PMH261243V1 – Diffusion du 30 juin 2026







Laboratoires BPE
5, rue de Hengwiller – 67440 Dimbsthal
Tél : 03 88 91 13 96 - @ : bpe@bpe-ing.com
SARL au capital de 150 000€ - SIRET 517 597 092 00025 – APE 7112B

(60) – CHANTILLY

GRANDES ECURIES
AILE DE L'HEMICYCLE

Identification pétrophysique et physico-chimique des matériaux

Assistance scientifique de laboratoire

Page intentionnellement blanche

(60) – CHANTILLY – GRANDES ECURIES

Restauration de l'aile de l'Hémicycle

QUALIFICATION PETROPHYSIQUE DES PIERRES, IDENTIFICATION PHYSICO-CHIMIQUE DES MORTIERS ET RECHERCHE DE COMPOSES PATHOGENES

Maîtrise d'ouvrage : **DOMAINE DE CHANTILLY – Fondation d'Aumale – Madame Virginie CORNU -** 17, rue du Connétable 60500 CHANTILLY

Maîtrise d'œuvre : **COVALENCE ARCHITECTES - Monsieur Rémy FROMONT, Architecte en Chef des Monuments Historiques -** 136, rue de Bagnolet 75020 PARIS





Page intentionnellement blanche

SOMMAIRE

PREAMBULE 6

DOCUMENTS DE REFERENCE 7

CARTOGRAPHIE DES MATERIAUX PIERREUX 10

ANALYSES DES PIERRES EN OEUVRE 14

PROGRAMME D'ANALYSES 14
REFERENCEMENT DES PRELEVEMENTS 14
LOCALISATION DES PRELEVEMENTS 15
FACIES LITHOLOGIQUES DES PRELEVEMENTS 16
RESULTATS DES ANALYSES PETROPHYSIQUES 18
DETERMINATION DE LA POROSITE OUVERTE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE 18
MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES SONORES 18
DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE 19
ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION 19
DETERMINATION DES MODULES D'ELASTICITE 20
DETERMINATION DU NUMERO D'IDENTIFICATION 20
SUR LA QUALITE ET LA NATURE DES PIERRES 21
FOCUS SUR LES PIERRES EN ŒUVRE 24

ANALYSES DES MORTIERS EN OEUVRE 28

PROGRAMME D'ANALYSES 28
REFERENCEMENT DES PRELEVEMENTS 28
LOCALISATION DES PRELEVEMENTS 29
DESCRIPTION ET ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE 30
SUR LA NATURE DES MORTIERS 35

ANALYSES DES PHASES PATHOGENES 38

PROGRAMME ANALYTIQUE 38
TYPOLOGIE ET REFERENCEMENT DES PRELEVEMENTS 38
DETERMINATION DES TENEURS EN SELS SOLUBLES 41
SEUILS D'ACCEPTABILITE DES TENEURS EN SELS SOLUBLES 42
SUR L'ETAT PATHOLOGIQUE DES MAÇONNERIES 43

Note sur la présentation du rapport : Ce rapport est optimisé pour une impression recto-verso.

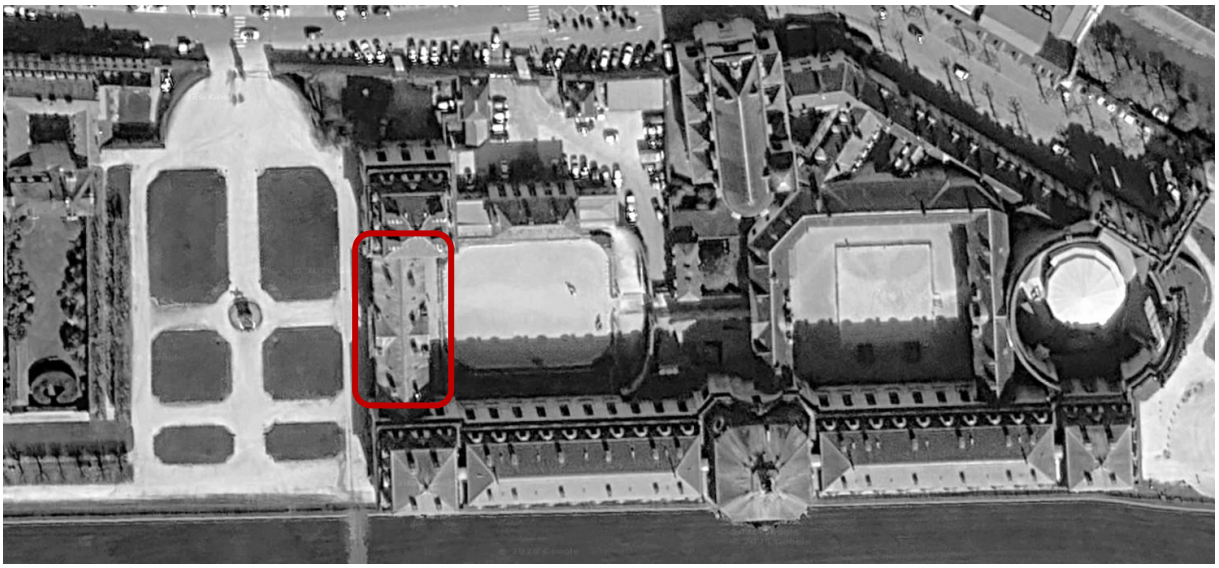
PREAMBULE

La mission confiée par la Fondation d'Aumale au laboratoire BPE, sous la maitrise d'œuvre de Monsieur Rémy FROMONT, Architecte en Chef des Monuments Historiques a comme objet d'accompagner la maitrise d'ouvrage et la maitrise d'œuvre dans l'identification des matériaux et plus particulièrement l'identification des pierres et mortiers ainsi que la qualification des potentiels agents pathogènes les affectant, dans le cadre des travaux de restauration de l'aile de l'Hémicycle des Grandes Ecuries du Domaine de Chantilly.

Ces travaux ont été déclinés en trois phases dont chacune fait l'objet d'un chapitre détaillé regroupant l'ensemble des observations, analyses et interprétation des résultats. Ces trois phases se déclinent comme suit :

- Phase n°1 : caractérisation pétrophysique des pierres en œuvre,
- Phase n°2 : caractérisation physico-chimique des mortiers en œuvre,
- Phase n°3 : identification et quantification des agents pathogènes.

Cette étude fait suite au programme analytique préétabli et correspondant au cahier des charges dressé par le maître d'œuvre portant la référence SLPMH2604212V1 en date du 20 avril 2026 confirmé par l'engagement de la Fondation d'Aumale en date du 18 mai 2026.







DOCUMENTS DE REFERENCE

Cette étude est réalisée en conformité avec :

- Ministère de la Culture et de la Communication. Direction de l'Architecture et du Patrimoine. Mission étude et travaux. Travaux de restauration des Monuments Historiques. Guide de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre.

- « Ouvrages en pierre de taille » édité par le Ministère de la Culture et de la Communication - Direction de l'Architecture et du Patrimoine - Mission étude et travaux - édition juillet 2003.

- Norme NF B 10-601 « Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles ».

- Norme NF EN 14579 « Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la vitesse de propagation du son ».

- Norme NF EN 1936 « Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale ».

- Norme NF EN 1925 : « Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité ».

- Norme NF EN 1926 : « Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination de la résistance en compression uniaxiale ».

- Roche de France (2006) Edition Pro Roc, 236 p.

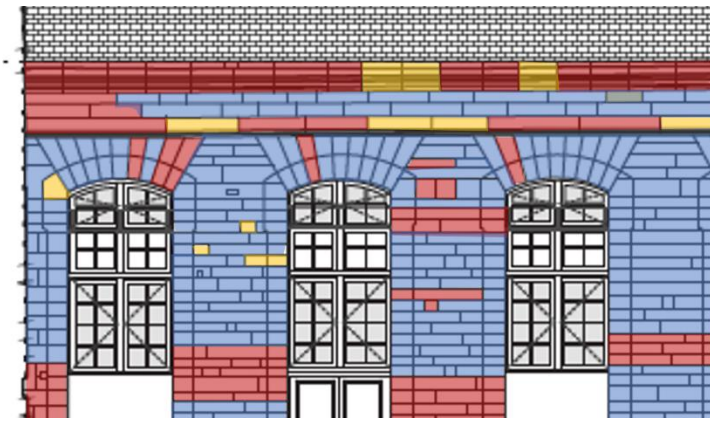
- Répertoire des carrières de pierre de taille en exploitation en 1889 publié par le ministère des travaux publics en 1890

- Notice de la carte géologique XXIII-12 « Creil » aux éditions BRGM

- NF DTU 26.1 : « Travaux de bâtiment - Travaux d'enduits de mortiers - Partie 1-1 : cahier des clauses techniques - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux - Partie 2 : cahier des clauses spéciales ».

- Pierre et patrimoine, connaissance et conservation, BIGAS JP., BROMBLET P., MARTINET G., GAUDON P. et al., (2009) Actes Sud / Cefracor, Arles, 214 p.

- La conservation de la pierre monumentale en France (coordonné par PHILIPPON J., JEANNETTE D. et LEFEVRE R.A.), Presse du CNRS, Paris, 1992, 268 p. ISBN 2 87682 0595.

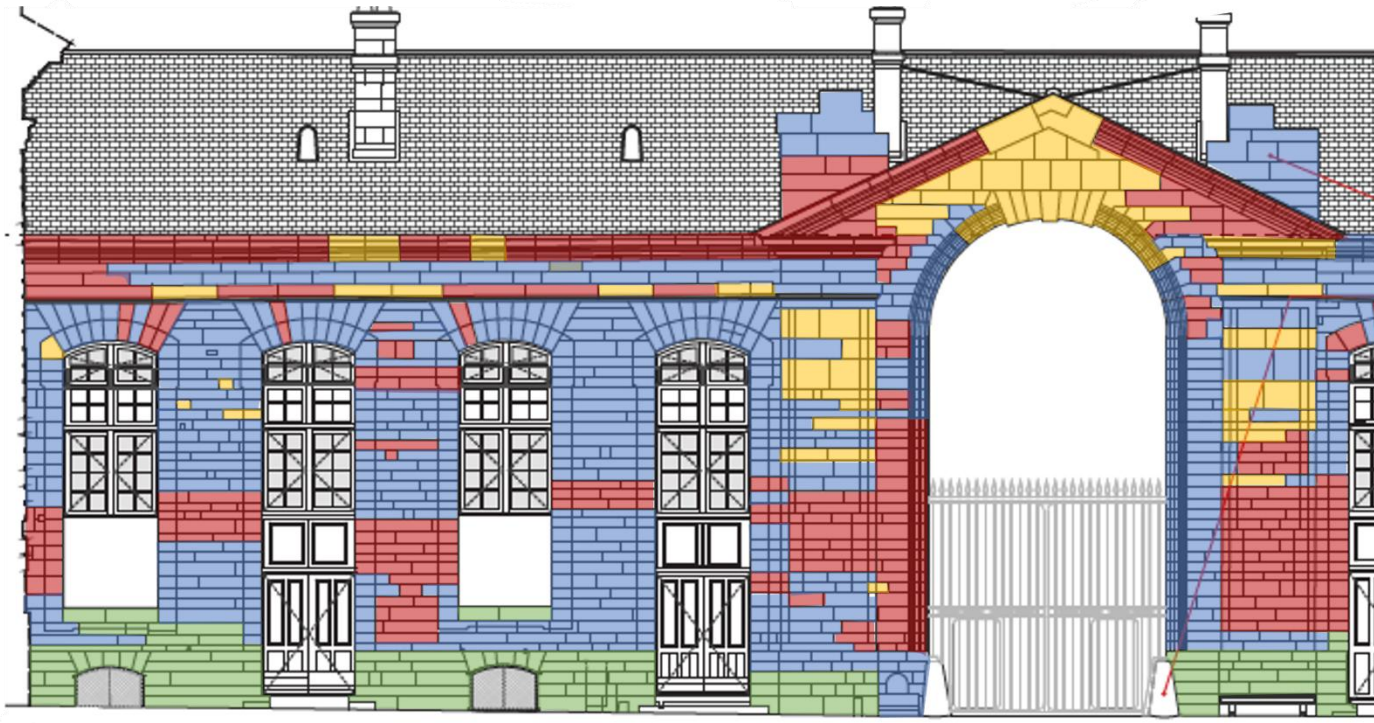


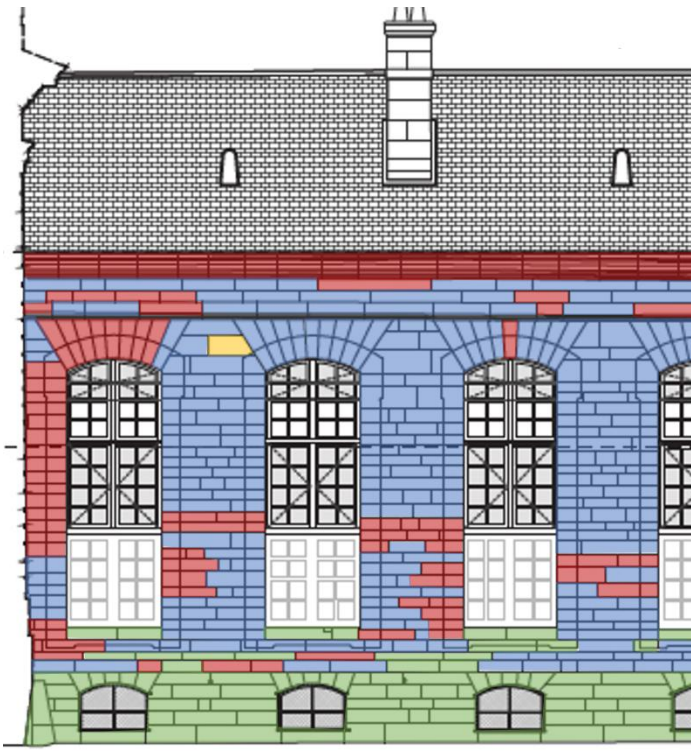
CARTOGRAPHIE DES PIERRES



CARTOGRAPHIE DES MATERIAUX PIERREUX

L'établissement d'une cartographie de répartition des matériaux a comme objet de renseigner la maîtrise d'œuvre sur les différentes natures de pierres ayant servies à l'édification de l'ouvrage. Cette cartographie sert également de base pour la localisation des prélèvements de pierres pour les caractérisations pétrophysiques en laboratoire.

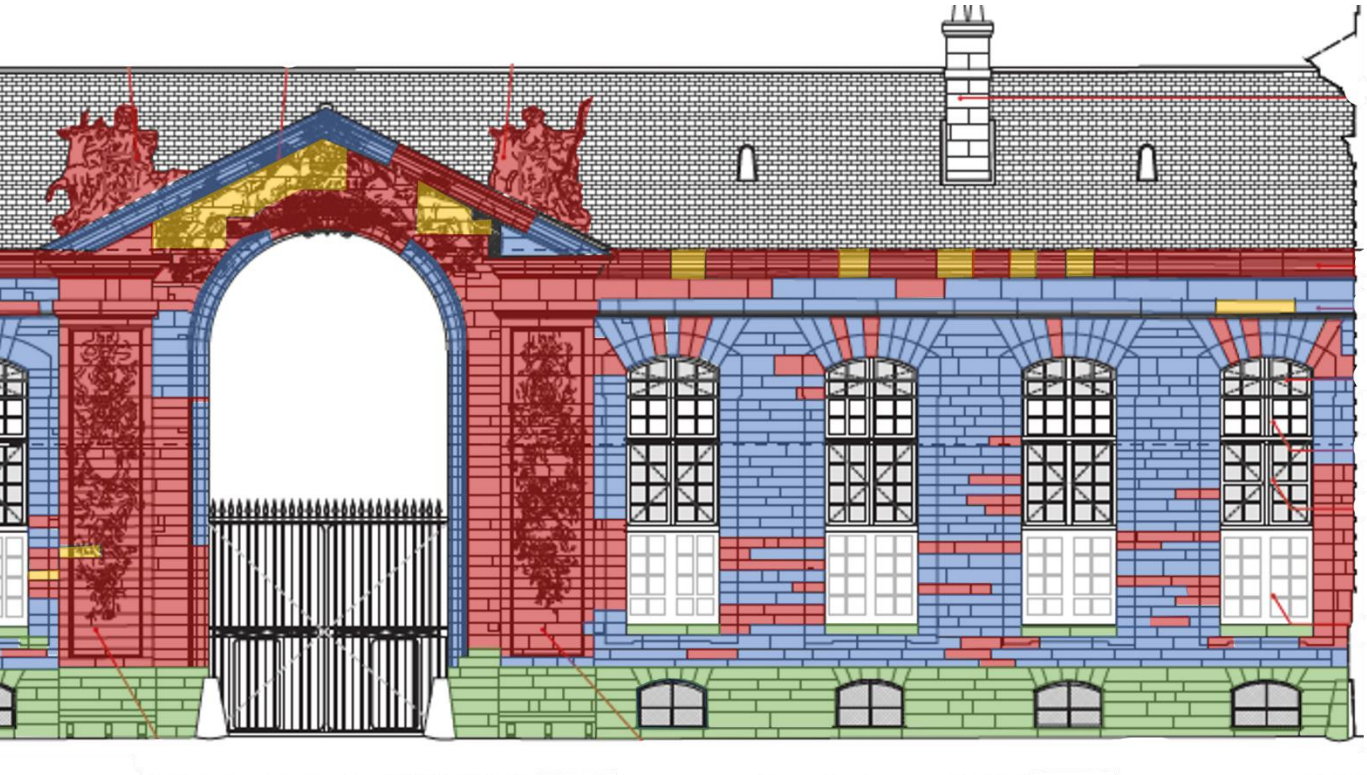




Légende des codes couleurs des cartographies de répartition des matériaux :

[carto jaune] : pierre sédimentaire calcaire fine rubanée jaune beige à ditrupa strangulata.
[carto rouge] : pierre sédimentaire calcaire fine beige à ditrupa strangulata et milioles.
[carto bleue] : pierre sédimentaire calcaire coquillière grossière à cérithes et ditrupa strangulata.
[carto vert] : pierre sédimentaire calcaire coquillière grossière beige à milioles.







QUALIFICATION DES PIERRES



ANALYSES DES PIERRES EN OEUVRE

Les analyses pétrophysiques et pétrographiques des pierres en œuvre ont comme objet de renseigner la maîtrise d'œuvre sur les différentes natures de pierres ayant servies à l'édification de l'ouvrage. Ces analyses permettent d'établir les propriétés physico-chimiques de ces pierres qui serviront de référence pour la recherche des pierres de substitution actuellement en exploitation présentant des caractéristiques similaires et pouvant être compatible d'un point de vue des caractéristiques pétrophysiques définies par les textes réglementaires.

Programme d'analyses

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées pour la qualification pétrophysique des roches sont les suivantes :

- Mesure de la **porosité et de la masse volumique**. Essais réalisés selon les prescriptions de la Norme NF EN 1936,
- Mesure de **l'absorption d'eau et de la porosité à 48H** selon les prescriptions de la Norme NF EN 13755,
- Détermination du **coefficient d'absorption d'eau par capillarité** selon les prescriptions de la Norme NF EN 1925,
- Mesure de la **vitesse de propagation des ondes sonores** selon les prescriptions de la Norme NF EN 14579,
- Détermination de la **dureté superficielle** par mesure de la largeur à la rayure au scléromètre de Martens selon les recommandations de la norme NF X 80-003,
- Essai de **résistance à la compression** selon les prescriptions de la Norme NF EN 1926.

Référencement des prélèvements

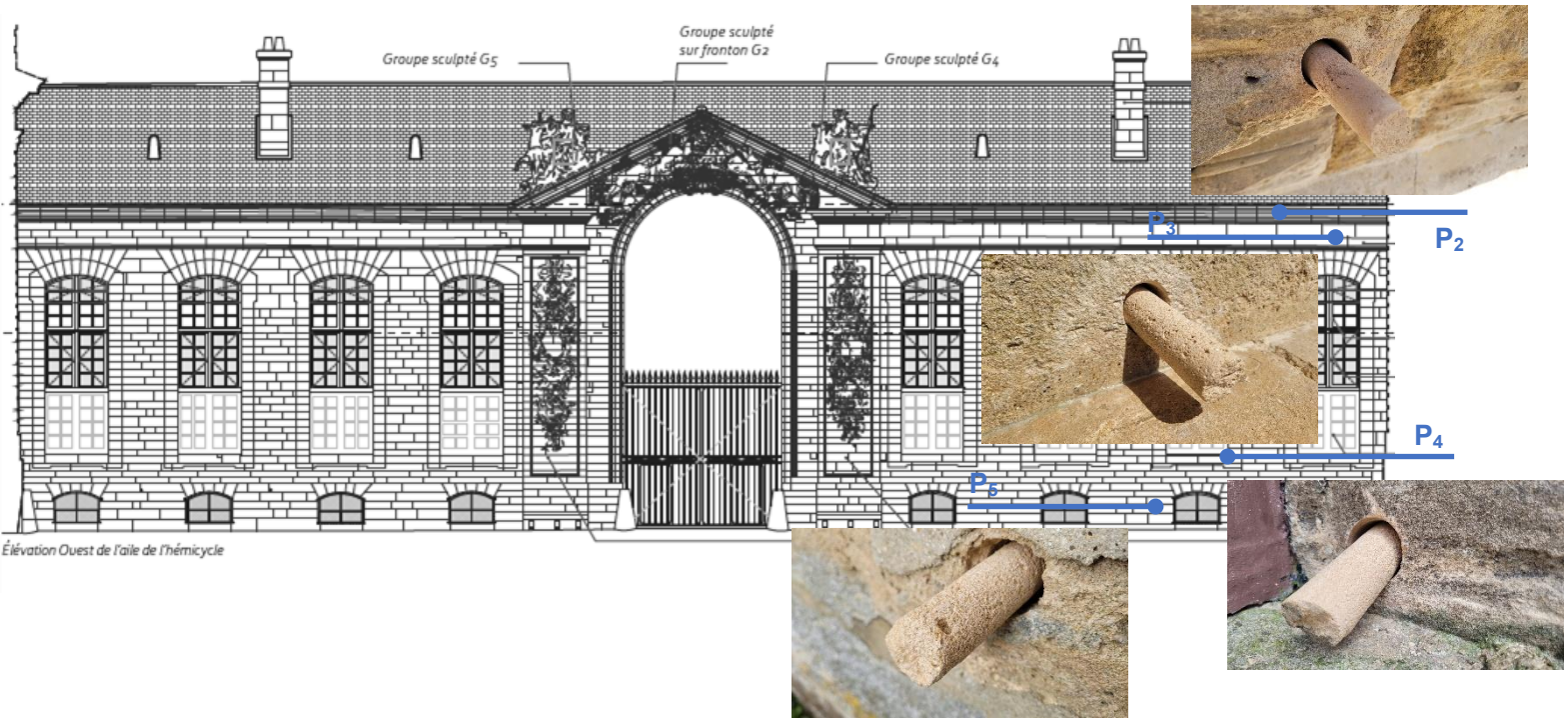
Dans le cadre des caractérisations des pierres en œuvre, ont été réalisés des prélèvements par carottage de diamètre 45 mm par le laboratoire en fonction de la nature géologique des roches. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

REF. BPE	DESIGNATION
PMH261243 – 1	**P1** : prélèvement par carottage Ø 45 mm sur pierre fine rubanée jaune beige à ditrupa strangulata
PMH261243 – 2	**P2** : prélèvement par carottage Ø 45 mm sur pierre fine beige sur corniche à ditrupa strangulata
PMH261243 – 3	**P3** : prélèvement par carottage Ø 45 mm sur pierre coquillière grossière à cérithes et ditrupa strangulata
PMH261243 – 4	**P4** : prélèvement par carottage Ø 45 mm sur pierre fine ocre beige à patine grise à milioles
PMH261243 – 5	**P5** : prélèvement par carottage Ø 45 mm sur pierre coquillière grossière beige à milioles sur soubassement

Tableau 1 : référencement des échantillons de pierres en œuvre pour analyses de caractérisation en laboratoire

Localisation des prélèvements

ELEVATION OUEST

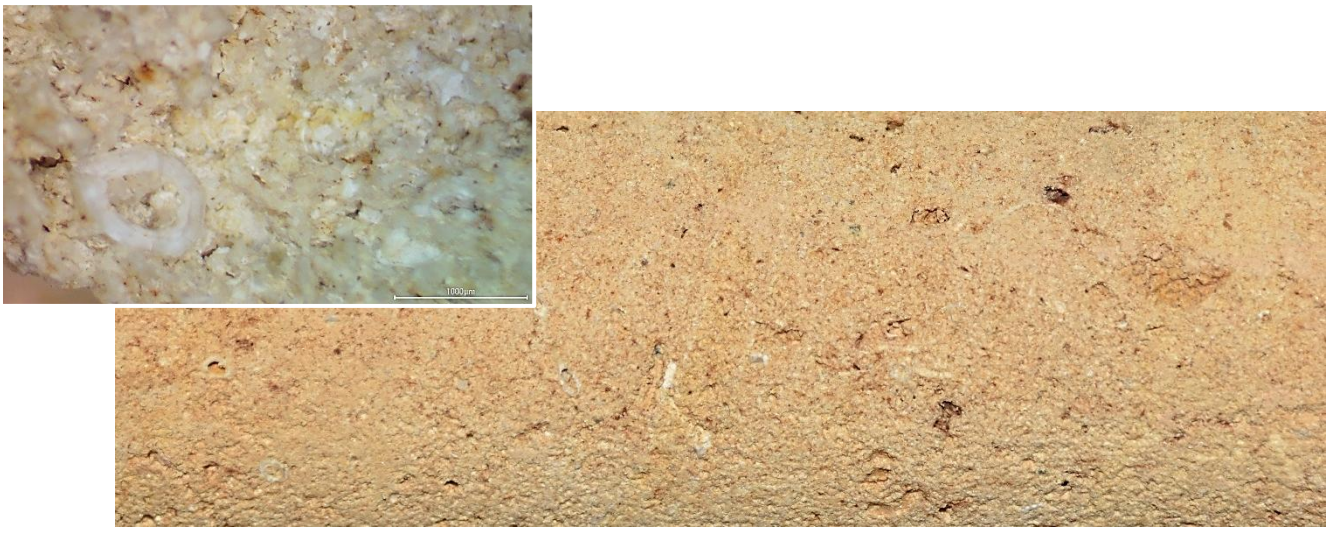


ELEVATION EST



Faciès lithologiques des prélèvements

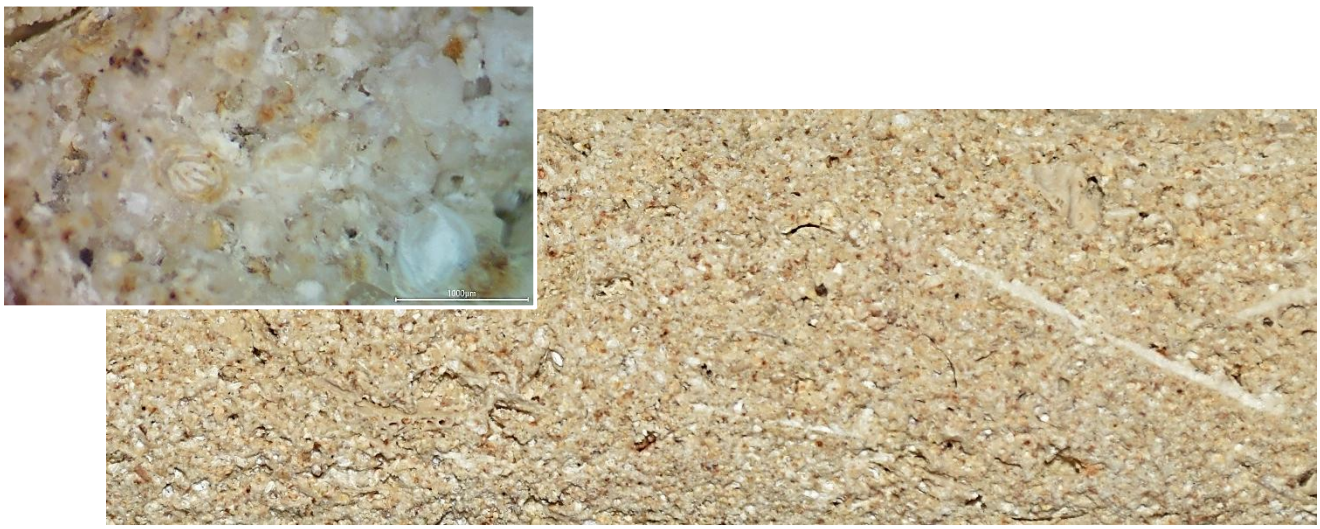
P_1 : Elévation courante - Pierre fine rubanée jaune beige [PMH261243-1]



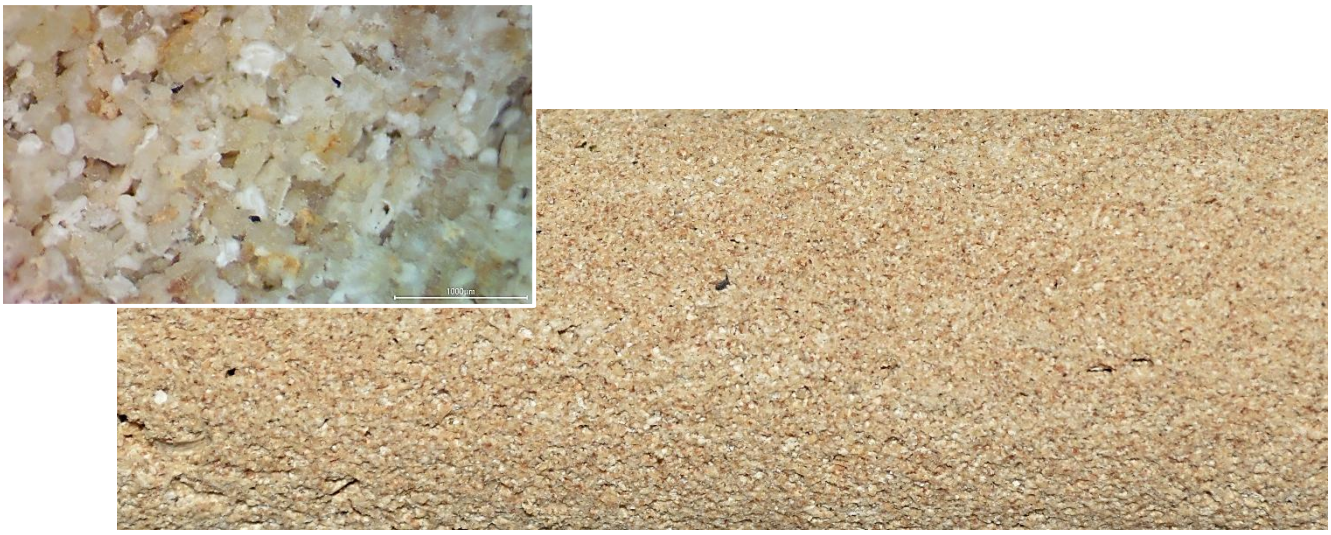
P_2 : **Corniche -** Pierre fine beige [PMH261243-2]



P_3 : **Entablement -** Pierre coquillière grossière à cérithes [PMH261243-3]



P_4 : Rejaillissement - Pierre fine ocre beige à patine grise [PMH261243-4]



P_5 : Soubassement [PMH261243-5]



Résultats des analyses pétrophysiques

Détermination de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente

La mesure de la porosité s'effectue sur un matériau solide et insoluble par pesée hydrostatique. Elle s'exprime en pourcentage, par le rapport du volume des vides au volume total et indique la grandeur du volume des pores accessibles à l'eau par le volume apparent de l'éprouvette. La masse volumique apparente renseigne sur le volume total des vides, d'où l'on déduit la porosité. Les essais ont été réalisés selon les recommandations de la norme NF EN 1936.

REFERENCE ECHANTILLON	POROSITE OUVERTE (%)	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE (KG/M^3)
P1 [Elévation] PMH261243-1	**41,3**	**1573**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**38,9**	**1646**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**35,4**	**1717**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**30,3**	**1821**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**34,0**	**1778**

Tableau 2 : détermination de la porosité et de la masse volumique

Mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores

La vitesse de propagation d'une onde ultra sonique (en m/s) dans un échantillon se fait selon la formule v = L / t. L étant la distance parcourue dans le matériau (en m) par l'impulsion vibratoire pendant le temps t (en s). Les essais ont été réalisés selon les recommandations de la norme NF EN 14579.

REFERENCE ECHANTILLON	VITESSE DE PROPAGATION DU SON (M/S)
P1 [Elévation] PMH261243-1	**2169**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**2424**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**2319**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**2539**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**2293**

Tableau 3 : mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores

Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité

L'essai est effectué dans une enceinte à 20°C et 90% d'humidité relative. La base des éprouvettes est immergée sur une hauteur de 3 mm dans l'eau potable à une température de 20°C. Le niveau d'eau est maintenu constant pendant toute la durée de l 'essai. Des pesées sont effectuées à des intervalles de temps en progression logarithmique. La dernière détermination est effectuée lorsque la quantité d'eau totale absorbée reste constante. Les essais ont été réalisés selon les recommandations de la norme NF EN 1925.

REFERENCE ECHANTILLON	COEFFICIENT DE CAPILLARITE ($G.M^{-2}.S^{-0,5}$)
P1 [Elévation] PMH261243-1	**358**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**379**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**430**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**422**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**456**

Tableau 4 : détermination du coefficient de capillarité

Essai de résistance à la compression

Les échantillons sont soumis à une pression dont l'avance est normalisée suivant les caractéristiques géométriques de la pierre. On applique la pression jusqu'à rupture de l'échantillon. Les essais ont été réalisés suivant le mode opératoire de la norme NF EN 1926, avec une presse de 300 KN de classe A.

REFERENCE ECHANTILLON	CONTRAINTE DE RUPTURE (MPA)
P1 [Elévation] PMH261243-1	**4,76**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**6,57**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**5,60**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**6,24**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**8,28**

Tableau 5 : détermination de la résistance à la compression

Détermination des modules d'élasticité

Les modules d'élasticité dynamique et statique ont été établis par calcul. Le module d'élasticité dynamique a été établi en référence à la procédure RILEM par intégration de la masse volumique et la vitesse de propagation des ondes sonores. Le module d'élasticité statique a été établi en référence à la publication « Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus » [V.Brotons et al.-2016]. Il s'agit d'une valeur médiane issue des neuf équations apportant un coefficient de corrélation supérieur à 0,9.

REFERENCE ECHANTILLON	MODULE D'ELASTICITE DYNAMIQUE E_{DYN}(GPA)	MODULE D'ELASTICITE STATIQUE E_{STAT} (GPA)
P1 [Elévation] PMH261243-1	**7,40**	**4,33**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**9,68**	**6,31**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**9,23**	**5,92**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**11,7**	**8,09**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**9,34**	**6,02**

Tableau 6 : détermination des modules d'élasticité statique et dynamique par calcul

Détermination du numéro d'identification

La détermination du numéro d'identification des pierres calcaires est la plus ancienne et encore la plus utilisée et la plus courante (issue de l'ancienne norme d'identification indexée NF B 10-301, datant de 1975). Ce numéro est un outil de sélection basé sur trois caractéristiques physiques. Ce numéro d'identification I, compris entre 0,5 et 14, est déterminé à l'aide la détermination de la masse volumique apparente, la mesure de la dureté superficielle à l'aide du scléromètre de Martens et la mesure de la vitesse de propagation du son.

REFERENCE ECHANTILLON	NUMERO D'IDENTIFICATION I	APPELATION
P1 [Elévation] PMH261243-1	**3**	**Tendre**
P2 [Corniche] PMH261243-2	**3**	**Tendre**
P3 [Entablement] PMH261243-3	**3,5**	**Tendre**
P4 [Rejaillissement] PMH261243-4	**3,5**	**Tendre**
P5 [Soubassement] PMH261243-5	**3,5**	**Tendre**

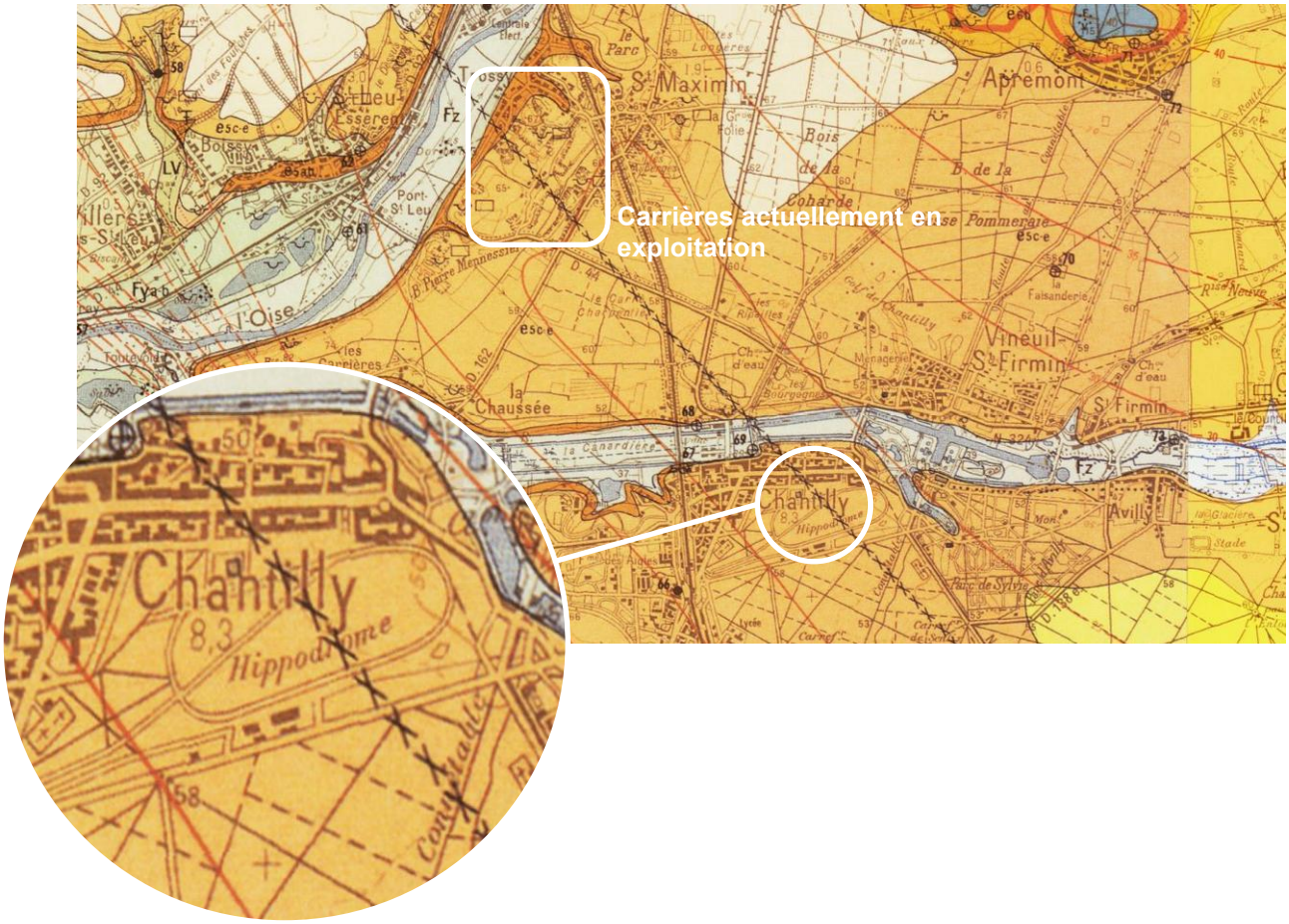
Tableau 7 : détermination du numéro de classement Afnor et de l'appellation des pierres

Sur la qualité et la nature des pierres

Les pierres analysées répondent aux faciès actuellement en exploitation dans les carrières de Saint Maximin et de Saint Vaast-lès-Mello sachant qu'originellement ces pierres ont probablement été extraites à proximité dans des bancs dont on trouve actuellement l'équivalent dans lesdites carrières. A ce propos, il convient de souligner l'existence d'un site d'extraction appelé carrière de la pelouse de Chantilly.

On peut ainsi lire : « […] D'une superficie de 18 600m², elle a été ouverte en 1720 pour la construction des Grandes Ecuries (1719 à 1735) par l'architecte Jean Aubert, sur demande de Louis-Henri de Bourbon Condé, propriétaire du domaine de Chantilly. Les pierres extraites de la carrière de la Pelouse ont également servies à la construction de maison à Chantilly, notamment dans la rue du Connétable. La carrière est ouverte à nouveau de 1875 à 1885, pour la reconstruction du grand château. La carrière de la Pelouse possède sur près de 40m une voute maçonnée indiquant une volonté de consolider la rampe d'accès se situant en partie sous la route. La hauteur sous le ciel (toit de la carrière) est en moyenne de 4m. L'épaisseur du ciel varie de 6 à 8m […] »

Dans l'ouvrage « Les grandes écuries de chantilly » par Aurore Bayle-Loudet, il est également indiqué « […] une carrière de pierre est ouverte sous la pelouse (l'actuel hippodrome) afin d'en extraire un calcaire tendre propre au Sud de l'Oise, réputé pour sa couleur blanche et sa résistance dans le temps. Il sera employé jusqu'au XIX^{ème} siècle. Utilisées pour la construction des maison de la rue du Connétable, dont le plan est aussi fourni par Jean Aubert, elles sont ensuite exploitées pour la reconstruction du Grand Château sous la direction d'Honoré Daumet en 1875. D'une superficie totale de 18 600 m², accessible par une rampe d'accès directement sous la route, la carrière est constituée de galeries, située généralement à 11 m sous le sol […] ».



Description de la carte géologique :

Lutétien moyen. Bien visible sur toute l'étendue de la feuille grâce à de nombreuses exploitations. il est essentiellement constitué par les Calcaires à Milioles. où l'on distingue localement le Banc royal et le Vergelé. et le Calcaire de Saint- Leu-d'Esserent débutant par le Banc à Mollusques et se terminant par le Banc à verrains que l'on peut placer aussi à la base du Calcaire à Milioles. Sur une coupe typique de Saint-Vaast-lès-Mello. A. Blondeau a proposé de définir un néostratotype du Lutétien, comprenant du haut en bas:

- Banc royal (11 à 12 m). Calcaire crème à Miliolidae, homogène à grain fin, à stratification entrecroisée peu marquée,
- Vergelé (5 à 6 m). Calcaire crème à Miliolidae et Orbitolites complanatus avec empreintes de mollusques, plus abondantes à la base où le Banc à verrains est caractérisé par des moules internes de Campanile giganteum,
- Calcaire de Saint-Leu-d'Esserent (7 m). Calcaire jaunâtre à Miliolidae, très tendre, avec Ditrupa strangulata, rares Échinodermes et empreintes de Mollusques, très abondantes à la base, tandis que les empreintes d'Algues sont fréquentes au sommet.

Les analyses relatives à la caractérisation pétrophysique des pierres en œuvre sur les élévation de l'aile de l'Hémicycle des Grandes Ecuries de Chantilly mettent en évidence trois familles de roches issues du Bassin Parisien.

La première famille, la plus commune, regroupant les prélèvements [**P_3 – entablement**, **P_4 – élévations courantes** ainsi que **P_5 – soubassement**] est caractérisée par des pierres présentant un litage ocre plus ou moins marqué et comportant des débris coquilliers ainsi que des milioles. Les résultats des essais font état de porosité moyenne de 33% pour un coefficient de capillarité de près de 436 $g.m^{-2}.s^{-0,5}$ et d'une résistance de l'ordre de 8 MPa. En référence aux pierres actuellement disponibles, cette roche est l'équivalent d'une pierre de Saint Maximin Roche Fine (banc 4 dans la carrière du Bosquet).



Une seconde famille de roche identifiée correspondant au prélèvement [**P_2** - Corniche] est caractérisée par des pierres présentant un litage ocre plus ou moins marqué et comportant des débris coquilliers ainsi que des trous de verriers. En référence aux données de la littérature cette roche pourrait correspondre à une pierre de Saint Leu Banc Royal. Les résultats des essais font état d'une porosité de 40% pour un coefficient de capillarité de près de 379 $g.m^{-2}.s^{-0,5}$ et d'une résistance de l'ordre de 7 MPa. En référence aux pierres actuellement disponibles, cette roche est l'équivalent d'une pierre de Saint Leu.



Une troisième famille ayant des caractéristiques géologiques du bassin parisien est représentée par le prélèvement [P_1 – Elévation courante]. Cette roche, de teinte beige crème est composée d'une matrice à grains moyen, au sein de laquelle des débris fossiles sont identifiables veinée beige ou jaune sur fond beige. Les essais réalisés indiquent une pierre caractérisée par porosité élevée de l'ordre de 41 % pour un coefficient de capillarité élevé de près de 358 $g.m^{-2}.s^{-0,5}$ et d'une résistance de 5 MPa. En référence aux pierres actuellement disponibles, cette roche est l'équivalent d'une pierre de Saint Vaast Roche Construction.



NOTE : Ces pierres ont été définies et sélectionnées par rapport aux critères pétrophysiques mesurés. Il sera néanmoins nécessaire de réaliser un comparatif esthétique entre pierres sur site et de faire une sélection en carrière afin de définir avec précision les bancs d'extraction.

Focus sur les pierres en œuvre

Les conclusions évoquées ci-avant ont été formulées en prenant un soin particulier à dissocier les types de pierres de par leur faciès lithologique, leur propriétés pétrophysiques et leur esthétique dans une démarche actuelle de sélection de pierres de substitutions. Néanmoins, au regard de leur propriétés pétrophysiques très proches et en référence aux bioclastes en présence, les pierres proviennent très probablement d'un même site d'extraction avec une sélection moins rigoureuse qu'actuellement, des bancs d'extractions. Le cliché photographique ci-après et les explications s'y rattachant témoignent de cette hypothèse.



Nettoyage généré par Intelligence Artificielle

L'illustration photographique ci-avant est particulièrement intéressante, car elle illustre une transition entre deux faciès emblématiques du Lutétien exploités dans les carrières de l'Oise. La roche présente deux faciès distincts :

- Partie supérieure : texture plus grossière, irrégulière, avec de nombreux débris ou bioclastes visibles,
- Partie inférieure : texture beaucoup plus fine et homogène, avec un aspect légèrement laminé.

Avec une surface de séparation nette entre les deux niveaux. Cette organisation évoque fortement un dépôt sédimentaire stratifié avec :

- Un dépôt d'un sédiment fin dans une mer peu profonde ou une lagune calme dans laquelle les particules très fines (boue carbonatée ou limon) se déposent lentement formant la couche inférieure, homogène,
- Un changement brutal des conditions avec l'arrivée d'un courant plus énergique, d'une tempête ou d'un épisode de remaniement et des dépôts de débris coquilliers, fragments calcaires ou grains plus grossiers.

Avec l'enfouissement, les sédiments se compactent et lors de la diagenèse, le carbonate de calcium précipite entre les grains et cimente l'ensemble, le sédiment devenant alors une roche calcaire.

La présence de stratifications entrecroisées associées à des Milioles, des Ditrupa Strangulata et des débris coquilliers, indique un milieu marin peu profond soumis à des courants de marée ou à des courants de houle, typique d'une plateforme carbonatée éocène.

Du point de vue paléoenvironnemental, la pierre de Saint-Leu traduit un milieu lagunaire ou de plateforme interne avec des énergies faibles à modérées et une accumulation importante de boues carbonatées, tandis que la pierre de Saint-Vaast traduit davantage un milieu plus ouvert, des courants plus actifs et une accumulation de débris coquilliers.

Par rapport à l'illustration photographique ci-contre :

- la partie inférieure évoque davantage un faciès de type Saint-Leu : texture fine, peu de fossiles visibles et aspect homogène,
- la partie supérieure évoque davantage un faciès de type Saint-Vaast : texture bioclastique, nombreux éléments fossiles et structure plus grossière.

Cette pierre conserve la trace d'une ouverture progressive de la plateforme marine lutétienne de Chantilly, lorsque les courants ont commencé à remanier le fond et à accumuler davantage de bioclastes. C'est l'une des évolutions classiques observées dans les carrières de Saint-Leu, Saint-Maximin et Saint-Vaast-lès-Mello.



QUALIFICATION DES MORTIERS



ANALYSES DES MORTIERS EN OEUVRE

Les analyses physico-chimiques des mortiers en œuvre ont comme objet de renseigner la maîtrise d'œuvre sur les différentes natures de mortiers ayant servies à l'édification de l'ouvrage et ayant été mises en œuvre dans les différentes campagnes de restauration. Ces analyses permettent d'établir la nature chimique de ces mortiers qui serviront de point de référence pour la compatibilité des mortiers mis en œuvre dans la présente campagne de restauration.

Programme d'analyses

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées en fonction des diverses recherches sont les suivantes :

- ☒ Détermination du **résidu insoluble par attaque acide et analyse thermogravimétrique** complété par une description pétrographique pour la caractérisation chimique : L'analyse thermogravimétrique est une technique permettant de renseigner sur les différentes phases en présence dans les mortiers notamment les teneurs en eau liée, les teneurs en composés organiques et les teneurs en dioxyde de carbone. Ces déterminations sont réalisées avec un analyseur permettant une mesure continue de la perte de masse en fonction de la température sur une gamme de 80°C à 950°C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min et des paliers jusqu'à masse constante à 450°C, 550°C et 950°C.
- ☒ Identification et **qualification de la fraction soluble** par chromatographie ionique et spectrométrie d'émission atomique : Les résultats relatifs à la quantification des éléments solubles contenus dans les matériaux sont présentés ci-dessous, avec une précision relative de 5 %. Les dosages ont été réalisés sur des éluats issus d'une lixiviation avec un rapport 1 :10. La quantification des sels solubles (anions et cations) a été réalisée après extraction aqueuse selon le référentiel NF EN 16455. Les résultats présentés ci-dessous correspondent au pourcentage massique de ces ions dans l'échantillon considéré.

Référencement des prélèvements

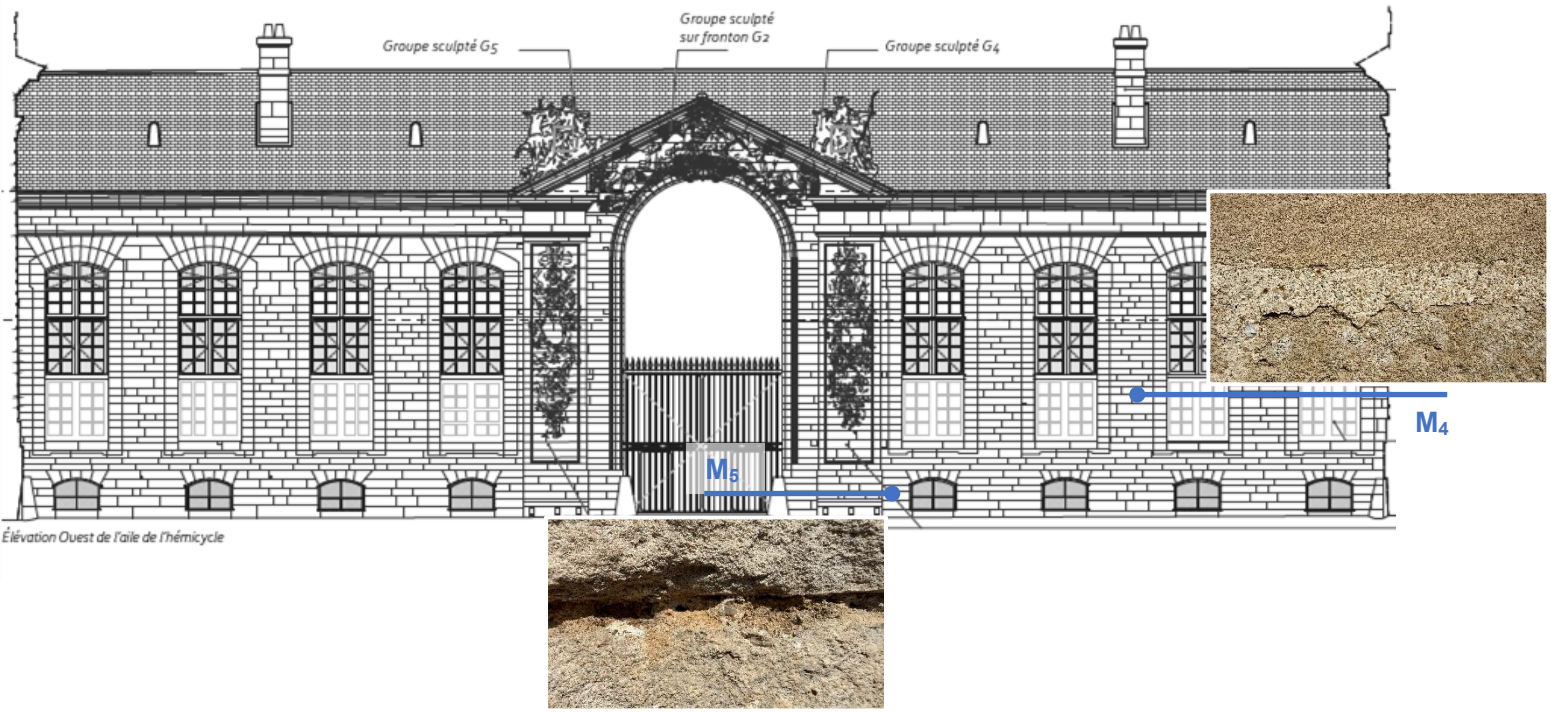
Dans le cadre des caractérisations des mortiers en œuvre, ont été réalisés des prélèvements par clivage sur les différentes natures visuelles de mortier par le laboratoire. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

REF. BPE	DESIGNATION
PMH261243 – 6	**M1** – Elévation Est – Aile Sud – Mortier de jointoiement beige – Partie courante – probablement originel
PMH261243 – 7	**M2** - Elévation Est – Aile Sud – Mortier de pose marron/beige – Bandeau
PMH261243 – 8	**M3** - Elévation Est – Aile Nord – Mortier de rejointoiement granuleux – Restauration ancienne
PMH261243 – 9	**M4** – Elévation Ouest – Aile Sud – Mortier de rejointoiement partie courante
PMH261243 – 10	**M5** – Elévation Ouest – Aile Sud – Mortier de pose soubassement

Tableau 8 : référencement des échantillons de mortiers en œuvre pour analyses de caractérisation en laboratoire

Localisation des prélèvements

ELEVATION OUEST



ELEVATION EST



M_1 – PMH261243-6 [Elévation Est – Mortier de jointoiement – Partie courante – originel]

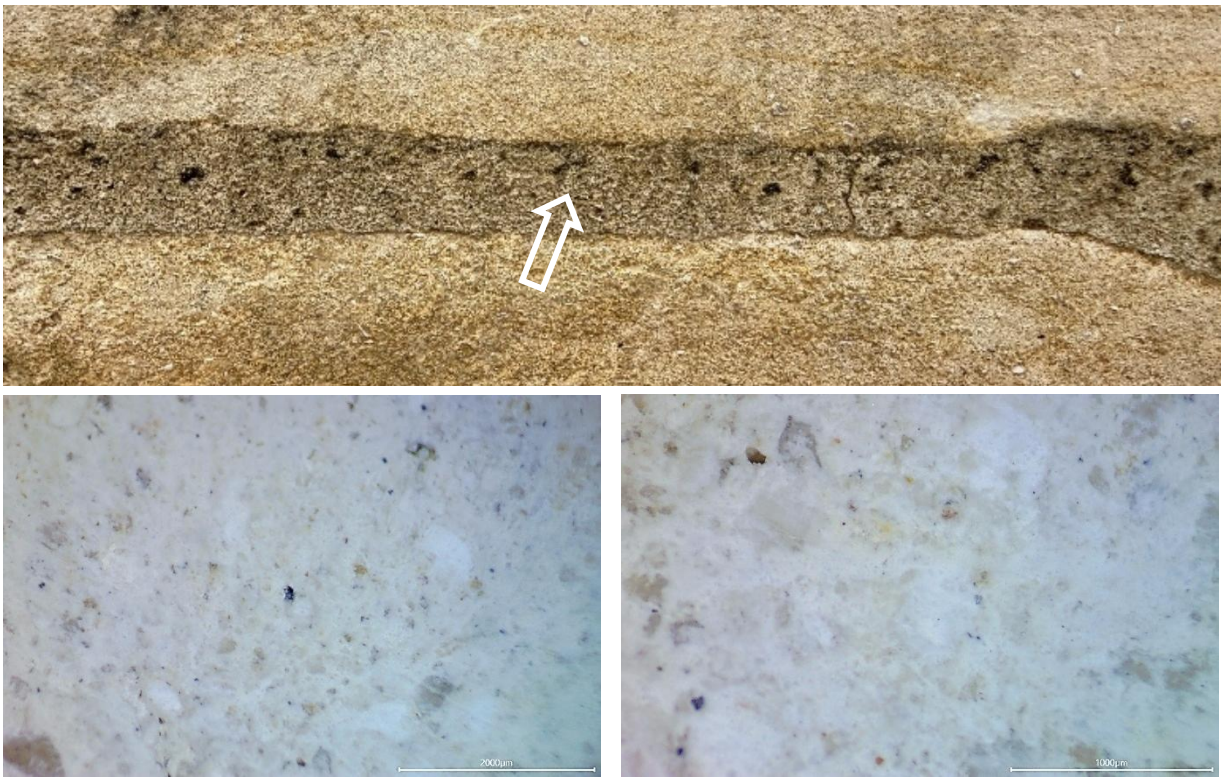


Figure 1 : cliché à la loupe binoculaire sur fragment brut – Gr x20 et x40

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZnO	Ba	Pb
0,97	**0,16**	**1,84**	**27,1**	<0,01	**0,14**	**36,2**	**0,02**	**0,34**	<0,01	<0,01	<0,01

Teneur en sulfates solubles (%)	**31,1**
Teneur en Eq plâtre (%$CaSO_4$, $2H_2O$)	**58,8**
Teneur en chlorures solubles (%)	**0,04**
Teneur en nitrates solubles (%)	**0,02**
Teneur en sodium soluble (%)	**0,01**
Teneur en potassium soluble (%)	<0,01
Perte au feu 105°C/450°C (%)	**11,9**
Perte au feu 450°C/550°C (%)	**0,15**
Perte au feu 550°C/950°C (%)	**16,7**
Teneur en Eq Calcite (%$CaCO_3$)	**38,0**
Résidu insoluble (%)	**3,61**

Les observations mettent en évidence un mortier présentant une matrice de couleur blanche à légèrement beige, ponctuée de micro-inclusions blanches à fort clivage, attribuables à des incuits de gypse. Aucun squelette granulaire n'est observé, traduisant l'absence de charge minérale silicatée ou carbonatée significative.
Les analyses physico-chimiques confirment la prédominance d'une phase liante sulfatée, avec une teneur en équivalent plâtre d'environ 59 %, cohérente avec une teneur en eau structurelle voisine de 12 %. Une phase calcique est également mise en évidence, représentant près de 38 % de la composition. Enfin, le très faible résidu insoluble confirme l'absence de composés silicatés et traduit un mortier essentiellement constitué d'un mélange de plâtre et de chaux, sans apport notable de charge granulaire.

M_2 – PMH261243-7 [Elévation Est – Mortier de pose – Entablement]



Figure 2 : cliché à la loupe binoculaire sur fragment brut – Gr x20 et x40

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZnO	Ba	Pb
0,76	**2,70**	**35,1**	**0,54**	**0,05**	**0,46**	**18,3**	**0,29**	**1,05**	<0,01	<0,01	<0,01

Teneur en sulfates solubles (%)	**0,27**
Teneur en Eq plâtre (%$CaSO_4$, $2H_2O$)	**0,51**
Teneur en chlorures solubles (%)	**0,04**
Teneur en nitrates solubles (%)	**0,04**
Teneur en sodium soluble (%)	<0,01
Teneur en potassium soluble (%)	<0,01
Perte au feu 105°C/450°C (%)	**1,02**
Perte au feu 450°C/550°C (%)	**0,53**
Perte au feu 550°C/950°C (%)	**5,18**
Teneur en Eq Calcite (%$CaCO_3$)	**11,8**
Résidu insoluble (%)	**82,3**

Les observations mettent en évidence un mortier de teinte beige, présentant une porosité relativement développée et constitué d'un assemblage de granulats silicatés liés par une matrice calcique. Celle-ci renferme localement des nodules blanchâtres, interprétés comme des agglomérats de chaux ou des incuits de chaux résultant d'une extinction incomplète.
Les analyses physico-chimiques mettent en évidence une faible teneur en eau structurelle, caractéristique d'un liant à faible hydraulicité, compatible avec une chaux faiblement hydraulique, voire aérienne. La proportion élevée de résidu insoluble traduit l'emploi d'une charge granulaire constituée quasi exclusivement de sable silicaté. Les analyses révèlent par ailleurs une très faible teneur en sels solubles et l'absence de composés gypseux, témoignant d'un mortier peu affecté par les phénomènes de contamination saline.

M_3 – PMH261243-8 [Elévation Est – Mortier de rejointoiement – Restauration ancienne]

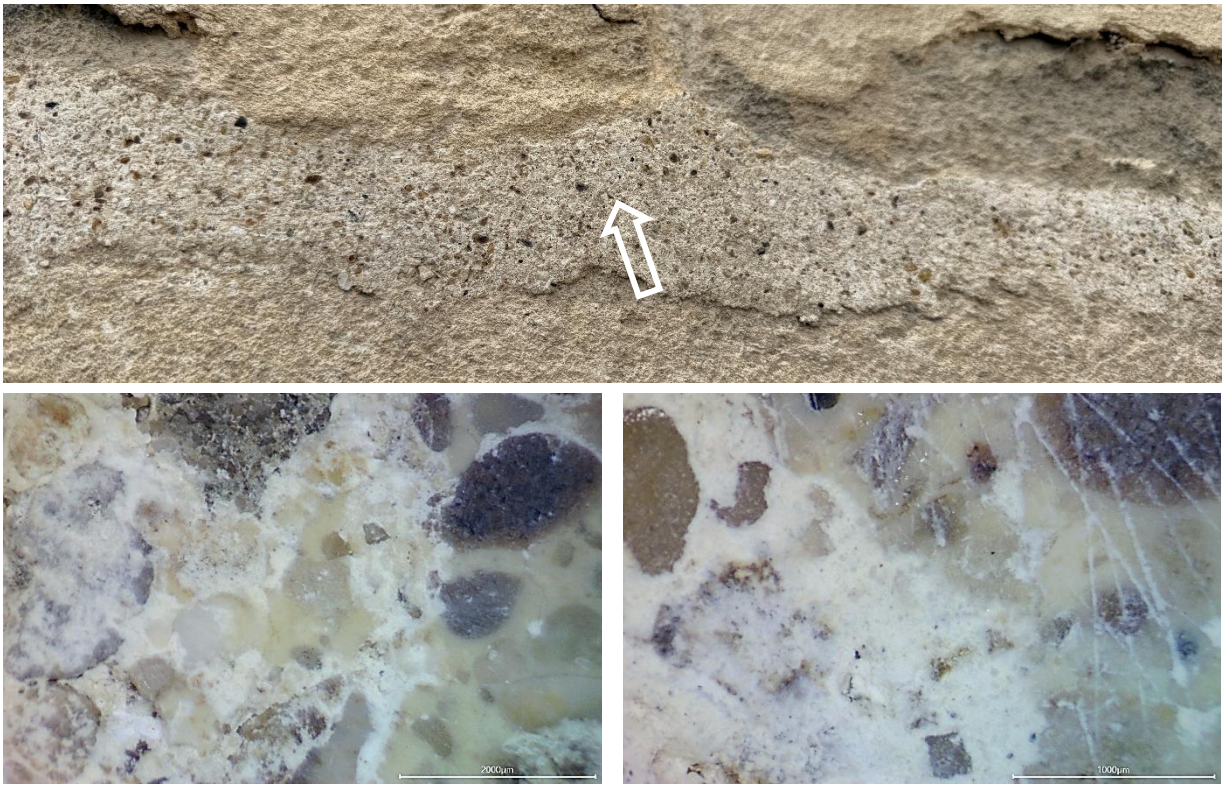


Figure 3 : cliché à la loupe binoculaire sur fragment brut – Gr x20 et x40

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZnO	Ba	Pb
1,22	**0,63**	**9,45**	**8,16**	**0,05**	**0,26**	**42,8**	**0,03**	**0,58**	<0,01	<0,01	<0,01

Teneur en sulfates solubles (%)	**6,67**
Teneur en Eq plâtre (%$CaSO_4$, $2H_2O$)	**12,6**
Teneur en chlorures solubles (%)	**0,07**
Teneur en nitrates solubles (%)	**0,22**
Teneur en sodium soluble (%)	**0,04**
Teneur en potassium soluble (%)	**0,05**
Perte au feu 105°C/450°C (%)	**4,46**
Perte au feu 450°C/550°C (%)	**1,29**
Perte au feu 550°C/950°C (%)	**27,5**
Teneur en Eq Calcite (%$CaCO_3$)	**62,4**
Résidu insoluble (%)	**12,7**

Les observations mettent en évidence un mortier à matrice blanchâtre à légèrement beige, relativement compacte, renfermant une charge granulaire constituée de sable alluvionnaire et liée par une phase liante microporeuse. La granulométrie et la texture du mortier traduisent une formulation homogène, caractéristique d'un mortier à base de chaux hydraulique.
Les analyses physico-chimiques confirment le caractère hydraulique du liant, avec une teneur en eau structurelle voisine de 4,5 %. Cette valeur est toutefois susceptible d'être partiellement influencée par la présence d'une contamination sulfatée, mise en évidence à hauteur d'environ 7 %. L'origine de cette pollution est vraisemblablement liée à des phénomènes de migration des ions sulfates depuis les anciens mortiers de rejointoiement à base de plâtre présents à proximité.

M_4 – PMH261243-9 [Elévation Ouest – Mortier de rejointoiement partie courante]

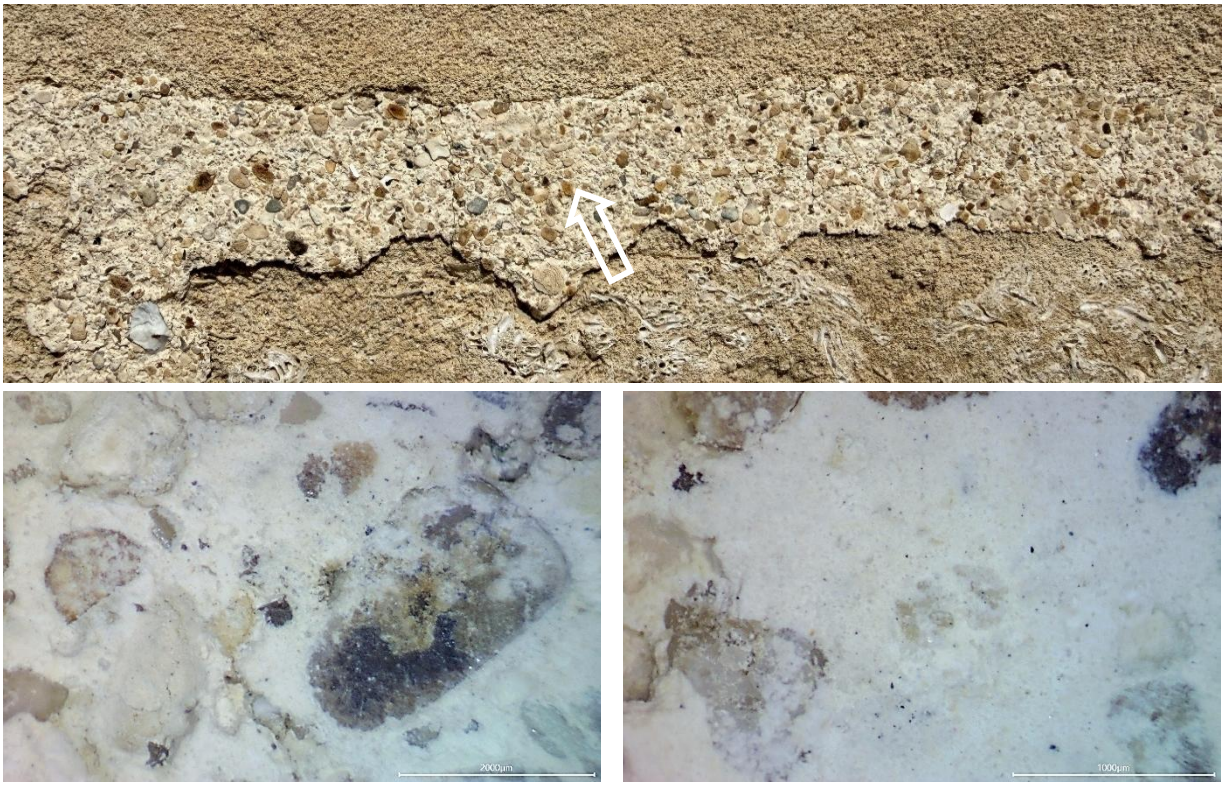


Figure 4 : cliché à la loupe binoculaire sur fragment brut – Gr x20 et x40

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZnO	Ba	Pb
1,66	**0,83**	**12,2**	**2,02**	**0,25**	**0,22**	**48,2**	**0,03**	**0,59**	<0,01	<0,01	<0,01

Teneur en sulfates solubles (%)	**0,64**
Teneur en Eq plâtre (%$CaSO_4$, $2H_2O$)	**1,21**
Teneur en chlorures solubles (%)	**0,10**
Teneur en nitrates solubles (%)	**0,18**
Teneur en sodium soluble (%)	**0,07**
Teneur en potassium soluble (%)	**0,05**
Perte au feu 105°C/450°C (%)	**3,22**
Perte au feu 450°C/550°C (%)	**1,80**
Perte au feu 550°C/950°C (%)	**29,8**
Teneur en Eq Calcite (%$CaCO_3$)	**67,7**
Résidu insoluble (%)	**12,4**

Les observations microscopiques révèlent un mortier dont les caractéristiques pétrographiques sont comparables à celles de l'échantillon précédent. L'examen macroscopique met toutefois en évidence un squelette granulaire de granulométrie plus grossière, traduisant l'emploi d'un sable alluvionnaire plus fortement calibré.
Les analyses physico-chimiques confirment cette similitude de composition, en mettant en évidence un liant de même nature hydraulique. En revanche, aucune contamination saline significative n'est détectée, contrairement au mortier précédemment analysé. Enfin, la très faible proportion de résidu insoluble indique que la charge granulaire est constituée quasi exclusivement de granulats calcaires d'origine alluvionnaire, avec une contribution très limitée des fractions silicatées.

M_5 – PMH261243-10 [Elévation Ouest – Aile Sud – Mortier de pose soubassement]



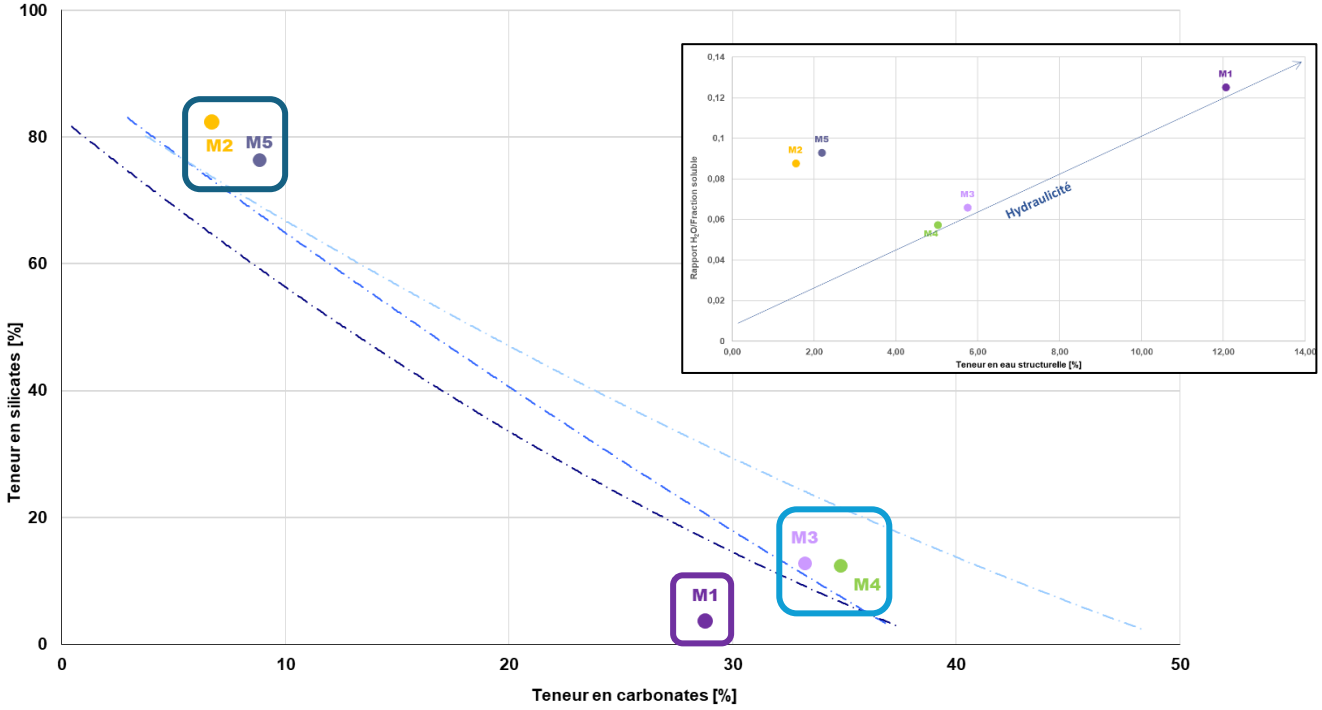
Figure 5 : cliché à la loupe binoculaire sur fragment brut – Gr x20 et x40

MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	ZnO	Ba	Pb
1,21	**2,92**	**31,6**	**1,96**	**0,15**	**0,54**	**19,5**	**0,33**	**1,27**	<0,01	<0,01	<0,01

Teneur en sulfates solubles (%)	**1,33**
Teneur en Eq plâtre (%$CaSO_4$, $2H_2O$)	**2,51**
Teneur en chlorures solubles (%)	**0,21**
Teneur en nitrates solubles (%)	**1,31**
Teneur en sodium soluble (%)	**0,12**
Teneur en potassium soluble (%)	**0,11**
Perte au feu 105°C/450°C (%)	**1,47**
Perte au feu 450°C/550°C (%)	**0,72**
Perte au feu 550°C/950°C (%)	**6,67**
Teneur en Eq Calcite (%$CaCO_3$)	**15,1**
Résidu insoluble (%)	**76,4**

L'examen macroscopique met en évidence un mortier de couleur beige, à porosité ouverte, constitué d'une matrice calcique englobant une charge granulaire majoritairement silicatée. La présence ponctuelle de nodules blanchâtres au sein de la matrice est attribuable à des incuits ou à des amas de chaux.
Les analyses physico-chimiques indiquent une faible teneur en eau structurelle, traduisant l'utilisation d'un liant à faible hydraulicité. La forte proportion de résidu insoluble confirme que la charge est composée essentiellement de sable siliceux. Par ailleurs, les faibles teneurs mesurées en sels solubles, associées à l'absence de phases gypseuses, témoignent d'un matériau peu affecté par les phénomènes de contamination saline.

Les exploitations des données analytiques relatives aux échantillons de mortiers de montage et de (re)jointoiement consistent en l'élaboration d'un indice d'hydraulicité global et d'une exploitation graphique relative aux teneurs en carbonates et silicates (résidu insoluble et perte au feu) permettant de regrouper les mortiers par familles. Il en résulte le graphique suivant :



Ainsi, les mortiers en œuvre se répartissent en trois grandes familles :

- **Les mortiers à base calciques faiblement hydraulique voire aérienne** ; il s'agit pour l'essentiel des mortiers de hourdage de la maçonnerie prélevés pour le premier au niveau de l'entablement en élévation Est [M_2] et le second en soubassement de l'élévation Ouest [M_5]. Les analyses mettent en évidence une importante fraction calcique dans la phase liante s'inscrivant dans un fuseau correspondant à une chaux faiblement hydraulique avec une charge granulaire essentiellement silicatée.

- **Mortiers à base de chaux hydraulique** : il s'agit des deux faciès de mortiers de rejointoiement prélevés à l'occasion d'une campagne de restauration des façades Est [M_3] et Ouest [M_4]. Les analyses révèlent une teneur élevée en eau structurelle au sein d'une matrice liante calcique dont la composition s'inscrit dans le domaine caractéristique des chaux hydrauliques. La charge granulaire est constituée presque exclusivement de granulats calcaires d'origine alluvionnaire. Les deux mortiers se différencient principalement par la granulométrie de leur squelette granulaire, plus grossier pour le mortier de la façade Ouest, ainsi que par leur teneur en sulfates, sensiblement plus élevée dans le mortier de la façade Est. Cette contamination sulfatée est vraisemblablement liée à des phénomènes de migration ionique en provenance des mortiers anciens adjacents.

- **Les mortiers à base gypseuse :** il s'agit du mortier de rejointoiement vraisemblablement d'origine, prélevé en partie courante de l'élévation Est [M_1]. Ce mortier, conservé de manière discontinue et localement recouvert par les mortiers de rejointoiement plus récents décrits précédemment, se caractérise par une phase liante constituée d'une importante fraction gypseuse associée à une fraction calcique. Cette composition traduit l'emploi d'un mortier mixte à base de plâtre et de chaux.



ANALYSES PATHOLOGIQUES



ANALYSES DES PHASES PATHOGENES

Cette phase de l'étude a comme objectif de renseigner le demandeur sur l'état sanitaire des maçonneries en phase préalable des travaux. Il s'agit qualifier et de quantifier la nature des potentiels polluants minéraux pouvant participer à l'altération des supports en fonction des faciès de dégradations visibles sur site. Ces analyses permettent également de formuler un avis sur la nécessité d'assainissement des maçonneries pour en assurer la durabilité.

Programme analytique

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées pour la qualification des agents pathogènes, sont les suivantes :

- ☒ Dosage des **anions** (chlorures, sulfates et nitrates) **et des cations** (calcium, magnésium, sodium et potassium) par chromatographie ionique et spectrométrie d'émission atomique.

Typologie et référencement des prélèvements

Dans le cadre des caractérisations des pathologies, ont été réalisés par le laboratoire des prélèvements par perçage de diamètre 8 mm en 3 profondeurs successives de 0-10/10-20 et 40-50 mm. Le référencement des échantillons prélevés est indiqué dans le tableau à suivre :

REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
PMH261243 – 11 a b c	**S1** – Elévation Ouest – Aile Sud – Soubassement – Proche joint type ciment [H=90cm] (0-10/10-20/40-50mm)
PMH261243 – 12 a b c	**S2** – Elévation Ouest – Aile Sud – Partie courante avec croute noire [H=160cm] (0-10/10-20/40-50mm)
PMH261243 – 13 a b c	**S3** – Elévation Ouest – Aile Sud – Partie courante avec colonisations microbiologiques (0-10/10-20/40-50mm)
PMH261243 – 14 a b c	**S4** – Elévation Ouest – Aile Sud - Corniche (0-10/10-20/40-50mm) avec voile de salissure grisâtre
PMH261243 – 15 a b c	**S5** – Elévation Est – Aile Sud – Soubassement [H=50cm] (0-10/10-20/40-50mm) avec desquamations et colonisations microbiologiques
PMH261243 – 16 a b c	**S6** – Elévation Est – Aile Sud – Partie courante avec desquamations et croûte noire [H=173cm] (0-10/10-20/40-50mm)

Tableau 9 : référencement des échantillons pour analyses pathologiques en laboratoire

S1 – Elévation Ouest – Aile Sud – Soubassement – Proche joint type ciment



S2 – Elévation Ouest – Aile Sud – Partie courante avec croute noire



S3 – Elévation Ouest – Aile Sud – Partie courante avec colonisations microbiologiques



S4 – Elévation Ouest – Aile Sud - Corniche avec voile de salissure grisâtre



S5 – Elévation Est – Aile Sud – Soubassement avec desquamations et colonisations microbiologiques



S6 – Elévation Est – Aile Sud – Partie courante avec desquamations et croûte noire



Détermination des teneurs en sels solubles

Les résultats relatifs à la quantification des éléments solubles contenus dans les matériaux sont présentés ci-dessous, avec une précision relative de 5 %. Les dosages ont été réalisés sur des éluats issus d'une lixiviation avec un rapport 1 :10. La quantification des sels solubles (anions et cations) a été réalisée après extraction aqueuse selon la norme NF EN 16455. Les résultats présentés ci-après correspondent au pourcentage massique de ces ions dans l'échantillon considéré.

Ref. Prel	Prof. (mm)	Chlorures (%)	Sulfates (%)	Nitrates (%)	Calcium (%)	Magnesium (%)	Sodium (%)	Potassium (%)
S_1 – Ouest **H = 90 cm** **Soubassement** PMH261243 – 11	**0-10**	**0,04**	**14,5**	**0,03**	**5,20**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
	10-20	**0,04**	**3,65**	**0,02**	**1,86**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
	40-50	**0,04**	**0,34**	**0,01**	**0,72**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
S_2 – Ouest **H = 160 cm** **Croûte noire** PMH261243 – 12	**0-10**	**0,05**	**3,26**	**0,14**	**1,70**	**0,01**	**0,02**	**0,02**
	10-20	**0,06**	**3,66**	**0,13**	**1,83**	**0,01**	**0,02**	**0,02**
S_3 – Ouest **Colonisations biologiques** PMH261243 – 13	**0-10**	**0,04**	**1,46**	**0,02**	**1,10**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
	10-20	**0,06**	**0,57**	**0,03**	**0,80**	**0,01**	**0,02**	< 0,01
	40-50	**0,06**	**0,13**	**0,03**	**0,63**	**0,01**	**0,02**	**0,01**
S_4 – Ouest **Voile de salissure** PMH261243 – 14	**0-10**	**0,04**	**1,12**	**0,01**	**0,89**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
	10-20	**0,05**	**0,07**	**0,01**	**0,56**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
	40-50	**0,04**	**0,18**	**0,01**	**0,57**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
S_5 – Est **H = 50 cm** **Soubassement** PMH261243 – 15	**0-10**	**0,09**	**13,8**	**0,33**	**4,91**	**0,02**	**0,04**	**0,03**
	10-20	**0,05**	**1,17**	**0,07**	**0,95**	**0,01**	**0,01**	**0,01**
	40-50	**0,04**	**0,06**	**0,03**	**0,57**	**0,01**	< 0,01	< 0,01
S_6 – Est **H = 173 cm** **Croûte noire** PMH261243 – 16	**0-10**	**0,08**	**6,05**	**0,63**	**2,74**	**0,02**	**0,05**	**0,07**
	10-20	**0,08**	**0,96**	**0,55**	**0,95**	**0,02**	**0,05**	**0,06**
	40-50	**0,08**	**0,10**	**0,37**	**0,66**	**0,01**	**0,03**	**0,04**

Tableau 10 : Résultats des dosages des sels solubles - anions et cations

Seuils d'acceptabilité des teneurs en sels solubles

D'après les recommandations du fascicule technique « Ouvrages de maçonnerie » Juin 2006, dans le cadre d'une conservation satisfaisante des matériaux en œuvre (pierre et mortier) il convient de ne pas dépasser les seuils suivants :

	TENEURS LIMITE (EN %)
CHLORURES	**0,10**
NITRATES	**0,50**
SULFATES	**0,10** EN ASSOCIATION AVEC LE SODIUM, POTASSIUM, MAGNESIUM **5** EN ASSOCIATION AVEC LA CALCIUM SOUS FORME DE GYPSE

Tableau 11 : Seuils de recommandations des teneurs en sels solubles au sein des pierres et mortiers

	TENEURS EN CATIONS ASSOCIES CORRESPONDANTES (EN %)			
	SODIUM	POTASSIUM	MAGNESIUM	CALCIUM
CHLORURES [0,10 %]	**0,04**	**0,05**	**0,03**	**0,04**
NITRATES [0,50 %]	**0,14**	**0,20**	**0,08**	**0,13**
SULFATES [0,10 %]	**0,03**	**0,04**	**0,02**	**1,47**

Tableau 12 : Teneurs indicatives en cations associés aux valeurs limites de recommandation en anions

Sur l’état pathologique des maçonneries

Les analyses des phases pathogènes mettent en évidence une répartition hétérogène des pollutions salines, dominée par la présence de sulfates. Les concentrations les plus importantes sont observées au niveau des soubassements, où les teneurs surfaciques atteignent localement des valeurs très élevées de 13% à 15%. Cette contamination est vraisemblablement liée aux phénomènes de migration des ions sulfates depuis les mortiers de rejointoiement à base de ciment, susceptibles de constituer une source de sulfatation des maçonneries.

À l'inverse, les prélèvements réalisés en élévation courante présentent des concentrations en sulfates nettement plus faibles, traduisant une moindre exposition aux transferts hydriques et aux phénomènes d'accumulation des sels y compris dans les zones présentant un voile de salissure grisâtre ou de fines croûtes noires.

Par ailleurs, les analyses montrent que les maçonneries situées en pied de l'élévation Est sont les plus affectées par les pollutions salines, avec des teneurs significativement plus élevées en sulfates mais également en nitrates. Cette double contamination suggère la combinaison de plusieurs mécanismes de dégradation, associant des remontées capillaires, des infiltrations d'eau chargée en sels dissous et des interactions avec des matériaux de restauration incompatibles. La présence conjointe de sulfates et de nitrates est susceptible de favoriser les phénomènes de cristallisation saline, générant des contraintes mécaniques importantes au sein des mortiers et de la pierre, à l'origine de désagrégations, d'écaillages et de pertes de matière.

Pour le laboratoire BPE :

Dimbsthal, le 30 juin 2026

Stéphane LOGEL

Laboratoires BPE
5, rue de Hengwiller – 67440 Dimbsthal
Tél : 03 88 91 13 96 - @ : bpe@bpe-ing.com
SARL au capital de 150 000€ - SIRET 517 597 092 00025 – APE 7112B

OPQIBI L'INGÉNIERIE QUALIFIÉE CERTIFICAT N° 11 08 2338