

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 – Rapport - Cabinet STUDIOLO**

Valence (26)

Cathédrale Saint-Apollinaire

Diagnostic sanitaire du mur de soutènement du parvis



Réf Rapport	Cathédrale Saint-Apollinaire - Diagnostic sanitaire du mur de soutènement		
Date	17 septembre 2020		
Destinataire	Maîtrise d'œuvre : Michel TRUBERT - Architecte en Chef des Monuments Historiques - 76, rue de France - 77300 Fontainebleau - 01 64 22 32 04		
Réf du marché	Date de notification	Novembre 2019	
Réf de l'affaire	Diagnostic sanitaire et étude des matériaux du mur de soutènement du parvis		
Pages hors annexes	55 pages	Nombre d'annexe(s)	3
Rédacteur	Benjamin Reidiboym Pauline Breguin	Relecteur	Barbara Brunet-Imbault Clément Guinamard

SOMMAIRE

<u>INTRODUCTION</u>	<u>3</u>
<u>1. DESCRIPTION DU MUR DE SOUTÈNEMENT.....</u>	<u>4</u>
1.1. CONTEXTE D'IMPLANTATION	4
1.2. DESCRIPTION DE LA MAÇONNERIE ET CARACTERISATION DES MATERIAUX EN ŒUVRE	8
1.2.1. OBSERVATION SUR SITE ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX	8
1.2.2. OBSERVATION IN-SITU DES PIERRES.....	10
1.2.3. CARACTERISATION DES PIERRES EN LABORATOIRE	14
<u>2. ÉTAT SANITAIRE DE LA MAÇONNERIE.....</u>	<u>16</u>
2.1. DESCRIPTION DES PATHOLOGIES	16
2.1.1. PATHOLOGIES AFFECTANT LA MOLASSE DE CHATEAUNEUF-SUR-ISERE	16
2.1.2. ÉTAT SANITAIRE DE L'ELEVATION EN TUF.....	20
2.1.3. PATHOLOGIES AFFECTANT LE CALCAIRE DE SAINT-PAUL-TROIS-CHATEAUX	22
2.1.4. PATHOLOGIES AFFECTANT LE CALCAIRE DE CRUSSOL.....	30
2.1.5. COLONISATION DU MUR PAR LA VEGETATION	32
2.1.6. GRAFFITIS.....	34
2.2. CARTOGRAPHIE DES ALTERATIONS.....	35
2.3. ANALYSES DES FACTEURS D'ALTERATION POTENTIELS	37
2.3.1. REFLEXION SUR LES PHENOMENES D'ÉCOULEMENT	37
2.3.2. MESURES DE TENEUR EN EAU DANS LES PIERRES	39
2.3.3. DOSAGE DES SELS SOLUBLES	41
2.3.4. INFLUENCE DES PROPRIETES DES PIERRES SUR LE DEVELOPPEMENT DES PATHOLOGIES.....	43
2.3.5. MODIFICATION DES PROPRIETES DES PIERRES DANS LES ZONES SAINES ET ALTEREES..	44
<u>3. CONCLUSIONS.....</u>	<u>52</u>
3.1. ÉTAT SANITAIRE DU PAREMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT	52
3.2. ORIENTATIONS D'INTERVENTION SUR LES PIERRES DE PAREMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT	53
<u>ANNEXES.....</u>	<u>55</u>
ANNEXE 1 : CARTOGRAPHIE DES PIERRES EN ŒUVRE DANS LE PAREMENT	55
ANNEXE 2 : RAPPORT DU LABORATOIRE BPE PMH 191374V1.....	55
ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIES SANITAIRE	55

Introduction

Dans le cadre d'une étude de diagnostic qui a débuté par une première étude réalisée au début de l'année 2019 sur l'élévation Sud de la cathédrale Saint-Apollinaire, le cabinet Studiolo a été sollicité par l'agence de Michel Trubert, architecte en chef des monuments historiques. L'étude de diagnostic menée sur la cathédrale St Apollinaire comprend le diagnostic sanitaire du parement du mur de soutènement du parvis de la cathédrale.

Le parvis de la cathédrale, situé au Sud de l'édifice, se termine en effet dans sa partie Ouest par une dépression de terrain brusque et élevée, formant ainsi un espace en terrasse contrebuté par un mur en pierre. Ce dernier est d'aspect composite et comprend vraisemblablement des parties XIX^{ème} siècle et d'autres plus anciennes, modernes et potentiellement médiévales.

L'étude du mur de soutènement s'inscrit dans un double cadre d'investigation. Il s'agit premièrement de caractériser les matériaux employés pour sa partie de parement et deuxièmement d'identifier les pathologies des pierres de parement pour permettre la mise en place d'un programme de restauration adapté.

Cette étude de diagnostic du mur de soutènement se concentre sur l'étude du parement en pierre de ce mur. Cette étude n'a pas pour objectifs de rendre un avis sur la structure de ce mur ni sur sa stabilité ou ses faiblesses mécaniques.

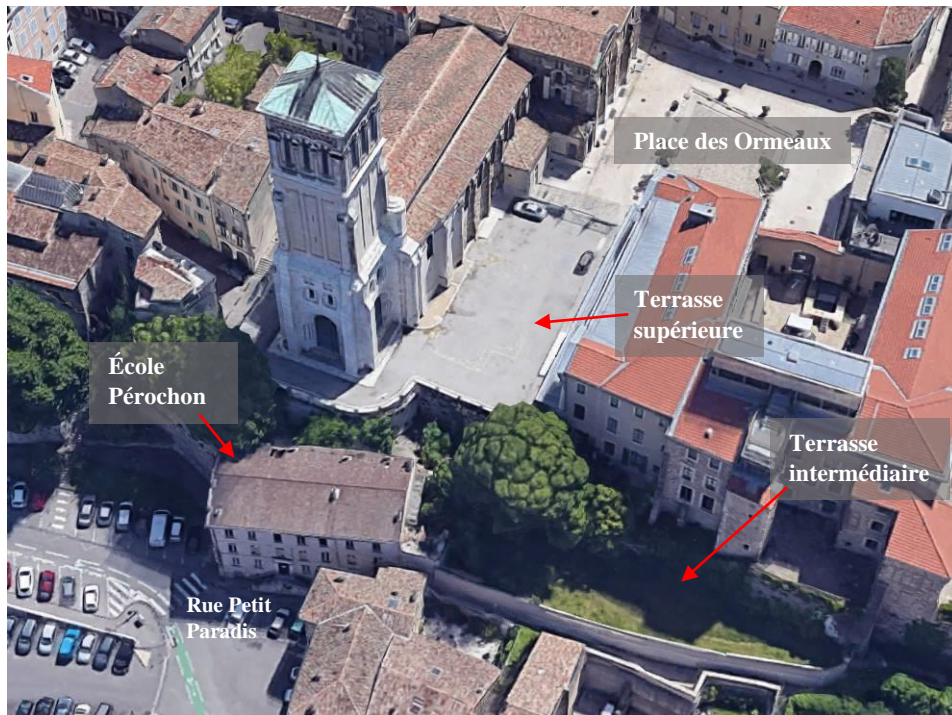
Afin d'affiner la connaissance des pierres de parement en œuvre et d'approfondir la compréhension des mécanismes d'altération de celles-ci, une campagne de prélèvements a été effectuée avec la collaboration du laboratoire BPE.

Le présent rapport fournit toutes les constatations et investigations faites lors de cette étude de diagnostic du parement du mur de soutènement ainsi qu'une interprétation des résultats analytiques fournis par le laboratoire BPE. Il est accompagné en annexes de cartographies localisant les pathologies et les différents matériaux en œuvre, ainsi que du rapport d'analyse du laboratoire BPE.

1. Description du mur de soutènement

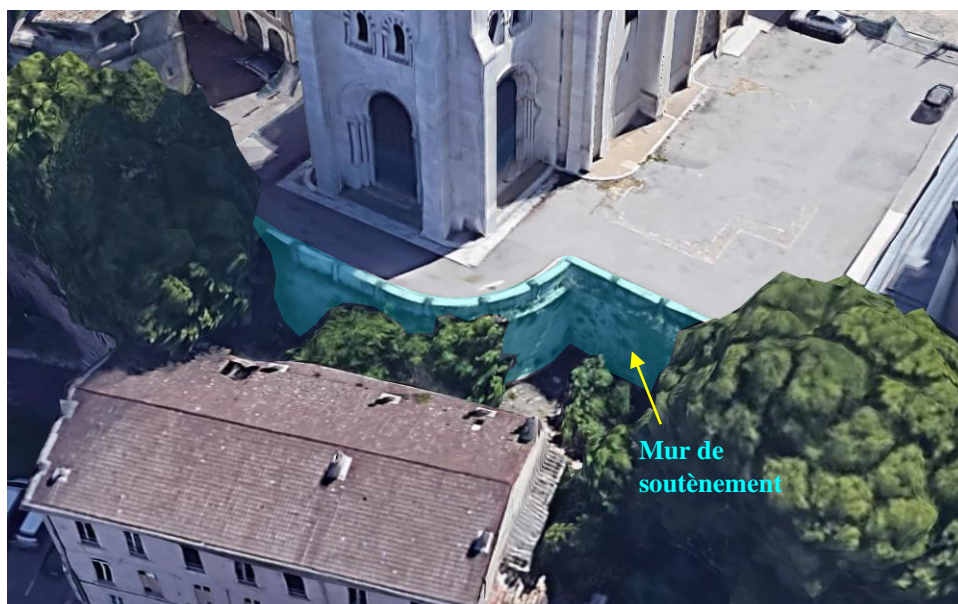
1.1. Contexte d'implantation

Le mur de soutènement assure, à l'Ouest, le maintien du niveau de terrasse sur lequel est bâtie la cathédrale. Il repose sur une terrasse intermédiaire formant un petit jardin et ayant servi pendant un temps de cour à l'école Pérochon, construite sur la terrasse intermédiaire surplombant la rue Petit Paradis.



Détail des différents niveaux de terrasse (vue Google Maps)

La terrasse supérieure présente une saillie en arrondi. Le mur de soutènement épouse cet arrondi.

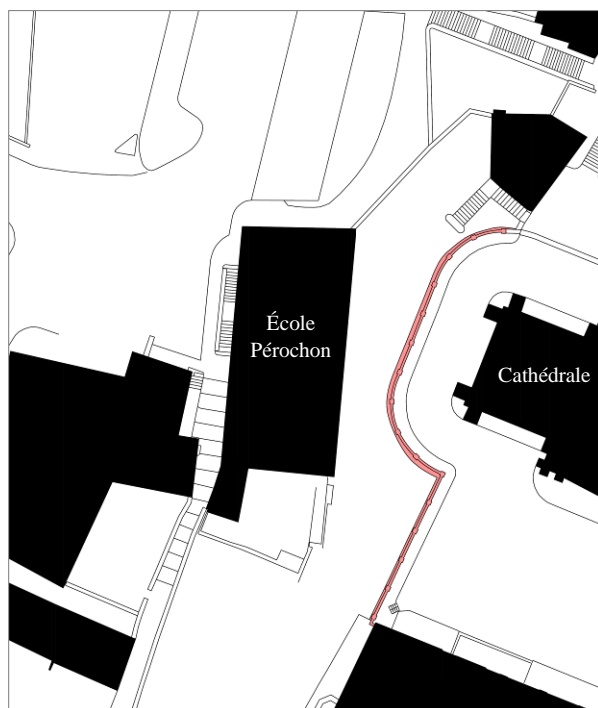


Implantation du mur de soutènement

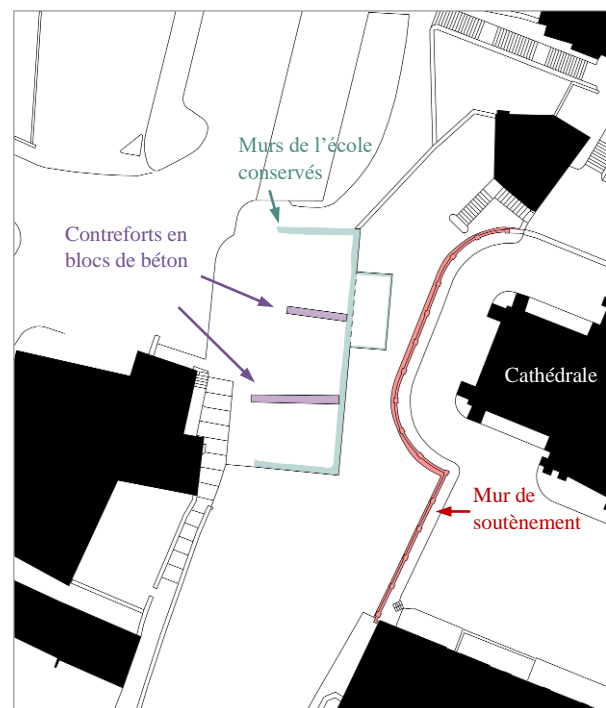
Le bâtiment de l'école Pérochon a récemment été démoli. Une partie des murs a été conservée et deux contreforts en béton ont été mis en œuvre.



Vues du site après destruction de l'école Pérochon

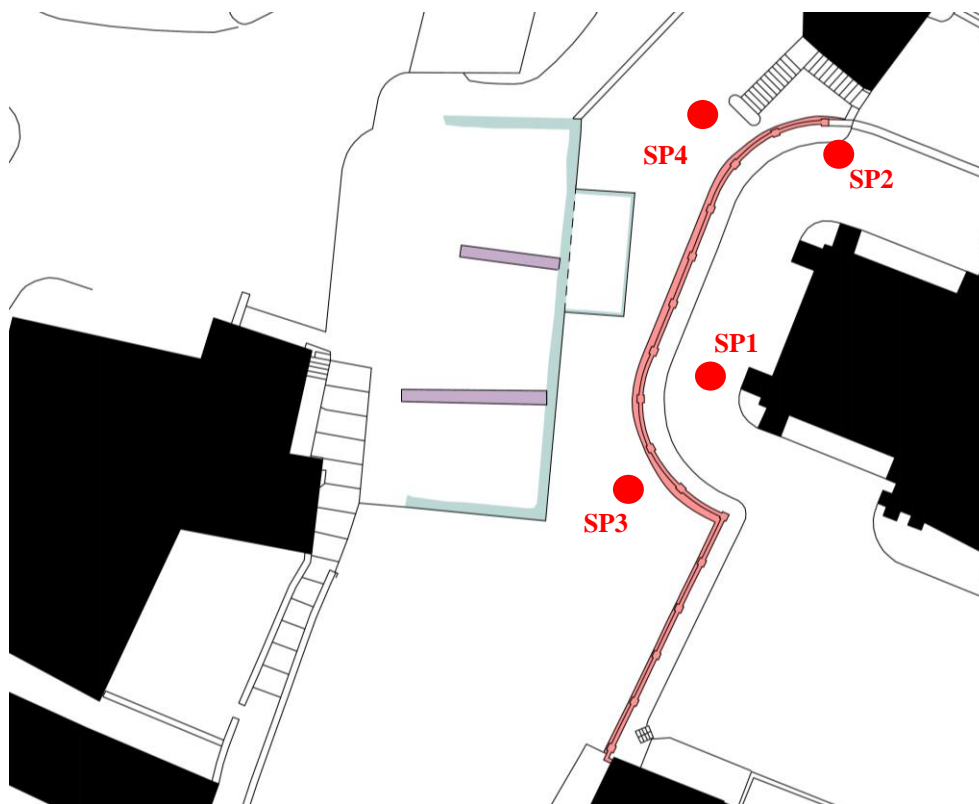


Plan de masse du site avant démolition

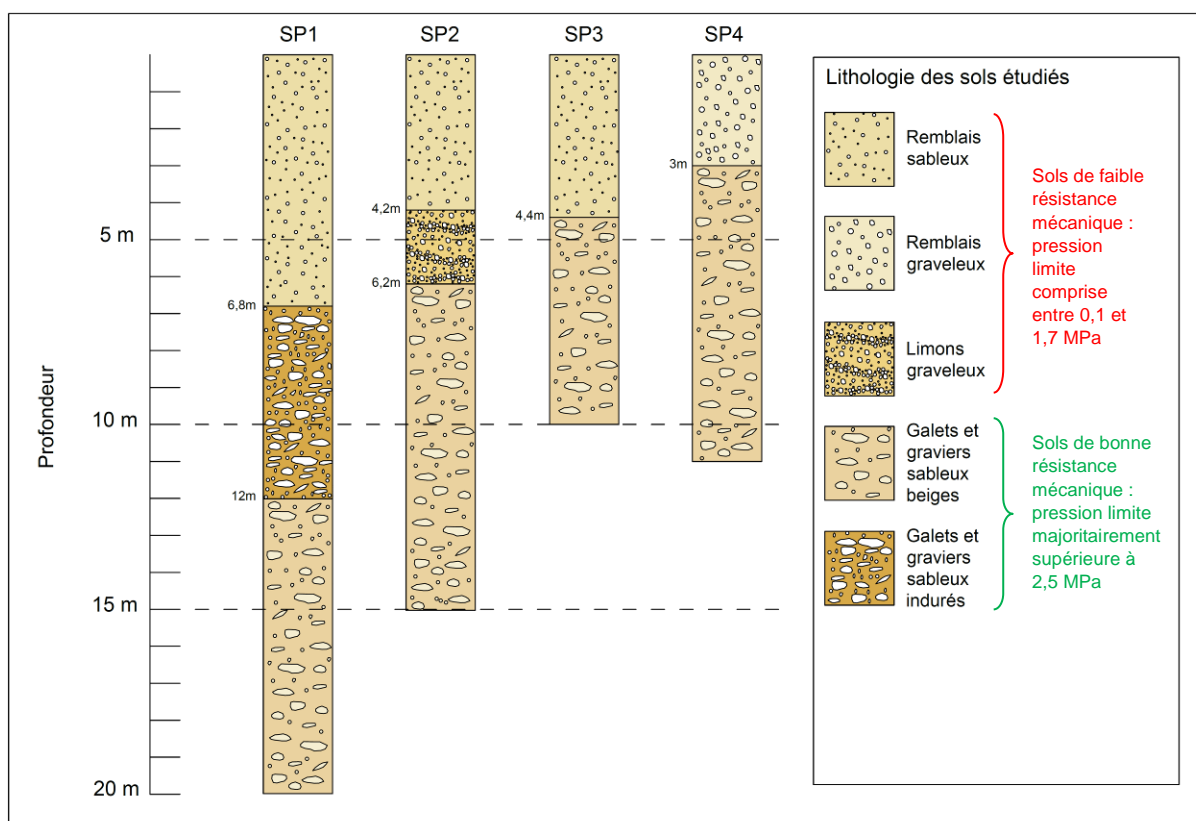


Plan de masse du site après démolition

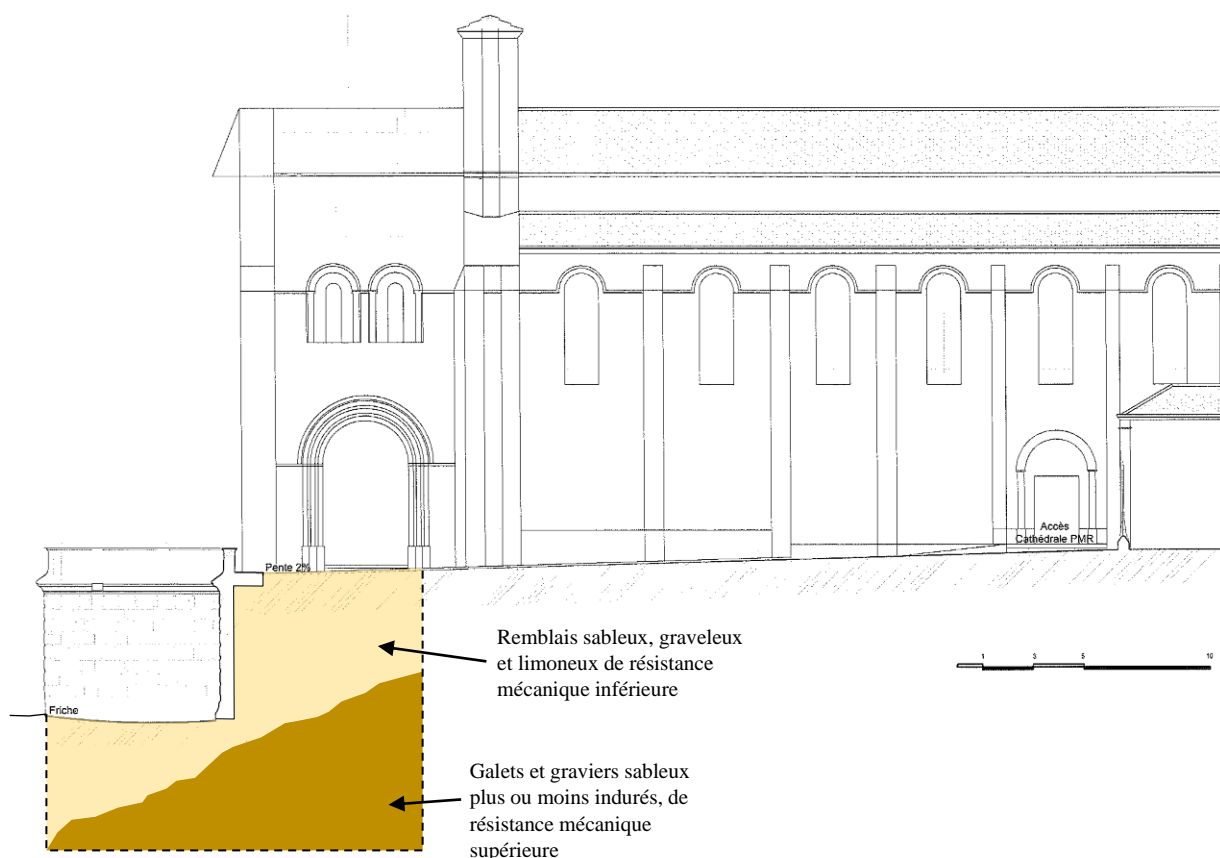
Des sondages pressiométriques et des reconnaissances de sol ponctuelles par carottage ont été effectués après les travaux de démolition par l'entreprise SIC INFRA 26. Quatre de ces sondages nous renseignent sur la nature des remblais au droit du mur de soutènement.



Localisation des sondages réalisés au droit du mur de soutènement par la société SIC INFRA 26



Synthèse des résultats des sondages SP1 à SP4 d'après le rapport SIC INFRA 26 de novembre 2019



Proposition de représentation schématique des sols au droit du mur de soutènement et du parvis
 Proposition établie d'après les informations du rapport SIC INFRA 26 de novembre 2019

Un sondage à la minipelle réalisé par la société SIC INFRA 26 a montré que la partie en molasse de l'extrémité Sud du mur de soutènement ne possédait aucune semelle de fondation profonde et que le mur est donc à cet endroit posé sur le remblai sableux.



Localisation et détail du sondage de reconnaissance à la minipelle

Aucune information n'existe, à ce jour, sur les fondations de la partie arrondie du mur, plus récente puisque bâtie en même temps que la tour-clocher de 1862. Le rapport SIC INFRA 26 indique que le sondage réalisé sur cette partie du mur a été interrompu en raison de la présence de « béton contre le soutènement ».

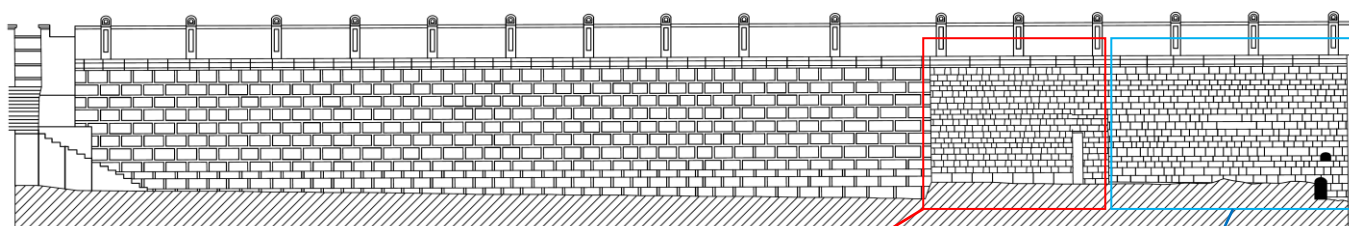
1.2. Description de la maçonnerie et caractérisation des matériaux en œuvre

1.2.1. Observation sur site et identification des matériaux

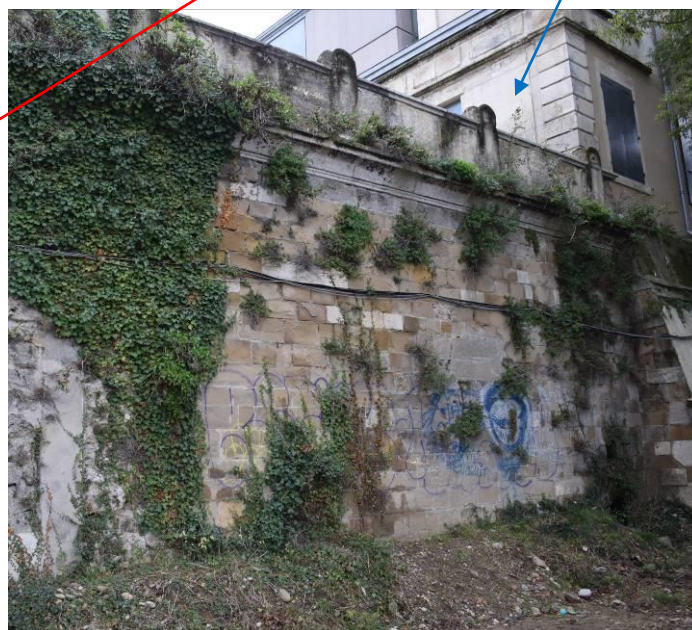
Le parement du mur de soutènement regroupe, juxtaposées, différentes maçonneries plus ou moins anciennes, réalisées avec des matériaux et des procédés de mise en œuvre variables.

La portion Sud du mur peut être divisée en deux parties bien distinctes :

- une première portion bâtie en moyen appareil régulier constituée de blocs de molasse de Châteauneuf-sur-Isère qui constitue vraisemblablement la partie la plus ancienne de l'ensemble,
- une seconde portion constituée de blocs de tuf calcaire, plus grossiers et moins soigneusement équarris.



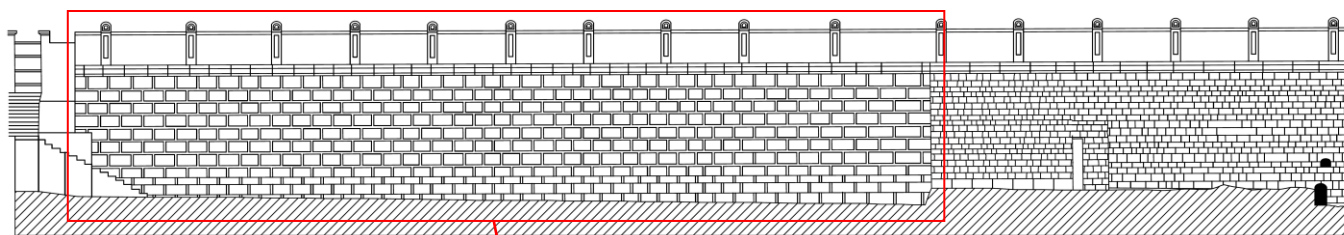
Parement en blocs de tuf calcaire



Parement en molasse de Châteauneuf-sur-Isère

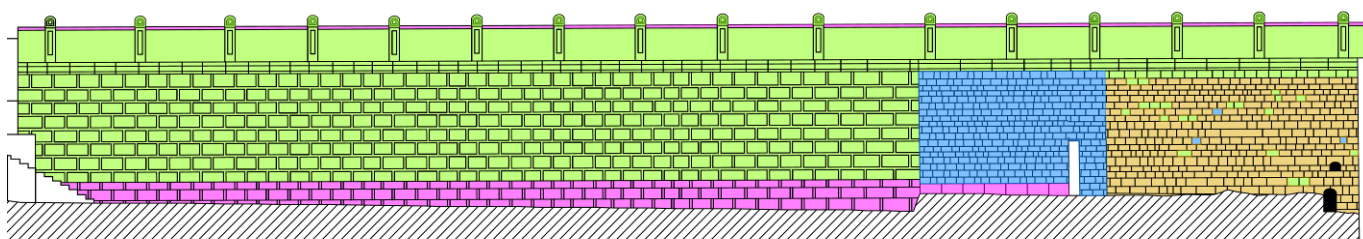
La partie arrondie du mur de soutènement, bâtie au milieu du XIX^{ème} siècle, apparaît comme la plus longue lorsqu'on la représente sur une élévation développée. Elle est constituée de deux types de pierre :





- la corniche supérieure, le parapet et la partie centrale du mur, montée en grand appareil et constituée de blocs taillés en bossage à chanfrein, met en œuvre un calcaire biodétritique beige clair correspondant vraisemblablement à la pierre de Saint-Paul-Trois-Châteaux ; ce calcaire a également été utilisé pour les multiples greffes réalisées au XIX^{ème} siècle sur les élévations de la cathédrale,
- les trois premières assises formant le soubassement ainsi que la main courante du parapet, sont réalisés dans un calcaire ferme stylolithique, du type de la pierre de Crussol.



Détail du parement XIX^{ème} siècle en calcaire type Saint-Paul-Trois-Châteaux et en calcaire type Crussol

La cartographie ci-dessous reporte la répartition des différents types de pierre constituant le parement du mur de soutènement. On voit bien ainsi que les deux portions en tuf et en molasse de Châteauneuf-sur-Isère sont intégrées au sein d'un ensemble majoritairement XIX^{ème} siècle, par la mise en œuvre de greffes et d'un parapet continu. Le parement du mur est par conséquent en grande majorité constitué de calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux et de pierre dure de Crussol.



 Tuf calcaire	 Molasse de Châteauneuf-sur-Isère	 Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux (XIX ^{ème} siècle)	 Calcaire dur stylolithique de Crussol (XIX ^{ème} siècle)
--	--	---	---

Cartographie des différents types de pierre constituant le parement du mur de soutènement (Annexe 1)

1.2.2. Observation in-situ des pierres

- Tuf calcaire

Il s'agit d'une pierre de couleur beige présentant une surface très ouverte et particulièrement hétérogène, comprenant un grand nombre de vacuoles, de vermiculures et de cavités de formes et de dimensions variables. Ce faciès peut être désigné comme un tuf calcaire ou bien comme une cargneule. Le processus de cargneulisation consiste en une évolution naturelle de certains calcaires dolomitiques qui voient leur part de dolomite dissoute et le remplacement progressif du magnésium par du calcium. Il s'agit donc d'une pierre majoritairement calcique mais comprenant encore partiellement du magnésium avec une porosité très importante résultant du processus de dissolution progressif.

On trouve beaucoup d'affleurement de cargneule de ce type dans les alpes mais également quelques gisements ponctuels dans la Drôme, notamment près de Nyons. Des affleurements de tuf calcaire d'aspect semblable existent également en plusieurs points du département, rendant difficile l'identification exacte de ces blocs qui semblent correspondre à une récupération opportuniste de blocs affleurant plutôt qu'à une véritable extraction en carrière.



Détails de blocs de tuf calcaire ou de cargneule

- Molasse de Châteauneuf-sur-Isère

Il s'agit de la molasse employée en très grand volume sur de nombreux monuments de Valence entre la période médiévale et la fin du XVIII^e siècle. Elle est utilisée notamment pour la construction de la totalité de la cathédrale avant que les restaurations des XIX^e et XX^e siècles n'introduisent des pierres de nature différente pour remplacer ce matériau, suite à l'interruption de son extraction.

C'est une molasse gréseuse du miocène, d'aspect très variable, formée par l'assemblage compact au sein d'un ciment calcique de grains de silice dont la taille peut varier entre 0,1 et 2 mm selon les bancs.

Le faciès à grains très fins et à teinte dominante brun-ocre observable sur l'extrémité Sud du mur de soutènement est comparable à celui de la cathédrale. On trouve cependant ponctuellement des blocs présentant un faciès plus grossier et une teinte ocre jaune plus prononcée. Ils correspondent à des greffes récentes, peut-être réalisées à l'aide de blocs récupérés sur d'autres monuments.



Détail du faciès de molasse majoritaire sur l'extrémité Sud du mur de soutènement

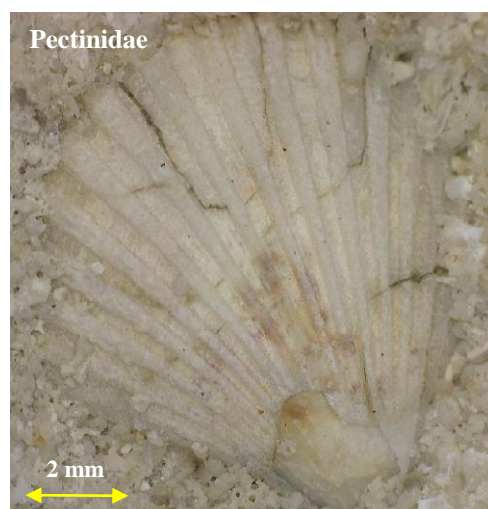
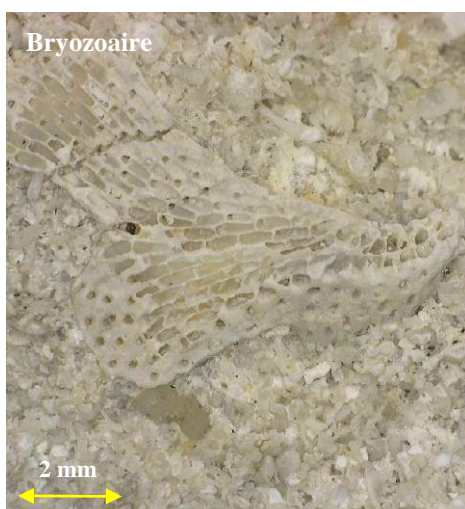


Exemple de greffes réalisées avec un faciès de molasse de teinte ocre jaune plus prononcée

- Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux

L'attribution de la pierre constituant la majorité des maçonneries du XIX^e siècle à la carrière de Saint-Paul-Trois-Châteaux peut être assurée à la fois par le faciès caractéristique des fossiles observés et par une désignation relevée dans l'inventaire du BRGM pour les pierres de la cathédrale Saint-Apollinaire. Cette pierre a en effet été employée massivement au XIX^e siècle pour réaliser les nombreuses greffes observables sur les élévations de la cathédrale et a logiquement été utilisée pour les parties reprises à neuf à la même époque sur le mur de soutènement.

Il s'agit d'un calcaire biodétritique à grain fin d'âge burdigalien incluant de nombreux fossiles de bryozoaires, d'éponges, d'échinodermes et de pectinidae ainsi que des débris majoritairement siliceux, au sein d'une matrice calcique.



Détail de surface du calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux et observation de fossiles à la Dinolite

- Calcaire dur stylolithique de Crussol

Ce calcaire ferme ardéchois datant du jurassique présente une très faible porosité et une grande résistance mécanique ce qui le rend idéal pour la mise en œuvre en soubassement ou la réalisation de dallages. Il a également été employé en grande quantité sur la cathédrale, notamment au sein de la tour-clocher, dont il constitue l'un des matériaux principaux ainsi que pour les soubassements.

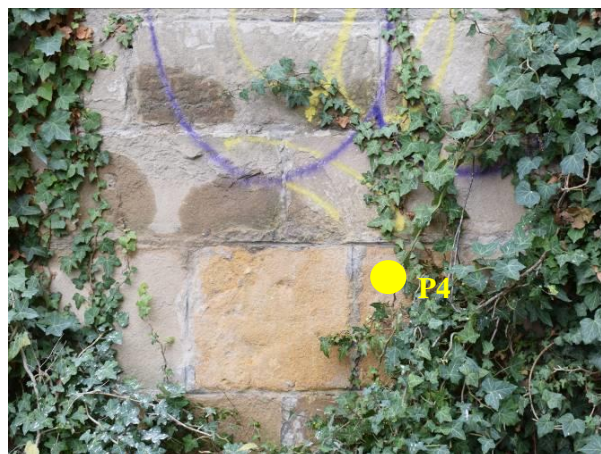
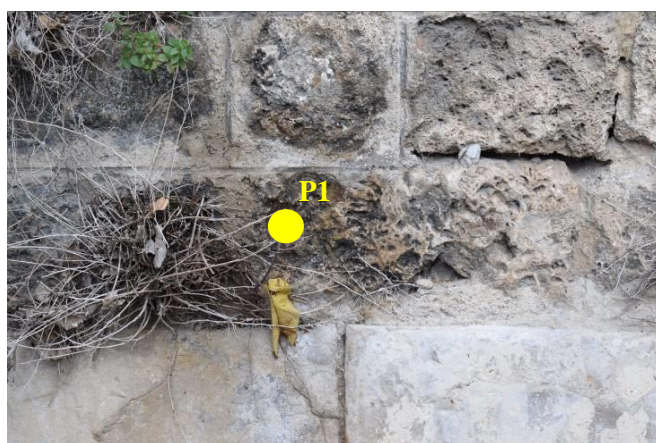
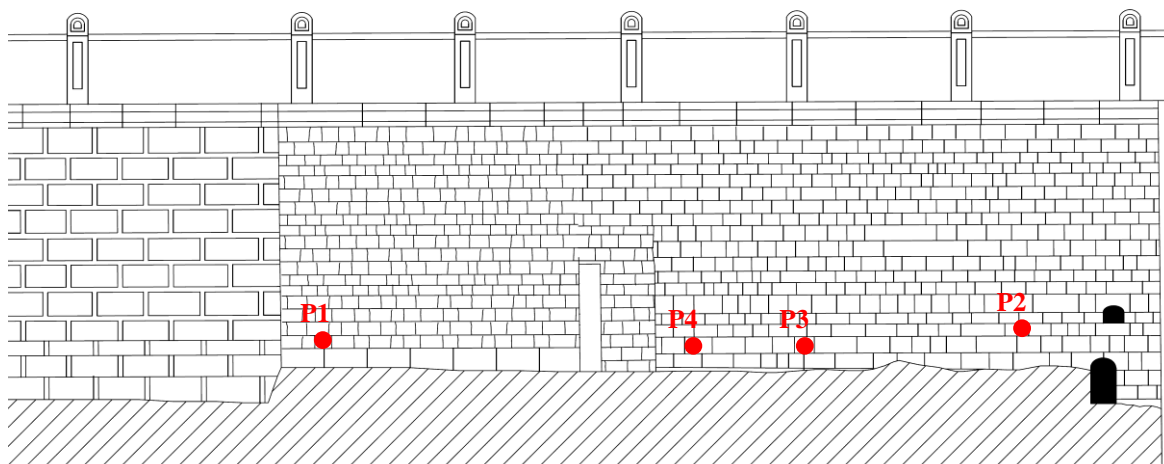
De teinte ocre brune à cœur, la pierre forme un épiderme blanc par les phénomènes de dissolution-re cristallisation au niveau superficiel.



Détail du calcaire dur de Crussol employé en soubassement

1.2.3. Caractérisation des pierres en laboratoire

Plusieurs carottes de pierre ont été prélevées sur site par le laboratoire BPE afin de réaliser des mesures pétro-physiques. Nous avons privilégié des échantillons de molasses issues de l'extrémité Sud du mur ainsi qu'un échantillon de tuf calcaire. Nous ne disposons en effet d'aucune donnée sur ce tuf et la grande variabilité des faciès de la molasse de Châteauneuf-sur-Isère nécessite, pour obtenir des résultats représentatifs des propriétés de cette pierre, d'analyser plusieurs échantillons. La localisation des prélèvements est la suivante :



Localisation des prélèvements de des carottes de pierr

Les carottes sont documentées dans le rapport BPE fourni en annexe 2 de ce rapport.

Le tableau ci-dessous fournit la synthèse des propriétés pétro-physiques des échantillons. Nous avons adjoint à ces résultats d'analyse des données connues pour les calcaires de Saint-Paul-Trois-Châteaux et de Crussol. Une partie de ces données provient de l'étude réalisée par nos soins en 2019 sur l'élévation Sud de la cathédrale. Les données complémentaires ont été recueillies sur la base de données MONUMAT du BRGM.

Echantillon	Porosité ouverte (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Vitesse du son (m/s)	Coeff de capillarité à l'eau (g.m ⁻² .s ^{-0.5})	Contrainte de rupture en compression (MPa)
P1 : Tuf calcaire ou cargneule	30,4	1790	3866	479	5,71
P2 : Molasse de Châteauneuf-sur-Isère saine	18,7	2141	1631	73,8	15,7
P3 : Molasse de Châteauneuf-sur-Isère desquamée	20,2	2087	1988	63,5	22,9
P4 : Molasse ocre jaune (greffe)	14	2258	2416	51,1	13

Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux	36,5	1691	2752	326	Entre 9,80 et 19,6*
Calcaire stylolithique de Crussol	-	2628*	-	-	Entre 82 et 130*

* Données BRGM

Données extraites du rapport BPE PMH191374V1 du 30/01/2020 (Annexe 2)

Les différentes pierres constituant le parement du mur de soutènement présentent donc une grande variabilité de leurs paramètres pétro-physiques. Le calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux et le tuf calcaire présentent une porosité et une capillarité comparables, relativement élevées par rapport aux molasses ce qui favorise à priori la circulation de l'eau au sein de ces matériaux. La résistance mécanique du tuf est très inférieure à celle de la molasse et du calcaire de St Paul-Trois-Châteaux.

Les trois échantillons de molasse analysés présentent des valeurs homogènes de leurs propriétés de porosité, masse volumique, capillarité, vitesse du son et résistance mécanique à la compression mais le bloc greffé de molasse ocre est légèrement moins poreux, moins capillaire et plus faible en termes de résistance mécanique que les molasses d'origine.

Nous ne disposons pas de la totalité des paramètres en ce qui concerne le calcaire de Crussol mais les données BRGM permettent d'affirmer qu'il s'agit du matériau le plus dense et le plus résistant mécaniquement de l'ensemble du panel étudié.

Par ailleurs, l'aspect de la carotte de pierre P4 documentée dans le rapport BPE permet de confirmer que le bloc au sein duquel elle est extraite est bien une greffe relativement tardive. Il s'agit en effet d'une pierre comportant à l'arrière un mortier de scellement à base de ciment gris ainsi que des fragments de brique destinés vraisemblablement au calage de la greffe de pierre.

2. État sanitaire de la maçonnerie

2.1. Description des pathologies

2.1.1. Pathologies affectant la molasse de Châteauneuf-sur-Isère

La molasse de Châteauneuf-sur-Isère présente un faciès de délitement très caractéristique qui voit la pierre se desquamer progressivement sous forme d'écailles.

La perte progressive de ces écailles est accentuée par une tendance de la pierre à subir des décohésions granulaires, rendant le matériau pulvérulent. La dimension des écailles est variable en termes d'étendue, de quelques centimètres de longueur à la quasi-surface complète du bloc dans certains cas.



Détail d'un bloc de molasse comportant un délitement sous forme de micro-feuillets

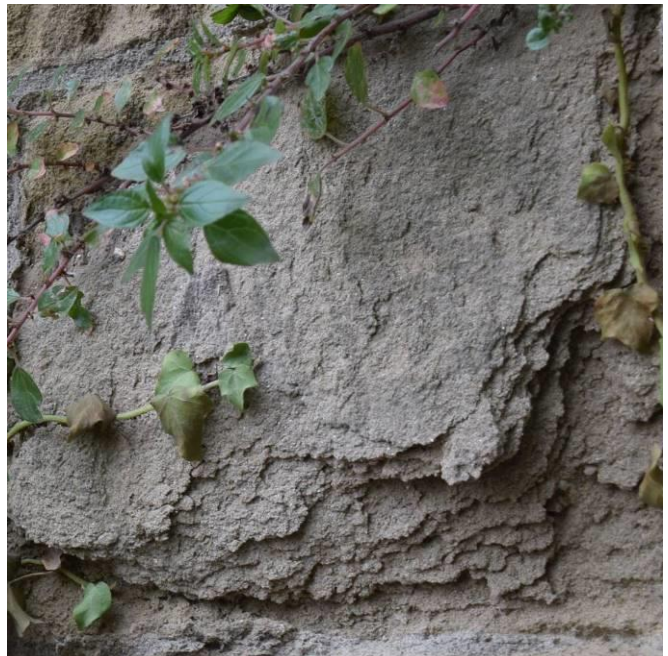
L'observation de la carotte P3 montre clairement le phénomène actif de desquamation sur un bloc en cours d'altération. Des microfissurations se forment en subsurface créant des pertes d'écailles pouvant à terme entraîner des lacunes d'épaisseurs importantes.



Détail du délitement à la surface de la carotte P3

En effet, selon les zones, l'intensité du phénomène peut être plus ou moins marquée mais son activité est toujours très sensible. Une fois que ce processus de desquamation est enclenché, il se poursuit dans le temps, entraînant des pertes de matière de plus en plus profondes.

L'observation des pierres en cours de desquamation montre une déformation des écailles superficielles en cours de desquamation due à leur soulèvement, à l'ouverture des écailles superposées tel de minces feuillets.



Exemple de blocs subissant des desquamations d'intensités différentes

La cinétique de l'altération est variable pour les différents blocs ce qui a engendré de très fortes lacunes de plusieurs centimètres sur certains blocs tandis que d'autres ont seulement desquamé de façon superficielle et que certains conservent encore leur épiderme.

Le creusement des joints qui accompagne cette desquamation progressive des blocs de molasse est également très hétérogène. Nous constatons aujourd'hui de nombreux joints ouverts et ce malgré plusieurs campagnes de rejointoiement.



Parement en molasse présentant des pertes de matière hétérogènes

Afin de combler les pertes de matière les plus profondes, de nombreuses greffes ont été mises en œuvre sur la maçonnerie de molasse. La majorité de ces greffes est réalisée avec du calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux mais l'on remarque également des greffes ponctuelles en tuf calcaire (ou cargneule) ainsi que des greffes réalisées avec la variété de molasse ocre jaune correspondant à la carotte P4.



Grefte en tuf calcaire



Grefte en calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux



Grefte en molasse ocre

Exemples de greffes

Des ragréages à l'aide de mortier hydraulique très rigide (à base de ciment) ont également été mis en œuvre en certaines zones.



Exemple de ragréage

2.1.2. État sanitaire de l'élévation en tuf

Les blocs de tuf ne présentent pas d'altération notable et sont en bon état de conservation. Leur microstructure favorise les accumulations de dépôts atmosphériques dans leurs anfractuosités. Nous constatons aujourd'hui un rejointoiement montrant des joints larges qui a été mis en œuvre sur une grande partie de l'élévation.



Détail d'une zone rejointoyée à l'aide d'un mortier de chaux et de sable

Le mortier de jointoiement originel, plus gris, comportait une finition lissée et un retraçage au fer.



Détail d'une portion de parement conservant les joints anciens



Détail des joints anciens partiellement repris par le mortier plus récent

Le mortier de hourdage est friable et vraisemblablement très pauvre en liant. Il comporte surtout du sable et de petits galets de rivière.



Détail du mortier de hourdage

2.1.3. Pathologies affectant le calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux

Les parties bâties en calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux comportent de nombreuses pathologies. Nous constatons tout d'abord le mauvais état généralisé des parties hautes, notamment de la corniche supérieure et du parapet.

La corniche présente en effet de manière quasi systématique des faciès de boursouflures et de desquamations actives ainsi que des croûtes noires.



Détail des boursouflures affectant la corniche en calcaire

Contrairement à la molasse, le calcaire de St-Paul-Trois-Châteaux desquame sur une épaisseur de quelques millimètres, desquamations et boursouflures sont souvent des faciès associés affectant une même zone, en particulier la corniche et l'assise inférieure sous le parapet. Corniche et assise inférieure sont à l'aplomb de potentielles infiltrations d'eau depuis le parvis.



Détail des croûtes noires et des desquamations affectant les pierres de corniche

Le parapet présente des desquamations ainsi que des faciès d'érosion, des éclatements et de profondes lacunes parfois reprises avec des ragréages au mortier de chaux et de sable.



Détail d'une partie altérée du parapet présentant des desquamations

Les lacunes dépassent parfois les cinq centimètres de profondeur et leur fond pulvérulent témoigne de l'activité du processus d'altération.



Détail d'une portion de parapet comportant de profondes lacunes

Beaucoup des ragréages mis en œuvre n'ont pas tenus formant de nouvelles lacunes.



Section de parapet présentant des décollements de ragréages

Le reste de l'élévation présente des états de surface différents selon les zones. Si les parties Ouest et Sud du mur sont relativement épargnées par les dépôts atmosphériques du fait de leur exposition au vent et pluies dominantes, le retour Nord-Ouest, plus abrité, présente d'importantes croûtes noires gypseuses.

Ces dernières forment par endroit d'épais bourgeonnements qui dénaturent profondément la surface du calcaire.



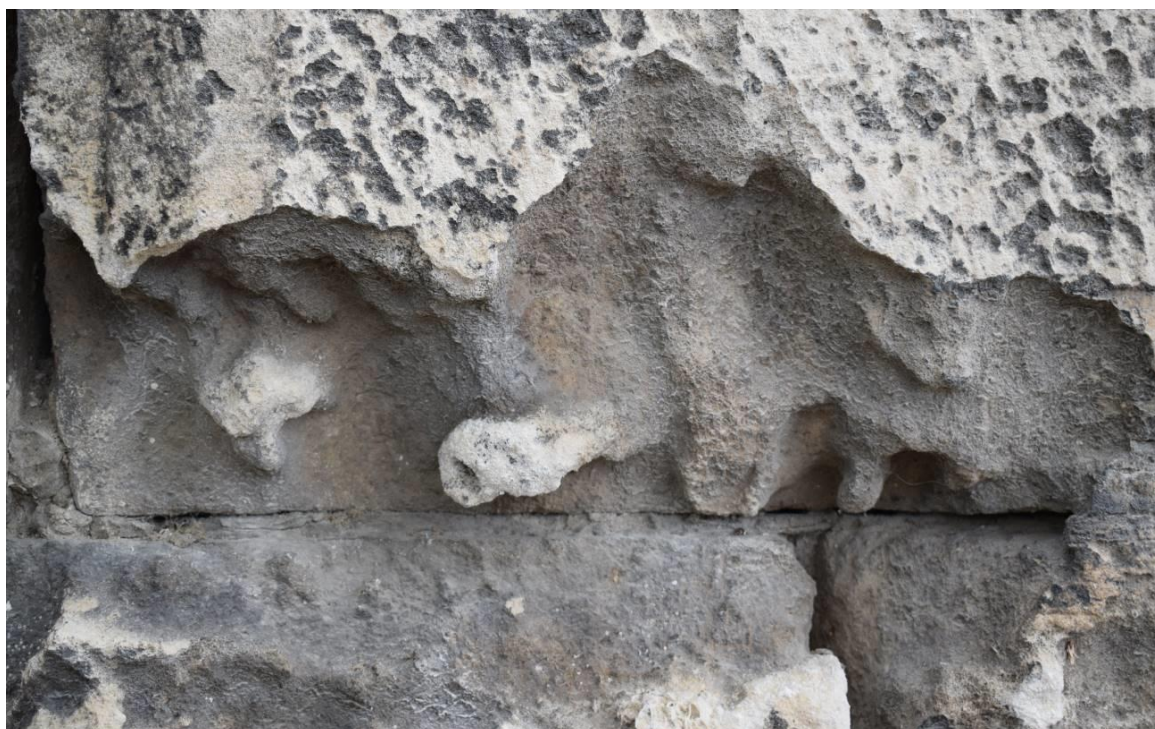
Vue de la portion de parement recouverte de croûte noire et détail de l'aspect bourgeonnant de cette dernière

Mais les altérations les plus spectaculaires sont les alvéolisations qui creusent parfois le parement à bossage sur plusieurs centimètres de profondeur.



Exemple d'alvéolisation particulièrement importante sur le parement à bossages

Certaines sont stabilisées, comme en témoigne la formation d'une pellicule de croûte noire au fond des cavités.



Détail de la pellicule de croûte noire s'étant formé au fond de l'alvéolisation

Mais plusieurs zones d'alvéolisation comportent des signes d'activité : pulvérulence des fonds, teinte beige jaune caractéristique.



Exemple d'alvéolisation très fortement active



Alvéolisation en cours avec desquamation de l'épiderme au droit des creusements

Enfin, le parement à bossage comporte également des zones de desquamations et de micro-desquamations, le plus souvent actives car en cours de soulèvement.



Détails d'un bloc en cours de desquamation

2.1.4. Pathologies affectant le calcaire de Crussol

Le soubassement en calcaire de Crussol souffre principalement d'une ouverture généralisée des joints et d'éclatements en profondeur. Les esquilles de pierre détachées dans les zones d'éclatement atteignent parfois plusieurs centimètres d'épaisseur et les creusements dénaturent fortement la volumétrie des blocs.

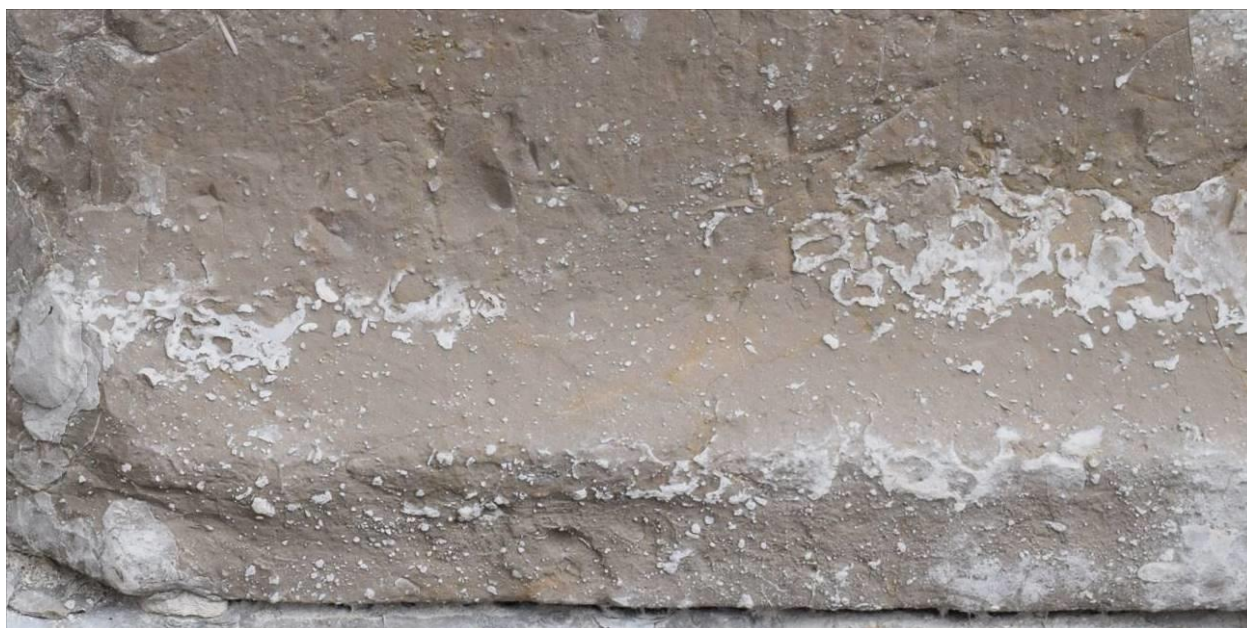


Détail de blocs de calcaire de Crussol éclatés

On remarque également un phénomène de desquamation de l'épiderme sur une épaisseur régulière d'environ 1 à 3mm, ainsi que l'ouverture très fréquente des stylolithes de la pierre.



Détail d'un début de desquamation



Exemple de bloc où l'épiderme n'est plus conservé que très ponctuellement



Détail d'un stylolithe ouvert

2.1.5. Colonisation du mur par la végétation

Le mur est colonisé par de nombreuses espèces végétales qui risquent, à terme, de menacer sa cohésion et de provoquer d'importants désordres sur la maçonnerie.

Un important développement de lierre est notamment constaté à la jonction des parties en molasse et en tuf.



Colonisation du mur par le lierre

Mais ce sont surtout les colonisations arbustives qui menacent le plus le mur, du fait de leur important développement racinaire au sein des joints de la maçonnerie.



Exemple de zone fortement impactée par des colonisations arbustives

Certaines de ces colonisations ont d'ores et déjà commencé à détériorer les joints en profondeur et constituent des points de rétention d'humidité au sein de la maçonnerie, favorisant l'apparition des pathologies.



Colonisation arbustive

Nous constatons également le développement de mousses et de lichens sur la corniche de la partie arrondie du mur. L'absence de couverture favorise la rétention d'eau dans les pierres de corniche et facilite l'implantation de colonisations biologiques.



Détail de la corniche de la partie arrondie du mur

2.1.6. Graffitis

Enfin, il faut mentionner la présence de nombreux graffitis sur le mur de soutènement, principalement sur le parement en molasse du mur.



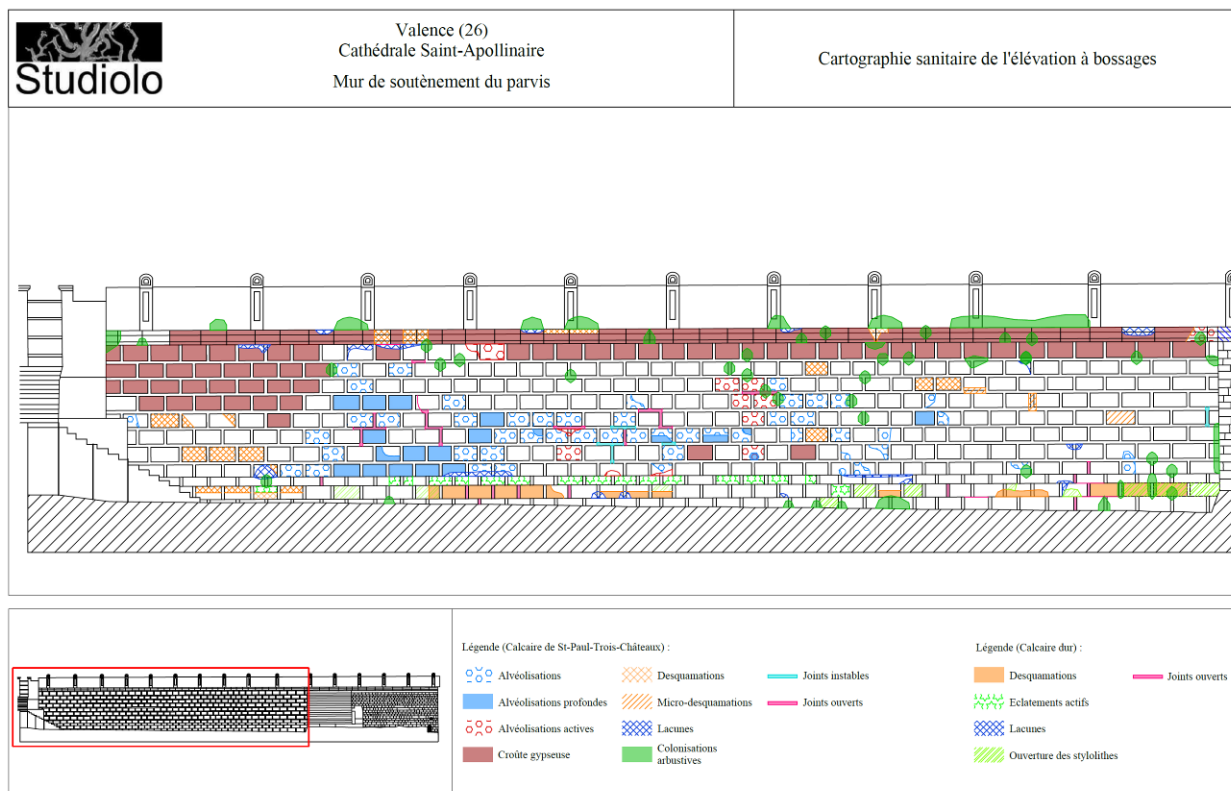
Exemple de graffiti affectant la partie en molasse du mur



Exemple de graffiti affectant le parement en calcaire et le soubassement en pierre de Crussol

2.2. Cartographie des altérations

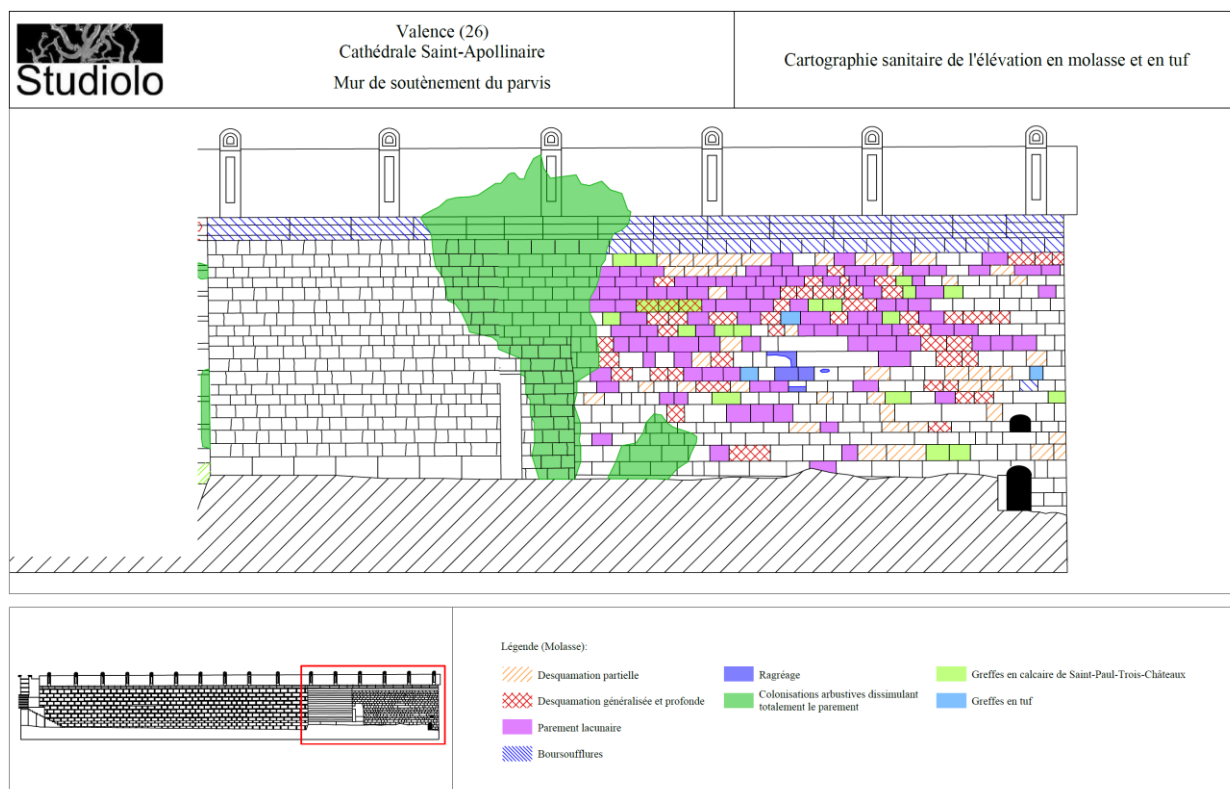
Les différentes pathologies affectant les pierres du mur de soutènement ont été reportées sur un relevé des élévations. Les cartographies sont fournies en annexe 3 du présent rapport.



La légende des altérations affectant la pierre de St Paul-Trois-Châteaux comprend 3 niveaux d'alvéolisation qui correspondent aux états suivants :

- alvéolisations : creusement d'alvéoles de 1 à 2cm de profondeur
- alvéolisations profondes : creusement d'alvéoles de plus de 2cm de profondeur et jusqu'à 8cm de profondeur
- alvéolisations actives : alvéolisations associées à une pulvérulence de la pierre

Le parement à bossage du mur de soutènement présente de nombreuses assises ayant des alvéolisations profondes ou actives. Le soubassement en pierre de Crussol montre de nombreux éclatements au niveau de son assise supérieure.



Exemple de cartographies des altérations fournies en annexe 3

Le parement en tuff et molasse du mur de soutènement présente une forte concentration de colonisation biologique qui masque aujourd'hui le mur et ne permet pas d'en apprécier parfaitement l'état de conservation.

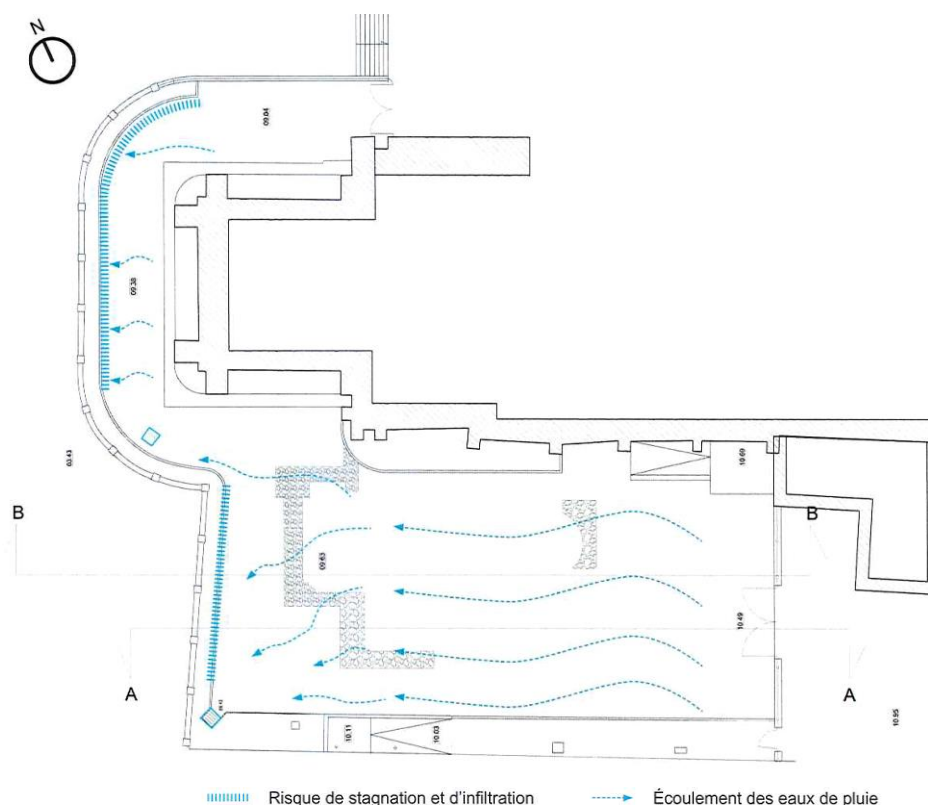
La partie en tuff est en bon état de conservation.

La partie en molasse concentre elle de nombreuses assises dont le parement est lacunaire c'est-à-dire profondément délité suite à des desquamations. Si l'on prend en considération les assises affectées de desquamations profondes ainsi que les assises dont le parement est lacunaire, plus de la moitié de la surface du parement en molasse de ce mur est lourdement atteint de pathologies ayant entraîné des pertes de matière importantes affectant le nu du parement.

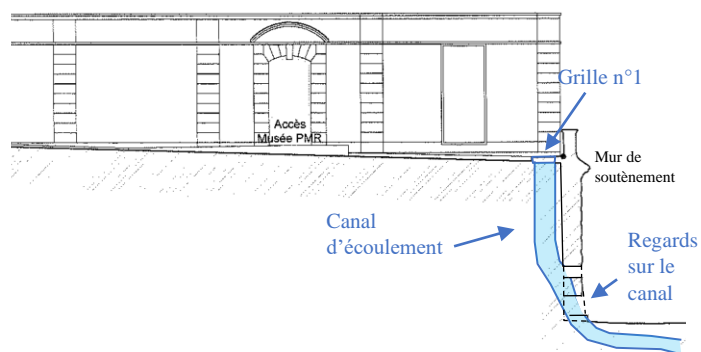
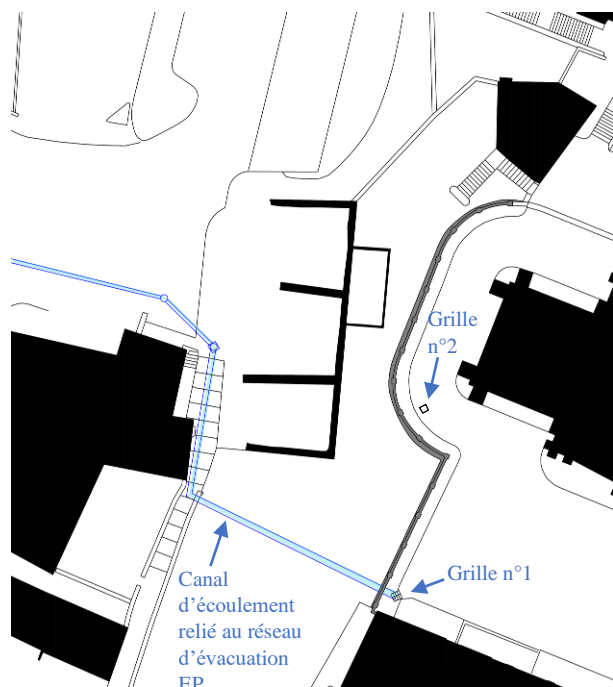
2.3. Analyses des facteurs d'altération potentiels

2.3.1. Réflexion sur les phénomènes d'écoulement

L'étude de diagnostic réalisée en 2015 par Vincent Brunelle, architecte en chef des monuments historiques, avait synthétisé la problématique d'écoulement des eaux au niveau du parvis de la cathédrale. La disposition du sol en pente vers l'Ouest tend à faire naturellement s'écouler les eaux pluviales en direction du mur de soutènement et à créer des zones de stagnation au droit de celui-ci.

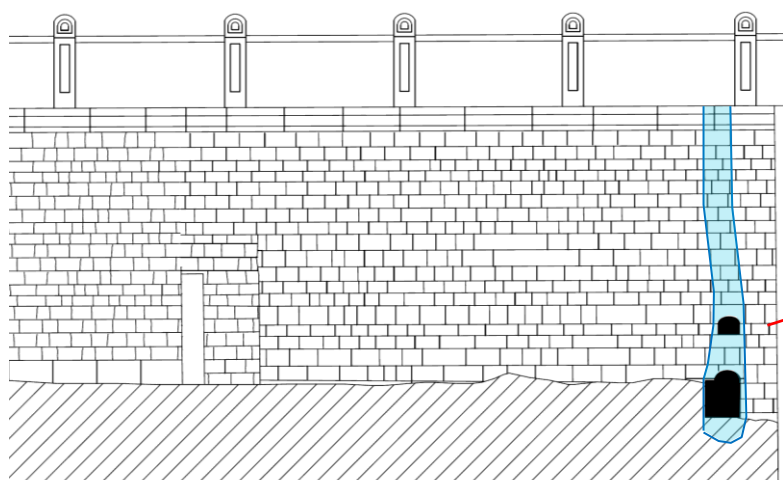


En revanche le raccordement de la grille n°2 avec le réseau n'est pas reconnu et nous ne parvenons pas à définir si les eaux qui s'y écoulent parviennent à rejoindre les voies d'évacuation ou si elles pénètrent simplement dans le remblai au droit du mur de soutènement.



Localisation sur plan et en coupe du canal d'évacuation et des deux grilles du parvis

Un regard a été aménagé dans le parement en molasse du mur de soutènement afin de pouvoir entretenir et vérifier l'écoulement des eaux depuis la grille n°1. La forme même de cette double ouverture permet de penser que cette voie d'évacuation est relativement ancienne et que le réseau actuel réutilise probablement un canal d'écoulement médiéval ou moderne.

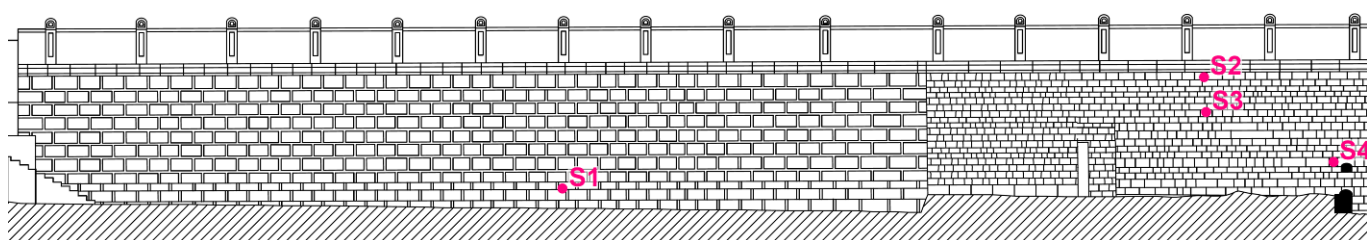


Détail et localisation sur l'élévation du mur de soutènement des regards permettant d'accéder au canal d'évacuation

2.3.2. Mesures de teneur en eau dans les pierres

Des percements ont permis de recueillir de la poudre de pierre en quatre localisations :

- S1 : Soubassement en calcaire de Crussol de couleur brun sombre présentant des éclatements
- S2 : Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux fortement boursoufflé, juste sous la corniche, au droit d'une zone de stagnation des eaux pluviales sur le parvis
- S3 : Molasse desquamée en profondeur, située à environ 190 cm sous le niveau de sol du parvis
- S4 : Molasse présentant un délitement de surface et des efflorescences blanches au droit du canal d'écoulement des eaux pluviales



Localisation des prélèvements pour mesure de teneur en eau sur le mur de soutènement

La détermination de la teneur en eau totale massique a été réalisée sur site par le laboratoire BPE, par dessiccation infrarouge permettant une lecture directe du taux massique d'humidité. 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%. La teneur en eau libre est calculée en déduisant à la teneur en eau hygroscopique à la teneur en eau totale.

Référence échantillon	Profondeur de prélèvement (mm)	Teneur en eau totale (%/M)	Teneur en eau hygroscopique (%/M)	Teneur en eau libre (%/M)
S1 – Calcaire de Crussol brun et éclaté	20-40	1,89	19,4	<=>
	180-200	0,77	6,76	<=>
S2 – Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux boursoufflé, sous la corniche	20-40	1,77	1,98	<=>
	180-200	2,75	3,30	<=>
S3 – Molasse desquamée en profondeur	20-40	2,13	12,7	<=>
	180-200	3,79	6,83	<=>
S4 – Molasse à surface délitée au droit du canal d'écoulement	20-40	4,67	2,51	2,16
	180-200	12,2	5,08	7,12

Résultat des mesures de teneur en eau

La lecture des résultats permet de constater des valeurs comparables pour les prélèvements S1 et S3, qui présentent d'importantes pathologies, sous forme d'éclatements dans le cas du calcaire de Crussol et de desquamations profondes dans le cas de la molasse. Ces pierres altérées comportent toutes deux une faible teneur en eau totale mais une importante proportion d'eau hygroscopique ce qui signifie qu'elles ne sont pas saturées en eau liquide mais qu'elles comportent des sels propres à adsorber de l'eau et que ceux-ci sont potentiellement responsables des pathologies de la pierre. Le fait que la teneur en eau hygroscopique soit plus élevée en surface qu'en profondeur vient renforcer cette hypothèse.

En revanche, le prélèvement S4, correspondant à un bloc de molasse situé à proximité immédiate du canal d'écoulement des eaux pluviales, comporte une teneur en eau totale non négligeable (jusqu'à 12% de la masse totale à cœur), avec une part élevée d'eau libre. La teneur en eau libre de 7.12% mesurée à environ 20cm de profondeur est significative d'une circulation d'eau active dans le mur dans cette zone.

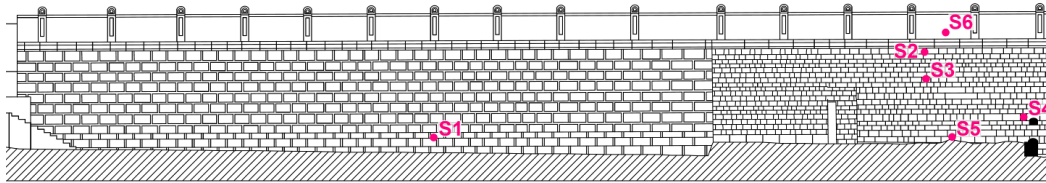
Le prélèvement S2, situé sous la zone de stagnation potentielle des eaux pluviales, à proximité du parapet, ne présente quant à lui que des teneurs en eau limitées.

Ces mesures, associées à l'observation des dispositions d'écoulement, permettent de mieux comprendre la problématique de circulation des eaux au sein du mur de soutènement et du terrain adjacent :

- il semble en réalité que le canal d'évacuation soit relativement efficace et permette d'évacuer la majeure partie des eaux. Les pierres situées à proximité sont saturées en eau, au moins en partie basse, car aucun dispositif d'étanchéité n'est prévu pour les protéger, le canal ancien étant utilisé. Mais cette saturation périphérique est un signe de la circulation abondante des eaux pluviales dans le canal, qui remplit donc son rôle d'évacuation.
- les pierres situées plus loin du canal sont sujettes également à des infiltrations et à des transferts d'eau mais selon un rythme différent, qui laisse le temps à des composés salins de cristalliser, donnant en analyse les importantes teneurs en eau hygroscopique mesurées. Il est possible que lors de forts épisodes pluvieux, ces pierres soient également saturées en eau. Cependant, lors de notre venue sur site, malgré l'importante quantité de neige fondue en train de s'évacuer, les zones étudiées restaient relativement pauvres en eau libre.
- la zone de prélèvement située juste sous la zone de stagnation potentielle a présenté les plus faibles teneurs en eau ce qui signifie que l'infiltration due à la stagnation n'est pas importante hors des très forts épisodes pluvieux.

2.3.3. Dosage des sels solubles

De nouveaux prélèvements de poudre de pierre ont ensuite permis de réaliser un dosage des sels solubles. Les 4 zones ayant déjà fait l'objet de mesures de teneur en eau ont ainsi été reprélevées, de même que deux autres zones supplémentaires : S5, correspondant à une molasse desquamée située à 20 cm du sol, et S6, recueilli sur une partie fortement érodée du parapet en calcaire.



Localisation des prélèvements pour dosage des sels solubles

Les images présentées ci-dessous permettent de mettre en évidence l'état des blocs sur lesquels ont été réalisés les prélèvements pour dosage des sels solubles.



Nous présentons ici les résultats de l'analyse des six échantillons, avec une précision relative de 5 %. Les dosages ont été réalisés par le laboratoire BPE 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.

Référence échantillon	Profondeur de prélèvement (mm)	Chlorures (%)	Sulfates (%)	Nitrates (%)	Calcium (%)	Sodium (%)	Potassium (%)
S1 – Calcaire de Crussol brun et éclaté	00-10	0,11	0,13	0,24	0,53	0,16	0,13
	30-40	0,08	0,08	0,13	0,56	0,09	0,08
S2 – Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux boursoufflé, sous la corniche	00-10	0,08	0,08	0,06	0,45	0,04	0,07
	30-40	0,05	0,04	0,03	0,50	0,02	0,06
S3 – Molasse desquamée en profondeur, à 190cm sous le niveau de sol du parvis	00-10	0,11	1,08	0,26	0,80	0,08	0,12
	30-40	0,10	0,42	0,28	0,59	0,08	0,10
S4 – Molasse à surface délitée et présentant des efflorescences au droit du canal d'écoulement	00-10	0,05	0,41	0,04	0,60	0,04	0,05
	30-40	0,04	0,05	0,02	0,47	0,02	0,03
S5 – Molasse desquamée en profondeur à 20cm du sol	00-10	0,10	0,08	0,32	0,47	0,04	0,10
	30-40	0,09	0,04	0,22	0,53	0,04	0,08
S6 – Calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux du parapet, très érodé	00-10	0,06	1,77	0,04	1,14	0,01	0,03
	30-40	0,07	0,54	0,05	0,66	0,02	0,02

0,53

Teneur à risque pathogène du fait des risques de combinaison avec d'autres ions en présence

0,11

Teneur limite

0,20

Teneur pathogène

Les seuils de recommandations pour la conservation de la pierre sont :

- Chlorures : < 0.10%
- Sulfates : < 0.10% s'ils sont associés au sodium ou au potassium, <5% s'ils sont sous forme de gypse associés au calcium
- Nitrates : < 0.5%
- Sodium : <0.04% lorsqu'il est associé aux chlorures, <0,03% associé aux sulfates ou <0,14% associé aux nitrates
- Potassium : <0.05% associé aux chlorures, <0,04% associé aux sulfates ou <0.20% associé aux nitrates
- Calcium : <0,04% associés aux chlorures, <1,47% associé aux sulfates ou <0,13% associés aux nitrates

Trois des assises étudiées, à savoir le calcaire de Crussol éclaté et les deux molasses desquamées en profondeur, présentent une teneur limite en chlorures, associée à des teneurs en sodium et potassium pouvant générer la formation de sels pathogènes.

La teneur en chlorures est probablement liée à l'emploi de sels de déverglaçage sur le parvis, migrant à travers le mur jusqu'au parement de ce mur. Les teneurs plus en profondeur, de 30 à 40mm, sont en effet encore élevées au regard de la teneur en subsurface.

Le bloc de molasse placé au droit du canal d'écoulement des eaux, qui présente une importante teneur en eau totale et une forte proportion d'eau libre, ne comporte qu'une faible teneur en sels mais contient néanmoins en surface, là où se développe la pellicule d'efflorescence blanche, un taux de sulfate non négligeable ; celui-ci décroît très rapidement en profondeur. Il s'agit donc là d'une teneur superficielle due à un enrichissement en zone d'évaporation du fait de transferts d'eau ce qui corrobore les mesures de teneurs en eau ayant montré par ailleurs une circulation active d'eau au sein de cette assise.

Par ailleurs, le parapet et la corniche supérieure en calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux, présentant des desquamations et des boursoflures, ne comportent pas de sels en quantité pathogène. La corniche boursoflée est la moins contaminée en sels des pierres étudiées et le parapet ne présente pas de taux de cations significatifs et les sulfates sont en teneur limitée pour être pathogènes au regard des taux de calcium, sodium et potassium. Les teneurs en sulfates et calcium de la pierre de parapet suggèrent une teneur en gypse mais les teneurs restent faibles pour évoquer une formation de gypse à caractère pathogène.

2.3.4. Influence des propriétés des pierres sur le développement des pathologies

L'étude réalisée en 2019 sur l'élévation Sud de la cathédrale avait permis de mettre en évidence que la molasse de Châteauneuf-sur-Isère peut contenir, au sein de sa fraction fine, une importante quantité d'argiles gonflantes, influant sensiblement sur les propriétés dilatatoires du matériau et jouant un rôle dans l'apparition des pathologies. Le laboratoire BPE a réalisé des analyses permettant d'évaluer la proportion d'argiles gonflantes et la tendance dilatatoire de la molasse employée dans la maçonnerie de l'extrémité Sud du mur de soutènement afin de compléter la connaissance des propriétés de cette même molasse.

Les carottes de molasse P2 et P3, déjà utilisées pour la détermination des propriétés pétro-physiques, ont donc subi des tests de dilatation hydrique et thermique (le protocole expérimental employé est décrit précisément dans le rapport BPE fourni en annexe). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Référence de l'échantillon	Dilatation hydrique à saturation (mm/m)	Coefficient de dilatation thermique (K^{-1})
P2 – en surface	0,386	$4,8.10^{-5}$
P2 – à cœur	0,227	$2,5.10^{-5}$
P3 – en surface	0,205	$2,6.10^{-5}$
P3 – à cœur	0,168	$2,5.10^{-5}$

Les analyses permettent de mettre en évidence une importante tendance dilatatoire pour les molasses étudiées. On remarque toutefois des variations notables.

Le premier constat est que la frange de pierre située au plus près de la surface dilate plus fortement, y compris dans le cas d'une molasse saine comme celle de l'échantillon P2 alors que la pierre à cœur présente une plus faible expansion.

De plus, on remarque une nette différence entre les deux pierres, l'échantillon P2 dilatant plus fortement que l'échantillon P3

Ces différences entre deux blocs de molasse ainsi qu'au sein d'un même échantillon, traduisent bien le caractère très variable des propriétés de la pierre de Châteauneuf-sur-Isère, déjà mises en évidence lors de la précédente campagne d'étude sur la cathédrale.

Le laboratoire BPE a également réalisé un essai de détermination de l'activité argileuse au bleu de Méthylène. Nous avons pour cela choisi la carotte P2, présentant les plus grandes valeurs en termes de dilatation.

Référence de l'échantillon	Valeur au bleu de méthylène (MB)
P2 - Molasse Saine	0,27

La valeur au bleu de méthylène révèle une certaine activité argileuse au sein de la fraction fine de la pierre mais reste néanmoins peu élevée comparée à d'autres molasses miocènes.

La valeur mesurée sur cette assise de molasse du mur de soutènement est également plus faible que celles mesurées pour les molasses de l'élévation Sud de la cathédrale de Valence, comprises entre 0,55 et 0,91.

2.3.5. Modification des propriétés des pierres dans les zones saines et altérées

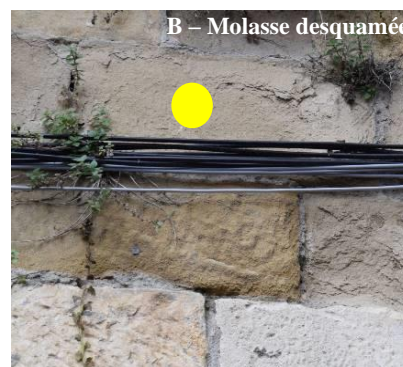
Afin de rechercher si des différences micro structurales importantes entre un épiderme induré et un matériau moins dense à cœur pourraient être en cause dans l'apparition des pathologies, notamment les desquamations observées sur la molasse et sur le calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux, des tests in situ de capacité de prise en eau ont été réalisés.

Afin de mettre en évidence ces évolutions différentielles, nous avons mis en œuvre, sur des épidermes en place et sur des parties altérées, des tests de prise en eau à la pipe de Karsten, ainsi que des peeling-tests permettant d'estimer le degré de cohésion des pierres en surface.

Ces tests permettent également d'évaluer le caractère plus ou moins évolutif des parties altérées.

- Évaluation des capacités de prise en eau de la molasse à la pipe de Karsten

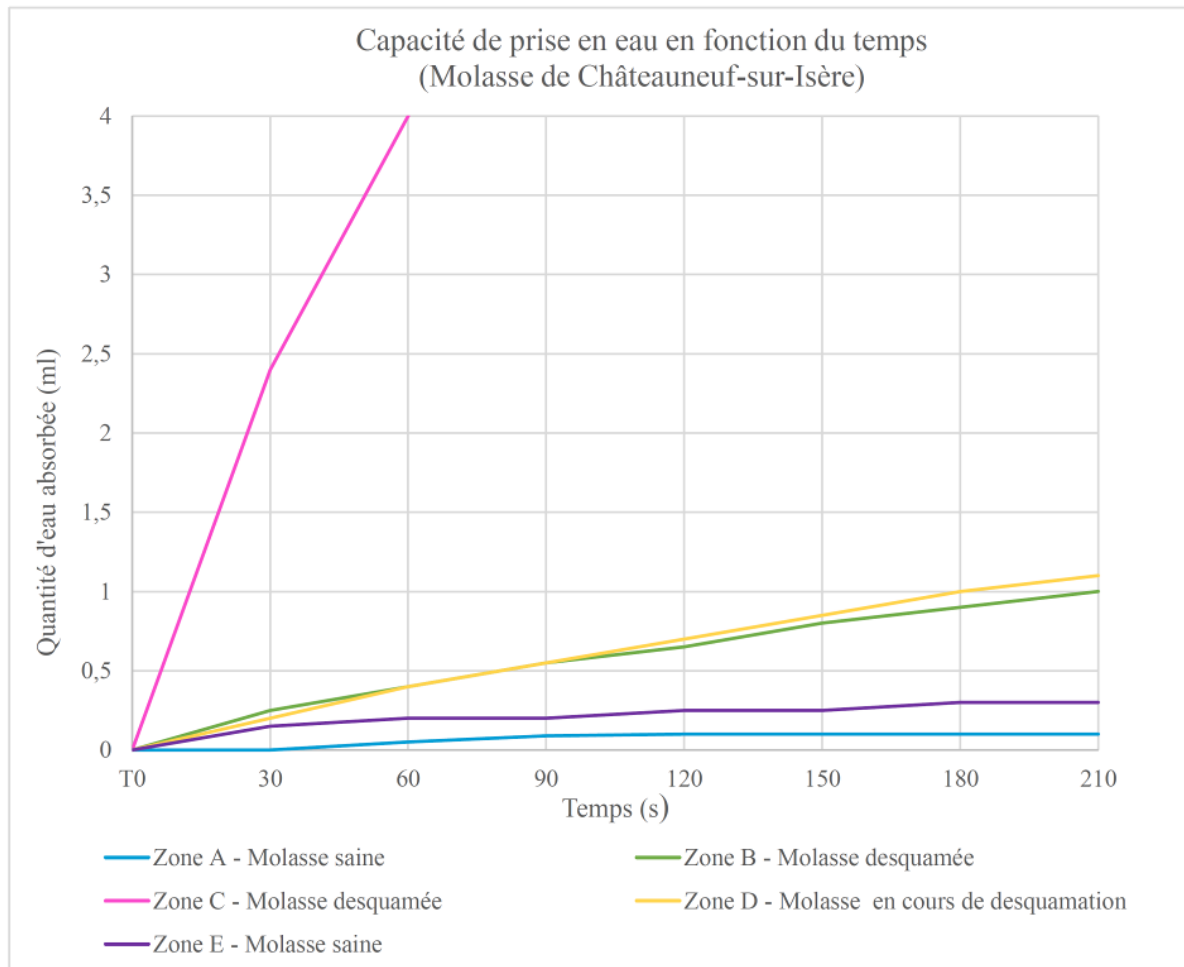
Le test de mesurage d'absorption d'eau par le test à la pipette a été réalisé selon les recommandations de la norme NF EN 16302 de mars 2013. Le test à la pipe de Karsten consiste à appliquer sur la pierre une pipe coudée, fixée à l'aide d'un mastic permettant d'assurer l'étanchéité entre le support et la pipe. La pipe est remplie d'eau et l'absorption d'eau par le support (en ml) est lue sur les graduations de la pipe en fonction du temps. La pipette utilisée est une pipette dont le diamètre de la surface d'essai est égal à 2.5cm. L'essai a été réalisé à l'eau du robinet. Les points de mesurage à la pipe sont :



Localisation des différents points d'application de la pipe de Karsten sur le parement en molasse

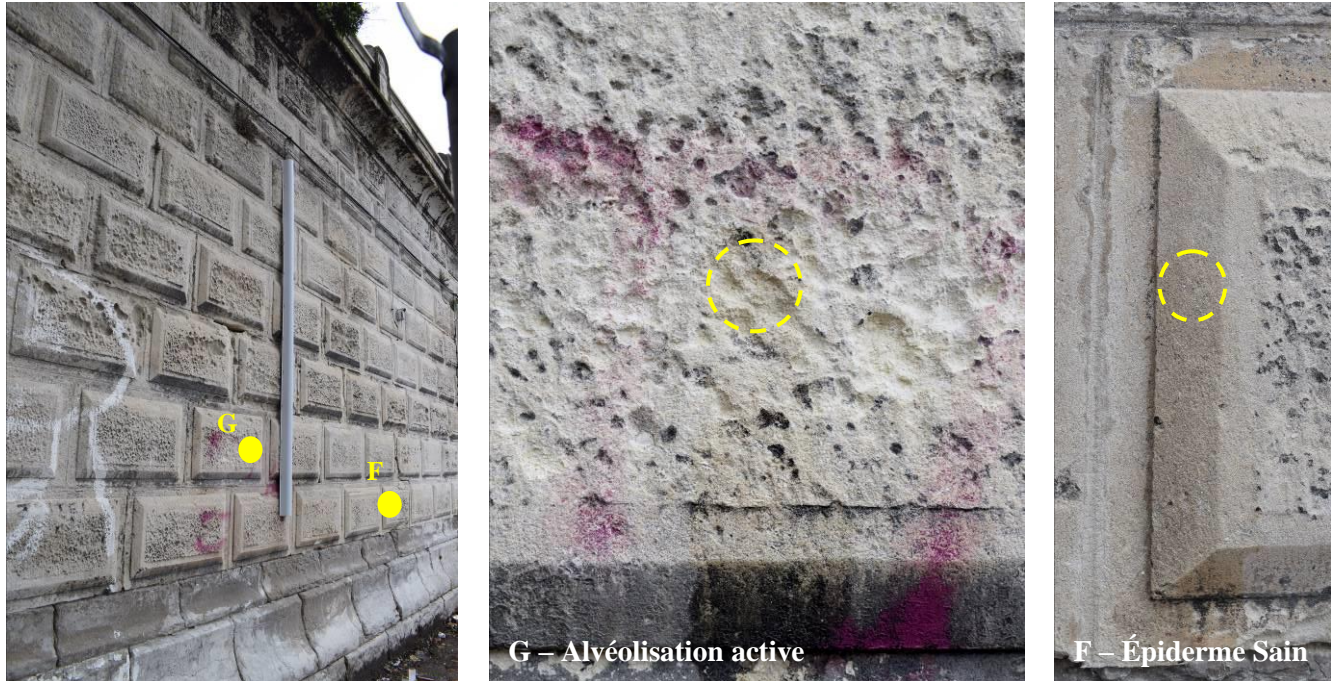
Les mesures d'absorption d'eau à la pipe de Karsten montrent une augmentation de la prise en eau lorsque les pierres sont desquamées. L'intensité de cette augmentation est cependant très hétérogène selon les cas. La pierre de la zone C présente une prise en eau beaucoup plus importante que celle de la zone B, alors que les faciès de desquamation sont très semblables. La pierre en cours de desquamation (zone D) présente une prise en eau similaire à celle de la zone B, totalement desquamée.

On notera par ailleurs la très faible prise en eau des épidermes sains, démontrant ainsi l'importante différence existant entre les blocs conservant cet épiderme et ceux l'ayant perdu.



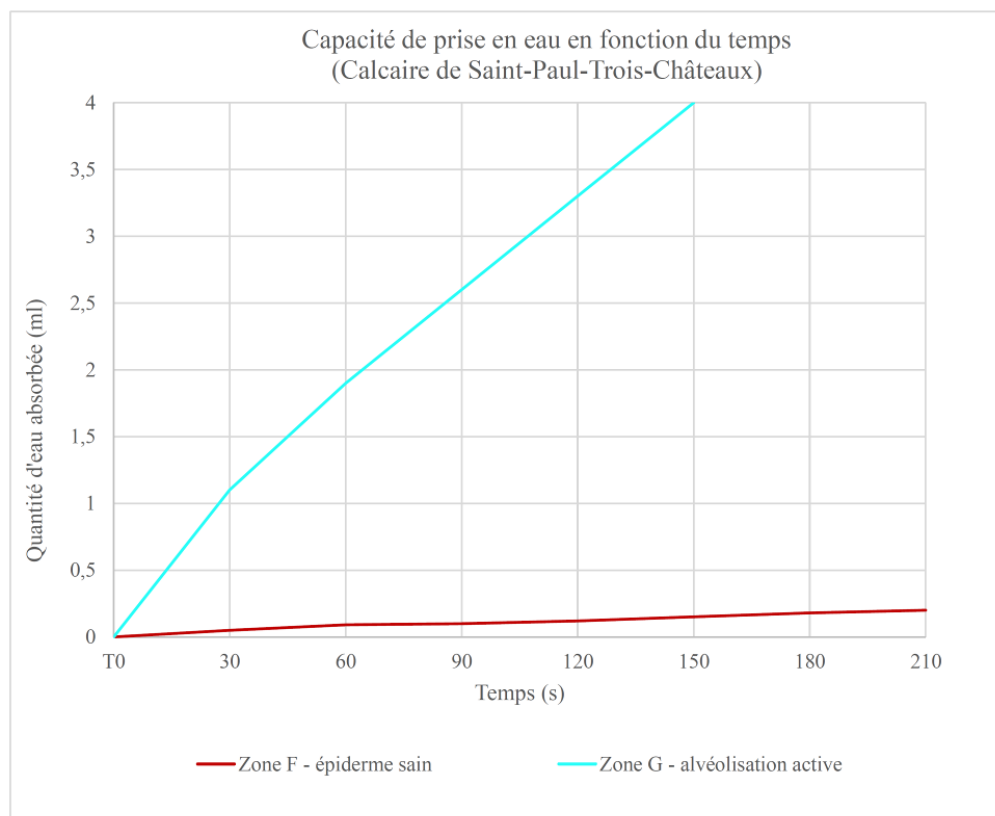
- Évaluation des capacités de prise en eau du calcaire à la pipe de Karsten

Des tests semblables ont ensuite été réalisés sur le parement en calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux :



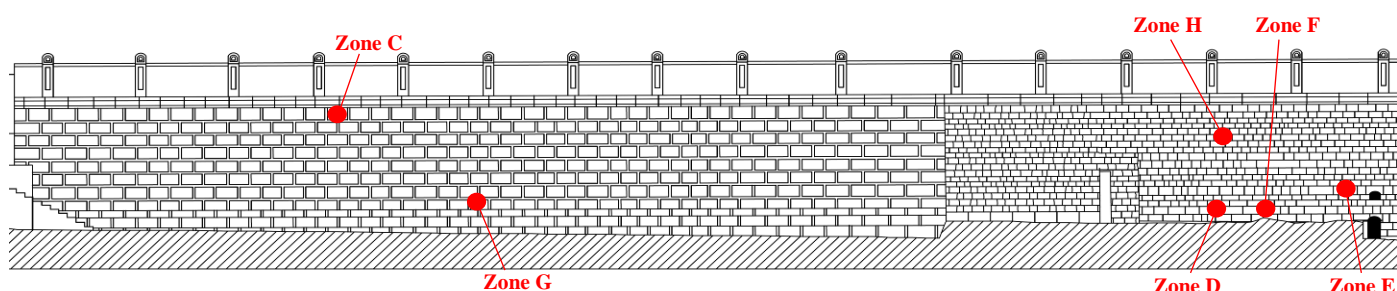
Localisation des points d'application de la pipe de Karsten sur le parement en calcaire

On constate une très faible prise en eau de la pierre conservant son épiderme, alors que le faciès alvéolisé accuse une très importante augmentation de cette même prise en eau. Il existe donc une nette différence de comportement entre les pierres saines et alvéolisées dans un processus actif.



- Peeling-tests

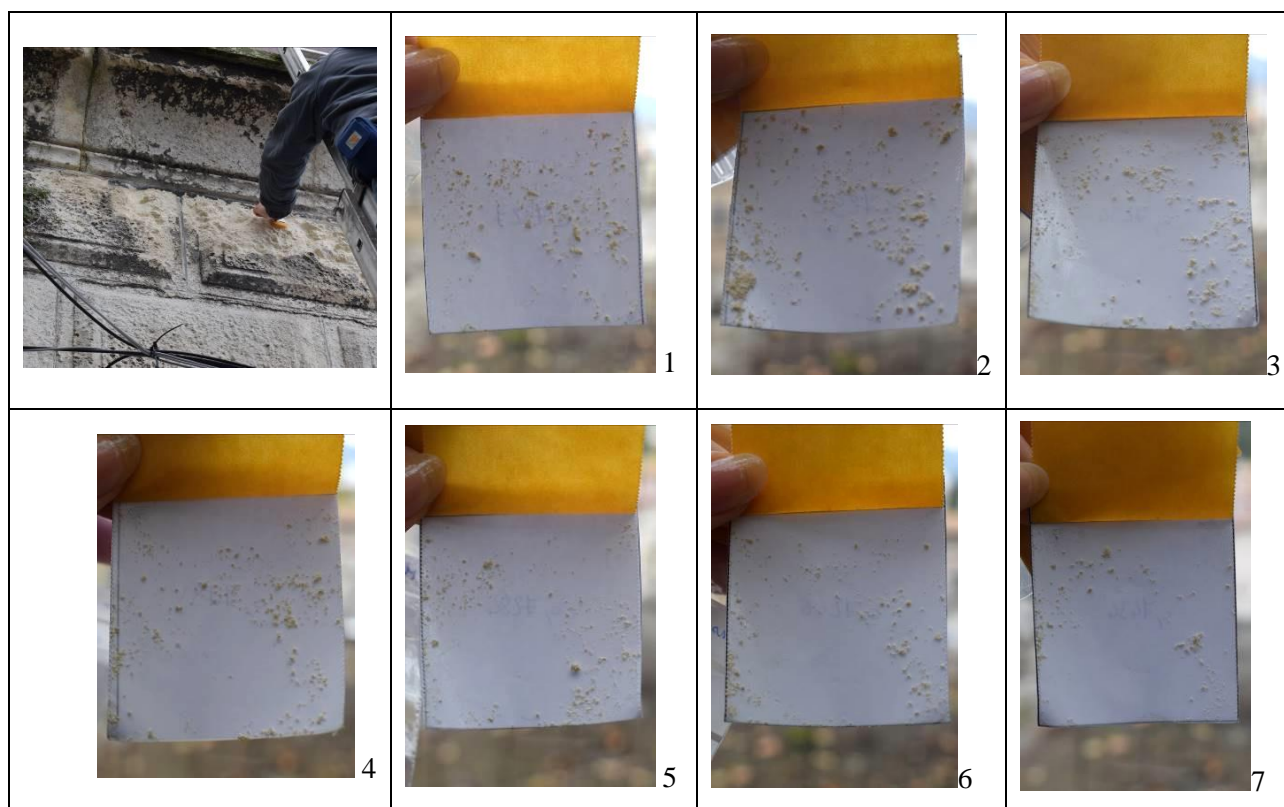
Afin de comparer le degré de décohésion de la pierre, dans les zones saines et altérées, des essais de peeling-tests ont été réalisés. L'état de conservation est apprécié par test à l'adhésif selon la méthode décrite dans l'article de Drdacky et al. (2013 J of geophysics and engineering) *Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar*. Sept adhésifs double face de 5×5cm ont été appliqués de manière successive sur chaque zone. Chaque adhésif est pesé avant puis après application à l'aide d'une balance de précision (au 1/1000g) et permet ainsi de quantifier la masse de poudre et/ou d'écaille de pierre retenue par l'adhésif après chaque test. La courbe de la masse retenue par les adhésifs permet d'évaluer la cohésion de l'épiderme. Les six zones choisies sont les suivantes :



- Zone C : Calcaire alvéolisé actif
- Zone G : Calcaire épiderme sain
- Zone E : Molasse saine

- Zone H : Molasse desquamée
- Zone D : Molasse desquamée
- Zone F : Molasse saine

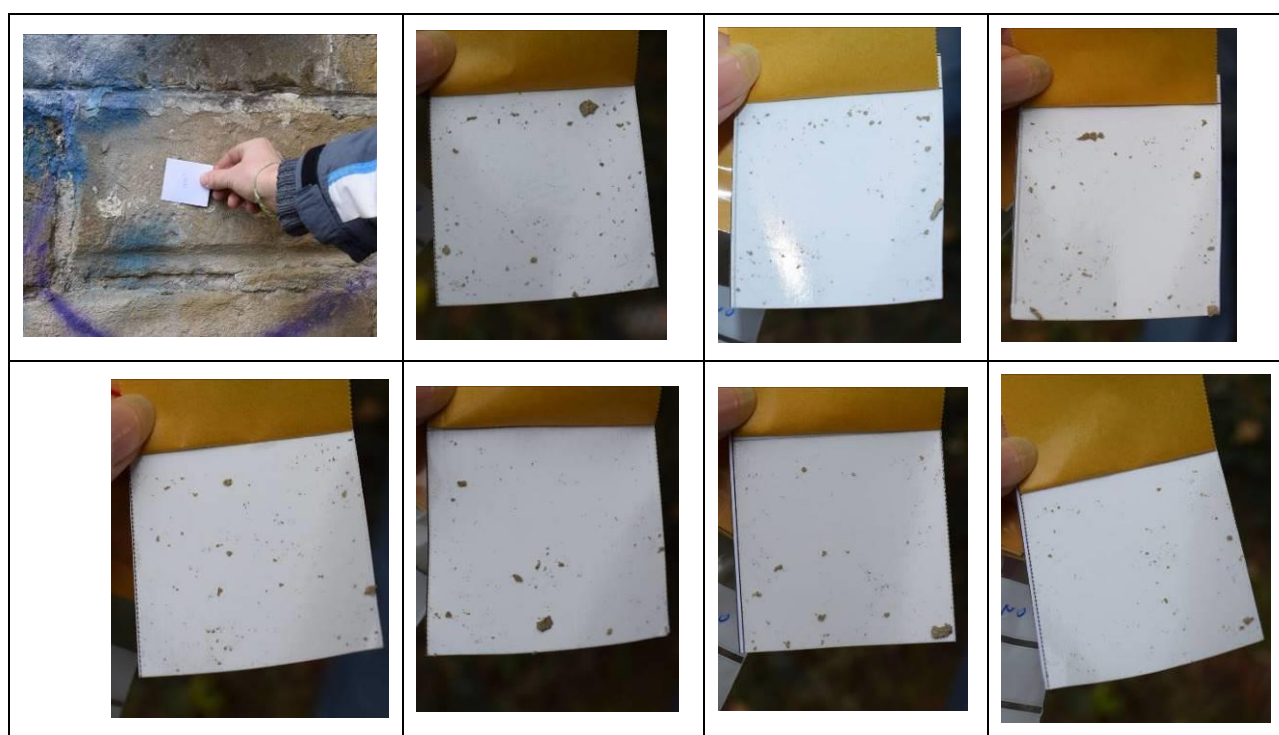
Des clichés des adhésifs ont été pris après chaque application pour toutes les zones, afin de pouvoir documenter la quantité de matière prise par les adhésifs et les dimensions de la matière prise :



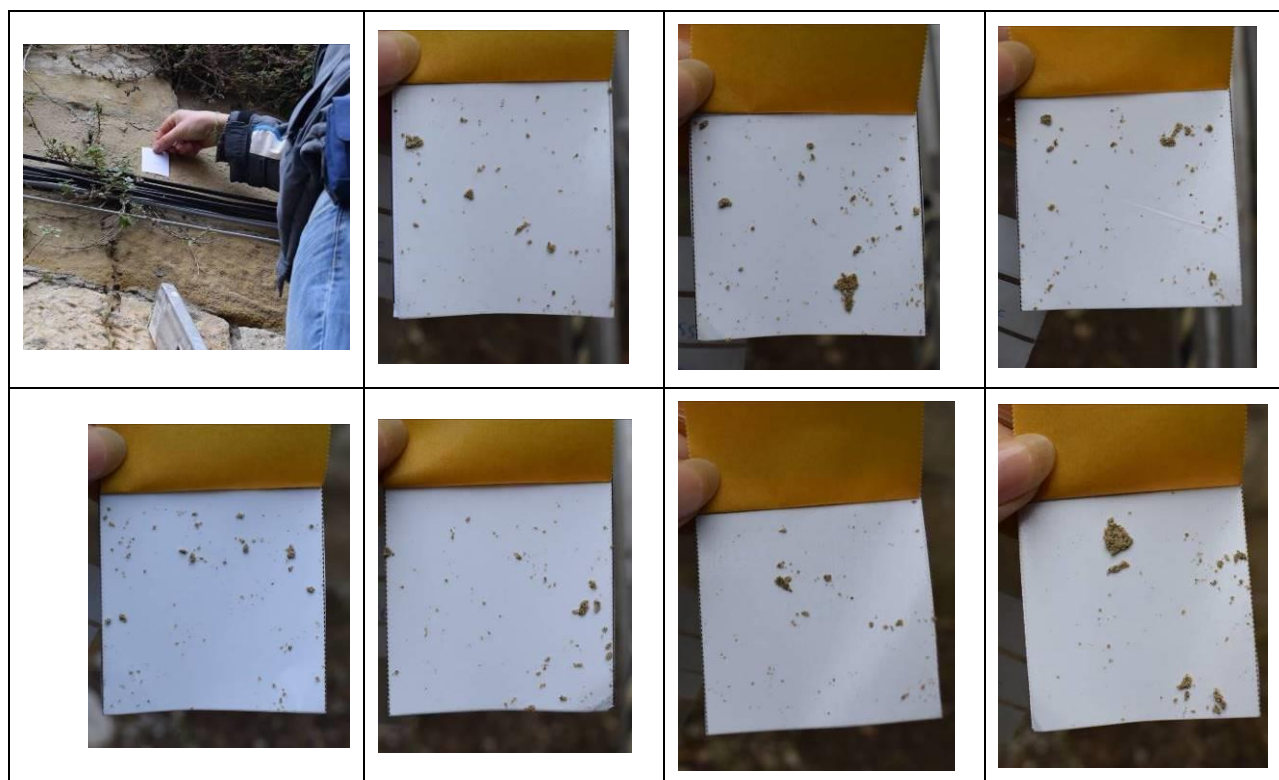
Zone C – Calcaire alvéolisé actif



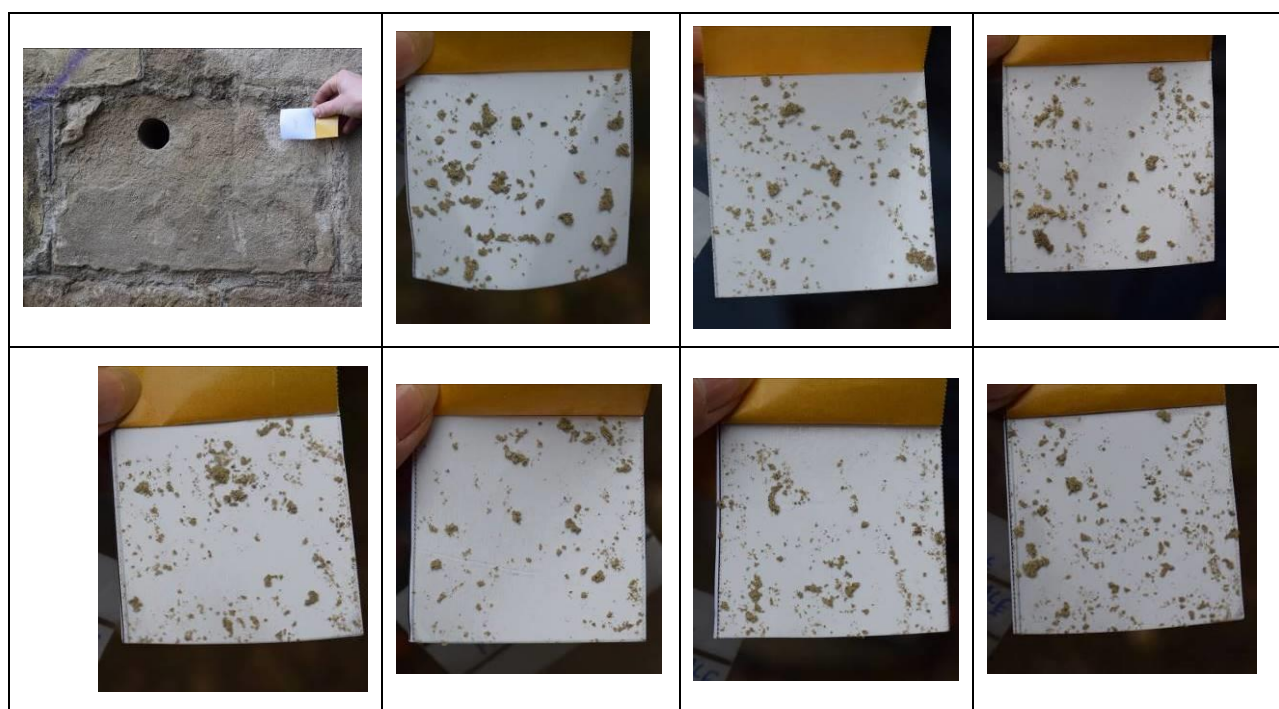
Zone G – Calcaire à épiderme sain



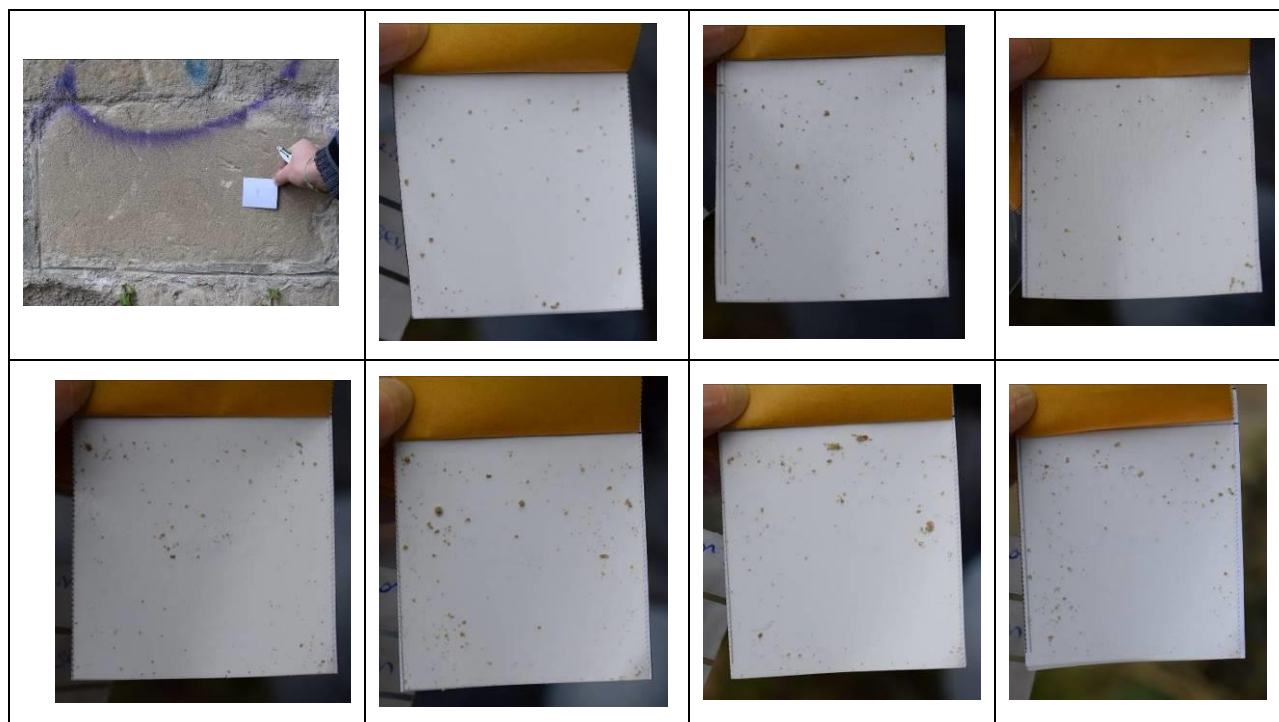
Zone E – Molasse à épiderme sain



Zone H – Molasse desquamée

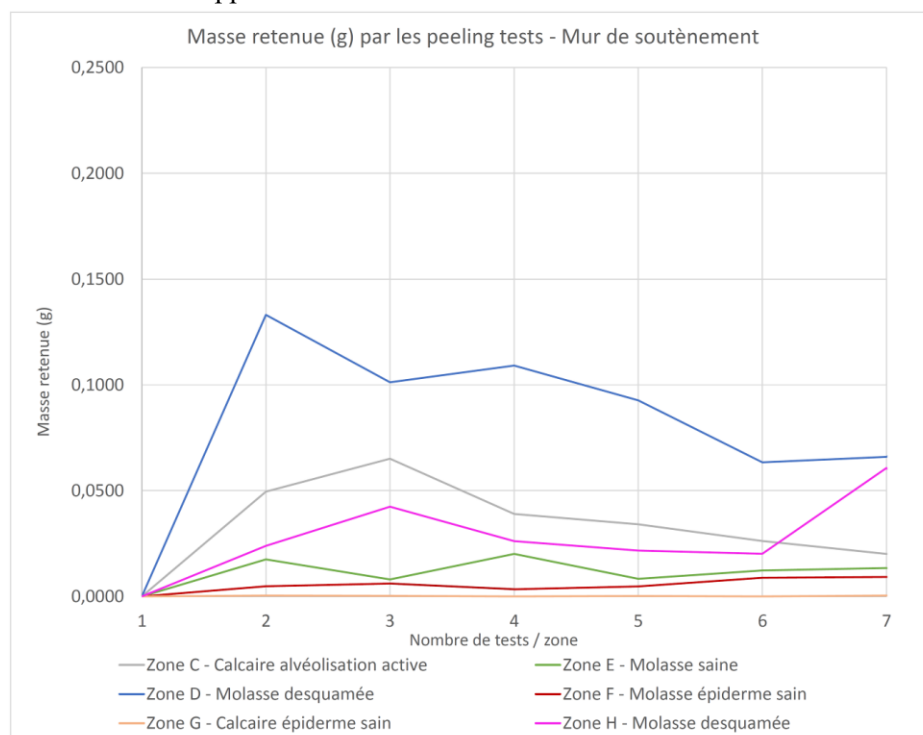


Zone D – Molasse desquamée



Zone F – Molasse à épiderme d'apparence saine

Comme le test à la pipe de Karsten, les peeling-tests révèlent une très nette différence entre le calcaire conservant son épiderme, présentant une parfaite cohésion de surface et le calcaire souffrant d'alvéolisation active accusant une décohésion. Pour ce qui est des molasses, la comparaison des deux zones desquamées révèle une certaine hétérogénéité. Selon les cas, la cohésion des surfaces altérées peut être plus ou moins importante. On notera de manière intéressante l'augmentation brusque de l'arrachement, sous forme d'écailles de taille importante, pour le dernier peeling de la zone H, révélant une fragilité accrue en subsurface qui, soumise à la sollicitation répétée de 7 adhésifs, a montré une perte de cohésion à la 7^{ème} application d'adhésif.



3. Conclusions

3.1. État sanitaire du parement du mur de soutènement

- Tenue structurelle

Nos constatations n'ont pas relevé de traces visibles d'un mouvement d'origine structurelle sur le parement du mur de soutènement. On ne relève aucune fissuration significative, ni aucune trace de déformation, de démaillage des assises du parement ou autre signe de mouvement du parement du mur. Il s'agit là de constats sur l'état de conservation du parement du mur de soutènement qui ne peuvent se substituer à l'expertise d'un bureau d'étude structure pour étudier la stabilité structurelle du mur à moyen ou long terme.

- Écoulement des eaux

Les observations et les analyses ont révélé que des passages d'eau affectent le parement du mur de soutènement et qu'ils sont responsables pour partie de la formation des pathologies, notamment au droit du canal d'écoulement de l'extrémité Sud.

Nous avons cependant pu constater qu'en période de fort écoulement d'eau (fonte de neige), le système d'évacuation au moyen du canal d'écoulement de l'extrémité Sud est fonctionnel. Il ressort des mesures de teneurs en eau que, en dehors des très forts épisodes pluvieux, l'écoulement des eaux n'engendre pas de transferts d'eau significatifs dans le parement du mur de soutènement sauf au droit du canal d'évacuation des eaux au Sud du mur. Nous n'avons d'ailleurs constaté aucune trace de concrétion ou de coulures sur le parement du mur de soutènement qui témoigneraient de transferts importants depuis le remblai à l'arrière du mur.

Il faudrait néanmoins vérifier, par l'étude des plans de voirie, par sondage ou géoradar, si la grille d'évacuation n°2, située au droit de la partie arrondie du mur, est bien reliée au réseau d'évacuation.

- Altération des pierres en œuvre

Les pathologies rencontrées sur les différents types de pierre sont le fait de plusieurs facteurs environnementaux ainsi que de l'évolution naturelle de ces pierres exposées en milieu environnemental extérieur.

Si les teneurs en sels sont plus importantes dans les prélèvements faits sur les molasses du parement du mur de soutènement que sur les élévations Nord et Sud de la cathédrale, témoignant de transferts d'eau et de passage de résidus de sels de déverglaçage, les teneurs en sels ne sont pas fortement pathogènes et ne constituent pas la cause majeure de dégradation des molasses et pierres en œuvre sur le parement du mur de soutènement.

Les mesures d'absorption d'eau à la pipe de Karsten révèlent, pour la molasse comme pour le calcaire de Saint-Paul-Trois-Châteaux, une capacité à former un épiderme dont les propriétés d'absorption d'eau sont très réduites par rapport à celles des pierres à cœur ce qui favorise les phénomènes de desquamation. Par ailleurs, les peeling-tests ont montré que, dans les zones altérées, l'exposition de surfaces décohésives et présentant d'importantes capacités d'absorption d'eau ne permet pas une stabilisation de la pierre et entraîne des pertes de matière importantes.

La molasse de Châteauneuf-sur-Isère en œuvre sur le parement du mur de soutènement est incontestablement la pierre qui présente aujourd'hui le degré d'altération le plus marqué de ce parement de mur. Cette prédominance vient d'une part de l'ancienneté de cette portion de maçonnerie, l'extrémité Sud étant très certainement la partie la plus ancienne du mur de soutènement et également d'autre part des propriétés intrinsèques de cette pierre. La capacité de dilatation, lorsque cette molasse a un apport d'eau, engendre une forte réactivité de cette pierre lorsqu'elle est exposée en extérieur.

3.2. Orientations d'intervention sur les pierres de parement du mur de soutènement

Au regard du constat de l'état sanitaire des pierres de parement du mur de soutènement, il ressort que les orientations pour la restauration de ce parement de pierre devront comprendre les opérations suivantes.

Dé-végétalisation et traitement curatif des colonisations biologiques

Reprise du canal d'écoulement des eaux au Sud du mur (cf. grille n°1 du schéma p.38) afin qu'il n'engendre plus de transferts d'eau dans les assises à son pourtour

Reconnaissance du système d'écoulement des eaux au droit de la grille d'évacuation au niveau du parvis (grille n°2 du schéma p.38)

Sur les molasses :

- purge raisonnée du parement de molasse en cours de desquamation au droit des parements affectés de desquamation généralisée ou sur les parements lacunaires
- purge des ragréages
- mise en œuvre de greffes de pierre au droit des lacunes très importantes engendrant des infiltrations d'eau dans les assises inférieures par le ruissellement d'eau sur un parement ayant un nu très dégradé
- traitement éventuel de consolidation appliqué par pulvérisation sur les parements présentant des desquamations généralisées et les parement lacunaires qui seront conservés et traités par solins (protocole en attente des résultats des tests en cours)
- mise en œuvre de solins de mortier en recherche sur les parements présentant un état de desquamation superficielle autour des épidermes encore en place afin de consolider ces épidermes conservés mais adjacents à des états desquamés sur une même assise
- mise en œuvre de solins de mortier en recherche au droit des lacunes de petite taille pour permettre de rétablir le bon ruissellement des eaux sur les parements de desquamation généralisée et au droit des parements lacunaires lorsque le niveau de lacune permet de conserver la pierre en œuvre
- provision pour greffes de pierre au droit des parements lacunaires engendrant des infiltrations d'eau dans les assises inférieures par le ruissellement d'eau sur un parement ayant un nu très dégradé ne pouvant être traité par solins ou sur les assises présentant des très forts niveaux de desquamation et de désagrégation granulaire
- rejointoiement des pierres de parement et mise en œuvre de compléments de hourdage en recherche

Sur les tuffs :

- rejointoiement des pierres de parement et mise en œuvre de compléments de hourdage en recherche,

Sur les calcaires de type St Paul Trois Châteaux :

- la restauration des pierres de parapet comprenant :
 - purge des ragréages dégradés
 - mise en œuvre de solins de mortier au droit des lacunes de petite taille pour permettre le bon ruissellement des eaux
 - la reprise par ragréage au droit des assises présentant des lacunes ou perte de matière affectant le nu du parement devra être limitée au cas de rétablissement du bon écoulement d'eau sur des assises ne nécessitant pas de greffes de pierre compte tenu de la propension de cette pierre à s'alvéoliser et à boursoufler ce qui indique le risque d'un vieillissement prématuré des mortiers de ragréages
 - autant que de besoin le changement de blocs ne pouvant être conservés pour rétablir la fonctionnalité du parapet dans les zones étayées
 - mise en œuvre de greffes sur la main courante et le socle du parapet ainsi que sur les assises de Saint-Paul-Trois-Châteaux du parapet
- la restauration du parement à bossages comprenant :
 - purge des esquilles en cours de desquamation
 - consolidation en recherche sur les pierres alvéolisées mettant au jour une pierre pulvérulente
 - mise en œuvre de solins de mortier au droit des lacunes de petite taille pour permettre le bon ruissellement des eaux
 - la reprise par ragréage au droit des assises présentant des pertes de matière devra être limitée au cas de rétablissement du bon écoulement d'eau sur des assises ne nécessitant pas de greffes de pierre compte tenu de la propension de cette pierre à s'alvéoliser

Sur les calcaires stylolithiques de type Crussol :

- purge des éclats de pierre
- mise en œuvre de greffes au droit des lacunes importantes affectant le nu du parement et les écoulements d'eau
- mise en œuvre de solins de mortier au droit des lacunes de petite taille pour permettre le bon ruissellement des eaux
- rejointoiement
- ne pas appliquer de ragréage sur les stylolithes ouverts, fermer pas solinage au droit des plus fortes ouvertures si elles sont accompagnées de lacunes

Un traitement de stabilisation pourra être envisagé sur les molasses pour limiter la détérioration des pierres d'origine. Notre étude est en cours actuellement ; nous réalisons des essais sur les pierres de molasse des élévations de la cathédrale, en combinant un inhibiteur de gonflement des argiles et des consolidants. Les résultats permettront de préciser le protocole envisageable pour la consolidation de la molasse.

Annexes

Annexe 1 : Cartographie des pierres en œuvre dans le parement

Annexe 2 : Rapport du laboratoire BPE PMH 191374V1

Annexe 3 : Cartographies sanitaire
