



(02) – Essômes sur Marne

ABBAYE SAINT FERREOL

Caractérisation des matériaux et
pathologies associées

Assistance scientifique de
laboratoire

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

Page intentionnellement blanche

(02) – ESSÔMES SUR MARNE - ABBAYE SAINT FERREOL -

Poursuite de la restauration de l'édifice
Chapelle du Saint Sépulcre

CARACTERISATION DES MATERIAUX EN ŒUVRE
ET DE LEURS PATHOLOGIES ASSOCIEES

Maîtrise d'ouvrage : **VILLE D'ESSÔMES SUR MARNE - Monsieur le Maire** – 1, rue de l'Abbaye – 02400 ESSÔMES SUR MARNE

Maîtrise d'œuvre : **ACV ARCHITECTE – Madame Alice CAPRON-VALAT – Architecte du Patrimoine** - 3, square de Châtillon – 75014 PARIS



Page intentionnellement blanche

SOMMAIRE

PREAMBULE	6
DOCUMENTS DE REFERENCE	7
IDENTIFICATION DES PIERRES	10
PROGRAMME ANALYTIQUE	10
TPOLOGIE DES PRELEVEMENTS	10
RESULTATS DES ANALYSES PETROPHYSIQUES	12
DETERMINATION DE LA POROSITE OUVERTE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	12
MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES SONORES	12
DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE	13
ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION	13
SUR LA QUALITE DES PIERRES EN ŒUVRE	15
ANALYSES DES MORTIERS EN OEUVRE	18
PROGRAMME D'ANALYSES	18
REFERENCEMENT DES PRELEVEMENTS	18
LOCALISATION DES PRELEVEMENTS	19
ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DES MORTIERS	19
SUR LA NATURE DES MORTIERS EN ŒUVRE	26
ETAT SANITAIRE DES MAÇONNERIES	30
PROGRAMME ANALYTIQUE	30
TPOLOGIE DES PRELEVEMENTS	30
LOCALISATION DES PRELEVEMENTS	31
CARTOGRAPHIE DE REPARTITION DE L'EAU	32
DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU	34
SEUILS D'ACCEPTABILITE DES TENEURS EN SELS SOLUBLES	34
DETERMINATION DES TENEURS EN SELS SOLUBLES	35
IDENTIFICATION DES PHASES CRISTALLINES	36
DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU HYGROSCOPIQUE	39
SUR LA NATURE ET L'AMPLEUR DES POLLUANTS	40
RECHERCHE D'ELEMENTS METALLIQUES	44
PROGRAMME ANALYTIQUE	44
PRINCIPE D'AUSCULTATION GEOPHYSIQUE	44
ELEMENTS DE LECTURE DES DONNEES	45
RESULTATS DES AUSCULTATIONS	46
ESSAI DE DESSALEMENT DES MAÇONNERIES	50
PROGRAMME ANALYTIQUE	50
TPOLOGIE DES PRELEVEMENTS	50
DETERMINATION DES TENEURS EN SELS SOLUBLES – 2 ^{EME} PASSE	51

PREAMBULE

La mission confiée par la Ville d'Essômes sur Marne au laboratoire BPE, sous la maîtrise d'œuvre de Madame Alice CAPRON-VALAT, Architecte du Patrimoine a comme objet d'accompagner la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et les entreprises de restauration dans l'identification des matériaux, leurs éventuelles pathologies associées afin de permettre le choix de protocoles de traitement et de matériaux de substitution adaptés.

Les investigations menées sur site et en laboratoire ont comme objectif de caractériser les éléments en œuvre afin de sélectionner des matériaux les plus appropriés en garantissant leur compatibilité, d'assister les entreprises dans la sélection des produits et méthodologies de traitement afin d'en garantir l'efficacité et l'innocuité et de réaliser une étude performantielle d'un dispositif d'assainissement des maçonneries.

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

- Phase n°1 : Caractérisation pétrophysique des pierres,
- Phase n°2 : Caractérisation physico-chimique des mortiers en œuvre
- Phase n°3 : Suivi hygrométrique et caractérisation des phases pathogènes
- Phase n°4 : Essais et contrôle des opérations de traitement

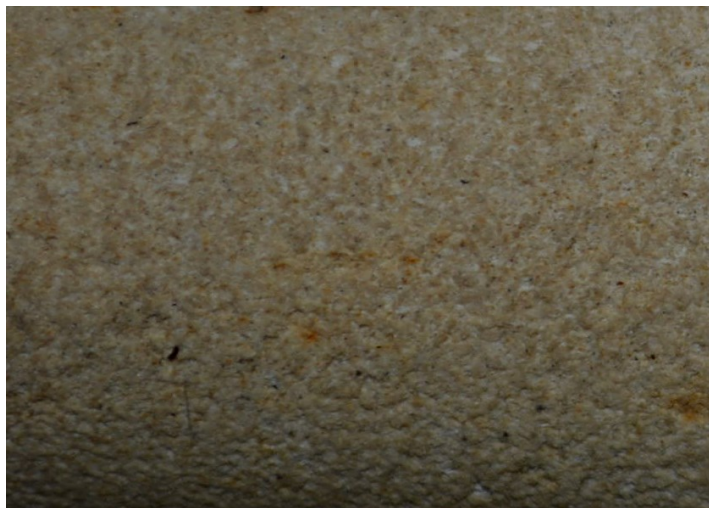
Le présent rapport traite des phases n°1 à n°3, la phase n°4 faisant l'objet d'un rapport complémentaire en liaison avec l'entreprise de restauration en charges des essais. Cette étude fait suite au programme analytique préétabli portant la référence CLPMH1905252V3 en date du 11 février 2020.

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

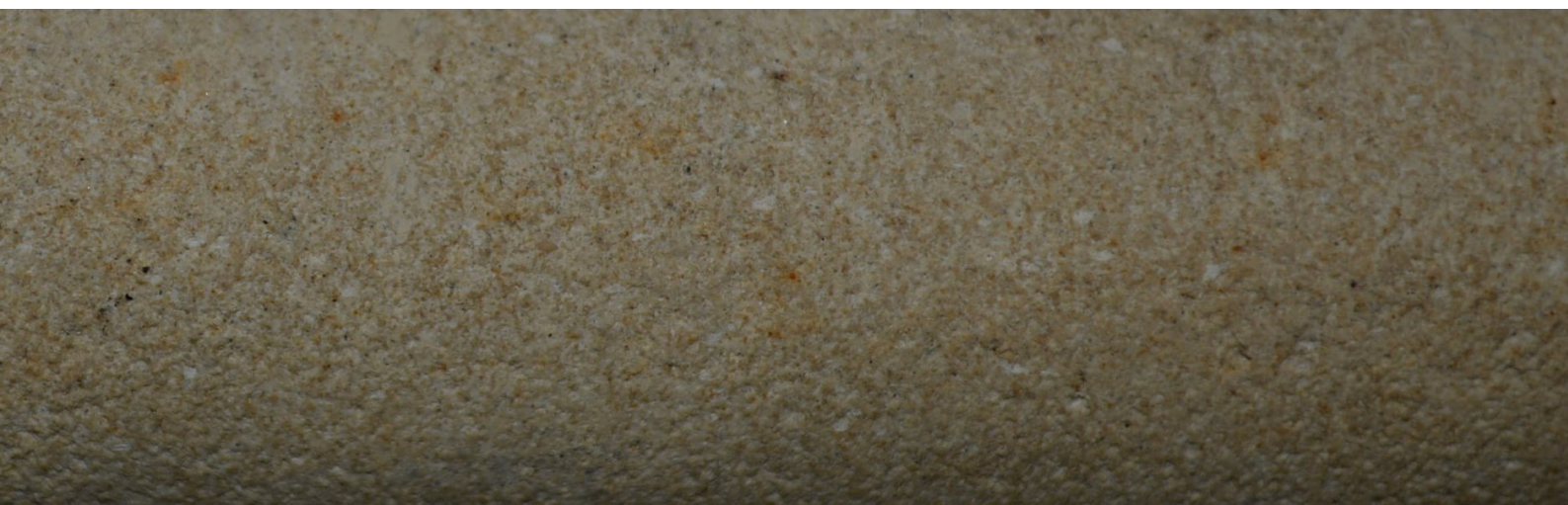
DOCUMENTS DE REFERENCE

Cette étude est réalisée en conformité avec :

- Rapport Laboratoires BPE : Référence PMH191092V1 du 30.04.2020 « Restauration et mise en valeur de la rotonde et de la sacristie. Assistance scientifique de laboratoire »
- 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.
- 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 ».
- Norme NF EN 16455 « Conservation du Patrimoine culturel – Extraction et détermination de la teneur des sels solubles dans la pierre naturelle et les matériaux associés ».
- Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre – ICOMOS-ISCS 2008.
- Note de Monsieur Jean-Didier MERTZ - LRMH « M19 _ S1 _ LABO _ Diagnostiquer contamination saline ».
- Pierre et patrimoine, connaissance et conservation, BIGAS JP., BROMBLET P., MARTINET G., GAUDON P. et al., (2009) Actes Sud / Cefracor, Arles, 214 p.
- Le nettoyage de la pierre (VERGES-BELMIN V. et BROMBLET P.) dossier technique, Monumental, revue scientifique et technique des monuments historiques, éditions du Patrimoine, centre des monuments nationaux, 2000, p. 220-273.
- 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.



IDENTIFICATION DES PIERRES



IDENTIFICATION DES PIERRES

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'élaboration des élévations Ouest et Nord. 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 analytique

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

- Mesure de la **porosité et de la masse volumique**. Essais réalisés selon les prescriptions de la Norme NF EN 1936,
- 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,
- Essai de **résistance à la compression** selon les prescriptions de la Norme NF EN 1926.

Typologie des prélèvements

Dans le cadre des caractérisations des pierres formant l'enceinte de la chapelle du Saint Sépulcre de l'abbaye Saint Ferréol, ont été réalisés des prélèvements par carottage de diamètre 30 mm. Ces prélèvements ont été réalisés sur site le 10 juillet 2020. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

REF. BPE	DESIGNATION
PMH201144-18	P1 : pierre déposée formant initialement le bandeau du retable
PMH201144-19	P2 : pierre formant l'encadrement de porte de l'enceinte Ouest
PMH201144-20	P3 : pierre formant l'appui de l'enceinte Nord
PMH201144-21	P4 pierre prélevée sur l'entablement de l'enceinte Ouest

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

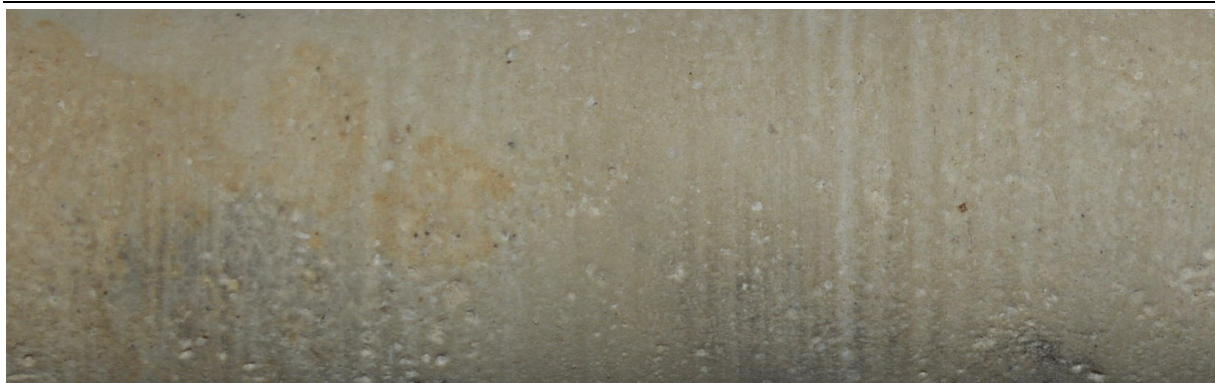
Prélèvement P1 / [PMH201144-18] Bandeau du retable



Prélèvement P2 / [PMH201144-19] Encadrement Ouest



Prélèvement P3 / [PMH201144-20] Appui Nord



Prélèvement P4 / [PMH201144-21] Entablement Ouest



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 [Bandeau retable] PMH201144-18	35,3	1658
P2 [Encadrement Ouest] PMH201144-19	30,8	1858
P3 [Appui Nord] PMH201144-20	29,6	1934
P4 [Entablement Ouest] PMH201144-21	28,4	1989

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 sonore (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 [Bandeau retable] PMH201144-18	2806
P2 [Encadrement Ouest] PMH201144-19	3012
P3 [Appui Nord] PMH201144-20	2879
P4 [Entablement Ouest] PMH201144-21	3283

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

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 [Bandeau retable] PMH201144-18	269
P2 [Encadrement Ouest] PMH201144-19	104
P3 [Appui Nord] PMH201144-20	92,3
P4 [Entablement Ouest] PMH201144-21	81,3

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 [Bandeau retable] PMH201144-18	7,88
P2 [Encadrement Ouest] PMH201144-19	13,9
P3 [Appui Nord] PMH201144-20	17,9
P4 [Entablement Ouest] PMH201144-21	10,9

Tableau 5 : détermination de la résistance à la compression des échantillons

Page intentionnellement blanche

Sur la qualité des pierres en œuvre

Les investigations analytiques relatives aux pierres en œuvre mettent en évidence deux familles de roches ; on distingue ainsi la pierre formant le bandeau du retable des pierres constituant les élévations de l'enceinte de la chapelle, ces dernières étant d'une même origine géologique avec des variations pétrophysiques liées au banc d'extraction.

La première correspond à une pierre calcaire du bassin lutétien caractérisé par la présence de millioles caractéristiques des carrières de l'Ouest de l'Aisne dans l'arrondissement de Soissons. Il s'agit d'une roche relativement poreuse (environ 35%) présentant des capacités de transfert de fluide très importantes (près de $300 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-0,5}$) avec des résistances relativement faibles (environ 8 MPa). L'équivalent actuel de cette pierre est extraite dans les carrières de Saint Maximin et correspond à une pierre fine de Saint Maximin :

Pierre de Saint Maximin Roche Fine

Commune de Saint Maximin (Oise)
Ere Tertiaire Paléogène – Etage Lutétien

Masse volumique	:	1600 à 1800 kg.m^{-3}
Porosité	:	30 à 37 %
Vitesse du son	:	2500 à 3000 m.s^{-1}
Résistance	:	8 à 15 MPa

Concernant la seconde famille de roche constituant l'essentiel de l'ouvrage, il s'agit d'une pierre calcaire à grain fin de couleur blanche légèrement jaunâtre présentant des caractéristiques géologiques locales. Il s'agit d'une pierre relativement poreuse (environ 30%) présentant des capacités de transfert de fluide relativement élevées (près de $100 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-0,5}$) avec des résistances moyennement élevées (environ 15 MPa). Dans le répertoire des carrières de 1889, il est fait mention de plusieurs carrières locales situées entre Château-Thierry et Soissons. Il convient ainsi de citer la carrière du fossé rouge à la Ferté Million dans laquelle est extraite une pierre calcaire à grain fin de couleur blanche légèrement jaunâtre ou grise légèrement celluleuse, la carrière des fours à chaux à Crouy dans laquelle est extraite une pierre blanche grisâtre un peu coquillière à grain fin ou encore la carrière de Billy dans laquelle est extraite un calcaire à grain fin blanc jaunâtre. Ces carrières ne sont actuellement plus en exploitation. L'équivalent actuel de cette pierre est extraite dans les carrières de Noyant et Aconin et correspond à une pierre fine de Noyant :

Pierre de Noyant Roche Fine

Commune de Noyant et Aconin (Aisne)
Ere Tertiaire Paléogène – Etage Lutétien

Masse volumique	:	1700 à 1800 kg.m^{-3}
Porosité	:	30 à 35 %
Vitesse du son	:	2600 à 2900 m.s^{-1}
Résistance	:	11 à 15 MPa



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. 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 :

- ☒ Analyse **chimique élémentaire** par spectrométrie de fluorescence des rayons X,
- ☒ Identification des **phases cristallines** par spectrométrie de diffraction des rayons X,
- ☒ Détermination du **résidu insoluble par attaque acide** complété par une **analyse thermogravimétrique**,
- ☒ Identification et **qualification de la fraction soluble sulfatée** par chromatographie ionique.

Référencement des prélèvements

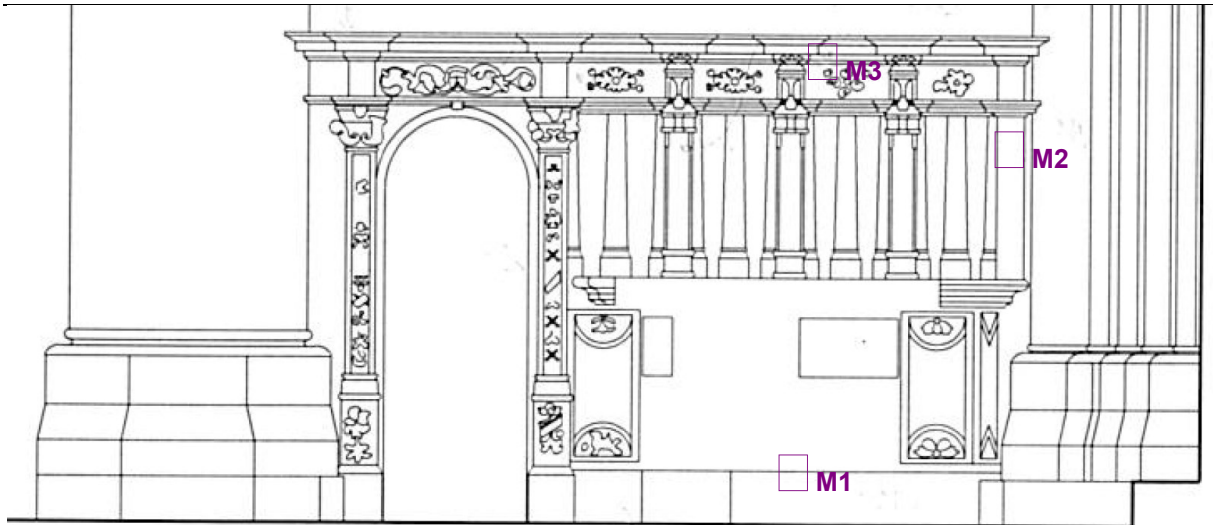
La présence de différentes natures de mortiers de hourdage observés sur site on fait l'objet de campagnes de prélèvements. Leur référencement est présenté dans le tableau ci-dessous.

REF. BPE	DESIGNATION
PMH201144-12	M1 : prélèvement par clivage de mortier de montage de couleur ocre/beige en base d'élévation extérieure Ouest
PMH201144-13	M2 : prélèvement par clivage de mortier de montage de couleur ocre/beige fortement pulvérulent sur colonnette extérieur Ouest
PMH201144-14	M3 : prélèvement par clivage de mortier beige avec inclusion blanches sur l'entablement élévation Ouest
PMH201144-15	M4 : prélèvement par clivage de mortier de montage de couleur ocre/beige en base d'élévation intérieure Nord
PMH201144-16	M5 : prélèvement par clivage de mortier de montage des colonnettes de l'élévation intérieure Nord, mortier beige à inclusions blanches
PMH201144-17	M6 : prélèvement par clivage de mortier gris/beige sur entablement sur élévation intérieur Nord

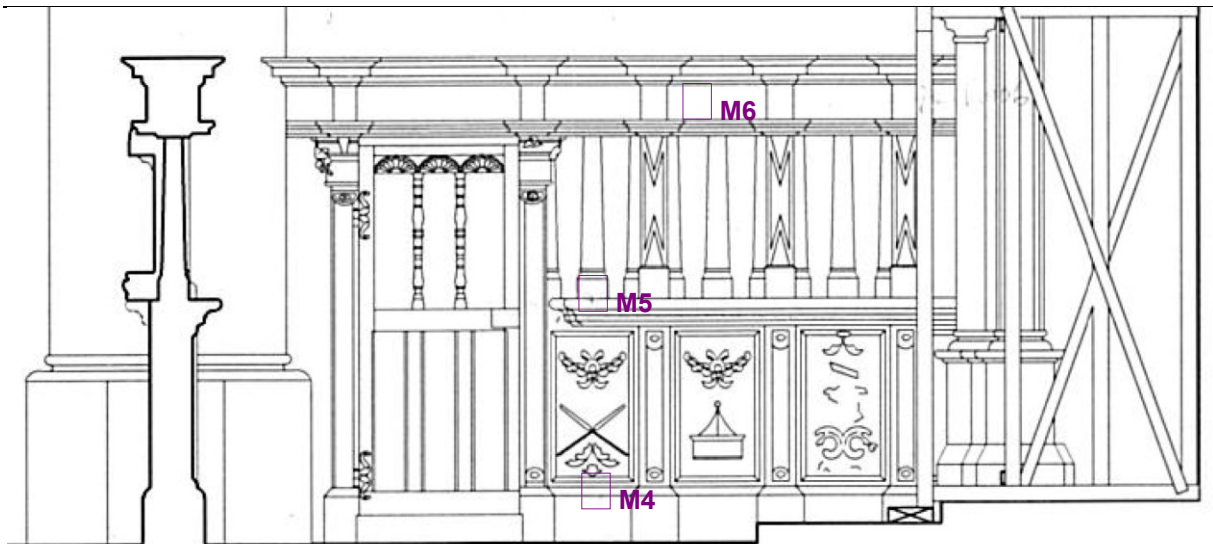
Tableau 6 : référencement des échantillons de mortiers en œuvre pour analyses de caractérisation en laboratoire

Localisation des prélèvements

Elévation externe Ouest de l'enceinte



Elévation interne Nord de l'enceinte

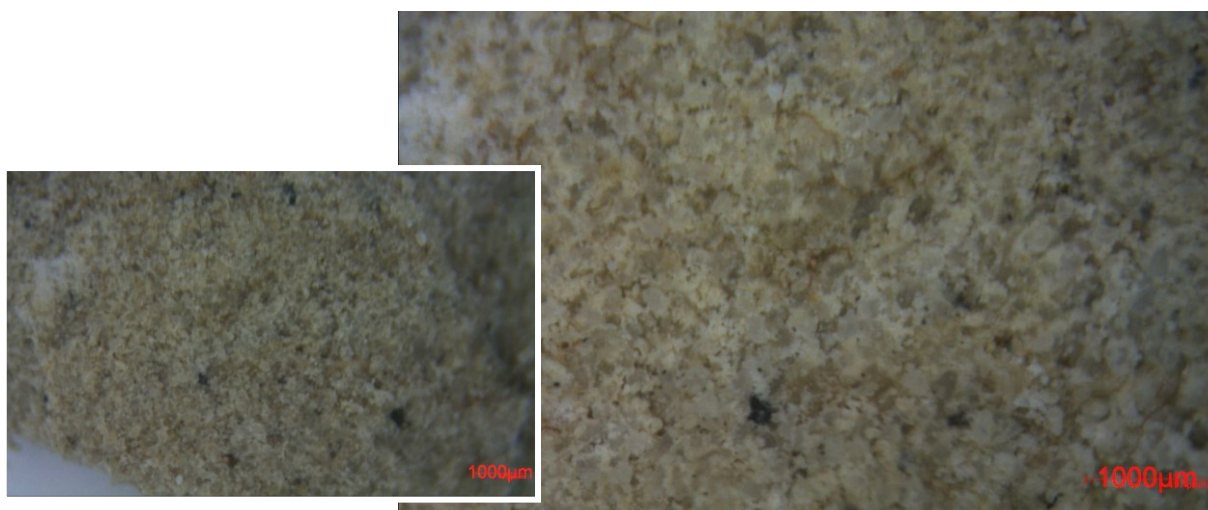


Analyse physico-chimique des mortiers

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.

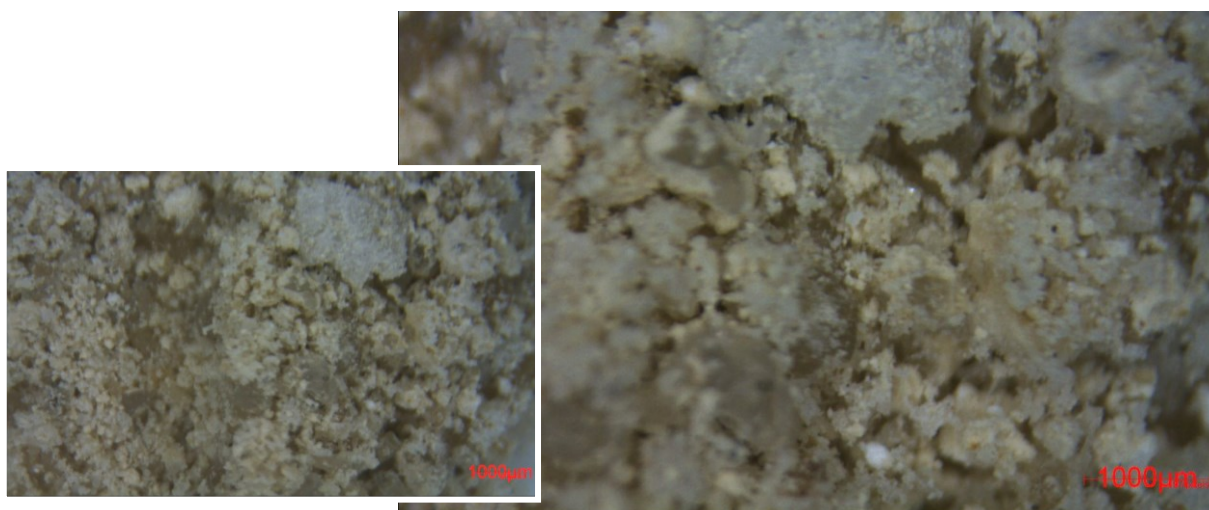
La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique permettant, par les propriétés physiques des matériaux en les irradiant avec un faisceau de rayons X, d'obtenir une composition élémentaire quantitative. Les analyses ont été réalisées avec un spectromètre NITON XR3TGOLDD+ avec une puissance de 50keV préalablement calibré de l'élément Magnésium à l'élément Uranium. Les résultats des analyses sont exprimés en poids d'oxyde.

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.



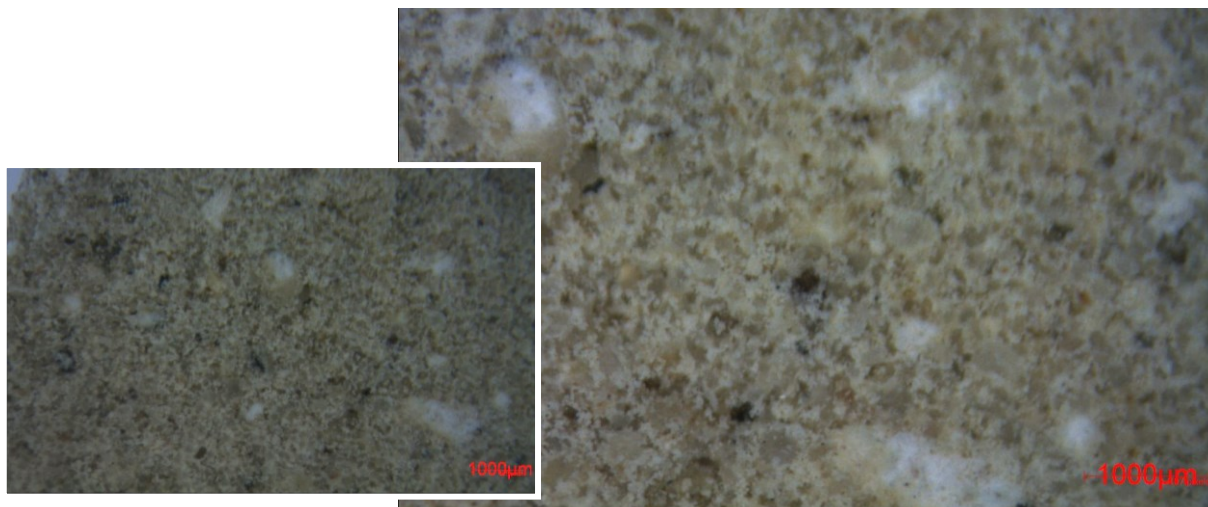
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
2,71	0,99	17,5	6,43	0,07	0,39	32,3	0,24	1,43	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								1,47			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								2,78			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								0,05			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								0,09			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								2,62			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								0,88			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								7,08			
RESIDU INSOLUBLE (%)								55,9			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier de couleur beige, de texture fine et d'aspect terrigène. La fraction liante présente une couleur matricielle blanche avec localement des inclusions blanches correspondant à des agglomérats calciques. Le squelette granulaire est de granulométrie fine inférieure à 1 mm et présente un faciès émoussé suggérant l'utilisation d'un sablon alluvionnaire. Les analyses élémentaires soulignent le caractère calcique du mortier avec un indice silicaté de la fraction liante précisé par les analyses thermiques. L'analyse de la fraction soluble ne met pas en évidence de contamination particulière excepté une légère pollution sulfatée sans incidence notable.



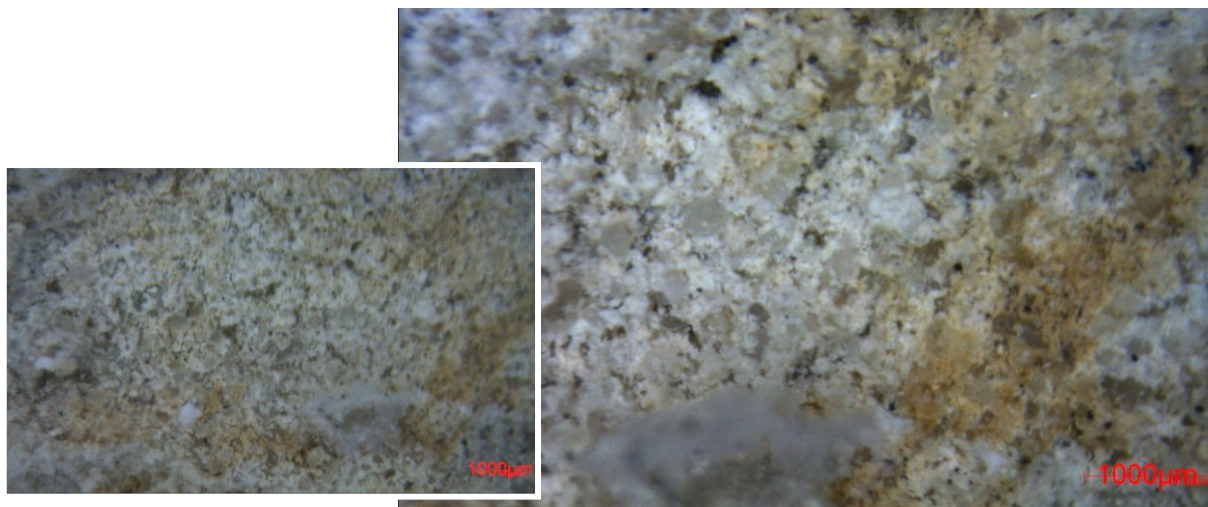
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
2,58	<0,1	13,4	14,1	0,81	0,65	34,6	0,11	0,93	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								12,3			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								23,2			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								0,61			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								3,04			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								9,39			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								2,85			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								4,97			
RESIDU INSOLUBLE (%)								41,2			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier friable se présentant principalement sous forme pulvérulente constituée d'une matrice fine assimilable à la phase liante de couleur matricielle beige et des agrégats de faible granulométrie translucides partiellement blancs, de forme émoussée indiquant une origine alluvionnaire de la charge granulaire. Les analyses élémentaires soulignent le caractère silico-calcaïque du mortier avec de fortes interférences liées aux pollutions multiples notamment par des composés sulfatés et azotés. Ces pollutions sont de forte ampleur et ne permettent pas de garantir l'intégrité du mortier.



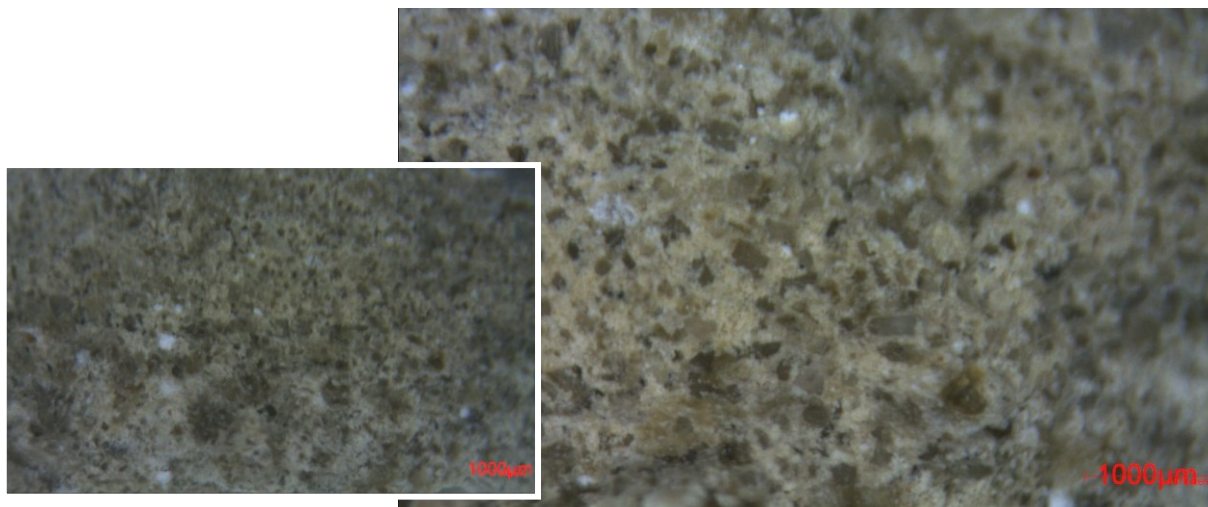
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
<1	1,09	20,5	4,44	0,94	0,98	25,9	0,19	0,92	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								1,37			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								2,59			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								0,94			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								3,94			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								6,88			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								4,01			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								5,65			
RESIDU INSOLUBLE (%)								46,7			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier de couleur beige, de texture fine et caractérisé par la présence de nombreux nodules blanchâtres assimilable à des agglomérats de chaux. La charge granulaire est relativement fine, d'aspect terrigène avec des faciès émoussés suggérant l'utilisation d'un sablon alluvionnaire. Les analyses élémentaires indiquent un équilibre des composantes silicatées et calcaireuses. L'analyse de la fraction soluble met en évidence une très forte contamination azotée et dans une moindre mesure, la présence d'une pollution sulfatée.



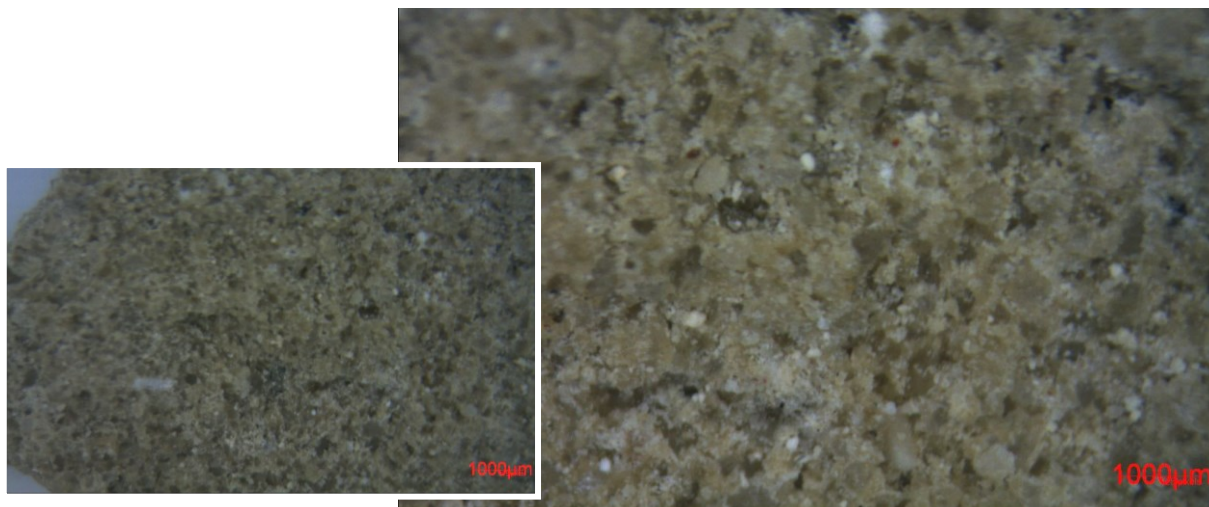
MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
<1	<0,1	10,2	26,3	0,03	0,17	34,7	0,13	0,66	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								15,7			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								29,7			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								0,06			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								0,12			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								12,0			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								1,16			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								6,08			
RESIDU INSOLUBLE (%)								28,4			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier de couleur matricielle originelle blanche avec des plages ocre jaunes pouvant correspondre à des phases oxydées. Il s'agit d'un mortier de texture fine avec une fraction liante relativement faible conférant à l'ensemble une microporosité relativement développée. Le squelette granulaire est principalement constitué d'agrégats translucides de faible granulométrie assimilable à un sablon alluvionnaire. Le faciès et les données physico-chimiques de ce mortier sont sensiblement équivalents au mortier M1. On notera toutefois la présence d'une pollution sulfatée très importante pouvant être en liaison avec la déstructuration matricielle.



MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
1,91	0,36	12,0	19,0	0,38	1,05	28,5	0,10	0,65	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								16,6			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								31,4			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								0,36			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								2,14			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								10,2			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								2,35			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								4,92			
RESIDU INSOLUBLE (%)								35,0			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier de couleur matricielle beige relativement riche en liant avec des inclusions blanches correspondant à des nodules de chaux. Le squelette granulaire est de faible dimension et les grains n'excèdent pas 1 mm. De couleur translucides, beiges et de forme émoussée, la charge granulaire correspond à un sable alluvionnaire. Les analyses élémentaires soulignent le caractère principalement calcique de ce mortier avec une très forte pollution sulfatée, une pollution importante par les nitrates et dans une moindre mesure, une pollution chlorée.

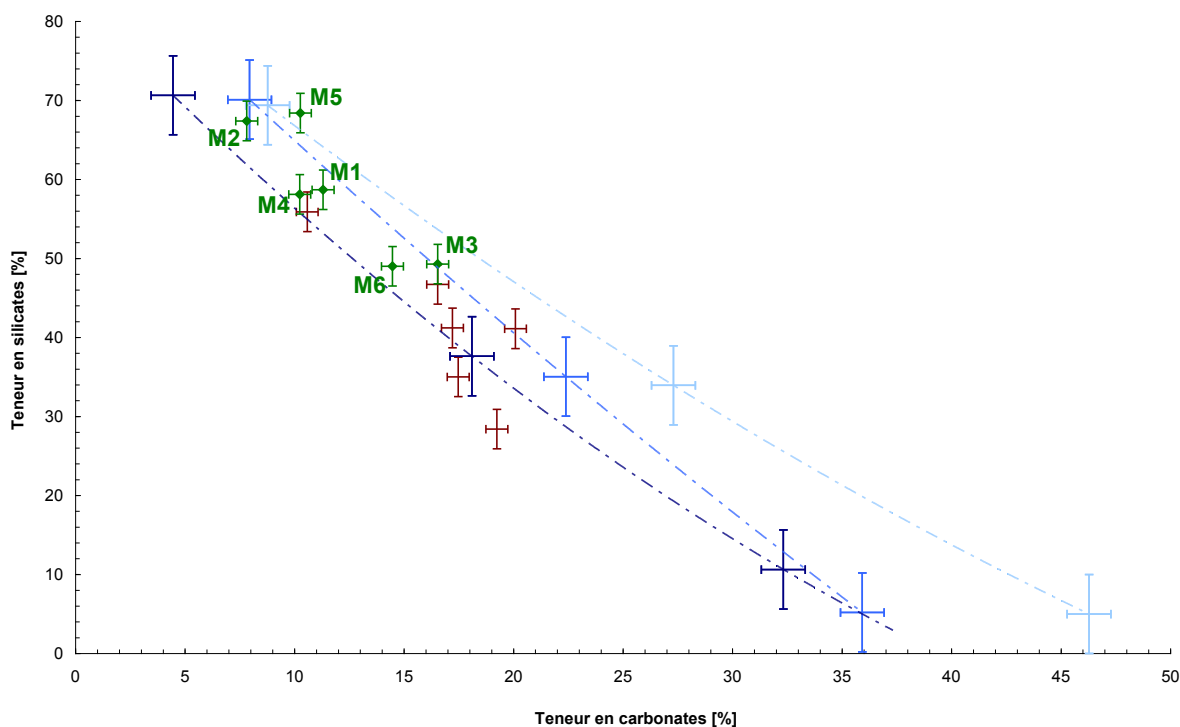


MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ba	Pb
2,51	0,86	11,9	4,69	1,16	1,71	28,2	0,16	1,25	<0,01	<0,01	<0,01
TENEUR EN SULFATES SOLUBLES (%)								4,18			
TENEUR EQUIVALENTE EN PLATRE (%)								7,90			
TENEUR EN CHLORURES SOLUBLES (%)								1,22			
TENEUR EN NITRATES SOLUBLES (%)								6,20			
PERTE AU FEU 105°C/450°C (%)								8,62			
PERTE AU FEU 450°C/550°C (%)								4,58			
PERTE AU FEU 550°C/950°C (%)								6,89			
RESIDU INSOLUBLE (%)								41,1			

Les observations en microscopie optique mettent en évidence un mortier de couleur matricielle beige relativement dense avec un aspect plus ou moins vitreux de la fraction liante. On note la présence de nodules calciques de faible dimension suggérant l'utilisation d'une chaux. Le squelette granulaire est similaire à ceux décrit précédemment à savoir, un sablon de granulométrie 0/1 mm d'origine alluvionnaire. Ce mortier présente un faciès relativement proche de l'échantillon M3. Les analyses élémentaires présentent d'importantes interférences avec des polluants multiples. En effet, l'analyse de la fraction met en évidence des pollutions multiples de forte ampleur pour l'ensemble des anions analysés.

Sur la nature des mortiers en œuvre

Les exploitations des données analytiques relatives aux différents échantillons de mortiers 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 :



L'exploitation des données brutes d'analyses ne permettent pas de classification en raison des très fortes contaminations sulfatées et azotées de certains échantillons. Ainsi, pour une exploitation plus objective, ont été retirés les polluants aux résultats bruts de manière à reporter uniquement les données relatives au mortier matriciel. Cette exploitation permet ainsi de regrouper les six prélèvements de mortiers en trois familles, se situant dans un fuseau indiquant que toutes ont été élaborées à base de chaux hydraulique. Les mortiers analysés peuvent être regroupés comme suit :

Le mortier de montage de couleur ocre/beige en base d'élévation extérieure Ouest [M1] et le mortier de montage de couleur ocre/beige en base d'élévation intérieure Nord [M4] sont de même nature et contemporains l'un de l'autre. Il s'agit d'un mortier élaboré sur une base calcaire assez faiblement dosée avec une charge granulaire silico-calcaire à dominante silicatée (environ 80% de silicates) translucide, de faible granulométrie (inférieure à 1 mm) et présentant un faciès assimilable à un sablon d'origine alluvionnaire.

Le mortier de montage de couleur ocre/beige fortement pulvérulent sur colonnette extérieure Ouest [M2] et le mortier beige à inclusions blanches de montage des colonnettes de l'élévation intérieure Nord [M5] sont de même nature et se distinguent principalement des autres mortiers de par leur squelette granulaire quasi exclusivement silicaté assimilable à un sable fin dont la granulométrie n'excède pas 2 mm avec un faciès roulé indiquant une origine alluvionnaire de celui-ci.

Le mortier beige avec inclusion blanches sur l'entablement élévation Ouest [M3] et le mortier gris/beige sur entablement en élévation intérieur Nord [M6] présentent des similitudes et sont chimiquement proches mais distincts des mortiers analysés précédemment. En effet et même si la phase liante est assimilable à une chaux hydraulique, la principale différence est notable de la fraction granulaire qui correspond à un sablon silico-calcaire avec une un équilibre de la fraction carbonatée avec la fraction silicatée. Ce sablon est de granulométrie 0/1 mm et présente un faciès émoussé indiquant son origine alluvionnaire.

Au total, le regroupement par type de matériau permettant d'isoler trois familles de mortiers est également un indicateur temporel de mise en œuvre. On observe ainsi trois grandes périodes d'interventions correspondant aux opérations de maçonneries originelles, une opération correspondant potentiellement à une reconstruction et une opération de rejointoiement.



ÉTAT SANITAIRE DES MAÇONNERIES



ETAT SANITAIRE DES MAÇONNERIES

Cette phase de l'étude a comme objectif de renseigner la maîtrise d'œuvre sur l'état sanitaire des maçonneries en phase préalable des travaux. Il s'agit de 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 le diagnostic d'humidité et la qualification des agents pathogènes sur l'enceinte de la chapelle du Saint Sépulcre de l'abbaye Saint Ferréol sont les suivantes :

- ☒ **Cartographie de répartition de l'humidité** par méthode non destructive combinant radiofréquences et micro-ondes,
- ☒ Détermination des **teneurs en eau libre, eau totale et eau hygroscopique** par dessiccation infrarouge et reprise en eau en enceinte climatique,
- ☒ Dosage des **sels solubles - anions** (chlorures, sulfates et nitrates) **et des cations** (sodium et potassium) par chromatographie ionique et spectrométrie d'absorption atomique,
- ☒ Identification cristallographique **des formations de néogenèse** par spectrométrie de diffraction des rayons X.

Typologie des prélèvements

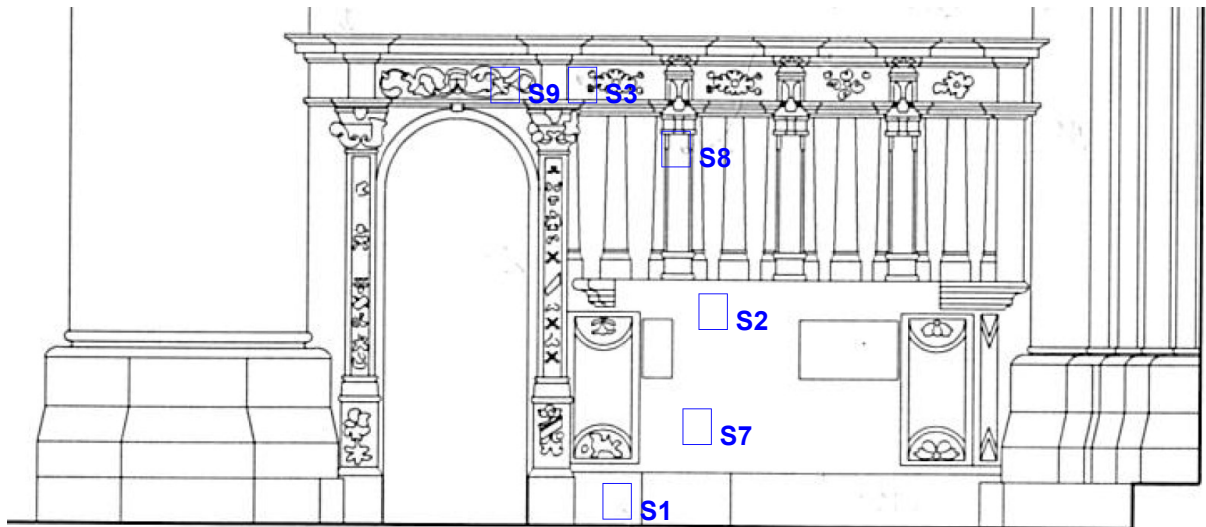
Dans le cadre des caractérisations des pathologies, ont été réalisés par le laboratoire des prélèvements par perçage de diamètre 6 mm en trois profondeurs [0/10 mm - 10/20 mm et 40/50 mm] ainsi que des prélèvements superficiels sur des zones présentant des concrétions et / ou des efflorescences. Le référencement des échantillons prélevés est indiqué dans le tableau à suivre :

REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
PMH201144-1	S1 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur soubassement de l'enceinte Ouest à h=60 mm
PMH201144-2	S2 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur élévation courante de l'enceinte Ouest à h=1210 mm
PMH201144-3	S3 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur entablement de l'enceinte Ouest à h=2280 mm
PMH201144-4	S4 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur soubassement de l'enceinte Nord à h=370 mm
PMH201144-5	S5 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur chapiteau d'encadrement de porte de l'enceinte Nord à h=1700 mm
PMH201144-6	S6 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur entablement de l'enceinte Nord à h=2200 mm
PMH201144-7	S7 : prélèvement par grattage d'efflorescences blanches bourgeonnantes en base d'élévation extérieur ouest
PMH201144-8	S8 : prélèvement par grattage d'efflorescences en film mince sur colonnade de l'élévation extérieure ouest
PMH201144-9	S9 : prélèvement par grattage d'efflorescences pulvérulentes sur bandeau de l'élévation extérieur ouest
PMH201144-10	S10 : prélèvement par grattage d'efflorescences pulvérulentes sur ébrasement de porte de l'élévation extérieure nord
PMH201144-11	S11 : prélèvement par grattage d'efflorescences en forte épaisseur sur colonnade sud de l'autel

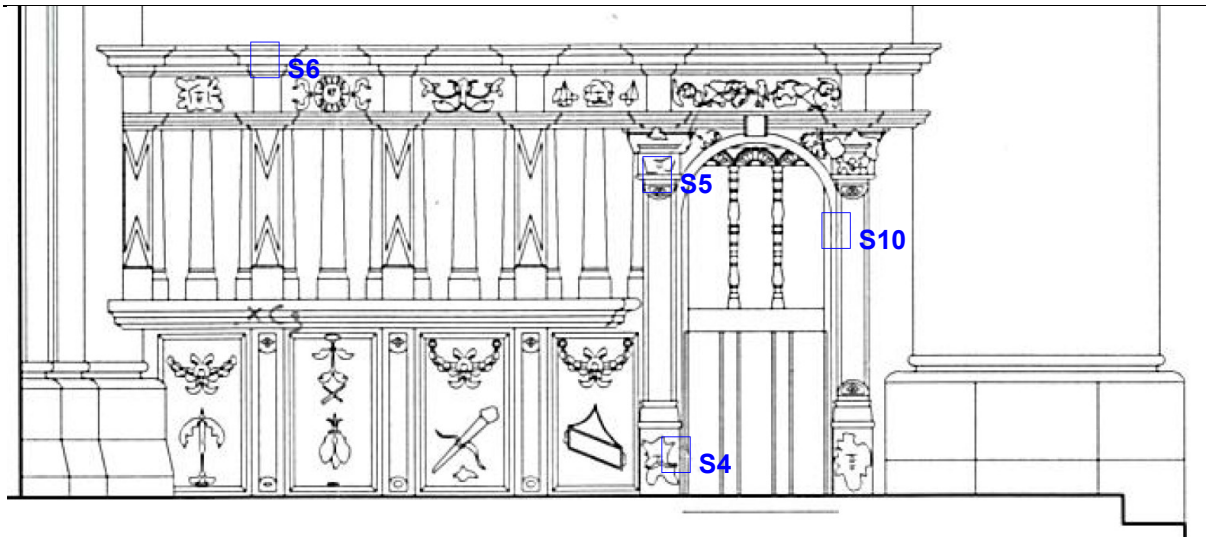
Tableau 7 : référencement des échantillons pour analyses de caractérisation pathologique en laboratoire

Localisation des prélèvements

Elévation externe Ouest de l'enceinte



Elévation externe Nord de l'enceinte



Cartographie de répartition de l'eau

Les cartographies de répartition des zones humides ont été réalisées en combinant un certain nombre de techniques à l'aide d'un humidimètre à radiofréquence TROTEC T660 permettant une mesure d'humidité en valeur relative sur une profondeur de 0 à 30 mm et un humidimètre à micro-ondes TROTEC T610 permettant une mesure d'humidité en valeur relative sur une profondeur de 0 à 300 mm.

Relevé sur élévation Ouest

Répartition de l'eau de 0 à 30 mm

Relevé par radiofréquences



Répartition de l'eau de 0 à 300 mm

Relevé par micro-ondes



Relevé sur élévation Ouest

Répartition de l'eau de 0 à 30 mm

Relevé par radiofréquences



Répartition de l'eau de 0 à 300 mm

Relevé par micro-ondes



Détermination de la teneur en eau

La détermination de la teneur en eau totale massique est réalisée sur site par dessiccation infrarouge permettant une lecture directe du taux massique d'humidité et permettant de s'affranchir des pertes d'eau éventuelles lors du conditionnement et du transport des échantillons.

REFERENCE ECHANTILLONS	HAUTEUR PREL (MM)	TENEUR EN EAU TOTALE (%/M)		
		0-10 mm	10-20 mm	40-50 mm
Elévation externe Ouest – S₁ à S₃	2280	4,41	4,27	3,51
	1210	8,61	9,60	9,66
	60	7,10	8,54	10,4
Elévation externe Nord – S₄ à S₆	2200	3,94	3,91	3,17
	1700	2,94	3,41	3,35
	370	5,00	5,22	5,69

Tableau 8 : détermination des teneurs en eau libre

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 9 : 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 10 : Teneurs indicatives en cations associés aux valeurs limites de recommandation en anions

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.

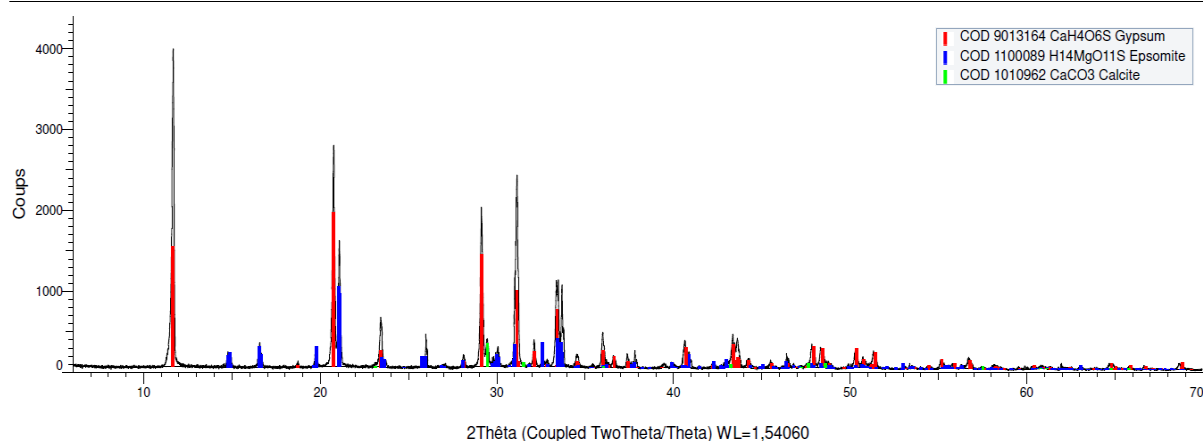
REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	CHLORURES (%)	SULFATES (%)	NITRATES (%)	SODIUM (%)	POTASSIUM (%)	CALCIUM (%)	MAGNESIUM (%)
S1 Ouest H=60 mm PMH201144-1	0-10	0,06	0,46	0,06	0,04	0,04	0,66	0,03
	10-20	0,05	0,06	0,01	0,05	0,05	0,57	0,02
	40-50	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,59	0,02
S2 Ouest H=1210 mm PMH201144-2	0-10	0,06	3,48	0,08	0,04	0,04	1,56	0,07
	10-20	0,06	0,61	0,10	0,03	0,04	0,67	0,04
	40-50	0,06	0,29	0,10	0,04	0,05	0,61	0,04
S3 Ouest H=2280 mm PMH201144-3	0-10	0,32	3,42	4,18	0,13	1,29	1,37	0,27
	10-20	0,36	1,61	2,05	0,18	0,29	0,91	0,28
	40-50	0,36	1,22	1,82	0,19	0,23	0,82	0,25
S4 Nord H=370 mm PMH201144-4	0-10	0,09	7,15	0,38	0,05	0,11	2,47	0,20
	10-20	0,09	1,72	0,38	0,06	0,11	0,91	0,17
	40-50	0,09	0,84	0,35	0,05	0,10	0,73	0,11
S5 Nord H=1700 mm PMH201144-5	0-10	0,39	2,88	1,59	0,16	0,36	1,18	0,28
	10-20	0,42	1,89	1,33	0,16	0,21	0,92	0,19
	40-50	0,42	1,59	1,42	0,18	0,24	0,88	0,19
S6 Nord H=2200 mm PMH201144-6	0-10	0,41	1,37	2,05	0,22	0,23	1,00	0,23
	10-20	0,43	0,20	2,09	0,23	0,20	0,64	0,22
	40-50	0,42	0,15	2,02	0,23	0,22	0,61	0,20

Tableau 11 : Résultats des dosages des sels solubles - anions et cations

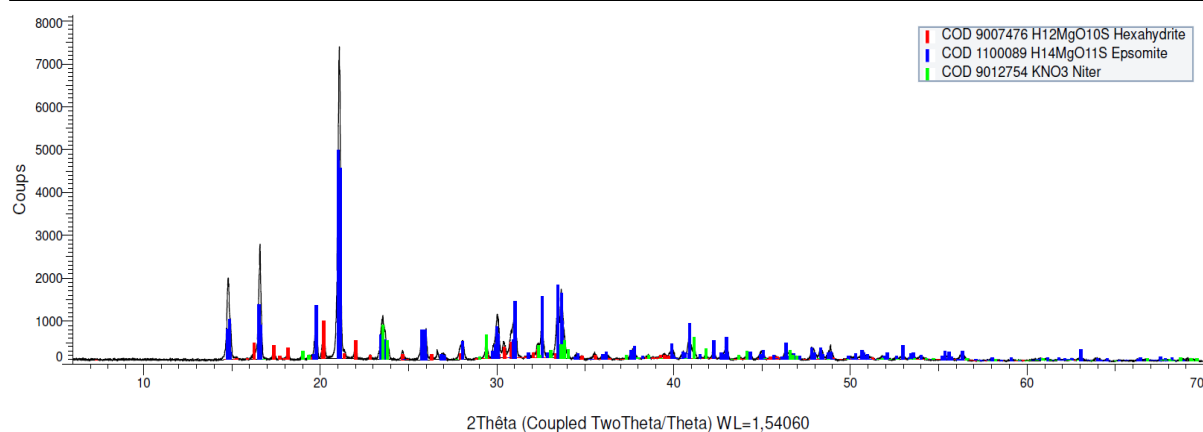
Identification des phases cristallines

La spectrométrie de diffraction des rayons X donne principalement des informations sur les structures et les phases minérales contenues dans un matériau. Les pics de diffraction des rayons X sont produits par interférence d'un faisceau monochromatique de rayons X diffusé à des angles spécifiques de chaque jeu de plans réticulaires compris dans un échantillon. Les intensités des pics sont déterminées par la distribution des atomes à l'intérieur du réseau. Par conséquent, le schéma de diffraction des rayons X est l'empreinte du dispositif atomique dans un matériau donné. Une recherche dans la base de données standard COD des schémas de diffraction des rayons X permet de faire une identification rapide de phase dans une grande quantité d'échantillons cristallins.

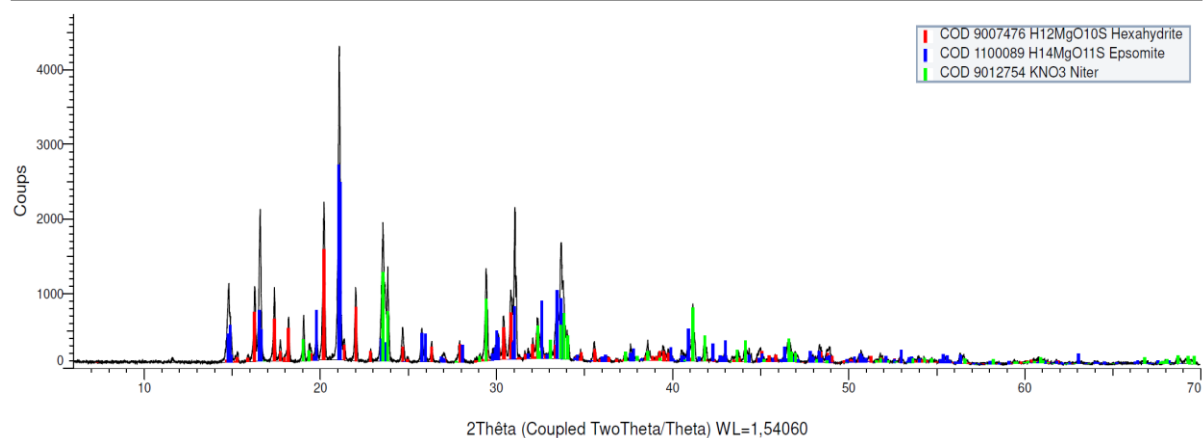
S7 : grattage d'efflorescences bourgeonnantes en base d'élévation extérieur Ouest



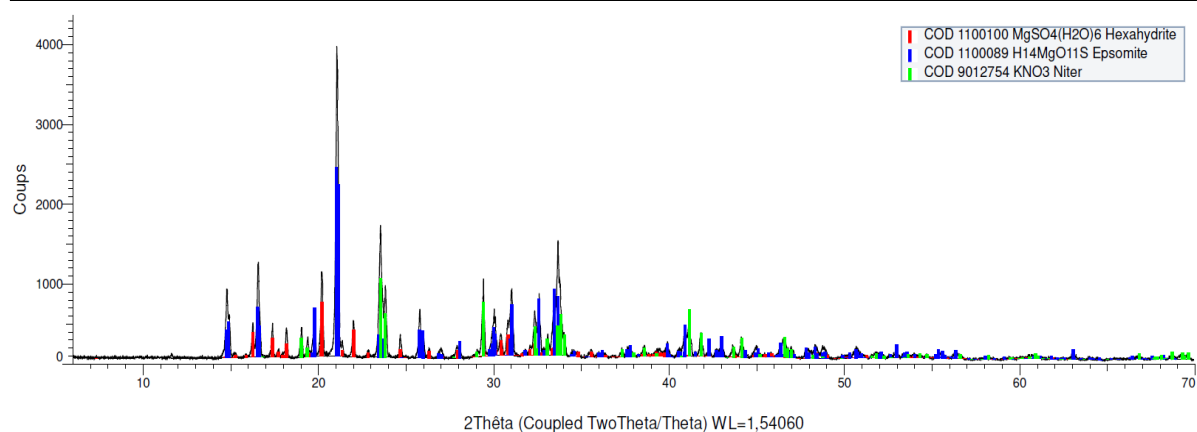
S8 : grattage d'efflorescences en film mince sur colonnade de l'élévation extérieure Ouest



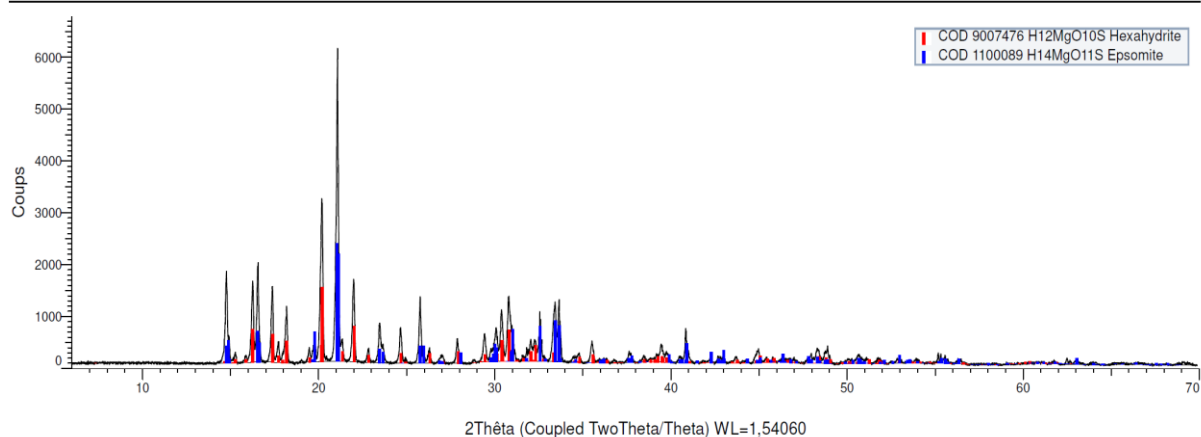
S9 : grattage d'efflorescences pulvérulentes sur bandeau de l'élévation extérieur Ouest



S10 : grattage d'efflorescences pulvérulentes sur ébrasement de porte nord



S11 : grattage d'efflorescences en forte épaisseur sur colonnade sud de l'autel



Détermination de la teneur en eau hygroscopique

Fort des premières investigations et en présence de sels fortement hygroscopiques, ont été réalisées des analyses visant à quantifier l'eau induite par les espèces salines. La détermination de la teneur en eau hygroscopique est réalisée en estimant l'eau fixée par adsorption dans une enceinte à température constante et humidité relative de 97 % entretenue par une solution sursaturée de sulfate de potassium. Les mesures de teneurs en eau hygroscopique sont réalisées à intervalles réguliers jusqu'à stabilisation de masse à environ 0,1%.

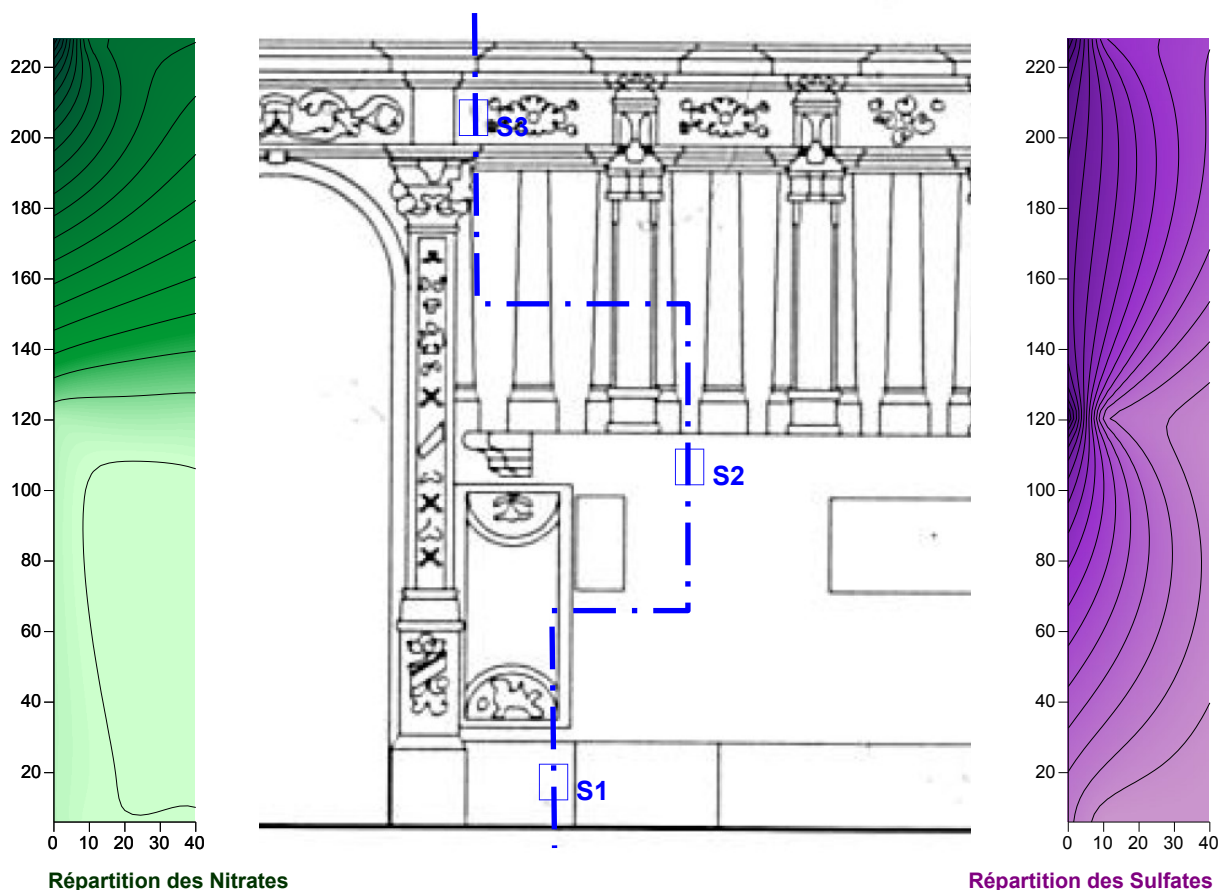
REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	TENEUR EN EAU TOTALE (%)	TENEUR EN EAU HYGROSCOPIQUE (%)
S1 Ouest H=60 mm PMH201144-1	0-10	7,10	0,82
	10-20	8,54	1,14
	40-50	10,4	1,18
S2 Ouest H=1210 mm PMH201144-2	0-10	8,61	4,33
	10-20	9,60	3,04
	40-50	9,66	3,36
S3 Ouest H=2280 mm PMH201144-3	0-10	4,41	34,4
	10-20	4,27	27,1
	40-50	3,51	24,4
S4 Nord H=370 mm PMH201144-4	0-10	5,00	8,37
	10-20	5,22	8,28
	40-50	5,69	5,75
S5 Nord H=1700 mm PMH201144-5	0-10	2,94	24,2
	10-20	3,41	25,9
	40-50	3,35	25,4
S6 Nord H=2200 mm PMH201144-6	0-10	3,94	29,7
	10-20	3,91	29,6
	40-50	3,17	28,4

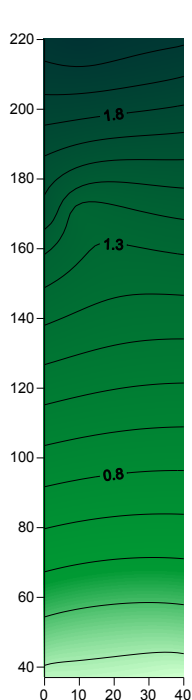
Tableau 12 : Détermination de la teneur en eau hygroscopique vs eau totale

Sur la nature et l'ampleur des polluants

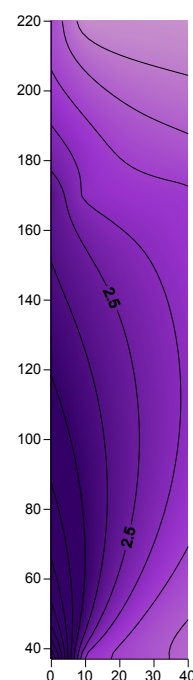
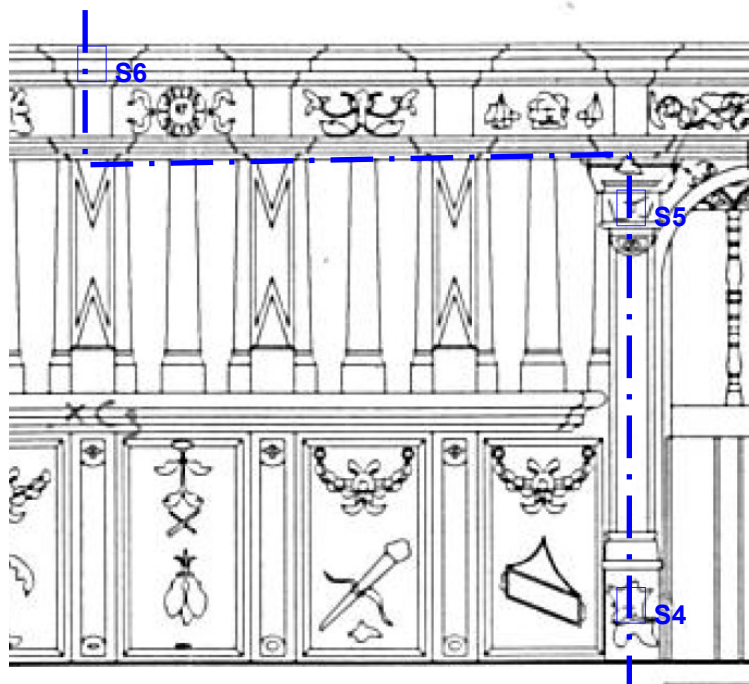
Les analyses relatives au comportement pathologique de l'ouvrage mettent globalement en évidence une situation pouvant rapidement s'avérer critique vis-à-vis de la conservation des matériaux. En effet, les investigations relatives aux polluants indiquent la présence d'un cortège salin complexe avec des espèces à fort caractère délétère tandis que les relevés d'humidité mettent en évidence une problématique essentielle d'alimentation en polluants.

En s'intéressant en premier lieu aux contaminations salines, on observe en effet un large spectre de polluants, notamment en partie haute de l'ouvrage avec une présence de la quasi-totalité des espèces anioniques associées de manière sélective aux espèces cationiques. Ainsi, les analyses minéralogiques mettent en évidence, outre la présence minimale d'Halite [NaCl] et de Gypse [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$], la prédominance du Nitre [KNO_3] et de l'Epsomite [$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$] également présente sous sa forme légèrement moins hygroscopique, l'Hexahydrate [$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]. Si le Nitre est caractéristique de phénomènes de remontées d'eau par capillarité entraînant des composés azotés et potassiques, la présence de formes salines magnésiennes est plus rare et surtout, leur origine n'est pas clairement établie en l'absence de liants dolomitiques. N'en reste que les teneurs en sels solubles sont extrêmement élevées et très largement supérieures aux seuils de recommandation. On notera ainsi des teneurs en nitrates pouvant dépasser 4% en partie haute de l'enceinte Ouest et dans cette même zone, des teneurs en sulfates, associées au magnésium pouvant dépasser 3,5%, soit des seuils dix fois supérieurs aux recommandations du LRMH. Il conviendra également de souligner que les décroissances en profondeur sont relativement faibles, voire inexistantes pour l'Epsomite et le Nitre sur les parties hautes des ouvrages. Ces phénomènes de répartitions salines et notamment les nitrates (pour traceur du Nitre) et des sulfates (pour traceur de l'Epsomite et du Gypse) sont proposés sous forme de cartographies sur les illustrations à suivre.



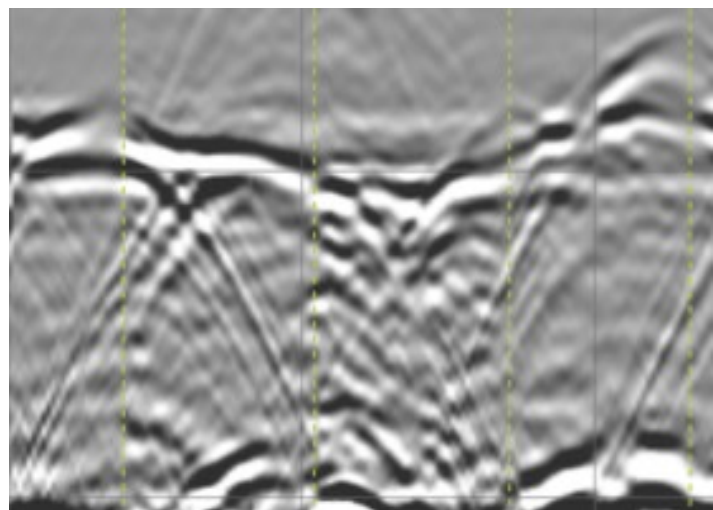


Répartition des Nitrates

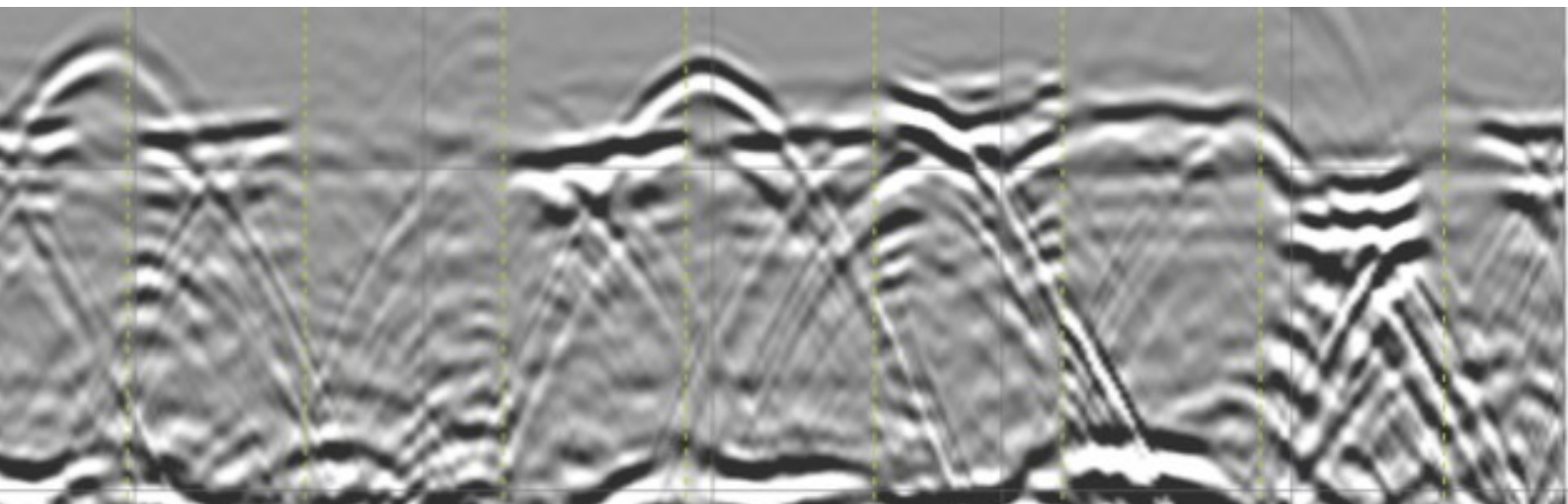


Répartition des Sulfates

La présence et l'activité de ces espèces salines pourraient être négligeables en l'absence d'un vecteur ; les mouvements d'eau. En effet, les cartographies réalisées sur site et notamment les relevés avec la sonde micro-ondes (en profondeur), mettent en évidence une alimentation de l'ouvrage depuis sa base ; on observe en effet des gradients de concentration sur l'élévation Nord et notables sur l'élévation Ouest de l'enceinte quasiment jusqu'au niveau de l'entablement. Les relevés réalisés en radiofréquence mettent quant à eux en exergue les très fortes teneurs en eau induites par les sels avec des surconcentrations humides notables de la base des colonnettes jusqu'à l'intégralité de l'entablement. Ces relevés cartographiques sont confirmés par les teneurs en eau massiques réalisées sur site, notamment en profondeur, dont le spectre s'étend de 10% d'eau massique en base et jusqu'à 3% d'eau sur l'entablement.



RECHERCHE D'ELEMENTS METALLIQUES



RECHERCHE D'ÉLEMENTS MÉTALLIQUES

Cette phase de l'étude a comme objectif de renseigner la maîtrise d'œuvre sur la présence éventuelle d'éléments métalliques au sein des maçonneries.

Programme analytique

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées pour l'identification des dispositions constructives sont les suivantes :

- ☒ Auscultation par interférométrie radar, recherche précise des emplacements des armatures métalliques et mesures d'épaisseurs des éléments,
- ☒ Sondage de reconnaissance des matériaux par piquage.

Principe d'auscultation géophysique

Le **radar d'auscultation** (GPR pour Ground Penetrating Radar ou géoradar) est composé de :

- une unité d'acquisition de données radar de marque PROCEQ GP 8000
- une antenne de fréquence modulable allant de 0,9 à 3,5 GHz de profondeur d'investigation 0,70 m, montée sur une roue codeuse qui permet de déclencher l'acquisition et de mesurer la distance parcourue,

Le radar fonctionne sur le principe de l'étude de la propagation d'une onde électromagnétique dans le milieu étudié. Le système envoie une onde (un pulse) de très courte durée dans le matériau et enregistre l'amplitude et le temps d'arrivée de chaque onde réfléchi. Les réflexions sont produites au droit de tout changement dans les propriétés de conduction du courant électrique du milieu (constante diélectrique). L'amplitude de la réflexion est déterminée par le contraste de permittivité diélectrique entre l'encaissant et la cible. Une partie de l'énergie envoyée continue aussi à se propager dans le milieu jusqu'à ce qu'elle soit trop atténuée pour être détectée. L'atténuation du signal est ainsi très variable et dépend grandement de la conductivité électrique des matériaux.

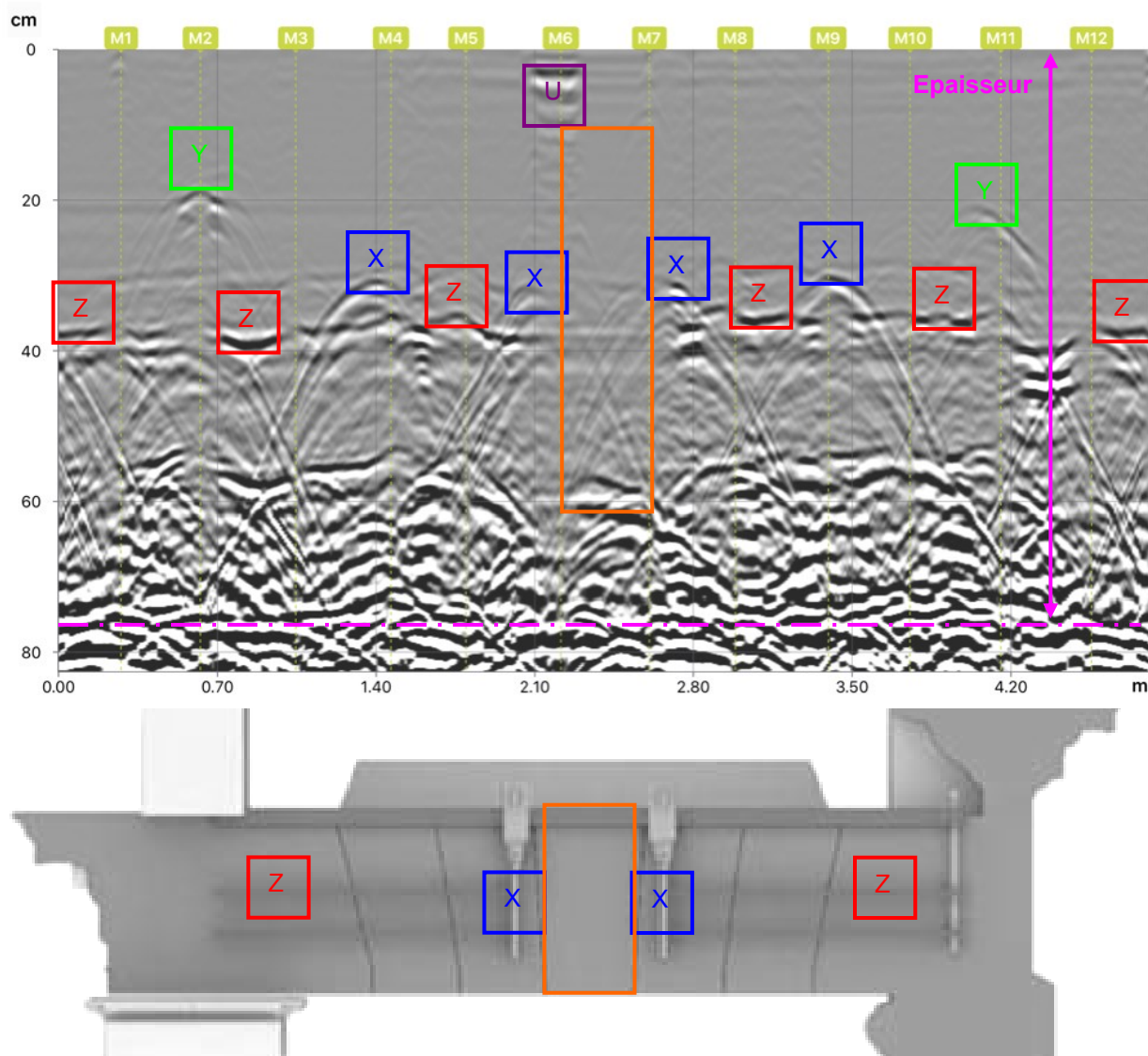
Addendum sur la technique d'interférométrie radar

La détection d'éléments métalliques par la technique d'interférométrie électromagnétique est une technique de reconnaissance non destructive présentant un certain nombre de limites. Il est ainsi impossible de distinguer deux aciers parfaitement alignés ou deux aciers parfaitement accolés. L'auscultation est également limitée par les dimensions de l'appareil ne permettant pas de détection sur les jonctions d'éléments. L'onde électromagnétique peut être gênée par différents facteurs comme :

- la présence d'eau ou d'humidité trop importante,
- la présence d'un isolant ou d'une étanchéité,
- la présence de fibres métalliques,
- la présence d'une lame d'air.

Eléments de lecture des données

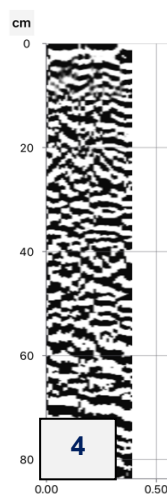
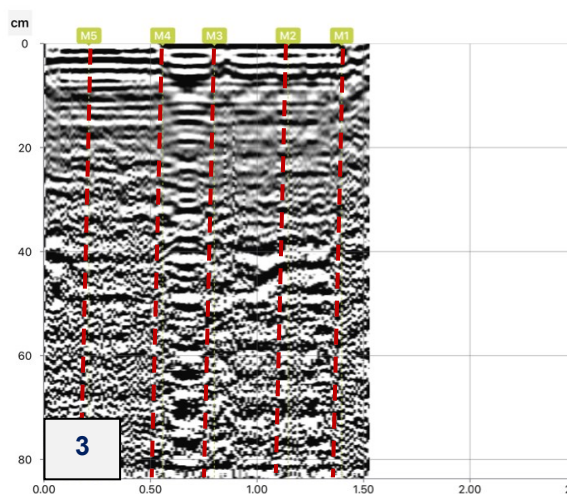
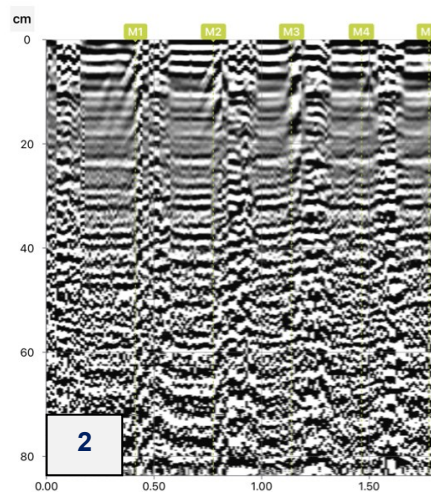
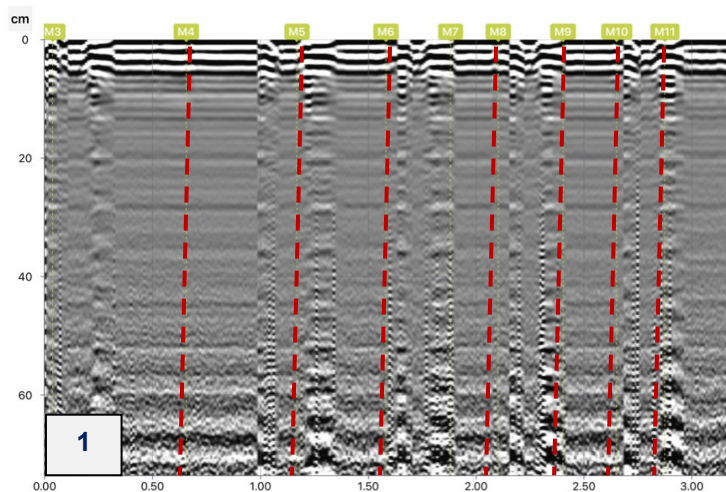
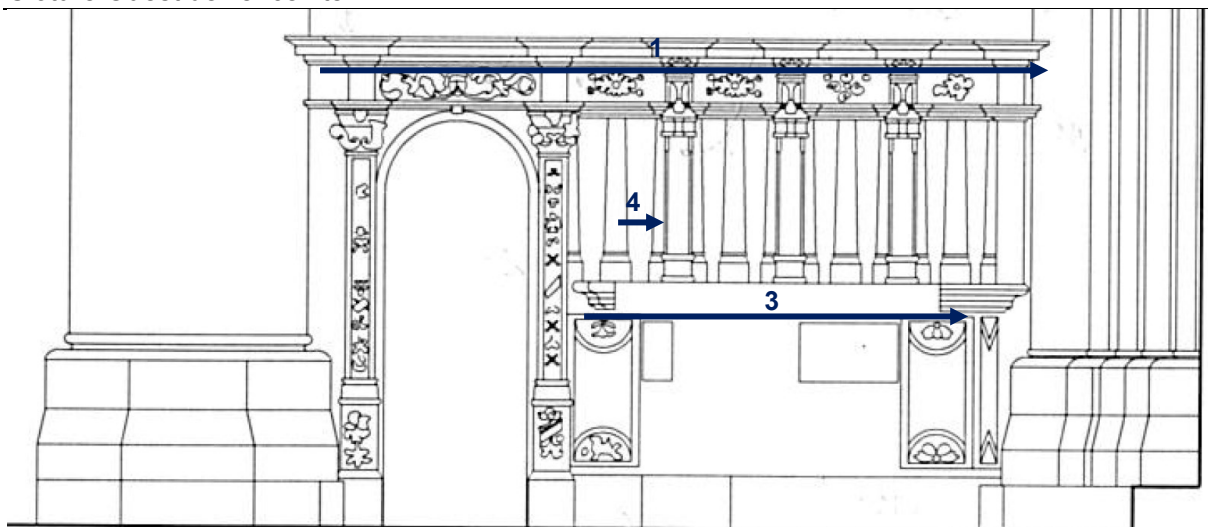
Les auscultations au Géoradar permettent l'établissement d'une « coupe » sur la ligne de profil avec une ouverture de 30°. On observe ainsi, sur un radargramme, la profondeur d'intrusion sur l'axe des ordonnées et la longueur de l'élément sur l'axe des abscisses. Chaque événement électromagnétique, c'est-à-dire chaque changement de constante diélectrique de matériaux est caractérisé par une hyperbole si l'évènement se trouve dans un axe transversal et par une ligne continue si l'évènement se trouve dans un axe longitudinal. Le radargramme présenté à titre d'exemple ci-après, illustre les différentes interférences électromagnétiques détectées sur la retombée Sud de la platebande Nord Est de l'église Notre Dame de Lorette.



Sur cet exemple de radargramme, on note la présence de 2x2 tringles verticales [repère X en bleu] situées à proximité des joints des claveaux [repères Mx en vert] et une barre horizontale [repère Z en rouge] interrompue au niveau de la clef centrale [encadré orange]. L'épaisseur totale de la platebande est d'environ 75 cm [ligne discontinue en rose] et les événements magnétiques se situent approximativement en son centre. On notera également la présence de deux événements électromagnétiques se produisant à environ 20 cm de profondeur [repère Y en vert] sur les contre-sommiers (ce phénomène est visible de part et d'autre de la platebande). De manière plus anecdotique, on observe la présence d'une agrafe [repère U en violet] au niveau de la jonction de la clef avec sa contre clef.

Résultats des auscultations

Clôture Ouest de l'enceinte



Note :
Les auscultations réalisées font état de l'absence d'éléments métalliques au sein de l'élévation Ouest de l'enceinte.

Radargramme 1 : réalisé dans la longueur du bandeau du retable (recherche d'épingle)

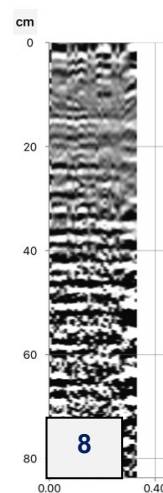
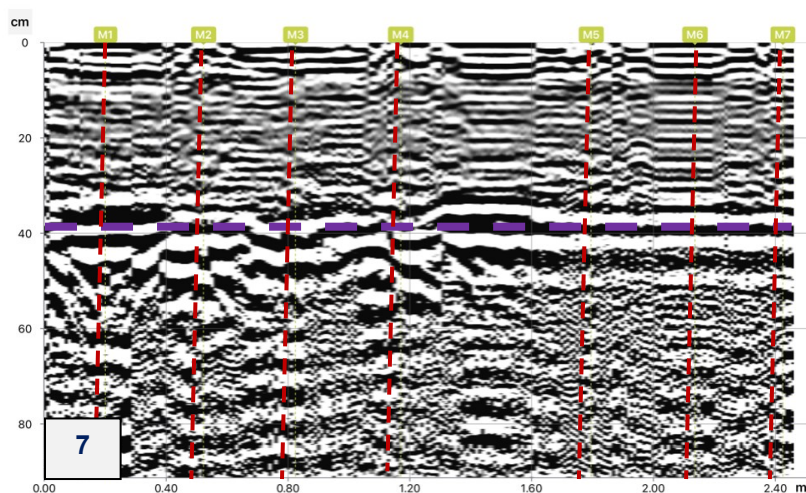
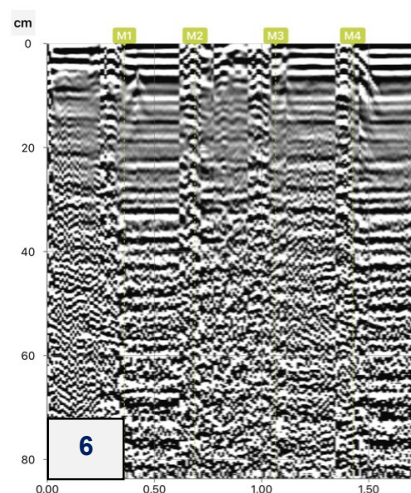
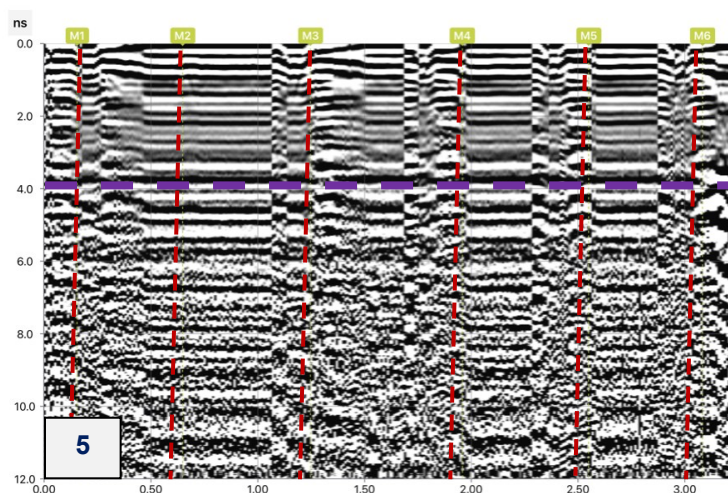
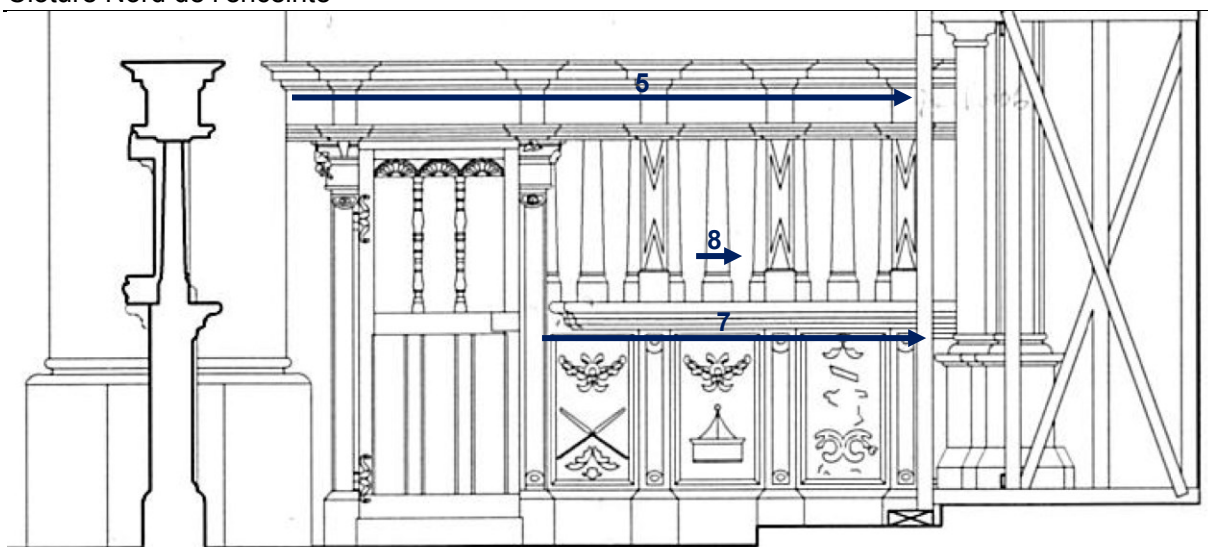
Radargramme 2 : Succession de profil sur la largeur en surface du bandeau du retable (recherche d'un tirant)

Radargramme 3 : réalisé sur la longueur de l'entablement.

Radargramme 4 : réalisé sur le pilier (recherche d'un tirant)

Légende : Joint bloc Succession de profils radar

Clôture Nord de l'enceinte



Note :
Les
auscultations
réalisées font
état de
l'absence
d'éléments
métalliques
au sein de la
clôture Nord
de l'enceinte.

Radargramme 5 : réalisé dans la longueur du bandeau du retable (recherche d'épingle)

Radargramme 6 : Succession de profil sur la largeur en surface du bandeau du retable (recherche d'un tirant)

Radargramme 7 : réalisé sur la longueur de l'entablement.

Radargramme 8 : réalisé sur le pilier (recherche d'un tirant)

Légende : Joint bloc Succession de profil radar Epaisseur bloc



SUIVI DES ESSAIS DE DESSALEMENT



ESSAI DE DESSALEMENT DES MAÇONNERIES

Cette phase de l'étude a comme objectif de renseigner la maîtrise d'œuvre sur l'efficacité des essais de dessalement réalisés par l'entreprise H.CHEVALIER. Les investigations présentées ci-après ont été menées suite à l'application de deux passes de dessalement.

Programme analytique

Dans le cadre de la mission confiée au laboratoire BPE, les différentes analyses réalisées pour évaluer les performances du traitement de dessalement des maçonneries de la chapelle du Saint Sépulcre de l'abbaye Saint Ferréol sont les suivantes :

- ☒ Dosage des **sels solubles - anions** (chlorures, sulfates et nitrates) **et des cations** (sodium et potassium) par chromatographie ionique et spectrométrie d'absorption atomique,

Typologie des prélèvements

Dans le cadre du suivi des essais de traitement par dessalement réalisés par les soins de l'entreprise H.CHEVALIER, ont été effectués par le laboratoire des prélèvements par perçage de diamètre 6 mm en trois profondeurs [0/10 mm - 10/20 mm et 40/50 mm] à proximité immédiate des prélèvements initiaux [§ Etat sanitaire des maçonneries – p.35 Détermination des teneurs en sels solubles], afin de permettre une étude comparative.

Rappel du référencement des échantillons prélevés :

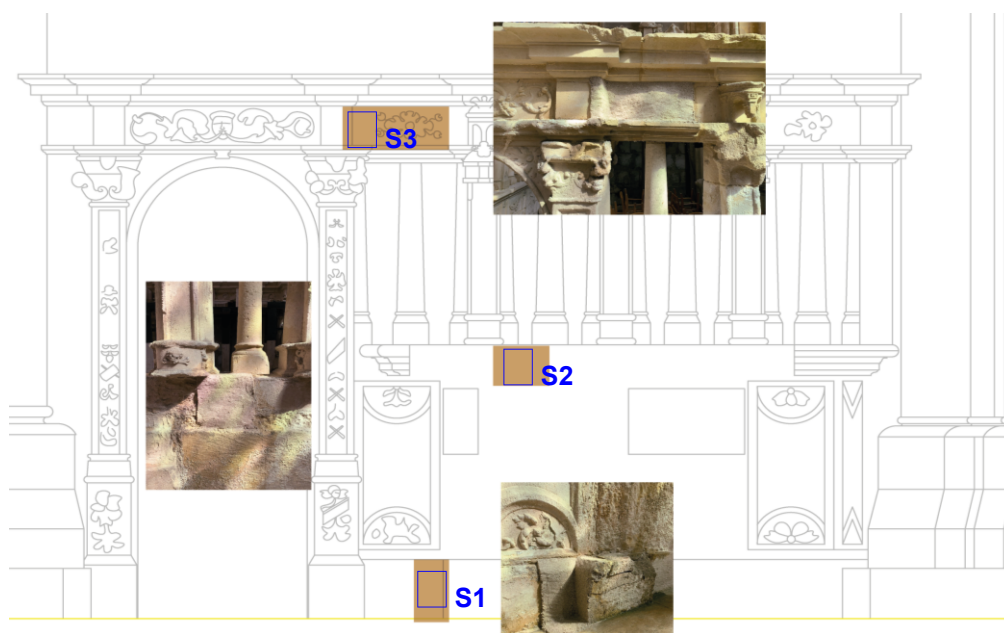
REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
PMH201144-1	S1 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur soubassement de l'enceinte Ouest à h=60 mm
PMH201144-2	S2 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur élévation courante de l'enceinte Ouest à h=1210 mm
PMH201144-3	S3 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur entablement de l'enceinte Ouest à h=2280 mm
PMH201144-4	S4 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur soubassement de l'enceinte Nord à h=370 mm
PMH201144-5	S5 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur chapiteau d'encadrement de porte de l'enceinte Nord à h=1700 mm
PMH201144-6	S6 : prélèvement par perçage 3 profondeurs sur entablement de l'enceinte Nord à h=2200 mm

Tableau 13 : référencement des échantillons pour analyses de caractérisation pathologique en laboratoire

Détermination des teneurs en sels solubles – 2 passes

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.

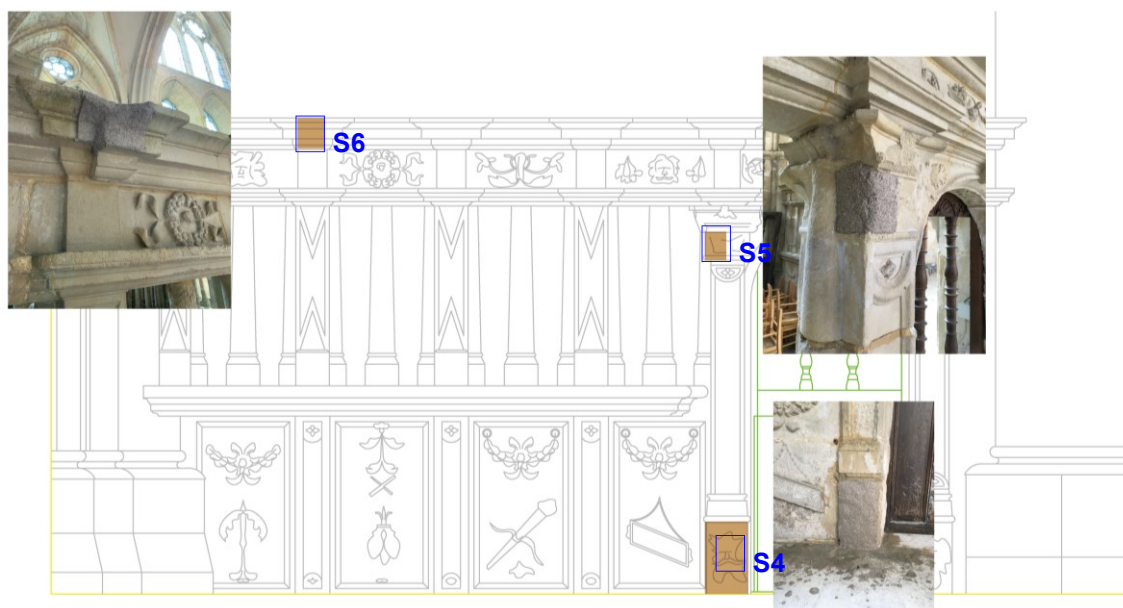
Elévation externe – Clôture Ouest de l'enceinte



REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	CHLORURES (%)	SULFATES (%)	NITRATES (%)	SODIUM (%)	POTASSIUM (%)	CALCIUM (%)	MAGNESIUM (%)
S1 Ouest H=60 mm PMH201144-1 Initial	0-10	0,06	0,46	0,06	0,04	0,04	0,66	0,03
	10-20	0,05	0,06	0,01	0,05	0,05	0,57	0,02
	40-50	0,05	0,06	0,01	0,02	0,02	0,59	0,02
S1 Ouest PMH201246-1 1^{ère} passe	0-10	0,05	0,29	0,01	0,01	0,01	0,71	0,04
	10-20	0,05	0,06	0,01	0,01	0,02	0,64	0,03
	40-50	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01	0,63	0,03
S1 Ouest PMH201246-7 2^{ème} passe	0-10	0,05	0,25	0,02	0,01	0,02	0,67	0,03
	10-20	0,05	0,07	0,01	0,01	0,02	0,60	0,02
	40-50	0,05	0,05	<0,01	0,01	0,01	0,60	0,02

REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	CHLORURES (%)	SULFATES (%)	NITRATES (%)	SODIUM (%)	POTASSIUM (%)	CALCIUM (%)	MAGNESIUM (%)
S2 Ouest H=1210 mm PMH201144-2	0-10	0,06	3,48	0,08	0,04	0,04	1,56	0,07
	10-20	0,06	0,61	0,10	0,03	0,04	0,67	0,04
	40-50	0,06	0,29	0,10	0,04	0,05	0,61	0,04
S2 Ouest PMH201246-2 1^{ère} passe	0-10	0,06	2,17	0,08	0,02	0,03	1,26	0,04
	10-20	0,06	0,66	0,09	0,02	0,04	0,74	0,04
	40-50	0,06	0,16	0,09	0,03	0,04	0,67	0,03
S2 Ouest PMH201246-8 2^{ème} passe	0-10	0,05	2,73	0,01	0,01	0,02	1,49	0,02
	10-20	0,05	0,66	0,01	0,01	0,03	0,76	0,01
	40-50	0,05	0,14	0,01	0,01	0,03	0,54	0,01
S3 Ouest H=2280 mm PMH201144-3	0-10	0,32	3,42	4,18	0,13	1,29	1,37	0,27
	10-20	0,36	1,61	2,05	0,18	0,29	0,91	0,28
	40-50	0,36	1,22	1,82	0,19	0,23	0,82	0,25
S3 Ouest PMH201246-3 1^{ère} passe	0-10	0,29	4,58	1,52	0,14	0,15	2,03	0,27
	10-20	0,30	1,91	1,45	0,14	0,15	1,14	0,25
	40-50	0,30	1,22	1,38	0,14	0,15	0,97	0,21
S3 Ouest PMH201246-9 2^{ème} passe	0-10	0,12	3,11	0,40	0,05	0,06	1,55	0,10
	10-20	0,22	1,75	1,02	0,11	0,13	1,12	0,17
	40-50	0,33	1,16	1,47	0,17	0,20	0,88	0,22

Elévation externe – Clôture Nord de l'enceinte



REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	CHLORURES (%)	SULFATES (%)	NITRATES (%)	SODIUM (%)	POTASSIUM (%)	CALCIUM (%)	MAGNESIUM (%)
S4 Nord H=370 mm PMH201144-4 Initial	0-10	0,09	7,15	0,38	0,05	0,11	2,47	0,20
	10-20	0,09	1,72	0,38	0,06	0,11	0,91	0,17
	40-50	0,09	0,84	0,35	0,05	0,10	0,73	0,11
S4 Nord PMH201246-4 1^{ère} passe	0-10	0,09	9,84	0,40	0,04	0,08	3,60	0,35
	10-20	0,09	1,37	0,39	0,04	0,10	0,86	0,17
	40-50	0,10	0,65	0,39	0,05	0,10	0,80	0,12
S4 Nord PMH201246-10 2^{ème} passe	0-10	0,10	2,18	0,43	0,05	0,12	0,91	0,20
	10-20	0,10	1,28	0,44	0,06	0,13	0,72	0,16
	40-50	0,10	0,80	0,40	0,05	0,13	0,67	0,11
S5 Nord H=1700 mm PMH201144-5	0-10	0,39	2,88	1,59	0,16	0,36	1,18	0,28
	10-20	0,42	1,89	1,33	0,16	0,21	0,92	0,19
	40-50	0,42	1,59	1,42	0,18	0,24	0,88	0,19
S5 Nord PMH201246-5 1^{ère} passe	0-10	0,31	3,61	1,26	0,13	0,23	1,52	0,29
	10-20	0,30	2,37	1,01	0,13	0,15	1,26	0,18
	40-50	0,29	1,42	0,91	0,12	0,14	1,01	0,14
S5 Nord PMH201246-11 2^{ème} passe	0-10	0,11	2,52	0,27	0,04	0,09	1,18	0,13
	10-20	0,22	1,52	0,77	0,10	0,15	0,91	0,10
	40-50	0,36	1,30	1,23	0,17	0,21	0,92	0,17
S6 Nord H=2200 mm PMH201144-6	0-10	0,41	1,37	2,05	0,22	0,23	1,00	0,23
	10-20	0,43	0,20	2,09	0,23	0,20	0,64	0,22
	40-50	0,42	0,15	2,02	0,23	0,22	0,61	0,20
S6 Nord PMH201246-6 1^{ère} passe	0-10	0,37	0,54	1,88	0,21	0,18	0,79	0,21
	10-20	0,37	0,08	1,75	0,20	0,18	0,67	0,19
	40-50	0,35	0,07	1,67	0,20	0,17	0,73	0,18
S6 Nord PMH201246-12 2^{ème} passe	0-10	0,18	1,48	0,75	0,09	0,10	0,92	0,09
	10-20	0,27	0,30	1,38	0,16	0,17	0,68	0,13
	40-50	0,44	0,08	2,22	0,26	0,27	0,64	0,18

Tableau 14 : Comparatif des résultats des dosages en sels solubles obtenus à l'issu de la 1^{ère} et de la 2^{ème} passe de dessalement effectuée par les soins de l'entreprise H.CHEVALIER

Commentaires – 1^{ère} passe

Concernant la clôture Ouest de l'enceinte :

En considérant les teneurs initiales en sels solubles, les résultats des dosages obtenus à l'issu de la 1^{ère} passe de dessalement font état d'un allègement salin uniquement pour le nitrate de potassium [KNO₃]. En effet, on notera soit de légères baisses soit une équivalence des teneurs avant et après dessalement concernant les ions chlorures, sodium et magnésium.

Concernant la clôture Nord de l'enceinte :

Les résultats des dosages réalisés suite à la 1^{ère} passe de dessalement mettent en évidence des performances relativement similaires à celles obtenues au niveau de la clôture Ouest. Seuls les ions nitrates associés au potassium semblent avoir pu être mobilisés et extraits des supports.

Commentaires – 1^{ère} passe

De manière générale, les résultats des dosages en sels solubles effectués à l'issu de l'application de la 2^{ème} passe de dessalement mettent en évidence la diminution significative des teneurs entre 0 et 20 mm de profondeur s'accompagnant cependant d'une augmentation importante des concentrations en profondeur de supports. La répartition de ces gradients indique de ce fait la mobilisation des sels solubles contenus en profondeur au sein de la maçonnerie en œuvre malgré un assainissement superficiel avéré.

Au regard de l'importance et de la répartition des contaminations salines initialement présentes au sein des maçonneries formant la clôture de la chapelle du Saint Sépulcre et en considérant l'efficacité de la première passe et de la deuxième passe de dessalement réalisées par les soins de l'entreprise H.CHEVALIER, il apparaît que la technique envisagée ne permettra pas d'obtenir un assainissement suffisant des matériaux pour garantir leur durabilité. Il semble par conséquent nécessaire d'envisager une autre méthodologie de traitement. Un dessalement par bain associé à la mise en place d'une barrière physique, visant à stopper les phénomènes hydriques ascensionnels, peut être éventuellement suggéré.

t



Laboratoires

Pour le laboratoire BPE :

Dimbsthal, le 30 octobre 2020

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

