



## PROJET POSTFIRE :

### STABILITE ET PRESERVATION DES BATIMENTS DU PATRIMOINE CULTUREL EN MAÇONNERIE DE PIERRE APRES INCENDIE

#### LIVRABLE DE SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS

**CTMNC**  
MATERIAUX NATURELS DE CONSTRUCTION

**CY** L2MGC  
laboratoire de mécanique  
et matériaux du génie civil

 **POLYCOR**  
PIERRE NATURELLE

**CSTB**  
le futur en construction

**CY** CERGY PARIS  
UNIVERSITÉ

1970-2020  
**LRMH**  
Laboratoire  
de Recherche  
des Monuments  
Historiques

  
Université  
d'ORLÉANS

 **LaMé**  
Laboratoire de Mécanique  
Gabriel Lamé

---

Pour citer ce document / [To cite this document :](#)

**M. Vigroux et al. (2025)**, « *Livrable de synthèse et recommandations : Stabilité et préservation des bâtiments du patrimoine culturel en maçonnerie de pierre après incendie* », Technical report (in french), ANR project POSTFIRE (ANR-20-CE22-0012), version n°1 – may 2025, p.40

# SOMMAIRE :

<b>Préambule .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. La maçonnerie en pierre naturelle comme sujet d'étude : un matériau historique et contemporain .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Une approche expérimentale à différentes échelles, couplée à de la modélisation numérique .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Contribution au diagnostic post-incendie d'un ouvrage maçonné en pierre calcaire .....</b>	<b>22</b>
<b>5. L'apport de ces résultats vis-à-vis de la normalisation européenne et de la réglementation incendie applicable en France .....</b>	<b>28</b>
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>36</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>37</b>

# PREAMBULE

Initié en décembre 2020, ce projet de recherche collaboratif s'inscrit dans le cadre du programme **ANR – POSTFIRE** (2020-2024), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et coordonné par le Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) de CY Cergy Paris Université (**CYU**).

Intitulé « *Stabilité et préservation des bâtiments du patrimoine culturel en maçonnerie de pierre après incendie* », le projet POSTFIRE est mené en partenariat avec divers acteurs publics et privés tels que le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (**CTMNC**), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (**CSTB**), et POLYCOR FRANCE (**ROCAMAT**), industriel et leader mondial en fourniture de pierre naturelle. Le projet implique également des institutions publiques comme le laboratoire *LaMé* de l'Université d'Orléans (**UO**) et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (**LRMH**), sous l'égide du ministère de la Culture.

L'objectif de POSTFIRE est d'étudier le comportement des pierres naturelles de construction et des ouvrages de maçonnerie en pierre calcaire exposés à des températures élevées, afin de formuler des recommandations sur l'utilisation de ces pierres et des mortiers de montage associés, ainsi que sur l'évaluation post-incendie d'ouvrage maçonné en pierre calcaire. Par ailleurs, les résultats de l'étude pourront contribuer à la normalisation européenne, et apporter des réponses à la réglementation incendie applicable en France. Pour cela, le projet adopte une approche couplée expérimentation / modélisation multi-échelle. Ces recherches ont été menées au sein de quatre laboratoires : principalement au L2MGC, mais également au sein du CSTB, du CTMNC, et du LRMH.

Acronyme du projet :	<b>POSTFIRE</b>	
Titre du projet (FR) :	Stabilité et préservation des bâtiments du patrimoine culturel en maçonnerie de pierre après incendie	
<i>Project title</i> (ENG) :	<i>Safety and preservation of cultural heritage stone masonry buildings after fire events</i>	
Axe :	CE22 - Sociétés urbaines, territoires, constructions et mobilité	
Référence ANR :	ANR-20-CE22-0012	
Date :	décembre 2020 - janvier 2025	
Pilote du projet :	CYU Cergy Paris Université	<a href="https://www.cyu.fr/">https://www.cyu.fr/</a>
	CTMNC	<a href="https://www.ctmnc.fr/">https://www.ctmnc.fr/</a>
	CSTB	<a href="https://www.cstb.fr/">https://www.cstb.fr/</a>
Partenaires :	POLYCOR FRANCE (ROCAMAT)	<a href="https://www.polycor.com/">https://www.polycor.com/</a>
	LRMH	<a href="https://www.lrmh.fr/">https://www.lrmh.fr/</a>
	Université d'Orléans	<a href="https://www.univ-orleans.fr/">https://www.univ-orleans.fr/</a>

# 1. INTRODUCTION

---

## **Le contexte.**

Parmi les diverses sollicitations accidentelles auxquelles sont exposés les bâtiments et les activités humaines qui s'y déroulent, l'incendie reste l'un des sinistres les plus redoutables. En effet, le nombre d'incendies touchant les monuments historiques et les bâtiments contemporains en maçonnerie de pierre ne cesse de croître. L'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris en 2019, gravé dans les mémoires, illustre la vulnérabilité des monuments historiques en maçonnerie de pierre face au feu. D'autres sinistres, tels que celui de l'hôtel de Seignelay en février 2022 et, plus récemment, celui de l'ancienne bourse de Copenhague en 2024, soulignent également la nécessité de mieux comprendre les conséquences des incendies sur les bâtiments en pierre. Le manque d'études scientifiques approfondies sur la résistance au feu et la durabilité post-incendie des matériaux de maçonnerie rend en effet difficile l'évaluation de l'état post-incendie des bâtiments en pierre et des dégradations qui en découlent. Par ailleurs, la pierre naturelle, en tant que matériau bas carbone, est de plus en plus utilisée dans la construction neuve. Cependant, aucune recommandation relative au dimensionnement au feu des bâtiments en pierre naturelle n'existe actuellement dans les normes, notamment dans l'Eurocode 6, ce qui freine l'utilisation de ce matériau dans les projets de construction. Ce projet de recherche s'inscrit donc dans une démarche globale de compréhension et de préservation des bâtiments en maçonnerie de pierre calcaire face au risque d'incendie.

## **La problématique.**

La compréhension du comportement de la maçonnerie en pierre soumise à des températures élevées soulève des questions tant à l'échelle des matériaux constitutifs qu'au niveau de la structure. Dans la littérature, les études sur le comportement des pierres à hautes températures sont principalement orientées vers des applications géologiques, se concentrant souvent sur des roches présentes en profondeur et de résistance mécanique très élevée. De plus, les mécanismes de dégradation des roches étudiées dans un contexte géologique sont souvent extrapolés aux pierres utilisées en maçonnerie pour la construction et la restauration, sans prendre en compte leurs spécificités. En outre, peu d'études se penchent sur le comportement des mortiers requis pour la maçonnerie en pierre à hautes températures. Par ailleurs, la réglementation relative à la résistance au feu de la maçonnerie en pierre est un sujet d'actualité, d'autant plus que cette technique connaît un regain d'intérêt dans la construction contemporaine en raison de ses qualités architecturales et environnementales. Cependant, le manque de données suffisantes sur les propriétés à haute température des matériaux constituant la maçonnerie en pierre, comme la pierre elle-même et le mortier de chaux, freine le développement de cette technique et complique son dimensionnement en matière de résistance au feu. Afin d'approfondir la compréhension et faciliter le diagnostic de l'état d'altération des bâtiments en pierre après un incendie, ce projet de recherche s'articule autour des problématiques suivantes : quels sont les mécanismes d'altération à hautes températures de la maçonnerie en pierre ? Quels paramètres influencent le comportement de

la maçonnerie en pierre à haute température, tant au niveau des matériaux constitutifs qu'au niveau structurel ? Quelle est la contribution de chaque paramètre à l'endommagement de la maçonnerie en pierre à haute température ? Comment les propriétés intrinsèques des matériaux (pierre et mortier) influencent-elles le comportement structurel de la maçonnerie en pierre sous haute température ? Dans une optique de dimensionnement au feu, quelle différence existe-t-il entre les performances mécaniques résiduelles de la pierre et celles mesurées à chaud ?

## **Les objectifs fixés.**

Ce projet de recherche a pour objectif d'étudier le comportement multi-échelle de la maçonnerie en pierre calcaire à haute température. Les objectifs incluent, dans un premier temps, l'identification et la quantification expérimentale des mécanismes d'altération de treize variétés de pierre calcaire française soumises à haute température. Cela implique une caractérisation mécanique approfondie (à chaud et en résiduel) à l'échelle du matériau, associée à des analyses pétrophysiques, minéralogiques, thermochimiques et thermoélastiques, portant aussi bien sur la pierre calcaire que sur le mortier de montage. Dans un second temps, ces recherches visent à étudier les paramètres favorisant l'endommagement thermique d'éléments de plus grande dimension, tels que des blocs et des maquettes structurales, en simulant un incendie par un chauffage unidirectionnel avec une montée rapide en température. Des modélisations numériques viendront compléter les essais expérimentaux et s'efforceront de reproduire le comportement observé. En raison de la diversité des pierres sélectionnées dans ce projet, on s'attend à produire des données essentielles pour le dimensionnement au feu de la maçonnerie en pierre ainsi que des paramètres de conception pour ses éléments constitutifs. En conclusion, ces résultats constitueront une base de données étendue pour le dimensionnement au feu des bâtiments en maçonnerie de pierre et permettront de formuler des recommandations pour l'évaluation post-incendie du patrimoine bâti. De plus, les résultats de l'étude pourront contribuer à la normalisation européenne, et apporter des réponses à la réglementation incendie applicable en France. Enfin, un objectif pédagogique est attendu à travers la dissémination dans le milieu académique des connaissances acquises au cours du projet, à travers des colloques, conférences, articles scientifiques et enseignement à l'université.

## **A qui est destiné ce guide ?**

Ce guide est destiné aux principaux acteurs de la construction :

- Carriers et producteurs / transformateurs de pierre naturelle ;
- Architectes œuvrant dans des projets en pierre naturelle ;
- Maîtres d'œuvre ;
- Maîtres d'ouvrage ;
- Bureaux d'étude spécialisés ;
- Enseignants / chercheurs universitaires ;
- Entreprises applicatrices ;
- Contrôleurs techniques.

## 2. LA MAÇONNERIE EN PIERRE NATURELLE COMME SUJET D'ETUDE : UN MATERIAU HISTORIQUE ET CONTEMPORAIN

---

### Quelles sont les pierres étudiées au cours de ce projet ?

Dans ce projet de recherche, treize pierres calcaires aux caractéristiques diverses et variées ont été sélectionnées. Issues de carrières françaises en activité, ces pierres ont historiquement servi de matériau de construction pour de nombreux monuments et continuent d'être employées dans la restauration du patrimoine bâti ainsi que dans des projets de construction contemporaine.

Le choix de pierres exclusivement calcaires dans cette étude s'explique par leur forte présence dans le paysage français et leur usage courant et répandue en maçonnerie, tant pour les monuments historiques que dans des réalisations actuelles. En effet, parmi les exploitations de roches ornementales et de construction en France, les carrières de pierres calcaires représentent plus de la moitié des sites autorisés, loin devant celles de granites, schistes, marbres et grès. Par ailleurs, cette sélection de treize pierres calcaires offre une représentativité étendue en termes de propriétés intrinsèques : physiques, mécaniques, de transfert thermique et hydrique, de composition minéralogique, et de caractéristiques microstructurales. Ainsi, les trois classes de résistance mécanique définies par la norme NF DTU 20.1 (pierres tendres, fermes et durs) sont représentées dans cette sélection. De plus, la sélection des pierres a aussi été guidée par l'expertise des différents partenaires du projet, et s'explique également par des études antérieures menées au sein du L2MGC (thèse de Charlotte Walbert <sup>(1)</sup> en 2015, suivi de la thèse de Martin Vigroux <sup>(2)</sup> en 2020).

Parmi ces treize pierres [cf. **Figure 1**], sept sont des calcaires lutétiens et proviennent du Bassin parisien. La pierre de *Saint-Vaast*, la pierre de *Saint-Leu*, et la pierre *Sébastopol Construction* sont toutes trois extraites de la carrière de Saint-Vaast-lès-Mello, dans l'Oise. Les pierres de *Saint-Maximin Ferme Construction*, et *Saint-Maximin Franche Construction* proviennent de la carrière de Saint-Maximin « Bosquet de l'Ange » tandis que la pierre *Liais de Saint-Maximin Verbois* est associée à la carrière de Saint-Maximin « Le vieux Moulin, Verbois ». La pierre de la *Croix-Huyart*, d'aspect beige-orangé, est issue d'une carrière située à Bonneuil-en-Valois, également dans l'Oise. Les six autres pierres calcaires trouvent leur origine dans des régions hors Île-de-France. La pierre de *Tuffeau*, à fond blanc, est extraite de Marigny-Brizay alors que la pierre de *Savonnières* est originaire de Juvigny-en-Perthois dans la Meuse. La pierre de *Tervoux*, d'aspect crème uni, est issue de Chasseneuil-en-Poitou dans la Vienne. La pierre d'*Euville* provient de la commune d'Euville, tandis que la pierre de *Lens*, dotée d'un fond blanc crème, est extraite de la carrière de Moulézon dans le Gard. Enfin, la pierre de *Massangis*, à fond beige clair, est issue de la carrière de Massangis, à Val d'Arion dans l'Yonne.

Les faciès de Saint-Maximin, grâce à leur large éventail de résistances mécaniques associé à des grains différents, ont été employés dans divers édifices parisiens tels que le Louvre, l'Hôtel des Invalides, le Palais de l'Élysée, ainsi qu'à l'international, notamment pour l'Université de

Stanford en Californie. La Cathédrale de Nantes, partiellement détruite par un incendie en 2020, est en grande partie construite en pierre de Tuffeau. La pierre calcaire de Savonnières a largement contribué aux constructions anciennes de la Meuse, et la pierre de Lens à l'édification de monuments romains du Gard, dont la Maison Carrée de Nîmes en est un bel exemple. Enfin, la pierre de Massangis est renommée pour son utilisation dans des édifices parisiens tels que le musée de l'Art Moderne, le Palais de Chaillot, ainsi que le parvis de la tour Eiffel.

---














<sup>1</sup> **Note** : Charlotte Walbert, « *Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2015.

Accessible à l'adresse suivante : [<https://theses.fr/api/v1/document/2015CERG0779>]

<sup>2</sup> **Note** : Martin Vigroux, « *Influence de la microstructure et de la minéralogie sur l'endommagement mécanique des pierres du patrimoine bâti sous l'effet de conditions environnementales sévères* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2020.

Accessible à l'adresse suivante : [<https://theses.fr/api/v1/document/2020CYUN1081>]

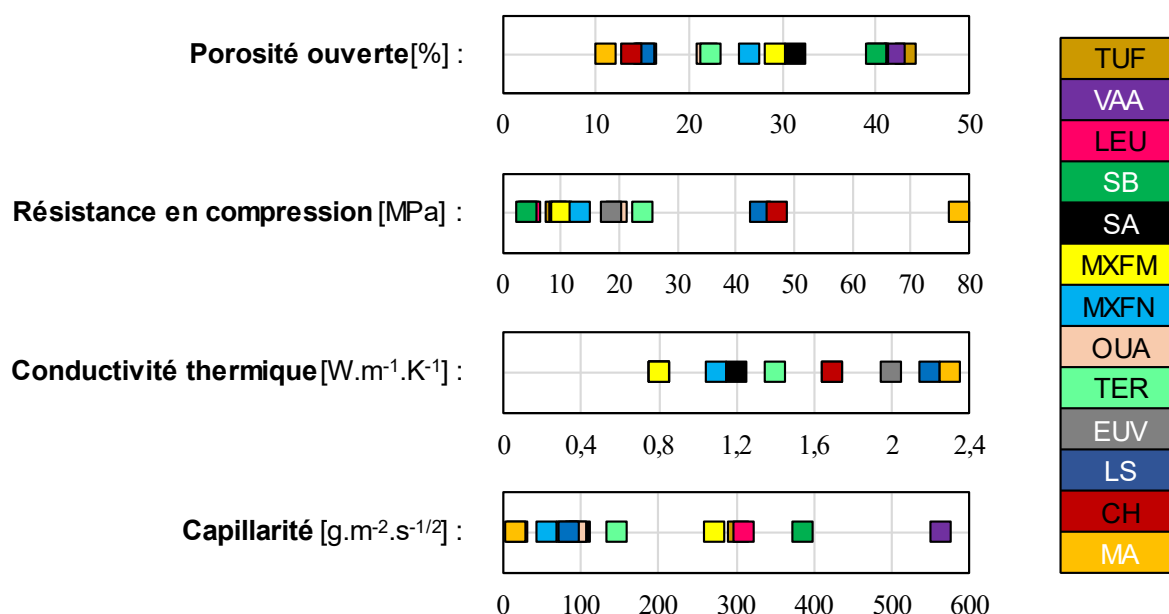


Classe de résistance mécanique	Dénomination commerciale	Provenance		Nomenclature	
Tendre	Tuffeau	Marigny-Brizay (Vienne)		TUF	
	Saint-Vaast fin	Saint-Vaast-lès-Mello (Oise)		VAA	
	Saint-Leu			LEU	
	Sébastopol Construction			SB	
Ferme	Savonnières	Juvigny-en-Perthois (Meuse)		SA	
	Saint-Maximin Ferme Construction	Saint-Maximin (Oise)		MXFM	
	Saint-Maximin Franche Construction			MXFN	
	Liais de Saint-Maximin			OUA	
	Tervoux	Chasseneuil-en-Poitou (Vienne)		TER	
	Euville classique	Euville (Meuse)		EUV	
Dure	Lens	Moulézon (Gard)		LS	
	Croix Huyart	Bonneuil-en-Valois (Oise)		CH	
	Massangis Beige Clair	Massangis (Yonne)		MA	

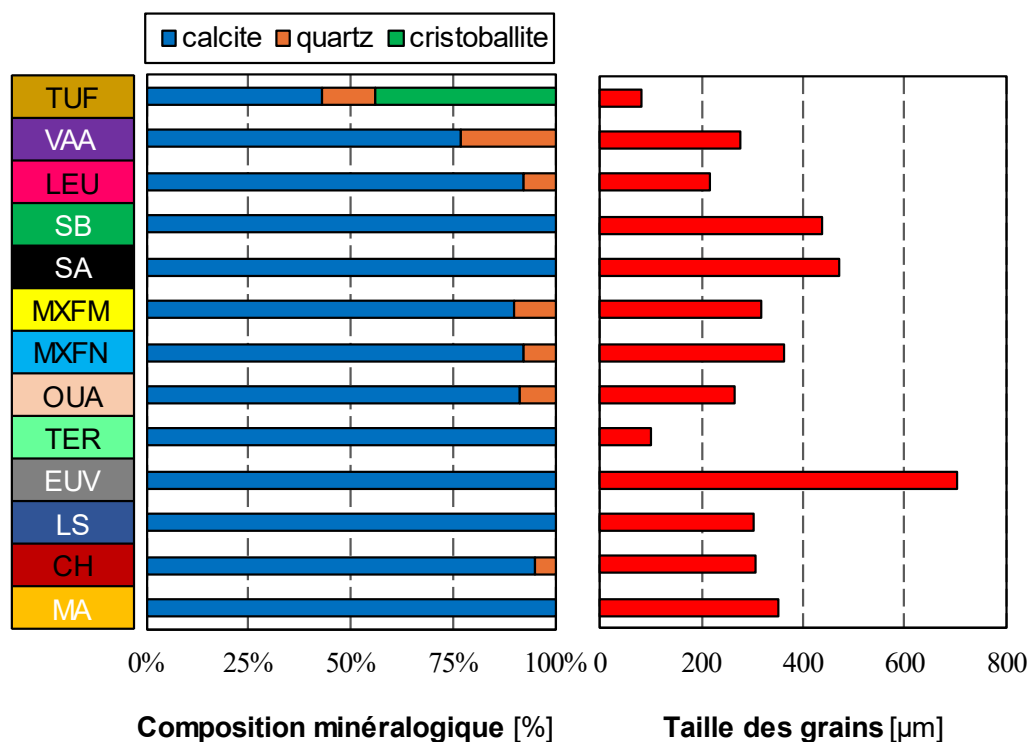
**Figure 1** – Identification des treize pierres calcaires de l'étude

Les pierres calcaires de cette étude ont été fournies par l'entreprise [Polycor France \(Rocamat\)](#), à l'exception de la pierre de la Croix-Huyart, mise à disposition par la [Société Nouvelle Saint-Pierre-Aigle](#).

Cette sélection de treize pierres permet d'explorer le large éventail des caractéristiques des pierres calcaires [cf. **Figure 2**]. Les pierres investiguées présentent des valeurs de porosité ouverte variant de 10 à 45 %, ainsi que des résistances en compression allant de 5 à plus de 100 MPa. Cette diversité de propriétés intrinsèques se traduit également à travers une vaste gamme de valeurs de conductivité thermique (de 0,8 à 2,3 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>), de capillarité (de 10 à 600 g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>), de composition minéralogique (nature monophasique ou polyphasique) et de taille moyenne des grains (structure allant de fine à grossière) [cf. **Figure 3**].



**Figure 2** – Diversité des pierres calcaires étudiées, couvrant une gamme étendue de propriétés courantes : porosité ouverte, résistance en compression, conductivité thermique et capillarité



**Figure 3** – Identification de la composition minéralogique et de la taille moyen des grains des pierres calcaires étudiées

## Quels sont les types de mortier visés ?

Plusieurs critères ont orienté le choix des types de mortier à intégrer dans ce projet. Tout d'abord, le document normatif NF DTU 20.1 (2020) <sup>(3)</sup> précise les dosages du liant en fonction de la classe de résistance mécanique des pierres, et des performances mécaniques attendus du mortier (M2.5, M5 et M10). Il liste également les différents types de produits utilisables (types de ciment, chaux aérienne et hydraulique, plâtre) et les compatibilités entre eux (mortier de liant pur ou mortier bâtard).

Ainsi, trois formulations de mortier de montage, correspondant aux trois classes de résistance mécanique des pierres (tendre, ferme et dure), ont été sélectionnées pour répondre aux exigences de la norme NF DTU 20.1. Par ailleurs, afin de se rapprocher des mortiers historiques, qui se caractérisent par leur faible teneur en éléments argileux et siliceux, des chaux hydrauliques naturelles *NHL 2* et *NHL 3,5* ont été choisies. Pour les pierres de classes ferme et dure, du ciment de référence *Super Blanc CEM II/42,5N* et *CEM I Calcia* a été utilisé pour la préparation de mortiers bâtards, afin d'atteindre des résistances mécaniques élevées, compatibles aux pierres associées.

Pierre :	Mortier de montage :				
Résistance à la compression	Classe de mortier	Sable 0-2 mm [kg]	NHL 2 [kg]	NHL 3,5 [kg]	CEM II / 42,5 N [kg]
tendre : ≤ 10 MPa	M2.5	1525	350	0	0
ferme : [10 - 40 MPa]	M5	1525	0	250	100
dure : > 40 MPa	M10	1525	0	250	150

\* La quantité d'eau dépend de la consistance

**Tableau 1** – Dosage en liant pour 1 m<sup>3</sup> de sable sec des trois formulations de mortier retenues

Le **Tableau 1** présente les dosages en liant des trois formulations retenues, exprimés pour un mètre cube de sable sec, en tenant compte des recommandations de la norme NF DTU 20.1, ainsi que des références issues de la littérature et des pratiques anciennes.

En résumé, les types et formulations de mortier analysés dans ce projet visent à la fois à recréer des mortiers historiques et à répondre aux pratiques courantes utilisées dans les constructions neuves.

---

<sup>3</sup> **Note** : NF DTU 20.1 (publié en juillet 2020) : Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs

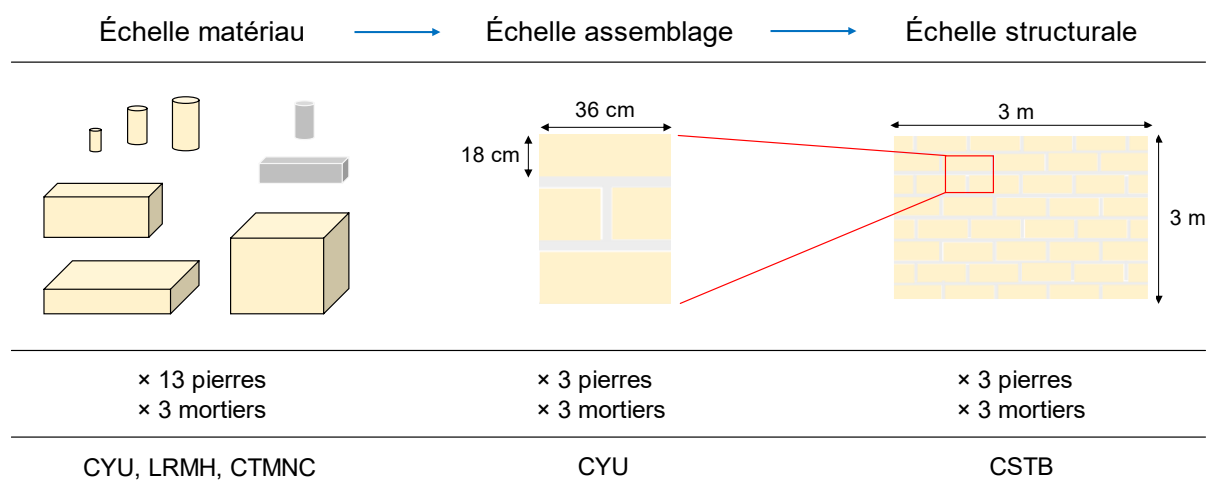
### 3. UNE APPROCHE EXPERIMENTALE A DIFFERENTES ECHELLES, COUPLEE A DE LA MODELISATION NUMERIQUE

#### Quelles actions ont-été réalisées au cours du projet ?

Une stratégie d'étude et de caractérisation multi-échelle du comportement des maçonneries en pierres calcaires à haute température a été mis en place, et se décline en trois niveaux d'échelles [cf. **Figure 4**] :

- L'échelle matériau(x) ;
- L'échelle d'assemblage ;
- L'échelle structurale.

#### Étude expérimentale et numérique



**Figure 4** – Etude multi-échelle adoptée durant ce projet

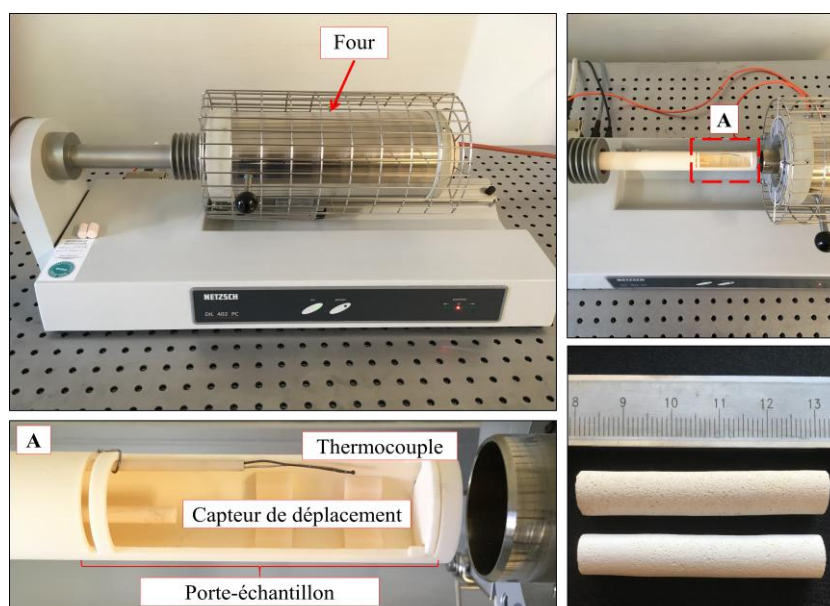
#### L'échelle matériau(x).

Ce volet explore le comportement des treize pierres calcaires de l'étude, caractérisées à l'état sain et sous hautes températures, en réponse à différentes sollicitations thermiques. Cette partie inclut aussi l'analyse des trois formulations de mortier de montage définies au **Chapitre 2**.

Tout d'abord, la nature minéralogique des différentes pierres est identifiée par diffraction des rayons X (DRX) et complétée par des observations à échelle fine au microscope à lumière polarisée.

Des analyses thermiques réalisés à chaud sont menées pour détecter les principaux phénomènes thermochimiques (ATG-DSC) influençant le comportement thermomécanique de ces pierres de construction. En ce sens et en complément, des essais de dilatométrie

thermique linéaire, réalisés jusqu'à 1050 °C sur de petits échantillons, permettent de suivre la déformation thermique (phases d'expansion et contraction) [cf. **Figure 5**].

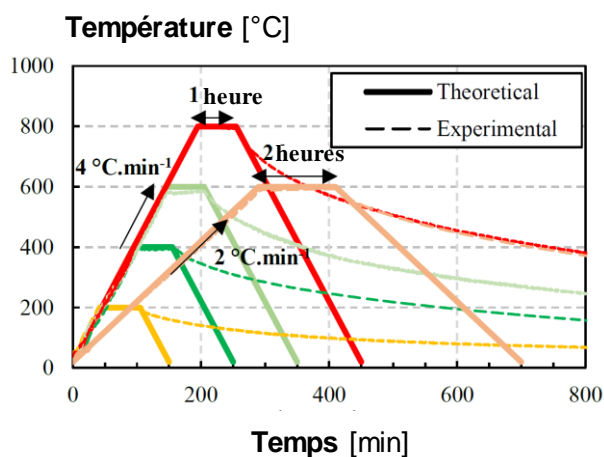


**Figure 5** – Dispositif expérimental de l'essai de dilatométrie thermique linéaire et échantillons préparés pour la réalisation de l'essai (CYU)

Afin d'établir les lois d'évolution des propriétés des matériaux en fonction de la température, les pierres sont soumises à des cycles de chauffage-refroidissement. Divers essais résiduels sont ensuite réalisés après refroidissement pour évaluer l'évolution des propriétés à différents niveaux de haute température. Quatre cycles de chauffage-refroidissement sont programmés : chaque cycle comprend une phase de chauffage jusqu'à la température cible, un palier de maintien thermique, puis une phase de refroidissement à la même vitesse [cf. **Figure 6**]. Les températures de palier retenues sont 200, 400, 600 et 800 °C, correspondant à des températures réalistes en cas d'incendie. Elles tiennent compte également des températures spécifiques de transformations thermochimiques de certains minéraux des pierres étudiées.

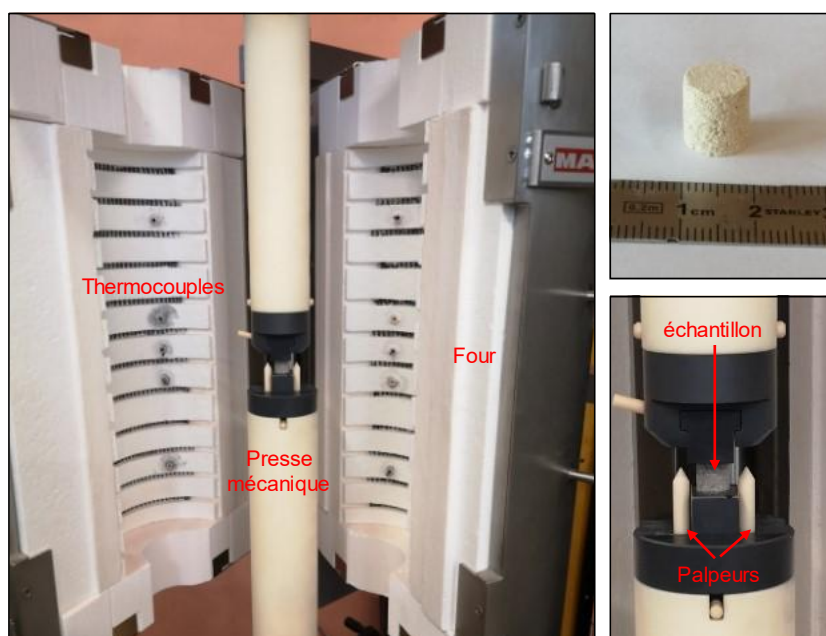
La caractérisation mécanique est assurée à l'aide d'une presse électromécanique pour déterminer les principales caractéristiques mécaniques : résistance en compression, coefficient de Poisson, résistance en traction par fendage et résistance en flexion par essai de flexion trois points. De plus, le module d'élasticité statique est obtenu en instrumentant les éprouvettes de pierre avec des jauges de déformation. Ce module est ensuite comparé au module d'élasticité dynamique déterminé en mesurant la vitesse de propagation des ondes P à travers le matériau. Par ailleurs, l'effet de forme sur les propriétés mécaniques à haute température est étudié en répétant les essais sur diverses géométries d'éprouvettes, conformément à différentes normes.

En compléments des essais mécaniques résiduels, des essais de compression uniaxiale à chaud (jusqu'à 800 °C) sont réalisés au CTMNC sur des éprouvettes cylindriques de très petites dimensions [cf. **Figure 7**]. De plus, l'effet du préchargement sur le comportement mécanique à chaud (à 600 °C) est analysé pour deux niveaux de préchargement définis (20 et 40 % de la résistance à la compression initiale). L'effet de forme sur la résistance à la compression en fonction des différentes géométries d'échantillons est également abordé.



[pierres : 4 °C.min<sup>-1</sup> / mortiers : 2 °C.min<sup>-1</sup>]

**Figure 6** – (à gauche) : four électrique permettant des chauffes jusqu'à 900 °C (CYU) ; (à droite) : paramètres des cycles de chauffage-refroidissement théoriques et expérimentaux



**Figure 7** – Dispositif expérimental du CTMNC permettant la réalisation d'essais mécaniques (compression et flexion) à chaud jusqu'à 1300 °C

La caractérisation microstructurale repose sur des essais complémentaires visant à investiguer l'évolution des propriétés du réseau poreux : essai de porosité ouverte à l'eau sous vide, essai de porosité à 48 heures en conditions naturelles de saturation, et essai de porosimétrie au mercure.

Concernant les propriétés de transfert, des mesures des propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique) sont effectuées à chaud grâce au dispositif *Hotdisk*, basé sur la théorie de la source plane transitoire. Ces mesures sont complétées par des essais de capillarité à l'eau (réalisés en résiduel) afin d'appréhender le transfert de fluide au sein de ces pierres après avoir été soumis à des cycles de chauffage-refroidissement.



Une analyse colorimétrique des échantillons chauffés à différentes températures est réalisée, fournissant des indices sur la température maximale atteinte par les pierres en cas d'incendie.

Les trois formulations de mortier sont également soumises à des tests à haute température. La dilatation thermique linéaire des mortiers est mesurée jusqu'à 800 °C. De plus, des mesures de la vitesse des ondes P, du module d'élasticité dynamique, et des résistances en compression et en traction sont effectuées après des cycles de chauffage-refroidissement à 200, 400 et 600 °C.

Une synthèse du programme expérimental de caractérisation à l'échelle matériau est fournie dans le **Tableau 2**.

Type de caractérisation expérimentale à l'échelle <i>matériau</i> :	<i>pierres</i> <sup>(a)</sup>			<i>mortiers</i> <sup>(b)</sup>	
	Types de sollicitation thermique :				
	20 °C <sup>(c)</sup>	en résiduel <sup>(d)</sup>	à chaud <sup>(e)</sup>	20 °C <sup>(c)</sup>	en résiduel <sup>(d)</sup>
Résistance à la compression	✓	✓	✓	✓	✓
Résistance à la flexion	✓	✓	-	✓	✓
Résistance à la traction par fendage	✓	✓	-	-	-
Vitesse de propagation des ondes P	✓	✓	-	✓	✓
Module d'élasticité statique	✓	-	✓	-	-
Coefficient de Poisson	✓	-	-	-	-
Module d'élasticité dynamique	✓	✓	-	✓	✓
Porosité accessible à l'eau sous vide	✓	✓	-	-	-
Porosité à l'eau à P <sub>atm</sub> (48 heures)	✓	✓	-	-	-
Porosimétrie au mercure (MIP)	✓	✓	-	-	-
Conductivité thermique	✓	-	✓	-	-
Diffusivité thermique	✓	-	✓	-	-
Chaleur spécifique massique	✓	-	✓	-	-
Analyse thermogravimétrique (ATG)	-	-	✓	-	-
Analyse DSC	-	-	✓	-	-
Dilatation thermique linéaire	-	-	✓	✓	✓ <sup>(e)</sup>
Coefficient de dilatation thermique	-	-	✓	✓	✓ <sup>(e)</sup>
Diffraction des rayons X ( <i>DRX</i> )	✓	✓	-	-	-
Microscope à lumière polarisée	✓	✓	-	-	-

**Notes :**

- <sup>a</sup> : l'intégralité des pierres de l'étude (×13) n'ont pas été systématiquement soumis à tous les essais.
- <sup>b</sup> : 3 formulations de mortier, adaptées aux classes mécaniques des pierres calcaires.
- <sup>c</sup> : à température ambiante (20 °C), pour établissement des valeurs de référence.
- <sup>d</sup> : après exposition à des cycles de chauffage-refroidissement (200, 400, 600, 800 °C).
- <sup>e</sup> : mesures réalisées lors de l'élévation de température ; température maximale variable selon l'essai.
- : mesure non réalisée par choix/limitations, ou car inadaptée au protocole expérimental.

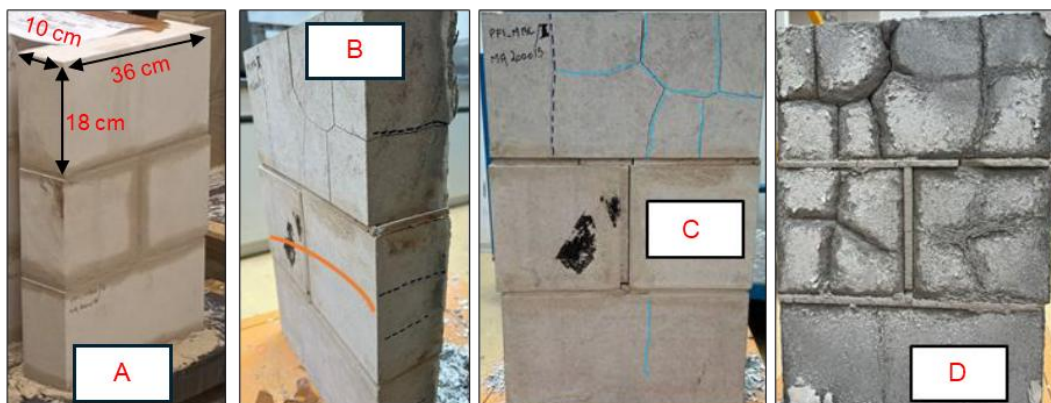
**Tableau 2 – Récapitulatif du programme expérimental conduit à l'échelle matériau**

En complément des cycles thermiques appliqués [cf. **Figure 7 - droite**], où la phase de refroidissement s'effectue lentement et de manière semi-contrôlée en raison de l'inertie du four, une attention particulière est portée à l'analyse d'un mode de refroidissement alternatif et à son impact direct sur le matériau calcaire. Ainsi, un refroidissement plus rapide, obtenu par projection d'eau sur les faces chauffées de l'échantillon, fait l'objet d'une campagne exploratoire de caractérisation menée au sein de l'usine de transformation de Ravières, exploitée par Polycor France (Rocamat). Ce mode de refroidissement reproduit de manière plus réaliste l'intervention des pompiers lors d'un incendie et les opérations d'extinction.

Enfin, une étude de la sensibilité thermique à l'échelle de blocs de construction est réalisée, en examinant le schéma de fissuration et l'étendue de l'endommagement relevés sur des blocs de différentes formes après leurs expositions à des chauffages unidirectionnels rapides. Deux cycles de chauffage-refroidissement sont étudiés : 650 et 850 °C. Les mesures de vitesse des ondes P réalisées avant et après chauffage, en fonction de l'épaisseur des blocs, permettent de suivre l'évolution des dommages depuis la face chauffée vers la face non-chauffée. L'influence de la géométrie des blocs et des propriétés intrinsèques des pierres sur leur sensibilité thermique est également examinée.

### L'échelle d'assemblage.

À l'échelle d'assemblage, deux murets mesurant 56 × 36 × 10 cm sont fabriqués pour chaque type de pierre calcaire et son mortier associé. Chaque muret est soumis à un chauffage unidirectionnel rapide : l'un jusqu'à 650 °C et l'autre jusqu'à 850 °C, avec exposition à l'humidité ambiante pour évaluer les dommages additionnels liés à la réhydratation de la chaux [cf. **Figure 8**].



**Figure 8** – exemple de mini-muret maçonné en pierre calcaire, correspondant à l'échelle d'assemblage : A) confection de la maquette ; après exposition à un cycle de chauffage-refroidissement à 850 °C : B) bombement observé ; C) chemins de fissurations constatés ; D) suivi de la détérioration, 24 heures après la fin de l'essai

### L'échelle structurale.

Six essais de résistance au feu ont été réalisés sur des murs de maçonnerie en pierre calcaire. Ces essais ont été menés sur trois types de pierre : *Saint-Leu* (pierre tendre), *Tervoux* (pierre ferme) et *Massangis* (pierre dure). Ces trois pierres ont été sélectionnées parmi les

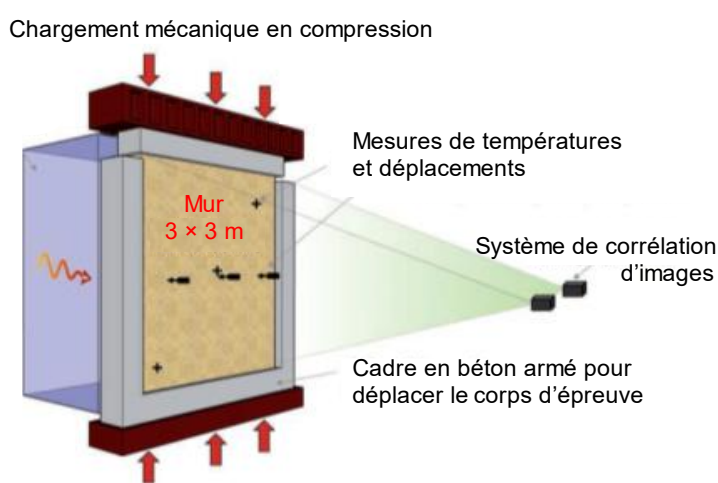


treize étudiées et ont fait l'objet d'une caractérisation très détaillée [cf. **Tableau 2**]. Les murs, de dimensions 3 m × 3 m et d'épaisseur 20 cm, sont constitués de huit rangées de blocs mesurant chacun 72 cm × 36 cm × 20 cm (avec des demi-blocs de 36 cm × 36 cm × 20 cm sur les bords latéraux). Leur montage a été réalisé par un professionnel aguerri sous la supervision de *Polycor France (Rocamat)*.

La nature et la résistance des mortiers ont été adaptées à chaque type de pierre : un mortier à base de chaux hydraulique naturelle pour la pierre de Saint-Leu, et des mortiers bâtards de chaux hydraulique naturelle et de ciment Portland pour les pierres de Tervoux et Massangis. Les joints horizontaux et verticaux ont été réalisés avec une épaisseur de 1 cm.

Les murs ont été soumis sur une seule face à la courbe de température normalisée ISO 834-1 pendant deux heures, suivies d'une phase de refroidissement de 24 heures. Pour chaque type de pierre, un mur a été testé sans chargement mécanique, tandis qu'un autre était soumis à un chargement correspondant à 50 % des charges admissibles calculées selon l'Eurocode 6. Une instrumentation avancée a été mise en place pour ces essais, incluant des thermocouples, des capteurs de déplacement, un dispositif de corrélation d'image numérique, une caméra thermique et des endoscopes [cf. **Figure 9**].

Vingt-quatre heures après la fin de l'essai et de la phase de refroidissement, chaque mur a été à nouveau chargé jusqu'à rupture pour déterminer sa capacité portante résiduelle. Les murs ont ensuite été conservés pendant au moins deux semaines pour observer la cinétique d'altération à court et moyen terme.



**Figure 9** – Dispositif expérimental des essais de résistance au feu (CSTB) : instrumentation mise en place et maquette du mur maçonné en pierre calcaire (mouchetis appliqué sur le mur)

## Quels sont les principaux résultats et enseignements ?

### A l'échelle matériau(x).

**Processus thermochimiques : influence de la minéralogie.** Les pierres calcaires présentent un comportement thermochimique similaire, lié à la prédominance du minéral calcite : stable jusqu'à 700 °C, il se décarbonate au-delà pour afficher une perte de masse de

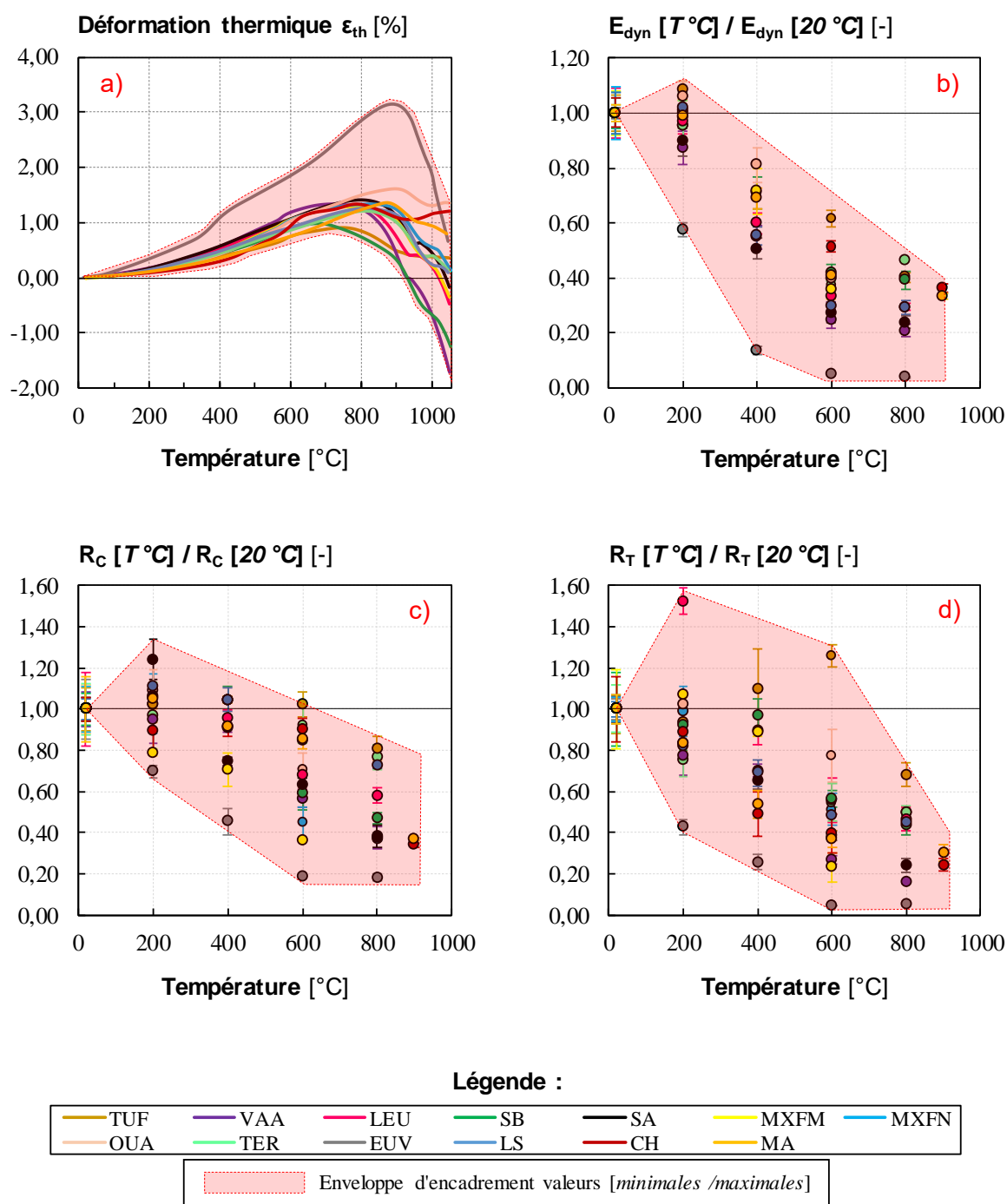
44 % à 930 °C. Les différences de perte de masse observées à 1000 °C pour les calcaires, peuvent être dues à la combustion de matières organiques (370 °C), ou bien à la présence de minéraux secondaires.

*Déformation thermique : influence de la minéralogie, agencement et taille des grains, texture, porosité.* Les pierres calcaires affichent une déformation thermique généralisable. Tout d'abord, les pierres calcaires se dilatent progressivement puis se contractent consécutivement à la perte de masse engendrée par la décarbonatation de la calcite [cf. **Figure 10-a**]. La phase de dilatation peut afficher de légères perturbations au cours du chauffage, causées par la nature polyphasique de certaines pierres. Ainsi, une fissuration du matériau peut être la conséquence de déformations thermiques différentielles liées à des incompatibilités de déformation entre minéraux (calcite, dolomite, quartz). L'amplitude de déformation affichée par les différentes pierres calcaires peut varier du simple au triple, et dépend largement de paramètres pétrophysiques. Les pierres constituées de larges grains agencés dans une matrice compacte se dilatent plus largement que les pierres disposant d'une faible cohésion petits grains-matrice. De plus, à l'inverse de l'idée généralement admise, les pierres calcaires les moins poreuses ne sont pas nécessairement celles qui se dilatent le plus. La porosité semble avoir moins d'influence que la texture de la pierre sur la déformation thermique. La microfissuration induite par une incompatibilité locale de déformation thermique influe aussi sur la déformation globale au cours du chauffage et sur une déformation résiduelle dilatante plutôt que contractante.

*Evolution des performances mécaniques en résiduel.* Les calcaires présentent des pertes de propriétés mécaniques très variables mais qui globalement se divisent en deux phases : une première jusqu'à 400 °C où la diminution de résistance en compression/traction n'excède que rarement 30 %, puis une seconde phase où les pertes s'amplifient et peuvent atteindre 80 % pour les plus impactées à 800 °C [cf. **Figure 10-b, -c, -d**]. Là encore, certains paramètres intrinsèques ont une forte influence sur l'évolution des propriétés des pierres en fonction de la température. La nature minéralogique de la pierre, et plus précisément la présence de minéraux secondaires, est un facteur augmentant la sensibilité mécanique du matériau soumis à de hautes températures. Ceci s'explique par le développement de fissurations, causées par des incompatibilités de déformation. De plus, les caractéristiques texturales se traduisant par des grains de dimensions variables et agencés de façon différente, sont tout autant des paramètres agissant sur le comportement mécanique à hautes températures. Ainsi, des grains de grandes dimensions apparaissent comme défavorable, conduisant alors à des déformations absolues plus larges et à une détérioration de la microstructure.

*Performances mécaniques à chaud versus en résiduel.* Le comportement mécanique à chaud, en particulier la résistance à la compression, présente des différences marquées par rapport aux propriétés résiduelles après un cycle de chauffage-refroidissement. Les pierres testées à chaud montrent une diminution notable de leur rigidité dès 400 °C, associée à une augmentation de leur déformabilité et de leur résistance à la compression jusqu'à 600 °C. En revanche, le comportement mécanique résiduel jusqu'à 600 °C se traduit par une légère hausse de la déformabilité et une variation modérée de la résistance à la compression, car la phase de refroidissement permet une récupération partielle de la rigidité. La baisse de rigidité et l'augmentation de la déformabilité, à chaud comme en résiduel, résultent en partie de

l'endommagement et de la fissuration thermique. Pour les essais à chaud, cette perte de rigidité et cette hausse de déformabilité sont accentuées par la plasticité du matériau, qui réduit le frottement et accroît la mobilité atomique aux interfaces des grains. À 800 °C, que ce soit lors des essais à chaud ou bien en résiduel, la décarbonatation de la calcite et sa contraction entraînent une diminution de la déformabilité, de la résistance à la compression et du module élastique. Par ailleurs, l'application d'une précharge avant la compression réduit la dilatation thermique par rapport à un essai sans précharge, consolidant ainsi la pierre. Cette précharge induit également une baisse de la déformabilité, une hausse significative du module élastique et une légère amélioration de la résistance à la compression.



**Figure 10** – Principaux résultats obtenus concernant les treize pierres calcaires étudiées à l'échelle matériau : a) déformation thermique ; évolution relative en fonction de la température (en résiduel) de b) module d'élasticité dynamique ; c) résistance à la compression ; d) résistance à la traction

*Conséquence sur la durabilité des pierres altérées.* L'exposition à de hautes températures altère le réseau poreux et modifie la répartition des tailles d'accès aux pores. L'augmentation de la porosité ouverte des pierres après plusieurs cycles thermiques soulève des questions quant à leur durabilité post-incendie, notamment face à des conditions environnementales agressives. En effet, la dégradation du réseau poreux entraîne une hausse du coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Cette capacité accrue d'absorption après un incendie peut aggraver les problèmes d'altération, notamment ceux liés aux cycles de gel-dégel.

*Sensibilité thermique à l'échelle de blocs : influence des propriétés intrinsèques de la pierre.* La sensibilité thermique des blocs de calcaire après un chauffage unidirectionnel dépend fortement de leurs propriétés physiques et mécaniques initiales, notamment la résistance à la traction, la ténacité et la conductivité thermique. Une vitesse de chauffage élevée crée un gradient thermique marqué et provoque une dilatation importante dans la partie chaude, dont la déformation est contrainte par la zone froide du bloc. Ainsi, des contraintes thermiques de compression et de traction apparaissent respectivement dans les parties chaude et froide. Les pierres présentant une résistance élevée à la traction et une grande ténacité résistent mieux à l'élévation de température. En revanche, celles ayant une faible conductivité thermique subissent davantage de gradients thermiques, entraînant un endommagement thermique accru.

### **A l'échelle d'assemblage.**

*Comportement à hautes températures du mortier versus pierre.* La dilatation thermique des mortiers de chaux diffère de celle des pierres calcaires. Les mortiers subissent une légère contraction jusqu'à 480 °C, suivie d'une expansion jusqu'à 590 °C en raison de la transformation  $\alpha$ - $\beta$  du quartz présent dans le sable siliceux, avant de se contracter à nouveau jusqu'à 800 °C. En revanche, les pierres calcaires présentent un comportement dilatant jusqu'à 800 °C, avec une dilatation thermique nettement supérieure à celle des mortiers. Concernant les résistances mécaniques, les mortiers sont plus sensibles à l'élévation de température. À 200 °C, la résistance des pierres n'est que peu impactée, tandis que le module d'élasticité et la résistance à la traction des mortiers chutent de plus de 20 %. À 400 °C, la résistance à la compression des pierres demeure stable, contrairement à celle des mortiers qui diminue également de plus de 20 %. À 600 °C, la chute de résistance des mortiers est plus prononcée, avec des fissures avancées, observées sur les éprouvettes chauffées.

*Influence de la température sur l'adhérence pierre-mortier.* L'exposition des murets à un chauffage unidirectionnel à 650 °C altère considérablement l'adhérence du mortier aux blocs de pierre. Selon les caractéristiques des pierres et des mortiers, cette altération peut entraîner un détachement partiel à complet des joints. Bien que les mortiers associés aux calcaires durs présentent une résistance élevée à la traction, la faible porosité de la pierre peut entraver la liaison physico-chimique entre le mortier et les blocs lors de la prise.

*Fissures thermiques induites sur les blocs de pierre.* Le schéma de fissuration thermique observé sur les blocs de pierre des murets est identique à celui des blocs parallélépipédiques chauffés unidirectionnellement de manière isolée. Cela résulte d'un

endommagement sévère de l'interface blocs-mortier, entraînant leur désolidarisation à des températures relativement basses. À 650 °C, les blocs de pierre tendre subissent un endommagement plus prononcé, présentant à la fois des fissures verticales et horizontales, alors que les blocs de pierre ferme et dure ne montrent que des fissures verticales. À 850 °C, tous les blocs de pierre sans exception montrent un endommagement avancé avec des fissures à la fois horizontales et verticales.

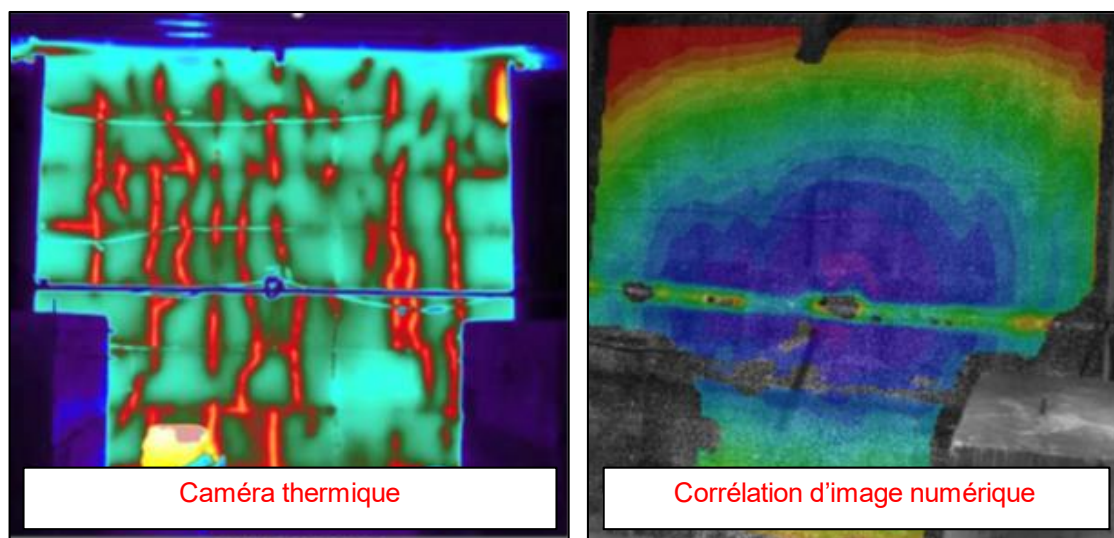
*Endommagement additionnel due à l'exposition à l'humidité de l'air.* La tenue structurelle post-incendie de la maçonnerie en pierre subit un endommagement additionnel et des fissurations dues à l'effet de l'humidité ambiante. Pendant l'incendie, les fissures thermiques dans les murets se forment de la face non-chauffée vers la face chauffée. Après avoir chauffé les murets à 850 °C, leur exposition à l'humidité de l'air provoque l'hydratation de la chaux vive près de la face chauffée, ce qui se manifeste par la formation d'une fine couche blanche friable. Ce phénomène entraîne un gonflement volumique significatif, élargit les fissures près de la face chauffée, et provoque de nouvelles fissures sur la face non-chauffée, et inverse la direction de propagation des fissures. En effet, après la réhydratation de la chaux, les fissures s'ouvrent de la face chauffée vers la face non-chauffée.

### A l'échelle structurale.

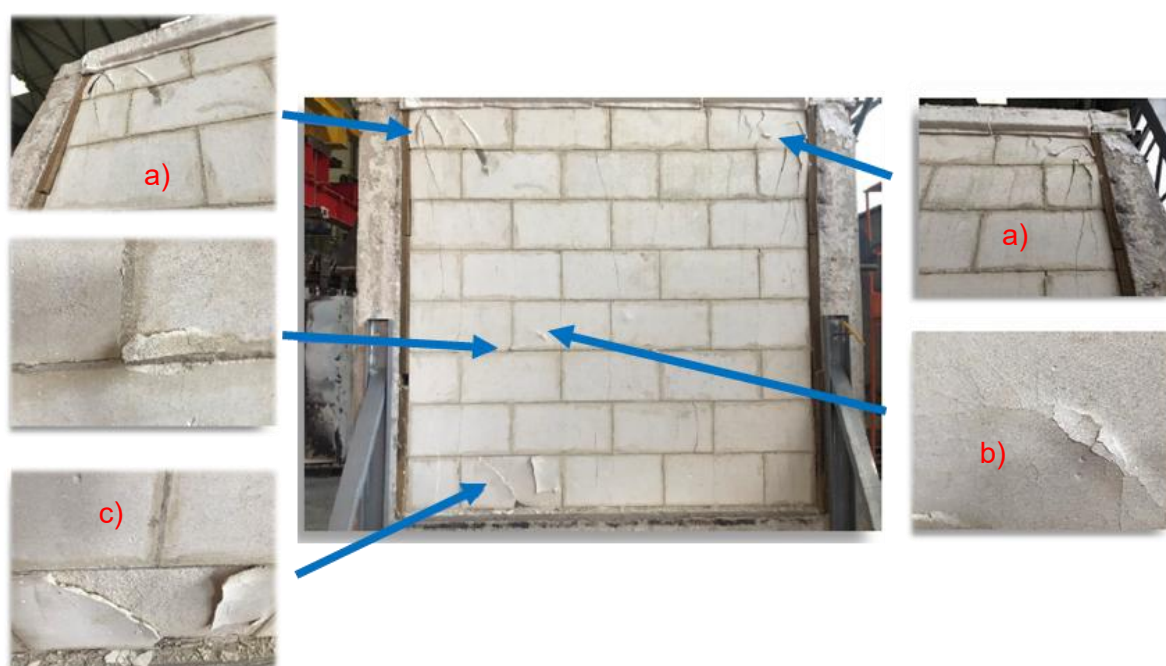
*Retour sur quelques observations constatées lors des essais.* Les mesures de températures dans les blocs ont permis de quantifier les gradients thermiques à travers l'épaisseur du mur jusqu'à 2 heures d'incendie. La pierre calcaire présentant des propriétés relativement isolantes (notamment pour le calcaire tendre), la température diminue rapidement avec la profondeur. Ainsi, au bout d'une heure de sollicitation thermique, les températures au-delà de 5 cm de profondeur sont inférieures à 100 °C et sont égales à 20°C sur la face non exposée du mur. Un palier à 100 °C a été observé, lié à la vaporisation de l'eau dans la pierre, qui consomme l'énergie thermique et ralentit l'élévation de température. Plus le calcaire est poreux et donc isolant, plus son gradient thermique sera élevé. Ces gradients thermiques présentent une forte influence sur le comportement mécanique de la structure car ils induisent une courbure du corps d'épreuve qui s'oriente vers le feu. L'élévation de température se traduit par la diminution des propriétés du matériau (rigidité et résistance) et sa dilatation thermique. Par simplification, il est possible d'imaginer que la face chaude du mur va se dilater alors que la face froide maintiendra sa longueur initiale ce qui provoquera un bombement du corps d'épreuve. Ce phénomène est d'ailleurs couramment qualifié « d'effet bilame ».

Les champs de déplacement hors-plan (flèche horizontale) ont été quantifiés par corrélation d'images à différents instants [cf. **Figure 11**]. Il apparaît que la courbure thermique se développe dans les deux directions (horizontale et verticale) créant un bombement circulaire vers le feu. Les valeurs de flèche maximale, obtenues au centre du mur, après deux heures d'incendie sont variables selon la nature de calcaire testée. Cela peut représenter un déplacement de presque 40 mm pour certaines pierres et peut engendrer à l'échelle de la structure des excentrement de charges susceptibles de vulnérabiliser le bâtiment. Il est à noter que cette flèche centrale évolue rapidement au début de l'essai, puis l'augmentation ralentit pour enfin se stabiliser et ne guère évoluer par la suite.





**Figure 11** – (à gauche) : exemple d'image capturée avec la caméra thermique, illustrant les chemins de fissurations associés aux températures les plus élevées ; (à droite) : exemple de la répartition des déplacements hors-plan horizontaux pendant l'exposition à la courbe de température ISO 834-1 – la flèche est maximale au centre du mur



**Figure 12** – Maquette ( $3 \times 3$  m) de mur maçonné en pierre calcaire (Massangis), 24 heures après la fin de l'essai de résistance au feu (courbe ISO 834-1) et après chargement mécanique en résiduel (375 tonnes) – face chauffée affichée ici : a) fissuration plus importante localisée dans les angles supérieurs ; b) fragilisation et fissuration ; c) détachement d'une fine couche de 10 mm

Lors des essais, certaines fissures peu marquées ont été observées principalement au voisinage des joints verticaux après environ 30 minutes de feu. Le développement de ces quelques fissures localisées n'a cependant pas modifié la tendance de la courbure thermique du mur. Cette dernière semble particulièrement continue dans les deux directions traduisant un déplacement d'ensemble du mur malgré la présence hétérogène constituée de blocs et de joints. Après le refroidissement du corps d'épreuve, la flèche centrale pouvait représenter une valeur proche de 10 % de l'épaisseur du mur. Ce retour vers la position d'origine est provoqué

par la diffusion thermique dans l'épaisseur du mur vers des valeurs proches du milieu environnant (20 °C) ce qui diminue le gradient thermique. L'endommagement du mur (fissures) [cf. **Figure 12**] ainsi que des propriétés résiduelles post-refroidissement du matériau empêche un retour complet à la position initiale (correspondant à une flèche nulle).

*Synthèse des corps d'épreuve testés et résultats obtenus.* Le **Tableau 3** ci-après reprend l'intégralité des caractéristiques concernant les spécificités d'essais, matériaux testés, et dispositions constructives associées.

Il est important de noter que l'intégralité des essais, au nombre de 6, ont conduit à un résultat très positif, à savoir un classement de résistance au feu REI 120.

Des explications complémentaires concernant la réglementation incendie applicable en France, et les exigences attendues sont discutées dans le **Chapitre 5**.

	Caractéristiques :	Configurations testées :	Critère :
<b>Essais :</b>	Nombre de pierres testées :	3	REI 120
	Nombre d'essais / pierre :	2	
	Nombre total d'essais réalisés :	6	
	Chargement mécanique :	non-chargé et chargé (50% de la charge admissible selon l'EC6)	
	Sollicitation thermique :	courbe ISO-834	
<b>Pierres :</b>	nature pétrographique :	calcaire	
	classes de résistance mécanique :	calcaire tendre, ferme, dur	
	propriétés courantes :	porosité : 8 à 40 % conductivité th. : 0,8 à 2,4 W/m.k	
<b>Mortiers :</b>	nature :	- mortier traditionnel à la chaux - mortier traditionnel (batard) chaux – ciment	
	dosage :	conforme au NF DTU 20.1	
	classe de résistance mécanique :	M2.5 – M5 – M10	
<b>Dispositions constructives :</b>	épaisseur du mur :	20 cm	
	épaisseur du joint de mortier :	1 cm	
	caractéristiques dimensionnelles des blocs de calcaire :	720 x 360 x 200 mm (L x h x ép.)	
	mise en œuvre :	montage conforme aux règles de l'art (NF DTU 20.1)	

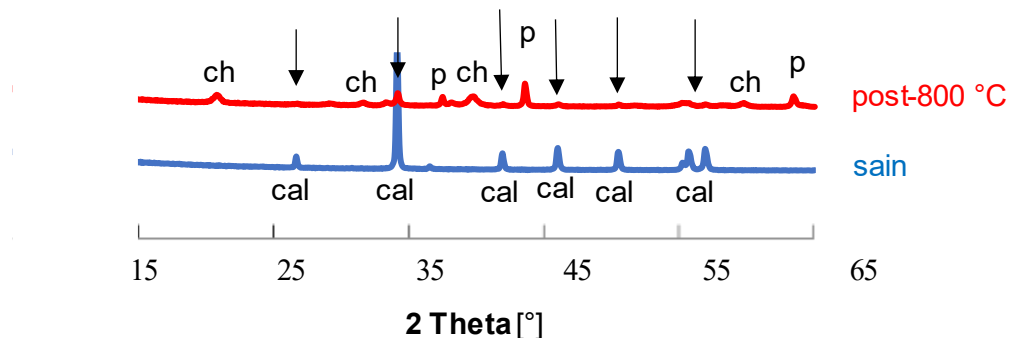
**Tableau 3** – Synthèse des six essais de résistance au feu sur des maquettes maçonnées de 3 × 3 m, réalisés au CSTB : résultats -> critère REI 120 obtenu pour les six essais

## 4. CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC POST-INCENDIE D'UN OUVRAGE MAÇONNE EN PIERRE CALCAIRE

### Quelles sont les techniques et méthodes pour conduire un diagnostic post-incendie d'un ouvrage en pierre calcaire ?

Différentes techniques expérimentales ont été abordées durant ce projet, et certaines d'entre-elles apparaissent à présent comme intéressantes vis-à-vis de leur pertinence à être employées afin d'évaluer/estimer/analyser les conséquences directes d'un incendie sur la maçonnerie en pierre calcaire.

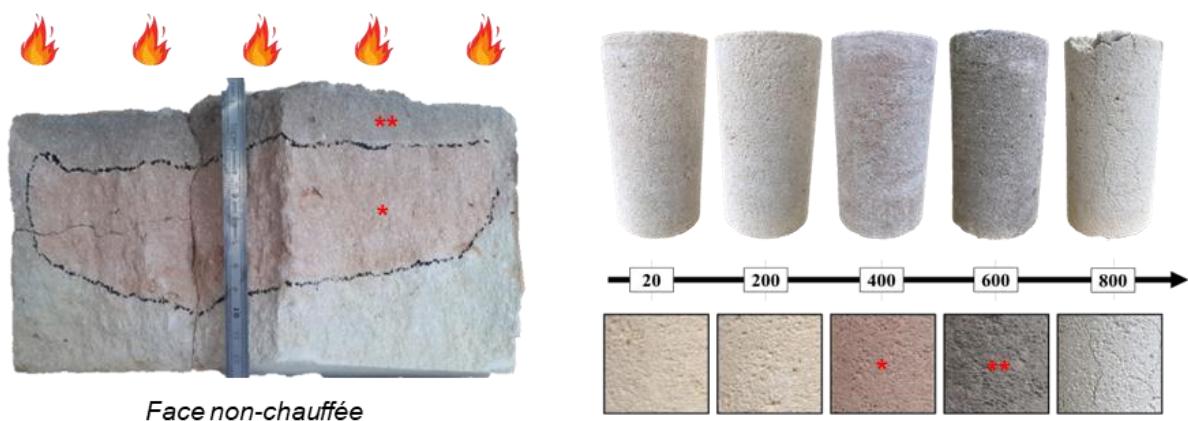
Des analyses DRX opérées sur une faible quantité de matière peut permettre l'identification de la température maximale atteinte par la pierre lors de l'incendie. En effet, pour les pierres calcaires, la présence ou au contraire, disparition (partielle) des pics de calcite, accompagnée par l'apparition de chaux, ou consécutivement de portlandite, renseigne sur le niveau de température subi par le matériau [cf. **Figure 13**]. Néanmoins, cette méthode ne semble porter ses fruits que dans le cas où le minéral constitutif est associé à une transformation thermochimique irréversible : c'est le cas de la décarbonatation de la calcite, mais pas de la transformation d'état réversible du quartz.



**Figure 13** – Comparatif de diffractogrammes DRX résultant d'échantillons de calcaire sain et soumis à une sollicitation thermique (800 °C)

En complément, l'analyse du changement de couleur par colorimétrie [cf. **Figure 14**] présente certains avantages, dans la mesure où une base de données concernant la pierre altérée a déjà été établie : méthode non-destructive et réalisable facilement sur terrain, analyses simples, faible coût lié à l'achat/utilisation/maintenance de l'appareil. Cependant, là encore, l'obtention de résultats probants, à savoir la détermination de la gamme de température maximale atteinte, est dépendante de la spécificité (minéraux constitutifs) de la pierre investiguée. En effet, certaines transformations thermochimiques sont associées à un changement de couleur : c'est le cas pour les pierres contenant de la goéthite qui en se transformant en hématite (dès 250 °C) affichent une couleur brune (phénomène de rubéfaction), ou bien pour les calcaires qui s'assombrissent fortement en présentant une diminution significative de la teinte de couleur jusqu'à 600 °C, puis blanchissent dès lors que de la portlandite est formée, témoin du début de la décarbonatation de la calcite à 700 °C.





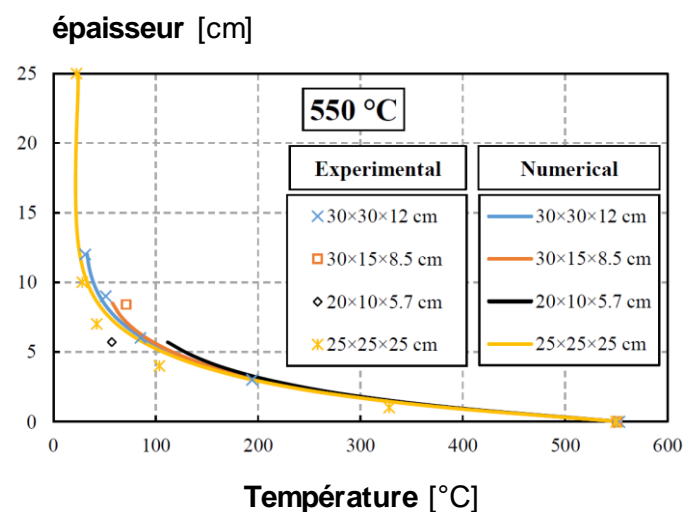
**Figure 14** – Evolution colorimétrique d'un calcaire chauffé jusqu'à 800 °C : mise en évidence de différentes teintes selon la température maximale atteinte

Enfin, la mesure de la vitesse des ondes P s'impose comme une méthode non-destructive, simple d'utilisation et qui peut conduire à l'estimation de la température atteinte, ou bien à l'évaluation des chutes de performances mécaniques, en se référant à une base de données expérimentales où des corrélations fiables ont été établies.

Une liste complémentaire de méthodes et techniques expérimentales, destructives ou non, est présentée à travers le **Tableau 4**. Les avantages, prérequis, apports mais également limites de ces outils sont détaillés dans ce tableau.

## Quel apport de la simulation numérique dans ce contexte ?

Les simulations numériques requièrent des paramètres thermiques et mécaniques déterminés expérimentalement. La base de données expérimentales établie dans ce projet, portant notamment sur les pierres calcaires et mortiers, peut alimenter des simulations visant à reproduire les effets d'un incendie sur la maçonnerie en pierre calcaire, avant d'être appliquée à l'échelle de l'ouvrage.



**Figure 15** – Profil de température d'une pierre calcaire chauffée à 550 °C : confrontation expérimentale et numérique

La confrontation des données expérimentales et numériques tout au long du projet [cf. **Figure 15**] a permis d'affiner et de valider les modèles de simulation destinés à la sécurité incendie et au dimensionnement d'ouvrages en pierre calcaire soumis à des sollicitations thermiques sévères.

## Que faut-il retenir ?

En résumé, adoptons une approche pratique et pragmatique : imaginons qu'un incendie affecte un ouvrage en pierre calcaire. Vous êtes alors chargé de réaliser un diagnostic sur cet édifice maçonné, qui se retrouve endommagé par le feu. Votre mission consiste à examiner les matériaux altérés pour évaluer les répercussions sur la stabilité structurelle de l'ouvrage, mais aussi à vous interroger sur la durabilité des pierres. Vous cherchez également à reconstituer le scénario de l'incendie et à en déterminer l'ampleur : durée, foyers localisés, températures maximales atteintes, et niveaux de sollicitations variables.

Plusieurs questions se posent alors quant au protocole expérimental *et/ou* numérique à adopter :

- Quelles caractéristiques essentielles faut-il déterminer en priorité ?
- Quelles informations complémentaires seraient utiles à l'expertise ?
- Comment obtenir ces données ? Quels essais sont à conduire ?

Dans certains cas, l'échantillonnage et l'accès au matériau peut poser des difficultés :

- Quelles sont alors les méthodes et outils non-destructifs permettant de recueillir des informations importantes ?
- Si des prélèvements sont nécessaires et possibles, quelle stratégie d'échantillonnage faut-il adopter ? quelle quantité de matière est requise pour chaque type d'essai ?
- Comment interpréter et analyser les différents résultats obtenus ?
- Existe-t-il des relations entre les différentes propriétés établies ?

En complément des mesures expérimentales, quelle valeur ajoutée apporte la modélisation numérique ?

- Quels paramètres essentiels doit-on identifier pour alimenter ces simulations ?
- Quelles hypothèses peuvent-être prises en considérant les résultats de ce projet ?
- Quelles sont les réponses pouvant être potentiellement produites ?

Les **Tableaux 4** et **5** regroupent des éléments de réponse à ces questions et visent à guider et orienter toute personne confrontée à un diagnostic post-incendie d'un ouvrage maçonné en pierre calcaire massive.

A titre d'information, l'expertise de la cathédrale Notre-Dame de Paris et son diagnostic post-incendie, a été réalisée par les équipes du LRMH, en appliquant une méthodologie de caractérisation semblable à celle définie dans ces deux tableaux. D'autres références d'ouvrages ayant subi un incendie ont également suivi un cheminement scientifique similaire.

Type d'investigations :		Propriétés et essais associés :		Objectif de la mesure : quelles informations <i>directe</i> et <i>indirecte</i> apportées ? corrélations et lois de comportement établies ?	Quelle quantité de matière requise : format(s), dimension(s), préconisations ?
expérimental	destructif (D)	mécanique	résistance à la compression	- évaluer l'impact de la sollicitation thermique sur le paramètre étudié (diminution ou augmentation en %) en comparant à des valeurs de référence sur échantillon témoin / sain ;	échantillon centimétrique, de forme cubique ou cylindrique
			résistance à la traction		échantillon centimétrique, de forme cylindrique ou parallépipédique
			module d'élasticité statique		échantillon centimétrique, de forme cubique ou cylindrique
		physique	masse volumique	- se reporter aux lois de comportement établies, entre ces paramètres et la température pour une estimation indirecte du niveau de température maximal atteint ;	échantillon centimétrique, de forme indifférente
			porosité		
		hydrique	capillarité à l'eau	- corrélations établies, et dépendantes de la température, entre les propriétés mécaniques et physique/hydrique et la vitesse de propagation du son	échantillon centimétrique, de forme cubique ou cylindrique
			perméabilité à l'eau		échantillon centimétrique, de forme cylindrique
		microstructure	porosimétrie au mercure	- évaluer et identifier les modifications microstructurales (taille des pores, fissuration) : conséquence importante sur la durabilité post-incendie	fragment de 1 cm²
			MEB		fragment millimétrique / centimétrique
		minéralogique	ATG	- identifier les potentielles transformations thermochimiques ayant eu lieu --> estimation du niveau de température maximal atteint ;  - identifier qualitativement (et semi-quantitativement) les phases minérales en présence --> estimation du niveau de température maximal atteint ;	100 g sous forme de poudre
DRX					

(suite à la page suivante)

(suite)

Type d'investigations :	Propriétés et essais associés :	Objectif de la mesure : quelles informations <i>directe</i> et <i>indirecte</i> apportées ? corrélations et lois de comportement établies ?	Quelle quantité de matière requise : format(s), dimension(s), préconisations ?
expérimental	non-destructif (ND)	mécanique vitesse du son	surface centimétrique
		- corrélations établies, et dépendantes de la température, entre les propriétés physico-mécaniques et la vitesse de propagation du son ;  - estimation de l'indice de continuité, renseignant sur l'intensité de la fissuration	
		scléromètre	
		- estimation indirecte de la résistance à la compression	
	colorimétrique	colorimétrie	
		- évaluer les modifications des paramètres colorimétriques, en les comparant à des valeurs de référence sur échantillon témoin / sain --> estimation de plages seuils de température maximale atteinte	

**Tableau 4** – Synthèse des méthodes et outils utiles au diagnostic post-incendie d'un ouvrage en maçonnerie de pierre calcaire

Type d'investigations :		Paramètres d'entrée ( <i>courants</i> ) :		Stratégies et échelles de modélisation :	Résultats ( <i>pouvant être</i> ) produits [variable selon modèle] :
numérique	Thermique ( <i>T</i> )	conductivité thermique	$\lambda$	- échelle <i>matériaux</i> , avec paramètres propres aux différents éléments constitutifs (pierre + mortier)	- profil et distribution de température
		masse volumique	$\rho$		
		capacité thermique	$C_P$		
	+	coefficient de dilatation thermique linéaire	$\alpha$	ou	- champs de déplacement et contrainte ;
	Thermo- Mécanique ( <i>TM</i> )	module d'élasticité	$E$		- cartographie d'endommagement ;
		résistance à la compression	$R_C$	- échelle <i>assemblage</i> (maçonnerie), avec paramètres homogénéisés (si connus / déjà déterminés expérimentalement ou numériquement)	- capacité portante admissible lors de l'incendie <i>et/ou</i> en résiduel (post-incendie) ;
		résistance à la traction	$R_T$		- durée pendant laquelle la stabilité structurelle est assurée
		constante(s) selon modèle d'endommagement	$K_1, K_2, \text{ etc}$		

**Tableau 5** – Apports possibles apportées par la simulation numérique :  
prérequis (paramètres d'entrée), stratégies de modélisation et résultats pouvant être produits

## 5. L'APPORT DE CES RESULTATS VIS-A-VIS DE LA NORMALISATION EUROPEENNE ET DE LA REGLEMENTATION INCENDIE APPLICABLE EN FRANCE

---

### Quels apports (*intégrations envisageables*) pour l'Eurocode 6 (EN 1996), document normatif de référence à l'échelle européenne ?

En France, le dimensionnement des bâtiments en maçonnerie repose principalement sur l'Eurocode 6 <sup>(4)</sup> (NF EN 1996) et le DTU 20.1, dont la version actuelle, publiée en 2020, s'appuie largement sur les principes de l'Eurocode 6.

A l'échelle européenne, l'Eurocode 6 (EN 1996) est le texte de référence pour les maçonneries composées de briques de terre cuite, d'éléments en silico-calcaire, d'éléments en béton de granulats courants et légers, d'éléments en béton cellulaire autoclavé, d'éléments en pierre reconstituée et en pierre naturelle. Ce texte couvre les maçonneries non-armées, armées et confinées.

La partie 1-2 de l'Eurocode 6 propose des méthodes de dimensionnement au feu pour certains types de maçonneries, regroupées en trois catégories :

- **Valeurs tabulées** pour l'épaisseur du mur en fonction du matériau et de la résistance au feu requise : Pour les maçonneries en terre cuite, en silico-calcaire, en béton de granulats courant et léger, en béton cellulaire autoclavé et en pierre artificielle, l'annexe nationale de l'Eurocode 6 partie 1-2 propose des épaisseurs minimales en fonction de la résistance requise, ainsi que des critères d'isolation et d'étanchéité lorsque le mur n'est pas porteur.

*A ce jour, aucune valeur tabulaire n'est disponible concernant la maçonnerie en pierre naturelle.*

- **Méthode de calcul « simplifiée »** : Pour certaines classes d'éléments en terre cuite, silico-calcaires, de béton de granulats légers, de granulats courants ou de béton cellulaire autoclavé, une méthode similaire à la méthode de l'isotherme à 500 °C pour le béton (Eurocode 2 partie 1-2) est proposée. Cette méthode consiste à diviser le mur en trois zones dans sa section transversale : une zone intacte, où la température reste inférieure à un seuil  $\theta_1$  ; une zone partiellement endommagée, où la température est comprise entre  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ; et une zone inefficace, sans résistance résiduelle, où la température excède  $\theta_2$ . La résistance en compression est calculée en additionnant la résistance de la première zone et celle de la deuxième, à laquelle est appliqué un facteur de dégradation spécifique au matériau. Les valeurs des températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$

varient selon le matériau. Un excentrement est également calculé pour tenir compte de la courbure thermique.

*A ce jour, aucune indication concernant les températures seuils, et évolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température, n'est fournie pour la pierre naturelle.*

- **Méthode de calcul « complexe »** : L'Eurocode 6 autorise également l'utilisation de calculs couplés thermo-mécaniques. L'évolution de certaines propriétés physiques, thermiques et mécaniques (masse volumique, conductivité thermique, capacité thermique massique, coefficient de dilatation thermique et résistance en compression) en fonction de la température est spécifiée pour les éléments en terre cuite, les éléments silico-calcaires, les éléments en béton de granulats légers, et les éléments en béton autoclavé. Des données provenant de publications de référence peuvent également être utilisées. Selon l'Eurocode 6 Partie 1-2, de tels calculs doivent prendre en compte l'évolution des propriétés thermiques et mécaniques en fonction de la température, l'effet des dilatations thermiques moyennes et différentielles ainsi que les éventuels effets de second ordre. Cette méthode de calcul est applicable pour toute courbe de montée en température, et pas seulement pour la courbe de feu normalisé ISO 834-1.

*A ce jour, aucune indication concernant l'évolution des paramètres thermiques, physiques et mécaniques en fonction de la température n'est fournie pour la pierre naturelle.*

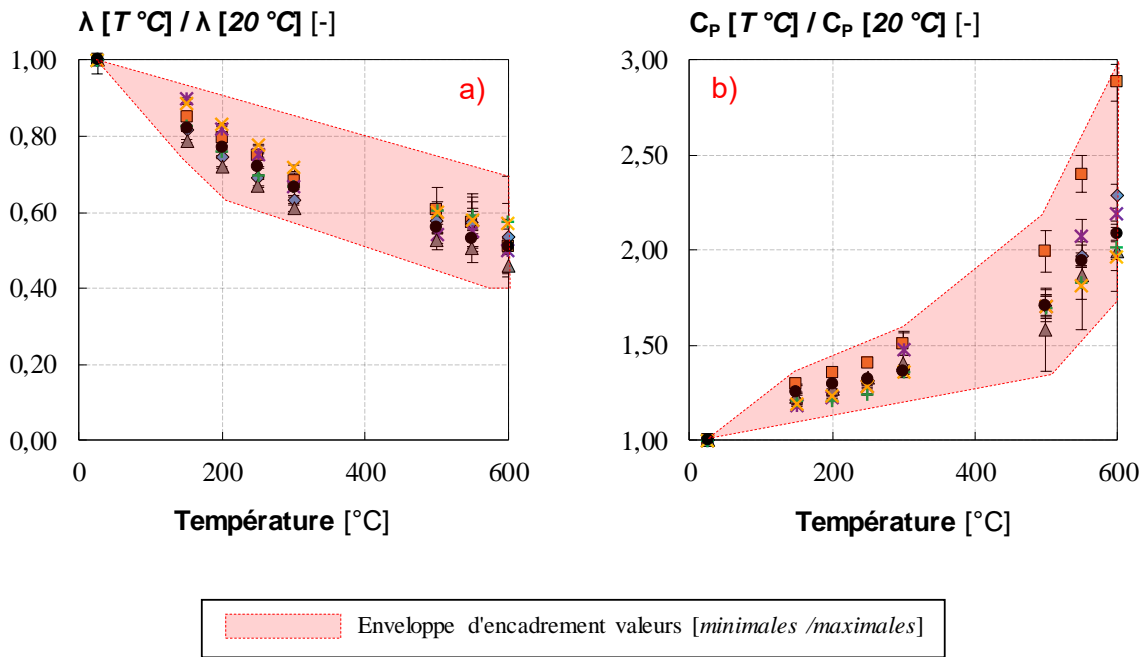
En résumé, l'Eurocode 6 est le texte de référence pour le dimensionnement des structures en maçonnerie au niveau européen. Cependant, contrairement à d'autres types de maçonnerie, il n'existe aucune donnée permettant de dimensionner au feu les éléments en pierre naturelle. En l'absence de ces informations, des hypothèses très sécuritaires sont prises en compte, ce qui rend l'utilisation de la pierre naturelle peu compétitive par rapport aux autres maçonneries pour justifier la stabilité au feu. Cela pose de nombreux problèmes, tant pour la construction neuve que pour la réhabilitation de bâtiments historiques. Il est donc nécessaire de fournir des données sur le comportement au feu de la pierre naturelle.

En ce sens, ce projet de recherche a permis de caractériser l'ensemble des paramètres thermo-physico-mécaniques nécessaires pour réaliser une simulation numérique. En complément des résultats déjà présentés dans la **Figure 10**, qui souligne les propriétés mécaniques influencées par la température, les **Figure 16** et **Figure 17** propose l'évolution de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique massique et du coefficient de dilatation thermique linéaire en fonction de la température. Des courbes enveloppes encadrent les résultats obtenus au cours de ce projet pour les pierres calcaires.

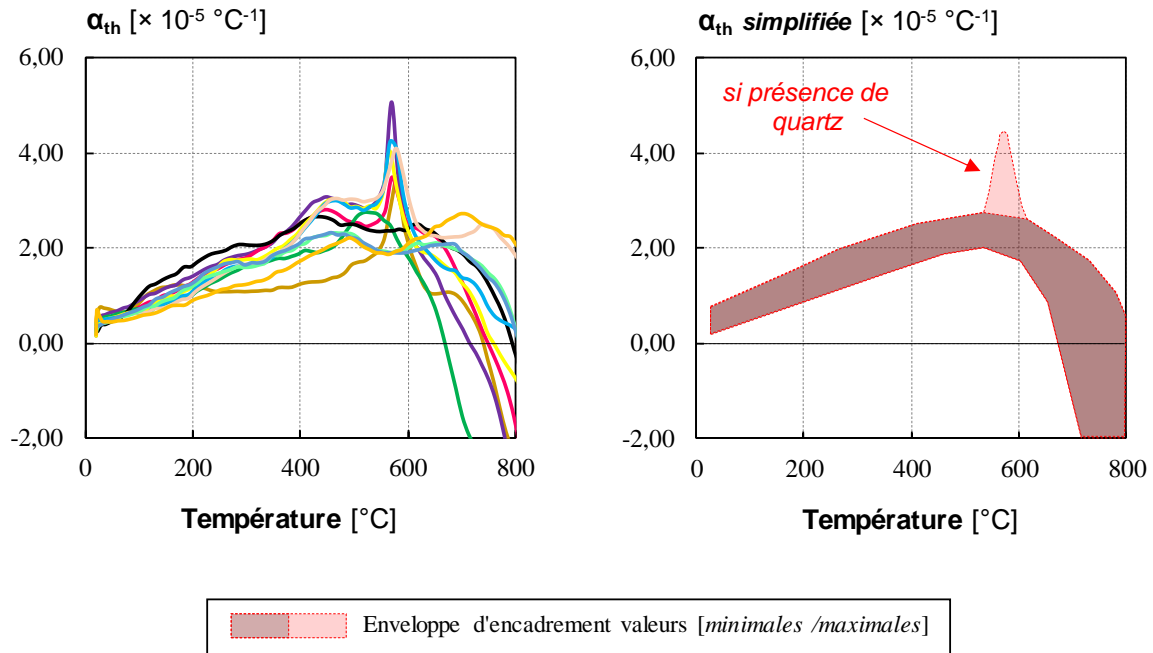
De plus, des données dépendant de la température concernant les mortiers de montage ont également été caractérisées dans le cadre de ce projet, bien qu'elles ne soient pas présentées dans ce livrable (se reporter à la partie **Bibliographie** pour consulter ces résultats).

---

<sup>4</sup> **Note** : NF EN 1996 : Calcul des ouvrages en maçonnerie



**Figure 16** – Evolution relative des propriétés thermiques mesurées à chaud des pierres calcaires de l'étude : a) conductivité thermique et b) chaleur spécifique massique



**Figure 17** – Coefficient de dilatation thermique linéaire des pierres calcaires de l'étude : a) valeurs mesurées spécifiques à chaque pierre et b) valeurs simplifiées proposées sous forme d'encadrement min : max



## Quelle réponse apportée vis-à-vis de la réglementation (spécifique) française ?

### Principes d'application de la sécurité incendie en France.

En France, la sécurité incendie dans les constructions civiles (habitations, établissements recevant du public - ERP, immeubles de moyenne et grande hauteur - IGH, ainsi que les locaux professionnels) est régie par le [Code de la Construction et de l'Habitat \(CCH\)](#).

Ce Code prévoit cependant des règles spécifiques pour les immeubles de moyenne et grande hauteur, indépendamment de leur usage. Par ailleurs, pour ce qui concerne la sécurité incendie des locaux professionnels, le Code de la Construction fait référence au Code du Travail. Le Code de la Construction et de l'Habitat se compose de deux parties : la partie législative, qui définit des règles générales fixées par des lois, et la partie réglementaire qui détaille les modalités d'application des objectifs et des règles générales décrits dans la partie législative.

La sécurité incendie est abordée dans les deux parties du Code, au sein du Livre I<sup>er</sup>, intitulé « [Construction, entretien et rénovation des bâtiments](#) », et plus précisément dans le titre IV « [Sécurité des personnes contre les risques d'incendie](#) ». Ainsi, l'article L141-1 du Code énonce les exigences suivantes : « *Les bâtiments sont implantés, conçus, construits, exploités et entretenus dans l'objectif d'assurer la sécurité des personnes :*

1. *En contribuant à éviter l'éclosion d'un incendie ;*
2. *En cas d'incendie, en permettant de limiter son développement, sa propagation, ses effets sur les personnes et en facilitant l'intervention des secours. »*

Ces objectifs peuvent être résumés comme suit : (i) permettre une évacuation sécurisée hors des bâtiments ou, pour les personnes à mobilité réduite (PMR), différer l'évacuation, (ii) désenfumer les lieux pour faciliter l'intervention et l'évacuation, et (iii) organiser les interventions et celles des secours.

La réglementation incendie est principalement prescriptive. Selon le type de bâtiment, elle impose au maître d'ouvrage une série de mesures constructives, telles que les restrictions sur l'utilisation de certains matériaux en fonction de leur inflammabilité, le nombre de sorties d'évacuation, la largeur des couloirs, le nombre d'extincteurs, la distance entre le bâtiment et la voie d'accès pour les pompiers, ainsi que la mise en place de systèmes de désenfumage, de détection, d'alerte et de balisage.

Dans le cadre de notre projet de recherche, nous retenons particulièrement l'article D141-2 du CCH : « *Le comportement au feu en cas d'incendie est apprécié d'après deux critères :*

1. *La réaction au feu, c'est-à-dire l'aliment qui peut être apporté au feu et au développement de l'incendie ;*
2. *La résistance au feu, c'est-à-dire le temps pendant lequel les éléments de construction peuvent jouer le rôle qui leur est dévolu malgré l'action d'un incendie. »*

C'est principalement le deuxième point qui nous intéresse, avec la notion claire de « résistance au feu ». Bien que la réaction au feu soit également un aspect essentiel de la sécurité incendie, elle ne sera pas abordée dans ce document. En effet, la pierre naturelle est considérée comme incombustible, ce qui signifie qu'aucun essai de caractérisation n'est requis pour la pierre calcaire. De même, d'autres types d'essais spécifiques au domaine de la sécurité incendie, comme l'essai *LEPIR II* défini par l'instruction technique 249 pour évaluer la propagation du feu par les façades, ne sont pas à considérer dans notre cas.

Les arrêtés du 25 juin 1980, du 31 janvier 1986 et du 30 décembre 2011 établissent, respectivement pour les ERP, les habitations et les immeubles de grande hauteur, les exigences de résistance au feu selon les critères de durée R, E et I, qui seront définis plus loin dans le document.

La durée de résistance au feu est étroitement liée aux conditions d'évacuation des locaux. Par exemple, la résistance au feu d'un élément porteur vertical (comme un mur ou un poteau) est de 15 minutes dans une maison individuelle isolée (habitation de 1<sup>ère</sup> famille), de 90 minutes dans un bâtiment résidentiel de 28 à 50 mètres de hauteur (habitation de 4<sup>ème</sup> famille), et de 120 minutes pour un immeuble de grande hauteur (IGH, hauteur > 50 m).

Concernant la résistance au feu, l'article D141-6 du CCH précise : « *Des arrêtés du ministre de l'intérieur fixent les différentes catégories de la classification, tant en ce qui concerne la réaction au feu, la résistance au feu que les conditions d'essais.* » Pour la résistance au feu, l'arrêté de première importance est l'arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages.

L'article 7 de l'arrêté du 22 Mars 2004 précise : « *Les performances de résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages peuvent être déterminées par une ou plusieurs des approches suivantes :*

- *essai conventionnel donnant lieu à un domaine d'application directe, conformément à l'annexe 1 ;*
- *méthode de calcul et règle de dimensionnement, selon l'annexe 2 ;*
- *référence à un procédé de fabrication ou de construction approuvé, dont la liste figure en annexe 3 ;*
- *appréciation de laboratoire agréé, établie selon l'annexe 4. »*

### **Le recours aux essais en laboratoire.**

L'article 5 de l'arrêté du 22 Mars 2004 précise : « *Les essais sont destinés à évaluer le comportement au feu des produits, des éléments de construction et d'ouvrages dans des conditions spécifiées. Les essais, effectués avec des actions thermiques prédéterminées, reproduites dans des fours appropriés, sont appelés "essais conventionnels".* »

L'annexe 1 de l'arrêté du 22 Mars 2004 stipule que les essais et le système de classification sont indiqués dans la décision 2000/367/CE du 03 Mai 2000 de la Commission Européenne. Cette dernière stipule à son tour que les essais conventionnels sont régis par la série de norme EN 1365 ([Essais de résistance au feu pour les éléments porteurs](#)) pour, entre autres, les murs porteurs (partie P1), les planchers et toitures (partie P2), les poutres (partie P3) ou les poteaux

(partie P4). Cette série de normes s'appuie sur la norme EN 1363-1, ([Essais de résistance au feu – Partie 1 : Exigences générales](#)) qui fixe en particulier les conditions de température et de pression à respecter dans les fours d'essai, les conditions d'application de charge mécanique et de choix de conditions aux limites mécaniques, ainsi que les critères de performance permettant de définir la résistance au feu du produit testé.

### **Critères de classement de résistance au feu.**

La réglementation incendie impose des critères prescriptifs pour différents types de bâtiments en termes de résistance, d'étanchéité et d'isolation au feu. La classe de résistance au feu se définit en temps (minutes). Elle se détermine sur la base du moins performant des trois critères suivants :

- La capacité portante (critère R) caractérise son aptitude à maintenir sa fonction structurale mécaniquement pendant une certaine durée. La capacité portante du corps d'épreuve est supposée assurée tant que les déplacements mesurés, *et/ou* la vitesse de déplacement reste(nt) inférieurs à des limites dépendant de certaines caractéristiques géométriques du corps d'épreuve ;
- L'étanchéité aux flammes (critère E) mesure la capacité du corps d'épreuve à assurer une fonction de séparation. Elle se détermine par un test d'inflammation d'un tampon de coton en face non exposée au feu *et/ou* par des tests de pénétration de calibres d'ouverture en face non exposée ;
- L'isolation thermique (critère I) caractérise son aptitude à limiter l'élévation de température sur la face non-exposée au feu. Ce critère est considéré assuré tant que les températures mesurées en face non-exposée ne dépassent pas (en moyenne et ponctuellement) des valeurs limites de température.

Les exigences réglementaires imposent des durées *dites* Pare-Flamme (PF) ou Coupe-Feu (CF) :

- Un élément Pare-Flamme (PF) assure les fonctions de résistance (R) et d'étanchéité (E) ;
- Un élément Coupe-Feu (CF) assure en plus la fonction d'isolation (I).

Le dimensionnement au feu repose sur l'aptitude à prédire la durée de tenue (REI) d'un élément pendant un incendie conventionnel (courbe ISO 834-1) définie dans l'Eurocode 1.

### **Appréciation de Laboratoire (APL) générique visant la maçonnerie en pierre calcaire massive.**

Depuis le 1er avril 2014, les méthodes de dimensionnement proposées par l'Eurocode 6 (EN 1996) ne sont plus autorisées. En effet, l'Annexe nationale de l'Eurocode 6 partie 1-2 interdit l'utilisation des valeurs tabulées et des méthodes de calcul. Par conséquent, même si l'arrêté du 22 mars 2004 modifié en 2011 autorise l'emploi des Eurocodes, la

résistance au feu des ouvrages en maçonnerie ne peut être déterminée que par des essais validés par des procès-verbaux ou par des avis de chantier établis par un laboratoire agréé (en résistance au feu).

Dans le cas où la résistance au feu d'un ouvrage en maçonnerie est évaluée par un procès-verbal, sa validité pour un ouvrage visé est possible si :

- Le classement validé est supérieur ou égal à la performance nécessaire ;
- Les caractéristiques des éléments testés sont identiques à ceux mis en œuvre. Un procès-verbal peut également être considéré comme valide pour des éléments de maçonnerie similaires permettant de réaliser un mur d'épaisseur supérieure ;
- La mise en œuvre des éléments est identique à l'exécution sur chantier ;
- Les éventuelles protections complémentaires sont mises en œuvre ;
- Dans le cas de murs porteurs, la charge verticale appliquée lors de l'essai est supérieure ou égale à la charge de calcul en situation d'incendie ;
- La hauteur maximale du mur autorisé par le procès-verbal n'est pas dépassée ;
- Le procès-verbal est en cours de validité au moment du dépôt du permis de construire ou de l'autorisation des travaux.

En ce sens, en capitalisant l'ensemble des résultats issus du projet, les différents partenaires œuvrent actuellement à la production d'une Appréciation de Laboratoire dite *générique*, visant la maçonnerie en pierre calcaire massive.

Ce document réglementaire sera produit par le CSTB, laboratoire feu agréé. Il permettra d'apporter une réponse réglementaire aux acteurs de la construction, prouvant que la construction en pierre calcaire massive répond favorablement à la réglementation applicable en matière de sécurité incendie.

Le document produit sera mis à disposition gratuitement par téléchargement sur le site du CTMNC (<http://www.ctmnc.fr/>).

## 6. CONCLUSION

---

La pierre naturelle est largement utilisée en maçonnerie, tant dans les monuments historiques que dans les constructions contemporaines, où elle s'associe aisément au mortier, permettant ainsi de réaliser des ouvrages architecturaux durables. Au cours des trois dernières décennies, l'incendie est devenu une menace sérieuse pour la stabilité structurelle des bâtiments en pierre.

Dans ce contexte de préservation post-incendie des ouvrages maçonnés, l'objectif principal de ce projet est d'approfondir la compréhension du comportement de la maçonnerie en pierre calcaire à haute température face à un risque incendie, en combinant une approche expérimentale multi-échelle avec de la modélisation numérique. Treize pierres calcaires, représentatives des trois classes de résistance mécanique (tendre, ferme et dure) et couramment utilisées dans la restauration des monuments historiques ainsi que dans la construction moderne, ont été sélectionnées et étudiées.

Ce projet de recherche collaboratif impliquant de nombreux partenaires experts, a permis d'apporter des réponses essentielles à cette thématique, dont les principaux enseignements et avancées sont les suivants :

- Acquérir de nouvelles données scientifiques et constituer une base de données étendue sur le comportement à haute température de la maçonnerie en pierre, en allant de l'échelle matériau jusqu'à l'échelle structurale ;
- Etablir des préconisations pour le diagnostic post-incendie d'ouvrages en pierre calcaire : méthodes, outils, analyses et interprétation ;
- Déterminer des données expérimentales essentielles, jusqu'à présent inexistantes, et contribuer à la normalisation à l'échelle européenne (Eurocode 6) ;
- Mettre à disposition des acteurs du secteur des éléments techniques et réglementaires permettant de se conformer à la réglementation incendie en France (édition en cours d'une Appréciation de Laboratoire générique, validant un classement de résistance au feu REI 120 pour la maçonnerie en pierre calcaire massive).

À l'issue de ce projet, plusieurs perspectives et pistes d'investigation complémentaires émergent :

- Exploration de nouvelles natures géologiques de pierre : grès, granit, marbre ;
- Développement et perfectionnement des modèles numériques prédictifs ;
- Etude de solutions de consolidation et renforcement des maçonneries en pierre calcaire après incendie.

## REMERCIEMENTS

---

Les membres du projet souhaitent adresser leurs remerciements aux différents partenaires et intervenants pour leur contribution déterminante au succès de ce projet de recherche. Leur collaboration a été essentielle à l'atteinte des objectifs fixés. Une reconnaissance particulière est également exprimée à l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour son soutien financier, qui a permis la réalisation de ce projet.

# BIBLIOGRAPHIE

---

Articles publiés dans des revues internationales avec comité de lecture répertoriées dans les bases de données internationales (ACL) – (3) :

- A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, M. Vigroux, J. Henin, A. Noumowé, “Comprehensive study of the post-heating mechanical performances and pore network changes of a wide variety of limestones: influence of petrographic properties”, in *Engineering Geology*, (article soumis)
- A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, M. Vigroux, A. Noumowé, “High-temperature behaviour of various limestones at the block scale”, in *Construction and Building Materials* 416 (2024), 135109, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135109>
- F. Sciarretta, J. Eslami, A.L. Beaucour, A. Noumowé, “State-of-the-art of construction stones for masonry exposed to high temperatures”, in *Construction and Building Materials* 304 (2021), 124536, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124536>

---

Communications avec actes dans un congrès international ou national (ACT) – (7) :

- A. Obaei, J. Eslami, A.L. Beaucour, D. Hoxha, A. Noumowé, P. Pimienta, “The comprehensive study of the thermo-mechanical behavior of masonry walls”, in 13<sup>th</sup> *International Conference on Structures in Fire (SIF)*, 19-21 june 2024, Coimbra, Portugal
- A. Obaei, J. Eslami, A.L. Beaucour, D. Hoxha, A. Noumowé, P. Pimienta, D.T. Pham “ Étude du comportement thermomécanique des murs en maçonneries de pierres calcaires”, in 42<sup>èmes</sup> *Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC)*, *Academic Journal of Civil Engineering* 42 (1) 607-618, 28-30 mai 2024, Le Havre, France
- P. Pimienta, A. Obaei, E. Donval, D.T. Pham, A. Noumowé, J. Eslami, D. Hoxha, “Fire behaviour of limestone masonry during and after fire”, in *International Fire Safety Symposium (IFireSS 2023)*, 21-23 june 2023, Rio de Janeiro, Brazil
- A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, A. Noumowé, “Influence of petrographical properties on the physico-mechanical behaviour of limestones at high temperatures”, in *RILEM Spring Convention & 4<sup>th</sup> International Congress on Materials & Structural Stability*, 6-10 mars 2023, Rabat, Morocco
- A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, F. Sciarretta, A. Noumowé, J.D. Mertz, J. Henin “Influence des propriétés pétrographiques sur le comportement physico-mécanique des pierres calcaires à hautes températures”, in *Conférence Internationale MATERIAUX 2022*, 24-28 octobre 2022, Lille, France
- A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, M. Vigroux, A. Noumowé, “High-temperature behaviour of various limestone used in heritage buildings at material and block scales”, in *AIP (Advances in Fracture and Damage mechanics)*, *Conference Proceedings* 2848

- **A. Daoudi, J. Eslami, A.L. Beaucour, M. Vigroux, A. Noumowé**, “Comportement à haute température des blocs en pierres calcaires utilisées dans les monuments historiques”, in *40<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC)*, *Academic Journal of Civil Engineering* 40 (1), 23-25 mai 2022, Lille, France

---

**Manuscrit de thèse de doctorat – (3) :**

- **A. Daoudi**, “Comportement expérimental multi-échelle de la maçonnerie en pierre calcaire des monuments historiques exposés à des températures élevées” Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, *Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC)*, CY Cergy Paris Université, 2024, <https://theses.fr/2024CYUN1302>

*Prochainement :*

- **A. Obaei**, Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, *Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC)*, CY Cergy Paris Université, 2025
- **V. Ngoudjou**, Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, *Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC)*, CY Cergy Paris Université, 2025

---

**Organisation de Journées Techniques et colloques – (4) :**

- **Colloque L2MGC**, “Bâtiments et ouvrages en béton, pierre ou terre : comportement du matériau en situation d’incendie”, 29 juin 2023, Neuville-sur-Oise, France
- **Journée Technique au LRMH**, “Journée matériaux en température : Notre-Dame... et autres monuments”, 5 avril 2023, Champs-sur-Marne, France
- **14<sup>ème</sup> Journée Technique du CTMNC**, “La pierre naturelle et le feu”, 23 juin 2022, Paris, France
- **Colloque L2MGC**, “Bâtiments et ouvrages en béton - Monuments historiques en pierre : comportement du matériau en situation d’incendie”, 24 juin 2021, Neuville-sur-Oise, France