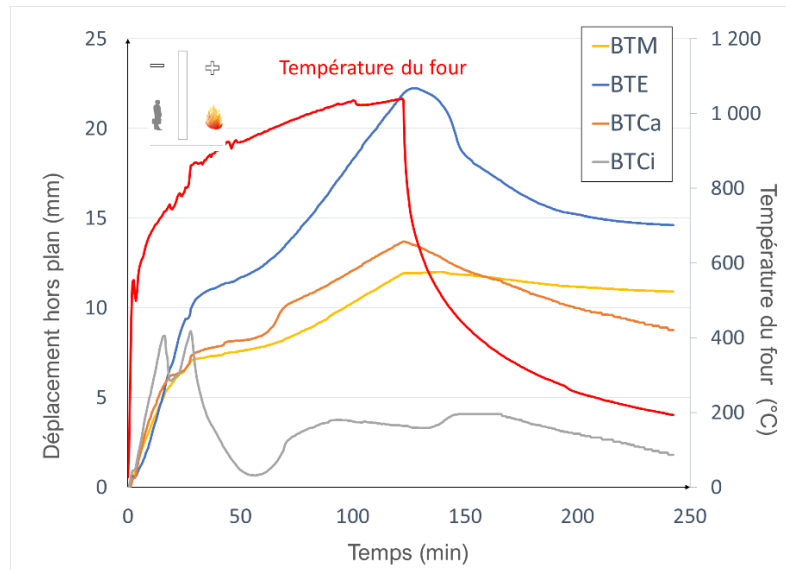


FIGURE 7. Déplacements hors plan en fonction du temps déterminées sur les 4 murets durant les phases de chauffage et de refroidissement.

IV. ESSAIS NORMALISES DE RESISTANCE AU FEU POUR LE CLASSEMENT REI

Les essais normalisés de résistance au feu ont été réalisés sur 2 murs de brique BTM et BTE sur le four Vulcain du CSTB conformément aux normes NF EN 1363-1 (2020) et NF EN 1365-1 (2012) (figure 8).

Le montage des murs a été effectué par une entreprise spécialisée avec un appareillage en flamande (boutisses et panneresses alternées d'un rang à un autre). Un schéma est présenté en figure 9. Ce type d'appareillage a été choisi car il est considéré comme le plus défavorable vis-à-vis de la résistance au feu, représentant ainsi un cas enveloppe pour les autres techniques d'assemblage. Les épaisseurs des 2 murs des briques BTM et BTE ont donc été respectivement de 28,5 cm et 26 cm, correspondant à la longueur des briques.

Le programme des essais et les principaux résultats sont présentés dans le tableau 3.

Les deux murs ont été soumis à un chargement mécanique puis exposés à la courbe de température normalisée ISO 834-1 pendant une durée de deux heures, conformément aux exigences des norme NF EN 1363-1 (2020) et NF EN 1365-1 (2012). Le chargement uniformément réparti sur les 3 mètres linéaires était respectivement de 20,3 tonnes pour le mur BTM et de 41,1 tonnes pour le mur BTE. Le niveau de chargement a été choisi de manière à couvrir les charges typiquement rencontrées dans ce type de construction. À l'issue de cette phase, le chargement mécanique a été retiré, et les mesures de température et de déplacements ont été poursuivis durant toute la phase de refroidissement. Le lendemain des essais, les deux murs ont été de nouveau chargés mécaniquement jusqu'à rupture, afin d'évaluer leur capacité portante résiduelle. Les deux murs ont été conservés pendant au moins deux semaines après l'essai au feu, afin d'observer leur évolution et d'évaluer les éventuels effets différés.

TABLEAU 3. Programme des essais de résistance au feu sur les 2 murs de brique BTM et BTE et principaux résultats

	BTM	BTE
Chargement thermique	ISO 834-1 - 2heures	ISO 834-1 - 2heures
Chargement mécanique appliqué	20,3 tonnes (0,24 MPa)	41,1 tonnes (0,53 MPa)
Classement atteint	REI 120	REI 120
Déplacement hors plan vers le feu	7 mm	19 mm
Capacité portante après essai Feu	102 tonnes (1,2 MPa) Attendu : 75 tonnes	218 tonnes (2,7 MPa) Attendu : 150 tonnes
Observations sur face non exposée	3 grandes fissures vert.	2 grandes fissures vert. 2 moy. fissures vert.
Observations sur face exposée après essai feu et chargement mécanique après refroidissement	Léger écaillage Quelques morceaux de brique se détachent	Pas d'écaillage Quelques morceaux de brique se détachent

L'instrumentation des essais a été renforcée par l'intégration de thermocouples positionnés à différentes profondeurs dans les briques et le mortier. Six séries de 7 thermocouples ont été installées dans les briques, réparties entre les rangs en panneresse et en boutisse. Deux autres séries de 7 thermocouples ont été intégrées dans le mortier. Les thermocouples ont été positionnés aux profondeurs suivantes : 15, 30, 50, 75, 100, mi-épaisseur et 200 mm. Enfin, 8 thermocouples supplémentaires ont été placés sur la face non exposée de l'éprouvette. Au total, 64 thermocouples ont été mis en œuvre : 42 dans les briques, 14 dans le mortier, et 8 sur la face non exposée.

Treize capteurs de type LVDT ont été placés à différents emplacements sur la face non exposée du mur afin de mesurer les déplacements hors du plan (Figure 8). Le déplacement vertical du mur — correspondant à l'écartement entre la poutre supérieure fixe et le cadre en béton en forme de U dans lequel le mur est positionné — a été mesuré à l'aide de deux capteurs à fil, placés de part et d'autre du mur.

Enfin, un enregistrement des observations à l'intérieur du four a été réalisé à l'aide d'une caméra endoscopique. Parallèlement, les champs de température sur la face non exposée ont été suivis en continu à l'aide d'une caméra thermique durant toute la phase de chauffage et le début de la phase de refroidissement.

Les deux essais ont été menés jusqu'à leur terme, avec une exposition de deux heures à la courbe ISO 834-1. Les murs ont satisfait aux critères de résistance mécanique, d'étanchéité aux flammes et d'isolation thermique, permettant leur classement REI 120.

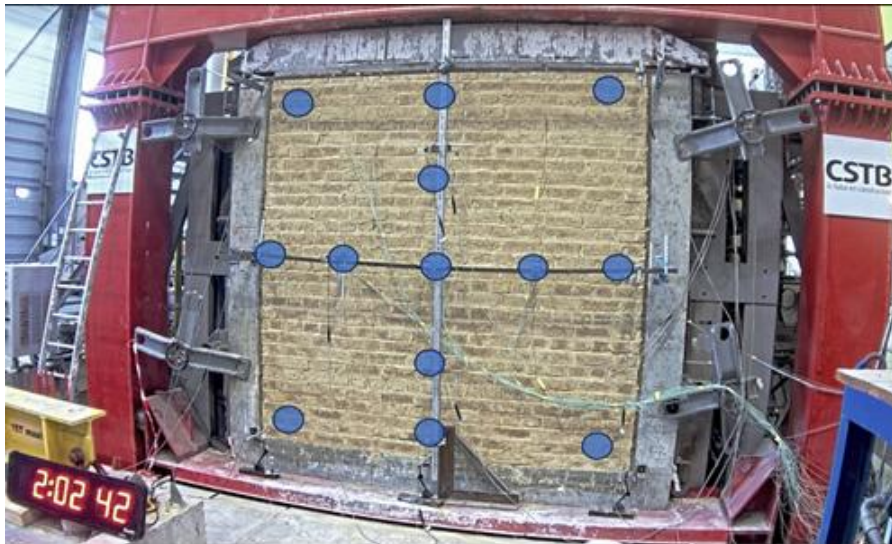


FIGURE 8. La figure montre le mur constitué de briques BTM. Les disques bleus indiquent la position des capteurs de mesure des déplacements hors plan. Les fils des thermocouples, installés à l'intérieur des briques, dans le mortier, ainsi que sur la face non exposée du mur, sont également visibles.

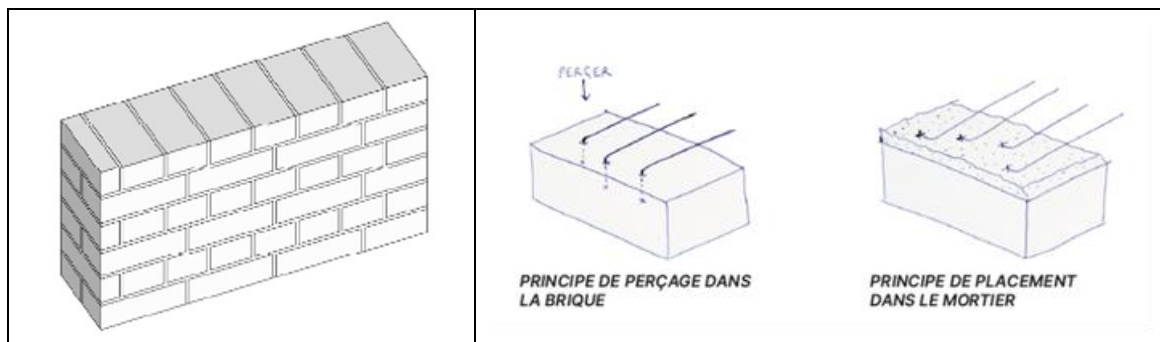


FIGURE 9. À gauche : appareillage en flamande, caractérisé par l'alternance de boutisses et de panneresses d'un rang à l'autre. À droite : schéma d'implantation des thermocouples dans les briques et le mortier, à différentes profondeurs (15, 30, 50, 75, 100, mi-épaisseur et 200 mm).

Aucun écaillage notable n'a été observé durant les essais feu au moyen de la caméra endoscopique. Les chargements mécaniques appliqués après la phase de refroidissement ont permis de constater une capacité portante résiduelle élevée, supérieure à celle attendue (voir Tableau 3).

Au cours de l'essai, des fissures verticales peu nombreuses ont été observées, phénomène courant dans les maçonneries soumises à des sollicitations thermiques. Ces fissures ont également pu être détectées à l'aide de la caméra thermique orientée vers la face non exposée. La figure 10 présente des photographies des faces exposées au feu des deux murs, prises après l'exposition thermique et le chargement jusqu'à rupture. Aucune dégradation significative n'a été observée sur les parements. La figure 11 présente les courbes de température en fonction du temps, mesurées dans les briques du mur BTM à différentes profondeurs (15, 30, 50, 75, 100, milieu et 200 mm). Les styles de courbes permettent de distinguer les mesures effectuées dans les briques montées en panneresse, en boutisse, ainsi que dans le mortier.



FIGURE 10. Photographies des faces exposées au feu des murs en briques BTM (à gauche) et BTE (à droite), après deux heures d'exposition à la courbe de température normalisée ISO 834-1, suivies de la phase de refroidissement et du chargement mécanique jusqu'à rupture.

Après deux heures d'exposition, les températures relevées varient de 860 °C à 15 mm à 50 °C à 200 mm, illustrant le fort gradient thermique au sein de la brique. Les températures mesurées à la profondeur de 15 mm présentent la plus forte dispersion. Ce phénomène, fréquemment observé lors des essais de résistance au feu, est principalement lié à l'incertitude sur la position exacte des thermocouples dans la zone où le gradient thermique est le plus élevé. L'analyse des courbes entre 15 mm et 75 mm montre que les températures dans les briques BTM orientées en panneresse sont généralement légèrement plus élevées que celles observées dans les briques en boutisse et dans le mortier. Aux profondeurs les plus importantes, notamment au-delà de 100 mm, nous observons des plateaux thermiques autour de 100 °C, caractéristiques de la vaporisation de l'eau contenue dans les matériaux. La plupart des mesures effectuées au-delà de 100 mm indiquent que la température de 100 °C est atteinte après environ une heure, puis se maintient jusqu'à la fin de la phase de chauffage, soit deux heures.

La figure 12 permet de comparer les courbes de température en fonction du temps, mesurées dans les briques des murs BTM et BTE à 3 profondeurs (30 mm, 75 mm et 200 mm). Les styles de courbes permettent de distinguer les mesures effectuées dans les briques montées en panneresse et en boutisse. L'analyse montre que, contrairement aux observations réalisées sur le mur BTM, les températures relevées dans les briques du mur BTE ne permettent pas de conclure à une différence significative entre les températures mesurées dans les briques en panneresse et en boutisse. De même, le graphique ne permet pas de conclure à une différence significative de températures mesurées dans les briques du mur BTE et du mur BTM.

La figure 13 présente les déplacements hors plan mesurés au centre des murs en briques BTM et BTE pendant l'exposition à la courbe de température normalisée ISO 834-1. Dans les deux cas, le mur se déforme de façon modérée en direction du feu. Comme observé lors des essais sur les quatre autres murs présentés dans le paragraphe précédent, le mur BTE présente un déplacement plus important que le mur BTM, avec des valeurs respectives de 19 mm et 7 mm.

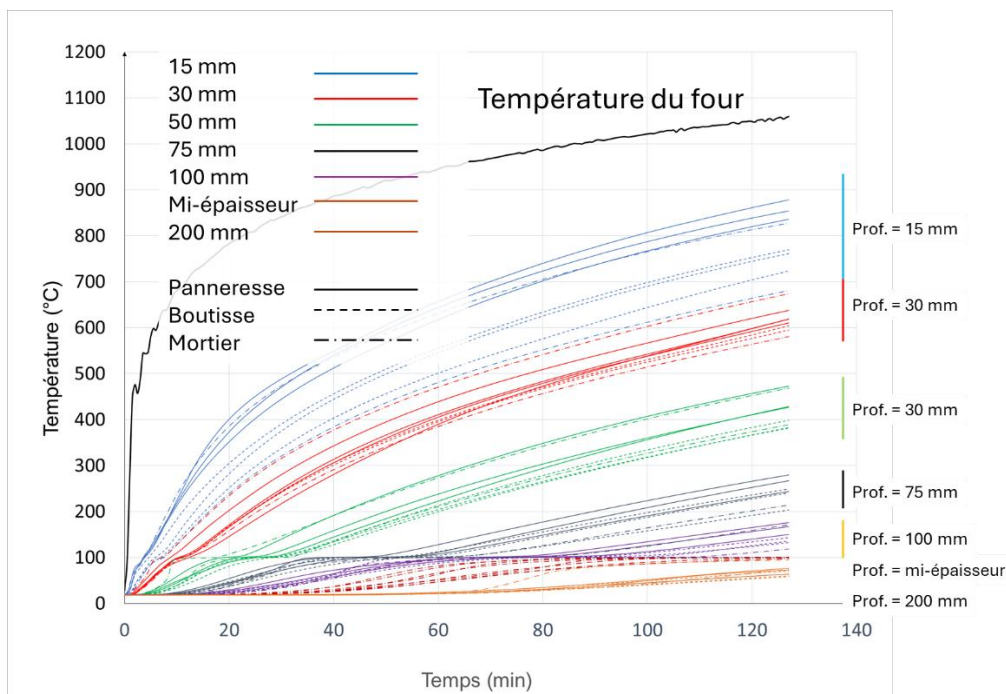


FIGURE 11. Courbes de température en fonction du temps mesurées dans les briques BTM à différentes profondeurs (15, 30, 50, 75, 100, milieu et 200 mm). Les styles de courbes permettent de distinguer les mesures effectuées dans les briques montées en panneresse, en boutisse et dans le mortier.

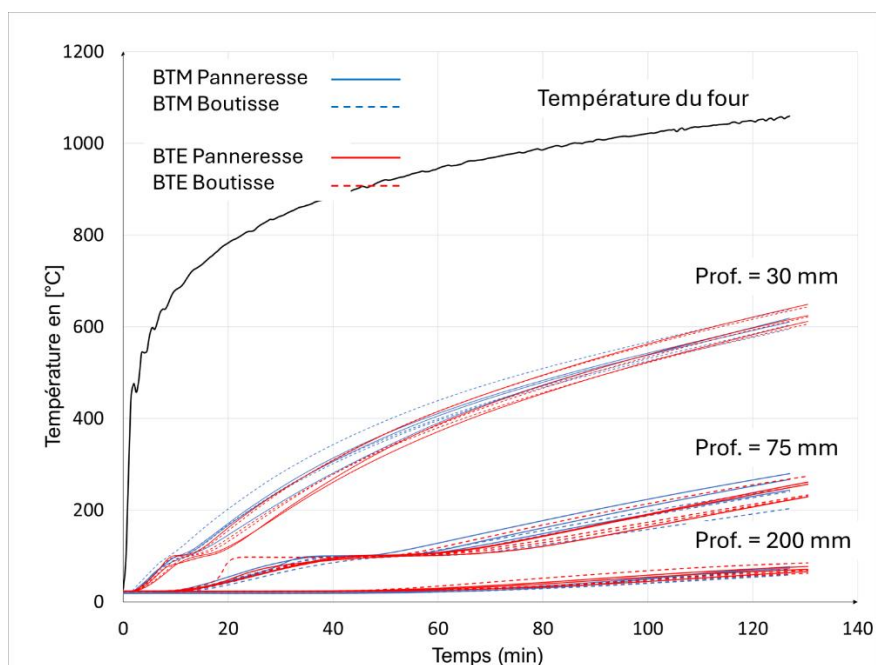


FIGURE 12. Courbes de température en fonction du temps mesurées dans les briques BTM et BTE à deux profondeurs (30, 75 et 200 mm). Les styles de courbes permettent de distinguer les mesures effectuées dans les briques montées en panneresse et en boutisse.

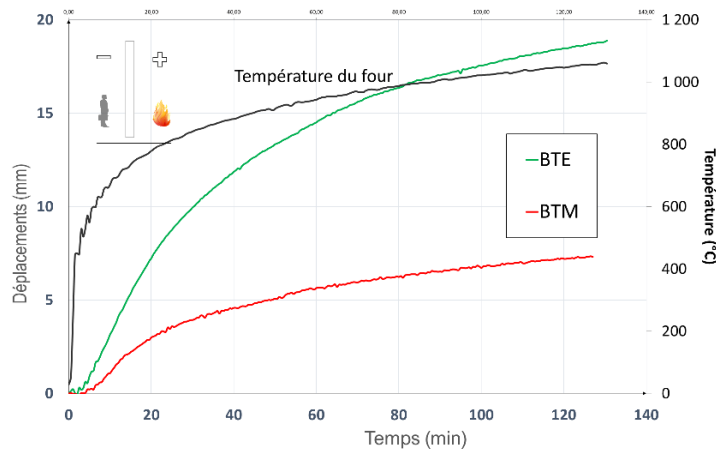


FIGURE 13. Déplacements hors plan mesurés au centre des murs en briques BTM et BTE pendant l'exposition à la courbe de température normalisée ISO 834-1 sur une durée de deux heures. Le mur se déforme en direction du feu.

V. CONCLUSION

Les essais réalisés ont permis de démontrer le bon comportement mécanique des briques en terre crue et de leurs assemblages soumis à des températures allant jusqu'à 600 °C. Ils ont également confirmé le bon comportement global au feu des murets et des murs soumis à la courbe de température ISO 834-1. Une observation particulière a été relevée sur le muret de 1,40 × 1,40 m en BTCi, qui a présenté un phénomène de délaminage partiel après environ 20 minutes d'exposition.

Les trois autres murets ainsi que les deux murs se sont bien comportés. Les deux murs soumis à un chargement mécanique ont satisfait aux critères de résistance mécanique, d'étanchéité aux flammes et d'isolation thermique, permettant leur classement REI 120.

Le comportement thermique des deux murs s'est révélé globalement similaire. En revanche, le mur BTE a présenté une déformation hors plan, bien que modérée, significativement plus importante que le mur BTM. Ceci pourrait également concerner le mur BTCi.

Enfin, les essais de chargement post-incendie ont mis en évidence une capacité portante résiduelle supérieure à celle attendue, confirmant la robustesse structurelle des murs après exposition au feu.

Dans le cadre du projet B2M, deux nouveaux essais de résistance au feu sont prévus en 2026 : un essai sur mur porteur en BTC et un essai sur une cloison non porteuse en BTE. Ces essais permettront de poursuivre l'analyse du comportement au feu des maçonneries de briques de terre crue. Enfin, une Appréciation par le Laboratoire (APL) viendra compléter cette campagne expérimentale.

REFERENCES

AFNOR, NF EN 1363-1, Essais de résistance au feu - Partie 1 : exigences générales, février 2020

AFNOR, NF EN 1365-1, Essais de résistance au feu des éléments porteurs - Partie 1 : murs, Décembre 2012