

# Identification des mécanismes d'endommagement des maçonneries en pierre historique exposées à des températures élevées : de l'échelle du bloc à l'échelle du mur

Victor TADIE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *CY Cergy Paris Université, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, EA4114, F-95000 Cergy-Pontoise, France (victor.ngoudjou-tadie@cyu.fr)*

**RESUME.** La restauration des édifices en pierre calcaire endommagés par le feu constitue un enjeu majeur en raison de l'altération des blocs et des liants anciens. En l'absence de directives spécifiques dans l'Eurocode 6, le projet ANR POSTFIRE, initié après l'incendie de Notre-Dame de Paris, vise à caractériser le comportement thermomécanique résiduel des pierres et mortiers exposés à des températures élevées. Des expérimentations ont été menées sur trois types de pierres (Saint-Leu, Tervoux, Massangis) en réalisant des essais de cisaillement oblique et des essais de compression sur des doublets et des murets afin d'évaluer la stabilité structurelle post-incendie. La corrélation d'images numériques (DIC) et l'émission acoustique (EA) ont été mobilisées pour analyser la distribution des contraintes à l'interface et les mécanismes de rupture sous compression uni-axiale. Par ailleurs, afin d'étudier l'évolution de la tenue mécanique des murets après un chauffage unidirectionnel à 600 °C, des jauges de déformation et des capteurs LVDT ont permis de suivre les déformations thermiques induites par le gradient thermique dans l'épaisseur de la maçonnerie et d'évaluer la dégradation des matériaux constitutifs sous contrainte thermique.

**Mots-clés** Maçonnerie, Interface pierre-mortier, Elévation de température, Courbure thermique, Modes de rupture.

## I. INTRODUCTION

La pierre calcaire est un matériau de construction largement utilisé dans le patrimoine architectural, mais elle se révèle particulièrement vulnérable aux effets des incendies, un phénomène devenu préoccupant ces dernières décennies. En effet sous l'exposition à des températures élevées, elle subit d'importantes transformations physiques et chimiques qui altèrent ses propriétés mécaniques et sa durabilité. L'un des principaux phénomènes observés est la décarbonatation de la calcite, constituant majoritaire de la pierre calcaire, qui commence à se produire au-delà de 700 °C comme montré dans les travaux (Daoudi, 2024). Ce processus entraîne une perte de masse, une diminution des caractéristiques mécaniques ainsi qu'une augmentation de la porosité, compromettant ainsi l'intégrité du matériau. Par ailleurs, les mortiers à base de chaux, couramment employés comme liants dans les maçonneries en pierre, réagissent différemment au feu en fonction de leur composition chimique et de leur âge. De ce fait, l'ampleur des dommages causés par un incendie au sein d'un mur en maçonnerie dépend non seulement des caractéristiques des pierres utilisées, mais aussi du type de mortier, de l'épaisseur des joints et des interactions à l'interface pierre-

mortier (Mohamad, 2007). Cette interface jouant un rôle clé dans la transmission des contraintes et la propagation des fissures, influençant ainsi directement la stabilité structurelle de l'ensemble.

Dans cette étude, une campagne d'essais expérimentaux a été mise en place afin d'identifier les paramètres influençant la dégradation des assemblages pierre-mortier sous différentes conditions thermiques. Trois types de pierres calcaires, présentant des résistances et des porosités distinctes (Saint-Leu, Tervoux et Massangis), ont été sélectionnés afin de représenter une diversité de comportements. L'analyse se concentre sur deux niveaux d'étude : i) une approche à petite échelle permettant d'examiner l'interaction pierre-mortier et son impact sur le mécanisme de rupture, et ii) une approche à l'échelle du muret visant à évaluer la stabilité globale de la maçonnerie après une exposition à des températures élevées. Pour cela, des techniques de contrôle non destructif, telles que la Corrélation d'Image Numérique (DIC) et l'Émission Acoustique (EA), ont été employées afin de caractériser les phénomènes de dégradation avec précision.

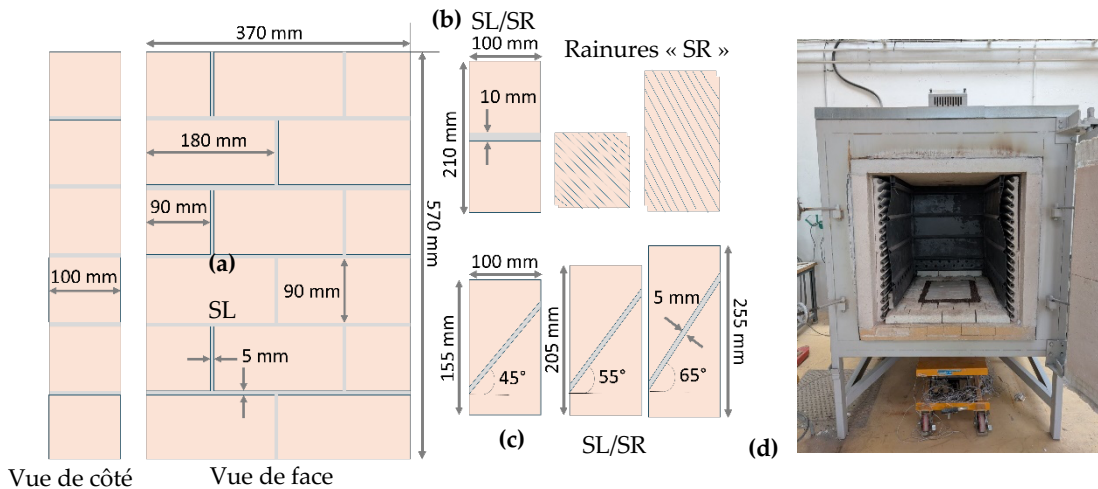
## II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

### A. Description des éprouvettes

Les trois pierres calcaires étudiées Saint Leu (LEU), Tervoux (TER) et Massangis (MAS) ; avec des porosités totales respectives de 40%, 22% et 11 % ; sont largement utilisées dans le patrimoine bâti français. Ces pierres, comme indiqué dans le tableau 1, appartiennent à différentes classes de résistance : la pierre de Saint Leu (LEU) est classée comme pierre tendre, tandis que les pierres de Tervoux (TER) et Massangis (MAS) sont considérées comme pierres fermes et pierres dures respectivement. Le comportement en compression des spécimens assemblés sous forme de doublets et des murets (Figure 1a-b), est étudié à température ambiante et après exposition à différents niveaux de température. Des essais de cisaillement oblique (Figure 1c) ont également été réalisés sur des assemblages pierre-mortier avec des inclinaisons de 45°, 55° et 65° pour déterminer les paramètres contrôlant la résistance au cisaillement de l'interface telles que la cohésion et l'angle de frottement interne suivant le critère de Mohr-Coulomb, et leur évolution sous sollicitations thermiques croissantes. Ces paramètres ont été déterminés conformément à la méthodologie décrite dans les travaux de (Brulin et al., 2020).

Pour améliorer l'adhérence, un traitement de surface a été réalisé avec des gradines en acier adaptées aux pierres tendres et fermes. Ce procédé a permis d'obtenir des rainures d'environ  $\pm 1$  mm de profondeur, espacées de  $\pm 2$  mm. Les éprouvettes à surface lisse seront désignées par l'abréviation SL et celles à surface rainurée par SR. Les rainures n'ont pas été réalisées sur la pierre MAS à cause de sa dureté élevée. Enfin pour cette étude, trois types de mortiers sont formulés selon les recommandations du DTU 20.1 (Tableau 1). Ils sont composés de sable (0-1 mm) et de liants à base de chaux hydraulique naturelle (NHL) ou d'un mélange de ciment et de chaux hydraulique (CEM II + NHL), adapté au type de pierre.

Dans le cadre des essais sur des éprouvettes de doublet et de cisaillement oblique, l'objectif principal est d'établir les tendances d'évolution des propriétés de l'assemblage en fonction de la température. Des essais de chauffage multidirectionnel ont été réalisés avec trois traitements thermiques allant de la température ambiante à 200, 400 et 600°C. Pour ce faire, il est donc essentiel d'assurer l'homogénéité de la température au sein de l'échantillon et de limiter le développement des fissures dues aux gradients thermiques.



**FIGURE 1.** Dimensions (a) des murets, (b) des doublets montés avec des cubes de 100 mm de côté, (c) des éprouvettes pour les essais de cisaillement oblique à différentes inclinaisons et (d) Montage du chauffage unidirectionnel des murets

**TABLEAU 1.** Dosage des mortiers pour 1 m<sup>3</sup> de sable sec (1525 kg) selon DTU20.1

Pierres		Mortiers			
Abrév.	Classe de résistance pierre DTU20.1	NHL 2 (kg)	NHL 3.5 (kg)	CEM II/ 42.5N (kg)	Classe de résistance mortier DTU20.1
LEU	$R_{C\_LEU} = 5 < 10$ MPa	350	0	0	$M_{LEU} = 1,3 < M2,5$
TER	$10 \text{ MPa} < R_{C\_TER} = 24,2 < 40$ MPa	0	250	100	$M_{TER} = 3,7 < M5$
MAS	$R_{C\_MAS} = 78,4 > 40$ MPa	0	250	150	$M_{MAS} = 5,9 < M10$

Les traitements thermiques ont été réalisés à l'aide d'un four électrique Isartel, capable d'atteindre 900 °C. Chaque traitement suit un cycle thermique composé d'une phase de chauffe à un rythme contrôlé de 2 °C/min jusqu'à atteindre la température cible, suivie d'un palier isotherme maintenu pendant deux heures, puis d'une phase finale de refroidissement semi-forcé. En ce qui concerne les murets, une seule face a été soumise au chauffage afin de mieux reproduire les conditions réelles d'un incendie. La face supérieure a ainsi été exposée à des températures élevées, tandis que les faces latérales ont été thermiquement isolées et que la face inférieure est restée en contact avec l'air ambiant (voir Figure 1d). Le protocole thermique appliqué comprend une montée en température à un taux de 10°C/min jusqu'à 600 °C, suivie d'un plateau isotherme de deux heures, puis d'un refroidissement semi-forcé. La température cible de 600 °C a été retenue sur la base des résultats des coefficients de dilatation thermique maximaux observés dans la plage de 573 °C à 600 °C, tels que rapportés dans les travaux de (Daoudi, 2024).

### B. Instrumentation du protocole d'essais

La Corrélation d'Images Numériques (DIC) a été employée pour analyser les champs de déplacement et de déformation sur la surface des éprouvettes de doublets, de cisaillement oblique et de murets. En complément, six transducteurs R15 (150 kHz) ont été utilisés pour surveiller en temps réel les Emissions Acoustiques (EA), détectant ainsi l'initiation et la propagation des fissures sous sollicitation mécanique au sein des éprouvettes. Par ailleurs, des jauges de déformation et des capteurs LVDT ont été placés sur les murets, afin d'enregistrer les variations dimensionnelles des

échantillons au cours des essais thermiques, fournissant des données essentielles sur la réponse des matériaux sous l'effet des gradients de température.

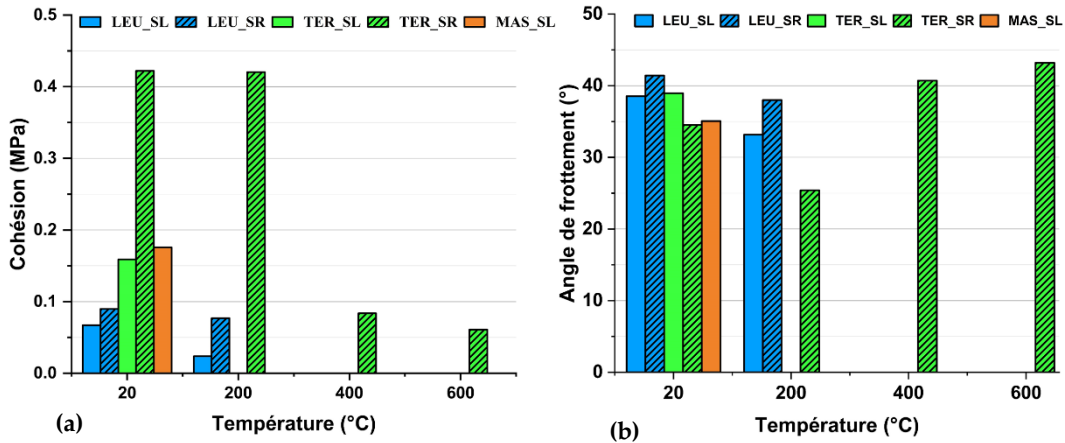
### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Résultats sur les propriétés de l'interface

La Figure 2a présente l'évolution de la cohésion de l'interface pierre-mortier en fonction du type de pierre, du type de rugosité, du type de mortier et de l'élévation de la température. L'analyse des résultats de cette figure, montre que les mortiers hybrides (à base de ciment et NHL3,5) offrent une cohésion initiale plus élevée que les mortiers de chaux pure (NHL2), en raison de leur hydraulité supérieure, favorisant une meilleure adhésion à température ambiante. L'application des rainures améliore significativement la cohésion des assemblages, en particulier avec un mortier hybride. Ce renforcement est attribuable à une meilleure imbrication mécanique entre le mortier et la pierre, retardant ainsi l'apparition du glissement à l'interface. L'effet des rainures est d'autant plus marqué pour la pierre TER, suggérant que les pierres lisses et denses bénéficient davantage d'une structuration géométrique que celles naturellement rugueuses comme LEU. Par ailleurs, l'augmentation de la température entraîne une diminution progressive de la cohésion des assemblages. À 200°C, les doublets TER\_SL et MAS\_SL perdent totalement leur cohésion. Ce phénomène est attribuable au retrait du mortier et de l'expansion de la pierre en fonction de la température, ainsi il se crée une incompatibilité de déformation à l'interface, accentuée par la rigidité des deux éléments. Pour LEU\_SL, la cohésion diminue de 65%, ce qui indique une assez bonne tenue thermique de l'interface par rapport aux pierres plus denses. En revanche, la présence de rainures sur les assemblages TER\_SR et LEU\_SR contribue à une diminution modérée de la cohésion, respectivement de 0,43% et 17% respectivement. À 400°C, La cohésion est nulle pour LEU\_SL et LEU\_SR, ce qui s'explique par les microfissurations intenses du mortier NHL2. Dans le cas des éprouvettes TER\_SR, bien que les rainures permettent de maintenir une bonne cohésion jusqu'à 200°C, leur efficacité diminue gravement à partir de 400°C. En résumé, les rainures améliorent significativement la cohésion à basse et à moyenne température, mais leur impact devient limité à très hautes températures, lorsque l'altération avancée du mortier ne permet plus de garantir une liaison efficace avec la pierre.

La Figure 2b présente l'évolution de l'angle de frottement interne de l'interface pierre-mortier en fonction du type de pierre, du type de rugosité, du type de mortier et de l'élévation de la température. Les résultats montrent que pour toutes les éprouvettes, l'angle de frottement interne apparaît moins sensible à l'élévation thermique que la cohésion. Même lorsque la cohésion devient quasi-nulle, la friction mécanique résiduelle continue d'assurer une certaine résistance au cisaillement. De plus, les rainures exercent un effet limité sur l'angle de frottement. À 20°C et 200°C, les éprouvettes LEU\_SL et LEU\_SR avec des mortiers NHL2 présentent un angle de frottement légèrement plus élevé que les autres pierres avec des mortiers hybrides. Ce constat s'explique par la rugosité naturelle de la pierre LEU, qui offre un meilleur ancrage mécanique du mortier. À 200°C, l'angle de frottement diminue légèrement pour TER\_SR, car le mortier hybride a un comportement fragile à l'interface avec le retrait et limite la friction avec la pierre. À 400°C et 600°C, on observe une augmentation de l'angle de frottement pour TER\_SR. Ce comportement peut s'expliquer par

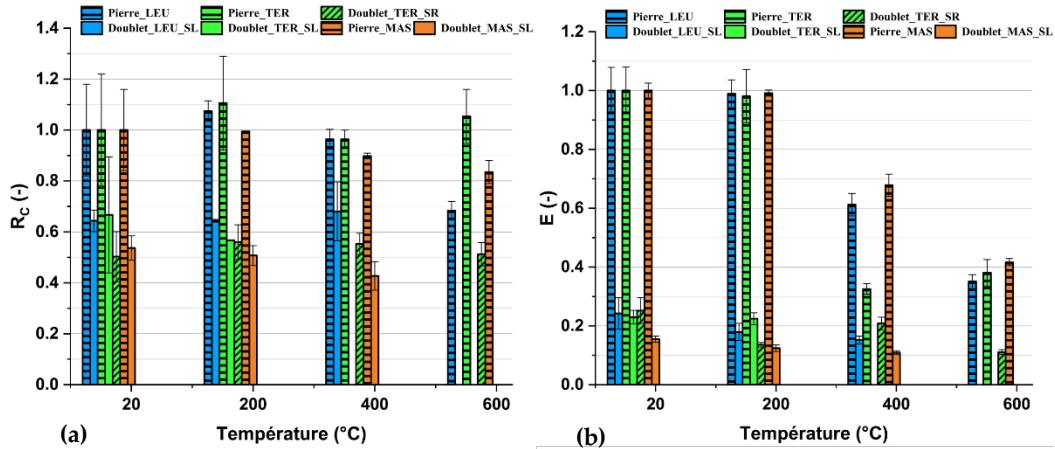
l'endommagement significatif du mortier, qui, en perdant sa cohésion, favorise un contact plus marqué avec les aspérités des rainures. L'interaction mécanique devient alors dominée par des phénomènes de frottement granulaire et d'emboîtement local, qui induisent une augmentation de l'angle de frottement.



**FIGURE 2.** Variations (a) de la cohésion et (b) de l'angle de frottement de l'interface pierre-mortier lors de l'essai de cisaillement oblique en fonction de la température, du type de mortier, du type de pierre et de sa rugosité

#### B. Résultats sur la résistance à la compression et le module statique des doublets

Les Figures 3a et 3b illustrent l'évolution relative de la résistance à la compression et du module d'élasticité des trois pierres étudiées ainsi que de leurs doublets associés, en fonction de la température. Ces grandeurs sont exprimées sous forme normalisée, rapportées aux valeurs de référence obtenues à 20 °C pour chaque type de pierre. Les valeurs de référence utilisées pour la résistance à la compression et le module d'élasticité des pierres seules proviennent des travaux de (Daoudi, 2024). À température ambiante, les résultats montrent que la résistance en compression des doublets atteint 50 à 60 % de celle des pierres, tandis que leur module d'élasticité ne représente que 20 à 30 % de celui des pierres. La chute de résistance des pierres en fonction de la température dépend du type de pierre : environ 30 % pour la pierre tendre, moins de 20 % pour la pierre dure, et presque nulle pour la pierre ferme à 600°C. L'évolution de la résistance des doublets suit une tendance similaire à celle des pierres. La chute du module pour les pierres en fonction de la température est bien plus importante que celle de la résistance. Cette chute atteint des valeurs de 60 à 65 % à 600°C pour les différentes pierres. Cependant, la chute des doublets reste plus modérée que celle des pierres. Une observation importante est la perte d'adhérence partielle des doublets LEU\_SL, TER\_SL et MAS\_SL à 200°C, au niveau de l'interface supérieure entre le bloc supérieur et la surface du joint. Ensuite, la perte d'adhérence devient globale lorsque la température atteint 400°C, ce qui montre qu'après le passage au feu, l'interaction à l'interface est principalement dictée par la friction entre le joint et la pierre. Ces observations soulignent l'influence de la température sur le comportement interfacial, et plus largement sur la stabilité mécanique post-incendie des assemblages.

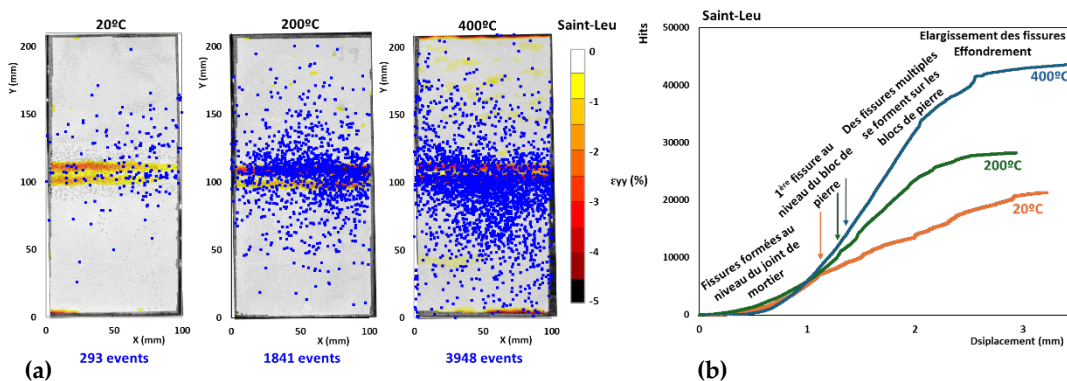


**FIGURE 3.** Variations des propriétés mécaniques des doublets en fonction de la température, du type de pierre et sa rugosité et du type de mortier : (a) Résistance à la compression et (b) Module statique

*C. Mécanismes de rupture des doublets à haute température : Cas de la pierre LEU\_SL*

D’après les précédents résultats, il est retenu que le mécanisme de rupture du doublet à haute température dépend de la pierre, du mortier et de l’interaction à l’interface pierre-mortier. Un scénario d’endommagement de l’assemblage sera maintenant proposé à l’aide de la DIC et des émissions acoustiques EA pour la pierre Saint LEU à surface lisse. Les étapes présentées sont aussi valables pour les autres pierres TER et MAS.

La Figure 4 montre les événements acoustiques détectés par six capteurs, révélant une interaction croissante à l’interface pierre-mortier sous forte sollicitation thermique. Dès 200°C, la cohésion du mortier diminue, laissant place à une interface dominée par la friction plutôt que par l’adhérence. Cette friction est confirmée par l’augmentation des EA autour de l’interface jusqu’à la première fissure verticale de la pierre (voir Figure 5a). Pareillement, la Figure 4b illustre l’augmentation importante des EA du début du chargement jusqu’à l’effondrement du doublet en fonction de la température, montrant que la baisse de la rigidité des éléments accentue le mécanisme de déformation de l’assemblage.

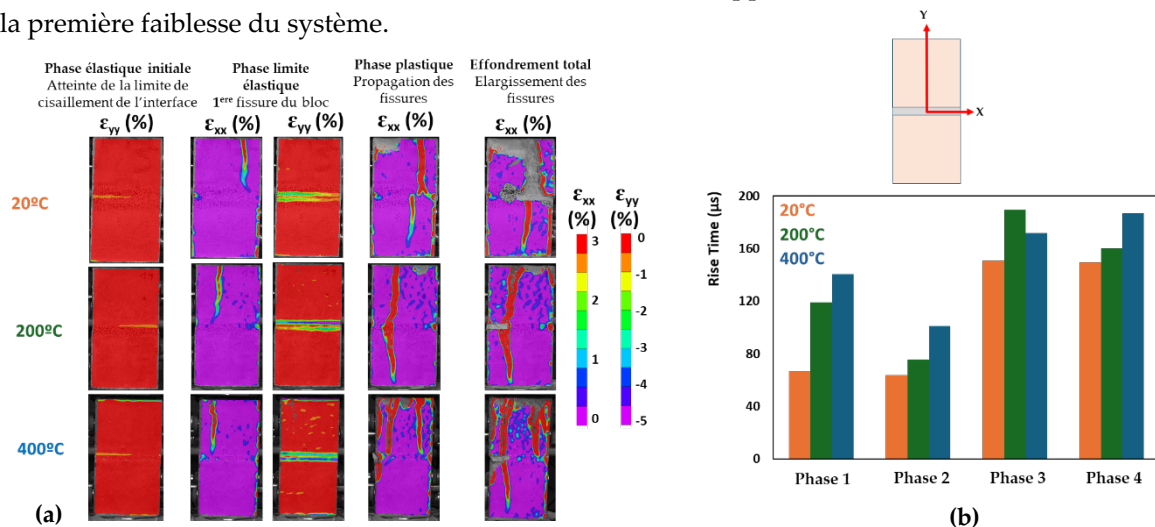


**FIGURE 4.** (a) Evènements acoustiques et (b) EA en fonction de la température (doublets LEU\_SL)

La Figure 5a présente les phases du mécanisme de rupture des doublets LEU\_SL par l’illustration des champs de déformations suivant  $x$  (caractérisant l’ouverture des fissures) et suivant  $y$  à l’aide de la DIC pour chaque exposition de température. La Figure 5b présente le Risetime de chaque

phase à différentes températures. Le Risetime désigne le temps nécessaire à un signal acoustique ou sismique pour passer de son niveau initial à son amplitude maximale. Il reflète ainsi la rapidité avec laquelle l'énergie est libérée lors d'un événement de fracturation. Un Risetime court est généralement associé à une rupture soudaine et localisée, traduisant une libération d'énergie rapide et concentrée. À l'inverse, un Risetime plus long peut indiquer une fracturation plus progressive ou une diffusion de l'énergie sur une zone plus étendue. Cette mesure constitue donc un indicateur pertinent de la dynamique de rupture et, de manière indirecte, de l'énergie de fracturation mise en jeu. La rupture du système pierre-mortier suit un processus en plusieurs phases :

**Phase 1 – Comportement élastique et initiation des fissures :** Lors de l'application de la charge, le bloc et le mortier se déforment initialement de manière élastique et l'assemblage agit comme un matériau homogène. La fissuration commence à l'interface lorsque la contrainte atteint environ 20 à 30% de la résistance maximale. À ce stade, des microfissures apparaissent dans le mortier, révélant la première faiblesse du système.



**FIGURE 5. (a) Phases du mécanisme d'endommagement illustrées par les champs de déformations donnés par la DIC (doublets LEU\_SL) et (b) La valeur moyenne du « Risetime » par phase (en µs)**

De plus, le Risetime montre un temps long pour les spécimens à 200°C et 400°C qui serait lié à la fracturation du mortier altéré et de l'interface. Pourtant à 20°C, le Risetime montre que l'énergie de fracturation a une amplitude moins importante, cela est possible par l'adhérence pierre-mortier (El Jazouli and Tsangouri, 2022).

**Phase 2 – Confinement et initiation de la première fissure :** Le Risetime court, observé pour les trois températures étudiées, correspond à l'achèvement de l'endommagement du mortier. En effet, l'écrasement progressif de ce dernier aboutit à un état ultime de confinement, générant ainsi d'importantes contraintes de traction dans le bloc. En réponse à ces contraintes, une fissure verticale apparaît généralement dans le bloc supérieur, comme observé pour la majorité des éprouvettes (Parent, 2015) (Mohamad, 2007).

**Phase 3 – Propagation des fissures :** La fissure, initialement localisée dans le premier bloc de pierre, se propage progressivement à travers le mortier jusqu'à atteindre le second bloc. Durant cette phase, le Risetime reste pratiquement constant pour l'ensemble des spécimens, ce qui peut s'expliquer par des résistances en compression similaires aux trois températures étudiées, conduisant ainsi à des temps de rupture comparables. En complément, des fissures verticales sont également observées sur les autres faces des doublets, suivant un mode de propagation similaire.

**Phase 4 – Ruine totale de l'assemblage :** L'élargissement progressif des fissures à l'intérieur des blocs de pierre mène inévitablement à l'effondrement global de la structure. L'exposition à des températures élevées accentue ce phénomène en réduisant la capacité du mortier à dissiper les contraintes et en aggravant la fragilisation des blocs de pierre. Le Risetime observé reste comparable à celui de la phase 3, ce qui suggère que le doublet a dépassé sa limite d'élasticité pour entrer dans un régime de déformation plastique permanente, révélateur d'un endommagement irréversible de l'ensemble.

*D. Résultats sur le comportement thermomécanique des murets à hautes températures : Cas de la pierre LEU\_SL*

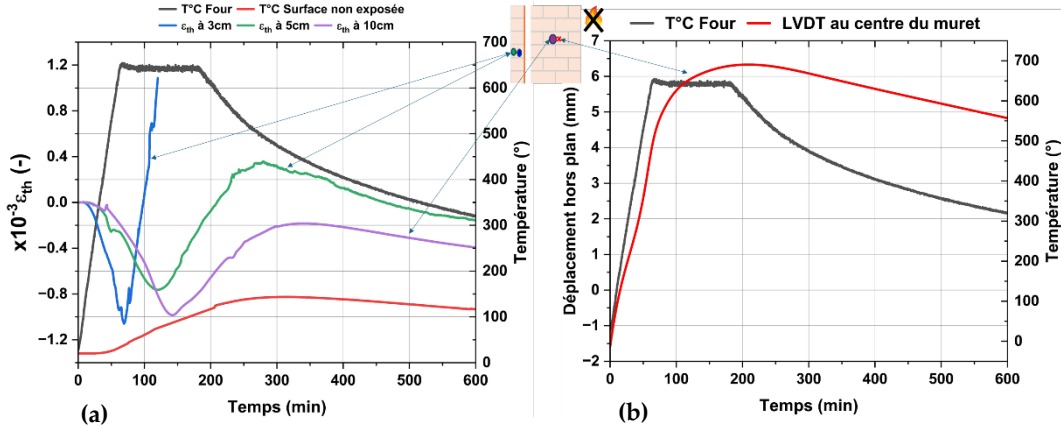
Cette section présente les résultats des essais réalisés sur les murets construits avec la pierre LEU et le mortier NHL2. Trois murets ont été testés au cours de cette campagne expérimentale : deux ont subi un chauffage unidirectionnel jusqu'à 600°C, suivi d'un essai de compression uniaxiale, tandis que le troisième a été soumis directement à un essai de compression à température ambiante.

1. Comportement du muret pendant le chauffage

La figure 6a présente les déformations thermiques mesurées à l'aide de jauges disposées sur la surface latérale d'un muret en pierre LEU, lors d'un cycle de chauffage-refroidissement. Les jauges sont positionnées sur la surface non exposée, ainsi qu'à 3 cm et 5 cm de la face exposée. La jauge située à 3 cm de la face exposée indique un comportement initial contractant dès que la température à la surface atteint environ 150 °C. Cette contraction se poursuit jusqu'à environ 600 °C, puis elle est suivie par une phase de dilatation caractérisée par des déformations positives, traduisant une expansion du matériau. Ce comportement contractant initial peut s'expliquer par l'apparition d'un gradient thermique à travers l'épaisseur du muret. La face exposée à la chaleur se dilate plus fortement que les zones internes plus froides. Ainsi, le différentiel de température génère un champ de contraintes thermomécaniques : la zone chauffée est soumise à une contrainte de compression due à l'opposition des zones plus froides, qui limitent sa libre expansion. Ce comportement est classique pour les matériaux pierreux exposés à un flux thermique unilatéral (Daoudi, 2024). Le comportement dilatant secondaire peut être expliqué par la diffusion de la chaleur et la diminution du gradient thermique dans l'épaisseur du muret au cours du chauffage. Le même comportement a été observé pour les jauges situées à 5 cm et 10 cm de la surface chauffée. La figure 6b montre un déplacement hors plan du muret vers la surface chauffée pendant le chauffage. Ce déplacement hors plan confirme la courbure thermique du muret lors du chauffage, qui est très peu réversible lors du refroidissement (Obaei et al., 2024).

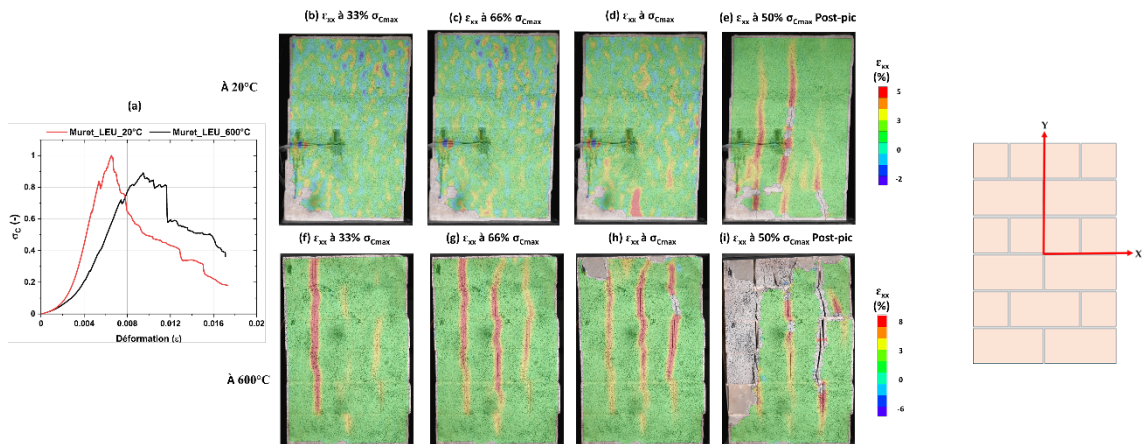
2. Comportement résiduel du muret

La figure 7a montre une chute modérée de la résistance en compression du muret chauffé, d'environ 12 % par rapport à celle du muret sain. En revanche, le muret chauffé se déforme beaucoup plus, avec environ 45 % de déformation supplémentaire au niveau du pic. La figure 7 (b-i) présente le champ de déformation suivant l'axe x, caractérisant l'ouverture des fissures parallèles à la direction de la charge, pendant l'essai de compression uniaxiale du muret LEU\_SL, à température ambiante et après exposition à 600°C, à différents niveaux de contrainte : de 33 % à 66 % avant le pic, au pic, et à 50 % de la contrainte résiduelle.



**FIGURE 6.** (a) Déformation thermique parallèle à la surface chauffée à 3, 5 et 10 cm de celle-ci, ainsi que (b) la déformation hors plan, pour le muret LEU\_SL

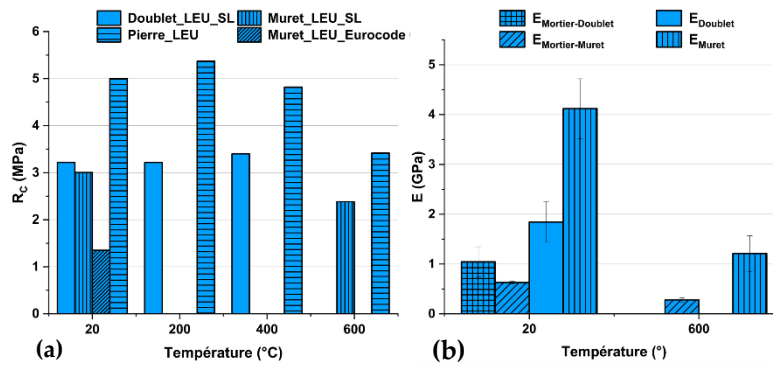
Dans le cas du muret chauffé, des fissures verticales ont été observées à des niveaux de charge très faibles, se propageant à travers le bloc et les joints verticaux sur toute la hauteur du muret au cours du chargement. En revanche, pour le muret non chauffé, les fissures apparaissent au pic de contrainte et se développent en post-pic.



**FIGURE 7.** Mode de rupture sous compression uni-axiale du muret à température ambiante 20°C (b, c, d, e) et celui chauffé à 600°C (f, g, h, i) à différents niveaux de contrainte normalisés par rapport à la contrainte maximale du muret à 20°C (a)

La figure 8a compare la résistance en compression des doublets, des murets et des pierres constitutives de l'assemblage, ainsi que la résistance estimée du muret selon l'Eurocode 6. Avant exposition au chauffage, les résistances mesurées pour le muret et le doublet sont très proches, ce qui montre que les doublets, en tant qu'assemblages simples de maçonnerie, permettent une estimation correcte de la résistance globale. Par ailleurs, une réduction d'environ 40 % de la résistance est observée aussi bien pour le muret que pour le doublet, par rapport à la pierre constitutive des assemblages. L'Eurocode, quant à lui, sous-estime d'environ 50 % la résistance en compression du muret, en raison du coefficient de sécurité inclus dans ses calculs ( $K = 0,45$ ).

La figure 8b compare le module d'élasticité des assemblages (doublet et muret) avec celui de leurs constituants, à savoir la pierre et le mortier. On observe que le module d'élasticité du muret est environ deux fois inférieur à celui de la pierre, mais huit fois supérieur à celui du mortier.



**FIGURE 8. (a) Résistance à la compression des doublets et des murets LEU\_SL testés à différentes températures et celle prédite par l’Eurocode 6 à l’état sain d’un muret LEU\_SL et (b) Module statique des doublets et des murets LEU\_SL testés à 20°C et à 600°C ainsi que des mortiers qui les constituent déterminé par la DIC**

Le module d’élasticité du doublet atteint environ 50 % de celui du muret, probablement en raison de l’épaisseur plus importante du joint de mortier, qui réduit la rigidité de l’ensemble. Toutefois, les résultats mettent en évidence une perte significative de la rigidité avec l’élévation de la température, entraînant une déformation plus importante des assemblages après sollicitation thermique. En effet, la diminution du module d’élasticité à 600 °C est nettement plus marquée que celle de la résistance en compression : une réduction d’environ 50 % pour le mortier du muret et une diminution de 70 % pour le muret.

#### IV. CONCLUSION

Cette étude visait à mettre en évidence l’influence des hautes températures sur les mécanismes d’endommagement des maçonneries en pierre calcaire naturelle. Les résultats ont montré que le comportement au cisaillement de l’interface mortier-pierre est particulièrement sensible à haute température, avec une perte totale de cohésion, notamment pour les pierres fermes et dures, ayant une surface non rugueuse et sans traitement, même à des températures relativement faibles. Les résultats ont également souligné la chute plus importante du module d’élasticité par rapport à la résistance, en fonction de la température. L’analyse conjointe des techniques d’émission acoustique (EA) et de corrélation d’images numériques (DIC) a permis d’identifier les mécanismes de fissuration et de mieux comprendre l’interaction pierre-mortier en situation de sollicitation thermique élevée. Les mesures de déformation sur les murets ont permis d’éclairer le comportement à chaud, mettant en évidence la courbure thermique des maçonneries. Enfin, les résultats ont permis d’évaluer les performances mécaniques des maçonneries à partir des propriétés des pierres et des mortiers qui les composent, ainsi que l’influence de la température sur le comportement résiduel de la maçonnerie, notamment en ce qui concerne le schéma de fissuration.

#### REFERENCES

- Bruhin, J., Blond, E., de Bilbao, E., Rezik, A., Landreau, M., Gasser, A., Colleville, Y., 2020. Methodology for brick/mortar interface strength characterization at high temperature. *Constr. Build. Mater.* 265, 120565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120565>

- Daoudi, A., 2024. Comportement expérimental multi-échelle de la maçonnerie en pierre calcaire des monuments historiques exposée à des températures élevées (These de doctorat). CY Cergy Paris Université.
- El Jazouli, B., Tsangouri, E., 2022. Fire-exposed stones in constructions: Residual strength, performance loss and damage mode shift due to mineralogical transformation and micro-cracking. *Eng. Geol.* 302, 106638. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106638>
- Mohamad, G., 2007. Triaxial compression tests on bedding mortar samples looking at confinement effect analysis.
- Obaei, A., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Hoxha, D., Noumowe, A., Pimienta, P., Pham, D.T., 2024. Étude du Comportement Thermomécanique des Murs en Maçonneries de Pierres Calcaires. *Acad. J. Civ. Eng.* 42, 607–618. <https://doi.org/10.26168/ajce.42.1.53>
- Parent, T., 2015. Méthodologie de Diagnostic de Structures Maçonnées Anciennes. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2448.5202>