LA PIERRE NATURELLE ET LE FEU

14E JOURNÉE TECHNIQUE DU CTMNC

23 JUIN 2022

HÔTEL HOLIDAY INN - 92110 CLICHY

CTMNC

Terre et Pierre
Expertise et Innovation

LA PIERRE
NATURELLE
ET LE FEU
JEUDI 23 JUIN 2022
HÔTEL HOLIDAY INN PARIS
PORTE DE CLICHY
2, RUE DU 8 MAI 1945 – 92110 CLICHY
PARTICIPATION AUX FRAIS : 35,00 € TTC
COMPREND :
ACCÈS AUX CONFÉRENCES, REPAS, PAUSE, DOSSIER
DANS LA LIMITE DES PLACES DISPONIBLES (75 MAXI)
CONTACT
NADÈGE VERRIER
CTMNC-ROC@CTMNC.FR
TÉL : 01 44 37 50 00
INSCRIPTION À L'AIDE DU BULLETIN JOINT,
AVANT LE 10 JUIN 2022

PROGRAMME

ANIMATEUR : Gilles Martinet, secrétaire général du SNROC

9H00 - 9H30	ACCUEIL
9H30 - 9H45	INTRODUCTION Emeric de Kervenoaël, vice-président du CTMNC
9H45 – 10H30	PIERRE ATTACHÉE : ESSAI LEPIRII Martin Vigroux, Chef de projet CTMNC
10H30 – 11H30	COMPORTEMENT AU FEU DES MURS EN PIERRES NATURELLES : EXPERIMENTATION ET MODELISATION Élodie Donval, Doctorante CSTB/CTMNC
11H30 – 12H15	PROJET ANR SUR LA PRÉSERVATION DES MONUMENTS EN MAÇONNERIES DE PIERRE FACE AUX INCENDIES Javad Eslami, Maître de conférences à CY Cergy Paris Université
12H15 – 13H45	PAUSE DÉJEUNER
13H45 – 14H45	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE PIERRES DE MAÇONNERIES EXPOSÉES A UNE TEMPERATURE ÉLEVÉE Ayoub Daoudi, Doctorant au L2MGC de CY Cergy Paris Université
14H45 – 16H00	PIERRES D'ORIGINE DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS ET BESOINS / RESSOURCES EN PIERRES « NEUVES » SUITE A L'INCENDIE DE 2019 David Dessandier, BRGM Lise Leroux, LRMH
16H00 – 16H30	QUESTIONS RÉPONSES avec les intervenants
16h30 - 16H45	CONCLUSION Emeric de Kervenoaël, vice-président du CTMNC

HÔTEL HOLIDAY INN PARIS

PORTE DE CLICHY
2, RUE DU 8 MAI 1945 - 92110 CLICHY
SALLE OXYGENE

CONTACT

NADÈGE VERRIER
CTMNC-ROC@CTMNC.FR
TÉL : 01 44 37 50 00

PIERRE NATURELLE

CTMNC
Terre et Pierre
Expertise et Innovation

Pierre attachée : essai *LEPIR II*

Martin VIGROUX - CTMNC

CTMNC

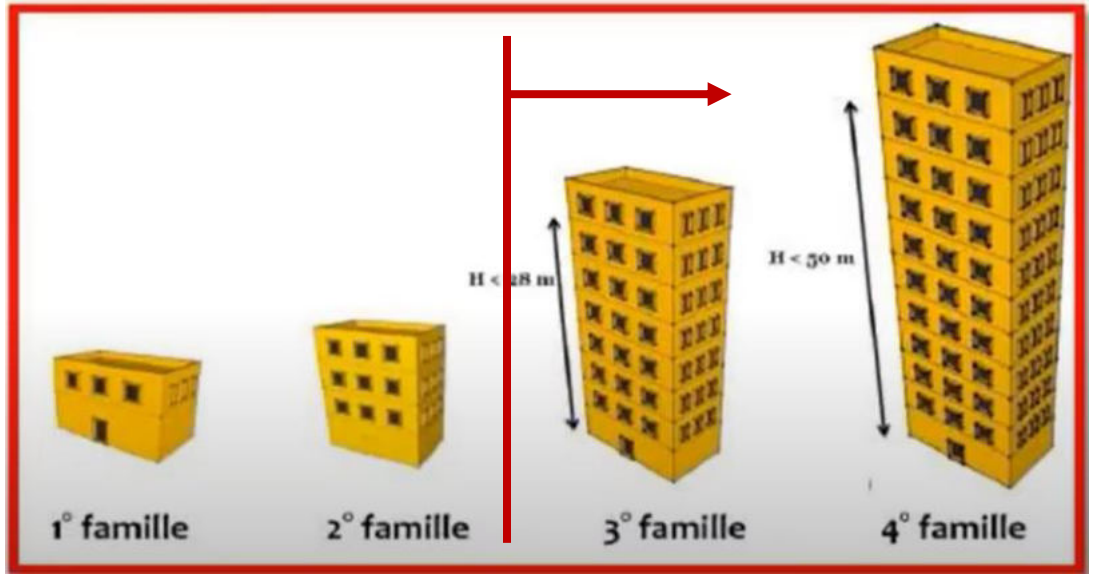
Terre et Pierre
Expertise et Innovation

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

1. Contexte et objectif de l'étude

- <u>Contexte</u> : l'*arrêté du 7 août 2019* a modifié l'*arrêté du 31 janvier 1986* relatif à la protection contre l'incendie des bâtiments d'habitation



→ Lorsque le système de façade comprend des vides constructifs (= lame d'air)

(cas de la pierre mince attachée selon le NF DTU 55.2)

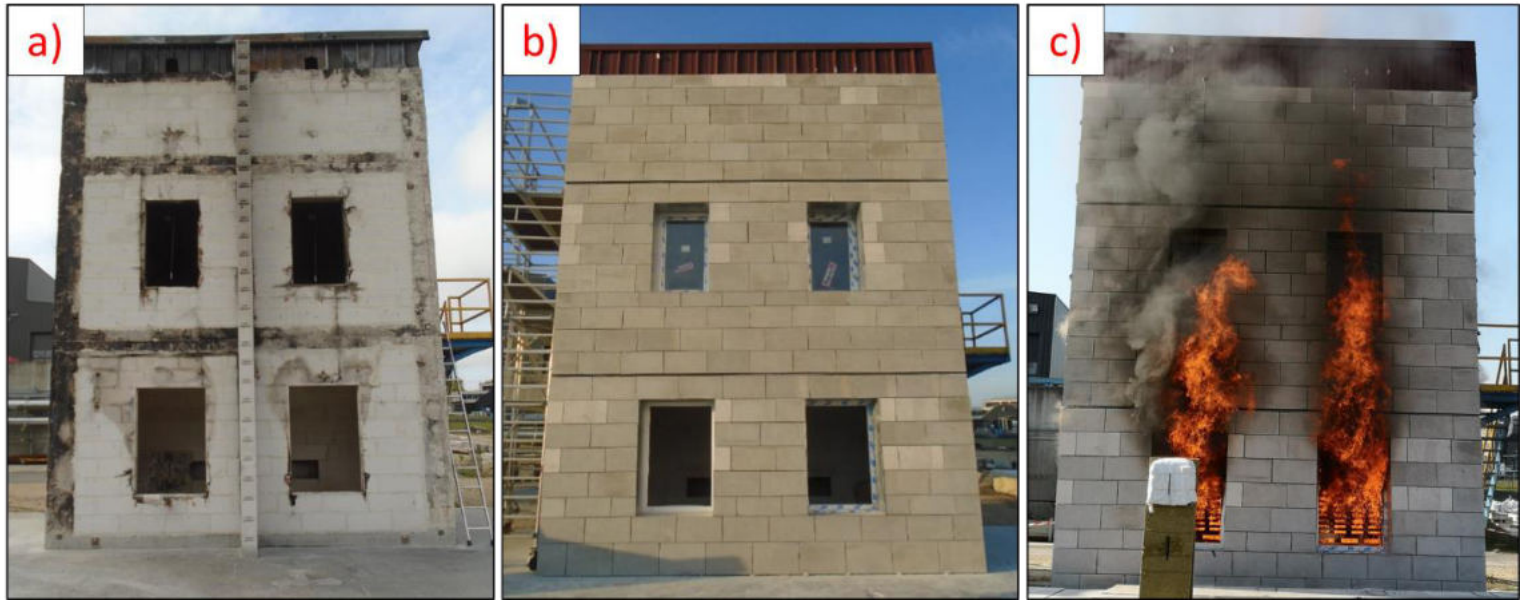
→ implique une Appréciation de laboratoire qui valide des dispositions constructives permettant de limiter la propagation du feu

1. Contexte et objectif de l'étude

- <u>Objectif</u> : → Réalisation d'un essai au feu *LEPIR II* chez un laboratoire feu agréé

  → Essai conduit sur une configuration dite « *générique – worst case* »

  → Rédaction d'un Guide de préconisations



a) *Façade brute recevant le support béton de 16 cm d'épaisseur ;*

b) *Maquette finalisée avant essai (5,65 m de longueur pour une hauteur de 7,20 m ;*

c) *Maquette soumise au feu après 15 min d"essai*

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2

- <u>Définition</u> : Revêtement mural constitué de plaques de pierre fixées à un support stable par des pattes mécaniques en métal inoxydable dans la masse et ancrées par des chevilles métalliques inoxydables au support.

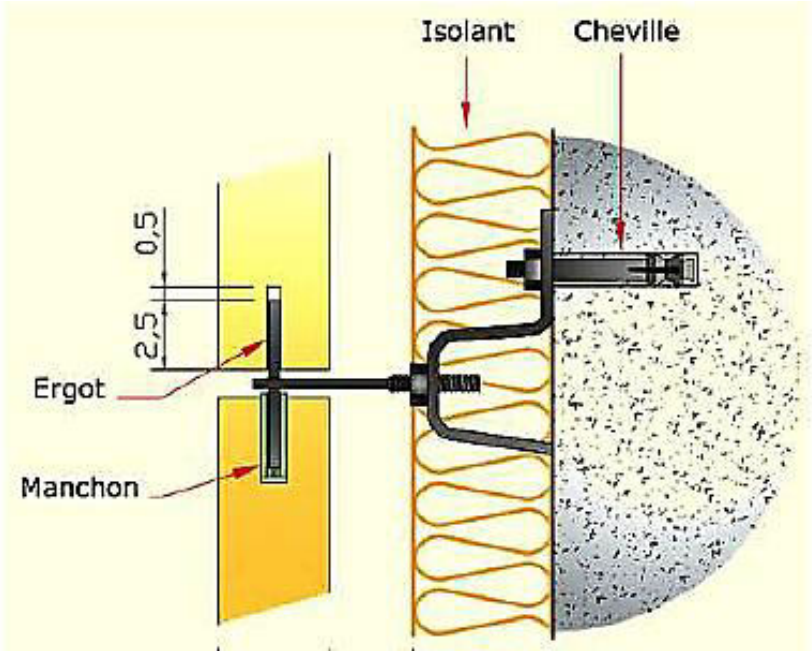
Tableau 2 — Types de fixation autorisés en fonction du support, avec couche d'isolation extérieure

Types de support	Types de fixation				
	Agrafes avec polochon		Attaches sans polochon		Ancrage sur ossature intermédiaire
	Scellées	Fixées mécaniquement	Scellées	Fixées mécaniquement	
Béton armé ou non	Non	Non	Oui	Oui	Oui

→ revêtements fixés par attaches métalliques sans polochon

2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2

- <u>Définition</u> : Revêtement mural constitué de plaques de pierre fixées à un support stable par des pattes mécaniques en métal inoxydable dans la masse et ancrées par des chevilles métalliques inoxydables au support.



2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2

- <u>Caractéristiques principales</u> : le choix de la pierre naturelle

NF B 10-601 COMPIL 1 — **Produits de carrière — Pierres naturelles — Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles**
Novembre 2021

↓

Tableau 2 — Pierres naturelles pour revêtements muraux attachés en pierre mince d'épaisseur < 80 mm

Essais d'identité + **Essais d'aptitude à l'emploi**

Gélivité	NF EN 12371
Résistance moyenne aux attaches[a, b]	NF EN 13364
Détermination de la résistance du marbre aux cycles thermiques et d'humidité	NF EN 16306

2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2

- Caractéristiques principales : formats, dimensions, dispositions, etc…

Utilisation en **partie courante :**
❑ L'**épaisseur** varie de : **27 mm à 80 mm**
❑ La **surface** des éléments est limitée à : **1 m²**
❑ L'**élancement** (rapport longueur / largeur) est limité à : **3**
❑ La **longueur maximale** admise est limitée à : **1,40 m**
❑ **Largeur minimale** de la **lame d'air : 2 cm**
❑ Le **nombre d'agrafes** à prévoir **par plaque** est de : **4**

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

La pierre

Dénomination
BLEU DE LIGNIERES

Nature
Type de pierre : Calcaire
Nature pétrographique : Calcaire à organismes
Age géologique : Jurassique moyen, étage Bathonien

Aspect
Fond gris bleu de trame serrée de veinage fin

Lieu d'extraction
Bierry-les-Belles-Fontaines (Yonne)
Coordonnées GPS : 47.61264247, 4.17665232

Producteur
ROCAMAT

Adoucie

	Référence normative	Valeur moyenne
Masse volumique apparente (kg/m3)	NF EN 1936	2490
Porosité ouverte (%)	NF EN 1936	8,1
Résistance à la flexion (MPa)	NF EN 12372	10,5
Capillarité C1 – perpendiculaire (g.m-2.s-1/2)	NF EN 772-11	7
Capillarité C2 – parallèle (g.m-2.s-1/2)	NF EN 772-11	6
Compression Maçonnerie (Mpa)	NF EN 772-1	127,2
Gel (cycles)	NF EN 12371	-
Résistance aux attaches (N) 40mm Type I	NF EN 13364	2700

23 formats différents :

			Observations :
Nombre total d'éléments :	215	-	-
Plus grande dimension :	62,00	cm	Plus grande dimension < 1,40 m Conforme au DTU 55.2
Plus petite dimension :	20,50	cm	
Plus grande surface :	0,22	m²	Plus grande surface < 1 m² Conforme au DTU 55.2
Plus petite surface :	0,07	m²	
Plus grand élancement :	2,83	-	Plus grand élancement < 3 Conforme au DTU 55.2
Plus petit élancement :	1,02	-	

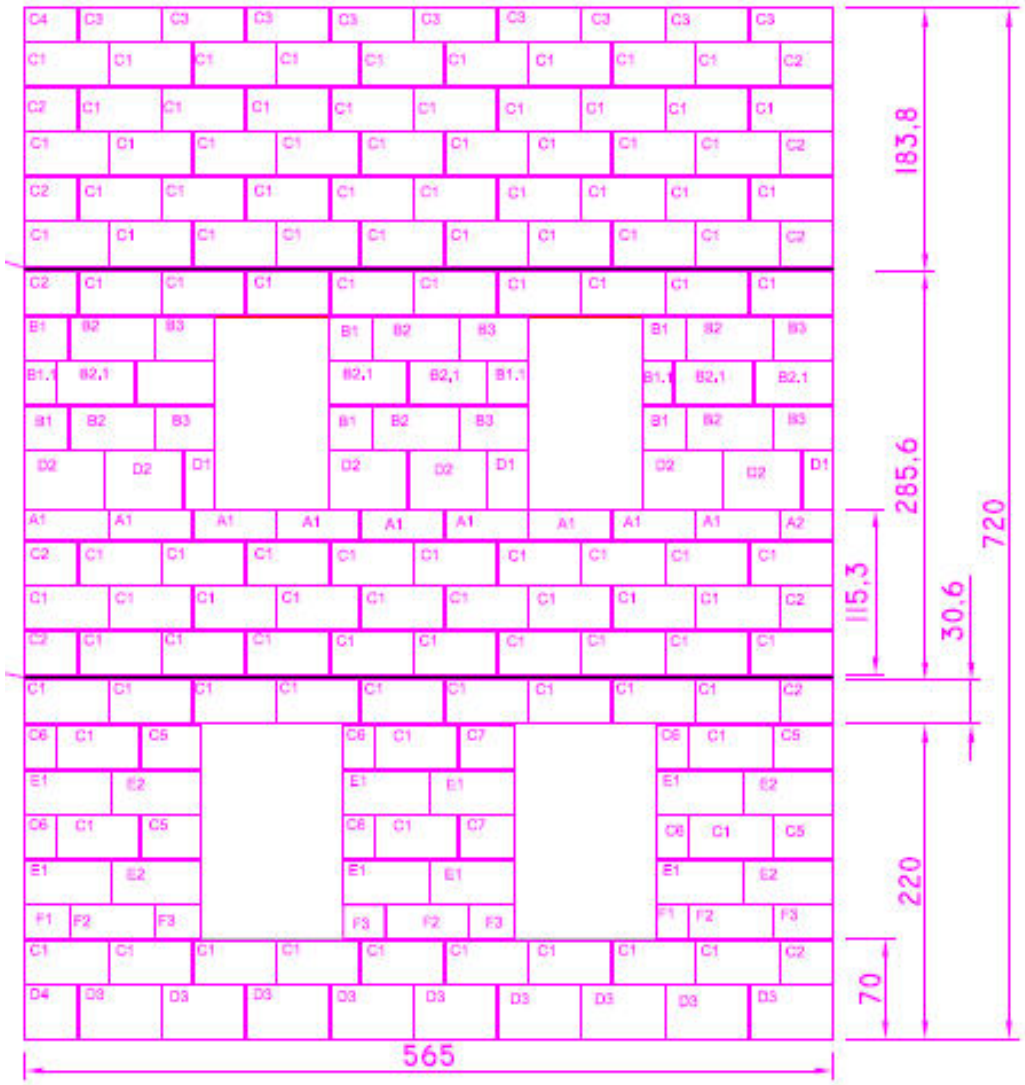
- Épaisseur des plaques : 40 mm
- Épaisseur des joints ouverts : 7 mm
- Épaisseur de joint horizontale pour les bavettes de recoupement : 40 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

La pierre

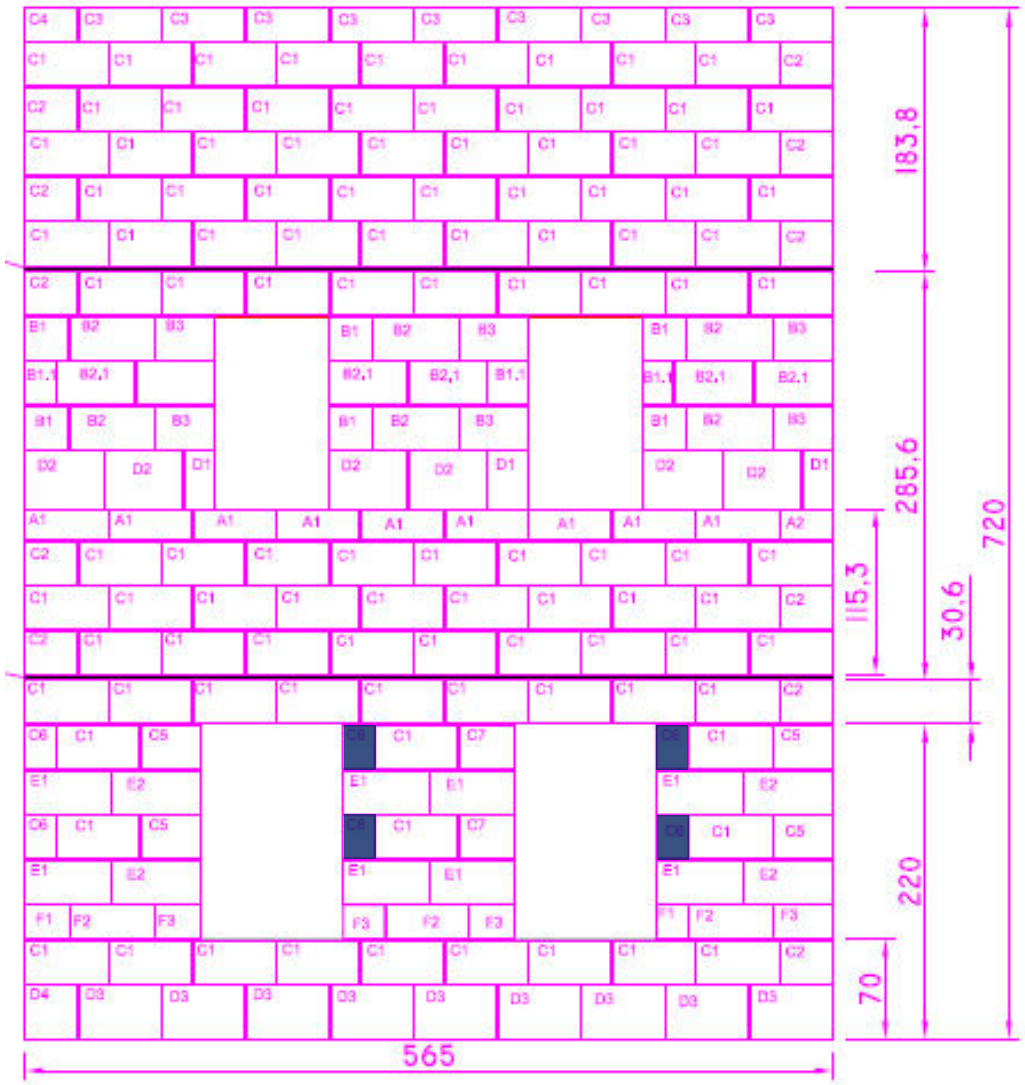
215 éléments

23 formats différents



3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

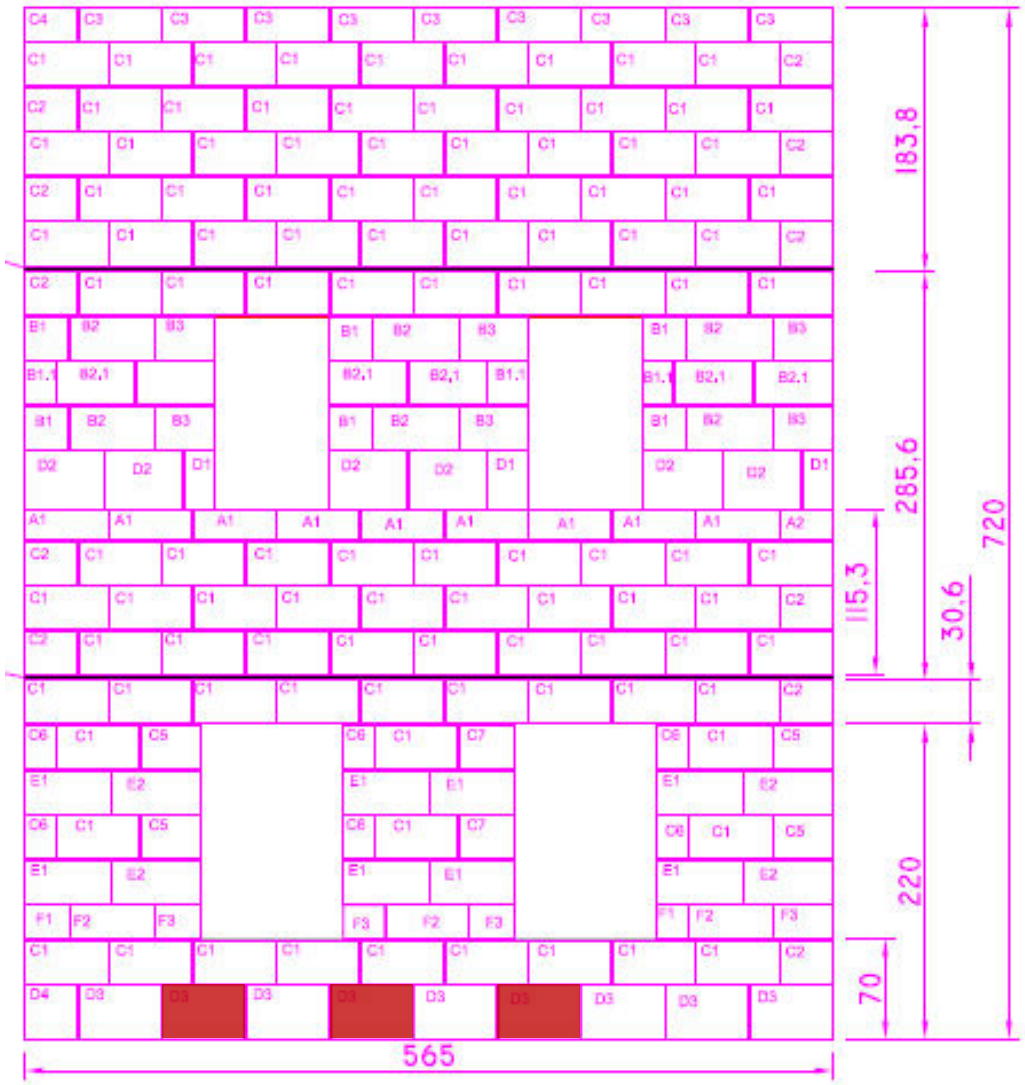
La pierre



Petit format

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

La pierre



Grand format

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

- Support béton banché ;
- Plaques de pierre fixées à la façade support par l'intermédiaire d'attaches en acier inoxydable de référence SRM290 (Etanco) - épaisseur 4 mm ;
- Pierres fixées aux attaches par l'intermédiaire d'un ergot M8 x 25 mm en acier encastré dans la pierre, fixé sur une tige à méplat M12 x 80 mm en acier inoxydable, elle-même solidarisée à l'attache par un écrou M12 serti ;
- Lame d'air ventilée de 40 mm ;
- Isolation : 2 × 140 mm de laine de verre (ISOFACADE NOIR 35R) ;
- Bavette « *invisible* » s'arrêtant au nu extérieur du parement pierre (profilé en tôle d'acier galvanisé pliée, d'épaisseur 15/10 mm) ;
- Encadrement des baies (linteau, appui et tableaux) : en tôle d'aluminium d'épaisseur 10/10 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

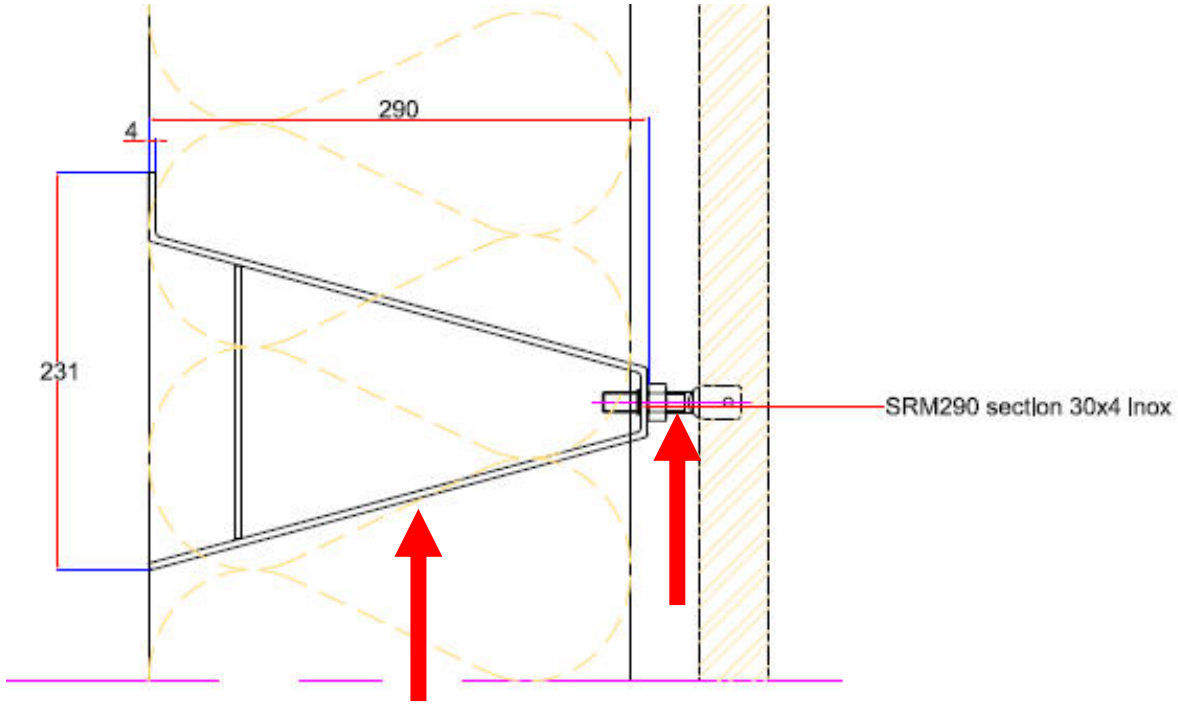
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

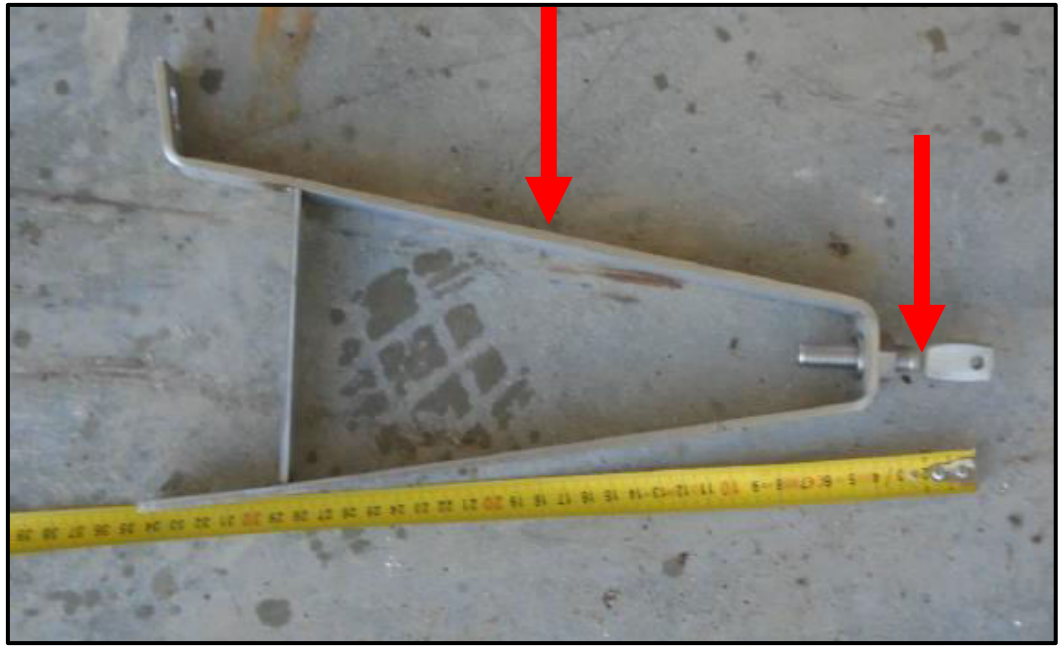
Autres caractéristiques :

- Support béton banché ;
- Plaques de pierre fixées à la façade support par l'intermédiaire d'attaches en acier inoxydable de référence SRM290 (Etanco) - épaisseur 4 mm ;
- Pierres fixées aux attaches par l'intermédiaire d'un ergot M8 x 25 mm en acier encastré dans la pierre, fixé sur une tige à méplat M12 x 80 mm en acier inoxydable, elle-même solidarisée à l'attache par un écrou M12 serti ;
- Lame d'air ventilée de 40 mm ;
- Isolation : 2 × 140 mm de laine de verre (ISOFACADE NOIR 35R) ;
- Bavette « *invisible* » s'arrêtant au nu extérieur du parement pierre (profilé en tôle d'acier galvanisé pliée, d'épaisseur 15/10 mm) ;
- Encadrement des baies (linteau, appui et tableaux) : en tôle d'aluminium d'épaisseur 10/10 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

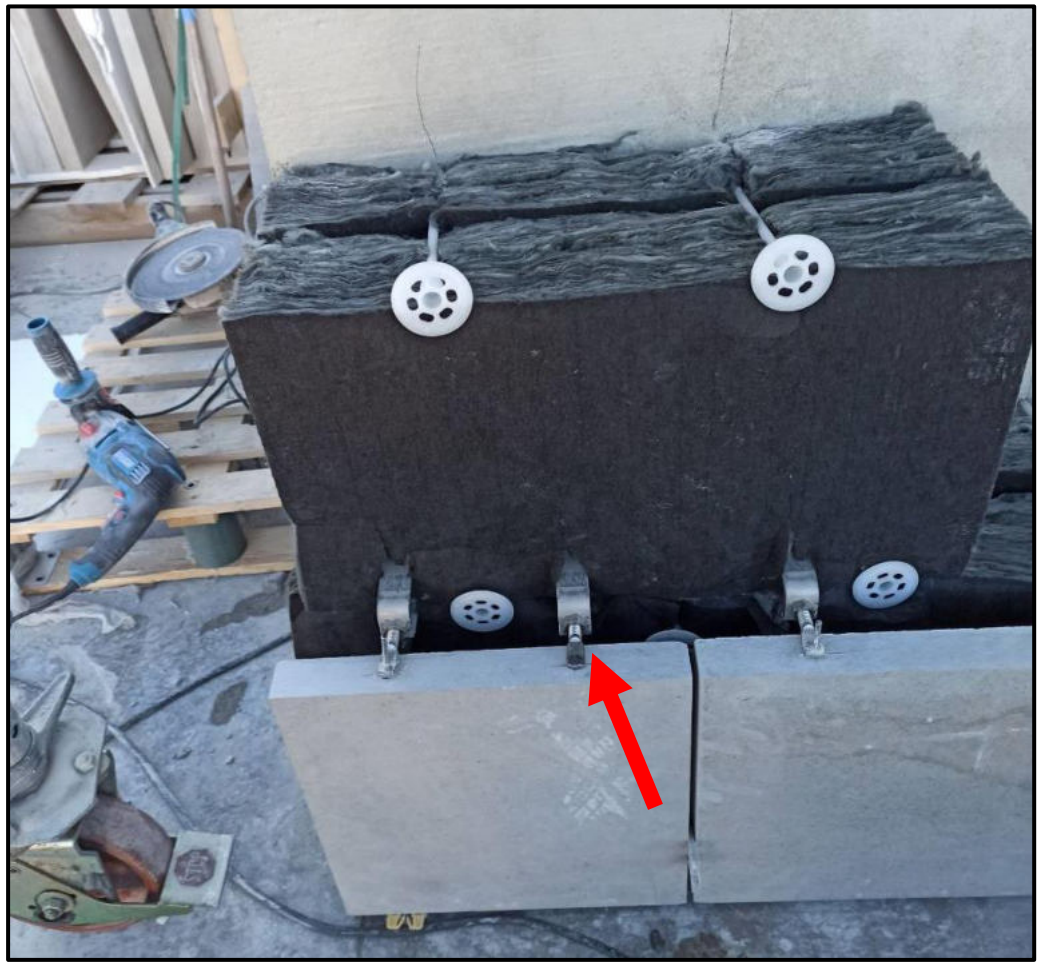
Autres caractéristiques :





3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

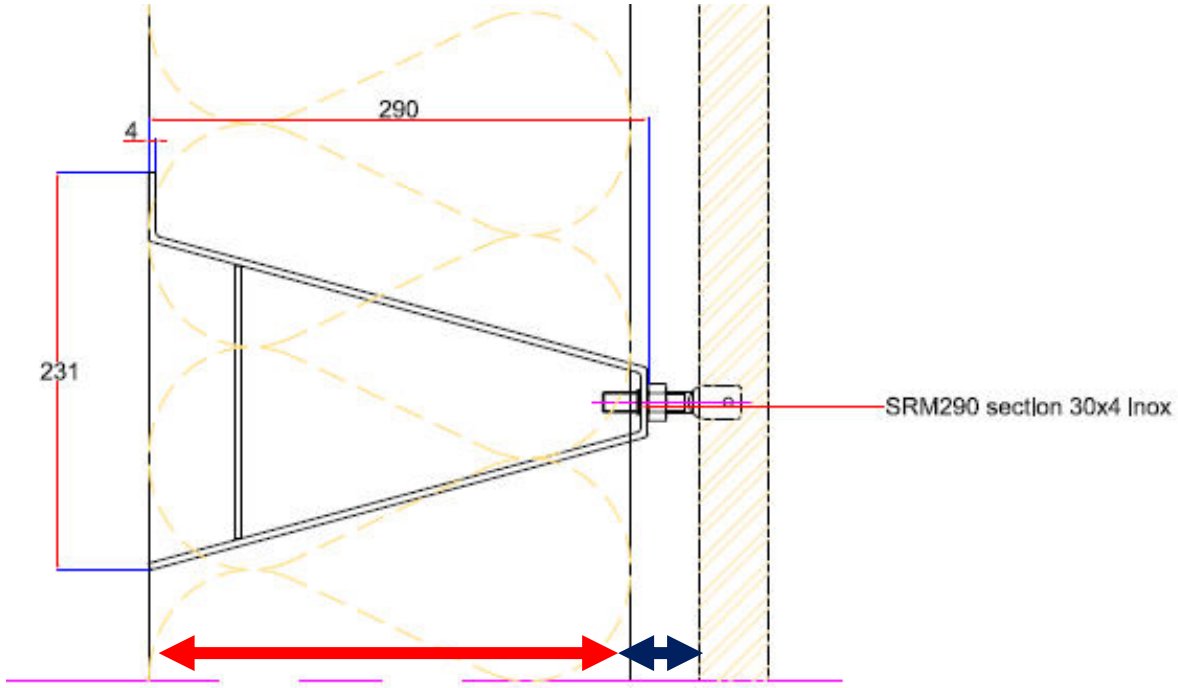


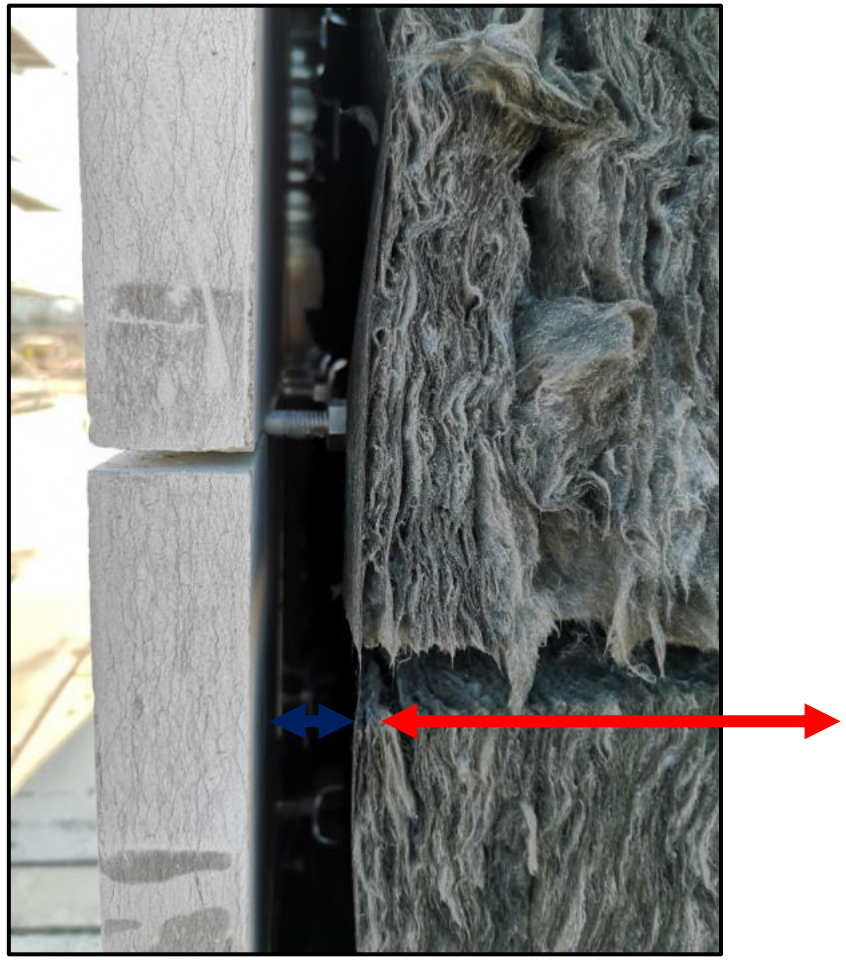
Autres caractéristiques :

- Support béton banché ;
- Plaques de pierre fixées à la façade support par l'intermédiaire d'attaches en acier inoxydable de référence SRM290 (Etanco) - épaisseur 4 mm ;
- Pierres fixées aux attaches par l'intermédiaire d'un ergot M8 x 25 mm en acier encastré dans la pierre, fixé sur une tige à méplat M12 x 80 mm en acier inoxydable, elle-même solidarisée à l'attache par un écrou M12 serti ;
- Lame d'air ventilée de 40 mm ;
- Isolation : 2 × 140 mm de laine de verre (ISOFACADE NOIR 35R) ;
- Bavette « *invisible* » s'arrêtant au nu extérieur du parement pierre (profilé en tôle d'acier galvanisé pliée, d'épaisseur 15/10 mm) ;
- Encadrement des baies (linteau, appui et tableaux) : en tôle d'aluminium d'épaisseur 10/10 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :



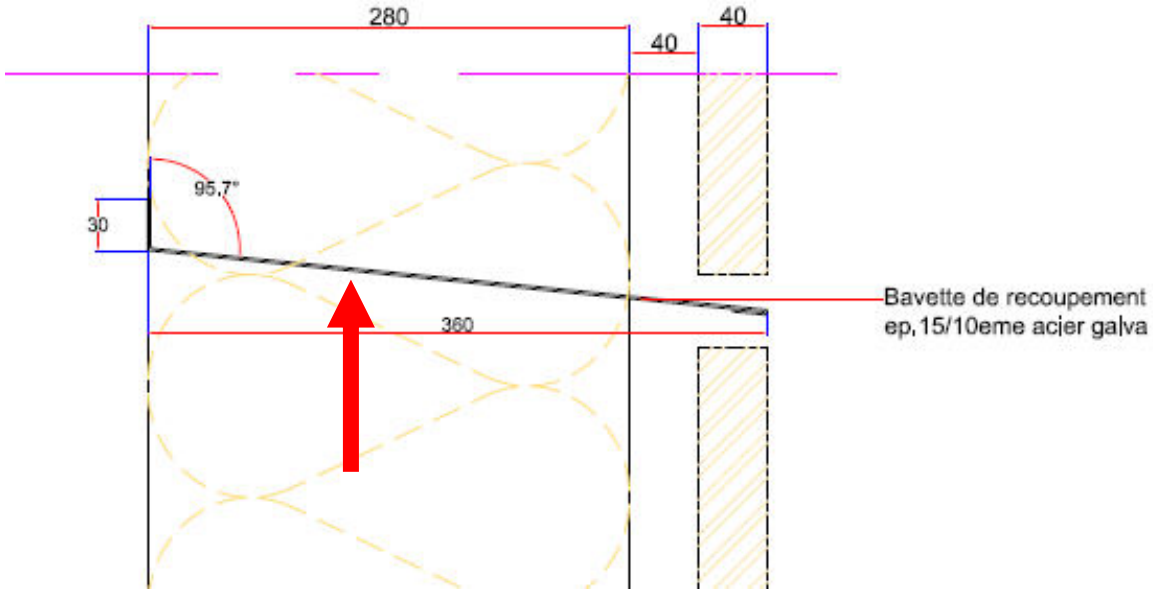


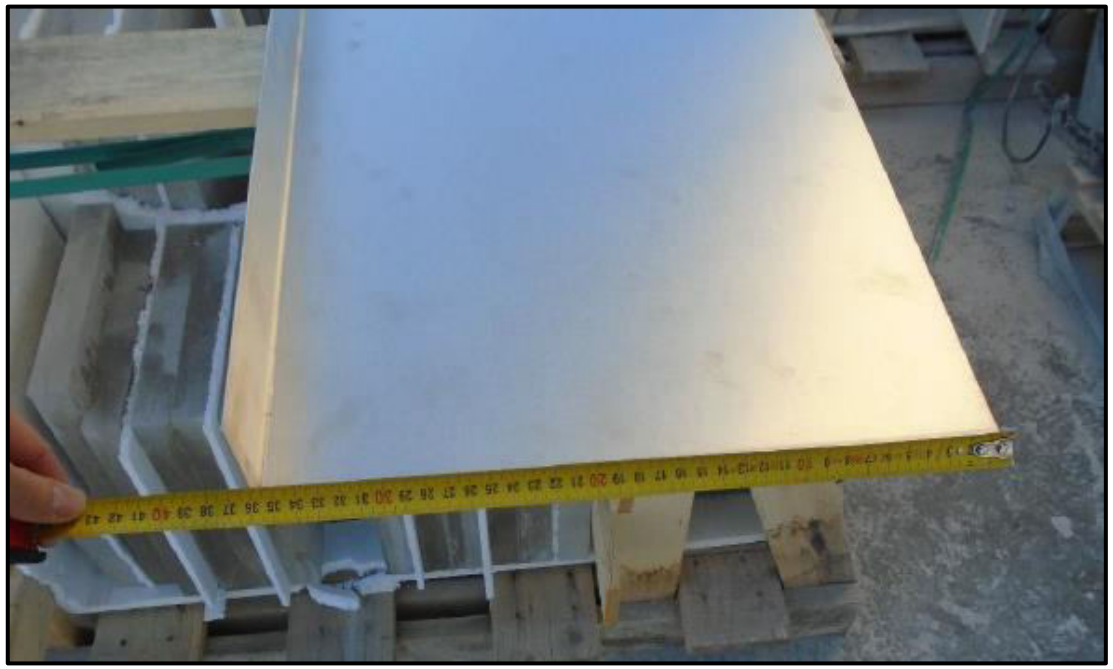
Autres caractéristiques :

- Support béton banché ;
- Plaques de pierre fixées à la façade support par l'intermédiaire d'attaches en acier inoxydable de référence SRM290 (Etanco) - épaisseur 4 mm ;
- Pierres fixées aux attaches par l'intermédiaire d'un ergot M8 x 25 mm en acier encastré dans la pierre, fixé sur une tige à méplat M12 x 80 mm en acier inoxydable, elle-même solidarisée à l'attache par un écrou M12 serti ;
- Lame d'air ventilée de 40 mm ;
- Isolation : 2 × 140 mm de laine de verre (ISOFACADE NOIR 35R) ;
- Bavette « *invisible* » s'arrêtant au nu extérieur du parement pierre (profilé en tôle d'acier galvanisé pliée, d'épaisseur 15/10 mm) ;
- Encadrement des baies (linteau, appui et tableaux) : en tôle d'aluminium d'épaisseur 10/10 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :





3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

- Support béton banché ;
- Plaques de pierre fixées à la façade support par l'intermédiaire d'attaches en acier inoxydable de référence SRM290 (Etanco) - épaisseur 4 mm ;
- Pierres fixées aux attaches par l'intermédiaire d'un ergot M8 x 25 mm en acier encastré dans la pierre, fixé sur une tige à méplat M12 x 80 mm en acier inoxydable, elle-même solidarisée à l'attache par un écrou M12 serti ;
- Lame d'air ventilée de 40 mm ;
- Isolation : 2 × 140 mm de laine de verre (ISOFACADE NOIR 35R) ;
- Bavette « *invisible* » s'arrêtant au nu extérieur du parement pierre (profilé en tôle d'acier galvanisé pliée, d'épaisseur 15/10 mm) ;
- Encadrement des baies (linteau, appui et tableaux) : en tôle d'aluminium d'épaisseur 10/10 mm

3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai

Autres caractéristiques :

Autres caractéristiques :

Maquette finalisée,
prête pour l'essai

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

4. Principe de l'essai LEPIR II

- Réalisé selon l'arrêté du 10 septembre 1970 du Ministère de l'Intérieur et de son protocole d'application entériné en CECMI le 11 juin 2013 ;
- Consiste à solliciter thermiquement une façade simulant un bâtiment RDC + deux niveaux (deux étages inférieurs étant équipés de fenêtres – ouvertes au RDC) ;
- Bûcher de 600 kg situé dans la pièce du rez-de-chaussée ;
- Métrologie mise en œuvre : mesures de température et de flux radiatif ;

→ Objectifs :

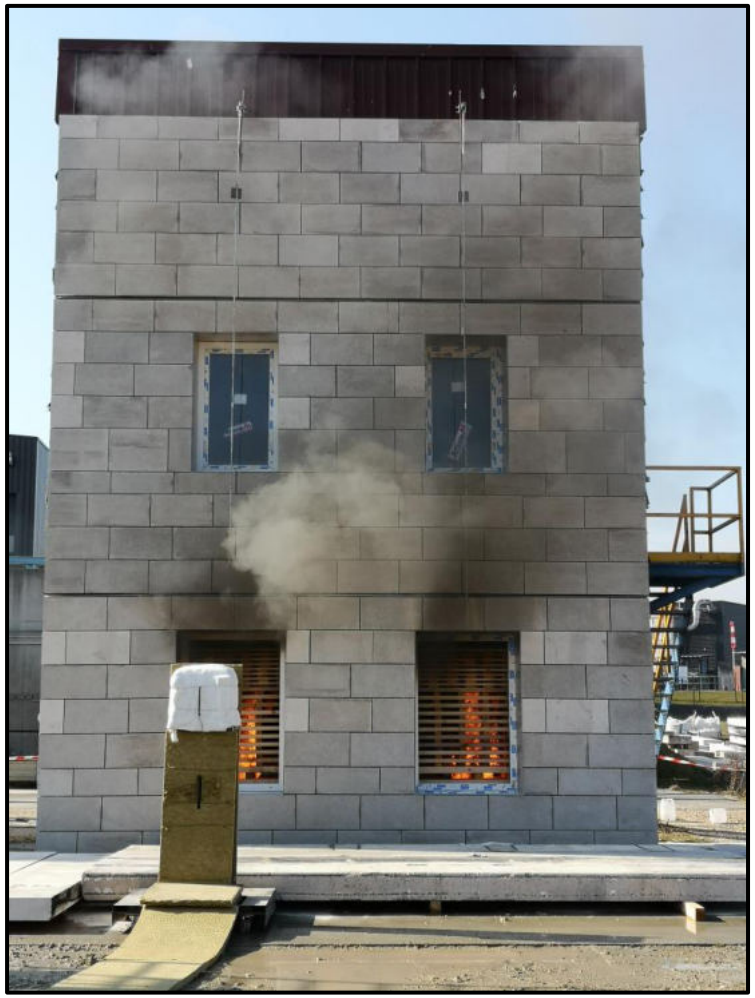
- Comportement de la façade : analyser et vérifier la non propagation des flammes verticalement et latéralement ;
- Vérifier si chute d'éléments lors de l'essai (masse, formats, …)

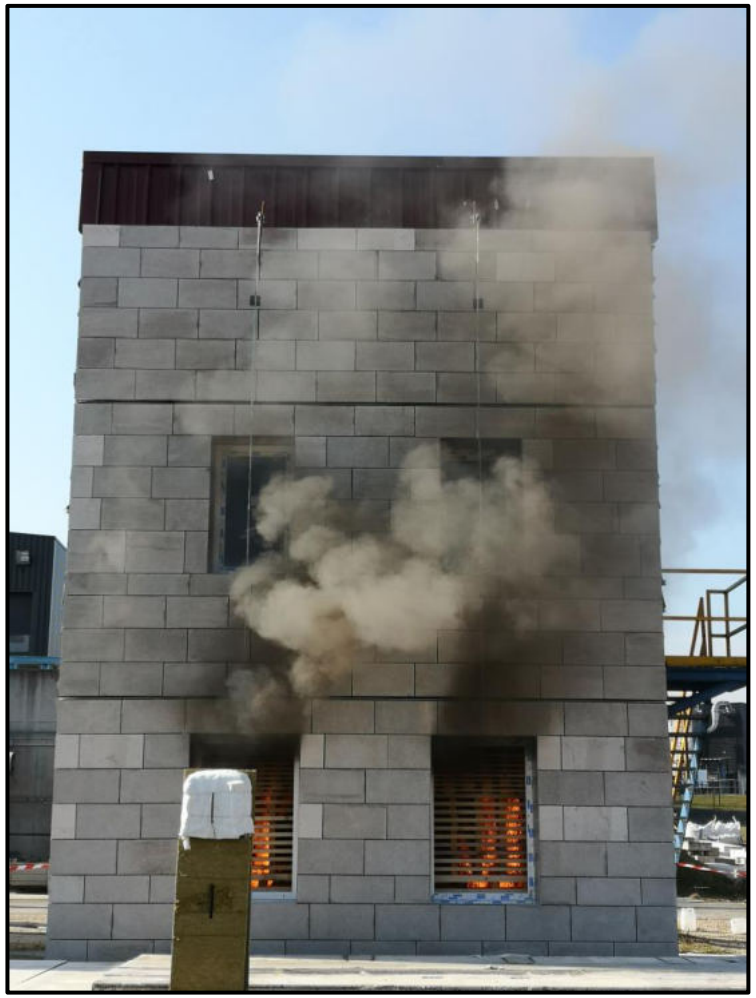
4. Principe de l'essai LEPIR II

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

5. Résultats de l'essai





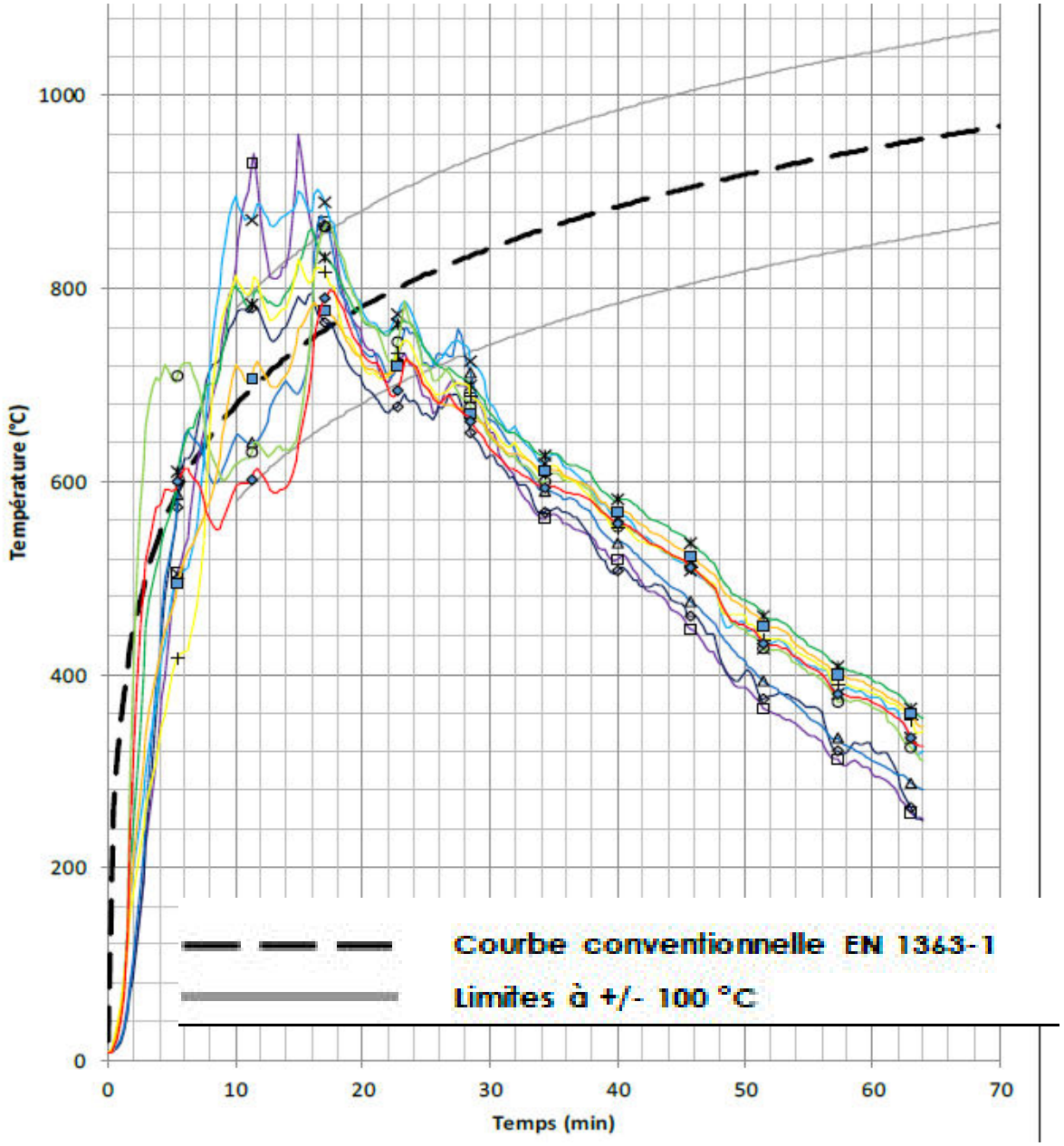
5. Résultats de l'essai

5. Résultats de l'essai

5. Résultats de l'essai

5. Résultats de l'essai

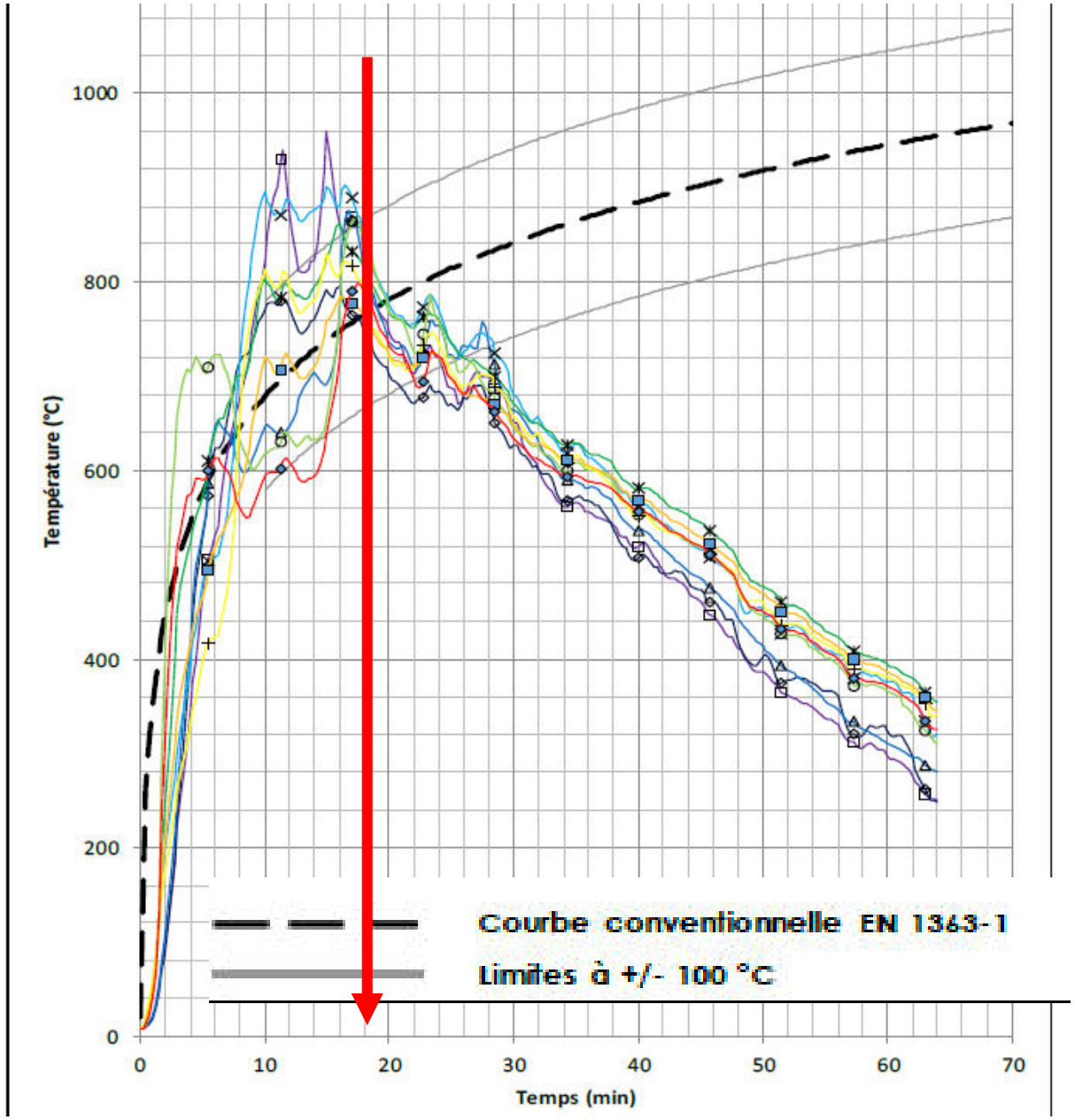
- Températures intérieures au RDC :



5. Résultats de l'essai

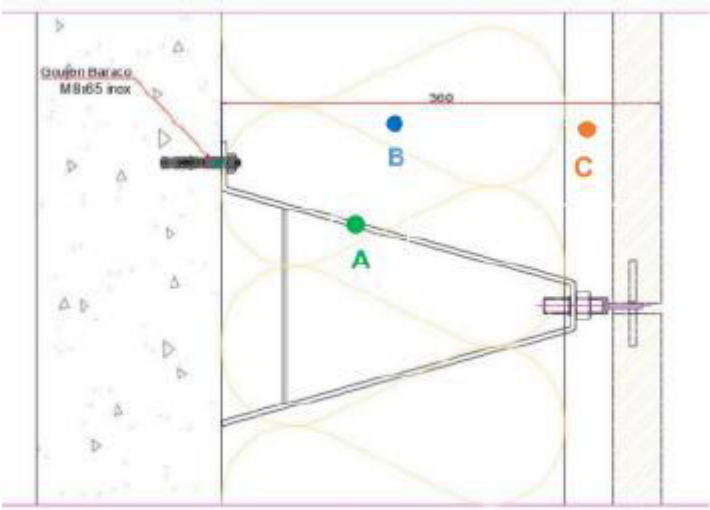
- Températures intérieures au RDC :

→ Effondrement du bûcher à 18 min



5. Résultats de l'essai

- Températures maximales relevées en différentes localisations (bornes sup/inf) :



RDC intérieur : ≈ 960 - 800 °C

R+1 intérieur : ≈ 58 -16 °C

R+2 extérieur : ≈ 220 - 210 °C

Attaches au droit des panaches de flammes : ≈ 370 - 70 °C *R+1*

R+1 - R+2 ½ épaisseur d'isolant : ≈ 100 - 16 °C

R+1 - R+2 ½ épaisseur de la lame d'air : ≈ 550 - 25 °C

5. Résultats de l'essai

Conformément aux critères définis dans les textes de référence et au terme de 30 minutes d'évaluation, il en ressort :

- aucune propagation n'a été observée au R+2 ;
- aucune propagation latérale sur l'ensemble de la largeur de la façade n'a été constatée au R+1 et au R+2 ;
- aucun percement de la peau externe n'a été observé au R+2 ;
- après analyse des capteurs de température, aucune inflammation n'a été relevée au R+2.

Plan de cette présentation :

1. Contexte et objectif de l'étude
2. Définition du procédé constructif selon le NF DTU 55.2
3. Descriptif détaillé du système soumis à l'essai
4. Principe de l'essai *LEPIR II*
5. Résultats de l'essai
6. Conclusion et perspectives de cette étude

6. Conclusion et perspectives de cette étude

- Obtention (à venir) d'une *Appréciation de laboratoire*, qui apporte une réponse réglementaire aux acteurs de la filière PN et qui prouve que ce procédé traditionnel répond favorablement à la réglementation applicable en matière de sécurité incendie

- Rédaction d'un Guide de Préconisations

Martin VIGROUX
Ingénieur bâtiment Pierre Naturelle
Tel : +33 (0) 1 45 37 77 89
Mobile : +33 (0) 7 88 49 53 68
E-mail : vigroux.m@ctmnc.fr

Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
17, rue Letellier - 75 015 PARIS
200, avenue Général de Gaulle - 92 140 CLAMART

Terre et Pierre
Expertise et Innovation
CTMNC

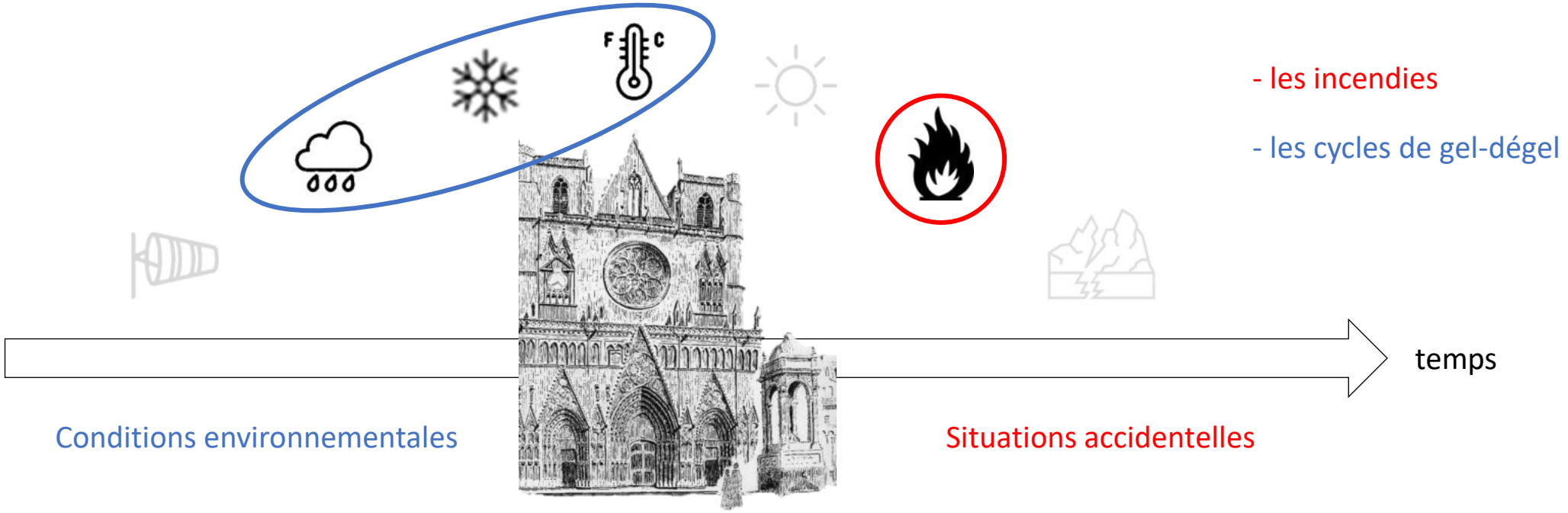
Projet ANR POSTFIRE

Safety and preservation of cultural heritage stone masonry buildings after fire events

Pôle thématique THCM du L2MGC

- Activités scientifiques du pôle thématique THCM : Comportement de matériaux de construction sous sollicitations couplées thermo-hydro-chemo-mécaniques.

- Altération des pierres des monuments historiques sous l'action de sollicitations thermiques sévères (avec le LRMH)



Fiche d'identité du projet

Instrument : Projet de Recherche Collaborative – Entreprises (**PRCE)**

Partenaires : **CYU** Cergy Paris Université (L2MGC, porteur de projet)

UO Université d'Orleans

LRMH Laboratoire de Recherche sur les Monuments Historiques (Ministère de la Culture)

CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

CTMNC Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction

Rocamat S. A.

Date de début du projet : 01/11/2020 Durée : 48 mois

Budget total : 1 163 179 €

Aide ANR accordée : 505 985 €

2 thèses, 1 post-doc, matériel…

Bilan de l'état de l'art

Limites actuelles :

- Peu de recherche sur le comportement à haute température des pierres (dans un contexte génie civil)
- Températures (maximales) investiguées peu élevées, ne reflétant pas certain cas d'incendie (<600 °C) ;
- Peu de recherche portant sur le comportement post-incendie du matériau ;
- Peu de recherche sur le comportement à haute température de maçonnerie de pierres à l'échelle des éléments de structure

Objectifs fixés :

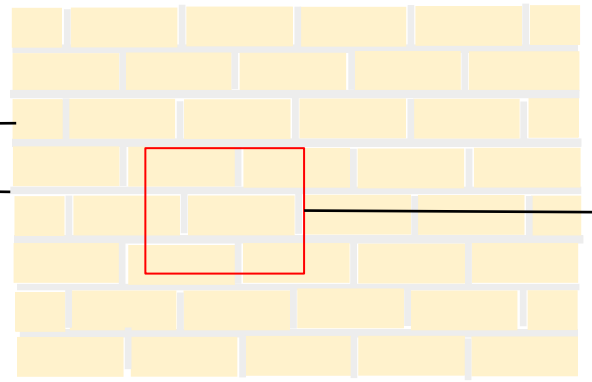
- Contribution à la compréhension du comportement à haute température des maçonneries en pierre
- Création d'une base de données des propriétés mécanique, thermiques des pierres calcaires à haute température
- Contribueront à l'amélioration des dispositions préventives et aux textes règlementaires

Approche couplée expérimentation - modélisation multi-échelle

Echelle du matériau

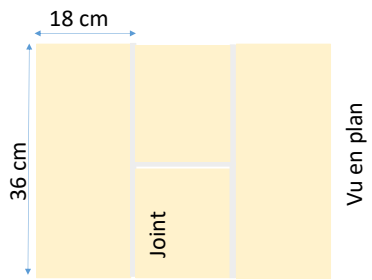
- comportement des composants constitutifs des maçonneries

Echelle d'un élément de structure



- Évaluer le comportement structurel des murs

Echelle assemblage pierre-mortier



- Etude de l'interaction mortier-pierre

Confrontation des résultats expérimentaux et modélisations avec un cas real

Étude de cas : cathédrale Notre-Dame de Paris

Structure et organisation du projet

T1. Recrutement de doctorants et post-doctorant

T2. Caractérisation des matériaux à l'état sain

T3. Essais dits à chaud

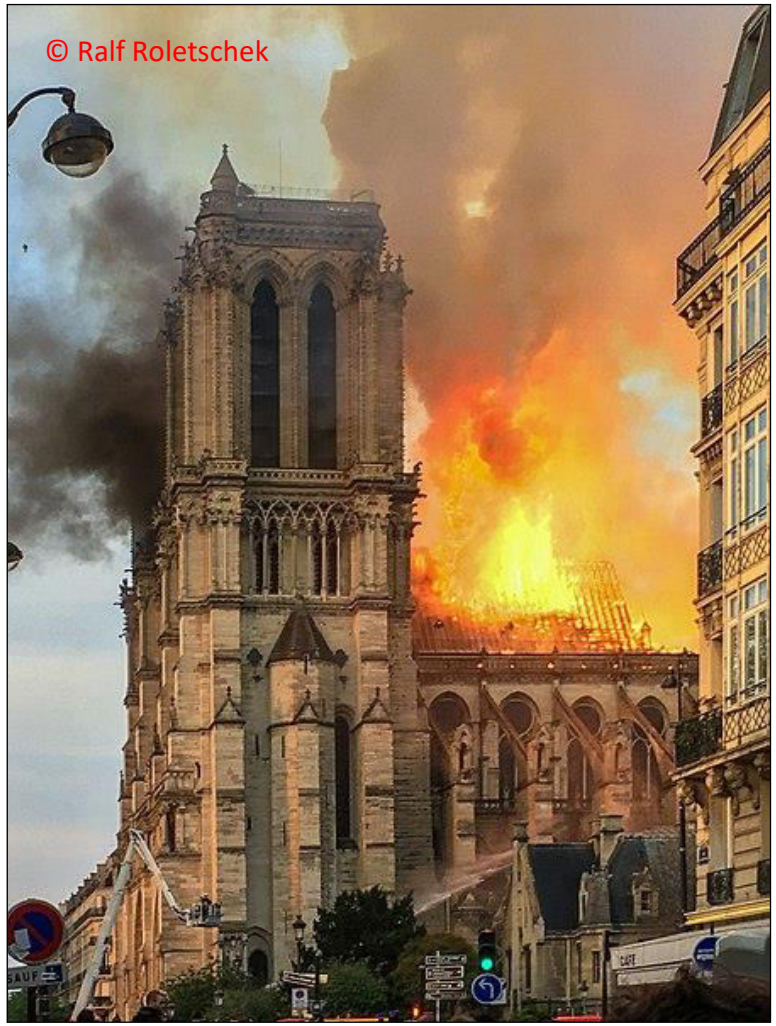
T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

T5. Essais de résistance au feu à l'échelle des éléments de structure

T6. Modélisation multiéchelle

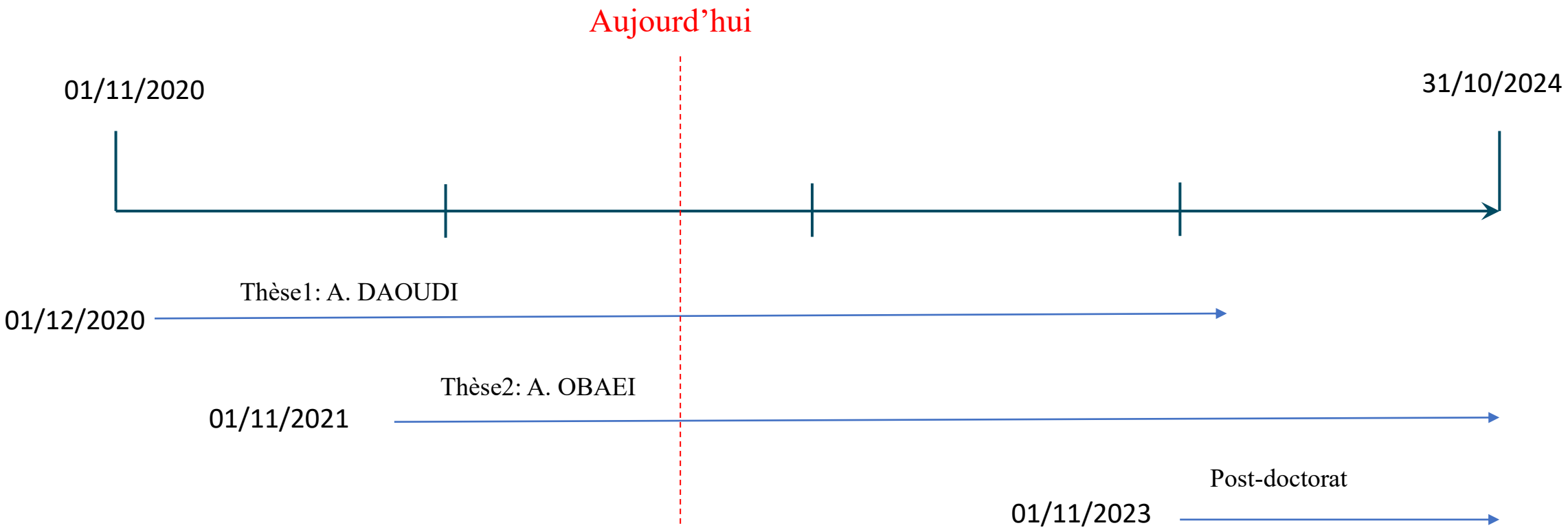
T7. Étude de cas : cathédrale Notre-Dame de Paris

T8. Recommendations



T1. Recrutement de doctorant et post-doctorat

- Duré du projet : 48 mois



T2. Caractérisation des matériaux à l'état sain

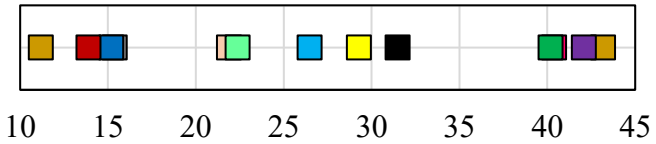
- 13 pierres calcaires

Tuffeau | Saint Vaast fin | Saint Leu | Sébastopol | Savonnières | Saint Maximin Ferme | Saint Maximin Franche | Tervoux | Liais de Saint Maximin | Euville | Lens | Croix Huyart | Massangis

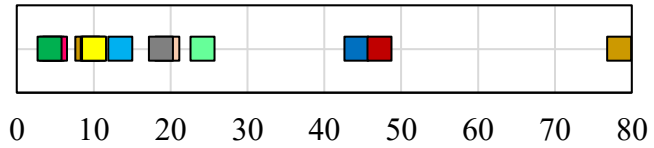
- Les critères de choix :
  - Largement utilisées dans les monuments historiques mais aussi en restauration
  - Représentent une grande diversité en termes de paramètres intrinsèques
  - La possibilité d'utilisation dans les futurs travaux de la cathédrale Notre-Dame de Paris

T2. Caractérisation des matériaux à l'état sain

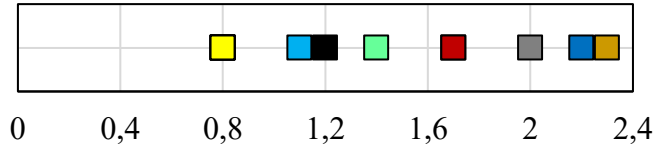
Porosité totale : N_T [%]



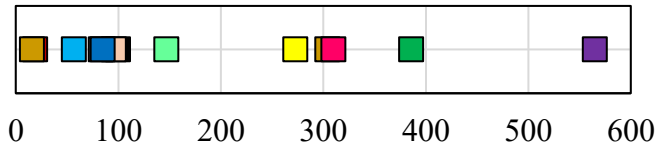
Résistance en compression : R_C [MPa]

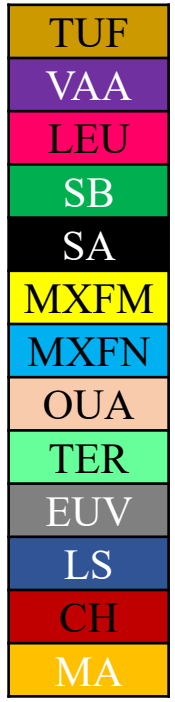


Conductivité thermique : λ [W. m^{-1}. K^{-1}]



Coefficient d'absorption capillaire : $A_\perp$ [g. m^{-2}. s$^{-1/2}$]





T2. Caractérisation des matériaux à l'état sain

- 3 mortiers

Pierre		Mortier					
Type de pierre	**R_C [MPa]**	**Sable 0-2mm [kg]**	**NHL 2 [kg]**	**NHL 3,5 [kg]**	**CEM II/ 42,5 N [kg]**	**Eau [kg]**	**Classe de résistance mortier [DTU20.1]**
Pierres tendres	**$R_C < 10$ MPa**	1525	350	0	0	La quantité d'eau dépend de la consistance	**M 2.5**
Pierres fermes	**10MPa < R_C < 40 MPa**	1525	0	250	100		**M 5**
Pierres dures	**$R_C > 40$ MPa**	1525	0	250	150		**M 10**

T2. Caractérisation des matériaux à l'état sain

- Méthode et essais :

Pétrographique : Microscope optique, Microscopie électronique à balayage (MEB)

Minéralogique : cristallographie aux rayons X (DRX)

Microstructural : porosité totale, porosité 48-h, porosimétrie mercure

Physique : densité, vitesse des ondes ultrasonores, colleur

Transfert thermique : conductivité, chaleur spécifique

Transfert hydrique : perméabilité à l'eau, capillary water absorption

Mécanique : résistance en compression, résistance en traction, module d'élasticité, coefficient de Poisson

T3. Essais dits à chaud

Objectifs :

- Identification des mécanismes élémentaires à l'origine de l'endommagement thermique des matériaux au cours du chauffage et refroidissement
- Déterminer l'évolution des propriétés mécanique, thermiques et la réponse thermique des matériaux à haute température

Méthode et essais :

- Thermique-chimique : Analyses thermogravimétriques (ATG), Calorimétrie différentielle (DSC)
- Thermomécanique : Dilatométrie
- Transfer thermique : Conductivité thermique, capacité thermique volumique
- Mécanique : essai en compression

T3. Essais dits à chaud

Objectifs :

- Identification des mécanismes élémentaires à l'origine de l'endommagement thermique des matériaux au cours du chauffage et refroidissement
- Déterminer l'évolution des propriétés mécanique, thermique et la réponse thermique des matériaux à haute température

Méthode et essais :

- Thermique-chimique : Analyses thermogravimétriques (ATG), Calorimétrie différentielle (DSC)
- Thermomécanique : Dilatométrie
- Transfert thermique : Conductivité thermique, capacité thermique volumique
- Mécanique : essai en compression

T3. Essais dits à chaud

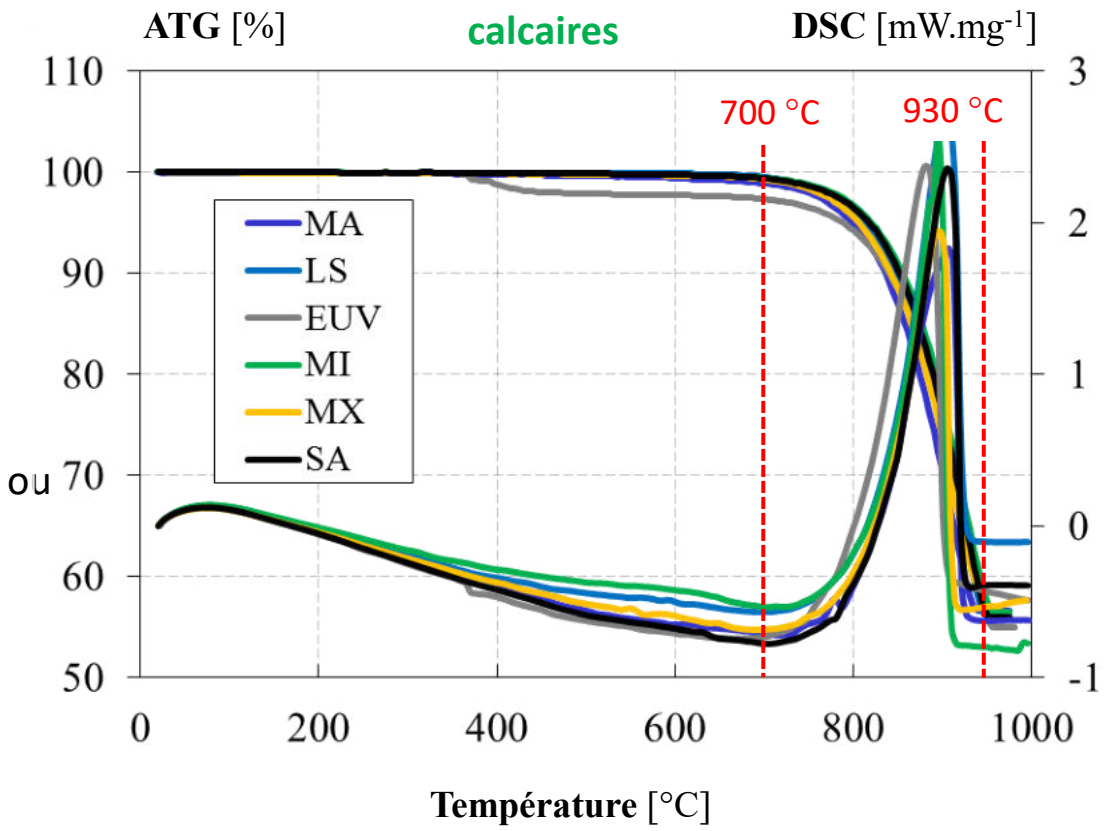
Méthode:

Analyses ATG-DSC

ATG : évolution de la perte de masse

DSC : évolution du flux de chaleur

→ transformations thermo-chimique associées non à une perte de masse



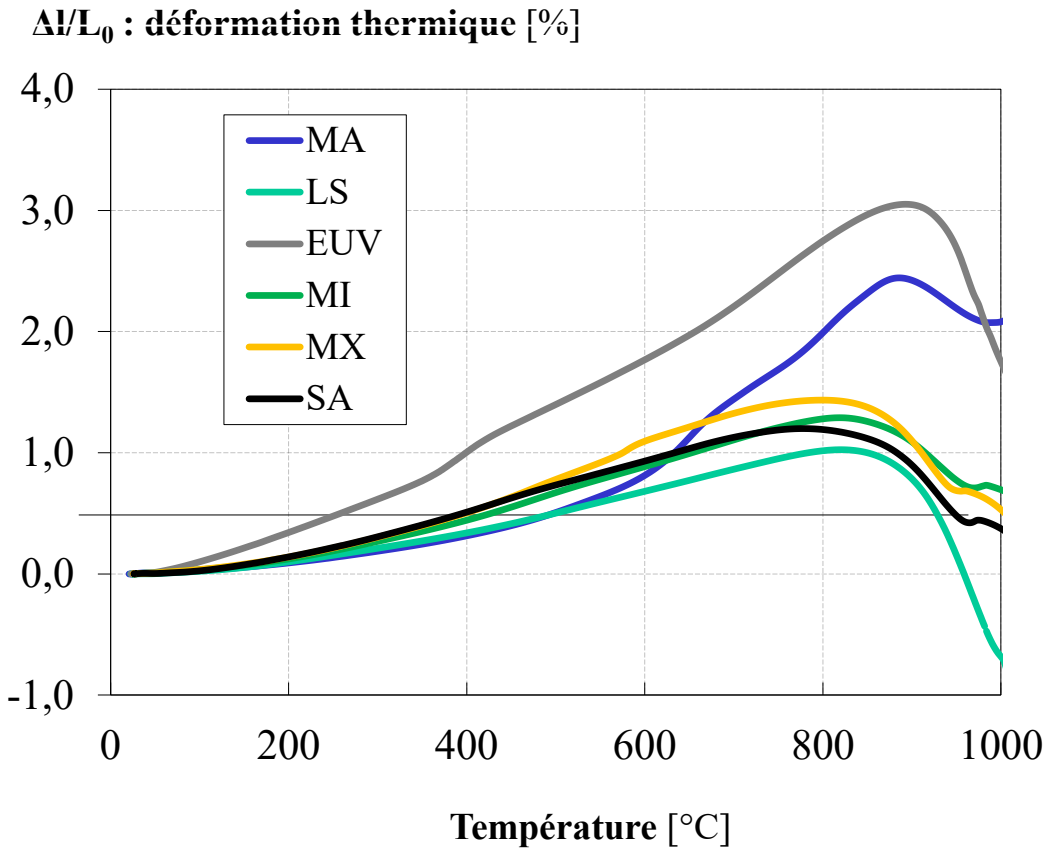
- Décomposition de la **calcite** :

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$

T3. Essais dits à chaud

Méthode :

Dilatométrie

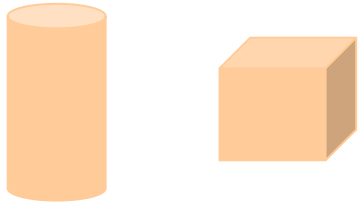


T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

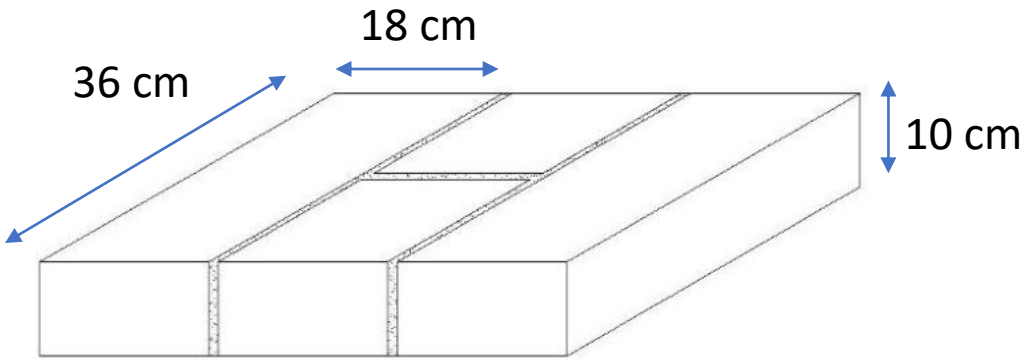
Méthode:

- Echelle matériau



cylindre ϕ4 × 8 cm
cube 5 ×5 ×5 cm

- Echelle assemblage bloc-mortier

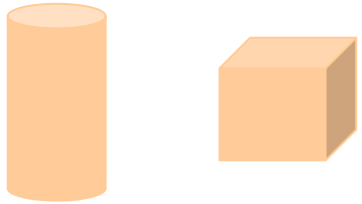


T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

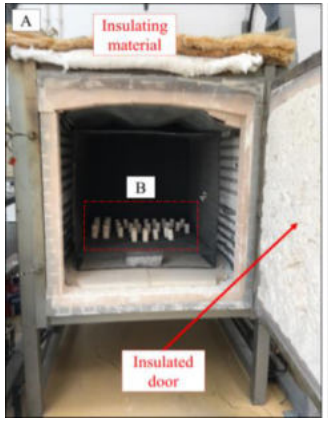
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

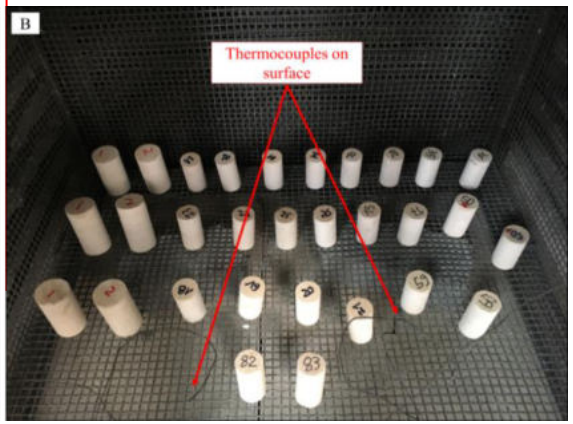
Méthode:

- Echelle matériau



cylindre ϕ4 × 8 cm
cube 5 ×5 ×5 cm



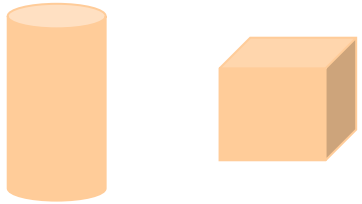


T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

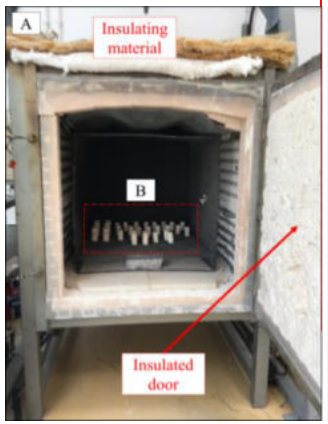
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

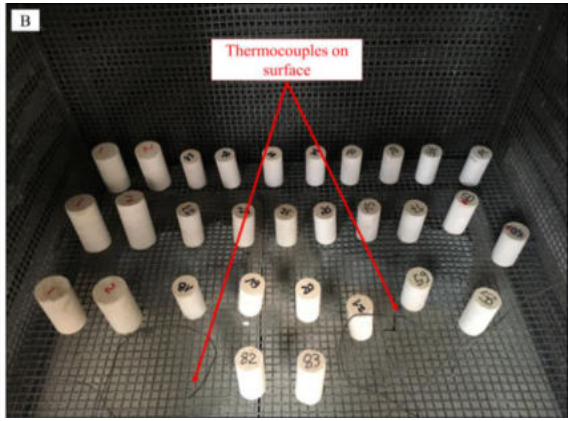
Méthode:

- Echelle matériau



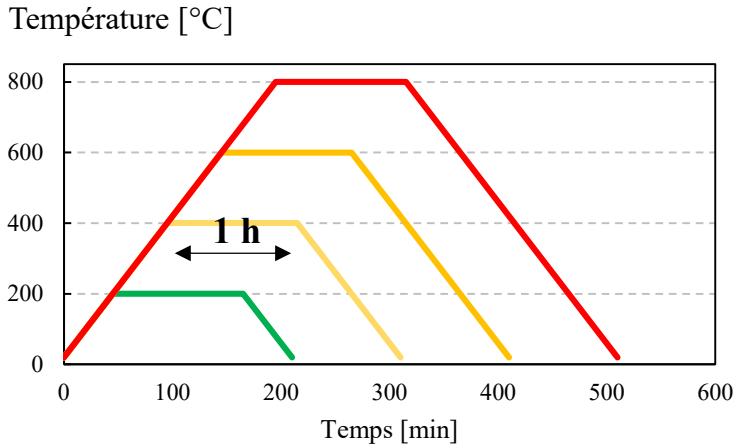
cylindre ϕ4 × 8 cm
cube 5 ×5 ×5 cm





Paramètres d'étude :

- Température maximale: 4 cycles de chauffage/refroidissement 200, 400, 600, 800 ° C
- vitesse de chauffage : 1,4 at 15 ° C/min
- état hydrique : sec, saturé

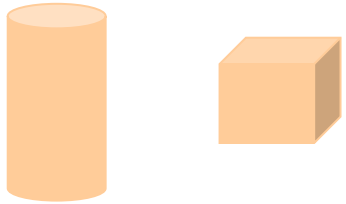


T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

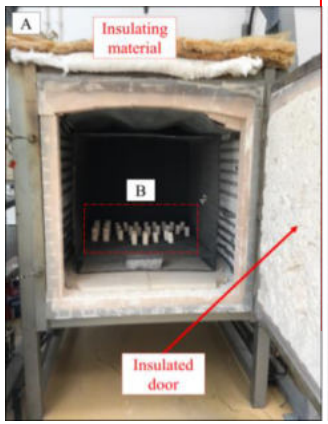
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

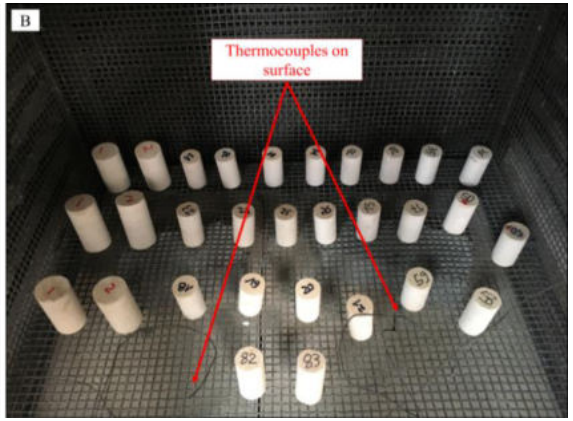
Méthode:

- Echelle matériau



cylindre ϕ4 × 8 cm
cube 5 ×5 ×5 cm





Suivi d'évolution des paramètres mécaniques

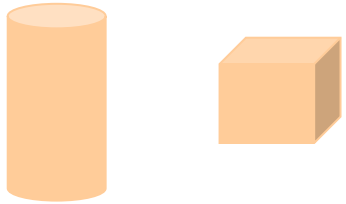
- Résistance en compression
- Résistance en traction
- Modules d'élasticité (statique et dynamique)
- Courbe contrainte-déformation

T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

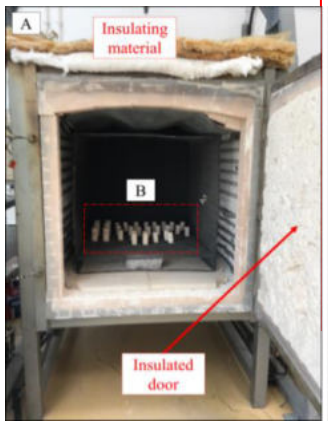
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

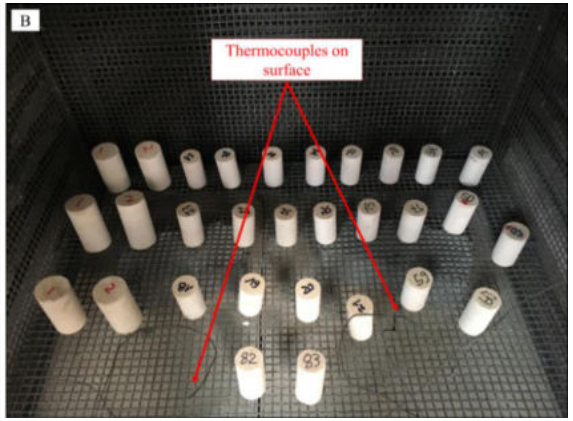
Méthode:

- Echelle matériau



cylindre ϕ4 × 8 cm
cube 5 ×5 ×5 cm





Suivi d'évolution des indicateurs de durabilité

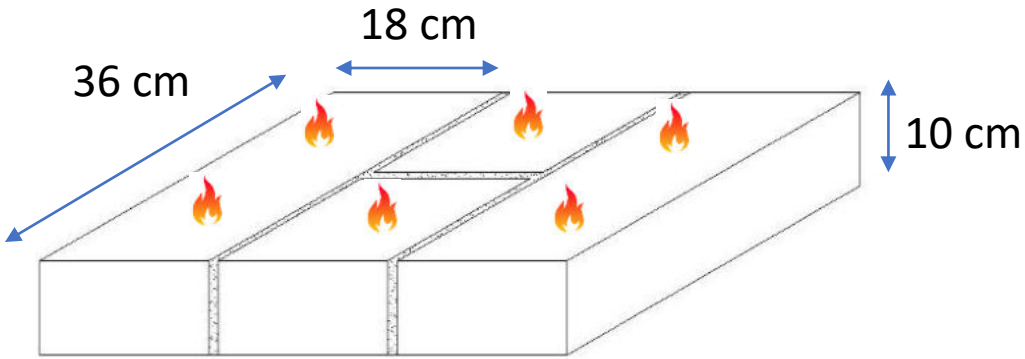
- porosité
- coefficient de capillarité
- perméabilité

T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

Méthode:

- Echelle assemblage bloc-mortier



T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

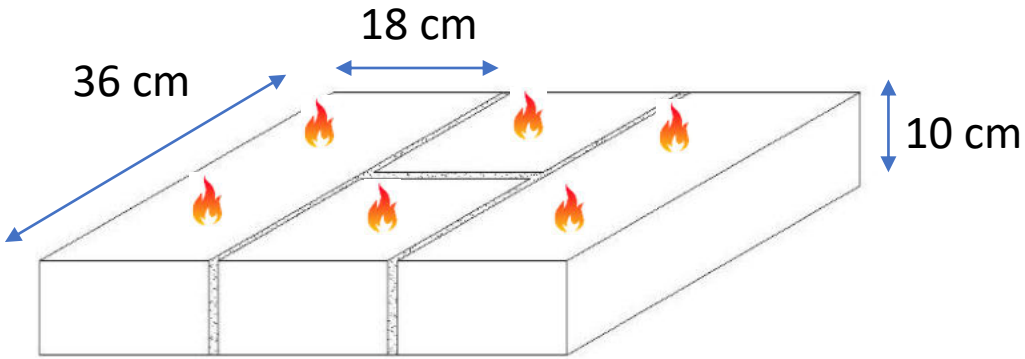
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

Méthode:

Paramètres d'étude :

- Température maximale : 600, 800 ° C
- vitesse de chauffage : 15 ° C/min
- cycles de ré-humidification-séchage après chauffage

❑ Echelle assemblage bloc-mortier



T4. Essais dits en résiduel, réalisés après chauffage-refroidissement

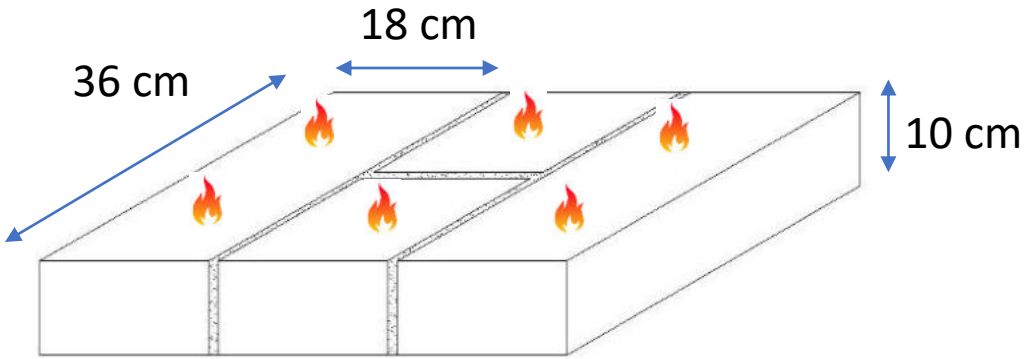
Objectifs : Évaluer les effets de différents niveaux de température sur l'évolution des propriétés des matériaux

Méthode:

Caractérisation :

- Analyse des mécanismes d'écaillage
- L'adhérence mortier-pierre

❑ Echelle assemblage bloc-mortier



T5. Essais de résistance au feu à l'échelle des éléments de structure

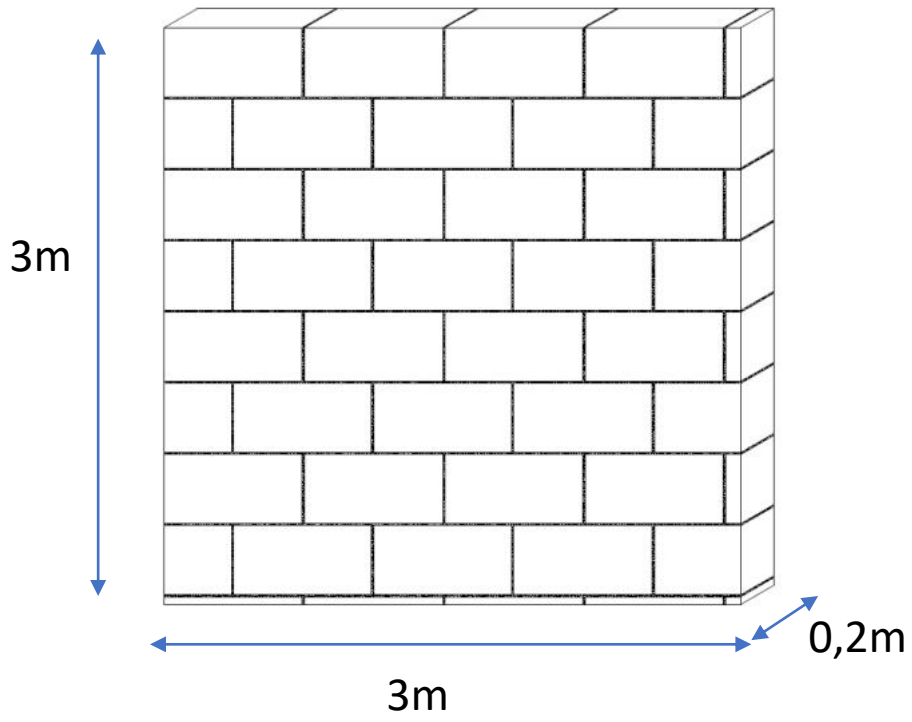
Objectifs : Évaluer le comportement structurel des murs en maçonnerie à la fois pendant et après l'exposition à des températures élevées

Méthode:

- 3 types de pierre seront étudiés
- Saint Leu (Rc=5 MPa)
- Tervoux (Rc=24 MPa)
- Massangis (Rc=78 MPa)

- 2 murs par pierre seront testés, un avec un chargement mécanique et un non-chargé

- Une face est exposée à haute température



T5. Essais de résistance au feu à l'échelle des éléments de structure

Objectifs : Évaluer le comportement structurel des murs en maçonnerie à la fois pendant et après l'exposition à des températures élevées

Méthode:

- 3 types de pierre seront étudiés
- Saint Leu (Rc=5 MPa)
- Tervoux (Rc=24 MPa)
- Massangis (Rc=78 MPa)

- 2 murs par pierre seront testés, un avec un chargement mécanique et un non-chargé

- Une face est exposée à haute température

T5. Essais de résistance au feu à l'échelle des éléments de structure

Objectifs : Évaluer le comportement structurel des murs en maçonnerie à la fois pendant et après l'exposition à des températures élevées

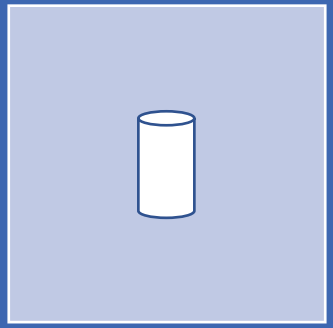
Méthode:

- Mesures et instrumentations effectuées : Déplacement, Digital Image Correlation (DIC), caméra thermique, capacité portante résiduelle
- Observation : développement des fissures pendant et après les essais
- Essais résiduels sur des blocs prélevés sur les murs testés

T6. Modélisation multiéchelle

Objectifs : Modélisation du comportement à haute température des maçonneries en pierre

I.

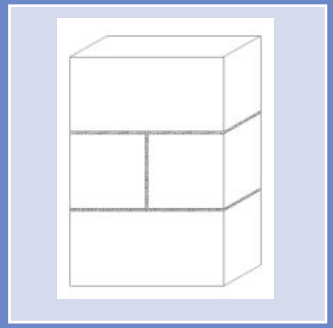


Echelle matériau

- Modèles thermomécaniques appropriés
- Identification des paramètres en fonction de la température

Drucker Prager
Double Criterion

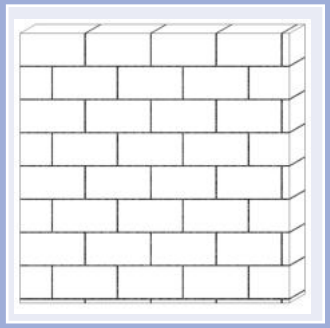
II.



Echelle intermédiaire

- Modélisation de l'interface du mortier et des blocs
- Détermination des propriétés équivalentes du mur homogène

III.



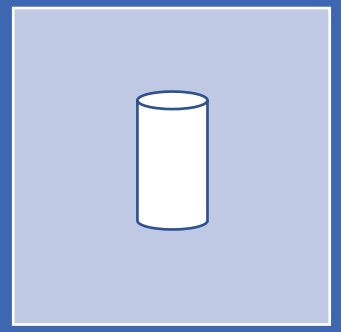
Echelle d'un élément de structure

- Evaluer l'stabilité globale (MEF)
- Evaluer les effets locaux (MED)

code_aster

T6. Modélisation multiéchelle

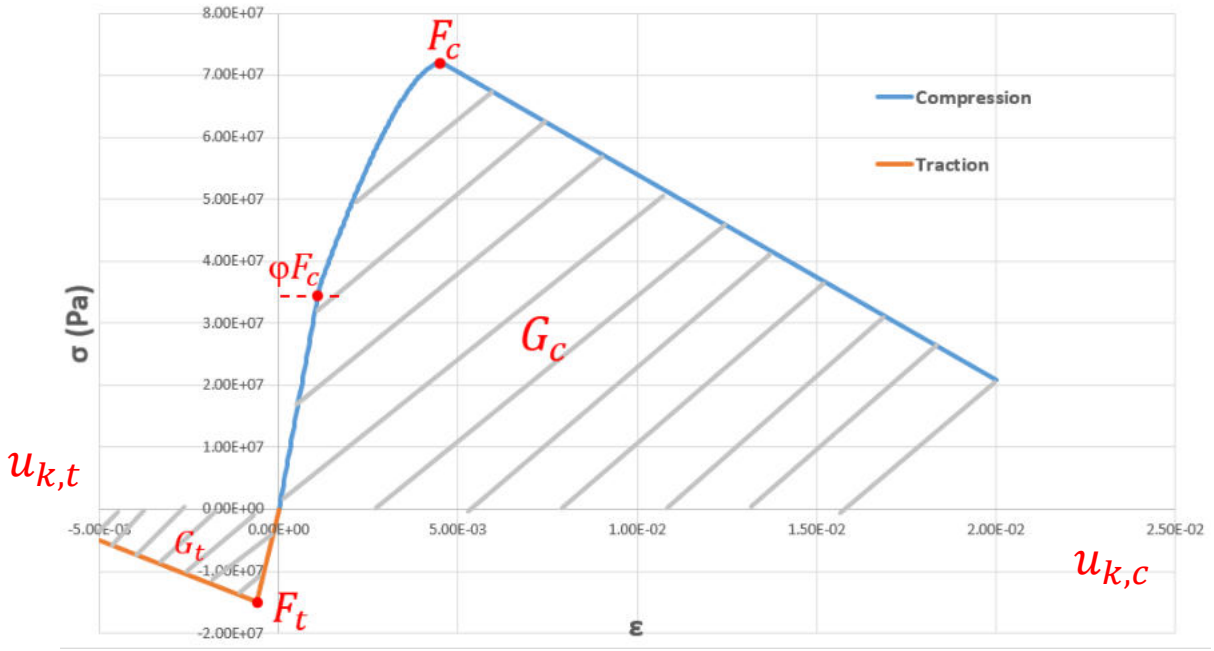
I.



Echelle matériau

- Modèles thermomécaniques appropriés
- Identification des paramètres dépendant de la température

Drucker Prager Double Criterion



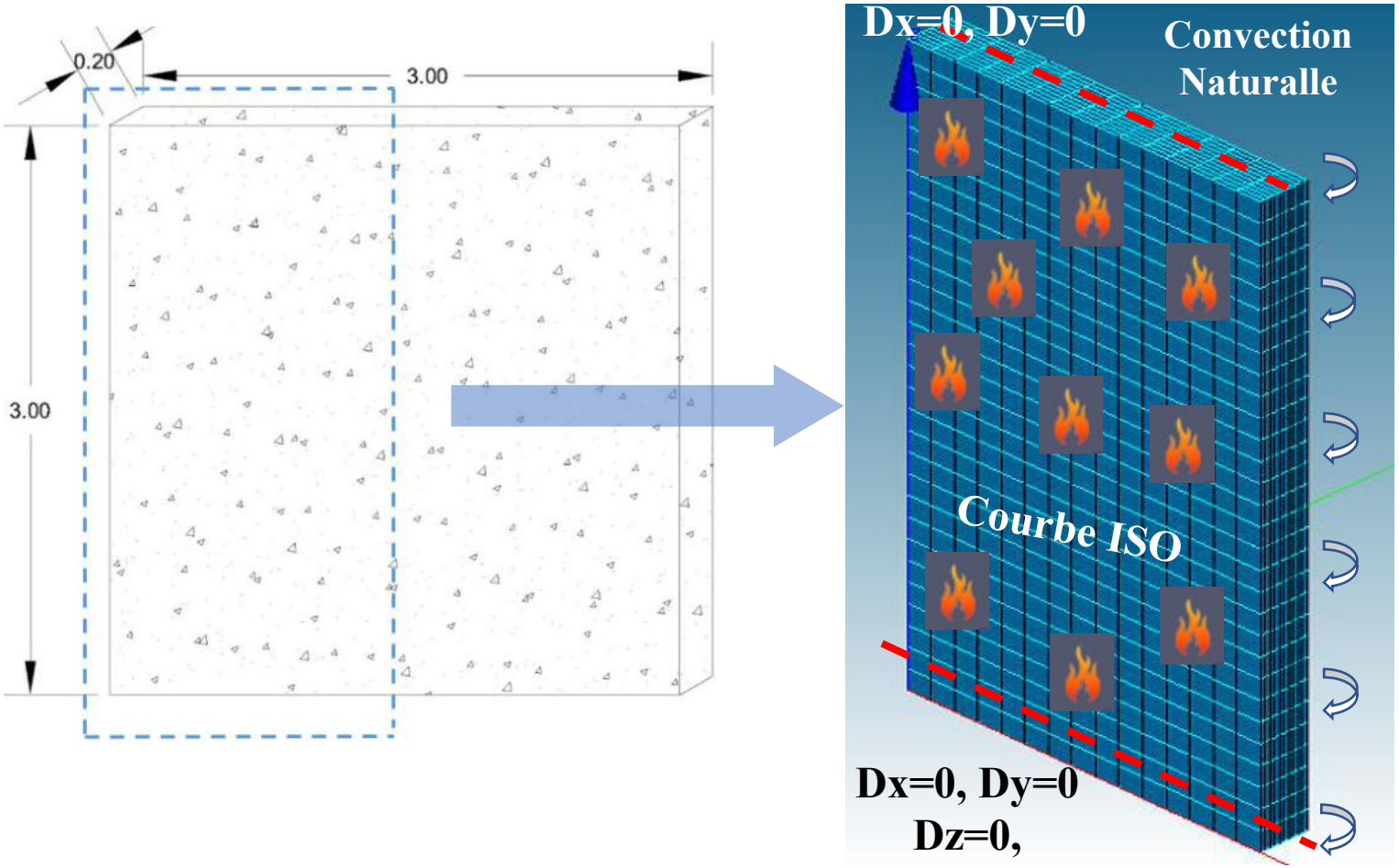
Stress – strain curve in compression and traction test

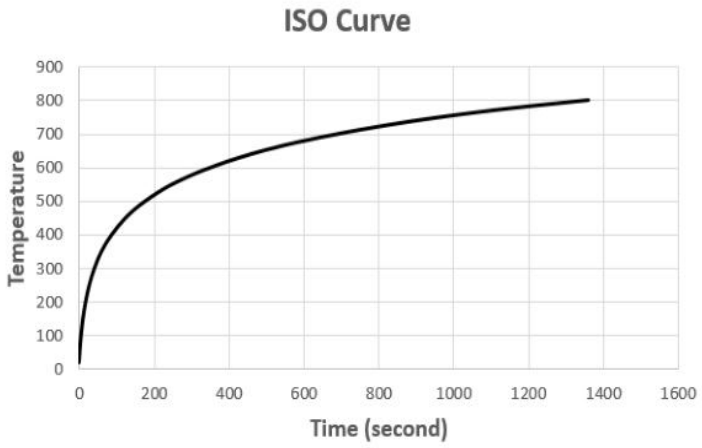
Parameters: F_c F_t β G_c G_t φ

$$u_{k,t} = \frac{2G_t}{l_c \times F_t}$$

T6. Modélisation multiéchelle

Configuration of the model and its boundary conditions

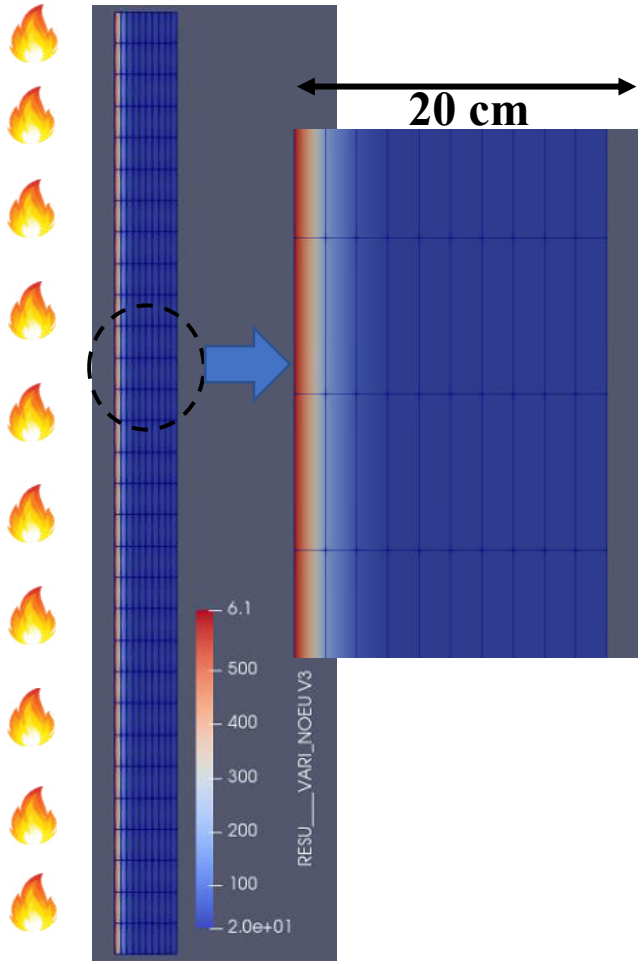


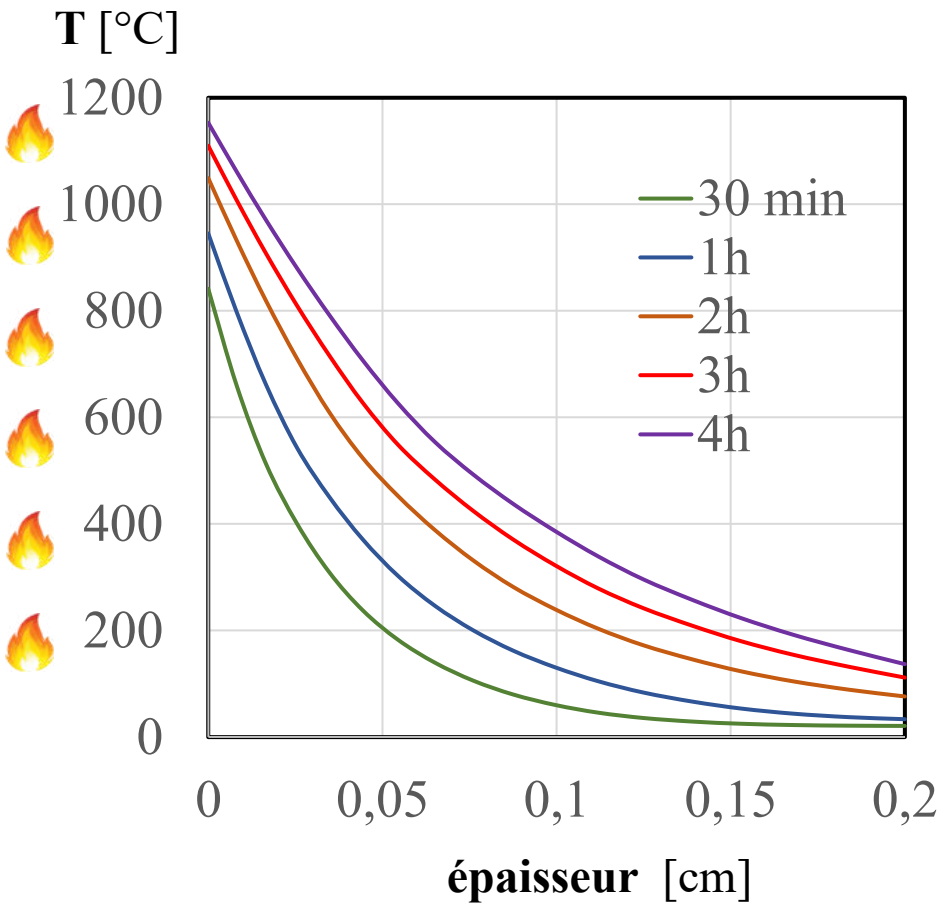


Courbe ISO

T6. Modélisation multiéchelle

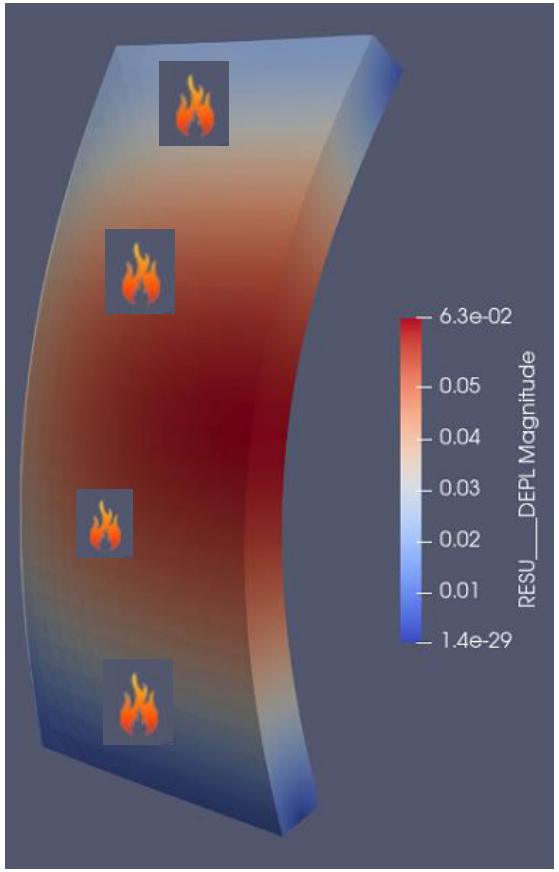
Influence de la durée d'incendie sur l'évolution de la distribution de la **température**



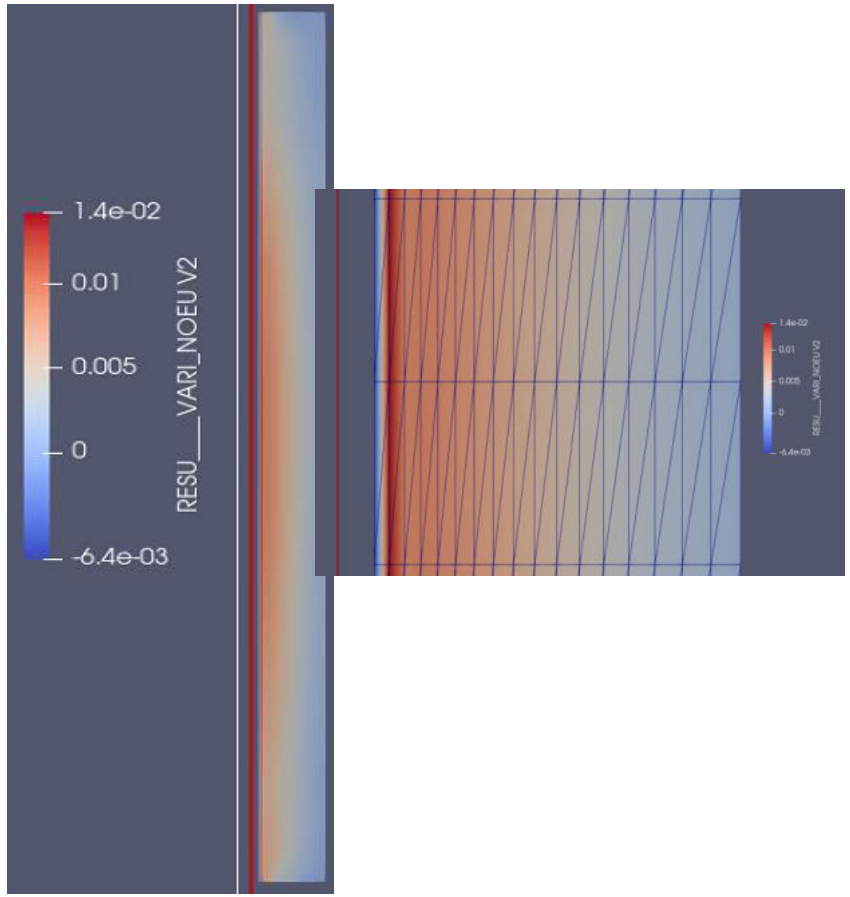


T6. Modélisation multiéchelle

Déformée et déplacement



Profil de plastification



T7. Étude de cas : cathédrale Notre-Dame de Paris

Objectifs : Confrontation des résultats expérimentaux et modélisation avec un cas réel

La grande diversité des types de calcaire et de mortiers touchés par l'incendie d'avril 2019

Méthode:

- Etudier des blocs de pierre et de mortiers provenant des voûtes effondrées de la cathédrale Notre-Dame de Paris

- essais non-destructifs
- essais micro-destructifs
- essais destructifs,

Confrontation avec les résultats expérimentaux.

Les équipes du LRMH et du SRA trient les vestiges dans les gravats, le 9 mai 2019 © Alexis Komenda / C2RMF / Ministère de la Culture

T7. Étude de cas : cathédrale Notre-Dame de Paris

Objectifs : Confrontation des résultats expérimentaux et modélisation avec un cas réel

Méthode:

- Utilisation des relevés réalisés sur place par l'équipe du LRMH pour affiner la modélisation

Sélectionner un ensemble de contextes architecturaux appropriés

↓

Prise en compte de la géométrie, le chargement et les conditions aux limites, et surtout le niveau relatif de dommages causés par le feu

↓

Confrontation avec les résultats numériques

Les équipes du LRMH et du SRA trient les vestiges dans les gravats, le 9 mai 2019 © Alexis Komenda / C2RMF / Ministère de la Culture

T8. Recommendations

Recommandations pour l'évaluation après incendie des bâtiments en maçonnerie

1) Températures critiques pour les matériaux étudiés,

2) Expressions de la dégradation induite par la température de chaque propriété matérielle étudiée

3) Protocoles d'évaluation pour les structures de maçonnerie en pierre après les incendies

Établissement public
chargé de la conservation et de la restauration
de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Pierres d'origine de la cathédrale ND de Paris & Besoins / ressources en pierres « neuves » consécutivement à l'incendie de 2019

14e journée technique du CTMNC
« La pierre naturelle et le feu »

23 juin 2022

David DESSANDIER (d.dessandier@brgm.fr) / BRGM
Lise LEROUX (lise.leroux@culture.gouv.fr) / LRMH

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Contexte & problématiques

En France, un nombre de carrières de pierres naturelles en constante diminution depuis la fin de la 1ère guerre mondiale :

- **Moins de 500 exploitations actives recensées aujourd'hui** (tous types de roches confondus ; une moitié environ de pierres calcaires)
- **Difficulté croissante** voire **criticité d'approvisionnement** des chantiers de restauration des monuments historiques en **certaines pierres neuves**

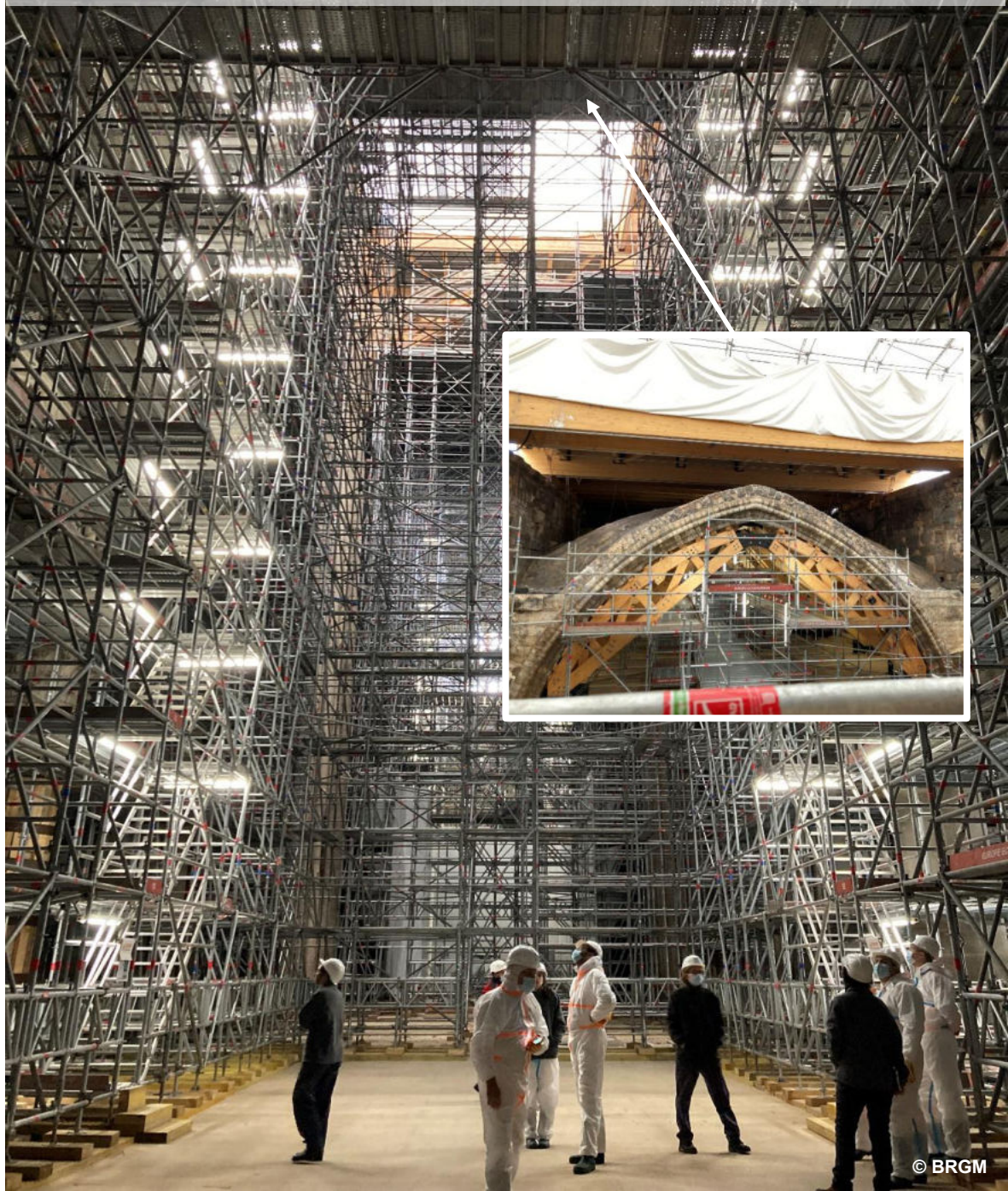
Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Consécutivement à l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, les 15-16 avril 2019 :

- Un **chantier exceptionnel de restauration et de reconstruction** de l'édifice
- Des **besoins en « pierres neuves » sans commune mesure avec les travaux ordinaires de restauration** des monuments historiques > **Près de 1000 m³** à remplacer
- Une **échéance court-terme** de réouverture de l'édifice au public (printemps 2024) > **Approvisionnement** du chantier en « pierres neuves » (une dizaine de sous-types au final) **à partir de mi 2022**

Vue des échafaudages de la nef & de la croisée du transept – Sept. 2021



© BRGM

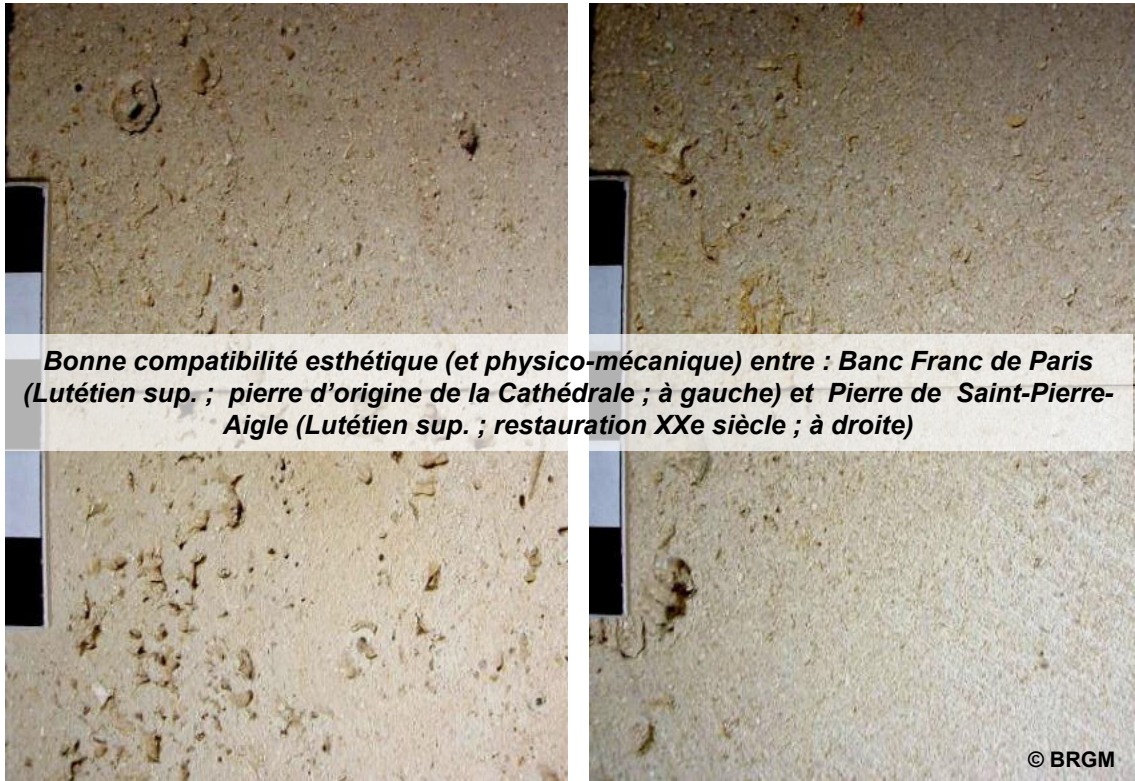
1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Un niveau d'exigence renforcé en matière de pierres neuves, propre aux chantiers de restauration des MH :

- Venant s'ajouter aux **exigences classiques** d'emploi des pierres naturelles dans la construction > **Norme NF B10-601** « Produits de carrières - Pierres naturelles - Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles »
- Nécessitant de recourir à des pierres neuves, **compatibles** d'un point de vue à la fois **esthétique** et **physico-mécanique** avec les **pierres conservées sur l'édifice**
- **Doctrine** privilégiant le **recours aux pierres de remplacement** si disponibles, plutôt qu'à des pierres de substitution > Cas des édifices patrimoniaux et surtout des **monuments historiques classés appartenant à l'Etat**, tels la cathédrale ND de Paris, sous MOE des Architectes en Chef des Monuments Historiques

Exemple d'incompatibilité : juxtaposition de blocs de calcaire « dur » (restauration) et de blocs de calcaire tendre (tuffeau d'origine) ayant accéléré la dégradation de ces derniers (Eglise Saint-Hilaire-du-Martray à Loudun).



Bonne compatibilité esthétique (et physico-mécanique) entre : Banc Franc de Paris (Lutétien sup. ; pierre d'origine de la Cathédrale ; à gauche) et Pierre de Saint-Pierre-Aigle (Lutétien sup. ; restauration XXe siècle ; à droite)

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Un monument emblématique :

- Objet, au cours des siècles, de nombreuses **campagnes d'entretien et de restauration** voire de **construction** à l'instar des travaux menés au XIXe siècle par Viollet-le-Duc

- Ayant eu recours à de **nombreuses pierres :**

  > de **« remplacement »** c.à.d. extraites des mêmes formations géologiques que les pierres d'origine (médiévales)

  > de **« substitution »** c.à.d. issues d'autres formations

- Avec la nécessité suite à l'incendie, de procéder à une **étude de synthèse globale des pierres en œuvre** :

  > **Inventaire et identification** des différents lithotypes

  > **Emplois et localisation** au sein de l'édifice

  > **Caractéristiques intrinsèques** (pétro-minéralogiques, physico-mécaniques…)

Vue partielle de la Tour Nord ; calcaires à Cérithes (Lutétien sup.) essentiellement, d'origine et de restauration – Sept. 2021

© BRGM

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Pierres constitutives de la cathédrale ND de Paris

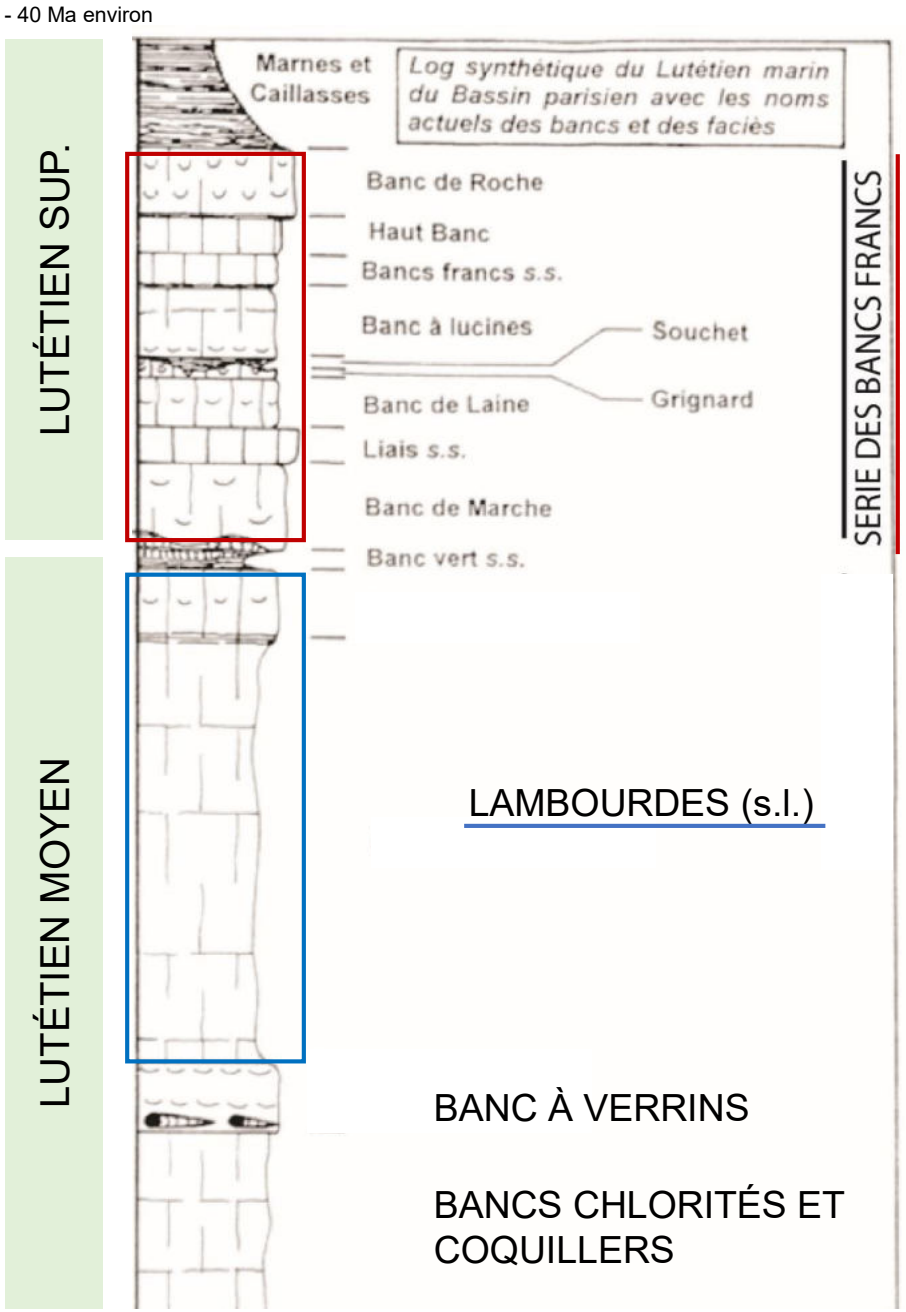
Pour l'essentiel, des calcaires du Lutétien marin (Série Eocène « moyen » - Ere Cénozoïque) :

- **A l'origine** (époque médiévale), extraites du **sous-sol parisien**, principalement en galeries souterraines > Formations géologiques du « **Calcaire grossier** » (Lutétien moyen) et de la « **Série des Bancs Francs** » (Lutétien supérieur)

- **Au cours des siècles**, issues de carrières **de plus en plus éloignées de Paris**, du fait de **gisements originels** de calcaires lutétiens **épuisés** ou rendus **inaccessibles** (urbanisation…) :

  > **Recours massif** à des pierres de remplacement, de Petite puis Grande Couronne, puis de Picardie (Oise, Aisne)

  > **Recours ciblé et limité** à des pierres de substitution, d'autres bassins calcaires français, à partir du XIXe siècle



D'après Gély, 2009, modifié

- Une connaissance issue de la documentation du XIXe siècle et des études scientifiques réalisées au cours des 50 dernières années, à la faveur des travaux de restauration :

> XIXe s. - Travaux de Viollet-le-Duc – Devis, attachements de maçonnerie, etc.

> 1969 - Nettoyage du portail central de la façade occidentale (Annie Blanc, Jean Taralon)

> 1986-88 - Nettoyage des voûtes de la nef – observations systématiques des voutes et piles par Annie Blanc, Claude Lorenz et Marc Viré

> 1992 - Suivi des restaurations de la tour sud – mise en évidence des altérations des vergetés (Annie Blanc)

> 2008 - Etude avant restauration de la porte Rouge (Annie Blanc, Lise Leroux, Olivier Rolland)

> 2015 - Etude avant restauration du chevet - travée de l'arc-boutant 18 (Lise Leroux, ECMH)

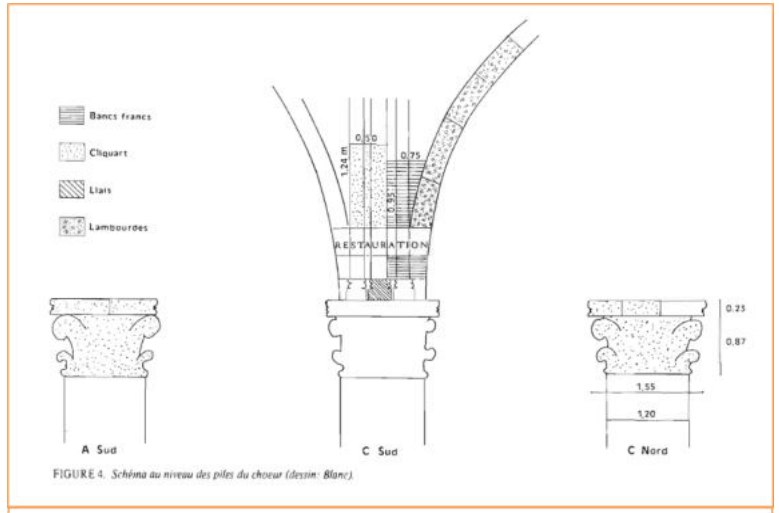
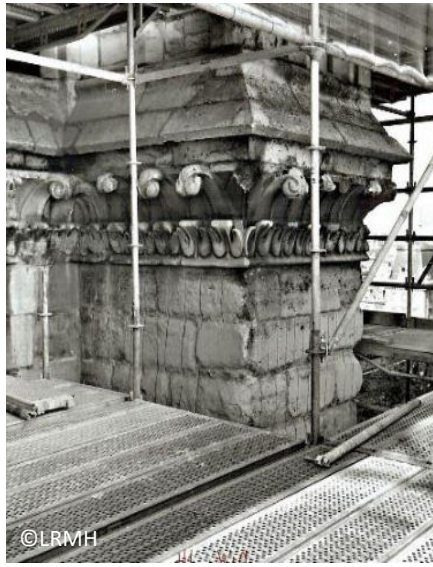
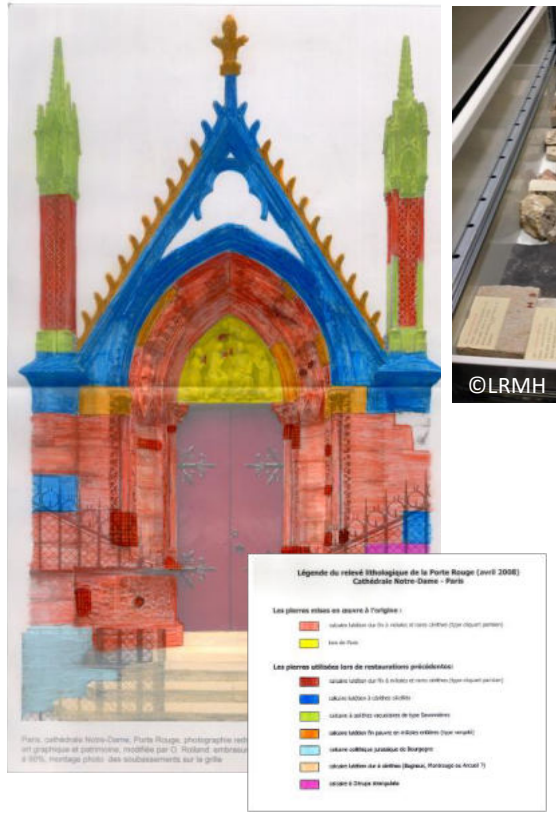


FIGURE 4. *Schéma au niveau des piles du choeur (dessin : Blanc).*

BLANC, (A.) , LORENZ (C.), Observations sur la nature des matériaux de la cathédrale Notre- Dame de Paris, (S.l.) : The International center of medieval art, 1990,





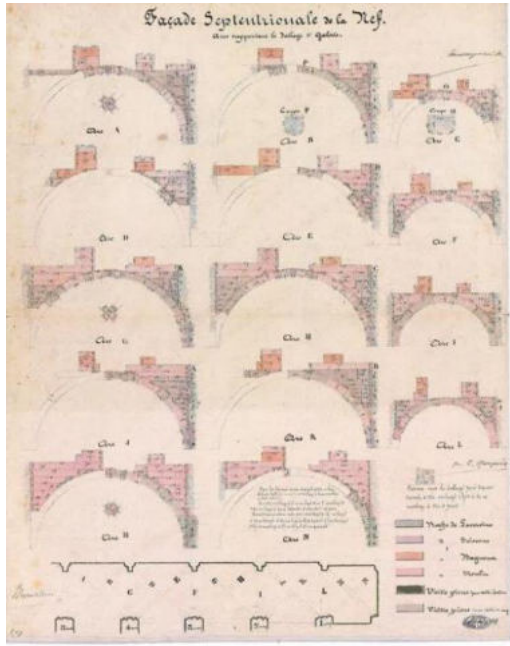


PLANCHE 37

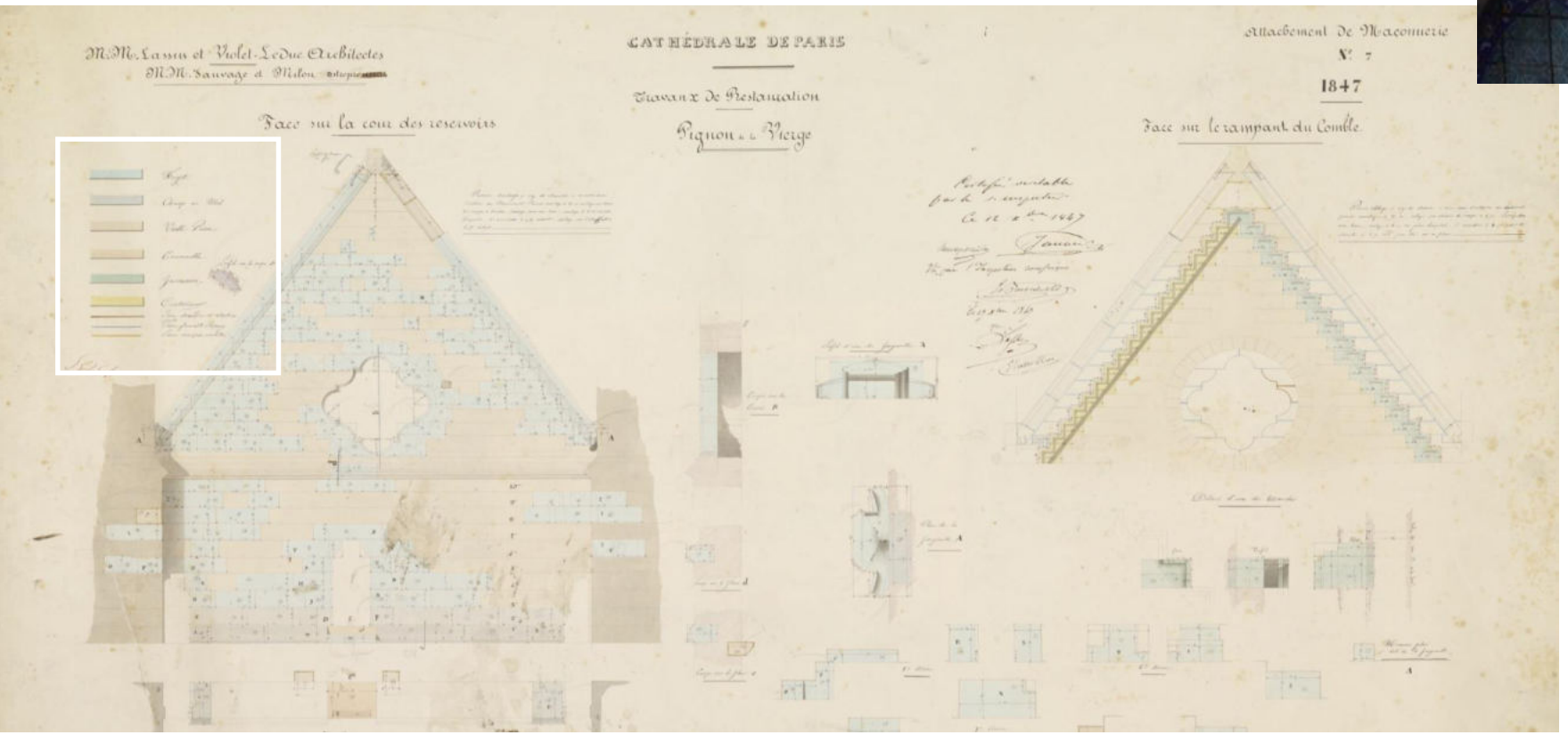
« Attachement figuré n°94.
Façade septentrionale de la nef.
Arcs supportant le dallage vre galerie »,
cinq premières travées à partir de la tour Nord
(niveau de la tribune Nord de la nef
[TR39, TR37, TR35, TR31 & TR29 ?]).
1859.
Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine,
Planothèque, F-1996-83, tiroir 89, pochette 26, n°55764 (1)
[cliché MAP 04R06391].

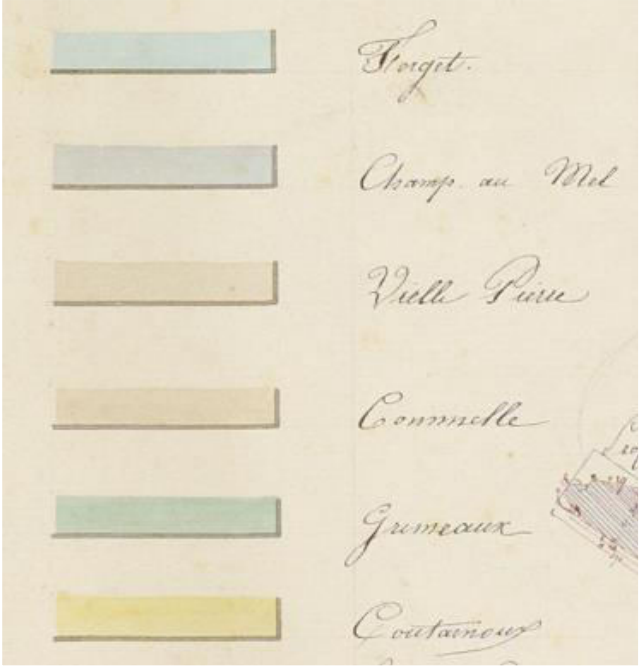
1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Etude de la documentation :

- Des provenances connues dont il fallait vérifier la présence sur l'édifice
- Des travaux du XVIIIe s. peu documentés > des approvisionnements en pierre méconnus





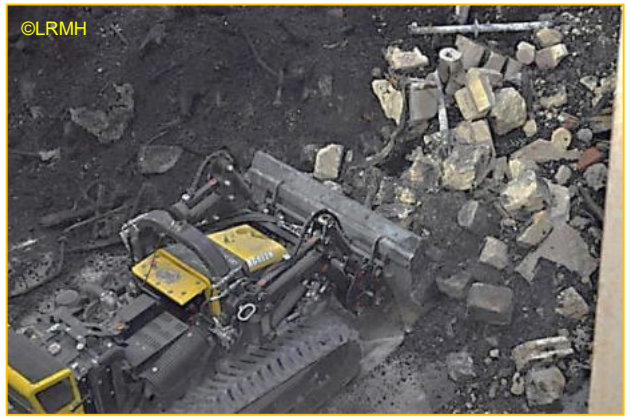
Exemple d'attachement de maçonnerie (1847) de travaux de restauration de la cathédrale menés sous la direction de Lassus et Viollet-le-Duc

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

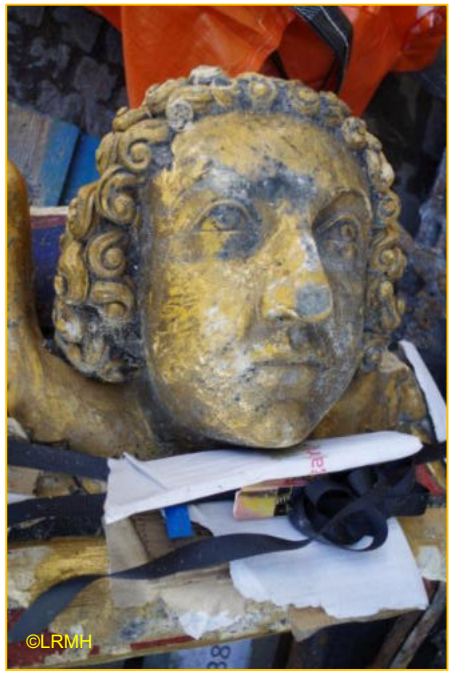
Géosciences pour une Terre durable brgm

Collecte des vestiges au sol, dépose de blocs des voûtes et tri des éléments: des moments clefs favorables aux observations et aux prélèvements:

Avril 2019 - février 2020 (SRA/LRMH/Police/INRAP)



> Identification des matériaux - Connaissance de la construction de l'édifice - Diagnostic et étude de l'endommagement dû à l'incendie



> Conservation/restauration des éléments remarquables - Réemploi?

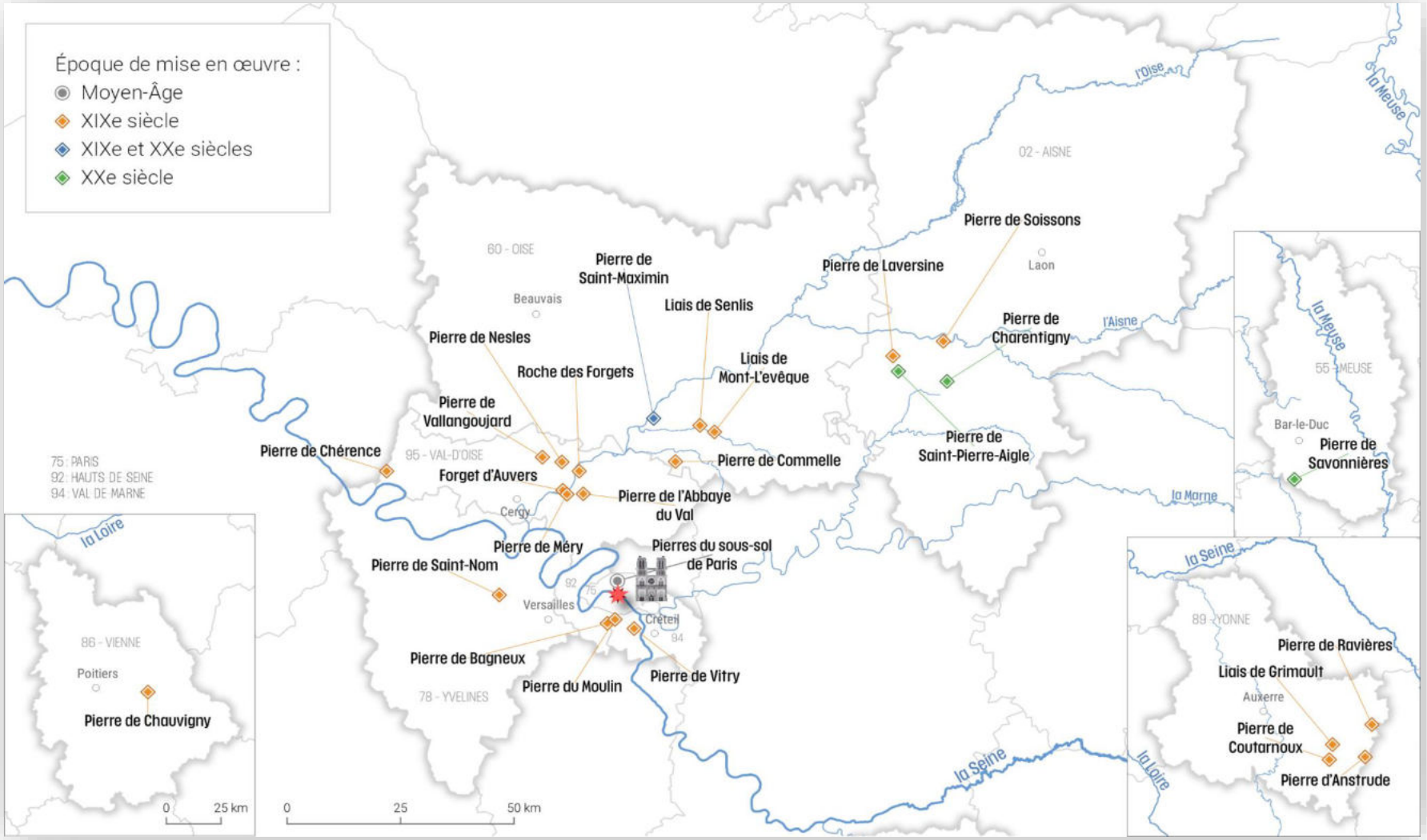
Contrôles visuels macroscopiques & prélèvement d'échantillons représentatifs :

- Objectifs analytiques > Caractérisation pétrographique et pétrophysique - Recherche de pierres de remplacement / substitution compatibles - Etude de l'impact du feu - Evaluation des possibilités de conservation / réemploi

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

Une trentaine de pierres calcaires inventoriées, provenant de zones proches à plus éloignées de la capitale



Carte de provenance des pierres de la cathédrale ND de Paris par époque de mise en œuvre

Banc Franc parisien

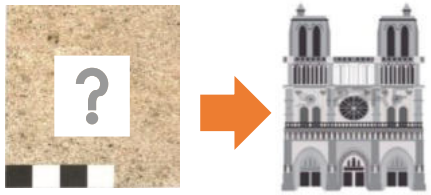
Lambourde parisienne

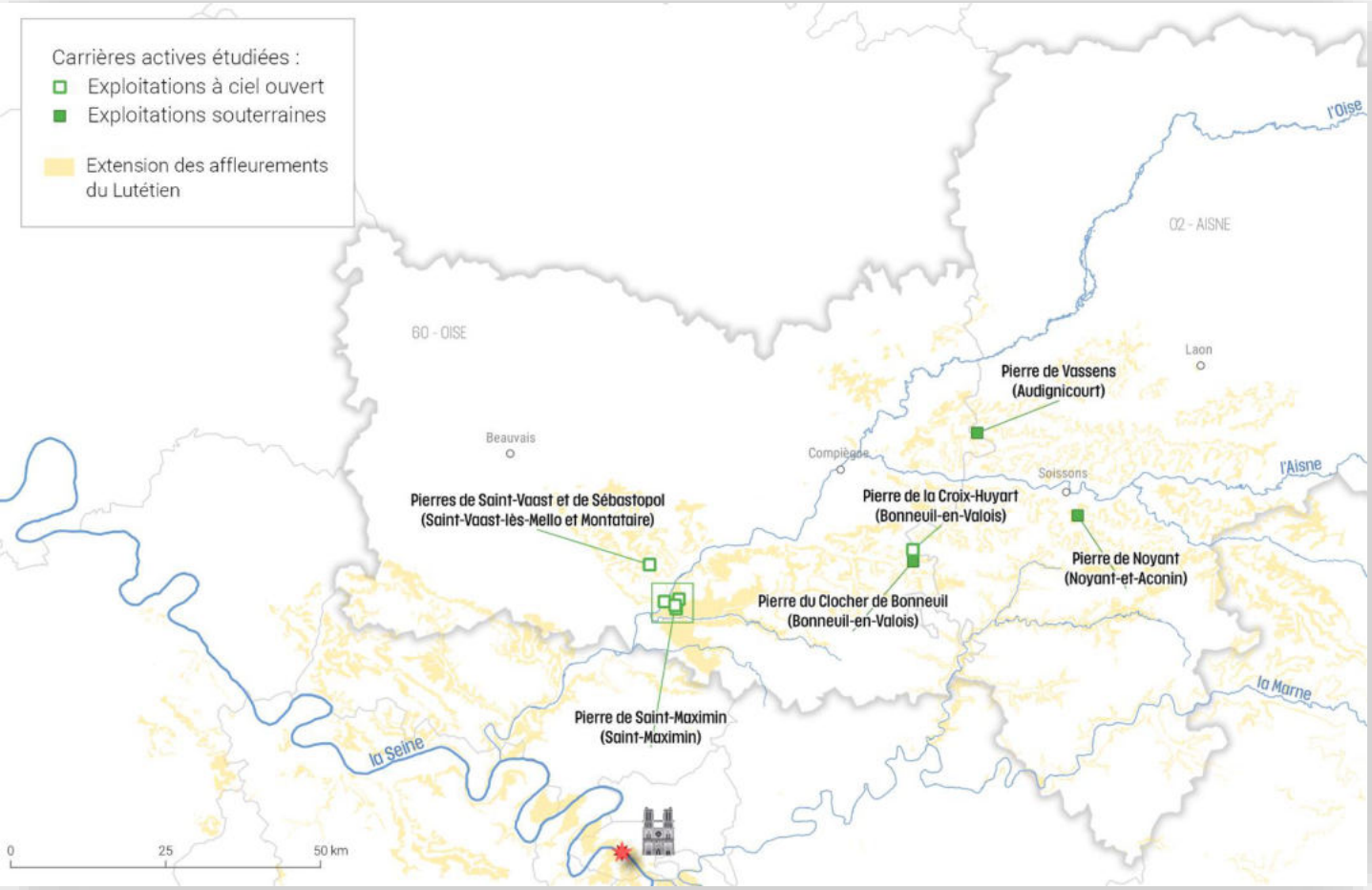
Calcaire biodétritique du Vexin

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques 1970-2020

Géosciences pour une Terre durable brgm

Pierres potentielles de remplacement





Carte de localisation des 9 carrières actives de l'Oise et de l'Aisne exploitant les calcaires du Lutétien (marin) pour la « pierre naturelle »

9 carrières encore actives exploitant les calcaires du Lutétien marin pour la Pierre naturelle :

- Dernières exploitations susceptibles de fournir des **pierres de remplacement** pour le chantier de la cathédrale ND de Paris
- **Evaluation du potentiel** des 9 carrières à :

  > Fournir des **pierres compatibles** avec les pierres d'origine de la cathédrale

  > Répondre à tout ou partie des **besoins spécifiques** du chantier de restauration

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques 1970-2020 LRMH

Géosciences pour une Terre durable brgm

Carrières de :

1. Pierre de Vassens (02)
2. Pierre de Noyant (02)
3. Pierre de Clocher de Bonneuil (60)
4. Pierre de La Croix-Huyart (60)
5. Pierre de St-Vaast & Pierre de Sébastopol (60)

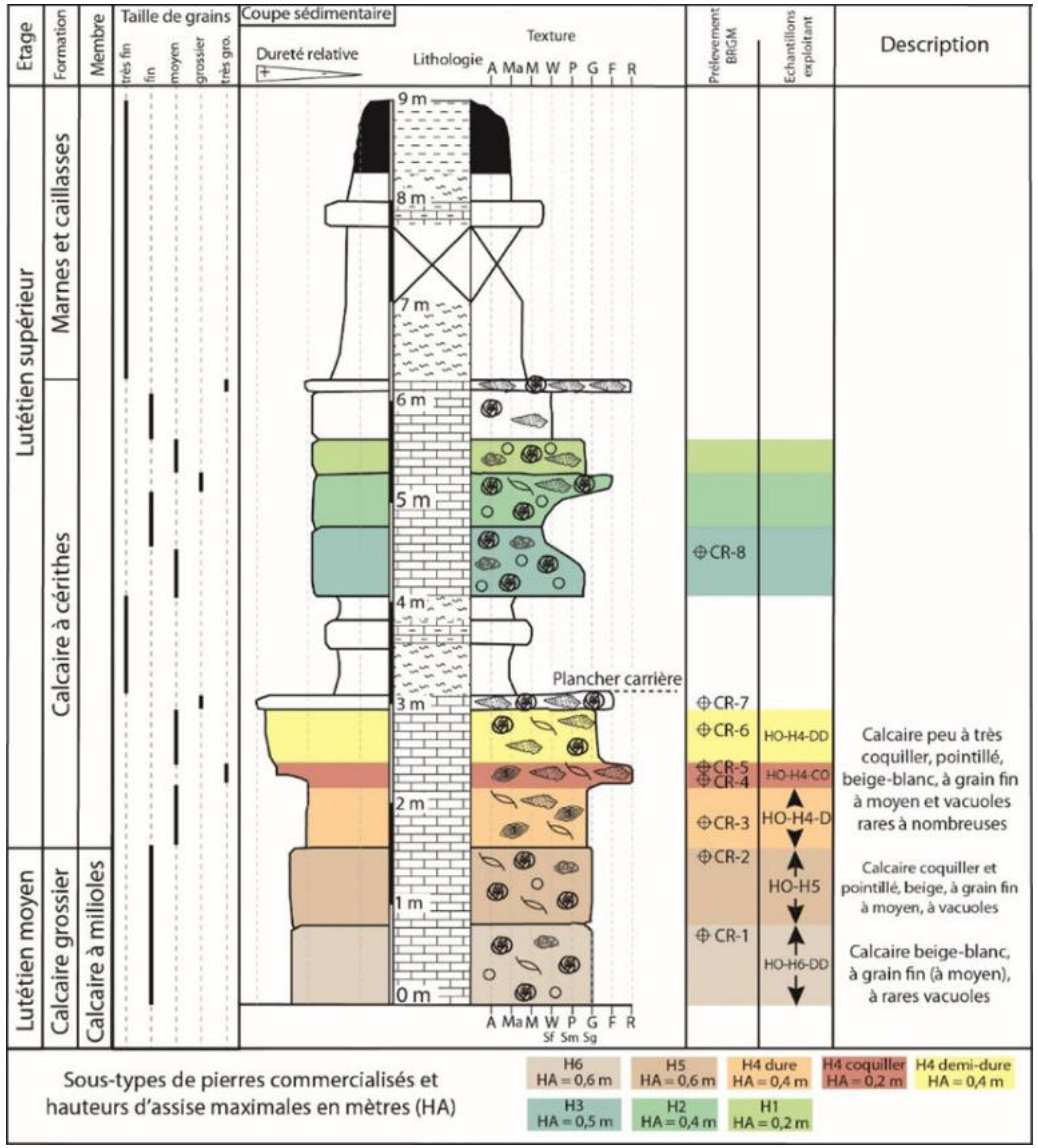
6 7 8 9 Pierre de St-Maximin / 4 carrières (60)

Vues des 9 carrières en activité de l'Oise et de l'Aisne exploitant les calcaires du Lutétien pour la « pierre naturelle », et susceptibles de répondre aux besoins du chantier de la cathédrale

Investigations de terrain dans les 9 carrières actives ciblées :

- Entretien avec les exploitants > Recueil d'informations sur la carrière et les différents sous-types de pierres extraits et commercialisés
- Observations de terrain > Examen des fronts de taille, mesures de hauteur de bancs, description macroscopique et échantillonnage des différents faciès, **coupes sédimentaires de synthèse**, **32 lithotypes préciblés**

Description de faciès sédimentaire dans la carrière de Pierre de Sébastopol (Saint-Vaast-lès-Mello, 60)



Coupe sédimentaire de la carrière de Pierre de la Croix-Huyart (Bonneuil-en-Valois,60)

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

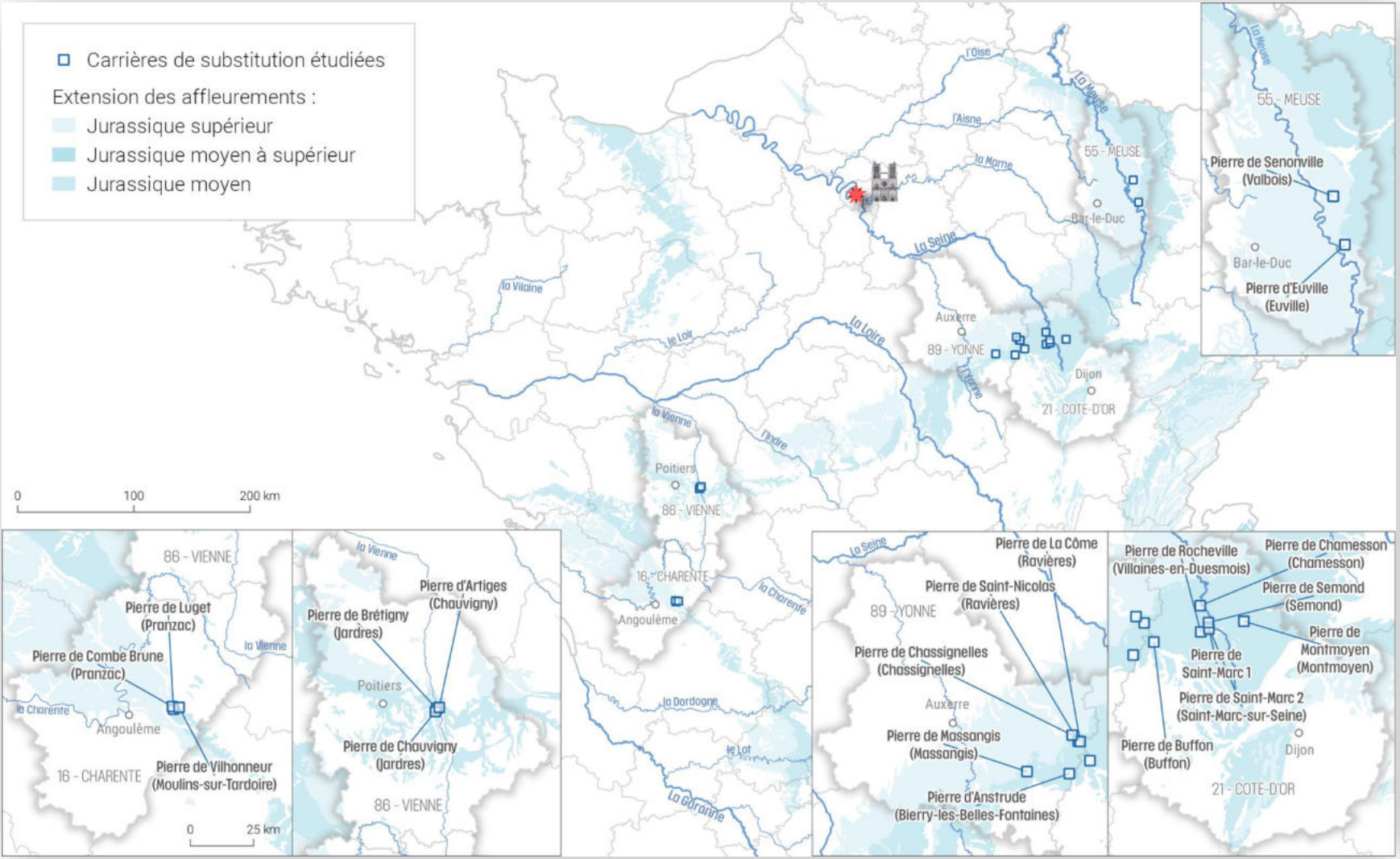
Caractérisation en laboratoire des 32 sous-types de pierres :

- **Description macroscopique** > Selon méthodologie originale destinée à faciliter la comparaison « esthétique » d'échantillons entre eux (carrières VS cathédrale)
- **Examen pétrographique au microscope** optique polarisant (MOP) sur lame mince > Description du microfaciès (classifications de Folk et Dunham) et détermination du membre géologique d'appartenance
- **Essais d'identité et d'aptitude à l'emploi** (selon norme NF B10-601 Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles) > Masse volumique apparente et porosité ouverte - Absorption d'eau à pression atmosphérique - Absorption d'eau par capillarité - Résistance à la flexion sous charge centrée - Résistance à la compression - Vitesse de propagation du son

Microfaciès de calcaire coquiller à milioles

Terre et Pierre
Expertise et Innovation
CTMNC

Pierres potentielles de substitution



Carte de localisation des 20 carrières actives préciblées exploitant des calcaires du Jurassique moyen et supérieur (Bathonien ou Oxfordien)

Recherche de pierres susceptibles de se substituer (= compatibles d'un point de vue physico-mécanique) aux pierres de la catégorie des « Bancs Francs parisiens (s.l.) et pierres équivalentes » de la cathédrale :

- Préciblage de 20 carrières actives (3 en Charente, 7 en Côte-d'Or, 2 dans la Meuse, 3 dans la Vienne et 5 carrières dans l'Yonne)

Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable
brgm

- Sélection de 10 lithotypes au sein de 8 des 20 carrières préciblées
- Echantillonnage et caractérisation en laboratoire selon le même protocole que pour les pierres de remplacement

Dénomination de la pierre		Localisation de l'exploitation		
Nom générique	**Sous-type sélectionné**	**Lieudit**	**Commune**	**Dép.**
Pierre de Buffon	Banc 6	En Charibeau	Buffon	21
Pierre de Chamesson	Nod Coquillier	En Pierre Chèvre, Roc Béron	Chamesson	21
Pierre de Combe-Brune	Roche Jaune	Combe-Brune	Marthon	16
Pierre de Saint-Marc	Doré	Buisson La Fleur	Saint-Marc-sur-Seine	21
Pierre de Semond	Doré	Au Coin des Fossottes	Semond	21
Pierre de Rocheville	Roche Dorée	Grange Marlet	Villaines-en-Duesmois	21
Pierre de Massangis	Massangis Clair Massangis Jaune Clair Charmot	Carrière de Vorion	Massangis	89
Pierre de Saint-Nicolas	Larrys	Saint-Nicolas	Ravières	89

Conclusion & aide à la décision

Des outils d'aide à la sélection de pierres neuves de remplacement, compatibles avec les pierres d'origine de la cathédrale, à disposition de la MOE et de la MOA :

- **Référentiel des pierres d'origine de la cathédrale ND de Paris**

  > **Données de références sur une trentaine de lithotypes inventoriés** regroupés par catégories (dureté, porosité, aspect visuel) et suivant leurs emplois spécifiques au sein de l'édifice (blocs de grandes dimensions, voûtes, pierres dures sous contrainte mécanique, etc.)

- ***Pierres de remplacement*** **> Référentiel des pierres issues des 9 carrières actives du Lutétien de l'Aisne et de l'Oise**

  > **Données de référence sur 32 lithotypes**, à considérer en fonction des besoins précis et exigences particulières (critère esthétique ou non, dureté et autres propriétés, hauteur d'assise et autres dimensions remarquables, etc.) du chantier

Pierres inventoriées sur la cathédrale ND		Période(s) de mise en œuvre	Informations géologiques		Caractéristiques physico-mécaniques de la catégorie de pierres inventoriées							Classe(s) de dureté (DTU 20.1 mod.)
Grandes catégories	Sous-catégories		Formation géologique (membre(s) géologique(s))	Sous-étage stratigraphique	Echantillonnage de la cathédrale	Localisation des échantillons sur l'édifice	Masse volumique apparente (g/m³)	Porosité à l'eau (%)	Coefficient d'absorption d'eau	Coefficient de capillarité (g.m-2.s-0,5)	Résistance à la compression (Mpa)	Vitesse du Son (m/s)	
1/ Bancs Francs parisiens s.l. & pierres équivalentes	Bancs Francs parisiens s.l. (75)	Moyen-Age	Série des Bancs Francs	Lutétien supérieur	15 échantillons avec caractérisation +/- complète	Claveaux de la nef - Parements du chœur, du transept sud & des pignons ouest & sud	1,84 à 2,39 Moy. 2,02 (13 val.)	12,9 à 30,6 Moy. 17,3 (16 val.)	0,5 à 0,65 Moy. 0,59 (4 val.)	22,3 à 245,2 Moy. 54,8 (13 val.)	13,1 à 45,9 Moy. 33,5 (11 val.)	2783 à 5084 Moy. 4189 (13 val.)	Demi-ferme à Très dure
	Calcaires à cérithes (provenances indéterminées)	ND	Calcaire à cérithes ou Série des Bancs Francs		5 échantillons avec caractérisation +/- complète	Parements du transept sud, de la nef et du pignon ouest	2,19 à 2,30 Moy. 2,22 (7 val.)	11,2 à 18,9 Moy. 15,8 (7 val.)		12,8 à 49,0 Moy. 32,0 (7 val.)	19,3 à 52,7 Moy. 34,2 (4 val.)	4041 à 4786 Moy. 4296 (7 val.)	
	Roche de Laversine & de Saint-Pierre-Aigle (02) - Pierre de Mont-l'Evêque & Liais de Senlis (60) - Pierre de Bagneux (92) - Pierres du Moulin & de Vitry (94)	XIXe, XXe siècles	Calcaire à cérithes & Série des Bancs Francs		Données bibliographiques issues du "Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889" =>		1,96 à 2,49 Moy. 2,18 (16 val.)	7,1 à 31,1 Moy. 17,2 (7 val.)	0,50 à 0,53 Moy. 0,52 (2 val.)	33,9 à 54,8 Moy. 42,5 (3 valeurs)	12,2 à 134 Moy. 42,2 (28 valeurs)	3169 à 5091 Moy. 3818 (5 valeurs)	
	Pierre de Soissons (02)		Calcaire grossier (Calcaire à Cerithium giganteum et Calcaire à Ditrupa strangulata)	Lutétien moyen									
	Pierre de Saint-Nom (78)		Calcaire grossier (Banc Royal)										
2/ Lambourdes parisiennes s.l. & pierres équivalentes	Lambourdes parisiennes s.l. (75)	Moyen-Age	Calcaire grossier (Lambourdes - Banc Royal)	Lutétien moyen	10 échantillons avec caractérisation +/- complète	Voussoirs de la nef & du chœur	1,50 à 1,96 Moy. 1,76 (6 val.)	26,4 à 42,5 Moy. 33,7 (6 val.)	0,59 à 0,72 Moy. 0,67 (6 val.)	59,5 à 228,5 Moy. 128,3 (4 val.)	6,5 à 16,2 Moy. 10,3 (5 val.)	⊥ 2039-3288 Moy. 2018 (6 val.)	Tendre à Demi-ferme
	Vergelés s.l. (provenances indéterminées)	XIXe, XX siècles	Calcaire grossier (Vergelé ou Banc Royal)		12 échantillons avec caractérisation +/- complète	Voissoires de la nef - Parements du chœur & des pignons ouest et sud	1,53 à 1,91 Moy. 1,70 (7 val.)	28,8 à 42,5 Moy. 35,9 (7 val.)	0,72-0,78 Moy. 0,75 (2 val.)	123,2 à 1194 Moy. 534 (7 val.)	4,5 à 13,0 Moy. 8,0 (4 val.)	2132 à 4255 Moy. 2869 (7 val.)	
	Pierres de Commelle & de Saint-Maximin (60)	XIXe, XXe siècles	Calcaire grossier (Vergelé - Banc Royal)		Données bibliographiques issues du "Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889" =>		1,57 à 1,85 Moy. 1,68 (9 val.)	35,6 à 38,8 Moy. 37,0 (3 val.)		461,5 (1 val.)	5,9 à 18,2 Moy. 9,6 (14 val.)	1997 à 2464 Moy. 2232 (3 val.)	
	Pierre de Charentigny (02)		Calcaire grossier (Calcaire à Orbitolites complanatus)										
	Pierres de l'Abbaye du Val & de Méry (95)		Calcaire grossier (Vergelé du Vexin)										
	Roche des Forgets "Vergelé" (95)				1 échantillon avec caractérisation +/- complète	Oculus du pignon nord	1,74	35,0		107		// 2810-2975	
3/ Calcaires biodétritiques du Vexin	Calcaires biodétritiques "tendres" du Vexin (provenance plus précise indéterminée)	XVIIIe (supposé), XIX siècles	Calcaire grossier (Calcaire biodétritique du Vexin)	Lutétien moyen	8 échantillons avec caractérisation +/- complète	Voussoirs du transept nord	1,51 à 1,75 Moy. 1,63 (2 val.)	35,2 à 41,8 Moy. 38,5 (2 val.)	0,64 à 0,74 Moy. 0,69 (2 val.)	93,2 à 219,2 Moy. 156,2 (2 val.)	4,4 à 9,9 Moy. 7,2 (2 val.)	⊥ 2140-2561 Moy. 2351 (2 val.)	Tendre à Dure
	Calcaires biodétritiques "fermes" du Vexin (provenance plus précise indéterminée)				1 échantillon avec caractérisation +/- complète	Parements du transept nord	2,09	22,6		73,0	27,1	// 4098	
	Roche des Forgets (95) "biodétritique"	XIX siècles			4 échantillons avec caractérisation +/- complète	Claveaux de la croisée du transept - Oculus du pignon sud - Parement du pignon ouest	1,90 à 2,27 Moy. 2,07 (6 val.)	35,2 à 24,4 Moy. 21,3 (6 val.)	0,59 à 0,62 Moy. 0,31 (2 val.)	22,9 à 151,0 Moy. 94,2 (6 val.)	12,2 à 52,4 Moy. 30,1 (3 val.)	3955 à 4236 Moy. 4152 (6 val.)	
	Forgets d'Auvers, Pierres de Chérence, Nesles et Vallangoujard (95) ?				Données bibliographiques issues du "Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889" =>		2,24 (Chérence)				30,3 à 47,5 (Chérence)		
4/ Calcaires oolithiques bourguignons	Pierres d'Arcenay, de Ravières & de Coulanmous, Liais de Grimault (89)	XIXe siècle	Oolithe blanche	Bathonien moyen	Données bibliographiques issues du "Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889" =>		2,06 à 2,51 Moy. 2,25 (9 val.)				22,3 à 149,9 Moy. 55,4 (11 val.)		Ferme à très dure

32 sous-types de pierres étudiées dans les 9 carrières actives de l'Aisne (02) et de l'Oise (60)			Carrière de provenance du sous-type de pierre associé	Informations géologiques		Référence échantillon	Caractéristiques physico-mécaniques de la catégorie de pierres inventoriées (valeurs moyennes)							Classe(s) de dureté (DTU 20.1 mod.)	Hauteur d'assise de blocs (m)
Grandes catégories	Pierre associée à la catégorie	Sous-type de pierre associé à la catégorie		Formation géologique (membre(s) géologique(s))	Sous-étage stratigraph.		Masse volumique apparente (g/m3)	Porosité à l'eau (%)	Coefficient d'absorption d'eau (%)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Coefficient de capillarité (g.m-2.s-0,5)	Vitesse du Son (m/s)		
A/ Calcaire tendre (à demi-ferme), fin, à Ditrupa strangulata	Pierre de Saint-Maximin	Roche Douce	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 3	Calcaire grossier (Calcaire de Saint-Leu d'Esserent)	Lutétien moyen	OC-RD	1,64	39,5	18,7	2,2	7,6	// 256 ⊥ 289	2750	Tendre	0,4 à 0,8
	Pierre de Saint-Leu	Saint-Leu	Carrière de Pierres de Saint-Vaast, Saint-Leu et Sébastopol	Calcaire grossier (Calcaire de Saint-Leu d'Esserent)		RO-SV-SL	1,68	38,1	17,5	3	13,5	// 253 ⊥ 292	2570	Demi-ferme	Max. 2
B/ Calcaire tendre, fin	Pierre de Saint-Maximin	Roche Fine	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 1	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)	Lutétien moyen	DE-RFS	1,93	28,5	9,4	3,1	6,5	// 146 ⊥ 134	2730	Tendre	Max. 0,5
	Pierre de Saint-Vaast	Roche Fine	Carrière de Pierres de Saint-Vaast, Saint-Leu et Sébastopol	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		RO-SV-F	1,6	40,6	19,1	2,1	8,8	// 585 ⊥ 719	2340	Tendre	Max. 3
	Pierre de Noyant	Banc Royal	Carrière de Pierre de Noyant	Calcaire grossier (Calcaire à Ditrupa strangulata)		NO-BR	1,5	44,1	22,6	1,4	6,7	// 928 ⊥ 760	2270	Tendre	Max. 1,6
	Pierre de Vaissens	Banc Franc	Carrière de Pierre de Vaissens	Calcaire grossier (Calcaire à Orbitolites complanatus)		VA-BF	1,6	40,6	18,3	1,4	9,8	// 552 ⊥ 599	2230	Tendre	Max. 1,5
	Pierre de Vaissens	Banc Royal	Carrière de Pierre de Vaissens	Calcaire grossier (Calcaire à milioles)		VA-BR	1,57	41,5	20,3	1,7	8,1	// 941 ⊥ 1064	2100	Tendre	Max. 1,5
C/ Calcaire tendre (à demi-ferme), coquillier	Pierre de Saint-Maximin	Roche ½ Fine	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 3	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)	Lutétien moyen	OC-RDF	1,79	33,9	13,1	2	10,1	// 251 ⊥ 375	2880	Demi-ferme	0,4 à 0,8
	Pierre de Saint-Maximin	Banc 5-6	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 4	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		BPE-B56	1,63	39,6	17,3	1,9	7,3	// 156 ⊥ 196	3570	Tendre	0,4 à 0,7
	Pierre du Clocher de Bonneuil	Coquillier	Carrière de Pierre du Clocher de Bonneuil	Calcaire grossier (Calcaire à Orbitolites complanatus)		CDC-CO	1,68	37,7	18,1	1,8	8,4	// 182 ⊥ 205	2540	Tendre	1 à 1,2
	Pierre de Noyant	Banc Franc	Carrière de Pierre de Noyant	Calcaire grossier (Calcaire à milioles)		NO-BF	1,72	36,4	16,1	2,6	11,2	// 106 ⊥ 124	2650	Demi-ferme	Max. 2,7
	Pierre de Noyant	1/2 Fine Grignard (Lavignelle)	Carrière de Pierre de Noyant	Calcaire grossier (Calcaire à Orbitolites complanatus)		NO-LA	2,02	25,2	10,3	3,9	10	// 62 ⊥ 89	2190	Demi-ferme	Max. 1,6
	Pierre de Vaissens	Banc Gris	Carrière de Pierre de Vaissens	Calcaire grossier (Calcaire à Ditrupa strangulata)		VA-BG	1,67	38,2	16,6	1,4	7,2	// 683 ⊥ 727	2400	Tendre	Max. 1
D/ Calcaire demi-ferme, fin	Pierre de Saint-Maximin	Roche Franche Fine	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 1	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)	Lutétien moyen	DE-RF11	2,09	22,8	7	3	15,9	// 84 ⊥ 85	2790	Demi-ferme	Max. 0,5
	Pierre de Saint-Maximin	Roche Franche ½ Fine	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 3	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		OC-RFDF	1,77	34,2	13,7	3,3	14,9	// 375 ⊥ 432	3110	Demi-ferme	0,4 à 0,8
	Pierre de Saint-Maximin	Roche Ferme Fine	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 2	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		RO-SM-FF	1,68	38	17	2,5	13,4	// 386 ⊥ 439	2810	Demi-ferme	Max. 0,4
	Pierre de la Croix Huyart	H6 (1/2 D)	Carrière de Pierre de la Croix Huyart	Calcaire grossier (Calcaire à milioles)		HO-H6-DD	1,7	37	10,8	2,8	13,2	// 160 ⊥ 151	3100	Demi-ferme	Max. 0,6
	Pierre du Clocher de Bonneuil	Banc Fin (Fine)	Carrière de Pierre du Clocher de Bonneuil	Calcaire grossier (Calcaire à milioles)		CDC-BF	1,67	38,2	16	2,6	13,5	// 158 ⊥ 135	2750	Demi-ferme	1 à 1,2
	Pierre de la Croix Huyart	H4 ½ Dur	Carrière de Pierre de la Croix Huyart	Calcaire à cérithes	Lutétien supérieur	HO-H4-DD	1,79	33,6	13,6	2,6	14,7	// 416 ⊥ 451	3360	Demi-ferme	Max. 0,4
E/ Calcaire demi-ferme (à ferme), coquillier	Pierre de Saint-Maximin	Roche Franche Construction	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 1	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)	Lutétien moyen	DE-RFC	1,90	29,8	10,6	6,7	14,2	// 133 ⊥ 138	3210	Demi-ferme	Max. 0,5
	Pierre de Saint-Maximin	Roche Franche construction	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 2	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		RO-SM-FC	1,97	27,1	7,1	6,6	21,5	// 75 ⊥ 97	3840	Ferme	Max. 0,4
	Pierre de Saint-Maximin	Banc 3	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 4	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		BPE-B3	1,88	30,5	10,9	5,2	19,3	// 131 ⊥ 143	3490	Demi-ferme	0,5 à 1,1
	Pierre du Clocher de Bonneuil	Banc Franc (½ Fine)	Carrière de Pierre du Clocher de Bonneuil	Calcaire grossier (Calcaire à Orbitolites complanatus)		CDC-BFR	1,87	30,9	10,7	3,6	16,5	// 114 ⊥ 152	3370	Demi-ferme	1 à 1,2
F/ Calcaire ferme à dur, fin	Pierre de Saint-Maximin	Liais ½ Fin	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 3	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)	Lutétien moyen	OC-LDF	2,16	19,7	6,1	9,5	61,3	// 110 ⊥ 153	4220	Dure	0,15 à 0,2
	Pierre de Sébastopol	Roche Franche	Carrière de Pierres de Saint-Vaast, Saint-Leu et Sébastopol	Calcaire grossier (Vergelé/Banc Royal)		RO-SE-L2	1,97	27	8,1	12	39,9	// 106 ⊥ 151	4470	Demi-dure	Max. 0,6
	Pierre de la Croix Huyart	H5	Carrière de Pierre de la Croix Huyart	Calcaire grossier (Calcaire à milioles)		HO-H5	1,92	28,9	10,7	2,8	24	// 242 ⊥ 233	3020	Ferme	Max. 0,6
G/ Calcaire demi-dur à très dur, à cérithes	Pierre de Saint-Maximin	Liais	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 1	Calcaire à cérithes	Lutétien supérieur	DE-L	2,33	14,1	3,5	12,5	72,7	// 18 ⊥ 21	5180	Très dure	Moy. 0,25 Max. 0,6
	Pierre de Saint-Maximin	Banc 1	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 4	Calcaire à cérithes		BPE-B1	2,39	11,5	2,7	10	77,7	// 5 ⊥ 7	4650	Très dure	0,2 à 0,5
	Pierre de Saint-Maximin	Liais	Carrière de Pierre de Saint-Maximin 2	Calcaire à cérithes		RO-SM-LI	2,13	21,2	5,7	7,9	37,4	// 34 ⊥ 37	3910	Demi-dure	Max. 0,25
	Pierre de Sébastopol	Liais	Carrière de Pierres de Saint-Vaast, Saint-Leu et Sébastopol	Calcaire à cérithes		RO-SE-L	2,26	15,9	4,1	10	51,9	// 67 ⊥ 133	4010	Dure	Max. 0,2
	Pierre de la Croix Huyart	H4 Dur	Carrière de Pierre de la Croix Huyart	Calcaire à cérithes		HO-H4-D	2,13	21	4,9	11,6	39,1	// 90 ⊥ 146	4260	Demi-dure	Max. 0,6 (pas de dégât)
	Pierre de la Croix Huyart	H4 Coquillier	Carrière de Pierre de la Croix Huyart	Calcaire à cérithes		HO-H4-CO	2,16	19,4	4,3	9,9	30,8	// 15 ⊥ 41	4690	Demi-dure	

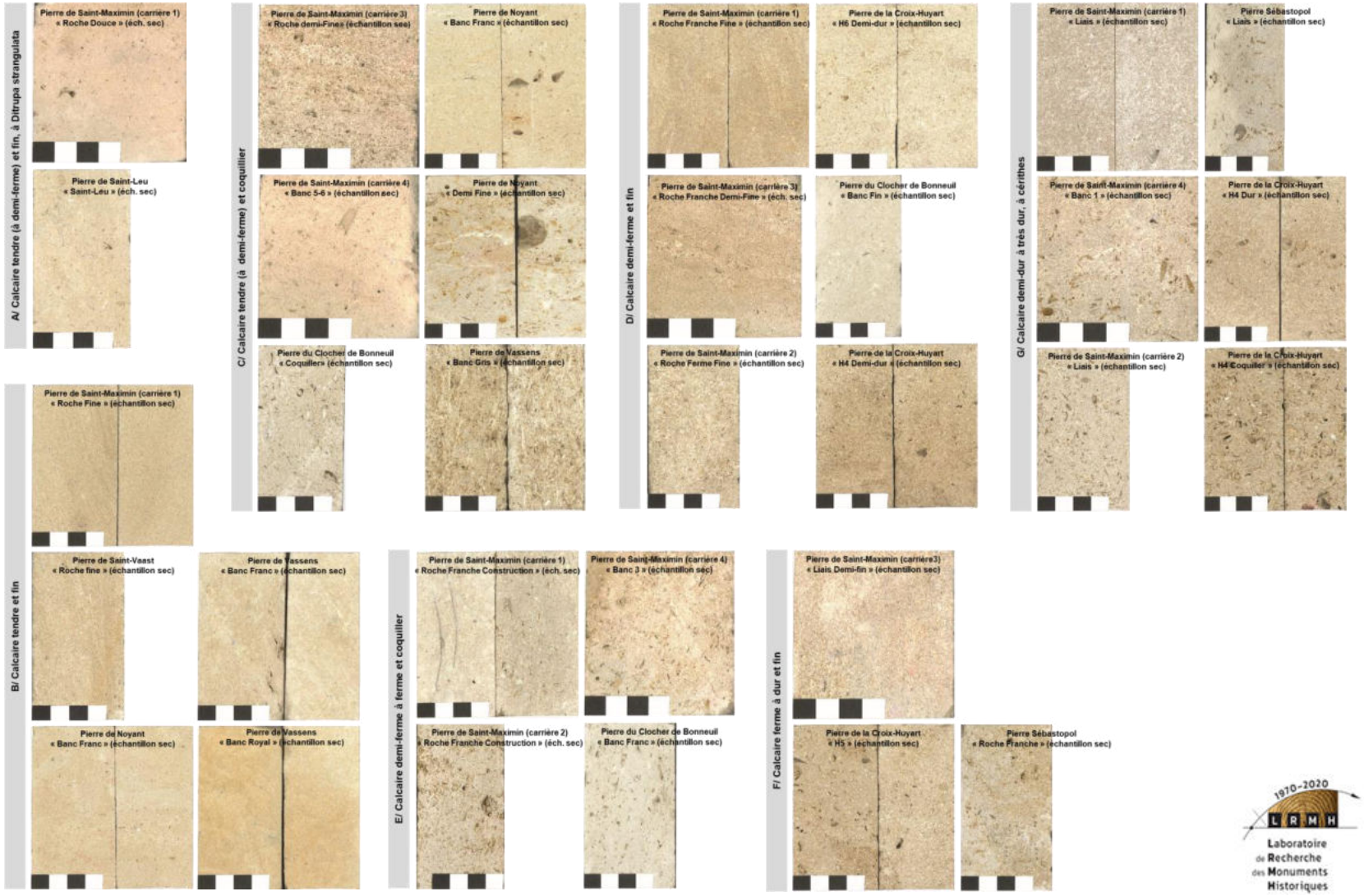
Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques 1970-2020

Géosciences pour une Terre durable brgm

Pierres de remplacement (suite)

> Collection d'échantillons de référence

> Parmi les 32, **sélection par la MOE de 12 pierres** adaptées aux exigences de la restauration



1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

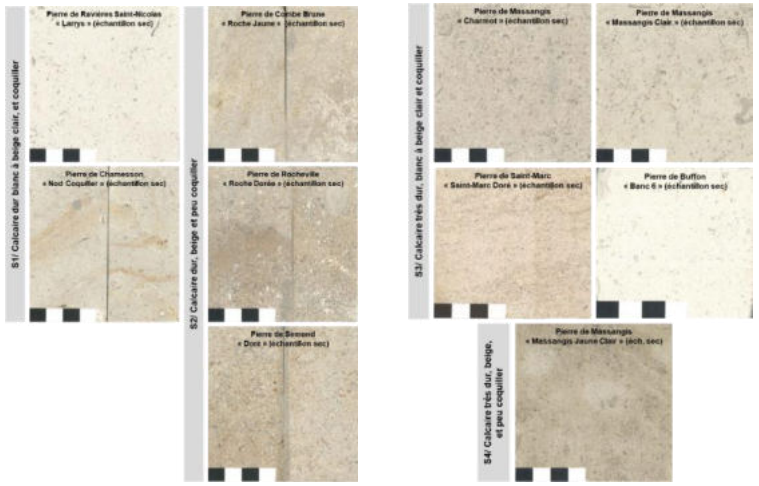
Géosciences pour une Terre durable brgm

- ***Pierres de substitution*** **> Référentiel des pierres de carrières actives du Bathonien de la Charente, de la Côte-d'Or et de l'Yonne**

> Données de référence sur 10 lithotypes, à considérer en cas de besoins non satisfaits par la disponibilité en pierres de remplacement adaptées

10 sous-types de pierres étudiés dans 7 carrières actives de Charente (16), Côte d'Or (21) et Yonne (89)			Carrière de provenance du sous-type de pierre associé	Informations géologiques		Référence Echantillon	Caractéristiques physico-mécaniques de la catégorie de pierres inventoriées							Classe(s) de dureté (DTU 20.1 mod.)	Hauteur d'assise de blocs (m)
Grandes catégories	Pierre associée à la catégorie	Sous-type de pierre associé à la catégorie		Formation géologique (membre(s) géologique(s))	Etage stratigraph.		Masse volumique apparente (g/m3)	Porosité à l'eau (%)	Coefficient d'absorption d'eau (%)	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (Mpa)	Coefficient de capillarité (g.m-2.s-0,5)	Vitesse du Son (m/s)		
S1/ Calcaire dur, blanc à beige clair et coquiller	Pierre de Saint-Nicolas	Larrys	Carrière de Pierre de Ravières Saint-Nicolas	Calcaire oolithique de l'Oolithe Blanche	Bathonien	PO-RA-LA	2300	14,9	7	7,5	52,1	// 71 ⊥ 81	4,34	Dure	2 m à 2,5 m
	Pierre de Chamesson	Nod coquiller	Carrière de Pierre de Chamesson			CV-CH-CO	2200	18,9	6,8	9,2	65,5	// 86 ⊥ 80	4,52		
S2/ Calcaire dur, beige foncé et peu coquiller	Pierre de Semond	Doré	Carrière de Pierre de Semond	Calcaire oolithique de l'Oolithe Blanche	Bathonien	SE-DO	2230	17,6	5,9	7,4	52	// 50 ⊥ 61	3,86	Dure	1 m à > 2,5 m
	Pierre de Rocheville	Roche Dorée	Carrière de Pierre de Rocheville			CV-VD-DO	2280	15,9	3,8	10,2	56,3	// 46 ⊥ 45	4,64		
	Pierre de Combe Brune	Roche Jaune	Carrière de Pierre de Combe-Brune	Calcaire de Combe Brune		CB-RJ	2370	14,4	4,5	7	54,6	// 67 ⊥ 69	4,20		
S3/ Calcaire très dur, beige clair et coquiller	Pierre de Massangis	Charmot	Carrière de Pierre de Massangis	Calcaire oolithique de l'Oolithe Blanche	Bathonien	PO-MA-CH	2340	13,5	5,9	7	72	// 31 ⊥ 30	4,92	Très dure	1,9 m à > 2,5 m
	Pierre de Buffon	Banc 6	Carrière de Pierre de Buffon			SAS-BU-6	2170	20,1	8,5	8,3	70,6	121 119	3,97		
	Pierre de Massangis	Clair	Carrière de Pierre de Massangis			PO-MA-CL	2370	12,4	4,6	12,4	90,6	// 47 ⊥ 55	3,66		
	Pierre de Saint-Marc	Doré	Carrière de Pierre de Saint-Marc 1			SMA-CF	2310	14,6	4,3	16,8	82,3	// 30 ⊥ 31	4,77		
S4/ Calcaire très dur, beige foncé et peu coquiller	Pierre de Massangis	Jaune Clair	Carrière de Pierre de Massangis	Calcaire oolithique de l'Oolithe Blanche	Bathonien	PO-MA-JC	2340	13,4	3,4	13,5	100,4	// 17 ⊥ 18	4,92	Très dure	1 m à > 2,5 m

> Collection d'échantillons de référence



> Pas de pierres sélectionnées à ce jour par la MOE pour les parties médiévales à restaurer de l'édifice

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm

1970-2020 LRMH Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques

Géosciences pour une Terre durable brgm