

DIRECTION REGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES D'AUVERGNE-RHÔNE-ALPES
CONSERVATION REGIONALE DES MONUMENTS HISTORIQUES
6, Quai Saint-Vincent - 69283 LYON Cedex 01

DRÔME (26)

VALENCE

CATHEDRALE SAINT-APOLLINAIRE

**Aménagement du parvis / Etat sanitaire
du mur de soutènement**

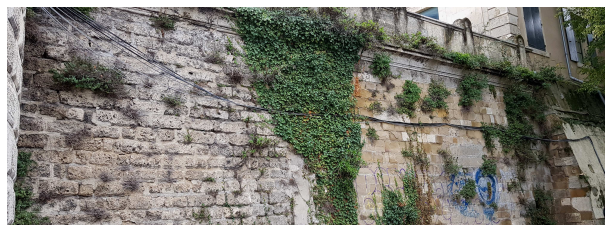
DIAGNOSTIC



**ANNEXE 2 : Diagnostic sanitaire du mur de
soutènement – Analyses Laboratoire - Cabinet
STUDIOLO**



Laboratoires



(26) – VALENCE

CATHEDRALE SAINT APOLLINAIRE

Caractérisation des pierres et des
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

(26) – VALENCE – CATHEDRALE SAINT APOLLINAIRE

Caractérisation des pierres et des pathologies associées

Demandeur : **CABINET STUDIOLO – Madame Barbara BRUNET IMBAULT /
Monsieur Benjamin REIDIBOYM - 6, rue des Haudriettes 75003 PARIS**



SOMMAIRE

PREAMBULE	5
DOCUMENTS DE REFERENCE	5
ANALYSES DES PIERRES EN OEUVRE	8
PROGRAMME ANALYTIQUE	8
TYPLOGIE ET ILLUSTRATIONS DES PRELEVEMENTS	8
POINTS SINGULIERS SUR PRELEVEMENTS	10
RESULTATS DES ANALYSES PETROPHYSIQUES	11
DETERMINATION DE LA POROSITE OUVERTE ET DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	11
MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ONDES SONORES	11
DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE	11
ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION	12
DETERMINATION DE LA PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU	12
DETERMINATION DE L'ACTIVITE ARGILEUSE	12
DETERMINATION DE STABILITE DIMENSIONNELLE HYDRIQUE	13
DETERMINATION DE STABILITE DIMENSIONNELLE THERMIQUE	13
IDENTIFICATIONS PATHOLOGIQUES	16
PROGRAMME ANALYTIQUE	16
TYPLOGIE ET ILLUSTRATIONS DES PRELEVEMENTS	16
RESULTATS DES INVESTIGATIONS – PATHOLOGIE	18
DETERMINATION DES TENEURS EN EAU	18
DOSAGES DES SELS SOLUBLES	18

PREAMBULE

La mission confiée par le CABINET STUDIOLO, représenté par Madame Barbara BRUNET, au laboratoire BPE, a comme objet de déterminer les principales caractéristiques pétrophysiques des pierres en œuvre, de déterminer leurs éventuelles pathologies associées et de rechercher la présence d'un ancien traitement des épidermes.

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

- Phase n°1 : Caractérisation pétrophysique des pierres
- Phase n°2 : Diagnostic hygrométrique et caractérisation des altérations

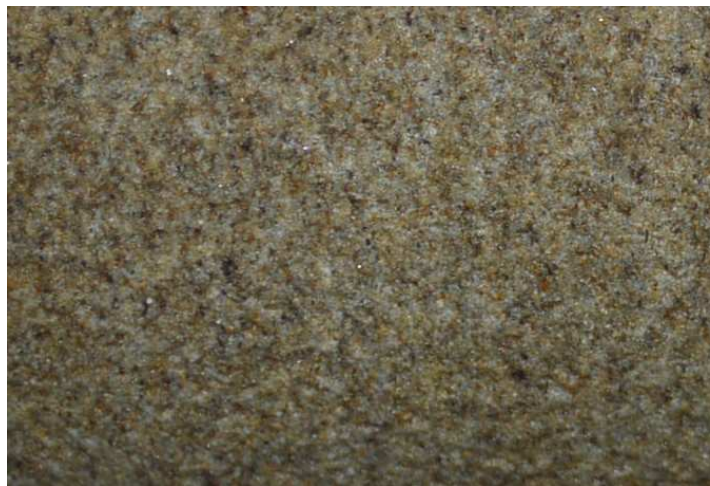
Les zones et typologies de prélèvements ont été définies en concertation avec Monsieur Benjamin REIDIBOYM représentant le cabinet STUDIOLO en charge du diagnostic.

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

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.
- 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.



QUALIFICATION DES PIERRES



ANALYSES DES PIERRES EN OEUVRE

Les analyses pétrophysiques et pétrographiques des pierres en œuvre ont comme objet de renseigner le demandeur 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 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,
- Détermination de la **perméabilité à la vapeur d'eau** selon les prescriptions de la Norme NF EN 15803,
- Détermination de l'**activité argileuse** par essai au bleu de méthylène selon les prescriptions de la Norme NF EN 933-9,
- Détermination des **dilatations thermiques et hydriques** selon les procédures RILEM.

Typologie et illustrations des prélèvements

Dans le cadre des caractérisations des pierres en œuvre, ont été réalisés des prélèvements par carottage de diamètre 50 mm par le laboratoire en fonction de la nature géologique des roches. Le détail des prélèvements est indiqué dans le tableau à suivre :

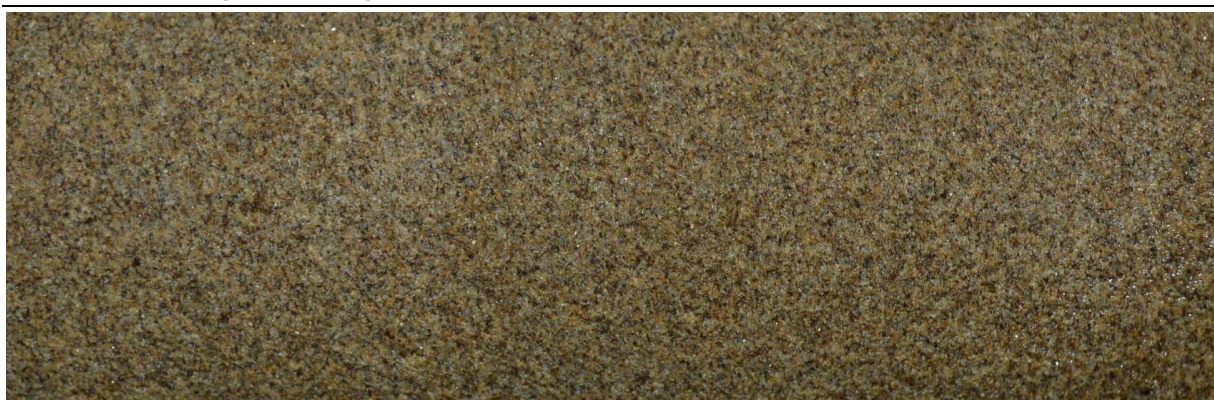
REFERENCE DES ECHANTILLONS	DESIGNATION
P1 PMH191374 – 1	C1 : Carottage Ø 50 mm sur pierre type « meulière » en base du mur de soutènement Ouest
P2 PMH191374 – 2	C2 : Carottage Ø 50 mm sur molasse gréseuse avec surface intacte en base du mur de soutènement
P3 PMH191374 – 3	C3 : Carottage Ø 50 mm sur molasse gréseuse brune avec surface desquamée en base du mur de soutènement
P4 PMH191374 – 4	C4 : Carottage Ø 50 mm sur molasse gréseuse ocre jaune avec surface desquamée en base du mur de soutènement

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

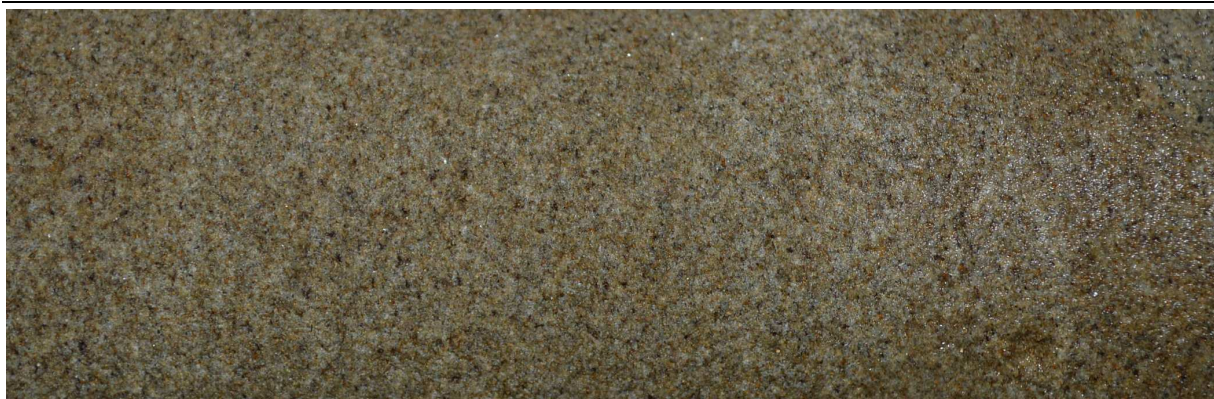
Prélèvement P1 [PMH191374-1]



Prélèvement P2 [PMH191374-2]



Prélèvement P3 [PMH191374-3]



Prélèvement P4 [PMH191374-4]



Points singuliers sur prélèvements

Lors des prélèvements sur site et plus particulièrement sur un bloc comportant l'épiderme de la pierre, on note, lors de l'extraction du carottage, la présence de microfissurations périphériques traduisant une altération sur une profondeur mesurée d'environ 15 mm.



Le prélèvement réalisé sur la molasse gréseuse ocre jaune avec surface desquamée en base du mur de soutènement met en évidence, en fond de carottage, la présence d'un élément en terre cuite hourdé avec un mortier d'aspect cimentaire.



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 PMH191374-1	30,4	1790
P2 PMH191374-2	18,7	2141
P3 PMH191374-3	20,2	2087
P4 PMH191374-4	14,0	2258

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 PMH191374-1	3866
P2 PMH191374-2	1631
P3 PMH191374-3	1988
P4 PMH191374-4	2416

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 PMH191374-1	479
P2 PMH191374-2	73,8
P3 PMH191374-3	63,5
P4 PMH191374-4	51,1

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	CONTRAINTES DE RUPTURE (MPa)
P1 PMH191374-1	5,71
P2 PMH191374-2	15,7
P3 PMH191374-3	22,9
P4 PMH191374-4	13,0

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

Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau

Le principe de cette mesure consiste à intercaler l'échantillon que l'on désire étudier entre deux milieux où règnent des humidités relatives différentes (ce qui constitue la cellule de mesure étudiée). La diffusion de vapeur d'eau s'effectue du milieu le plus humide vers le milieu le moins humide à travers la surface traitée. L'analyse consiste à mesurer la quantité de vapeur d'eau passant par unité de temps et par unité de surface en mesurant l'augmentation de masse de la cellule.

REFERENCE ECHANTILLON	PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU D (G/M ² .H.MMHG)
P2 PMH191374-2	0,387
P3 PMH191374-3	0,433

Tableau 6 : Détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau

Détermination de l'activité argileuse

Après avoir broyé l'échantillon, le sable obtenu a été tamisé de manière à récupérer la fraction 0/2 sur laquelle un essai au bleu de méthylène a été réalisé selon les prescriptions de la norme NF EN 933-9. L'essai consiste à ajouter successivement des doses de bleu de méthylène à une suspension aqueuse de la prise d'essai. L'adsorption de la solution colorée par prise d'essai est contrôlée après chaque ajout de solution colorée en réalisant un essai à la tâche sur du papier filtre pour mettre en évidence la présence de colorant libre. La valeur de bleu de méthylène s'exprime en grammes de colorant adsorbé pour 100 g de matériau sec de fraction 0/2 mm.

REFERENCE ECHANTILLON	VALEUR DE BLEU (MB)
P2 PMH191374-2	0,27

Tableau 7 : Détermination de l'activité argileuse - Valeurs au bleu de méthylène

Détermination de stabilité dimensionnelle hydrique

La détermination du caractère expansif des matériaux est réalisée sur des échantillons équipés d'inserts métalliques. Les échantillons sont progressivement plongés dans un bain d'eau et des mesures régulières sont effectuées jusqu'à une durée de 96 heures à l'aide d'un rétractomètre et d'un comparateur micrométrique numérique. Les valeurs maximales de dilatation hydriques sont indiquées dans le tableau à suivre et correspondent à la valeur numérique atteinte sur l'asymptote en phase de stabilisation.

REFERENCE ECHANTILLON	DILATATION HYDRIQUE A SATURATION (MM/M)
P2 – « Surface » PMH191374-2A	0,386
P2 – « A cœur » PMH191374-2B	0,227
P3 – « Surface » PMH191374-3A	0,205
P3 – « A cœur » PMH191374-3B	0,168

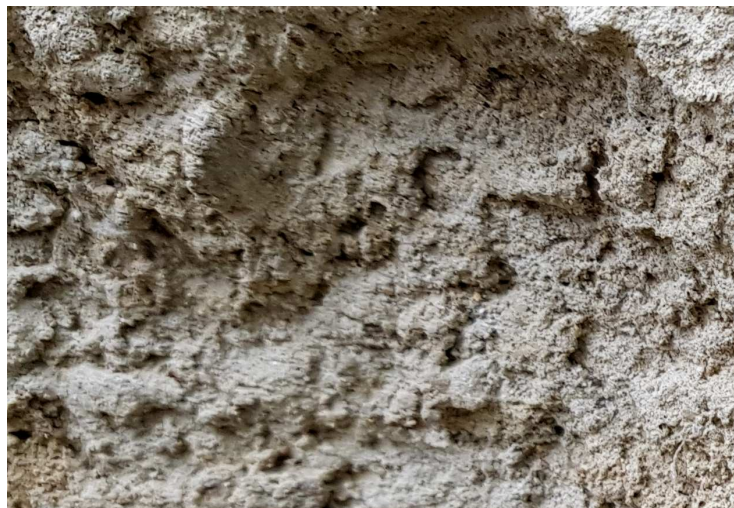
Tableau 8 : détermination du coefficient de dilatation hydrique

Détermination de stabilité dimensionnelle thermique

Pour la détermination du coefficient de dilatation thermique, les analyses ont été réalisées sur un intervalle thermique de 60°C (de 20°C à 80°C) avec une mesure micrométrique enregistrée à des intervalles de temps régulier. Les résultats des déterminations en K^{-1} sont présentés dans le tableau à suivre.

REFERENCE ECHANTILLON	COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE (K^{-1})
P2 – « Surface » PMH191374-2A	$4,8.10^{-5}$
P2 – « A cœur » PMH191374-2B	$2,5.10^{-5}$
P3 – « Surface » PMH191374-3A	$2,6.10^{-5}$
P3 – « A cœur » PMH191374-3B	$2,5.10^{-5}$

Tableau 9 : détermination du coefficient linéaire de dilatation thermique



QUALIFICATION DES PATHOLOGIES



IDENTIFICATIONS PATHOLOGIQUES

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 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 en fonction des diverses recherches sont les suivantes :

- ☒ Détermination des **teneurs en eau libre, eau totale et eau hygroscopique** par dessiccation infrarouge et reprise en eau en enceinte climatique,
- ☒ Dosage des **anions** (chlorures, sulfates et nitrates) **et des cations** (sodium et potassium) par chromatographie ionique et spectrométrie d'absorption atomique.

Typologie et illustrations des prélèvements

Dans le cadre des caractérisations des pathologies, ont été réalisés des prélèvements par perçage de diamètre 8 mm en deux profondeurs ainsi que par clivage. Le référencement des échantillons prélevés est indiqué dans le tableau à suivre :

REF. BPE	DESIGNATION
S1 PMH191007-9	HR1/S1 : prélèvement de poudre en 2 profondeurs sur pierre froide en soubassement du soutènement – h=110 mm
S2 PMH191007-10	HR2/S2 : prélèvement de poudre en 2 profondeurs sur pierre blanche en corniche du mur de soutènement - partie haute – h=450 mm
S3 PMH191007-11	HR3/S3 : prélèvement de poudre en 2 profondeurs sur molasse gréseuse en partie intermédiaire haute du mur dans frange d'altération – h=320 mm
S4 PMH191007-12	HR4/S4 : prélèvement de poudre en 2 profondeurs sur molasse gréseuse en partie basse du mur de soutènement au niveau de l'écoulement EP – h=140 mm
S5 PMH191007-13	S5 : prélèvement par perçage 0/10-30/40 sur pierre gréseuse desquamée en base du mur à h=20 cm
S6 PMH191007-14	S6 : prélèvement par perçage 0/10-30/40 sur pierre gréseuse desquamée en base sur parapet du parvis à h~580 cm

Tableau 10 : référencement des échantillons pour analyses de caractérisation pathologique en laboratoire

HR1/S1 : prélèvement sur pierre froide en soubassement du soutènement – h=110 mm



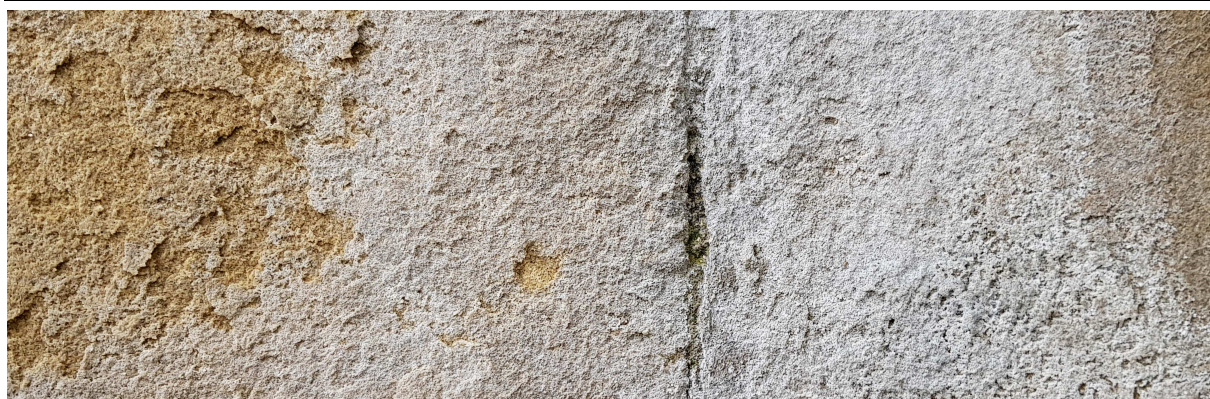
HR2/S2 : prélèvement sur pierre blanche en corniche du mur de soutènement – h=450 mm



HR3/S3 : prélèvement sur molasse gréseuse dans frange d'altération – h=320 mm



HR4/S4 : prélèvement sur molasse gréseuse au niveau de l'écoulement EP – h=140 mm



Résultats des investigations – Pathologie

Détermination des teneurs 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. 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 (%/M)	TENEUR EN EAU HYGROSCOPIQUE (%/M)	TENEUR EN EAU LIBRE (%/M)
S1/HR1 PMH191374-9	20-40	1,89	19,4	<=>
	180-200	0,77	6,76	<=>
S2/HR2 PMH191374-10	20-40	1,77	1,98	<=>
	180-200	2,75	3,30	<=>
S3/HR3 PMH191374-11	20-40	2,13	12,7	<=>
	180-200	3,79	6,83	<=>
S4/HR4 PMH191374-12	20-40	4,67	2,51	2,16
	180-200	12,2	5,08	7,12

Tableau 11 : détermination des teneurs en eau libre, hygroscopique et totale

Dosages des 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/HR1 PMH191374-9	0-10	0,11	0,13	0,24	0,16	0,13	0,53	<0,01
	30-40	0,08	0,08	0,13	0,09	0,08	0,56	<0,01
S2/HR2 PMH191374-10	0-10	0,08	0,08	0,06	0,04	0,07	0,45	<0,01
	30-40	0,05	0,04	0,03	0,02	0,06	0,50	<0,01
S3/HR3 PMH191374-11	0-10	0,11	1,08	0,26	0,08	0,12	0,80	<0,01
	30-40	0,10	0,42	0,28	0,08	0,10	0,59	<0,01
S4/HR4 PMH191374-12	0-10	0,05	0,41	0,04	0,04	0,05	0,60	<0,01
	30-40	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03	0,47	<0,01

Tableau 12 : Résultats des dosages des anions et cations

REFERENCE ECHANTILLONS	PROF. PREL (MM)	CHLORURES (%)	SULFATES (%)	NITRATES (%)	SODIUM (%)	POTASSIUM (%)	CALCIUM (%)	MAGNESIUM (%)
S1/HR1 PMH191374-9	0-10	0,10	0,08	0,32	0,04	0,10	0,47	<0,01
	30-40	0,09	0,04	0,22	0,04	0,08	0,53	<0,01
S2/HR2 PMH191374-10	0-10	0,06	1,77	0,04	0,01	0,03	1,14	<0,01
	30-40	0,07	0,54	0,05	0,02	0,02	0,66	<0,01

Tableau 13 : Résultats des dosages des anions et cations (suite)

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 14 : 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 15 : Teneurs indicatives en cations associés aux valeurs limites de recommandation en anions



Laboratoires

Pour le laboratoire BPE :

Dimbsthal, le 30 janvier 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

