

Etude préliminaire à la restauration des deux portails romans

Localité: Tournai
 Institution: Cathédrale Notre-Dame
 Type d'objet: Portail d'église
 Titre de l'objet: Porte Mantile et Porte du Capitole



Demandeur: DG04 –DEPARTEMENT DU PATRIMOINE
 Direction de la Restauration
 LA PROVINCE DE HAINAUT
 Service des Bâtiments et Constructions

Personne de contact: DG04-DEPARTEMENT DU PATRIMOINE: M. Pierre Paquet,
 Inspecteur général f.f. Tel. : (081)33 21 81
 LA PROVINCE DE HAINAUT : Mme. P. Marlière, Architecte
 Inspectrice générale. Tel. : (065) 38 25 40

Numéro de dossier IRPA: 2011.11040 et 2011.11041

Cellules IRPA concernées : Atelier de conservation-restauration de sculpture en pierre avec la
 collaboration de la Département Laboratoires, Cellule Monuments
 et le laboratoire des œuvres polychromées

Responsable de la cellule : Judy De Roy, chef de l'atelier

Personne de contact IRPA : Lieselote Hoornaert, Judy De Roy,

Date du rapport : 23/07/2014

Les personnes suivantes de l'atelier de conservation-restauration de sculpture en pierre ont participé à cette étude :

Lieselote Hoornaert , Judy De Roy, Camille De Clercq, Stefaan Devliegher , Sam Huysmans, Sam Kegels et Nicolas Verhulst

Ce rapport ne peut être diffusé que dans son intégralité. Aucun graphique ou figure ne peut être utilisé sans l'autorisation de l'auteur. Sauf autre modalité contractuelle, l'IRPA détient les droits d'auteur exclusifs sur l'ensemble de l'étude, comme le prévoit la législation.

Introduction

L'étude préliminaire est le résultat d'une collaboration interdisciplinaire entre le Département Labo (Cellule Monuments et le Laboratoire des polychromies) et le Département Conservation-Restauration (Atelier des sculptures en pierre) de L'Institut Royal du Patrimoine Artistique.

Cette étude s'est également basée sur les avis scientifique du Service géologique de Belgique (M. Michiel Dusar et Eric Groessens), l'asbl Pierres et Marbres de Wallonie (M. Francis Tourneur), de L'ETH Zûrich (Timothy Wangler) et de l'UNamur (Johan Yans).

La coordination de l'étude est assurée par Lieselote Hoornaert et Judy De Roy de l'Atelier des sculptures en pierre (IRPA).

L'ensemble de l'étude se compose de:

- Le rapport de l'Atelier de sculpture en pierre (Lieselote Hoornaert, Judy De Roy, Camille De Clercq et Sam Huysmans)
- Deux rapport du Département Labo: notamment un de la cellule Monuments (Laurent Fontaine, Poel Hendrickx et Hilde De Clercq) et un du Laboratoire des polychromies (Jana Sanyova).
- Groupage de toutes les cartographies par portail établi par l'Atelier de sculpture en pierre (Lieselote Hoornaert, Sam Kegels, Nicolas Verhulst et Stefaan Devlieghe)

Les rapports sont complémentaires.

Table des matières

Table des matières	1
I. Identification des portails et numérotation des blocs de pierre.....	4
II. Étude de l'état de conservation de la pierre de Tournai.....	7
1. Description technique	7
2. Histoire technico-matérielle et interventions antérieures	8
2.1. Répertoire de la détérioration des portails romans.....	8
2.1.1. Études iconographiques	8
2.1.2. Descriptions littéraires	10
2.1.3. Documentation photographique.....	10
2.2. Interventions antérieures.....	12
2.2.1. Interventions antérieures au XIX ^e siècle.....	12
2.2.2. Interventions datant du XIX ^e siècle	12
2.2.3. Interventions datant du XX ^e siècle.....	12
3. Causes des dégradations	13
3.1. Bref aperçu des résultats des analyses effectuées dans le cadre de l'étude	13
3.2. Influence de l'orientation des portails	14
3.3. Influence du mode de mise en œuvre des portails.....	15
4. Étude macroscopique des détériorations de la pierre de Tournai des portails : typologie.....	16
4.1. Fissures et déformations	17
4.2. Détachements	17
4.3. Altérations chromatiques et dépôts.....	18
4.4. Colonisation biologique.....	20
5. Étude de l'état de conservation des portails.....	21
5.1. Analyse des formes d'altération de la pierre : objectifs et méthode.....	22
5.2. Distribution des formes d'altération	22
A. La Porte du Capitole	22
B. La Porte Mantile	23
C. GÉNÉRALITÉS	24
5.3. État actuel de la détérioration : localisation et ampleur des zones les plus dégradées	27
5.4. Conclusion : approche théorique et éthique du traitement de conservation-restauration .	28
III. Analyse des revêtements des portails de la Porte Mantile et la Porte du Capitole.....	29
1. Les méthodes analytiques	29
2. État de conservation des couches picturales	29

3. Complexité de l'étude stratigraphique.....	30
4. Répartition des couches picturales	30
5. Observation des couches picturales in situ.....	31
6. Analyse des couches picturales.....	31
7. Conclusion	33
IV Protocole de restauration	34
1. Analyse de l'efficacité d'un traitement de consolidation	34
1.1. Objectifs.....	34
1.2. Problématique : faisabilité et durabilité du traitement de restauration	34
1.3. Fondements de la méthode de consolidation de la pierre	35
1.4. Choix du matériau de consolidation de la pierre	36
1.4.1. Introduction.....	36
1.4.2. Propriétés physico-mécaniques de la pierre de Tournai.....	36
1.4.3. Mortiers et coulis d'injection	37
1.4.3.1. Système modulaire à base de silicate d'éthyle	38
1.4.3.2. Système modulaire reposant sur un gel de silice (silice colloïdale)	38
1.4.3.3. Coulis hydrauliques : produits à base de chaux hydraulique dispersée.....	39
A. Gamme LEDAN de Tecno Edile Toscana.....	40
B. Gamme PLM (C.T.S. S.r.l.).....	42
1.4.4. Charges, granulats et additifs.....	43
1.4.4.1. Charges : Aerosil OX50 (Fa. Evonik Industries).....	43
1.4.4.2. Granulats	44
1.4.4.3. Additifs	44
1.5. Étude de l'efficacité des coulis d'injection en laboratoire	45
1.5.1. Introduction.....	45
1.5.2. Critères d'évaluation	45
1.5.2.1. Propriétés de travail	45
1.5.2.2. Caractéristiques de performances	46
1.5.3. Préparation des échantillons et critères d'évaluation	47
1.5.4. Résultats	47
1.5.4.1. Série d'essais 1 : composition des préparations d'essai.....	47
1.5.4.2. Série d'essais 2 : propriétés de travail des préparations finales	50

1.5.4.3. Propriétés de travail : conclusion.....	52
1.5.5. Caractéristiques de performance : conclusion.....	53
1.6. Étude de l'efficacité des coulis d'injection in situ.....	55
1.6.1. Introduction.....	55
1.6.2. Localisation des zones-tests.....	55
1.6.3. Composition des mortiers d'injection.....	57
1.6.4. Méthode par zone-test.....	59
1.6.4.1. Porte Mantile.....	59
1.6.4.2. Porte du Capitole.....	62
1.6.5. Évaluation de la méthode par zone d'essai.....	63
1.6.5.1. Porte Mantile.....	63
1.6.5.2. Porte du Capitole.....	65
1.6.6. Conclusion.....	67
2. Analyse de l'efficacité d'un nettoyage.....	69
2.1. Introduction.....	69
2.2. Méthode.....	70
2.3. Localisation des zones-tests sur la Porte Mantile et les résultats.....	72
2.4. Conclusion.....	77
3. Restauration pilote.....	78
3.1. Introduction.....	78
3.2. Localisation et description des différentes zones de la restauration pilote.....	78
3.3. Méthode utilisée.....	80
3.4. Résultat.....	81
3.5. Reportage photo de la restauration pilot.....	82
4. Protocole de restauration.....	88
V Conclusion finale.....	91
Bibliographie.....	92
Annexe.....	94

I. Identification des portails et numérotation des blocs de pierre

Porte du Capitole

Numéro d'objet IRPA	10059942
Numéro de dossier IRPA	2011.11040
Commune	Tournai
Institution	Cathédrale Notre-Dame de Tournai
Numéro d'inventaire	/
Type d'objet	Portail d'église
Titre de l'objet	Porte du Capitole
Auteur	Inconnu (tailleur de pierre)
Date	Entre 1191 - 1210
Matériaux	Pierre (pierre de Tournai et pierre bleue)



Fig. 1 ©KIK-IRPA, Bruxelles, B15024

Porte Mantile

Numéro d'objet IRPA	10059936
Numéro de dossier IRPA	2011.11041
Commune	Tournai
Institution	Cathédrale Notre-Dame de Tournai
Numéro d'inventaire	/
Type d'objet	Portail d'église
Titre de l'objet	Porte Mantile
Auteur	Inconnu (tailleur de pierre)
Date	Entre 1140 et environ 1270
Matériaux	Pierre (pierre de Tournai et pierre bleue)



Fig. 2 ©KIK-IRPA, Bruxelles, B15024.

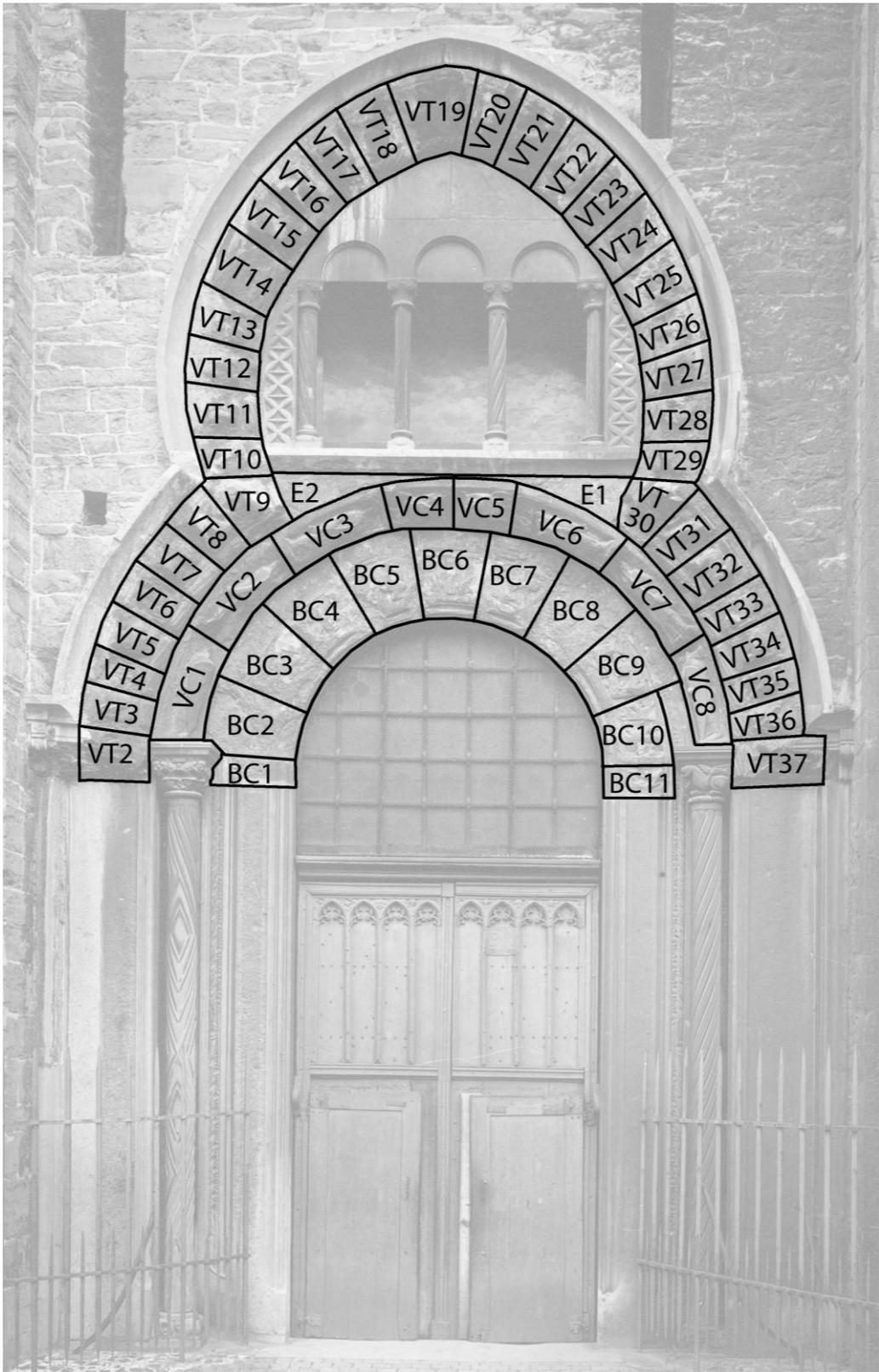


Fig. 3 Numérotation des blocs de pierre de la Porte du Capitole

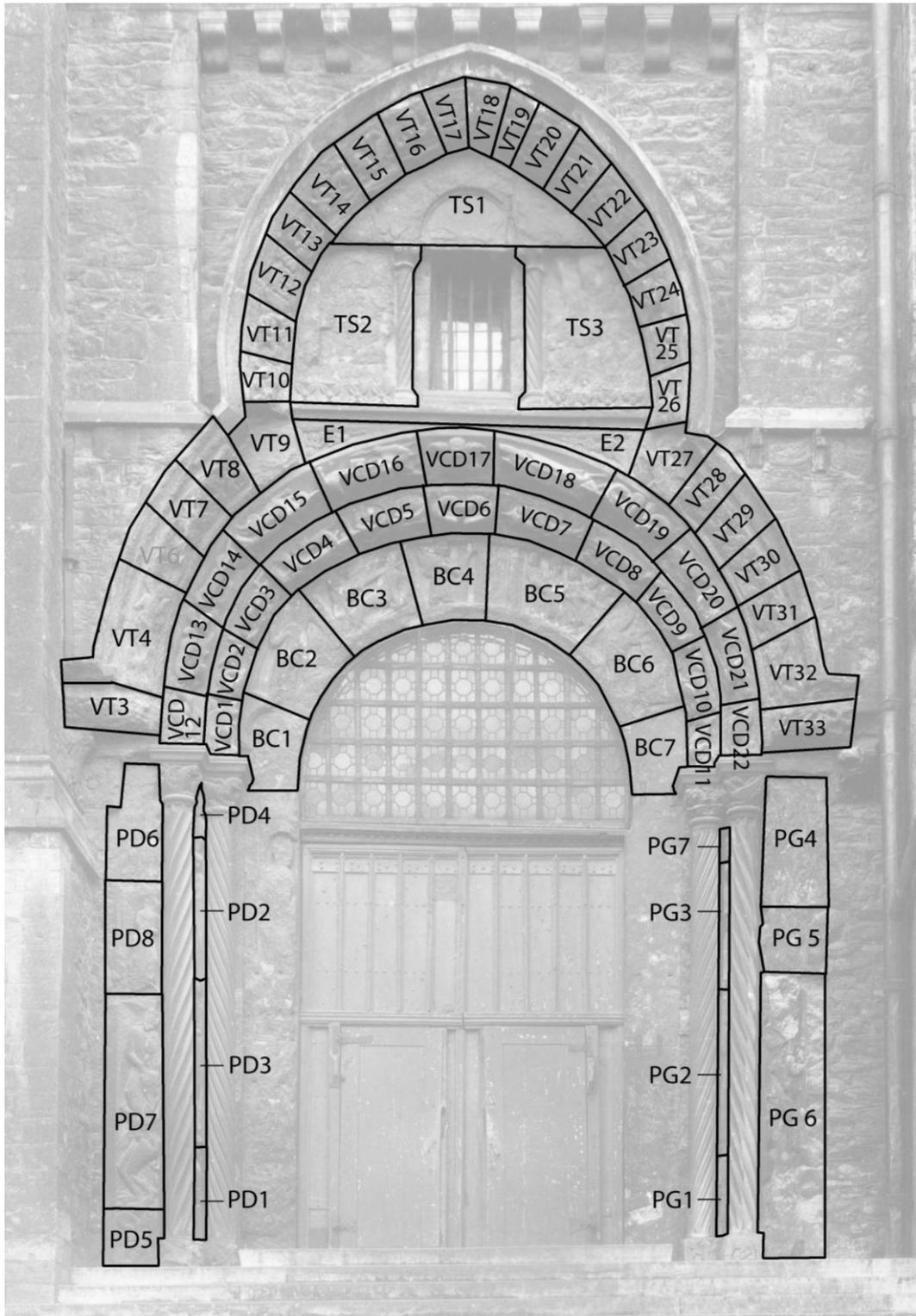


Fig. 4 Numérotation des blocs de pierre de la Porte Mantile

II . Étude de l'état de conservation de la pierre de Tournai

1. Description technique

Les portails Mantile et Capitole sont construits en deux types de pierre : la pierre de Tournai et le Petit-Granit de Maffle, ce dernier résultant de la restauration du XIXe siècle.

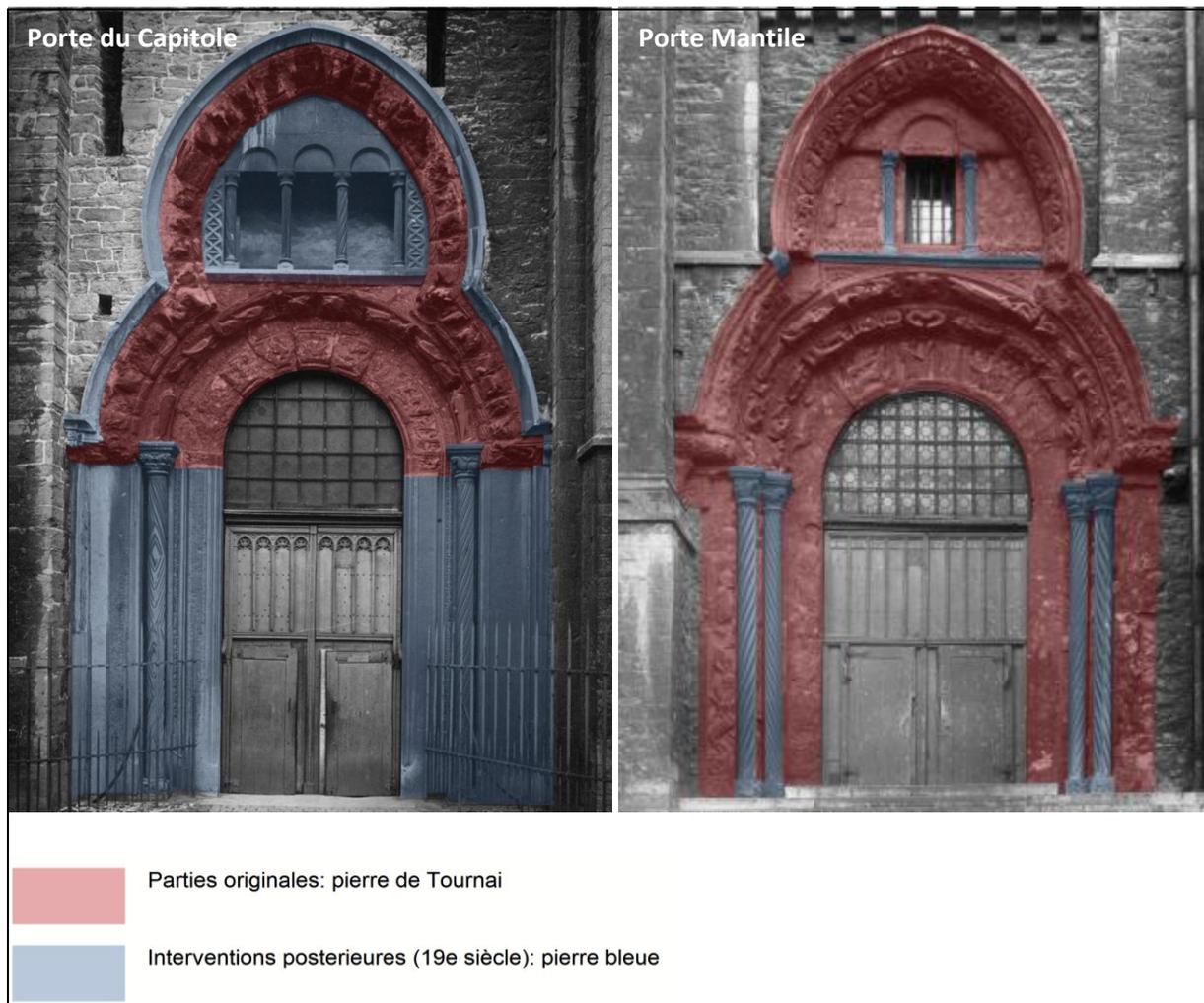


Fig. 5 Cartographie des matériaux utilisés pour les portails : Porte du Capitole (à gauche) et Porte Mantile (à droite).

La pierre de Tournai utilisée pour les portails romans proviendrait de la veine appelée *Fond de la Veine du Bois*, située sur la rive droite de l'Escaut à hauteur de Calonne (VAN DEN NOORTGAETE, 1995). L'analyse pétrographique effectuée par L. Fontaine (IRPA) dans le cadre de cette pré-étude a confirmé ces analyses visuelles¹ : « La pierre de Tournai utilisée pour les portails romans est très

¹ Pour une description détaillée des caractéristiques générales de la pierre de Tournai et, plus spécifiquement, de la pierre de Tournai utilisée pour la construction des deux portails de la cathédrale, voir le rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA, points 2 et 3 (p. 6-8).

finement grenue, peu fossilifère, ne contient pas de crinoïdes et ne renferme pas de cherts. L'ensemble de ces caractéristiques permet de restreindre au Membre de Calonne la provenance des bancs de pierre employés ».

D'après L. Nys, cette pierre de Tournai, appelée « Membre de Calonne », était traditionnellement extraite pour la réalisation de sculptures (NYS, 1993). Elle présente toutefois l'inconvénient d'être l'une des pierres les plus gélives du bassin tournaisien. Jadis appelé « Marbre de Calonne », et plus récemment « Noir de Tournai ». Ce type de pierre de Tournai est considéré comme gélif par le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC, 1986). La nature de cette pierre la rend inadaptée aux emplois à l'extérieur.

2. Histoire technico-matérielle et interventions antérieures

La gélivité de la pierre de Tournai utilisée prend tout son sens lorsque l'on retrace l'histoire matérielle et technique des portails à la lumière des sources littéraires, graphiques et photographiques. Les chercheurs se sont en effet intéressés aux portails latéraux de la cathédrale dès le XIX^e siècle, dans le but d'en comprendre l'iconographie.

2.1. Répertoire de la détérioration des portails romans

2.1.1. Études iconographiques

Très tôt, des auteurs d'études iconographiques ont souligné l'état de conservation avancé et préoccupant des deux portails et l'impact irrémédiable de la dégradation du support sur la lisibilité des motifs sculptés. Le Maître d'Anstaing fait ainsi remarquer, dès 1842-1843, qu'il n'y aura bientôt plus de trace des sculptures originales ; pour lui, la Porte du Capitole n'est déjà plus qu'une ruine, certains fragments de sculpture étant tombés (SCAFF, 1971). Ces remarques datent d'avant la campagne du XIX^e siècle qui visait à restaurer l'ensemble de la cathédrale. Villy Scaff évoque également l'état de ruine des portails, sur lesquels ne subsiste que peu de chose des sculptures originales, ce qui rend toute étude iconographique très difficile (SCAFF, 1971).

Thérèse Van Den Noortgaete réunit dans son *Rapport archéologique préalable à la restauration des sculptures romanes* des lithographies datant de différentes époques sur lesquelles elle observe le mauvais état de conservation des deux portails (VAN DEN NOORTGAETE, 1995).

La première lithographie qu'elle décrit est *La Cathédrale Notre-Dame à Tournai. Vue extérieure, côté sud*, réalisée en 1823 par Basterot de la Barrière (1792-1844) : le mauvais état de la **Porte du Capitole** y est clairement visible et correspond étroitement à la description du Maître d'Anstaing. Thérèse Van den Noortgaete émet trois considérations :

- les piédroits ne semblent plus conserver d'éléments sculptés ;
- les colonnes ont un aspect lisse et ne comportent pas de bases sculptées ;
- les cinq arcades de la partie supérieure semblent aveugles (VAN DEN NOORTGAETE, 1995).



Fig. 6 Porte du Capitole, lithographie de Basterot de la Barrière (1792-1844) (LE BAILLY DE TILLEGHEM, 1981).

En ce qui concerne **la Porte Mantile**, vers la même année 1823 la lithographie *La Cathédrale Notre-Dame de Tournay. Vue extérieure, portail nord* de Louis Hague (1806-1885) montre la situation de ce portail lors de la restauration de la fin du XIX^e siècle :

- les détails des motifs sculptés permettent encore l'identification des scènes toujours présentes aujourd'hui, à l'exception des zones aujourd'hui tout à fait disparues (le piédroit droit par exemple) ;
- la présence d'une surface lisse sur la partie interne des piédroits et les colonnes, ce qui présumerait qu'ils ont subi une intervention.



Fig. 7 Porte Mantile, lithographie de Louis Hague (1806-1885) datant de vers 1823 (LE BAILLY DE TILLEGHEM, 1981).

La description reprise dans le *Recueil de relevés* de Bruno Renard publiée dans la *Monographie de Notre-Dame de Tournay* en 1852 donne un bon aperçu de l'état de conservation de **la Porte Mantile**, énumérant toutes ses parties endommagées et manquantes :

- les zones déjà abîmées et disparues sont les parties extérieures des piédroits, les claveaux inférieurs du bandeau cintré et le tympan supérieur ;
- les zones portant des traces de pertes et de cassures se concentrent au niveau des têtes des personnages de l'archivolte, des motifs du cordon droit et des personnages du bandeau cintré (VAN DEN NOORTGAETE, 1995).

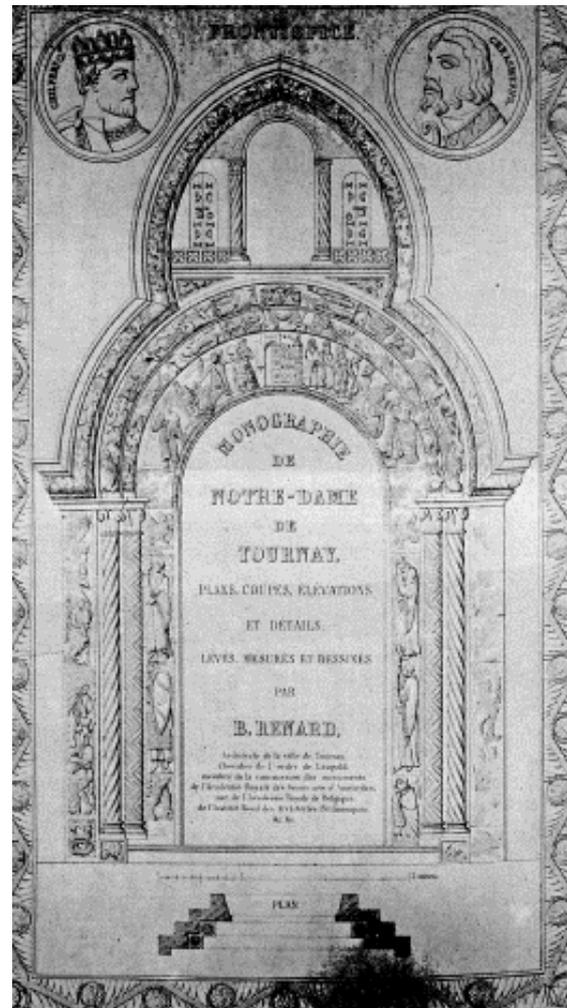


Fig. 8 Porte Mantile, relevé de Bruno Renard datant de 1825 (SCAFF, 1971).

2.1.2. Descriptions littéraires

Le plus ancien texte comportant une description des portails est de la main du Chanoine Waucquier : *La basilique des Nerviens ou descriptions de l'église cathédrale de Tournai*. Datant du **milieu du XVIII^e siècle**, il est conservé aux Archives de la cathédrale. Dans ce texte, l'auteur se concentre sur une description des motifs des sculptures : « ... si l'injure des temps et la malice des hommes n'avaient ensemble tout gâter à ne pouvoir rien démêler dans ce qu'il reste... » (VAN DEN NOORTGAETE, 1995).

En 1842-1843, Le Maistre d'Anstaing publie *Recherches sur l'histoire et l'architecture de l'Eglise cathédrale Notre-Dame de Tournai*. Il y souligne l'état de dégradation avancé des portails romans : « La mauvaise qualité de la pierre qui les compose est telle, qu'avant peu de temps, il ne restera plus de traces de ces antiques ornements, restes précieux de la statuaire romane. (...) Plus exposées aux injures de saisons de leur finesse et de leur légèreté, ces sculptures délicates tombent en ruines de tous côtés » (LE MAISTRE D'ANSTAING, 1842).

Ces documents montrent que la détérioration des portails a commencé très tôt après leur création. Étant donné que ces dégradations sont mentionnées dès le début du 19^e siècle, on peut en effet supposer qu'elles avaient déjà commencé durant les siècles précédents. Le Maistre d'Anstaing écrit d'ailleurs en 1842 :

« les bas-reliefs sont mutilés et portent encore des traces de la barbarie révolutionnaire de 1793... Depuis plus de cinquante années, la maison du Seigneur est restée abandonnée, se dégradant et se détériorant chaque jour davantage » (LE MAISTRE D'ANSTAING, 1842).

2.1.3. Documentation photographique

L'infothèque de l'IRPA rassemble une documentation photographique détaillée de l'ensemble ; la plupart de ces photographies datent de 1943 et ont été réalisées dans le cadre du vaste inventaire effectué pendant la Seconde Guerre mondiale (PIRON, 2012). Elles permettent d'analyser en détail la dégradation de la surface de la pierre et de comparer les états de conservation. On voit ainsi que l'état général des portails à l'époque est fort semblable à celui que l'on connaît en 2013 : les portails présentent déjà les mêmes phénomènes de dégradation et les grands fragments de pierre qui manquent aujourd'hui avaient déjà disparu en 1943.



Fig. 9 Porte Mantile, partie gauche de l'archivolte : état de conservation en 1914-1918 et en 2013. © KIK-IRPA, Bruxelles, A8030 et X049756.



Fig. 10 Porte Mantile, détail de la voussure trilobée : état de conservation en 1943 et en 2013. © KIK-IRPA, Bruxelles, A48491 et X049714.

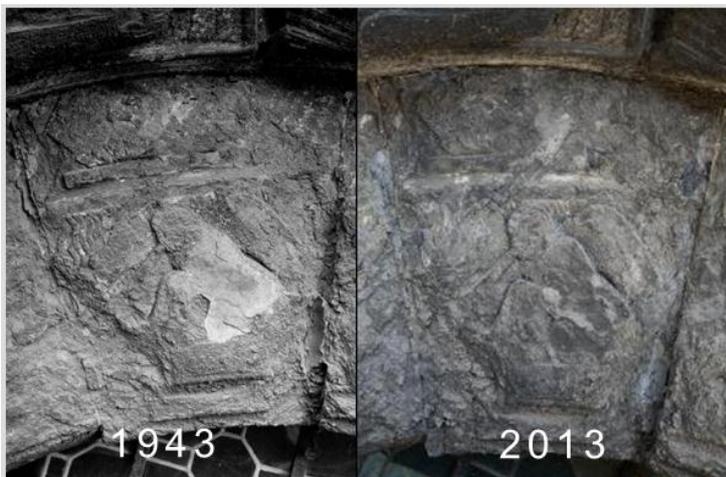


Fig. 9 Porte du Capitole, détail du bandeau cintré : état de conservation en 1943 et en 2013. © KIK-IRPA, Bruxelles, A56331 et X057540.

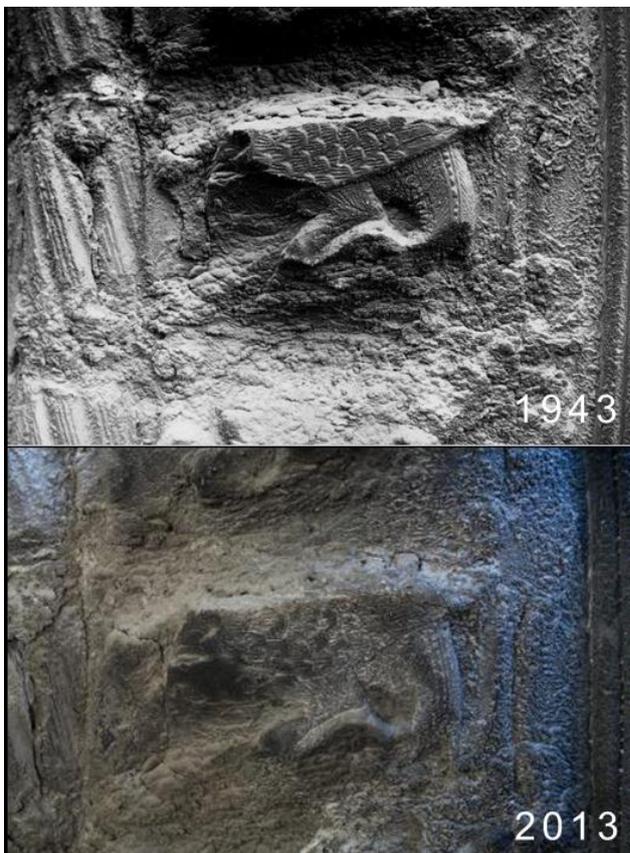


Fig. 10 Porte du Capitole, détail de la voussure trilobée : état de conservation en 1943 et en 2013. © KIK-IRPA, Bruxelles, A56364 et X057568.

2.2. Interventions antérieures

Thérèse Van den Noortgaete (1995) décrit également dans son rapport les détails des interventions effectuées sur les portails latéraux. Voici un bref résumé du chapitre II B de son rapport (VAN DEN NOORTGAETE, 1995).

1.2.1. Interventions antérieures au XIX^e siècle

Thérèse Van den Noortgaete mentionne que les portails ont peut-être subi des interventions avant le XIX^e siècle, mais que nous ne disposons d'aucune information à leur sujet. Selon elle, seuls certains éléments pourraient dater d'une restauration antérieure à celle de 1870 : les pierres de Tournai placées, dans la Porte Mantile, au piédroit interne droit et au premier claveau le surmontant et reliées par des agrafes métalliques et des renforts de plomb.

1.2.2. Interventions datant du XIX^e siècle

Les seules restaurations encore connues à ce jour sont celles conduites au cours du XIX^e siècle par l'architecte Bruyenne à l'initiative de la Commission de Surveillance des travaux de Restauration de la Cathédrale de Tournai instituée en 1837. Ces restaurations ont lieu entre 1848 et 1871 et concernent les deux portails. Elles visent principalement à renouveler les volumes de pierre en pierre de Maffles (cf. fig. 1). Les détails de ces interventions figurent dans les registres de correspondance et les rapports annuels conservés aux Archives de la cathédrale :

A. Porte Mantile

- remplacement des cordons et corniches ;
- redressement de la toiture assurant la protection des sculptures ;
- rénovation des quatre colonnes torsées, avec leurs bases et chapiteaux ;
- renouvellement du premier cordon et des quatre consoles.

B. Porte du Capitole

- réparations nécessaires aux colonnes, à la corniche de la tribune et aux chéneaux de toiture ;
- placement de pierres verticales lisses sur les piédroits dont les sculptures ne sont pas remplacées ;
- renouvellement des archivoltes et des éléments de la galerie couronnant la porte.

1.2.3. Interventions datant du XX^e siècle

Aucune intervention n'est effectuée pendant le XX^e siècle.

3. Causes des dégradations

Le processus de dégradation qui affecte une pierre naturelle comme la pierre de Tournai est un processus continu par lequel la pierre change peu à peu sous l'action de son environnement. Il dépend d'une part de facteurs intrinsèques (propriétés physiques de la pierre) et, d'autre part, de facteurs extrinsèques comme les conditions climatiques (DUSAR, DREESEN & DE NAEYER, 2009).

3.1. Bref aperçu des résultats des analyses effectuées dans le cadre de l'étude

Les causes d'altération ont été étudiées par la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA². Les analyses montrent que le processus de dégradation de la pierre de Tournai utilisée pour la Porte Mantile et la Porte du Capitole dépend bien :

(1) des propriétés physiques de la pierre elle-même :

- la présence de fins lits argileux à l'origine du litage de la pierre calcaire ;
- l'utilisation de blocs de pierres dont les croûtes d'aspect schisteux n'ont pas été soigneusement et suffisamment éliminées pour ne garder que le cœur ou le noyau du banc.

Les lames minces prélevées dans le cadre de l'étude dans les noyaux des bancs révèlent que la pierre est encore en relativement bon état, dans la mesure où aucune fissure n'y est décelée. Quant aux bords des bancs, ils contiennent davantage de fins lits argileux et présentent de multiples fissures. L'orientation globale des fissures suit le litage. Il en résulte la formation d'esquilles, également visibles à l'œil nu³.

Du fait que la nature même de la pierre de Tournai a déjà un effet défavorable sur sa conservation, il est évident que les facteurs externes ne peuvent que renforcer ce processus.

(2) de facteurs extrinsèques et, en particulier, **des conditions climatiques** auxquelles sont confrontées la Porte Mantile et la Porte du Capitole. Le climat joue un rôle capital dans le processus de dégradation. De manière générale, les matériaux pierreux subissent des variations dimensionnelles lorsqu'ils sont soumis à un changement de température, d'humidité relative ou à un contact direct avec l'eau (SIEGSMUND & SNETHLAGE, 2011). Ces facteurs conduisent en effet à une sévère dilatation de la pierre, irréversible.

Le moteur principal de la dégradation a été identifié comme étant la dilatation hydrique, c'est-à-dire par contact direct avec l'eau, lors d'averses ou en cas de mauvaise évacuation de l'eau par exemple. Les changements d'humidité relative (dilatation hygrique) et de température (dilatation thermique) entraînent une dilatation moins prononcée⁴. Le gonflement osmotique induit par la présence des particules argileuses illitiques est en grande partie responsable de cette forte dilatation hydrique⁵.

² Pour une description détaillée des causes de dégradation de la pierre de Tournai, voir *Ibid.*

³ *Ibid.*, p. 18-23.

⁴ *Ibid.*, p. 60-63.

⁵ *Ibid.*, p. 62-63

3.3. Influence du mode de mise en œuvre des portails

Le positionnement des blocs de pierre a également un impact sur la dégradation des portails. Cela apparaît clairement lorsque l'on documente graphiquement, à l'aide d'un *mapping*, les lits de carrière des différents volumes de pierre dans les deux portails.

Trois types de poses peuvent être relevés, en fonction de l'orientation du litage : soit en suivant le lit de carrière, soit en délit perpendiculairement à la courbure d'arche, soit en délit parallèlement à la surface sculptée. De façon générale, il semble que les lits de carrière des blocs de pierre n'ont pas été pris en compte lors de la construction des portails et de la réalisation des sculptures. La pierre naturelle a probablement été utilisée de la façon qui était la plus facile pour le sculpteur. Or ce choix ne devrait pourtant rien avoir d'arbitraire.

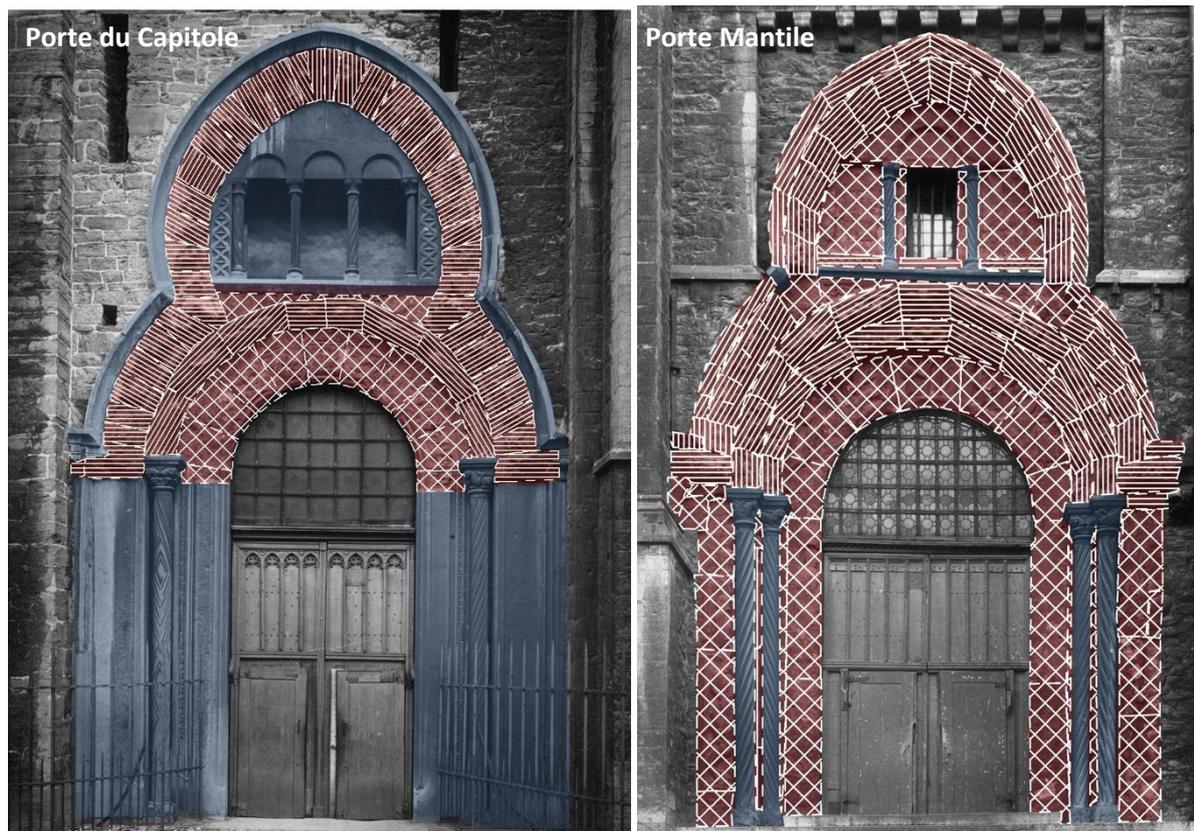


Fig. 12 Cartographie du mode de mise en œuvre des blocs originaux (en rouge). L'orientation des hachures montre le litage et les hachures croisées indiquent la pose en délit avec le lit en face (parallèlement à la surface sculptée).

La méthode de construction des deux portails est similaire en bien des points. Ainsi, dans les deux cas, les arcades des voûtures trilobées sont construites à partir de petits volumes de pierre. Pour la Porte du Capitole, ces pierres sont placées en délit perpendiculairement à la courbure d'arche, ce qui induit une modification dans l'orientation du lit de carrière : à hauteur des claveaux, les pierres sont posées en suivant le lit de carrière, mais l'orientation du lit s'inverse au fil de l'inclinaison et au sommet de la voûture les pierres sont posées en délit. Les arcades de la Porte Mantile ont été construites exactement de la façon inverse : les blocs de pierre ont été placés à la base en délit mais au sommet les pierres suivent le lit ; à nouveau, il y a une évolution.

Là où de plus longs, et souvent de plus minces, blocs de pierre étaient nécessaires, pour les bandeaux cintrés par exemple, la pierre de Tournai a été placée en délit parallèle au parement, probablement parce que l'exploitation de plus grands volumes orientés selon le lit de carrière est difficile, vu la forte stratification de la pierre. Du fait des couches plus argileuses présentes entre les bancs,

correspondant à des zones de faible résistance, il n'était pas possible de disposer de blocs ayant une épaisseur plus importante que celle du banc.

À l'heure actuelle, on pense que la pierre de Tournai ne peut être utilisée en extérieur que si elle est placée en suivant le lit de carrière. Toute autre position, et principalement le positionnement en délit, favorise l'altération de la pierre et provoque un délitage important (CAMERMAN, 1944). Comme nous l'avons déjà expliqué plus haut, le lit de carrière n'a pas été pris en compte lors de la construction des portails. Cela a provoqué de nombreux dégâts sur les blocs de pierre posés en délit, et des pertes très importantes. Toute la zone inférieure de la Porte du Capitole, le tympan supérieur et le cordon-larmier, par exemple, ont été remplacés au XIX^e siècle. On peut supposer que ce partie a ont été construites de la même façon qu'à la Porte Mantile, à savoir en délit parallèle à la surface sculptée. Ce sont également ces parties de la Porte Mantile qui présentent une perte de matière importante.

4. Étude macroscopique des détériorations de la pierre de Tournai des portails : typologie

L'évaluation de l'état de conservation de la pierre requiert tout d'abord une observation à l'œil nu des différents types de détériorations. Les altérations de la pierre ainsi observées peuvent être décrites à l'aide d'une terminologie spécifique basée sur des critères morphologiques. L'expérience a montré que l'utilisation d'une terminologie disparate pouvait être à la source de nombreuses confusions. Afin d'éviter ces problèmes, l'*ICOMOS International Scientific Committee for Stone* (ISCS) a publié en 2008 un glossaire illustré des formes d'altération de la pierre. Ce glossaire permet d'établir un langage commun entre conservateurs, restaurateurs et scientifiques (VERGES-BELMIN & VALLET, 2011).

Les termes du glossaire sont classés en six catégories : termes généraux, fissures et déformations, détachement, figures induites par une perte de matériau, altération chromatique et dépôt et, enfin, colonisation biologique. Chacune de ces catégories comprend des sous-types spécifiques et des divisions (ICOMOS-ISCS, 2008).

Pour la classification des formes d'altération présentes sur la Porte Mantile et la Porte du Capitole, nous avons adapté ces six grandes familles de termes aux formes les plus présentes sur les deux portails et avons ajouté des sous-catégories.

4.1. Fissures et déformations

Des microfissures, des fentes et des clivages sont présents çà et là sur les volumes de pierre, en suivant les plans de faiblesse de la pierre tels que les couches argileuses.



Fig. 14 Microfissures c'est-à-dire des fissures d'ouverture inférieure à 0,1 mm (Porte Mantile, tympan supérieur).



Fig. 15 Fente d'une largeur supérieure à 1 mm (Porte Mantile, tympan supérieur).



Fig. 13 Développement d'une cassure le long des plans de faiblesse lorsque ces éléments structuraux sont orientés verticalement (Porte Mantile, bandeau cintré).

4.2. Détachements

Des boursouflures se manifestent sur les représentations figuratives, notamment sur le bandeau cintré de la Porte Mantile. Cela signifie qu'une couche superficielle de la pierre se détache sous la forme d'un bombement creux plus ou moins fissuré et de forme sub-hémisphérique. Ce détachement est indépendant de la structure interne de la pierre.

Des éclatements dus à des pressions internes de la pierre peuvent également être observés un peu partout.



Fig. 17 Boursouflures visibles à l'œil nu sur une des sculptures (Porte Mantile, bandeau cintré).



Fig. 16 Éclatement de la pierre (Porte Mantile, bandeau cintré).

La majorité des pertes de pierre sont provoquées par le délitage (ou délamination) de la pierre. Le glossaire décrit le délitage comme un détachement selon une orientation préexistante de la pierre, qui conduit à la dissociation d'une ou plusieurs couches de pierre (ICOMOS-ISCS, 2008).



Fig. 18 Délitage superficiel (Porte du Capitole, bandeau cintré).



Fig. 19 Délitage de 1 à 2 cm de profondeur.



Fig. 20 Délitage de plus de 2 cm de profondeur.

4.3. Altérations chromatiques et dépôts

Des croûtes noires se sont développées sur les surfaces protégées de l'impact direct de la pluie battante et des ruissellements d'eau. Cela est particulièrement visible aux endroits les plus protégés de la Porte Mantile : d'épaisses croûtes noires se sont formées.

Deux types d'encroûtements noirs sont présents : des films ou couches superficielles cohérentes d'épaisseur millimétrique homogène et des croûtes bourgeonnantes.



Fig. 21 Croûte noire sous forme de film millimétrique (Porte du Capitole, bandeau cintré).



Fig. 21 Croûte noire bourgeonnante (Porte Mantile, voussure trilobée).

Les deux types de croûtes noires sont de couleur grise à noire, couleur habituelle des croûtes de gypse qui apparaissent sur des bâtiments en milieu urbain. Cette teinte noire résulte de l'incorporation de particules de différents polluants de l'air – cendres volantes, suie, poussière minérales, oxydes de fer ou oxyhydroxydes – et de polluants organiques – réactions de combustion des moteurs à combustion essentiellement (SIEGESMUND & SNETHLAGE, 2011). Laurent Fontaine fait remarquer que la formation de croûtes de gypse a vraisemblablement dû prendre de l'ampleur au XIX^e siècle⁶

⁶ *Ibid.*, p. 16

Les deux types d'encroûtements noirs adhèrent plus ou moins fortement à la pierre sous-jacente. Les couches de gypse millimétriques suivent la forme originale de la pierre. Les échantillons prélevés dans le cadre de cette étude⁷ révèlent une stratigraphie dans la formation des deux types de croûtes.

La structure de la croûte se compose de :

- (1) le support pierreux – (2) une zone de transition – (3) le dépôt de gypse en surface

Tableau 1 : Résumé des résultats d'analyses de la structure des croûtes noires présentes⁸

	FILM MILLIMÉTRIQUE	CROÛTE BOURGEONNANTE
Support pierreux état de conservation :	relativement saine	plus ou moins fortement fragmentée (du gypse est régulièrement observé dans les fissures)
Zone de transition/sulfatation - état de conservation de la surface originale : - limite entre zone de sulfatation et dépôt de gypse : - épaisseur de la sulfatation :	préservation de la texture originelle de la pierre correspond à la surface originale de 50 à 200 µm	disparition de la surface originale suite au processus de fragmentation de la pierre n'est pas tranchée plusieurs millimètres
Dépôt de gypse Composition :	minéralogique : gypse + impuretés	minéralogique : gypse + calcite (pierre) + impuretés

Des dépôts et souillures sont également apparents, mais moins fort. Des accumulations superficielles de matériaux exogènes, comme des poussières et des fientes, forment une couche peu cohérente et d'épaisseur variable à la surface.



Fig. 22 Dépôt de poussières formé sur les sculpture du piédroit (Porte Mantile).

⁷ Pour une description détaillée de l'analyse des encroûtements noirs, voir *Ibid.*, point 2.5, p. 24-32.

⁸ *Ibid.*, point 2.5, p. 24-32.

4.4. Colonisation biologique

Une colonisation biologique est présente sous forme d'algues vertes, de lichens blancs et de mousses. Ils apparaissent surtout sur le cordon-larmier de la Porte Mantile, en raison de sa forte dégradation.

Les lichens sont les colonisateurs les plus courants de la pierre calcaire. Ils apparaissent sur chaque pierre dont la surface n'est pas nettoyée régulièrement. Il est difficile de déterminer si cette colonisation contribue à la dégradation de la pierre.

L'examen visuel à l'œil nu des mousses effectué par le département Laboratoires de l'IRPA a permis de déterminer qu'il s'agit de *Tortula Muralis*, le type de mousse le plus répandu sur les bâtiments⁹.

Pour un examen plus détaillé voir le rapport de la Cellule Monuments.¹⁰



Fig. 23 La colonisation biologique sous forme de lichens, mousses et algues vertes du cordon larmier (Porte Mantile)

⁹ *Ibid.*, p. 15-17

¹⁰ *Ibid.*, p. 15-17

5. Étude de l'état de conservation des portails

Les phénomènes d'altération de la pierre peuvent se produire aussi bien séparément que conjointement. L'intensité de la dégradation varie souvent selon le bloc de pierre et selon les endroits du portail. Elle varie également d'un portail à l'autre. Une fois tous les phénomènes d'altération identifiés, le type et l'intensité de chacun d'eux ont été représentés schématiquement au moyen d'un *mapping*. Celui-ci a permis d'avoir un aperçu détaillé des différents types de dégâts et de leur fréquence (FITZNER, HEINRICH & LA BOUCHARDIERE, 2002).

5.1. Analyse des formes d'altération de la pierre : objectifs et méthode

L'analyse des formes d'altération de la pierre poursuit plusieurs objectifs. Premièrement, elle permet de déterminer l'état de détérioration actuel de la pierre, point de départ de toute mesure de conservation-restauration. Deuxièmement, elle permet d'évaluer la façon dont les formes d'altération sont réparties sur les portails et de localiser les zones les plus abîmées. Cela peut permettre de comprendre les causes et les mécanismes de détérioration ; par exemple, le côté droit de la voussure trilobée de la porte de Capitole est une zone affectée par de nombreuses pertes de matériau du fait d'un délitage, ce qui peut indiquer un contact direct avec des écoulements d'eau sous la forme de pluie, de ruissellement ou d'infiltration. Troisièmement, l'analyse des formes d'altération donne un aperçu clair de l'étendue et de l'intensité de la détérioration, prémice de tout plan d'action et de toute estimation des coûts d'un éventuel traitement de conservation-restauration (SIEGESMUND & SNETHLAGE, 2011).

Pendant l'étude de l'état de conservation de la Porte Mantile et de la Porte du Capitole, un *mapping* détaillé de chaque volume de pierre a ainsi été réalisé de façon systématique. Les types de dégâts les plus fréquents ont ensuite été rassemblés sur un *mapping* de l'ensemble des portails. Ces mappings ont été créés avec le logiciel Metigo MAP 3.0, un programme spécialement conçu par la firme Fokus GmbH Leipzig pour les historiens du bâti et les conservateurs-restaurateurs. Il permet la création de graphiques numériques et, par exemple, la localisation d'altérations dans une image mise à l'échelle.

Les *mappings* de chaque volume de pierre se trouvent en annexe de ce dossier.

5.2. Distribution des formes d'altération

Étant donné que la dégradation se manifeste dans les blocs de pierre d'origine, la pré-étude s'est concentrée principalement sur ces éléments. Globalement, l'état de conservation des parties originales des deux portails, ou de ce qui en subsiste, est très préoccupant. Les volumes de pierre peuvent être répartis en différentes catégories selon la gravité et l'ampleur de la dégradation et de la perte de matériau.

A. La Porte du Capitole

En ce qui concerne la Porte du Capitole, les blocs de pierre les mieux conservés se trouvent tout en haut du portail, au sommet de la voussure trilobée et sur l'archivolte.



Fig. 24 Détail de la zone avec les sculptures les mieux conservées de la Porte du Capitole.

Les parties de pierres d'origine qui subsistent encore correspondent au noyau plus compact et sain du banc de pierre. En général la surface de la pierre autour de ce noyau est marquée soit par un délitage profond soit par une croûte de gypse importante.

De l'autre côté du portail, plus exposé aux intempéries, les volumes de pierre sont en moins bon état et les reliefs sculptés d'une grande partie de la voussure trilobée ont disparu. Les parties d'origine encore présentes des volumes de pierre sont les bandes répétitives torsadées. Les éléments les plus figuratifs ont disparu suite au délitage. Sur certains volumes de pierre, aucune trace ni aucun contour de la sculpture d'origine n'a subsisté et jusqu'à 90 % de la surface originale de la pierre a disparu.



Fig. 25 Détail de la voussure trilobée (bloc de pierre VT20) : la distinction entre le noyau compact et les bords schisteux est bien visible.



Fig. 26 Détail de la voussure trilobée (bloc de pierre VT18) : seule la bande répétitive torsadée est encore présente.

B. La Porte Mantile

Les sculptures d'origine de la Porte Mantile sont mieux conservées, du fait de l'orientation du portail.



Fig. 27 Détail de la partie inférieure du côté droit de la voussure trilobée : contraste entre les sculptures originales encore présentes et la perte de sculpture à l'extérieur de la voussure.



Fig. 28 Détail montrant la perte de sculpture dans la partie supérieure du portail.

Toutefois, malgré le bon état de conservation général du bandeau cintré, certains volumes de pierre sont très altérés. On observe beaucoup de pertes de pierre par délitage de forme régulière, principalement sur le fond.

Plus on s'approche du centre du bandeau cintré, plus les sculptures originales sont conservées : c'est au centre du bandeau que se trouvent les plus beaux exemples de la sculpture originale. Dans les zones les plus exposées aux intempéries, on trouve cependant des volumes de pierre où aucune trace ni aucun contour de la sculpture d'origine n'a subsisté.



Fig. 29 Volume de pierre BC3 : un bel exemple de sculpture romane encore conservé.

C. GÉNÉRALITÉS

En ce qui concerne les dégâts observés sur l'ensemble des deux portails, l'étude a montré que les formes d'altération qui apparaissent le plus souvent sur la pierre de Tournai sont le délitage et la formation de croûtes noires.



Fig. 30 Cartographies générales des phénomènes de délitage et de formation de croûtes noires avec les différentes catégories qui montrent l'ampleur et l'intensité du phénomène.

Détachement : le délitage

Le délitage est le phénomène le plus répandu sur la pierre de Tournai de la Porte Mantile (présent sur 43 % de la surface originale), et de la Porte du Capitole (13,5 %). En fonction de la profondeur observée à l'œil nu, trois catégories de délitage peuvent être distinguées : délitage superficiel (<1cm), délitage de 1 à 2 cm et délitage supérieur à 2 cm. Ces catégories sont toutes trois présentes sur les deux portails, à raison respectivement de 3,6 %, 4,5 % et 5,4 % pour la Porte du Capitole et de 6,4 %, 19,3 % et 17 % pour la Porte Mantile.

Altération chromatique et dépôt : croûte noire

Comme c'est généralement le cas, les croûtes noires se sont développées sur les surfaces protégées de la pluie battante et du ruissellement des eaux. Sur la Porte Mantile, 54 % de la pierre de Tournai originale est couverte d'une croûte de gypse. Trois sortes différentes peuvent être distinguées, à savoir une croûte noire framboïdale (8 %), une croûte noire de 2 à 10 mm d'épaisseur (7,5 %) et une croûte noire de moins de 2 mm d'épaisseur (38,5 %). En ce qui concerne la Porte du Capitole, 28 % de la surface originale est couverte par une croûte noire dont 7 % d'une croûte noire framboïdale, 5 % d'une croûte noire de 2 à 10 mm d'épaisseur et 16 % d'une croûte noire mince. Dans les zones couvertes de ces croûtes de gypse, le délitage est absent ou se manifeste en tout cas dans une bien moindre mesure. Il est cependant tout à fait possible que la pierre de Tournai soit également altérée sous cette croûte de gypse et que ce soit elle qui maintienne la cohésion de la pierre naturelle en surface.

Comme mentionné plus haut, les analyses des croûtes noires effectuées par le département Laboratoires de l'IRPA¹¹ montrent que la pierre en-dessous des croûtes noires millimétriques est en relativement bon état. En ce qui concerne les croûtes noires de plus de 2 mm d'épaisseur (dépôts bourgeonnants, la zone de transition/sulfatation est plus épaisse et présente une cohésion très limitée. La pierre en-dessous de la croûte est fortement dégradée et fragmentée. Ceci confirme l'hypothèse comme quoi c'est la croûte de gypse qui assure la cohésion apparente de la pierre.

¹¹ *Ibid.*, p. 21-28.

5.3. État actuel de la détérioration : localisation et ampleur des zones les plus dégradées

En résumé, la combinaison de la mauvaise qualité de la pierre de Tournai utilisée – qui entraîne un important délitage et de multiples fissures et cassures –, de l'orientation des blocs de pierre – principalement en délit –, et des conditions climatiques défavorables (vents dominants, pluie battante et ensoleillement direct pour la Porte du Capitole) est à l'origine de l'état de dégradation avancé et des importantes pertes de matériau qu'ont subies les deux portails.

Le *mapping* général des sculptures encore présentes sur les deux portails met en évidence trois catégories : premièrement, des sculptures d'origine bien lisibles, deuxièmement des surfaces de pierre où sont encore visibles quelques éléments amorphes de la sculpture d'origine, mais ces éléments ne sont toutefois plus lisibles et il est dès lors difficile de deviner ce qu'ils représentaient à l'origine, et troisièmement des surfaces de pierre d'origine disparues, en conséquence de quoi aucune forme ni aucun contour de la sculpture n'a subsisté.



Fig. 31 Cartographies générales montrant la localisation et l'ampleur des zones les plus dégradées : vert= sculptures d'origine bien lisibles ; jaune= des surfaces de pierre où sont encore visibles quelques éléments amorphes de la sculptures d'origine ; rouge= des surfaces disparues de la pierre d'origine .

Malheureusement, nous pouvons constater que, pour l'ensemble des portails, seule une partie très réduite de la surface de la pierre d'origine comporte encore de fins détails de la sculpture romane (fig. 14) : à peine 21 % pour la Porte Mantile et 5 % pour la Porte du Capitole.

La Porte du Capitole présente l'état de dégradation le plus avancé : des 34 % qui subsistent de la pierre de Tournai, 24 % ont perdu leur surface originale sculptée. En revanche, la Porte Mantile se compose à 85 % de pierre de Tournai dont seuls 15 % de la surface originale ont été perdus. En ajoutant à cette perte les interventions postérieures au XIX^e siècle, il ne subsiste que 10 % de la sculpture originale pour la Porte du Capitole et 28 % pour la Porte Mantile. Ce qui signifie que les portails ne présentent aujourd'hui qu'une maigre partie de leur aspect original.

5.4. Conclusion : approche théorique et éthique du traitement de conservation-restauration

La conservation des monuments historiques suppose toute une variété de réflexions philosophiques et un choix entre plusieurs techniques de conservation-restauration en fonction de leur bénéfice relatif, de leur importance et de leur applicabilité au patrimoine concerné. Lorsqu'un bâtiment fait l'objet d'un projet de conservation-restauration, certains principes de conservation peuvent être pertinents et d'application. L'examen et le respect de ces principes de base peuvent orienter les conservateurs dans leur réflexion et les aider à trouver des solutions satisfaisantes au niveau technique (BRONSKI & GABBY, 1999).

La Charte de Venise, rédigée en 1964 par le Conseil international des musées, forme la base de l'approche éthique du traitement de conservation-restauration des portails romans de la cathédrale Notre-Dame. L'objectif d'une restauration est la conservation d'une œuvre d'art en sa qualité de témoignage historique. Aussi bien dans le cas d'un traitement de conservation que de restauration, il est important de conserver le cadre historique et de respecter l'histoire matérielle de l'œuvre (ICOMOS, 1965).

Mais on peut se demander dans quelle mesure cela est possible. Peut-on respecter l'histoire matérielle de la Porte du Capitole alors que 90 % du matériau d'origine a disparu et que seul subsiste un dixième des représentations figuratives d'origine ? Il faudrait dans ce cas pouvoir accepter l'aspect actuel du portail et l'illisibilité qui en découle.

À première vue, la solution idéale pour la préservation des deux portails est un traitement de restauration qui viserait une stabilisation complète du support. Compte tenu de l'état actuel des deux portails, l'enjeu principal est de trouver une méthode de traitement adéquate pour tous les types de dégâts, conforme aux règles professionnelles de l'ECCO (COUNCIL OF EUROPE, 2000).

III. Analyse des revêtements des portails de la Porte Mantile et la Porte du Capitole

C'est sans doute en raison « de leur état de dégradation » que Le Maistre d'Anstaing, dans sa monographie consacrée à L'Église Cathédrale de Notre-Dame de Tournai, publié en 1842, ne mentionne aucune trace de revêtements sur les porches du nord et du midi. (LE MAISTRE D'ANSTAING, 1842).

Par contre, à la suite de nos premières observations en 2012 nous pouvons souligner que les figures et bas-reliefs de ces portails étaient autrefois rehaussés de différents revêtements dont on aperçoit encore très distinctement les traces.

Ces témoins de couches de finitions pour protéger et/ou embellir l'ornementation sont aujourd'hui difficilement imaginables : la crasse et les croûtes de gypse qui recouvrent actuellement les reliefs, font penser que la surface sculptée originale et ses éventuelles décorations ont complètement disparu. Le caractère irrégulier de la croûte de gypse grise et les lacunes dans les visages des personnages ont l'aspect d'une pierre naturelle érodée.

Les observations minutieuses accompagnées d'analyses chimiques de prélèvements microscopiques par le Laboratoire des œuvres polychromées¹² ont permis d'identifier la composition des pigments, d'établir une stratigraphie des couches picturales et d'examiner les techniques utilisées pour appliquer les peintures sur la pierre de Tournai.

1. Les méthodes analytiques

L'analyse des couches picturales a, dans un premier temps, été réalisée in situ à l'aide de lunettes binoculaire permettant une observation à un grossissement de x50.

Ensuite, des microéchantillons ont été prélevés dans les zones protégées par des intempéries, au fond des reliefs, pour l'étude de la composition de ces couches picturales (pigments, liants), et ce afin de préciser les techniques de réalisation de ces couches. Cette opération était délicate car les surfaces peintes qui comportent toute la stratigraphie des couches sont de petite taille et leur fragilité n'a permis que le prélèvement de la taille d'une tête d'épingle. Les analyses au laboratoire de l'IRPA ont été effectuées sous la coordination de Jana Sanyova¹³.

2. État de conservation des couches picturales

L'aspect général de la surface des éléments sculptés des portails est très hétérogène. Les couches picturales sont entièrement recouvertes de croûtes noires indurées et épaisses.

De graves phénomènes de dégradation des couches picturales sont associés aux croûtes noires.

La cause principale de la dégradation est due à leur haute teneur en gypse. Sel assez soluble dans l'eau, il participe activement au processus cyclique de dissolution et de cristallisation. Le gypse se trouve à l'interface entre les croûtes noires et les couches picturales : lors de la cristallisation, les contraintes exercées entraînent la chute des croûtes noires et avec elles, une partie de la couche picturale. Il en résulte d'importantes lacunes et de nombreux soulèvements. Sur les zones à nouveau

¹² Pour une description détaillée des analyses des couches picturales voir le rapport de la Laboratoire des œuvres polychromées de l'IRPA.

¹³ Ibid.

exposées aux intempéries et à la pollution atmosphérique, de nouvelles croûtes noires se forment et le processus recommence.

Lorsque les couches picturales ne sont pas dissimulées par des croûtes noires, l'empoussièrément les ternit.

3. Complexité de l'étude stratigraphique

La crasse et la poussière, se confondant intimement avec les croûtes noires, a nécessité une grande vigilance lors de l'examen. L'épaisseur et la dureté des croûtes noires recouvrant les revêtements rendent l'étude stratigraphique difficile. La présence de la couche la plus ancienne (originale ?), conservée uniquement dans les creux difficilement accessibles, a également accru la difficulté du travail.

4. Répartition des couches picturales

En dépoussiérant les reliefs à l'aide de pinceaux et d'un aspirateur, des traces de plusieurs couches de peintures blanches apparaissent sur une grande partie des reliefs.

On distingue deux types de peinture :

La plus ancienne est appliquée sur le support en pierre de Tournai. Nous l'avons observée uniquement dans les creux profonds, protégés des intempéries et d'un éventuel décapage causé par l'homme. Elle se compose d'une fine couche grisâtre, compacte et dure, vraisemblablement liée à l'huile.

Toutes les autres couches de peinture surmontent la couche précédente quand elle est présente. Elles sont donc appliquées postérieurement. Elles se composent de différentes couches blanches, très peu liée, friables, de type peinture à la chaux.

La répartition de ces couches de peinture à la chaux et l'aspect des cassures permettent de proposer une succession des principaux événements qui ont déterminé l'état actuel de portails.

L'absence de peinture est visible sur les plans de fracture, situés généralement au niveau des têtes des personnages. Ces manques au niveau de têtes semblent plutôt résulter de cassures volontaires que de l'action des intempéries (figures 33 et 34). Ainsi, les couches de peinture s'arrêtent net au bord du plan de fracture (figure 35). On peut en conclure que l'application des couches de peinture à la chaux est antérieure aux mutilations.



Fig. 33 Détail du manque à la tête de la sculpture de la voissure trilobée (Porte du Capitole).



Fig. 34 Détail du manque à la tête de la sculpture de la voissure trilobée (Porte du Capitole).



Fig. 35 Détail des couches de peinture qui s'arrêtent net au bord du plan de fracture (Porte du Capitole).

Si les manques au niveau des têtes correspondent aux mutilations commises par les révolutionnaires de 1793 (LE MAISTRE D'ANSTAIN, 1842), toutes les couches de peintures seraient antérieures à cette époque.

5. Observation des couches picturales in situ

Les couches blanches qui apparaissent sous la crasse et la poussière qui ont recouvert toute la surface des portails, sont des badigeons à la chaux, peu liés qui datent probablement de l'époque classique du XVII^e et XVIII^e siècle. Le nombre de couches à la chaux est indéfinissable car elles ont la même composition, sont peu liées et ne comportent pas de couches de crasse dissimulable.

En effet, ces portails, très exposés aux intempéries et aux agressions de l'homme (n'oublions pas le saccage de Tournai en 1566), ont été souvent repeints.

Par contre, les couches plus anciennes (originales) ont quasi totalement disparu. Uniquement au fond des plis, protégée des manipulations tel que des décapages par l'homme et des intempéries, nous avons pu observer des traces d'une fine couche grisâtre sous les couches des badigeons.

6. Analyse des couches picturales

Les analyses sont réalisées sur les prélèvements des reliefs VCD10, BC3 et VCD5 du bandeau cintré de la Porte Mantile. Seules les couches qui peuvent correspondre à la première intervention (intervention originale ?) ont été analysées par le Laboratoire des œuvres polychromées¹⁴. Les couches à la chaux n'ont pas été analysées.

¹⁴ Ibid.



Fig. 36 Localisation des prrélèvements
 Dans ces trois cas la stratigraphies observée sous microscope optique est semblable.

Les trois coupes transversales, n°2,3 et 5, issues de leur prélèvement respectif (fig.36) sont similaires. Elles se composent non pas d'une mais de deux couches :

La première couche posée directement sur le support en pierre de Tournai est de couleur gris foncé et se compose principalement de grosses particules de silice ainsi que de carbonate de calcium¹⁵.

Nous ignorons la présence de couches semblables sur d'autres portails en pierre.

Peut-être que cette couche riche en quartz a une fonction liée à l'utilisation de la pierre de Tournai? On peut imaginer que cette sous-couche fait en sorte que les couches supérieures adhèrent mieux au support lisse et compacte en pierre de Tournai.

La sous-couche gris foncé est surmontée d'une couche de couleur gris clair. Les analyses effectuées par SEM-EDX par le Laboratoire des œuvres polychromées sur les coupes issues des échantillons n°2 et 5 révèlent que cette couche est faite de grains blancs d'une granulométrie variable et de grains noirs dont la morphologie évoque le noir de charbon de bois. Son épaisseur varie de 70 à 350µm en fonction de sa localisation, certainement due au relief du support¹⁶.

15 Ibid.

16 Ibid.

Elle est composée de blanc de plomb et de carbonate de calcium, mélangé à un pigment noir de carbone. L'analyse FT-IR, effectuée par le Laboratoire des œuvres polychromées, de l'échantillon n°2 indique la présence d'un liant organique gras¹⁷.

La composition de la couche gris clair est similaire à la majorité des préparations qui ont été identifiées sur un grand nombre de portails romans et gothiques polychromés : une préparation à base de céruse ou blanc de plomb, parfois en association avec du carbonate de calcium.

Les résultats des études stratigraphiques entreprises sur de nombreux portails romans montrent en effet qu'ils étaient décorés de couches colorées, à savoir les couleurs bleue, verte, rouge, orangée, jaune, les carnations, le noir et le blanc ainsi que les décors métalliques. (PALLOT-FROSSARD, 2000)

7. Conclusion

Ce n'est qu'au terme d'un examen approfondi que la présence de revêtements a été mise en évidence. Les observations et analyses des portails romans septentrionale et méridionale de la cathédrale de Tournai ont révélé que ceux-ci ont eu plusieurs revêtements de peinture.

Les couches les plus anciennes observées sont probablement des sous-couches du revêtement original. Jusqu'à présent nous n'avons pas observé une éventuelle couche de finition originale.

Ces couches ont été recouvertes à plusieurs reprises par des couches blanches à la chaux.

L'importance des restes de couches de peinture mis au jour devrait permettre une meilleure compréhension de la composition des couches de finition s'ajoutant à l'œuvre sculptée.

Cependant, le caractère très lacunaire des témoins en place et la présence des repeints rendent impossible la compréhension de l'aspect original des portails.

¹⁷ Ibid.

IV Protocole de restauration

1. Analyse de l'efficacité d'un traitement de consolidation

1.1. Objectifs

L'atelier de conservation-restauration des sculptures en pierre a mené une recherche expérimentale pour déterminer le traitement de consolidation adéquat. Cette étude se compose de deux volets majeurs :

- recherche et mise au point d'une palette de matériaux et produits de consolidation adéquats ;
- tests in situ des matériaux et produits retenus en les appliquant sur de grandes surfaces d'essai.

1.2. Problématique : faisabilité et durabilité du traitement de restauration

Les résultats des études et les observations visuelles montrent que la pierre naturelle a été fortement affaiblie par le processus de détérioration et qu'il existe un risque important de perte de matériau supplémentaire et de disparition complète des sculptures romanes d'origine qui subsistent encore. La façon la plus indiquée de préserver les portails d'éventuelles nouvelles détériorations est donc un traitement de consolidation.

Idéalement, un tel traitement devrait rendre la pierre plus résistante, de telle sorte qu'elle ne subisse plus de nouvelles dégradations. En théorie, il faut trouver un moyen de pénétrer suffisamment en profondeur dans la pierre pour atteindre tous les blocs et toutes les écailles, et les refixer à un bloc de pierre sain. Bien entendu, il faut en outre faire en sorte que le coût du traitement de consolidation soit relativement réduit et que ce traitement puisse être appliqué facilement et sans risques. Le traitement ne doit en outre entraîner aucun changement de couleurs, de réflexion ou de texture pour la surface de la pierre (THEOULAKIS, KARATASIOS & STEFANIS, 2008).

En pratique, il est presque impossible de répondre à toutes ces exigences. L'efficacité et la faisabilité du traitement dépendent essentiellement :

- des propriétés des matériaux de restauration, par exemple de la capacité de pénétration du produit de consolidation dans la pierre. Un produit de consolidation traditionnel comme le silicate d'éthyle ne peut être utilisé dans ce cas-ci car sa viscosité est trop basse et il n'est pas capable de combler des écarts entre des grains de plus de 50-100 microns ni de remplir la plupart des fissures (WHEELER, 2008). La consolidation en terme de fixation de toutes les écailles ne peut être effectuée ici qu'en faisant appel à un système de modules à base de mortiers d'injection ;
- des propriétés intrinsèques de la pierre. La faible porosité et capacité d'absorption de l'eau de la pierre de Tournai, influencée à son tour par le positionnement de la pierre en lit ou en délit, empêche le traitement ;
- des formes d'altération. Ce sont ces dernières qui influencent le plus la faisabilité du traitement. Le délitage, la forme la plus grave de dégradation, a provoqué la formation de cassures et de fissures jusqu'à une profondeur d'environ 3 cm ; il se manifeste en outre sous la forme de dizaines d'écailles qui se détachent et de cassures à l'échelle du micromètre, du millimètre et du centimètre. Il est pratiquement impossible de remplir toutes les fissures et de refixer toutes les écailles et tous les blocs, d'assurer le raccrochage à la pierre saine et de consolider ainsi l'ensemble de la structure interne de la pierre.

La faisabilité du traitement de consolidation est dès lors très faible. Si l'on ajoute à cela la qualité inférieure de la pierre de Tournai, sa haute sensibilité au gel et à l'humidité, qui est à l'origine de divers mécanismes de dégradation, et les facteurs négatifs liés à l'environnement externe, tels que l'orientation des portails et le climat, on se rend rapidement compte qu'il est impossible de procéder à un traitement de restauration durable en tenant compte de toutes les normes éthiques. La dégradation des portails est un processus irréversible toujours plus important qu'il s'avère impossible d'arrêter, même avec un traitement de restauration. Le traitement ne fera que, dans le meilleur des cas, stabiliser les portails dans leur état de conservation actuel.

1.3. Fondements de la méthode de consolidation de la pierre

Pour la consolidation structurelle et la fixation des écailles, le point de départ est la méthodologie du *Module system* (système modulaire) décrit par E. Wendler (WENDLER, 2000). Selon cette méthodologie, la fixation des écailles et le remplissage des interstices doivent être effectués avec le même liant dans les différentes étapes du traitement. Cette méthode présente l'avantage de ne comporter aucun délai d'attente et d'afficher une compatibilité parfaite entre les différentes interventions.

Les diverses étapes du traitement dépendent du phénomène de dégradation observé :

(1) À la base d'une écaille ou d'un bloc branlant, on relève toujours la présence d'une petite zone où ce bloc, cette écaille adhère encore à la pierre sous-jacente. Au niveau de cette zone, on observe souvent une décohésion granulaire qui va de pair avec différentes microfissures. Le traitement de ce phénomène de dégradation passe par une opération de consolidation. Il convient d'appliquer une solution de faible viscosité par irrigation ou injection derrière l'écaille pour renforcer le matériau fragilisé et le faire adhérer aux faces intérieures et extérieures concernées ;

(2) Les microfissures évoluent de l'intérieur vers la surface en formant des fissures plus larges et en favorisant le délitage, à savoir l'écaillage superficiel de la pierre selon la stratification préexistante de cette dernière. Selon Wendler (2003), il est possible d'appliquer une solution plus concentrée et plus visqueuse 10 à 20 minutes après avoir achevé l'étape précédente. Il est possible, si nécessaire, d'épaissir ce mélange par l'ajout d'un granulats. ("The Nemrud Dağ Project Proposal for the 2004 campaign," 2004)

(3) L'observation de phénomènes de désagrégation (fissures plus importantes, délamination, desquamation et écaillage) témoigne de la dégradation de la pierre naturelle. La dernière étape du système modulaire englobe le traitement de ces dégâts plus prononcés. On procède à l'application d'un coulis d'injection additionné d'un granulats inférieur à 50 µm pour boucher les lacunes ou les volumes ouverts (> 300 µm).

(4) Pour parfaire l'ensemble, les cavités et lacunes plus importantes peuvent être bouchées au moyen d'un mortier de réparation dont la préparation repose sur la même base que le matériau utilisé lors des étapes précédentes.

Tableau 2 Aperçu de la structure du système modulaire de Wendler

Phase	Formes d'altérations	Méthode
1	Désagrégation granulaire, microfissures	1 ^e consolidation : injecter une solution diluée derrière les écailles afin de renforcer le matériau fragile et de le lier aux côtés des écailles adjacentes.
2	Fissures, délitage	2 ^e consolidation : après 10 à 20 min., appliquer des solutions plus concentrées de la même manière, puis un mélange avec de la silice pyrogénée.
3	Fissures plus épaisse, délamination, desquamation et écaillage	3 ^e consolidation et étape finale : injecter un coulis contenant des agrégats de moins de 50 µm pour combler les lacunes de plus de 300 µm de profondeur.
4	Divers	Mortier de réparation

1.4. Choix du matériau de consolidation de la pierre

1.4.1. Introduction

La recherche d'un matériau de consolidation approprié dont le liant puisse à la fois faire office de mortier d'injection et de mortier de réparation a commencé par une analyse approfondie de la littérature existante dans le domaine de la conservation de la pierre. Les investigations ont porté sur des études de cas ou des recherches scientifiques consacrées à des problématiques de dégradation et de traitement d'une pierre semblable. Cette recherche a permis de sélectionner des produits et/ou des matériaux susceptibles d'être utilisés qui pouvaient être ensuite soumis à des essais poussés dans le cadre de l'étude préliminaire. Les propriétés techniques des produits et matériaux choisis ont également été contrôlées et soumises ensuite à une analyse approfondie effectuée par la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA¹⁸.

1.4.2. Propriétés physico-mécaniques de la pierre de Tournai

Pour mettre au point un mortier d'injection approprié qui s'apparente étroitement à la pierre naturelle des portails, il est indispensable de connaître les propriétés physico-mécaniques de la pierre de Tournai.

¹⁸ *Ibid.*, point 4, p. 82-94.

L'analyse menée en laboratoire dans le cadre de cette étude révèle que la pierre de Tournai utilisée pour les deux portails se caractérise par les propriétés suivantes :

Tableau 3 Synthèse des propriétés physico-mécaniques de la pierre de Tournai présente dans les deux portails.

Module d'élasticité dynamique	Bon état général : 50-100 GPa
	Relativement bon état avec quelques fines fissures : 2-15 GPa
	Fortement dégradé : 0,001 – 2 GPa
Porosité	1.6 à 4,2 V.% (moyen de 2,9 V.%)
Absorption capillaire (eau liquide)	Parallèle au litage : en laboratoire : $2,7 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ in situ : 0,01 à 0,084 $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$ selon l'état de la pierre
	Perpendiculaire au litage : en laboratoire : $0,6 \text{ g/m}^2\text{s}^{0.5}$ in situ : 0 – 0,031 $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$ selon l'état de la pierre
Absorption d'humidité ambiante (hygroscopicité)	1,58 V.%
Densité moyenne	2597 kg/m^3
Dilatation thermique	$5.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
Dilatation hydrique	Parallèle au litage : moyenne de 0,30 mm/m
	Perpendiculaire au litage : moyenne de 0,97 mm/m

1.4.3. Mortiers et coulis d'injection

La diversité des pierres naturelles rend difficile l'élaboration d'une gamme de mortiers dont toutes les caractéristiques concorderaient parfaitement aux propriétés des pierres. Henriques a proposé une liste de propriétés et d'exigences auxquelles doivent satisfaire les mortiers pour être compatibles (HENRIQUES, 2004) :

- faible absorption d'eau et surtout, évaporation et transfert de vapeur d'eau élevés ;
- résistance mécanique et module d'élasticité plus faible que ceux de la pierre ;
- retrait minimal et bonne adhérence au substrat ;
- teneur en sel soluble aussi faible que possible ;
- stabilité dimensionnelle similaire à celle de la pierre.

La sélection des mortiers repose d'une part sur la nécessité d'intégrer des produits facilement réalisables in situ et d'autre part, sur des formulations dont la capacité d'injection et les propriétés mécaniques sont adaptées au traitement des fissures.

Le choix des mortiers s'est porté sur des produits modernes à base de silicate d'éthyle et des produits pré-dosés, commercialisés et optimisés pour des applications spécifiques en Europe.

1.4.3.1. Système modulaire à base de silicate d'éthyle

À l'heure actuelle, la plupart des traitements de consolidation sont exécutés au moyen de produits à base d'ester tétraéthyle ou d'orthosilicate de tétraéthyle (TEOS), mais il s'agit toujours de la consolidation d'une pierre naturelle souffrant d'une décohésion granulaire. Auparavant, l'orthosilicate de tétraéthyle s'utilisait uniquement pour consolider le grès mais au fil des années, son usage s'est étendu à d'autres pierres telles que le calcaire ou le granit (SIEGSMUND & SNETHLAGE, 2011).

Cependant, la faible viscosité du silicate d'éthyle ne lui permet pas de connecter des interstices d'une largeur supérieure à 50 ou 100 µm entre les grains et ne serait donc pas efficace pour boucher la plupart des (micro)fissures que présentent les pierres des portails. Ce problème peut être résolu en utilisant un silicate d'éthyle plus concentré et additionné de silice pyrogénée. Ce mélange permet d'obtenir un produit capable de connecter des interstices plus importants (STOREMYR, WENDLER & ZEHNDER, 2001).

Les analyses pétrographiques¹⁹ effectuées dans le cadre de ces investigations et décrites dans d'autres études de la pierre de Tournai (CAMERMAN, 1947) ont montré que la pierre de Tournai est riche en minéraux argileux, comme déjà mentionné par Camerman (CAMERMAN, 1947) et contient plus précisément de l'illite.. L'influence de cette argile sur le processus de consolidation manque encore de clarté sur le plan scientifique. Elfving et Jäglid (1992) ont observé que le pouvoir de consolidation du MTMOS et du Wacker OH était moindre en présence de poudres d'argile fines telles que l'illite, la chlorite ou la biotite. Ces observations ont remis en question l'utilisation de TEOS pour des traitements de consolidation. Autre considération majeure : l'étude menée par Snethlage et Wendler (1991), dont les conclusions indiquaient que le traitement de pierres argileuses dégradées n'était pas sans danger parce qu'il risquait d'accroître la dilatation et ainsi le comportement hygrique de ces pierres.

Conclusion

En définitive, il a été décidé de ne pas intégrer dans l'étude préliminaire les esters tétraéthyle, ni pour la consolidation de zones pulvérulentes ni pour la préparation d'un mortier d'injection. Les données scientifiques tirées de la littérature contemporaine consacrée à la conservation de la pierre et relative à l'influence des particules d'argile sur la consolidation sont en effet encore trop limitées pour procéder à une sélection sérieuse et sans risque.

Il en résulte que le système conçu par Wendler n'est pas complètement applicable puisqu'il repose à l'origine sur l'utilisation de silicate d'éthyle. Mais les chercheurs ont tout de même recherché un matériau autorisant l'utilisation d'un même liant lors des différentes phases du traitement.

1.4.3.2. Système modulaire reposant sur un gel de silice (silice colloïdale)

Le gel de silice se présente comme une dispersion aqueuse de silice colloïdale. La silice colloïdale est disponible sous forme de système à base d'eau. Pendant le séchage, les groupes hydroxyles précipitent à la surface des particules en raison de leur séparation de l'eau pour former ce faisant des liaisons siloxane, lesquelles se traduisent par une coalescence et la formation d'interliaisons. C'est du SYTON X30 (Fa. Du Pont, Kremer Pigmente) qui a été employé. Ce produit composé de particules de SiO₂ dont la granulométrie moyenne s'élève à 25 micromètres présente une teneur en SiO₂ de 30 %.

¹⁹ Ibid., point 2.4, p. 18-23

Cette dispersion aqueuse a les mêmes propriétés d'écoulement à l'injection que les esters de silice ordinaires.

L'emploi de gels de silice tels que le SYTON X30 s'inscrit dans une longue tradition de l'industrie métallurgique. En revanche, son utilisation à des fins de restauration reste exceptionnelle et se limite jusqu'à présent à de petits bouchages et réparations. À titre d'exemple, ce produit a été utilisé en Allemagne sur les statues que présente la Fürstenportal de la cathédrale de Bamberg (1974) ainsi que sur la porte sud de la cathédrale d'Augsburg (1985). Hans Ettl s'est livré entre 1985 et 1996 à des travaux de recherche fondamentale portant sur les mortiers de réparation au gel de silice (SIEGESMUND & SNETHLAGE, 2011).

La littérature offre d'ores et déjà la description de quelques études de cas intéressantes concernant l'utilisation du SYTON X30 pour le remplissage de fissures et de microfissures dans la pierre naturelle. Sattler et Ettl (1997) ont mis au point un mortier d'injection à base de SYTON X30 pour la fixation des écailles et blocs de tuffeau de la cathédrale Saint-Gatien de Tours. Storemyr et Wendler (2002) ont également inclus un mortier d'injection dans leurs travaux de recherche expérimentale consacrés à la consolidation structurelle et à la fixation des écailles/blocs branlants dans les parties médiévales en stéatite et en schiste vert de la cathédrale de Nidaros (Trondheim, Norvège).

En 2012, ce produit a été étudié dans le cadre d'une étude préliminaire consacrée à la consolidation de sites archéologiques situés à Lalibela en Éthiopie, ainsi qu'à Eraclea Minoa en Sicile (PITTALUGA, FRATINI *et al.*, 2012). Des équipes de conservateurs-restaurateurs ont eu récemment recours à la dispersion aqueuse de silice colloïdale dans le traitement de conservation, le traitement de l'écaillage et de fissures affectant des églises rupestres (taillées dans la roche) telles que la Tokali Kilise située dans le musée à ciel ouvert de Göreme et l'église des Quarante Martyrs située à proximité du village de Şahinefendi en Cappadoce (Turquie) (ROVELLA *et al.*, 2014).

Dans le domaine de la conservation-restauration des peintures murales, des experts se sont également penchés sur l'emploi de ce type de produit, notamment dans le cadre du projet de recherche consacré à la nécropole romaine de Hermupolis située à Tuna el-Gebel en Égypte (*The Roman Necropolis of Hermupolis / Tuna el - Gebel Final report on the autumn 2012 season*, 2012).

1.4.3.3. Coulis hydrauliques : produits à base de chaux hydraulique dispersée

Les premiers mortiers d'injection ont été mis au point par l'ICCROM dans les années 1980 (FERRAGNI, FORTI, MALLIET, TEUTONICO & TORRACA, 1984). Depuis lors, un grand nombre de coulis commerciaux ont fait leur apparition sur le marché.

En règle générale, les coulis commerciaux sont considérés comme des produits faciles à préparer et caractérisés par d'excellentes propriétés de travail. Nonobstant ces atouts, ces coulis présentent un certain nombre d'inconvénients tels qu'une résistance mécanique (trop) importante et une teneur élevée en sels solubles, considérées comme autant de caractéristiques de performance indésirables. La littérature révèle un manque de confiance dans les coulis commerciaux lié au fait que les producteurs modifient régulièrement la composition de leurs produits et ne garantissent dès lors pas la continuité de leur production (BIÇER-ŞİMŞİR, GRIFFIN, PALAZZO-BERTHOLON & RAINER, 2009).

La littérature mentionne les coulis commerciaux suivants : LEDAN, MALTA, Jahn M40 et PLM. Bien que certaines adaptations de la composition des coulis commerciaux soient déconseillées par leur producteur, bon nombre d'études publiées font état de l'ajout d'additifs aux coulis LEDAN par exemple (KLARNER & SCHICK, 1998).

A. Gamme LEDAN de Tecno Edile Toscana

Le site internet officiel du fabricant²⁰ révèle que toutes les formules de la gamme LEDAN se caractérisent par les exigences chimiques et physiques suivantes :

- absence de formation d'efflorescences salines, même dans des conditions extrêmes de température et d'humidité : des travaux de restauration effectués au cours de ces dix dernières années en témoignent et un suivi continu de ces restaurations atteste aussi de l'absence presque totale d'effets préjudiciables ;
- pénétration exceptionnelle dans les matériaux, sans humidification préalable des supports, ce qui réduit la pression exercée par le coulis : cette pénétration profonde garantit une excellente adhérence aux surfaces de contact, même si ces dernières sont fortement déshydratées ;
- hydraulicité et résistance aux sulfates, même sur les supports gypseux, sans interaction chimique significative et, en particulier, sans effets négatifs collatéraux dus à la formation d'ettringite et de thaumasite ;
- les diverses formules et leurs propriétés mécaniques respectives (résistance mécanique, porosité, module d'élasticité, etc.) sont parfaitement adaptées aux supports envisagés. La stabilité physicochimique préserve l'homogénéité mécanique de l'ensemble du système sans provoquer de tension interne ou de retrait dangereux (?) qui engendrerait une modification dimensionnelle à la suite de variations de température ou d'humidité.

La gamme LEDAN comprend quatre grandes catégories de formules de mortiers de restauration spécialement conçues pour l'injection :

- mortiers pour injection / consolidation de gypse peints (TB1-ICR, RI.STAT BASE A, RI. STAT BASE B, RI. STAT EXTRA, ITAL B2) ;
- mortiers pour consolidation structurelle (TA1, TC1 PLUS) ;
- mortiers pour consolidation de structures en voûte (TA2, TA3) ;
- mortiers pour consolidation de gypse (MTX/P, TRAVER STUC, STUC FORTE).

La présente étude se penche sur l'utilisation de trois produits appartenant à cette gamme LEDAN : les coulis TA1, TA2 et TA3. Si la sélection du TA1 découle des résultats positifs décrits dans la littérature, celle des TA2 et TA3 s'explique par leur apparentement avec le TA1 et leur aptitude à connecter des interstices et des cavités plus importantes.

Dans le domaine de la restauration des sculptures en pierre, le LEDAN TA1 s'utilise depuis une vingtaine d'années en Italie, en Allemagne ainsi que dans d'autres pays d'Europe. Les mortiers LEDAN ont été étudiés dans le cadre de l'étude portant sur la recherche d'un mortier d'injection compatible avec le grès molassique de la cathédrale de Lausanne, en Suisse (ROUSSET, GENTILE, JAMES & POZZI, 2005). Dans le cadre de cette étude, les coulis présentaient de bonnes propriétés de travail telles que la viscosité, la capacité d'injection ou le temps de prise ainsi que de bonnes caractéristiques de performance qualitatives (retrait et adhérence) et quantitatives (porosité capillaire, absorption d'eau, résistance à la compression, etc.). En 2007, dans le cadre d'un projet Medistone de conservation des trois sites archéologiques les plus importants d'Afrique du Nord (MEDISTONE, 2007) le LEDAN TA1 a également été soumis à des mesures de dilatation thermique et hygrique visant à

²⁰ <http://www.tecnoediletoscana.it/ledan.php>, consulté en 2014.

examiner sa compatibilité à long terme avec la pierre naturelle d'origine (MERTZ, PAGNIN & GUIAVARC'H, non publié).

La composition des LEDAN TA1, TA2 et TA3 est décrite comme suit dans les fiches techniques : liant hydraulique chimiquement stable composé de sels en faible proportion, de silicate en poudre, d'une pouzzolane très fine et d'une combinaison précise d'additifs (diluants, agents de rétention d'eau et agents moussants).

LEDAN TA1

Le mortier d'injection LEDAN TA1 est conçu pour la consolidation de maçonneries, plafonds et murs sous-jacents de peintures murales. Son utilisation est recommandée pour le traitement de phénomènes de dégradation tels que des fissures et cavités d'un diamètre de 5 mm.

La proportion matière sèche/eau varie en fonction de l'application : pour procéder à la fixation de couches superficielles qui se détachent, il est recommandé d'utiliser une proportion de 1/1,6 à 1/0,8 pour la consolidation de maçonneries. Le cas échéant, des charges peuvent être ajoutées pour accroître la viscosité du mortier d'injection. Dans ce cas, le rapport maximal LEDAN/charges ne pourra excéder 1/7. Plus la quantité de charges ajoutée est élevée, plus la liaison sera faible.

LEDAN TA2

Le mortier LEDAN TA2 est conçu pour le remplissage de profondes cavités, de maçonneries et d'intrados. Ce mortier est recommandé lors du traitement de fissures et de cavités d'un diamètre inférieur ou égal à 10 mm.

La proportion matière sèche/eau varie dans une plage comprise entre 1/0,6 pour le bouchage de lacunes profondes à 1/0,5 pour l'injection de grandes cavités.

LEDAN TA3

Mortier d'injection plus thixotrope, le LEDAN TA3 est conçu pour le bouchage des fissures et cavités que présentent les voûtes et maçonneries et dont le diamètre est compris entre 10 et 30 mm.

Les proportions sont identiques à celles du LEDAN TA2.

Tableau 4 Synthèse des propriétés physico-chimiques connues des produits LEDAN TA1, TA2 et TA3 basé sur les fiches techniques.

	TA1	TA2	TA3
Rapport eau/liant	0,8 – 1,6	0,6	0,6
Poids spécifique	1,40 kg/dm ³	1,2 kg/dm ³	1,2 kg/dm ³
Résistance à la compression	15 N/mm ²	26 N/mm ²	25 N/mm ²
Résistance à la flexion	3,5 N/mm ²	7 N/mm ²	6 N/mm ²
Adhérence	1,4 N/mm ²	0,9 N/mm ²	0,9 N/mm ²
Perméabilité à la vapeur	11 μ	8 μ	8 μ
Module d'élasticité matière sèche	11.000 N/mm ²	15.000 N/mm ²	15.0 mm ²

B. Gamme PLM (C.T.S. S.r.l.)

Les fiches techniques des différents types de mortier à injecter établies par la société C.T.S S.r.l.²¹, fournisseur de la gamme complète PLM, décrivent les propriétés générales suivantes :

- absence de sels solubles efflorescents ;
- inaltérabilité de la perméabilité à la vapeur des murs ;
- caractéristiques physiques et mécaniques semblables à celles des matériaux sur lesquels on intervient ;
- facilité d'injection ;
- facilité de nettoyage des éventuelles coulures.

À l'instar des mortiers à injecter LEDAN, la gamme PLM se compose de divers mortiers de restauration adaptés à la consolidation structurelle par injection et dont les propriétés physico-chimiques diffèrent selon les applications. Cette gamme se décline en cinq produits : PLM-A, PLM-AL, PLM-I, PLM-M et PLM-SM.

La présente étude se penche sur l'utilisation de deux produits appartenant à cette gamme PLM : les mortiers PLM-I et PLM-M. Ces deux produits ont été sélectionnés d'une part pour diverses propriétés mécaniques telles qu'une résistance mécanique élevée. D'autre part, le mortier d'injection PLM-M a été sélectionné parce qu'il correspond au mortier d'injection de l'ICCROM mis au point par Paulo et

²¹ <http://www.ctseurope.com>, consulté en 2014.

Laura Mora (LABOURÉ & BRUSSIEUX, 2010) et parce que son utilisation a permis d'obtenir de bons résultats dans le cadre de plusieurs études de cas décrites dans la littérature.

Tout comme les mortiers LEDAN, le mortier PLM-M a été étudié dans le cadre de la pré-étude portant sur la recherche d'un mortier d'injection compatible avec le grès molassique de la cathédrale de Lausanne. Les essais préliminaires ont montré que ce mortier d'injection présentait de bonnes propriétés de travail (viscosité, capacité d'injection et temps de prise) ainsi que de bonnes caractéristiques de performance qualitatives et quantitatives (ROUSSET *et al.*, 2005). Le mortier d'injection PLM-M a également été affecté à la consolidation des petites fissures que présentait le grès utilisé pour bâtir la cathédrale de Strasbourg (LABOURÉ & BRUSSIEUX, 2010).

PLM-I

Le mortier à injecter PLM-I, est à base de chaux naturelles, exempt de sels efflorescents, avec des additifs inertes sélectionnés et des additifs modifiant les propriétés rhéologiques. Le PLM-I est utilisé pour consolider des enduits de valeur détachés de leur support mural et dont on souhaite renforcer l'accrochage.

La proportion matière sèche/eau s'élève à 1/0,7 ; de l'eau peut être ajoutée jusqu'à l'obtention de la fluidité souhaitée.

PLM-M de l'ICCROM

Le mortier à injecter PLM-M, est à base de chaux naturelles, exempt de sels efflorescents, avec des additifs inertes sélectionnés et des additifs modifiant les propriétés rhéologiques. Le PLM-M est utilisé pour consolider des structures de maçonneries.

La proportion matière sèche/eau s'élève à 1/0,7 ; de l'eau peut être ajoutée jusqu'à l'obtention de la fluidité souhaitée.

Tableau 5 Synthèse des propriétés physico-chimiques connues.

	PLM-M	PLM-I
Poids spécifique	1,4 kg/dm ³	1,2 kg/dm ³
Résistance à la compression	25,9 kg/cm ³	46,5 kg/cm ³

1.4.4. Charges, granulats et additifs

1.4.4.1. Charges : Aerosil OX50 (Fa. Evonik Industries)

L'ajout de silice pyrogénée hydrophile au silicate d'éthyle précondensé permet de reconnecter des fissures plus importantes (> 100 µm).

Durant l'étude préliminaire, l'aerosil a été utilisé comme agent antisédimentation et comme agent épaississant au sein d'un système modulaire reposant sur un gel de silice. L'ajout d'une quantité accrue de ce produit au liant SX30 en augmente la viscosité de manière exponentielle. En revanche, les dispersions caractérisées par un ajout d'aerosil supérieur à 10 % ne sont plus utilisables comme liant pour la préparation d'un mortier d'injection tandis que celles dont l'ajout d'aerosil est supérieur à 2 % cessent de l'être pour une consolidation structurelle (SATTLER & ETTL, 1996).

Tableau 6 Propriétés techniques caractéristiques

Superficie BET (m²/kg)	50 ± 15
Perte par déshydratation (% du poids)	≤ 1.5
pH	3.8-4.8

1.4.4.2. Granulats

Les granulats ont été sélectionnés en fonction de leurs propriétés esthétiques. Comme la pierre de Tournai est naturellement de teinte grise, il est important de teinter dans la masse les mortiers d'injection. Ce faisant, la masse injectée se confond davantage avec la pierre naturelle d'origine.

Toutefois, les restaurateurs ont renoncé à utiliser la pierre de Tournai comme granulats parce que celle-ci présente par nature une teneur non négligeable en d'argile qui pourrait influencer sur les propriétés techniques des mortiers d'injection.

Le choix des restaurateurs s'est dès lors porté sur les granulats suivants :

- poudre de granit gris 0 à 100 µm, Fa. Kremer Pigmente GmbH & Co. KG ;
- poudre de marbre noir 100 à 316 µm, Kremer Pigmente GmbH & Co. KG.

Ces granulats s'utilisent non seulement pour teinter dans la masse le mortier d'injection, mais aussi pour lui conférer une viscosité supérieure. Parmi les produits retenus, des poudres de pierre ont été ajoutés aux mortiers d'injection à base de SYTON X30 et de LEDAN TA1 parce que l'épaississement de ces mortiers permet d'en accroître la viscosité. Les autres produits présentent par contre tous la viscosité souhaitée ou ne se prêtent pas, comme le précise leur fiche technique, à un épaississement.

1.4.4.3. Additifs

L'adjonction d'additifs se limite à certains pigments permettant de nuancer la couleur du mortier d'injection déjà teinté par les granulats. Les additifs suivants ont été utilisés :

- pigment terre d'ombre naturelle, Kremer Pigmente GmbH & Co. KG ;
- pigment terre verte, Kremer Pigmente GmbH & Co. KG ;
- poudre de graphite, Kremer Pigmente GmbH & Co. KG.

La proportion de pigments terre d'ombre naturelle et terre verte ajoutés au mélange ne dépassait pas 3 %. La poudre de graphite devait par contre s'utiliser dans des concentrations supérieures (jusqu'à 12 %) parce que les produits commercialisés et prédosés de type LEDAN et PLM présentent une couleur blanc cassé et requièrent par conséquent l'ajout d'une quantité appréciable de poudre de graphite pour prendre la teinte gris foncé qui caractérise la pierre de Tournai.

1.5. Étude de l'efficacité des coulis d'injection en laboratoire

1.5.1. Introduction

Dans le cadre de l'étude portant sur la mise au point d'un mortier d'injection efficace, les chercheurs se sont penchés aussi bien sur les propriétés de travail que sur les caractéristiques de performance des produits étudiés et les ont évaluées et comparées aux objectifs visés. La nécessité pour le mortier de restauration/injection de présenter les mêmes propriétés mécaniques que la pierre de Tournai ou de s'en rapprocher le plus possible constitue l'un des axes d'investigation majeurs de ce volet de l'étude. C'est à ce prix que l'on obtient une compatibilité maximale entre la pierre naturelle d'origine et les nouveaux matériaux de restauration et que l'on réduit au maximum le risque d'échec de l'adhérence entre les deux matériaux soumis au vieillissement naturel, ce qui ne peut qu'être bénéfique pour la durabilité du traitement.

Dans le souci de garantir cette compatibilité maximale, divers échantillons de pierre et de coulis d'injection ont été soumis à des essais pétrophysiques.

1.5.2. Critères d'évaluation

1.5.2.1. Propriétés de travail

Les propriétés de travail, étroitement liées entre elles, ont été évaluées sur base des observations empiriques effectuées lors de la préparation des mélanges ainsi qu'avant, pendant et après leur introduction dans les différents supports d'échantillons. Ces évaluations ont été réalisées par le l'atelier de conservation-restauration des sculptures en pierre.

Étant donné qu'un coulis d'injection doit pouvoir, par sa nature, être introduit dans une cavité au moyen d'une seringue, **une faible viscosité (1)** est une propriété importante puisque c'est cela qui garantira un bon débit. Cependant, une faible viscosité peut augmenter le risque de retrait et la formation de fissures lors du réglage.

La capacité d'injection (2) d'un coulis est étroitement associée à sa viscosité, mais peut également être influencée par la taille des grains de la charges et par sa vitesse de « coagulation ».

Le temps de prise (3) est également un facteur important étant donné que le coulis doit rester fluide suffisamment longtemps pour remplir les coins les plus reculés de la cavité avant de se solidifier. Cette propriété s'est avérée particulièrement importante lors des essais sur le terrain, où des injections répétées sur plusieurs heures ont été nécessaires pour remplir complètement les vides (BIÇER-ŞİMŞİR, GRIFFIN, PALAZZO-BERTHOLON & RAINER, 2010).

Comme le mortier d'injection est visible en surface après application, son **intégration esthétique (4)** est importante. Cela implique que le matériau injecté ressemble le plus possible à la pierre naturelle de Tournai, tant sur le plan de la teinte que sur celui de la texture et de l'éclat.

Dernière propriété à ne pas négliger : l'**ouvrabilité (5)**. Si l'ouvrabilité en laboratoire revêt une importance déterminante, il en va de même de l'ouvrabilité sur site. Dans la mesure où le mortier doit être appliqué à grande échelle, un processus de fabrication simple et une applicabilité aisée s'imposent (RAINER & BIÇER-ŞİMŞİR, 2011).

1.5.2.2. Caractéristiques de performances²²

Les caractéristiques de performances ont été évaluées par le département Laboratoires de l'IRPA pour étudier la compatibilité des produits testés avec la pierre de Tournai. En effet, ce n'est pas parce que la capacité d'injection d'un coulis est satisfaisante que celui-ci convient pour une injection dans la pierre considérée. En d'autres termes, il faut que le coulis envisagé soit adapté au matériau à traiter, la pierre de Tournai dans le cas présent. Par « adapté », on entend « compatible chimiquement, physiquement et mécaniquement ».

Compatibilité chimique

La compatibilité chimique est une exigence majeure. Si les matériaux injectés ne sont pas chimiquement adaptés à la pierre naturelle, ils engendreront des dégradations telles que celles occasionnées par la cristallisation et l'hydratation de sels (STEVENS & SWENNEN, 2006). Les fiches techniques relatives aux mortiers d'injection commerciaux choisis font état, pour chaque produit, de l'absence d'efflorescences salines solubles.

Compatibilité mécanique

Par compatibilité mécanique, on entend l'adéquation de propriétés mécaniques importantes telles que le retrait, l'adhérence ainsi que la résistance à la compression, à la traction et à la flexion.

La formation de fissures de **retrait** pendant le séchage et le durcissement de la matière injectée est clairement un facteur négatif car cela peut compromettre la bonne adhérence du mortier aux parois de la cavité et limiter le transfert d'eau à travers le profil d'altération. Pour fournir un appui suffisant pour les zones détachées de la pierre, une **bonne adhérence** entre la pierre détériorée et le coulis d'injection est considérée comme un facteur essentiel.

Le coulis d'injection doit être suffisamment solide pour assurer l'accrochage des zones détachées de la pierre, même si un accrochage supplémentaire est parfois nécessaire en collant les bordures des écailles. En outre, si la pierre traitée est conservée en extérieur, le coulis d'injection devra résister aux variations dimensionnelles de la pierre liées aux variations de température et d'humidité. La compatibilité mécanique en tant que telle dépend aussi de la déformabilité du mortier de réparation soumis à l'influence de déformations et/ou de charges mécaniques. L'importance de la charge mécanique est déterminée entre autres par le **module d'élasticité** (HAYEN, 2010). Il convient d'étudier ce paramètre pour chaque coulis envisagé.

Compatibilité physique

Les propriétés physiques ont trait au transfert de l'humidité, à la dilatation thermique, etc.

Le coulis injecté entre la surface de la pierre (écailles) détachée et le bloc de pierre ne doit pas se comporter comme un réservoir ou une membrane de rétention d'eau. Dans ces deux cas, la durabilité et le rendement du système de consolidation en seraient défavorablement affectés. La compatibilité de porosité entre les coulis et la pierre a été testée au moyen de mesures de **l'absorption d'eau capillaire**.

Les matériaux poreux peuvent gonfler ou interagir entre eux suite aux variations d'humidité relative et de température ou à un contact avec de l'eau liquide. Une trop grande dilatation par rapport au matériau original est inacceptable car elle pourrait provoquer le détachement de la section rattachée

²² Pour une description détaillée de l'analyse des matériaux de restauration, voir le rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA, point 4, p. 82-94.

de la pierre. Les dilatations thermique, hygrique et hydrique doivent être comparables à celles de la pierre afin de ne pas générer de contraintes (STEVENS & SWENNEN, 2006).

Les échantillons de coulis d'injection ont été soumis aux mêmes analyses que les échantillons de la pierre de Tournai.

1.5.3. Préparation des échantillons et critères d'évaluation

Pour chaque mortier d'injection, les chercheurs ont préparé un certain nombre d'échantillons cylindriques (d x h : 5 x 3 cm).

Il s'agissait initialement de forer une série de réservoirs cylindriques identiques dans un échantillon de pierre de Tournai, puis de procéder à l'injection de mortiers dans ces cavités. En raison de la tendance à l'écaillage de la pierre de Tournai, cette approche s'est avérée impraticable parce qu'à la moindre sollicitation mécanique cette pierre se désagrègeait.

Pour mettre au point une méthode d'évaluation empirique des mortiers d'injection, les chercheurs ont retenu les options suivantes :

- d'une part injecter le mortier approprié à l'aide d'une seringue (5 ml) et d'une aiguille (d = 1,5 à 2 mm) dans des réservoirs en matière synthétique afin d'évaluer l'intégration esthétique, la viscosité et l'ouvrabilité des produits ;
- d'autre part, injecter le mortier approprié dans des réservoirs en matière synthétique remplis de gravier et de poudre de pierre de différentes granulométries afin d'en évaluer le *pouvoir d'écoulement* et la capacité d'injection.

1.5.4. Résultats

1.5.4.1. Série d'essais 1 : composition des préparations d'essai

La première série d'essais visait à mettre au point la composition la plus appropriée de mortier pour chaque coulis d'injection. Les propriétés de travail appelées à jouer un rôle important dans ce contexte sont surtout l'intégration esthétique (4) et l'ouvrabilité (5). Concernant l'intégration esthétique, les chercheurs ont essentiellement évalué l'influence des différents additifs sur la teinte et des granulats sur l'ouvrabilité et la capacité d'injection. Dans ce cas de figure, les trois autres facteurs revêtent une importance moindre.

Le rapport eau/liant prescrit par le producteur a été respecté pour chaque produit. L'ajout d'eau n'a eu lieu qu'après le mélange à sec des produits, liants, additifs et granulats.

Le tableau 7 présente un aperçu des liants, granulats et additifs utilisés.

Tableau 7 Type et composition des préparations-tests

Marque	Liant	Granulat	Additif
LEDAN	LEDAN TA1 + eau rapport liant/eau : 1/1,6 – 1,08 Rapport liant/charge : 1/0–1/7	Poudre de graphite Poudre de granit gris (0 à 100 µm) Poudre de marbre noir (100 à 316 µm)	Pigment terre d'ombre naturelle
	LEDAN TA2 + eau rapport liant/eau : 1/0,6-0,5		
	LEDAN TA3 + eau rapport liant/eau : 1/0,6-0,5		

PLM	PLM-M + eau rapport liant/eau : 1/0,7		Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle Pigment terre verte
	PLM-I + eau rapport liant/eau : 1/0,7		Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle
SYTON	SYTON X30	Poudre de marbre noir (100 à 316 µm)	1 à 1,5 % de silice pyrogénée (Aerosil OX50)

Évaluation générale par propriété de travail

(1) Viscosité et (2) capacité d'injection

Les coulis d'injection de type LEDAN TA2 et TA3, PLM-M et PLM-I présentent d'origine une certaine viscosité. L'ajout de granulats tels qu'une poudre de marbre noir se traduit par une capacité d'injection trop faible et une viscosité trop élevée.

Comme le fabricant (Tecno Edile Toscana) indique que l'emploi d'un mortier Ledan TA1 permet de faire varier le rapport liant/eau et le rapport liant/charge les chercheurs ont préparé, pour ce type, plusieurs échantillons dont le rapport liant/charge est compris entre 1/0 et 1/3. L'ajout d'une quantité plus importante de charge (rapport 1/4 à 1/7) se traduit par une viscosité trop élevée et par une capacité d'injection (trop) faible.

Il en va de même pour les mortiers à base de SYTON X30 et de TEOS dispersé. Comme ce produit est très fluide et peu visqueux par nature, il était vivement recommandé de procéder à l'ajout de charges supplémentaires (granulats) pour obtenir un mortier d'injection. Ce produit à l'état pur ainsi que le rapport 1/1 permettent en tout cas de procéder au bouchage de microfissures et de très fines fissures. L'ajout de poudre de marbre noir (100 à 360 µm) jusqu'à l'obtention d'un rapport ¼ se traduit par une viscosité et une capacité d'injection satisfaisantes.

(3) Temps de prise

L'évolution du rapport liant/eau ainsi que l'ajout de granulats et d'additifs n'ont aucune influence sur le temps de prise des trois produits de préparation de mortier. Cette propriété de travail fait l'objet d'une évaluation détaillée dans la série d'essais qui suit.

(4) Intégration esthétique

La matière sèche des coulis d'injection LEDAN (TA1, TA2 et TA3) et PLM (PLM-M, PLM-I) présente d'origine une teinte blanche. Pour teinter celle-ci de telle sorte que sa couleur se rapproche davantage de la teinte gris foncé de la pierre de Tournai, il faut ajouter des granulats ou des additifs.

L'ajout d'une poudre de graphite confère aux cinq mortiers considérés la teinte grise appropriée, l'adjonction de 1 % supplémentaire de pigment terre d'ombre naturelle et/ou terre verte permettant de rehausser le gris en lui donnant une teinte brunâtre.

La pierre naturelle de Tournai étant une pierre très compacte, il fallait trouver un mortier qui puisse avoir la même structure lisse. L'utilisation de granulats et d'additifs à la granulométrie la plus faible possible a permis d'atteindre un tel résultat. Les différents types de mortiers sont d'une finesse suffisante, par nature, pour obtenir la structure appropriée.

La pierre des portails, abîmée, présente aussi un aspect mat. Les mortiers choisis sont dès lors parfaitement adaptés puisqu'ils prennent un aspect mat après durcissement.

Le mortier d'injection additionné du liant SYTON X30 est en revanche un peu brillant si l'ajout de granulats est insuffisant. De plus, ce produit a tendance à se dissocier en provoquant la polymérisation en surface d'un film de SYTON X30 pur, ce qui engendre la formation d'une surface lisse et brillante. Pour prévenir ce phénomène, il suffit d'ajouter une quantité suffisante de granulats (rapports liant/charge de 1/2 au minimum).

(5) Ouvrabilité

L'ouvrabilité n'a fait l'objet d'aucune évaluation précise dans le cadre de cette première série d'essais. Les trois types de mortier (LEDAN, PLM et Syton X30) présentent une ouvrabilité acceptable.

Conclusion

Au total, neuf mélanges ont été sélectionnés par l'atelier de conservation-restauration des sculptures en pierre. Les préparations détaillées par type de mortier sont exprimées en pourcentages pondéraux dans le tableau 8.

Tableau 8 Résultats de la série d'essais 1 : les neuf préparations finales des mortiers d'injection (exprimées en pourcentages pondéraux)

Rapport liant/charges	LEDAN TA1 1:0	LEDAN TA1 1:1	LEDAN TA1 1:2	LEDAN TA2 1:0	LEDAN TA3 1:0
Liant	33	26	26	48	49
Eau	53	41	41	38	36
Poudre de graphite	12	7	7	11	12
Granit gris 0 à 0,1 mm	-	8,6	17	-	-
Marbre noir 0,1 à 0,316 mm	-	17,2	34	-	-
Pigment : terre d'ombre nat.	2	-	-	3	3

Rapport liant/charges	PLM-M 1:0	PLM-I 1:0
Liant	47,5	49
Eau	38	41
Poudre de graphite	9,5	7,5
Granit gris 0 à 0,1 mm	-	-
Marbre noir 0,1 à 0,316 mm	-	-
Pigment : terre d'ombre naturelle	2,5	2,5
Pigment: terre verte	2,5	-

Rapport liant/charges	Syton X30 1:2	Syton X30 1:4
Liant	33	17
Eau	-	14
Marbre noir 0,1 à 0,316 mm	66	68
Aerosil OX 50	1	1

1.5.4.2. Série d'essais 2 : propriétés de travail des préparations finales

Les neuf préparations retenues ont été soumises à une deuxième série de tests pour évaluer leurs propriétés de travail : (1) viscosité, (2) capacité d'injection, (3) temps de prise, (4) intégration esthétique et (5) ouvrabilité.

Les chercheurs ont à nouveau préparé différents échantillons cylindriques (d x h : 5 x 3 cm). Comme ils s'étaient essentiellement focalisés sur l'intégration esthétique, la mise au point de préparations, la viscosité et la capacité d'injection lors de la première série d'essais, cette deuxième série de tests s'est centrée sur l'ouvrabilité, le temps de prise, la viscosité et la capacité d'injection. Les propriétés de travail ont fait l'objet d'une évaluation empirique effectuée de la même manière.

Évaluation générale par propriété de travail

(1) Viscosité

En règle générale, la viscosité des neuf mortiers d'injection est satisfaisante, comme en témoigne une bonne capacité d'écoulement à travers les différents mélanges de poudres et fragments de pierre. Les coulis LEDAN TA1 (rapport 1/0) et les coulis SYTON X30 s'écoulent aisément à travers ces matériaux en bouchant la plupart des cavités du réservoir concerné. Ces coulis s'insinuent également dans les pores/cavités plus petites que présente la poudre de pierre de Tournai. C'est le coulis Syton qui présente le meilleur pouvoir de pénétration.

Les autres coulis hydrauliques commerciaux (LEDAN et PLM) se caractérisent par un pouvoir de pénétration restreint et une viscosité plus élevée. C'était prévisible pour un coulis LEDAN TA1 respectant un rapport 1/1 et 1/2, dans la mesure où ce produit bénéficie d'un apport en granulats visant à en accroître la viscosité. Les coulis LEDAN TA2 et TA3 présentent une viscosité comparable à celle du coulis LEDAN TA1 au rapport 1/2. De plus, ces produits possèdent les mêmes propriétés de travail.

Par contre, sans apport en granulats, les coulis PLM-I et PLM-M présentent par nature une viscosité supérieure et un pouvoir de pénétration inférieur. L'application d'une pression supérieure s'est avérée nécessaire pour remplir toutes les cavités, mais même avec cette pression, ces coulis n'ont pas réussi à pénétrer dans la poudre de pierre.

(2) Capacité d'injection

Ces coulis se caractérisent tous par une bonne capacité d'injection. L'emploi d'une seringue pourvue d'une aiguille supérieure à 2 mm s'est avéré indispensable pour procéder à l'injection des coulis PLM, LEDAN TA1 (rapports 1/1 et 1/2) et LEDAN TA3. C'est également le cas avec le coulis SYTON 1/4 ; mais l'on pouvait s'attendre à un tel résultat puisque ce mortier est voué au bouchage de grandes cavités.

Le coulis LEDAN TA2 se distingue par une capacité d'injection modérée. Les intervenants peuvent utiliser une seringue munie d'une aiguille de 1,5 mm, mais il leur faut exercer une pression supérieure pour que le coulis s'écoule librement.

(3) Temps de prise

Les coulis SYTON (rapports 1/2 et 1/4) se distinguent par un temps de prise plus long, lequel autorise des injections répétées humide sur humide. Mais un temps de prise supérieur à 12 heures peut également être considéré comme un inconvénient.

En revanche, les coulis commerciaux prennent plus rapidement en surface, mais demeurent encore assez fluides dans la masse. Le coulis LEDAN TA1 présente un temps de prise acceptable, qui permet aussi l'exécution d'injections humide sur humide. En raison de la brièveté accrue du temps de prise des coulis TA2 et TA3, l'exécution d'injections humide sur humide est envisageable, mais les intervenants doivent travailler beaucoup plus rapidement.

Les coulis PLM se distinguent par le temps de prise le plus court, un inconvénient majeur pour les coulis de ce type. Le temps de prise maximal est de l'ordre de 20 à 30 min., ce qui rend impossibles les injections humide sur humide et met en doute leur capacité à boucher les cavités profondes.

(4) Intégration esthétique

Comme indiqué précédemment, les chercheurs avaient mis l'accent sur l'intégration esthétique lors de la première série d'essais. Il s'est avéré que les neuf préparations finales présentaient une bonne intégration esthétique. Comme la préparation du coulis SYTON repose sur une base transparente, celui-ci s'intègre mieux dans la pierre de Tournai. Le coulis SYTON présente néanmoins l'inconvénient suivant : en cas d'utilisation d'un(e) concentration/rapport (trop) faible, le mélange a tendance à se dissocier en provoquant la polymérisation en surface d'un film de SYTON pur.

(5) Ouvrabilité

Les coulis se caractérisent tous par une bonne ouvrabilité. Les coulis SYTON sont très faciles à ouvrir parce qu'ils ne requièrent que l'adjonction d'un seul type de granulats. Cependant, ils présentent l'inconvénient de nécessiter l'ajout d'une silice pyrogénée toxique (Aerosil X50).

Les mortiers hydrauliques commerciaux se travaillent également très facilement. Ils doivent simplement être teints avec des pigments qui peuvent être dosés et mélangés à l'avance. Ce n'est que si l'adjonction de granulats supplémentaires s'impose, comme lors de la préparation de coulis LEDAN TA1 respectant un rapport 1/1 et 1/2, que l'ouvrabilité est plus complexe car tout doit être correctement dosé.

Comme décrit dans leurs fiches techniques, il convient de mélanger au mixeur les coulis commerciaux à une vitesse précise pendant un laps de temps déterminé. Les ingrédients constitutifs d'un coulis SYTON peuvent se mélanger à la main.

(6) Remarque : observation relative aux coulis LEDAN TA2 et TA3

Les coulis LEDAN TA2 et TA3 présentent une expansion latérale pendant la phase de durcissement. Ce phénomène était déjà clairement visible sur les échantillons préparés en vue de l'analyse en laboratoire : leur volume avait augmenté. Cette phase d'expansion est probablement due à la présence d'agents expansifs dans la composition de ces produits. Leur fiche technique indique qu'ils sont adaptés au bouchage d'interstices importants et de grandes cavités et lacunes, ce qui explique l'ajout d'agents expansifs dans leur composition.

Tableau 9 Propriétés de travail des 9 préparations finales : +++ = très bien ; ++ = bien ; + = assez bien ; - = mauvais

	Viscosité (faible)	Capacité d'injection	Temps de prise (long)	Intégration esthétique	Ouvrabilité
LEDAN TA1 1:0	+++	+++	+++	++	+++
LEDAN TA1 1:1	+++	++	+++	++	++
LEDAN TA1 1:2	++	++	+++	++	++
LEDAN TA2	++	++	++	++	+++
LEDAN TA3	++	+	++	++	+++
PLM-M	++	+	-	++	+++
PLM-I	++	+	-	++	+++
SYTON X30 1:2	+++	+++	++(+)	+++	++(+)
SYTON X30 1:4	+++	++	++(+)	+++	++(+)

1.5.4.3. Propriétés de travail : conclusion

Ces neuf coulis présentent de bonnes propriétés de travail. Les coulis LEDAN et SYTON X30 se distinguent par une faible viscosité, ce qui permet une bonne capacité d'écoulement et une capacité d'injection satisfaisante au moyen d'une seringue munie d'une aiguille.

Néanmoins, en raison de leur viscosité plus élevée et, surtout, de leur temps de prise plus court, les coulis LEDAN TA2 et TA3 pénètrent plus difficilement dans les cavités les plus profondes. Cette limitation s'observe également avec les coulis du type PLM (PLM-I et PLM-M). Ce facteur remet en question la capacité de ces produits à boucher des microfissures et des fissures profondes.

On peut en conclure que les coulis PLM-I et PLM-M ne conviennent pas dans le cadre de ce projet de recherche. Leurs propriétés de travail ne remplissent pas toutes les conditions requises pour traiter les innombrables fissures et microfissures présentes sur les portails.

Les coulis LEDAN TA2 et TA3 ne peuvent pas non être retenus, en raison de leur comportement expansif. En effet, le risque de voir cette expansion du mortier engendrer, pendant la phase de durcissement, des tensions internes au sein d'une pierre de Tournai très dégradée n'est pas négligeable. De telles tensions pourraient entraîner la formation d'un nombre accru de fissures et de microfissures.

Les coulis d'injection LEDAN TA1 et SYTON X30 sont les deux préparations qui présentent les meilleures propriétés de travail.

1.5.5. Caractéristiques de performance : conclusion

La cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA s'est penchée sur la compatibilité des neuf préparations d'essai avec la pierre des portails²³.

Comme indiqué précédemment, les propriétés matérielles et techniques ainsi que les caractéristiques de performance de la pierre de Tournai utilisée sont extrêmes²⁴ dans le sens où cette dernière :

- présente en règle générale une porosité, une absorption capillaire et une absorption de l'humidité ambiante relativement faibles, lesquelles augmentent néanmoins en fonction de l'état de dégradation et du positionnement du bloc de pierre. Plus la dégradation est prononcée et conjuguée avec un positionnement de la pierre parallèle au litage, plus la porosité, l'hygroscopicité et le degré d'absorption seront élevés ;
- possède un module d'élasticité faible, lequel est également déterminé dans une large mesure par le niveau de dégradation de la pierre naturelle ;
- présente une dilatation hydrique, hygrique et thermique non négligeable.

Étant donné la combinaison de diverses propriétés particulières, il est pratiquement impossible de trouver un matériau de restauration qui réponde à toutes les conditions requises en présentant une compatibilité irréprochable avec la pierre de Tournai utilisée.

Les résultats des essais de compatibilité montrent que les matériaux de restauration testés sont plus absorbants, moins résistants et moins denses et qu'ils présentent une dilatation thermique supérieure, mais une dilatation hygrique et hydrique comparable à celle de la pierre de Tournai.

Toutefois, en raison de leur absorption et de leur porosité supérieures, ces coulis d'injection ont tendance à se comporter comme un réservoir ou une membrane de rétention d'eau. Ce comportement se traduit par une durabilité moindre et par un rendement plus faible du traitement de consolidation.

Une densité et un module d'élasticité inférieurs garantissent qu'en cas de nouvelle dégradation, celle-ci affectera d'abord le matériau le plus faible ; à savoir, le mortier de restauration. Si ces caractéristiques réduisent d'une certaine manière la durabilité du traitement, elles influent aussi sur le caractère sacrificiel du matériau de restauration : comme le matériau de restauration introduit est plus tendre que la pierre naturelle d'origine, toute dégradation éventuelle atteindra d'abord ce matériau en épargnant du même coup les sculptures originelles.

En outre, la recherche d'un matériau dont la dilatation thermique, hydrique et hygrique est identique ou inférieure s'impose pour garantir une adhérence satisfaisante.

²³ *Ibid.*, tableau récapitulatif 23 (p. 21 à 28).

²⁴ Pour un aperçu des propriétés constructives de la pierre de Tournai utilisée, voir l'alinéa 1.3.2.

Tableau 10 Aperçu des propriétés déterminant la compatibilité²⁵

En rouge = mauvaise compatibilité ; en vert= la meilleure compatibilité parmi tous les produits testés ; en maillage rouge et vert = meilleure compatibilité parmi les mortiers commerciaux hydrauliques testés.

	Coeff. absorption	Teneur eau capillaire	Densité	Module dynamique	Rétrécissement	Adhérence	Exp. max. hygrique	Exp.max. thermique	Exp. hydrique après 48h
LEDAN TA1 1:0									
LEDAN TA1 1:1									
LEDAN TA1 1:2									
LEDAN TA2									
LEDAN TA3									
PLM-M									
PLM-I									
SYTON X30 1:2									
SYTON X30 1:4									

La synthèse des résultats des essais de compatibilité (cf. tableau 10) permet de déduire que le coulis d'injection à base de SYTON X30 est le plus compatible avec la pierre de Tournai. Ce coulis se caractérise par la teneur en eau capillaire la plus faible, le module d'élasticité dynamique et la densité les plus élevés, la meilleure adhérence et la dilatation la plus faible. Seule la dilatation thermique de ce coulis est supérieure à celle de la pierre de Tournai, cet écart constituant dès lors un critère défavorable. Par ailleurs, le retrait constaté n'est pas négligeable : les préparations-tests de mortier à base de SYTON X30 ont été mises au point pour être injectées dans des fissures et microfissures et non pour remplir de plus grandes cavités, ce qui pourra être corrigé en ajoutant plus de charges.

Les LEDAN TA2 et TA3 sont les coulis d'injection qui présentent les retrait et coefficient d'absorption les plus compatibles. Cependant, leurs propriétés de travail moins intéressantes leur valent à nouveau d'être considérés comme inadéquats.

Des quatre types de coulis hydrauliques commerciaux étudiés, le LEDAN TA1 présente les propriétés les plus compatibles avec celles de la pierre de Tournai originelle. Si le mortier à base de SYTON X30 est considéré comme le meilleur, le coulis LEDAN TA1 occupe la deuxième place. Ces deux coulis d'injection présentent aussi les meilleures propriétés de travail. Sur base de ces résultats, il a été décidé de tester et d'évaluer in situ ces deux matériaux de restauration.

²⁵ Cet aperçu se base sur les résultats des analyses de laboratoire : voir le rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA, tableau récapitulatif 23 (p. 92).

1.6. Étude de l'efficacité des coulis d'injection in situ

1.6.1. Introduction

Les mortiers d'injection mis au point en laboratoire ont été soumis à divers essais in situ. Trois zones d'essais ont été sélectionnées sur chaque portail, en concertation avec la cellule Monuments du laboratoire de l'IRPA. Avant d'appliquer ces mortiers d'injection, la cellule Monuments a réalisé des mesures du temps de propagation des ondes sonores.

1.6.2. Localisation des zones-tests

Dans les trois zones-tests, deux plus petites zones représentatives du phénomène de délamination ont été choisies. Les deux mortiers d'injection LEDAN TA1 et SYTON X30 ont été testés sur ces zones. Chacune de ces petites zones-tests se compose d'une écaille en train de se détacher.

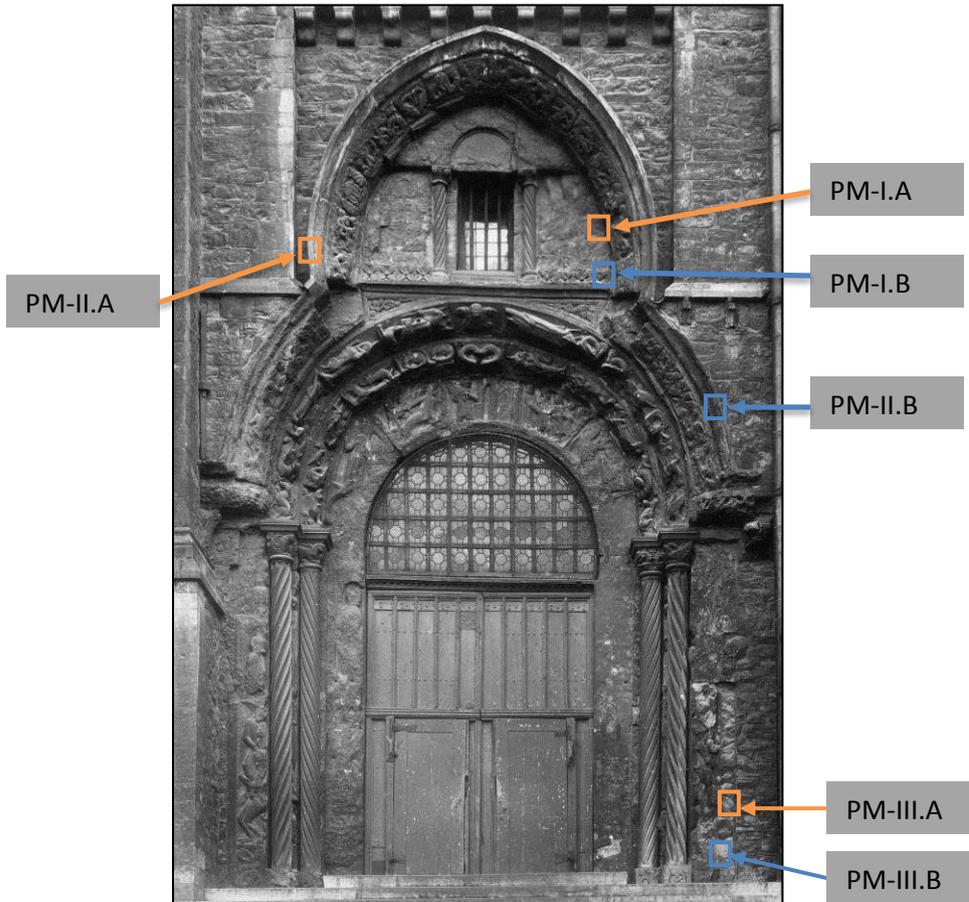
Tableau 11 Tableau récapitulatif des zones-tests à la Porte Mantile

Dénomination	Localisation	Mortier d'injection
<i>PM-I.A</i>	Tympan supérieur, bloc de droite : partie supérieure	Syton X30
<i>PM-I.B</i>	Tympan supérieur, bloc de droite : partie inférieure	Ledan TA1
<i>PM-II.A</i>	Cordon-larmier gauche	Ledan TA1
<i>PM-II.B</i>	Cordon-larmier droit	Syton X30
<i>PM-III.A</i>	Piédroit gauche 4 : partie inférieure	Syton X30
<i>PM-III.B</i>	Piédroit gauche 4 : partie supérieure	Ledan TA1

Tableau 12 Tableau récapitulatif des zones-tests à la Porte du Capitole

Dénomination	Localisation	Mortier d'injection
<i>PC-I.A</i>	Bandeau cintré 2 : gauche	Syton X30
<i>PC-I.B</i>	Bandeau cintré 2 : droite	Ledan TA1
<i>PC-II.A</i>	Bandeau cintré 3: en haut	Syton X30
<i>PC-II.B</i>	Bandeau cintré 3: en bas	Ledan TA1
<i>PC-III.A</i>	Écoinçon 2 : gauche	Syton X30
<i>PC-III.B</i>	Écoinçon 2 : droite	Ledan TA1

Porte Mantile



Porte du Capitole

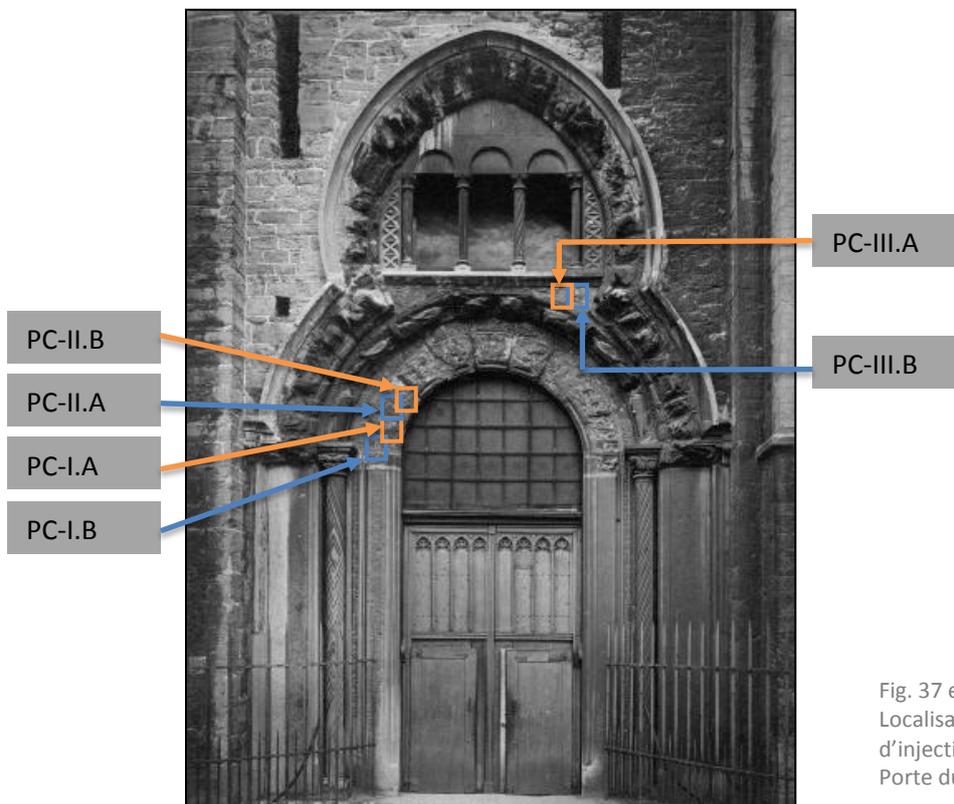


Fig. 37 et 38
Localisation des zones de test
d'injections sur la Porte Mantile et la
Porte du Capitole

1.6.3. Composition des mortiers d'injection

Voici la description des mortiers d'injection utilisés pour les tests in situ.

Dans les deux cas, les opérations ont été exécutées conformément à la méthode de consolidation de la pierre développée par Eberhard Wendler (WENDLER, 2000) décrite au paragraphe 1.2 et dont la mise au point s'est poursuivie dans le cadre des essais menés en laboratoire. Cette méthode comporte les opérations suivantes :

Préparation d'un mortier d'injection à base de SYTON X30 (1/2)

Tableau 13 La recette de base pour la préparation du coulis d'injection à base de SYTON X30.

Liant/charges	Pourcentage pondéral
Syton X30	33
Poudre de marbre noir 0,1 à 0,315 mm	66
Aerosil (1 à 1,5 %)	1

Tableau 14 Les différentes étapes dans le système modulaire de Wendler avec le coulis d'injection à base de SYTON X30.

Phase	Formes d'altération	Préparation
1	Désagrégation granulaire, microfissure (invisible à l'œil nu)	1 ^{re} consolidation : injecter du Syton X30 pur derrière les écailles afin de renforcer le matériau fragile
2	Fissure, délitage	2 ^e consolidation : après 10 à 20 min, appliquer une solution plus concentrée = Syton X30 + Aerosil (1-1.5 %)
3	Fissure plus épaisse, délamination, desquamation et écaillage	3 ^e consolidation = étape finale : appliquer le coulis d'injection Syton X30 1 :2 pour boucher les lacunes de plus de 300 µm de profondeur.
4	Divers	Mortier de réparation et comblement des bords : Syton X30 + agrégat jusqu'à la consistance souhaitée

Préparation d'un mortier d'injection à base de Ledan TA1

Tableau 15 La recette de base pour la préparation du coulis d'injection à base de LEDAN TA1.

Liant/charges	Pourcentage pondéral 1/0	Pourcentage pondéral 1/1	Pourcentage pondéral 1/2
Ledan TA1	33	26	20.8
Eau	53	41	32.8
Graphite	12	7	5.6
Granit gris 0 à 0,1 mm	-	8.6	13.6
Poudre de marbre noir 0,1 à 0,315 mm	-	17.2	27.2
Pigment : terre d'ombre naturelle	2	-	-

Tableau 16 Les différentes étapes dans le système modulaire de Wendler avec le coulis d'injection à base de LEDAN TA1.

Phase	Formes d'altération	Préparation
1	Désagrégation granulaire, microfissure (invisible à l'œil nu)	1 ^{re} consolidation : injecter du Ledan TA1 1:0 derrière les écailles afin de renforcer le matériau fragile
2	Fissure, délitage	2 ^e consolidation : après 10 à 20 min., appliquer une solution plus concentrée : Ledan TA1 1 :1
3	Fissure plus épaisse, délamination, desquamation et écaillage	3 ^e consolidation = étape finale : appliquer le coulis d'injection Syton X30 1:1 pour combler les lacunes creuses de plus de 300 µm.
4	Divers	Mortier de réparation et comblement des bords : Ledan TA1 + agrégat jusqu'à la consistance souhaitée à concurrence d'une proportion 1:7

1.6.4. Méthode par zone-test

1.6.4.1. Porte Mantile

Tableau 17 La méthode de travail détaillée avec le coulis de mortier à base de SYTON X30 par zone d'essai à la Porte Mantile

SYTON X30	
Zone d'essai	Méthodologie
PM-I.A	<ol style="list-style-type: none">1. injection de Syton X30 pur (20 ml*)2. traitement des côtés au Syton X30 rapport 1/4 + 1 % d'Aerosil3. injection de Syton X30 pur + 1 % d'Aerosil*4. injection de Syton X30 rapport 1/2 (10 à 15 ml*)
PM-II.B	<ol style="list-style-type: none">1. injection de Syton X30 pur (20 ml*)2. traitement des côtés du bloc situé à l'extérieur du cordon larmier au Syton X30 rapport 1/4 + 1 % d'Aerosil3. injection de Syton X30 rapport 1/2 + 1 % d'Aerosil (12 ml*)4. étançonnement des bords du bloc au Syton X40 rapport 1
PM-III.A	<ol style="list-style-type: none">1. injection de Syton X30 pur (20 ml*)2. traitement des côtés au Syton X30 rapport 1/4 + 1 % d'Aerosil3. injection de Syton X30 pur + 1 % d'Aerosil (40 ml*)4. injection de Syton X30 rapport 1/2 + 1 % d'Aerosil5. injection de Syton X30 rapport 1/2 (5 à 10 ml*)6. traitement du bord supérieur au Syton X30 rapport 1/4,5
*la quantité de mortier injectée n'a pas été fixée à l'avance, mais déterminée zone par zone en fonction du degré de dégradation ainsi que des fissures et microfissures internes relevées.	



Ecaille détachée et ouverte avant injection



Étape 1 :
injection au Syton X30 pur



Étape 2 :
étaçonnement des bords au
Syton X30 rapport 1/4,5

Fig. 39
Les différentes étapes d'injection avec le mortier à base de Syton X30

Tableau 18 La méthode de travail détaillée avec le coulis de mortier à base de LEDAN TA1 par zone d'essai à la Porte Mantile.

LEDAN TA1	
Zone d'essai	Méthodologie
PM-I.B	<ol style="list-style-type: none"> 1. humidification préliminaire à l'eau par injection 2. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 3. étançonnement des bords ouverts au Ledan TA1 rapport 1/5 4. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 (10 ml) 5. injection au Ledan TA1 rapport 1/1
PM-II.A	<p><u>Zone 1 (UPV)</u> : injection au Ledan TA1 rapport 1/0</p> <p>Remarque : un mélange au rapport 1/0 ne pénètre pas dans les fissures fines => il faut adapter la préparation. L'ajout d'une quantité d'eau deux fois plus élevée permet de réduire la viscosité (<i>pour connaître la composition précise, se reporter au tableau suivant</i>)</p> <hr/> <p><u>Zone 2 :</u> injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 Légère amélioration de la pénétration dans les fissures. <i>Remarque</i> : il convient de procéder à une humidification préalable à l'eau avant toute application du mortier d'injection, sinon la pénétration est insuffisante.</p> <hr/> <p><u>Zone 3 :</u> injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 précédée d'une humidification préalable à l'eau.</p>
PM-III.B fragment complètement branlant, largeur de l'ouverture > 1 cm	<ol style="list-style-type: none"> 1. traitement des bords au Ledan TA1 1/5 2. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 (15 ml) 3. au bout de 20 min. injection au Ledan TA1 rapport 1/1 <p>Remarque : le bloc perd son adhérence avec le support et se met à bouger, probablement sous l'effet de la pression accrue exercée par l'injection.</p>

Tableau 19 La recette adaptée du coulis d'injection LEDAN TA1.

Liant/charges	Pourcentage pondéral 1/0 rapport eau/liant adapté	Pourcentage pondéral 1/5
Ledan TA1	33	26
Eau	106	41
Graphite	12	14
Granit gris 0 à 0,1 mm	-	34
Poudre de marbre noir 0,1 à 0,315 mm	-	68
Pigment : terre d'ombre naturelle	2	-

1.6.4.2. Porte du Capitole

Tableau 20 La méthode de travail détaillée avec le coulis de mortier à base de LEDAN TA1 par zone d'essai à la Porte du Capitole.

SYTON X30	
Zone d'essai	Méthodologie
PC-I.A	<ol style="list-style-type: none"> 1. injection de Syton X30 pur 2. injection de Syton X30 pur + 1 % d'Aerosil (? ml)* 3. échançonnement des bords du bloc au Syton X40 rapport 1 :4,5 4. injection de Syton X30 rapport 1/2 (5 à 10 ml)*
PC-II.A	<ol style="list-style-type: none"> 1. injection de Syton X30 pur 2. injection de Syton X30 pur + 1 % d'Aerosil (? ml)* 3. échançonnement des bords du bloc au Syton X40 rapport 1:4,5 4. injection de Syton X30 rapport 1/2 (5 à 10 ml*)
PC-III.A	<ol style="list-style-type: none"> 1. traitement des côtés au Syton X30 rapport 1/4,5 + 1 % d'Aerosil 2. injection de Syton X30 pur + 1 % d'Aerosil (? ml)* 3. injection de Syton X30 rapport 1/2 + 1 % d'Aerosil (35 ml*)
<p><i>*la quantité de mortier injectée n'a pas été fixée à l'avance, mais déterminée zone par zone en fonction du degré de dégradation ainsi que des fissures et microfissures internes relevées.</i></p>	

Tableau 21 La méthode de travail détaillée avec le coulis de mortier à base de LEDAN TA1 par zone d'essai à la Porte du Capitole.

LEDAN TA1	
Zone d'essai	Méthodologie
PC-I.B	<ol style="list-style-type: none"> 1. humidification préalable à l'eau par injection 2. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 3. injection au Ledan TA1 rapport 1/1 (2 à 5 ml) <p>Remarque : déroulement sans heurt de l'injection, laquelle se caractérise par une pénétration profonde et une diffusion satisfaisante.</p>
PM-II.B	<ol style="list-style-type: none"> 1. humidification préalable à l'eau par injection 2. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 3. échançonnement des grandes ouvertures au Ledan TA1 rapport 1/5 4. injection au Ledan TA1 rapport 1/1
PC-III.B	<ol style="list-style-type: none"> 1. traitement des bords ouverts au Ledan TA1 rapport 1/5 2. injection d'une préparation adaptée de Ledan TA1 rapport 1/0 3. injection au Ledan TA1 rapport 1/1

1.6.5. Évaluation de la méthode par zone d'essai

Le traitement avec coulis d'injection à base de Syton X30 et de LEDAN TA1 a été évalué en fonction des cinq critères des propriétés de travail. Les experts ont également évalué trois propriétés supplémentaires qui revêtent une grande importance in situ : l'ouvrabilité sur site, le retrait et l'adhérence. Ces deux derniers aspects ont uniquement fait l'objet d'un examen visuel.

1.6.5.1. Porte Mantile

Tableau 22 Résumé de l'évaluation des zones-tests. +++ = très bien ; ++ = bien ; + = assez bien ; - = mauvais.

	Viscosité	Capacité d'injection	Temps de prise	Intégration esthétique	Ouvrabilité in situ	Retrait (fissures de retrait visibles)	Adhérence (examen visuel)
SYTON X30							
<i>PM-I.A</i>	+++	+++	++	++	+++	+++	+++
<i>PM-II.B</i>	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
<i>PM-III.A</i>	+++	+++	++		+++		+++
Synthèse des observations	/	/	Long temps de prise, avantageux dans ce cas-ci	(1) éclat superficiel dans les zones d'écoulement sur la surface ; (2) teinte parfois trop sombre	/	(1) très fines fissures de retrait dans le mortier brut (rapport 1/4,5).	Bonne adhérence à la traction et à l'impact
LEDAN TA1							
<i>PM-I.B</i>	+	+	+	+	+	+++	+
<i>PM-II.A</i>	++	++	+	+	++	+++	++
<i>PM-III.B</i>	++	++	+	+	+	+++	+
Synthèse des observations	/	(1) amélioration de la capacité d'injection après humidification préalable à l'eau ; (2) difficilement injectable dans les fissures verticales ; (3) écoulement insuffisant sous les écailles branlantes.	(1) temps de prise trop court, les trous d'injection se colmatent.	(1) teinte trop bleue, texture satisfaisante ; (2) formation de bulles d'air à la surface ; (3) formation d'un voile à la surface.	(1) colmatage (trop) rapide des trous d'injection	/	(1) les grands blocs requièrent une fixation ponctuelle à la colle ; (2) absence de bouchage complet de la lacune située derrière le bloc (son creux à la percussion).

PM-I.A



PM-I.B



PM-II.A



PM-II.B



PM-III.A



PM-III.B



Fig. 40
Les différentes zones-tests sur la Porte Mantile

1.6.5.2. Porte du Capitole

Tableau 23 Résumé de l'évaluation des zones-tests
+++ = très bien ; ++ = bien ; + = assez bien ; - = mauvais

	Viscosité	Capacité d'injection	Temps de prise	Intégration esthétique	Ouvrabilité in situ	Retrait (fissures de retrait visibles)	Adhérence (examen visuel)
SYTON X30							
<i>PC-I.A</i>	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++
<i>PC-II.A</i>	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++
<i>PM-III.A</i>	+++	+++	+++	++	+++	+	+++
Synthèse des observations	/	(1) injection apparemment satisfaisante des fissures fines.	/	(1) teinte sombre (2) absence d'éclat (3) texture satisfaisante	/	(1) absence de craquelures et d'affaissements.	/
LEDAN TA1							
<i>PC-I.B</i>	++	++	++	++	++	+++	++
<i>PC-II.B</i>	++	-	++	++	++	+++	++
<i>PC-III.B</i>	++	++	++	+	++	+++	+++
Synthèse des observations	/	(1) pénétration médiocre	(1) colmatage rapide des trous d'injection.	(1) trop bleu	/	/	/

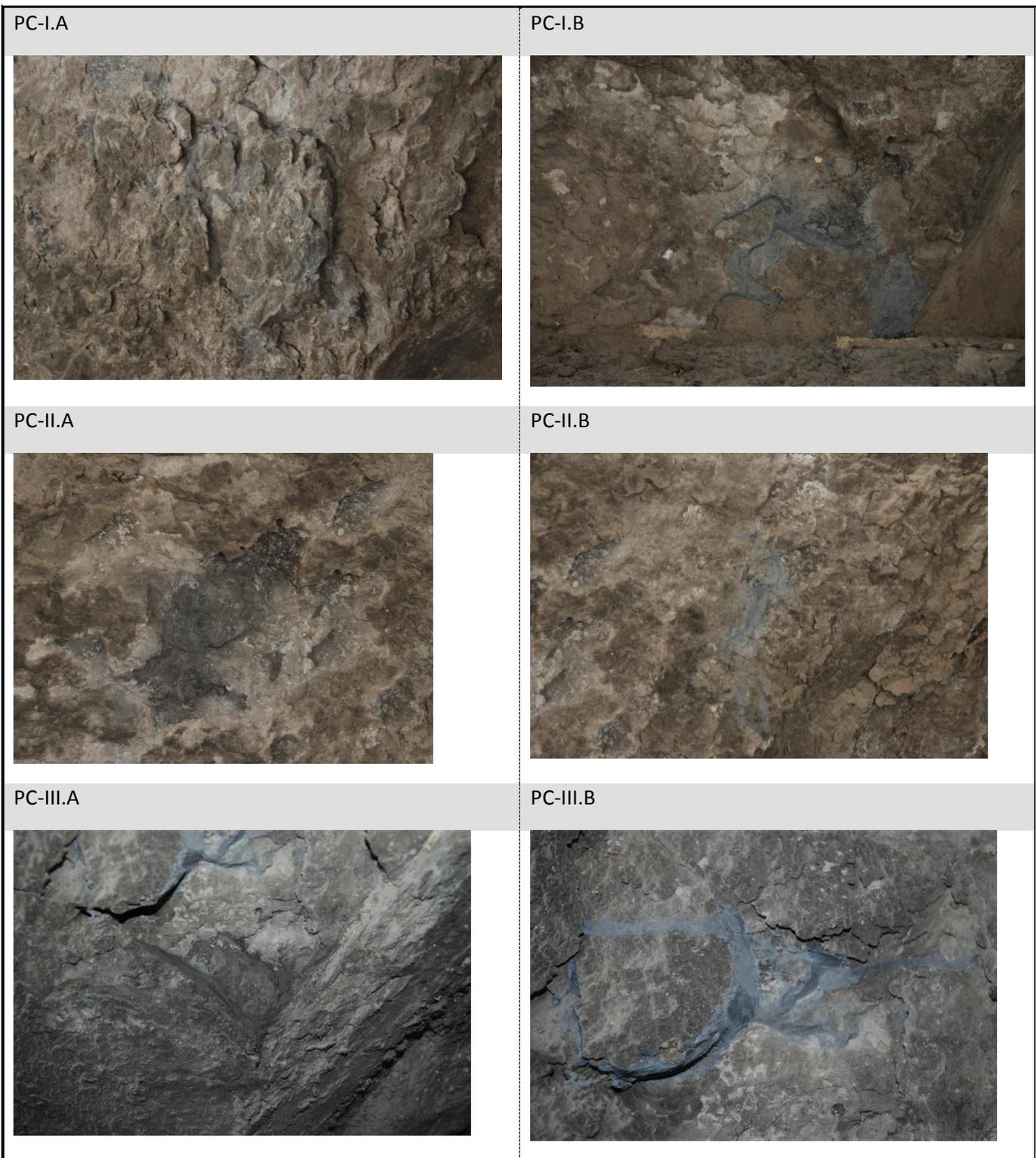


Fig. 41
Les différentes zones-tests sur la Porte du Capitole

1.6.6. Conclusion

Une analyse comparative des deux séries d'essais effectuées aussi bien sur la Porte Mantile que sur la Porte du Capitole permet d'en tirer des conclusions sans équivoque :

(1) le coulis d'injection à base de LEDAN TA1 ne satisfait pas aux exigences requises. En raison de sa viscosité encore trop élevée, la capacité d'injection de ce coulis demeure insuffisante pour pénétrer dans toutes les fissures et microfissures. De même, les experts se sont vus contraints d'adapter leur méthode de traitement. Une humidification préalable s'est avérée indispensable pour améliorer la pénétration du coulis et il leur a fallu adapter la préparation mise au point en laboratoire (ajout d'une quantité d'eau supplémentaire). Ces interventions ont fait naître des doutes quant aux propriétés techniques de ce produit parce que les recherches menées par le département Laboratoires de l'IRPA avaient révélé que plus la teneur en eau du coulis à base de LEDAN TA1 était élevée, plus son adhérence laissait à désirer, plus son module d'élasticité était faible et plus la dilatation due à l'absorption d'eau et le retrait étaient importants.

L'ouvrabilité in situ s'est également avérée moins favorable. Les experts se sont vus contraints de procéder à un dosage précis des différents composants avant de les mélanger pendant quelques secondes à une vitesse constante pour obtenir la bonne consistance. La brièveté du temps de prise entraîne un colmatage rapide des trous d'injection. En conséquence, le système de Wendler est plus difficile à appliquer.

Après durcissement, l'intégration du mortier à la surface environnante en pierre naturelle laisse généralement à désirer. Sa teinte est encore trop bleue par rapport à celle de la pierre de Tournai altérée.

(2) le coulis d'injection à base de Syton X30 présente les meilleures propriétés de travail :

- le liquide pur possède une très faible viscosité qui lui permet selon toute probabilité de s'insinuer dans les fissures et microfissures. Ainsi, ce mortier d'injection se distingue par une bonne capacité d'injection. Si l'on augmente le rapport de mélange en procédant d'abord à un ajout d'Aerosil (1 %) puis à l'adjonction d'une poudre de marbre noir, la viscosité et la capacité d'injection de la préparation demeurent très satisfaisantes.

- le temps de prise est satisfaisant. Il est beaucoup plus long que celui du coulis d'injection à base de LEDAN TA1, mais cette propriété est avantageuse dans le cas présent. En raison d'un temps de prise dont la durée est susceptible d'atteindre plus de 24 heures si l'on augmente le rapport de mélange, rien ne s'oppose à l'application du système de Wendler. Cette préparation autorise l'exécution d'injections humide sur humide sans entraîner aucun problème de compatibilité.

- le coulis d'injection polymérisé s'intègre bien à la surface environnante en pierre naturelle. Dans certaines zones telles que la PC-III.A, la teinte obtenue est trop sombre. Si le Syton X30 pur et le mélange à l'Aerosil s'écoulent sur la pierre naturelle par de petites fissures, le coulis polymérisé donne un certain éclat à la surface atteinte. Il est possible d'y remédier en procédant à un nettoyage par microsablage.

- comme le mortier d'injection se compose exclusivement du liant Syton X30 et d'une poudre de marbre noir additionnée d'Aerosil (1 %), l'ouvrabilité in situ est excellente. La composition est simple et la préparation facile à exécuter. À condition d'être recouvert, le mortier préparé demeure suffisamment fluide assez longtemps pour permettre son application en plus grandes quantités.

- seul le mortier dont le rapport de mélange correspond à 1/4,5 présente des fissures de retrait. Ces fissures sont probablement dues à la trop faible proportion de granulats que contenait le mortier pour être appliqué en grande quantité. L'ajout d'une quantité accrue de granulats à cette préparation permet d'y remédier.

- l'évaluation de l'adhérence ne repose que sur un examen visuel assorti d'une série de percussions à la surface de la pierre, mais les blocs traités présentent une bonne adhérence après injection.

Le Labo a effectué des mesures ultrason (Ultrasonic Pulse Velocity) pour évaluer les premiers essais de fixation. Pour les résultats des temps de propagation des ondes sonores avant et après traitement de fixation des écailles, il est fait référence au rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA ²⁶. En bref nous pouvons dire que, de manière globale, les mortiers d'injection, notamment le Syton X30 et le Ledan TA1, sont capables de pénétrer en profondeur dans les fissures et de les combler suffisamment. Les résultats obtenus ne permettent malheureusement pas de définir de façon univoque quel des deux produits est le plus efficace.

Il est clair que le coulis d'injection à base de Syton X30 est le mieux adapté aux objectifs poursuivis. Par conséquent, il a été décidé de continuer à l'utiliser pendant la restauration témoin.

26 Voir le rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA, p 102-117

2. Analyse de l'efficacité d'un nettoyage

2.1. Introduction

Il va de soi que, compte tenu de la fragilité de la pierre, son nettoyage doit être précédé d'un traitement à base de mortiers d'injection pour éviter des pertes de matière.

Les essais de nettoyage expérimental effectués in situ ont permis d'identifier la méthode de nettoyage la plus appropriée. Comme décrit au paragraphe 5.2., le délitage et la formation de croûtes noires constituent les deux phénomènes de dégradation les plus courants. Ces deux phénomènes affectent essentiellement l'état de conservation, l'aspect des portails et, de ce fait, le traitement de la pierre de Tournai.

Les différentes zones identifiées se distinguent chacune par une problématique spécifique :

- Blocs de pierre présentant un délitage restreint et une fine croûte de gypse.

Ces zones englobent principalement des blocs dont les sculptures d'origine sont encore clairement identifiables. Elles présentent toutefois différentes couches de finition qui influent sur le nettoyage et dont il faut, par conséquent, tenir compte.



Fig. 42
Exemple d'un délitage restreint et une fine couche de gypse

- Blocs de pierre présentant un délitage prononcé et une croûte de gypse fine ou inexistante.

Ces zones requièrent un léger nettoyage superficiel parce qu'il convient de privilégier le traitement de consolidation



Fig. 43
Exemple d'un délitage prononcé et une croûte de gypse fine ou inexistante

- Blocs de pierre présentant un délitage restreint, voire imperceptible, et une épaisse croûte de gypse framboïdale. Diverses études ont révélé la cohésion limitée de la pierre naturelle sous de telles croûtes de gypse.

Le nettoyage de ces zones constitue le volet le plus important de leur traitement.



Fig. 44
Exemple d'un délitage restreint et une épaisse couche de gypse

2.2. Méthode

La méthode de nettoyage doit remplir certaines conditions :

- la technique utilisée doit être efficace ;
- elle ne peut occasionner aucun dommage direct ou indirect à la surface de pierre dégradée ;
- elle doit garantir la meilleure conservation possible de l'épiderme et de la patine de la pierre ;
- elle ne doit ni engendrer un sous-produit néfaste ni accélérer le processus de dégradation ;
- elle doit être contrôlable et permettre d'adapter ou d'interrompre à tout moment le nettoyage (VERGÈS-BELMIN & BROMBLET, 2000).

Étant donné la fragilité et la grande sensibilité à l'eau de la pierre de Tournai, les méthodes de nettoyage à l'eau (par ruissellement d'eau, par nébulisation ou à la vapeur d'eau) sont inappropriées. Un nettoyage chimique, effectué au moyen de cataplasmes par exemple, est également exclu ; ce type de nettoyage requiert en effet un bon post-nettoyage à l'eau de la surface traitée afin d'éliminer les résidus éventuels.

Dans le cadre de cette étude préliminaire, l'analyse des multiples techniques de nettoyage utilisées dans le domaine de la conservation et de la restauration de la pierre naturelle a convaincu les restaurateurs d'accorder leur préférence au nettoyage mécanique assorti d'un microsablage. Cette méthode présente l'avantage de prévenir toute absorption d'eau, de ne présenter aucun risque d'infiltration d'eau, d'efflorescences salines ou de formation de taches. En outre, elle est susceptible d'être appliquée sur une zone convenablement délimitée.

Cette méthode comprend les étapes suivantes :

- (1) enlèvement des dépôts de poussières et des éléments coagulés en surface par action mécanique (brosse douce, spatule) ;
- (2) nettoyage par micro-abrasion avec différents abrasifs. Le tableau 14 répertorie les différents abrasifs et leurs propriétés respectives.

Tableau 24 Enumération des abrasifs sélectionnés et de leurs propriétés physiques

Abrasif	Granulométrie		Forme	Dureté (Mohs)
	Ø µm	mesh		
<i>Oxyde d'alumine Al₂O₃</i>	90	150	angulaire	9.0
<i>Oxyde d'alumine Al₂O₃</i>	70	180	angulaire	9.0
<i>Oxyde d'alumine Al₂O₃</i>	50	240	angulaire	9.0
<i>Oxyde d'alumine Al₂O₃</i>	30	320	angulaire	9.0
<i>Microbilles de verre SiO₂</i>	150-250	+/- 100-60	ronde	5.5
<i>Microbilles de verre SiO₂</i>	75-150	+/- 200-100	ronde	5.5
<i>Microbilles de verre SiO₂</i>	45-90	+/- 325-170	ronde	5.5
<i>Microbilles de verre SiO₂</i>	0-45	+/- 325	ronde	5.5
<i>Coques de noix finement broyées</i>	250 - 1000	60-18	angulaire	3-4
<i>Carbonate de calcium Durcal 130 CaCO₃</i>	20-250	700 - 60	ronde	3

Le tableau 14 donne un résumé des abrasifs utilisés et de leurs propriétés générales mentionnées dans les fiches techniques. Dans ces fiches, la granulométrie des granules était donnée tantôt en unités «mesh» tantôt en microns (µm). La différence est que l'unité mesh réfère à une quantité de grains par surface tandis que les microns réfèrent directement à la dimension des grains. Pour faciliter la comparaison entre les abrasifs, les granulométries en mesh ont été converties en µm selon la norme « S 410-1:2000».

L'Olivine GL70 (silicate de magnésium) et les coques de noix finement broyées n'ont pas été testées durant les essais de nettoyage. Leur forme et leur trop grosse granulométrie ne permettent pas un nettoyage doux et n'offrent pas suffisamment de contrôle sur le nettoyage de sculptures détaillées.

La précision du nettoyage détermine la qualité du traitement. La qualité du nettoyage par microsablage est fortement déterminée par le contrôle du restaurateur sur l'abrasion qu'il cause. La vitesse de l'abrasion influence la facilité du restaurateur à prévoir l'effet de ses mouvements et à anticiper l'abrasion qu'il cause.

Plus faible est la masse du substrat abrasée, plus précise sera l'abrasion. Différents paramètres du granulat influencent la masse de substrat abrasée :

- leur forme : les granules angulaires abrasent des plus grandes masses de substrat que les granules sphériques ;
- leur granulométrie : les granules grossiers abrasent de plus grandes masses de substrat que les granules fins ; la projection de très fines poudres risque de causer un jet moins régulier, ce qui réduit le contrôle sur l'abrasion ;
- leur dureté : les granules durs abrasent de plus grandes masses de substrat que les granules tendres.

Les conditions d'exécution du microsablage influent également sur la masse de substrat abrasée :

- la pression de l'air : plus la pression augmente, plus la masse de substrat abrasée est importante ;
- le débit :- plus le débit augmente, plus la masse de substrat abrasée par projection augmente.

Ainsi les granulats sphériques, fins et tendres abraseront le moins de masse du substrat quand ils seront projetés à basse pression et à faible débit. On peut donc considérer que ces granulats permettent d'abréger plus lentement (et plus graduellement) et donc de nettoyer avec plus de précision (KEGELS, n.d.).

1.3. Localisation des zones-tests sur la Porte Mantile et les résultats

Les tests de nettoyage ont été réalisés sur des zones représentatives de la Porte Mantile.

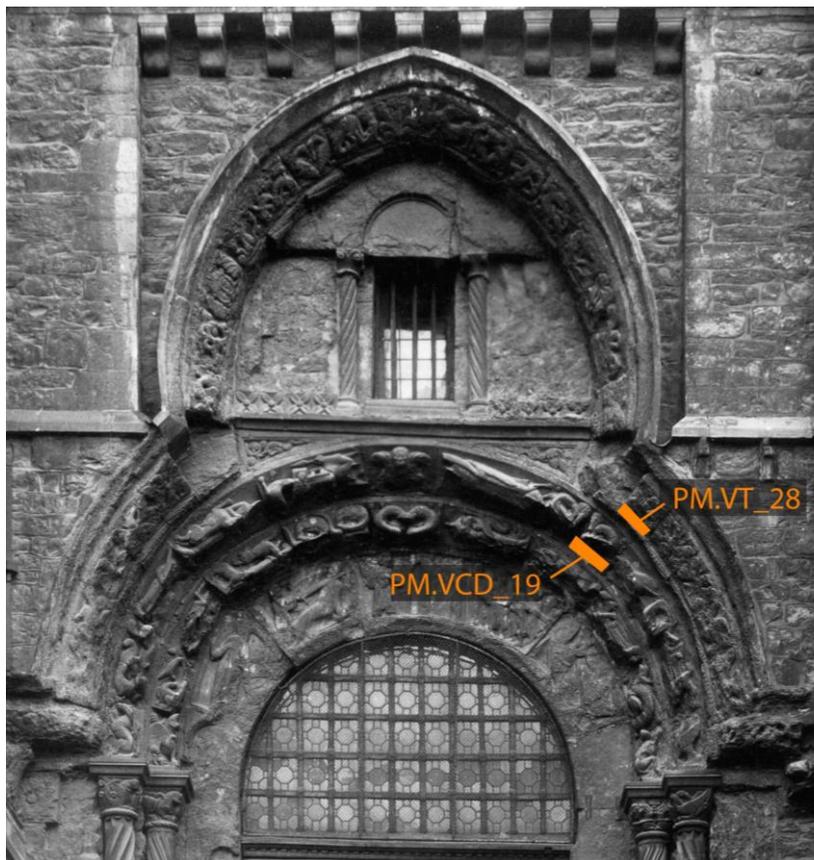


Fig. 45
Localisation des zones-tests sur la Porte Mantile

Tableau 10 Résumé de l'évaluation des zones-tests sur la zone PM.VT_28
 +++ = très bien ; ++ = bien ; + = assez bien ; - = mauvais.

Localisation de la zone-test : bloc de pierre PM.VT_28 – zone inférieure



Zone	Granulat	Distance par rapport à la surface	Débit	Pression	Temps	Résultat
Test 1	Oxyde d'alumine 30 µm	5-7 cm	2	2	10'	-
Test 2	Oxyde d'alumine 50 µm	5-7 cm	2	2	10'	++
Test 3	Oxyde d'alumine 70 µm	5-7 cm	2	2	10'	+
Test 4	Oxyde d'alumine 90 µm	5-7 cm	2	2	10'	-
Test 5	Microbilles de verre 0-45 µm	5-7 cm	2	2	10'	-
Test 6	Microbilles de verre 45-90 µm	5-7 cm	2	2	10'	++
Test 7	Microbilles de verre 75-150 µm	5-7 cm	2	2	10'	+
Test 8	Microbilles de verre 150-250 µm	5-7 cm	2	2	10'	-

Tableau 26 Résumé des résultats sur la zone PM.VT_28 :

Zone-test	Constats
PM.VT_28	<p data-bbox="427 286 1396 353">Défaut perpendiculaire à la courbure d'arche (gauche) La zone présente une délamination et beaucoup d'épaisses croûtes de gypse.</p> <p data-bbox="427 383 1396 488">Avant de pouvoir procéder au microsablage, une grande partie de ces croûtes devront d'abord être amincies au scalpel, après avoir été ramollies avec des compresses d'eau.</p>  <p data-bbox="427 1014 1396 1120">Les granulats très fins (oxyde d'alumine moy. 30 µm et microbilles de verre 0-45 µm) ne permettent qu'un nettoyage irrégulier et lent, et le restaurateur a peu de contrôle sur ce qu'il fait.</p> <p data-bbox="427 1149 1396 1254">Les oxydes d'alumine 240 (moy. 50 µm) et 180 (moy. 70 µm) donnent tous deux un bon résultat : les granulats exercent clairement un effet sur les croûtes noires.</p> <p data-bbox="427 1283 1396 1350">Les microbilles avec une granulométrie de 45 à 90 µm et de 75 à 150 µm donnent également un bon résultat.</p> <p data-bbox="427 1379 1396 1525">Le résultat obtenu avec des abrasifs plus gros ne donnent pas un résultat satisfaisant. La croûte de gypse est enlevée relativement vite avec une pression de 2 bar, ce qui rend le contrôle du nettoyage difficile. L'oxyde d'alumine 90 µm et les microbilles 150-250 µm sont trop agressifs.</p> <p data-bbox="427 1554 1396 1621">Le carbonate de calcium a des grains assez gros mais est tendre. Sur cette zone de test, il n'a exercé aucun effet.</p>

Tableau 27 Résumé de l'évaluation des zones-tests sur la zone PM.VCD_19
 +++ = très bien ; ++ = bien ; + = assez bien ; - = mauvais.

Localisation de la zone-test : bloc de pierre PM.VCD_19 – moitié droite – surface plane sous la figure



Zone	Granulat	Distance par rapport à la surface	Débit	Pression	Temps	Résultat
Test 1	Scalpel	/	/	/	10'	++
Test 2	Oxyde d'alumine 30 µm	5-7 cm	4	3	10'	-
Test 3	Oxyde d'alumine 50 µm	5-7 cm	4	3	10'	++
Test 4	Oxyde d'alumine 70 µm	5-7 cm	4	3	10'	+
Test 5	Oxyde d'alumine 90 µm	5-7 cm	4	3	10'	-
Test 6	Microbilles de verre 0-45 µm	5-7 cm	4	3	10'	-
Test 7	Microbilles de verre 45-90 µm	5-7 cm	4	3	10'	++
Test 8	Microbilles de verre 75-150 µm	5-7 cm	4	3	10'	+
Test 9	Microbilles de verre 150-250 µm	5-7 cm	4	3	10'	-
Test 10	Carbonate de calcium	5-7 cm	4	3	10'	-

Les résultats des tests en bas de la zone PM.VCD_19 correspondent aux tests effectués sur la zone PM.VT_28. Des résultats similaires ont été obtenus durant le microsablage. Seuls le débit et la pression ont été augmentés, ce qui montre que la technique du microsablage a une action plus abrasive sur les croûtes de gypse. Un test complémentaire a été exécuté au scalpel (voir le test n°1). La croûte de gypse a été enlevée manuellement, ce qui a donné un bon résultat. Il apparaît ainsi que le microsablage et l'élimination au scalpel peuvent être appliqués simultanément.

Les tests donnent les résultats suivants :

- La poudre très fine, Microbilles de verre 0-45 μm et Oxyde d'alumine 30 μm , n'est pas efficace et les granulats doivent être projetés pendant un long moment avant que le résultat ne soit visible. Le résultat est en outre irrégulier et difficile à contrôler.
- Une poudre épaisse donne un résultat très rapide, ce qui empêche un nettoyage subtil. Les grains créent des cratères dans la surface et l'opération est difficile à contrôler.
- Les grains de taille moyenne, entre 45 et 150 μm , semblent les plus adéquats, avec une préférence pour les grains plus fins, de 50 μm en moyenne.
- Les microbilles de verre semble plus appropriée que l'oxyde d'alumine. Sa forme ronde et sa dureté moyenne (Mohs 6) semblent avantageuses pour l'enlèvement des croûtes de gypse dure sans être trop agressive. Par contre l'oxyde d'alumine a une forme en coin et une dureté plus élevée (Mohs 9).
- Le carbonate de calcium ne convient que pour l'enlèvement de fines croûtes de gypse en raison de son grain tendre mais gros. Le microsablage avec du carbonate de calcium est toujours combiné avec un dégagement manuel, au scalpel, des détails fins dans la sculpture.

1.4. Conclusion

Pour les croûtes de gypse épaisses, la projection d'un abrasif est quasi impossible sans un pré-traitement avec des compresses d'eau et au scalpel . WEG ????

La transition entre la croûte de gypse et la pierre est difficile à déterminer puisque la croûte se forme aussi entre les écailles de pierre. Si la croûte de gypse est trop épaisse, elle devra d'abord être amincie au scalpel avant de pouvoir être soumise au microsablage ; pour ce faire, la croûte peut être attendrie avec une compresse et de l'eau au préalable.

Le microsablage convient tout à fait pour l'enlèvement de croûtes de gypse dans des zones plus profondes, par exemple entre des surfaces de pierre souffrant de délamination et des zones très détaillée.

Pendant le nettoyage, il a semblé que la fixation des écailles de pierre au Syton X30 a fortement contribué à la stabilité du support. Des injections complémentaires devront tout de même être faites pendant le nettoyage. Sous les croûtes de gypse se trouvent en effet souvent des fissures ou des craquelures qui ne sont pas visibles avant le nettoyage. Ces injections seront faites selon la même méthode que pour la consolidation de la pierre avant nettoyage. Le Syton X30 présente suffisamment de pouvoir d'adhésion et peut aussi être appliqué pour le fixage de petits fragments instables ou détachés.

Le film blanc que laisse l'injection de Syton X30 avec aerosil (1-1,5 %) et de Syton X30 avec poudre de marbre (1:2) peut aisément être enlevé par le microsablage ou au scalpel.

Pour que le nettoyage soit efficace, le nombre de types de granulats doit être limité à deux maximum ; pour parvenir au résultat souhaité, la pression et le débit peuvent éventuellement être ajustés. Un réglage précis est nécessaire pour un traitement correct et un bon résultat. La qualité d'exécution repose également sur l'expertise de l'exécutant. Une fois que les problématiques des différents types d'altérations sont connues, le nettoyage sera plus facile et l'appareil utilisé pour le microsablage pourra être réglé correctement.

Les microbilles de verre (45-90 µm) donnent le meilleur résultat en raison de la finesse et de la rondeur du grain de dureté moyenne (6 mohs). Ce granulat semble convenir pour l'élimination de la croûte de gypse et le nettoyage de la pierre naturelle sur les différentes zones du portail. Moyennant un bon réglage de la microsableuse (sur le plan du débit et de la pression), le nettoyage peut être effectué sans risque d'endommagement au support.

On peut globalement dire que les zones situées en profondeur dans les portails présentent moins de problèmes de délitage, des croûtes de gypse plus fines et plus de restes de couches de chaux blanches. Dans ces zones (par exemple, la zone PM.BC_5) subsistent souvent des sculptures originales encore lisibles, qui se trouvent sous une fine couche de gypse. De telles zones peuvent donc être nettoyées au scalpel, avec un abrasif doux (carbonate de calcium). La présence de la couche de chaux blanche rend la croûte de gypse facile à enlever. Celle-ci s'est formée sur la couche supérieure de l'épais ensemble de couches de chaux. Le carbonate de calcium semble approprié pour l'enlèvement de fines couches de gypse, avec une pression de 1,5 bar et un débit moyen (4 à 5). La granulométrie du carbonate de calcium (Durcal 130) s'étend sur une large gradation (20-250 µm) mais ne semble pas convenir pour le traitement de détails très fins comme les paupières, les poils de barbe, certains motifs, etc. Ces zones doivent plutôt être dégagées au scalpel.

Le microsablage permet d'obtenir un très bon résultat sur les zones planes ou sur des sculptures avec peu de détails. Il devra donc être combiné à un dégagement au scalpel pour obtenir un résultat homogène partout.

3. Restauration pilote

3.1. Introduction

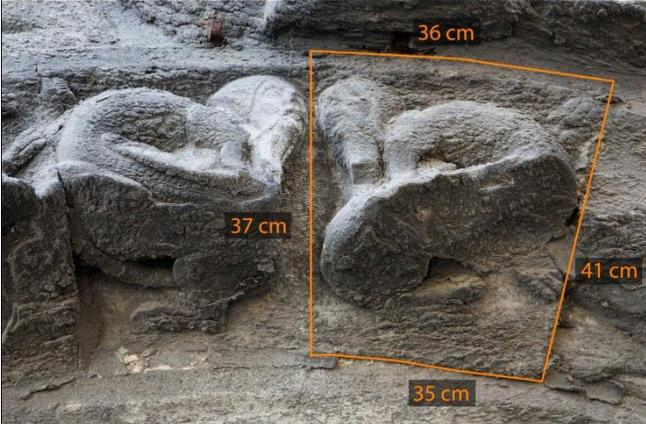
Pour montrer clairement le résultat final du traitement proposé, une restauration pilote a été réalisée sur la porte Mantile. La surface de test couvre les différents phénomènes de dégradation et les différents types de pose des blocs de pierre.

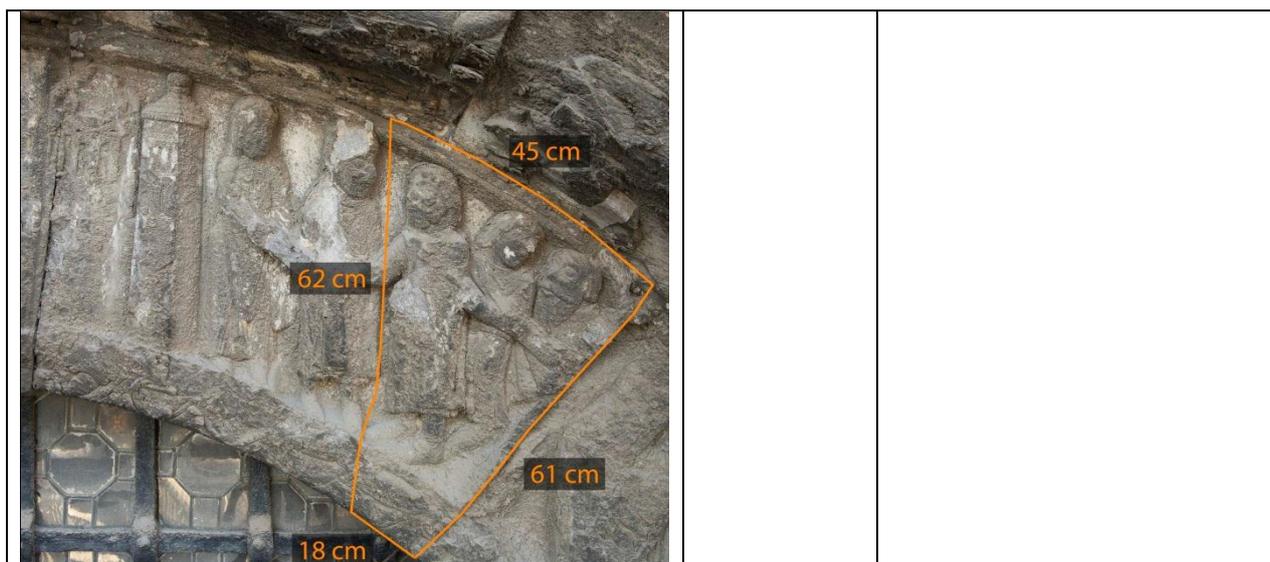
3.2. Localisation et description des différentes zones de la restauration pilote



Fig. 46
Localisation de la restauration
pilote

Tableau 28 Description des différentes zones de la restauration pilote

Zone-test	Bloc de pierre	Description
<p>Zone 1</p> 	<p>PM.VT_28 (moitié gauche)</p>	<p>Délit perpendiculaire à la courbure d'arche (gauche)</p> <p>-Croûte noire épaisse > 10 mm sur toute la surface</p>
<p>Zone 2</p> 	<p>PM.VCD_19 (moitié droite)</p>	<p>Délit perpendiculaire à la courbure d'arche (gauche)</p> <p>-Délitage > 2 cm</p> <p>-Croûte noire épaisseur moyenne (2-10 mm) et épaisse (> 10 mm)</p>
<p>Zone 3</p> 	<p>PM.VCD_8</p>	<p>Délit perpendiculaire à la courbure d'arche (gauche)</p> <p>-Délitage > 2 cm</p> <p>-Croûte noire épaisseur moyenne (2-10 mm) et épaisse (> 10 mm)</p>
<p>Zone 4</p>	<p>PM.BC_5 (moitié droite)</p>	<p>Délit parallèle au parement</p> <p>-Délitage superficiel < 1 cm (local)</p> <p>-Croûte noire mince (0-2 mm)</p>



3.3. Méthode utilisée

Dans un premier temps, la surface des différentes zones a été dépoussiérée à l'aide d'une brosse douce. Ensuite, des injections à base de Syton X30 ont été effectuées selon le système modulaire de Wandler.

Tableau 29
Liste des mortiers injectés:

Composition	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5	
	Volume	Durée d'action	Volume	Durée d'action	Volume	Durée d'action	Volume	Durée d'action	Volume	Durée d'action
Syton X30 pur	100 ml	10'	100 ml	25'	45 ml	18'	80 ml	30'	40 ml	21'
Syton X30 + aerosil (1 à 1,5%)	40 ml	6'	40 ml	13'	50 ml	22'	50 ml	17'	20 ml	15'
Syton X30 avec aerosil (1 à 1,5%) +poudre de marbre (1:2)	50 ml	35'	30 ml	40'	25 ml	36'	30 ml	30'	20 ml	30'

Outre le mortier injecté, un mortier ayant une plus grande proportion de poudre de marbre noir (1:4,5) a été appliqué. Il a été utilisé pour obturer les bords et/ou finir les zones injectées.

Après un délai d'attente de 3 semaines, la surface a été nettoyée.

La méthode de nettoyage a été déterminée en fonction de l'épaisseur et de la dureté des croûtes de gypse, ce qui a conduit à choisir 2 méthodes différentes :

- Les zones présentant une croûte noire mince au-dessus des couches de peinture à la chaux blanc ont été principalement dégagées à sec, à l'aide d'un scalpel, jusqu'aux couches de chaux.

Ensuite, la finition locale a été assurée par un microsablage à l'aide de :

- Microbilles de verre (45-90 μm) à 1 bar – max. 2 bars pour les détails
- Carbonate de calcium à 1 bar – max. 2 bars pour uniformiser la surface des couches de peinture à la chaux blanc.

Cette méthode a été appliquée sur la zone 4 et les parties des zones 3 et 4 où les couches de chaux blanc sont présentes à la surface.

- Les autres zones, à savoir la zone 1 et les parties restantes des zones 3 et 4, présentent toutes une croûte noire moyenne à épaisse et sont nettoyées de la même manière :
 - Les croûtes de gypse sont ramollies avec une compresse d'ouate et d'eau et ensuite amincies au scalpel.
 - Les croûtes de gypse sont ensuite éliminées à l'aide de microsablage et de microbilles de verre (45-90 μm) et une pression variant de 2 à 4 bars.

L'élimination des croûtes de gypse a mis au jour différentes fissures qui n'étaient pas visibles avant le nettoyage. Des injections complémentaires ont été entreprises. Ces injections ont été réalisées selon la même méthode que pour la consolidation de la pierre avant nettoyage.

3.4. Résultat

Le résultat du traitement est très satisfaisant. Il fait réapparaître les détails et accroît la lisibilité des sculptures.

Les injections ont permis de nettoyer la surface sans perte de matière.

3.5. Reportage photo de la restauration pilot



Fig. 47 et 48
Zone de test avant et après traitement



Fig. 49
PM.BC_5 avec à droite la zone de
test 4 après traitement



Fig. 50
Zone de test 4 après traitement



Fig. 51
Détail de PM.BC_5 avec à droite la zone de test 4 après traitement



Fig. 52
Détails de la zone de test 4 après traitement



Fig. 53
Détails de la zone de test 4
après traitement



Fig. 54
PM.VCD-8, zone 3
À moitié traité



Fig. 55
Détail de la zone de test 3
après traitement



Fig. 56
PM.VCD-19,
zone 2
Après
traitement



Fig. 57
Zone 2
Après traitement

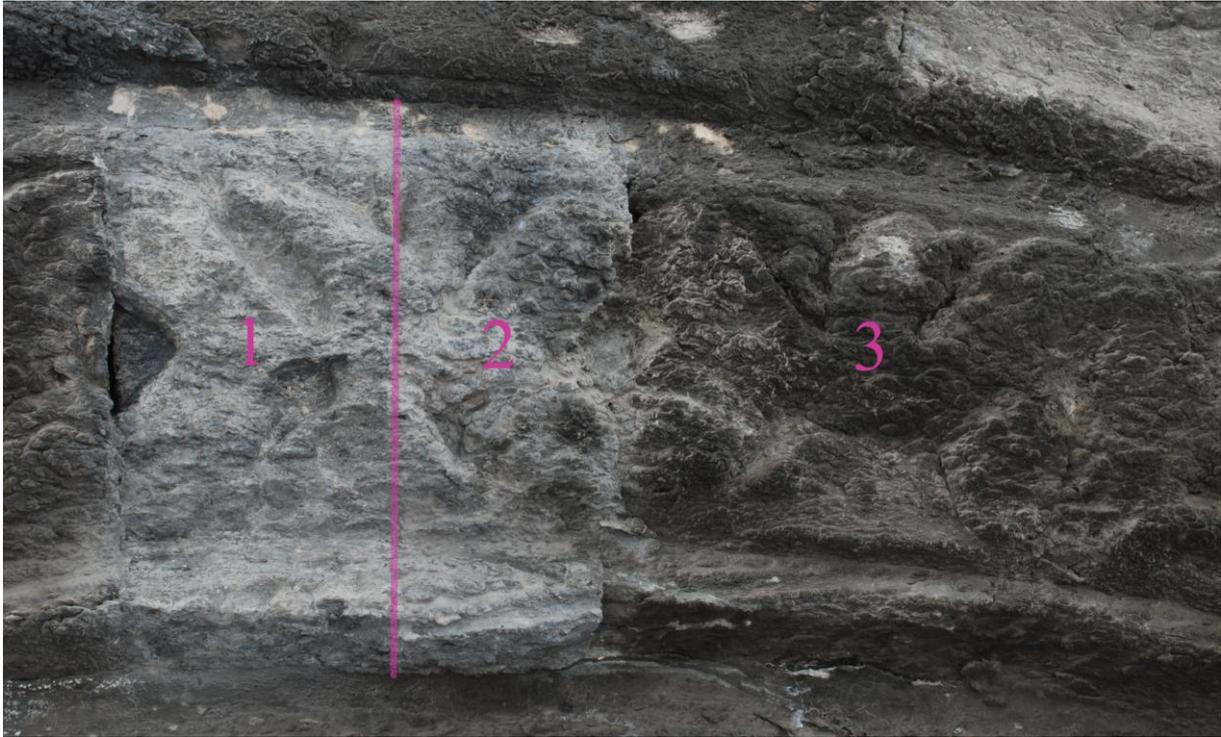


Fig. 58
PM.VT-28 et PM.VT-29, Zone 1

Nr. 1 : Après traitement (Injection et nettoyage),
nr. 2 : Après injection,
nr. 3 : avant traitement



Fig. 59
PM.VT-27(gauche) non traitée et PM.VT-29 (Zone 1) après traitement

4. Protocole de restauration

1-Dépoussiérage

Il faut tout d'abord éliminer les toiles d'araignée et la couche de poussière à l'aide d'une brosse douce et d'un aspirateur. Sur certaines zones, ce traitement s'avère impossible en raison de la fragilité de la surface de pierre. Cette action doit être interrompue si des pertes de matière interviennent localement.

2- Traitement des fissures et des fractures : consolidation à l'aide des mortiers d'injection

Sur la base de l'étude en laboratoire et de tests in situ, le produit *Syton X30* a été sélectionné et prescrit dans un système modulaire. Ce produit peut être appliqué pur, en coulis ou sous forme de mortier. Pour l'agrégat, de la poudre de marbre noir a été utilisée (0.1-0.315 mm).

Méthode/traitement :

Les différentes compositions ont été appliquées successivement. :

- 1 Injection de Syton X30 pur
- 2 Injection de Syton X30 + 1-1,5 % aerosil
- 3 Traitement des fissures et fractures ouvertes à l'aide du mortier de Syton X30 + 1-1,5 % aerosil + poudre de marbre (ratio de poids 1:4,5) avec des fines spatules
- 4 Injection de Syton X30 + 1-1,5 % aerosil + poudre de marbre (ratio de poids 1:2)

Un traitement au Syton X30 et à la poudre de marbre est injecté jusqu'à ce que les cavités soient entièrement remplies de mortier. Un seul traitement peut impliquer plusieurs injections de la même composition. Il faut prévoir de courts intervalles (environ 10 minutes) entre chaque injection.

- 5 Finition avec du mortier Syton X30 + 1-1,5 % aerosil + poudre de marbre (ratio de poids 1:4,5)

Remarque : entre chaque traitement, il faut respecter un délai d'attente de minimum 30 minutes.

Les injections donnent les meilleurs résultats si elles sont réalisées mouillé sur mouillé.

Le produit excédentaire est ôté avec de l'ouate.

Si les cavités, ouvertures ou fissures sont fermées avec du mortier, un trou d'injection et un canal d'aération sont prévus.

Le mortier de Syton X30 est, après durcissement, d'une couleur sombre et peut être brillant. Après durcissement complet, on peut changer la couleur de la « peau du mortier » en grattant légèrement la surface à l'aide d'un scalpel. Les gouttes indésirables de Syton X 30 peuvent être facilement éliminées durant le nettoyage.

Des colles de type époxy peuvent éventuellement être utilisées pour fixer de grandes écailles à l'aide de pontages.

Cela peut s'avérer nécessaire pour supporter le poids du mortier durant l'injection et éviter ainsi que le carrelé ne soit comprimé en raison de la pression de l'injection.

3- Élimination de la couverture biologique

La prolifération végétale est éliminée par action mécanique (brosse douce, spatule) complétée par un traitement biocide local (produit à base d'ammonium quaternaire). Le traitement s'effectue en faisant 2 ou 3 applications espacées d'une journée, par temps sec ; on brosse ensuite à sec les végétaux quand ils sont desséchés.

4- Joints/ rejointoiement

Le maximum de joints originaux doivent être conservés pour respecter l'authenticité de l'élément restauré.

Les anciens mortiers de restauration présents sur la surface de la pierre doivent, pour des raisons esthétiques, être enlevés sans endommager la pierre. Les joints durs en ciment doivent également être supprimés.

La valeur de la force et du module E du nouveau mortier de rejointoiement doit, pour éviter des dégâts, être inférieure à celle de la pierre. La dilatation hydrique et thermique, le coefficient d'absorption capillaire de l'eau ainsi que la résistance à la diffusion de vapeur doivent se rapprocher étroitement de ceux de la pierre. Dans la plupart des cas, cependant, une dilatation thermique inférieure à celle de la pierre est souhaitable pour assurer une meilleure adhérence du mortier. (SIEGSMUND-SNETHLAGE, 2011)

Le mortier de rejointoiement doit correspondre étroitement au mortier original, qui a été étudié par le Labo²⁷. Le mortier original est moyennement à fortement hydraulique avec du sable fin comme agrégat. Le mortier se caractérise également par des macropores plus ou moins arrondis pouvant atteindre plusieurs centaines de micromètres.²⁸

Le mortier de remplacement pour les joints doit être à base de chaux avec ajout de sable fin comme agrégat.

5- Nettoyage

Pour la suite du nettoyage, il faut faire une distinction entre les zones ayant une couche de gypse épaisse et celles présentant une couche mince, voire aucune. La position du lit de carrière est également déterminante pour le nettoyage.

Les épaisses croûtes de gypse doivent être ramollies à l'aide de compresses d'ouate à l'eau et peuvent ensuite être amincies mécaniquement (avec un scalpel). La compresse est apposée sur la surface durant 30 minutes. La compresse ne doit pas être trop humide pour éviter toute autre dégradation.

La suite du nettoyage est réalisée avec une microsableuse et/ou un scalpel
Voici les poudres de sablage qui ont été sélectionnées sur la base de tests :

- Microbilles de verre (45-90 µm)
- Le carbonate de calcium (20-250 µm)

²⁷ Ibid., point 3, p. 64-81

²⁸ Ibid., point 3, p. 64-810

La méthode de nettoyage est déterminée par l'épaisseur et la dureté des croûtes de gypse, ce qui a conduit à choisir 2 méthodes différentes :

- Les zones présentant une croûte noire mince au-dessus des couches de peinture à la chaux blanc ont été principalement dégagées à sec, à l'aide d'un scalpel, jusqu'aux couches de chaux.

Vervolgens werd er lokaal afgewerkt met behulp van microzandstralen avec:

- Microbilles de verre (45-90 µm) aan 1 bar – max. 2 bar pour les détails
- Le carbonate de calcium aan 1 bar – max. 2 bar om het oppervlak van de witte kalkagen te uniformiseren.
- Les zones présentant une croûte noire moyenne à épaisse sont nettoyées comme suit :
 - Les croûtes de gypse sont ramollies avec une compresse d'ouate et d'eau et ensuite amincies au scalpel
 - Les croûtes de gypse sont ensuite éliminées à l'aide de microsablage et de microbilles de verre (45-90 µm) et une pression variant de 2 à 4 bars.

La pression et le débit sont continuellement adaptés en fonction de la pollution, de l'épaisseur de la croûte de gypse et de la stabilité du support.

La pression est adaptée selon les zones (épaisseur de la couche de gypse, position du lit de carrière, etc.) et varie entre 1 et 4 bars :

- 1 bar – max. 2 bars : pour les zones très fragiles, les détails fins de la sculpture, la présence de couches de peinture, etc.
- 2 bars – 3 bars : croûtes de gypse minces et nettoyage général sur support stable
- Max. 4 bars : pour des croûtes de gypse très épaisses, une couche de gypse dure sur support stable

Le débit/dosage varie entre 2 et 6.

6-Injection intermédiaire

Pendant le nettoyage, il a semblé que la fixation des écailles de pierre au Syton X30 a fortement contribué à la stabilité du support. Des injections complémentaires devront tout de même être faites pendant le nettoyage. Sous les croûtes de gypse se trouvent en effet souvent des fissures ou des craquelures qui ne sont pas visibles avant le nettoyage. Ces injections seront faites selon la même méthode que pour la consolidation de la pierre avant nettoyage.

7- Retouches

Au moment de la phase finale, il convient d'examiner si des retouches locales sont nécessaires pour améliorer la lisibilité.

Ces éventuelles retouches doivent être effectuées à l'aide d'un système de peinture correspondant aux couches de peinture encore présentes et doivent donc être à base de chaux.

Remarques :

Durant la restauration des portails, les restaurateurs doivent veiller à bien identifier les éventuelles couches de peinture mises à jour par le nettoyage.

S'ils découvrent des résidus polychromiques complémentaires, il faut les documenter dans le rapport de restauration et éventuellement prévoir des analyses supplémentaires.

V Conclusion finale

Les recherches interdisciplinaires ont permis de développer une méthode visant à conserver les portails uniques.

Grâce aux injections, il est possible de fixer la surface extrêmement fragile et ainsi de la nettoyer pour accroître la lisibilité des sculptures. Le nettoyage permet aussi de remettre au jour le reste de la sculpture originale de manière détaillée.

Le résultat visé a donc été atteint.

Nous nous permettons cependant d'insister sur la nécessité de créer une commission chargée de prendre des décisions importantes.

Ainsi, pour assurer une conservation durable des portails, il faut réfléchir à une protection adéquate, comme un auvent ou une protection complète²⁹. Ce qui passe par la prise en considération de facteurs éthiques, esthétiques et techniques.

Cette commission peut également être chargée du suivi du traitement de restauration.

29 Voir le rapport de la cellule Monuments du département Laboratoires de l'IRPA, p 99

Bibliographie

- Bénédict, R., Gentile, S., James, J., & Pozzi, B. (2005). *INJECTION GROUTS FOR MOLASSE SANDSTONES: PRELIMINARY ASSESSMENTS*. *Proceedings RILEM workshop Repair mortars for historic masonry Delft University of Technology Delft the Netherlands 2628 January 2005* (pp. 1–11).
- Biçer-şimşir, B., Griffin, I., Palazzo-Bertholon, B., & Rainer, L. (2010). Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces. *Studies in Conservation*, 55(Supplement-1), 3–17.
- Bronski, M. B., & Gabby, B. A. (1999). A comparison of Principles in Several Architectual Conservation Standards. In L. B. Sickels-Taves (Ed.), *The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation* (pp. 12–23). Fredric: ASTM International.
- Camerman.....
- Council of Europe. (2000). *Guidelines for the protection of the architectural heritage = directives sur la protection du patrimoine architectural* (p. 87). Strasbourg.
- CSTS. (1986). *La pierre de Tournai (N.I.T. 163, Annexe 1)* (p. 12).
- Dusar, M., Dreesen R., D. N. A. (2009). *renovatie & restauratie - Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden*. (K. B. NV, Ed.) (p. 562). Mechelen.
- Hayen, R. (2010). Herstmortels, breed uitgesmeerd. In *Versteend Erfgoed* (pp. 4–19).
- Henriques, F. M. A. (2004). Replacement mortars in conservation: an overview. In D. Kwiatkowski & R. Löfvendahl (Eds.), *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, June 27–July 2, 2004* (pp. 973–983).
- Hens, 1993 : référence manquante or cité dans le texte (Fig. 11)
- Icomos. (1965). International Charter for the Conservation and Restoration of Sites (The Venice Charter). In *2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments* (p. 8). Venice, Italy: International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments.
- Kegels, S. (n.d.). *Tests expérimentaux de microsablage. Evaluation de l'influence de l'abrasif, de la pression et du débit sur l'abrasion*. La Cambre, Ecole National Supérieure des Arts Visuels.
- Le Bailly de Tillegem, S. (1981). *Tournai et le Tournaisis en gravures*. Liège.
- Le Maistre d'Anstaing, J. (1842). *Recherche sur l'histoire et l'architecture de l'église cathédrale Notre-Dame de Tournai*. (M. et Janssens, Ed.). Tournai, Vol.I, p. 27 et p. XXII.
- Mertz, J., Pagnin, P., & Guiavarc'h, M. (n.d.). Comportement dilatométrique de mortiers de chaux pour la restauration Application à la durabilité des ré-assemblages de pierres, X, 1–14.
- Nys, L. (1993). La pierre de Tournai: son exploitation et son usage aux XIIIème, XIVème et XVème siècles (Tournai Ar., p. 411). Tournai-Louvain-La-Neuve: Fabrique de l'Église Cathédrale de Tournai.

- Pallot-Frossard, I. (2000). Polychromies des portails sculptés médiévaux en France, Contributions et limites des analyses scientifiques. In *La couleur et la pierre. Polychromie des portails gothiques* (pp. 73–90).
- Rainer, L., & Biçer-şimşir, B. (2011). *Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces* (p. 120). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Scaff, V. (1971). *La sculpture romane de la cathédrale notre-dame de Tournai* (p. 295). Tournai: Casterman.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). *Stone in Architecture: Properties, Durability* (4th ed., p. 552). Springer Berlin / Heidelberg.
- Stefanaggi, M., & Vergès-Belmin, V. (2011). *Jardins de pierres : conservation de la pierre dans les parcs, jardins et cimetières : 14 es journées d'étude de la SFIIC = Conservation of stone in parks, gardens and cemeteries : 14th Study days of the SFIIC, PARIS, Institut national du patrimoine, 22-2* (p. 390).
- Stevens, Y., & Swennen, K. (2006). *mechanische en reologische studie van injectiegrouts op basis van cement, kalk en puzzolanen voor de consolidatie van historisch metselwerk*. Katholieke Universiteit Leuven; Faculteit Ingenieurswetenschappen.
- Storemyr, P., Wendler, E., & Zehnder, K. (2001). *Weathering and Conservation of Soapstone and Greenschist used at Nidaros Cathedral Brief Summary of Investigations 1999-2000*.
- The Nemrud Dağ Project Proposal for the 2004 campaign. (2004), (December 2003), 1–59.
- The Roman Necropolis of Hermupolis / Tuna el - Gebel Final report on the autumn 2012 season.* (2012) (pp. 1–16).
- Van den Noortgaete, T. (1995). *Etude préliminaire à la restauration de la cathédrale de Tournai. Porte Mantile et Porte du Capitole. Rapport archéologique préalable à la restauration des sculptures romanes* (p. 59). Tournai.
- Vergès-Belmin, V., & Bromblet, P. (2000). Le nettoyage de la pierre. *Monumental*, 221–272.
- Wendler, E. (2000). Elastifizierte Kieseläureester als mineralische Bindemittel für unterschiedliche Konservierungsziele. Praktische Erfahrungen mit dem KSE-Modul-System. Neue Möglichkeiten zur Natursteinkonservierung. In *Lönninger Beiträge zur Baudenkmalpflege. Band I* (pp. 24–51).
- Wheeler, G. (2008). Alkoxysilanes and the consolidation of stone: where we are now. In J. Delgado Rodrigues & J. M. Mimoso (Eds.), *Stone consolidation in cultural heritage : research and practice : proceedings of the international symposium, Lisbon 6-7 May, 2008* (pp. 41–52). Lisbon, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Annexe

Fiches techniques :

- LEDAN TA1
- LEDAN TA2
- LEDAN TA3
- PLM-I
- PLM-M
- Syton X30

Composto per iniezioni di consolidamento strutturale in edifici di particolare interesse artistico e storico

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

Ottima penetrabilità,
anche senza preliminarmente
bagnatura dei supporti;
**facile pulitura delle
fuoriuscite**, compatibilità
chimico-meccanica ed
assenza di efflorescenze
anche in ambienti
fortemente umidi.

COMPOSIZIONE DEL FORMULATO

È composto da leganti idraulici speciali (C30), chimicamente stabili ed a bassissimo contenuto di sali solubili; quarzi purissimi granulometricamente impalpabili, pozzolana finissima ed una particolare combinazione di additivi fluidificanti, ritentivi ed aeranti. La speciale formulazione, prodotta in dispersione planetaria 1/10.000 per un tempo inferiore a 20', forma un premiscelato omogeneo di colore bianco. La malta può essere additivata con microfibre per migliorarne le caratteristiche meccaniche in impieghi particolari.

CAMPI DI APPLICAZIONE

LEDAN TA1 è
un formulato
estremamente
versatile. In
particolare è utilizzato
per: consolidamento
di: **volte in mattoni**;
colonnati in pietrame
misto; **strutture
archeologiche**;
strutture murarie
affrescate o graffite.

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

Impastare energicamente, per circa tre minuti, **LEDAN TA1** con acqua.

DOSI CONSIGLIATE

USO	LEDAN TA1	ACQUA
PRECONSOLIDAMENTO DI SUPERFICI DECOESE	10 Kg	16 lt
CONSOLIDAMENTO DI STRUTTURE MURARIE, VOLTE, ECC.	10 Kg	8 lt

ISTRUZIONI PER L'USO

- 1) Stuccare bene le possibili vie di uscita del prodotto dal supporto murario con apposito composto da stuccatura **LEDAN TA2**.
- 2) Effettuare la foratura delle murature a quinconce con distanza tra i fori non superiore a 50 cm ed una profondità pari a 2/3 della muratura. Diametro minimo dei fori 8 mm.
- 3) Pulire accuratamente i fori con aria.
- 4) Eseguire le iniezioni di **LEDAN TA1** in modo continuo.

* Se le operazioni di foratura e pulitura vengono eseguite correttamente, il **LEDAN TA1**, anche senza preliminarmente bagnatura del supporto ed applicando una bassissima pressione, affluirà all'interno della muratura, diffondendosi uniformemente. Qualora ciò non avvenisse, controllare di nuovo la potenziale ricettività dei fori effettuati.

LIMITI D'IMPIEGO

LEDAN TA1 è un composto a base di calce; evitare quindi l'applicazione in periodi eccessivamente freddi (con temperature minime inferiori a 5° C) o estremamente caldi (con temperature massime superiori a 35° C).

L'applicazione di **LEDAN TA1** può avvenire con sistemi a coclea, ad aria compressa, a pistoni, sia manuali che elettrici. Si consiglia, comunque, l'uso di apparecchiature che consentano di immettere nella muratura elevati quantitativi di materiale, senza necessità di soste per il caricamento.

CARATTERISTICHE CHIMICO FISICHE

PESO SPECIFICO	1,40 Kg/DM ³	MEDIO	ADERENZA	1,4 N/mm ²	OTTIMA
INIZIO PRESA	18 ORE	MEDIO	ESSUDAMENTO	TRASCURABILE	OTTIMO
FINE PRESA	24 ORE	MEDIO	PERMEABILITÀ AL VAPORE	11 μ	BUONA
LAVORABILITÀ	3 ORE	MEDIO	MODULO ELASTICO SEC. A COMP.	11.000 N/mm ²	MEDIO
RESISTENZA A COMPRESSIONE	15 N/mm ²	ALTA	RITENZIONE D'ACQUA	>80%	OTTIMA
RESISTENZA A FLESSIONE	3,5 N/mm ² (28 gg)	ALTA	POTERE DI IMBIBIZIONE	5%	OTTIMO

N.B. Il materiale è stato caratterizzato tenendo conto delle proprie modalità d'applicazione. I valori numerici si riferiscono a medie rilevate su supporti di laboratorio riproducenti problematiche inerenti a strutture murarie.

EFFLORESCENZE

Per valutare se eventuali sali solubili presenti in una malta possono provocare indesiderati fenomeni di alterazione chimica e cromatica, è possibile eseguire in laboratorio un test secondo la norma RAL 544/3. Il formulato **LEDAN TA1** sottoposto a tale prova non provoca fenomeni d'efflorescenza.

DURABILITÀ

Alcuni campioni di **LEDAN TA1** sottoposti ad un ciclo di invecchiamento accelerato, simulante un invecchiamento naturale di circa **20 anni**, hanno mostrato un decadimento delle prestazioni inferiore al **5%**.

STOCCAGGIO

Se conservato in luogo asciutto ed in contenitori chiusi il prodotto si conserva per **12 mesi**.

CONFEZIONI

Secchi da: **15 Kg**

**SPERIMENTAZIONI ESEGUITE IN CANTIERI CONTROLLATI DAL
MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITÀ CULTURALI**

Un prodotto da utilizzare nel settore dei beni culturali, oltre che di severi studi di laboratorio, necessita anche di attente verifiche in cantiere, finalizzate ad appurare il reale comportamento nel tempo, la stabilità, l'assenza di effetti negativi diretti ed indiretti e la possibile reversibilità.

LEDAN TA1, messo a punto in una ricerca promossa e finanziata dal **Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Soprintendenza di Matera (Chiese Rupestri) e Soprintendenza per l'Etruria Meridionale (Necropoli di Tarquinia)**. Le prove applicative effettuate durante la ricerca hanno dimostrato che il materiale corrisponde ai requisiti-obiettivo e può, per assenza di effetti negativi, essere utilizzato in interventi di restauro monumentale.

VOCE DI CAPITOLATO

Iniezioni per consolidamento strutturale di murature decoese, volte e manufatti anche affrescati, eseguite utilizzando un premiscelato composto da leganti idraulici speciali (C30) chimicamente stabili ed a bassissimo contenuto di sali solubili, inerti silicei e calcarei in combinazione con additivi iperfluidificanti. Il premiscelato per la particolarità dell'applicazione deve essere sperimentato da almeno 10 anni in ricerche promosse dal **Ministero BB.AA.CC.** Del prodotto utilizzato dovranno essere dichiarate le principali caratteristiche chimico-fisiche, i luoghi e la data dell'avvenuta sperimentazione. Il produttore dovrà inoltre fornire gli elaborati relativi all'attività di ricerca svolta, ratificati dall'Ente Pubblico preposto al controllo della stessa.

TECNO EDILE TOSCANA s.r.l.

via Monti Lepini, 14 04100 LATINA (ITALY)

Tel (+39) 0773241293 Fax (+39) 0773611023

www.tecnoediletoscana.com

Composto idoneo al riempimento di lesioni in sistemi strutturali

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

Premiscelato *fixotropico* da iniezione idoneo ad effettuare il **riempimento di lesioni** anche profonde di strutture murarie ed in particolare nell'intradosso di volte.

Microlesioni e lesioni di larghezza non superiore a 10 mm.

COMPOSIZIONE DEL FORMULATO

È composto da leganti idraulici speciali (C30), chimicamente stabili ed a bassissimo contenuto di sali solubili; pozzolana, inerti di tipo siliceo-calcareo ed una particolare combinazione di additivi fluidificanti, ritentivi ed aeranti.

La speciale formulazione, prodotta in dispersione planetaria 1/10.000 per un tempo non inferiore a 20 minuti, forma un premiscelato omogeneo di colore bianco.

CAMPI DI APPLICAZIONE

Il prodotto, è utilizzato per eseguire interventi di consolidamento strutturale rapidi ed efficaci di manufatti lesionati. In combinazione con **LEDAN TA1** consente **lavorazioni sicure in presenza di affreschi.**

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

LEDAN TA2 è un premiscelato pronto all'uso con la sola aggiunta di acqua. Impastare energicamente, per circa 3 minuti, **LEDAN TA2** con acqua pulita; filtrare la boiacca ottenuta e quindi iniettare il prodotto preferibilmente entro 10 min dalla preparazione dopo aver depolverizzata per aspirazione la lesione (bagnare se possibile).

DOSI CONSIGLIATE

USO	LEDAN TA2	ACQUA
STUCCATURA DI LESIONI E VUOTI PROFONDI	10 Kg	6 lt
INIEZIONI DI GROSSE CAVITÀ	10 Kg	5 lt

ISTRUZIONI PER L'USO

- 1) *Se possibile bagnare le superfici da trattare con ripetute applicazioni d'acqua.*
- 2) *Prima di eseguire stuccature, asportare bene parti friabili ed incoerenti ed applicare solo su supporti precedentemente desalinizzati e rinforzati.*
- 3) *Aggiungere acqua al LEDAN TA2, miscelando energicamente con trapano elettrico a bassa velocità munito di agitatore per circa 6-8 minuti.*
- 4) *Mantenere il composto in agitazione prima di iniettare.*
- 5) *Iniettare "in continuo" per evitare occlusioni, con pistole ad aria o con apposito macchinario avente ugelli di uscita con diametro non inferiore ai 6 mm. tali da consentire il totale riempimento della lesione.*

LIMITI D'IMPIEGO

LEDAN TA2 è un composto a base di calce; evitare quindi l'applicazione in periodi eccessivamente freddi (**con temperature minime inferiori a 5° C**) o estremamente caldi (**con temperature massime superiori a 35° C**).

L'applicazione di **LEDAN TA2** può avvenire con sistemi a coclea, ad aria compressa, a pistoni, sia manuali che elettrici. Si consiglia, comunque, l'uso di apparecchiature che consentano di immettere nella muratura elevati quantitativi di materiale, senza necessità di soste per il caricamento.

CARATTERISTICHE CHIMICO FISICHE

PESO SPECIFICO	1,2 Kg/Dm ³	MEDIO	ADERENZA	0,9 N/mm ²	BUONA
INIZIO PRESA	6 ORE	MEDIO	ESSUDAMENTO	NESSUNO	OTTIMO
FINE PRESA	10 ORE	MEDIO	PERMEABILITÀ AL VAPORE	8 μ	BUONA
LAVORABILITÀ	30 minuti	MEDIO	MODULO ELASTICO SEC. A COMP.	15.000 N/mm ²	MEDIO
RESISTENZA A COMPRESSIONE	26 N/mm ²	MEDIA	RITENZIONE D'ACQUA	>85%	OTTIMA
RESISTENZA A FLESSIONE	7 N/mm ² (28 gg)	MEDIA	RITIRO	1,60 μ	OTTIMO

N.B. Il materiale è stato caratterizzato tenendo conto delle proprie modalità d'applicazione. I valori numerici si riferiscono a medie rilevate su supporti di laboratorio riproducenti problematiche inerenti a strutture murarie.

EFFLORESCENZE

Per valutare se eventuali sali solubili presenti in una malta possono provocare indesiderati fenomeni di alterazione chimica e cromatica, è possibile eseguire in laboratorio un test secondo la norma RAL 544/3. Il formulato **LEDAN TA2** sottoposto a tale prova non provoca fenomeni d'efflorescenza.

**SPERIMENTAZIONI ESEGUITE IN CANTIERI CONTROLLATI DAL
MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITÀ CULTURALI**

Un prodotto da utilizzare nel settore dei Beni Culturali, oltre che di severi studi di laboratorio, necessita anche di attente verifiche in cantiere, finalizzate ad appurare il reale comportamento nel tempo, la stabilità, l'assenza di effetti negativi diretti ed indiretti e la possibile reversibilità.

il LEDAN TA2, messo a punto in una ricerca promossa e finanziata dal **Ministero per i Beni e le Attività Culturali**. Le prove applicative effettuate durante la ricerca hanno dimostrato che il materiale corrisponde ai requisiti-obiettivo e può, per assenza di effetti negativi collaterali, essere utilizzato in interventi di **restauro monumentale**.

DURABILITÀ

Alcuni campioni di **LEDAN TA2** sottoposti ad un ciclo di invecchiamento accelerato, simulante un invecchiamento naturale di circa **20 anni**, hanno mostrato un decadimento delle prestazioni inferiore al **4%**.

VOCE DI CAPITOLATO

Iniezioni per riadesione e riempimento di vuoti in sistemi ornamentali, con composto a basso peso specifico e bassissimo contenuto di sali solubili, eseguito con composto premiscelato denominato **LEDAN TA2**.

Il premiscelato per la particolarità dell'applicazione deve essere sperimentato da almeno 5 anni in ricerche promosse dal **Ministero per i Beni e le Attività Culturali**. Del prodotto utilizzato dovranno essere dichiarate le principali caratteristiche chimico-fisiche, i luoghi e la data dell'avvenuta sperimentazione. Il produttore dovrà inoltre fornire gli elaborati relativi all'attività di ricerca svolta, ratificati dall'Ente Pubblico preposto al controllo della stessa.

STOCCAGGIO

Se conservato in luogo asciutto ed in contenitori chiusi il prodotto si conserva per **12 mesi**.

CONFEZIONI

Secchi da: **15 Kg**

TECNO EDILE TOSCANA s.r.l.
via Monti Lepini, 14 04100 LATINA (ITALY)
Tel (+39) 0773241293 Fax (+39) 0773611023
www.tecnoediletoscana.com

Composto idoneo al riempimento di lesioni in sistemi strutturali

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

Premiscelato tixotropico idoneo ad effettuare il riempimento di lesioni anche profonde di strutture murarie ed in particolare di **volte anche affrescate**.

Lesioni di larghezza compresa tra 10 e 30 mm.

COMPOSIZIONE DEL FORMULATO

È composto da leganti idraulici speciali (C30) chimicamente stabili ed a bassissimo contenuto di sali solubili, pozzolana, ierti di tipo siliceo-calcareo ed una particolare combinazione di additivi fluidificanti, ritentivi ed aeranti.

La speciale formulazione, prodotta in dispersione planetaria 1/10.000 per un tempo non inferiore a 20 minuti, forma un premiscelato omogeneo di **colore bianco**.

CAMPI DI APPLICAZIONE

Il prodotto, è utilizzato per eseguire interventi di consolidamento strutturale rapidi ed efficaci di manufatti lesionati.

In combinazione con **LEDAN TA1** consente lavorazioni sicure in **presenza di affreschi**.

CARATTERISTICHE PARTICOLARI

LEDAN TA3 è un premiscelato pronto all'uso con la sola aggiunta di acqua.

Impastare energicamente, per circa tre minuti, **LEDAN TA3** con acqua pulita; e quindi iniettare il prodotto preferibilmente entro 10 minuti dalla preparazione dopo aver depolverizzata per aspirazione la lesione (bagnare, se possibile).

DOSI CONSIGLIATE

USO	LEDAN TA3	ACQUA
STUCCATURA DI LESIONI E VUOTI PROFONDI	10 Kg	6 lt
INIEZIONI DI GROSSE CAVITÀ	10 Kg	5 lt

ISTRUZIONI PER L'USO

- 1) Se possibile bagnare le superfici da trattare con ripetute applicazioni d'acqua.
- 2) Prima di eseguire stuccature, asportare bene parti friabili ed incoerenti ed applicare solo su supporti precedentemente desalinizzati e rinforzati.
- 3) Aggiungere acqua al LEDAN TA3, miscelando energicamente con trapano elettrico a bassa velocità munito di agitatore per circa 6-8 minuti.
- 4) Mantenere il composto in agitazione prima di iniettare.
- 5) Iniettare "in continuo" per evitare occlusioni, con pistole ad aria o con apposito macchinario avente ugelli di uscita con diametro non inferiore ai 10 mm. tali da consentire il totale riempimento della lesione.

LIMITI D'IMPIEGO

LEDAN TA3 è un composto a base di calce; evitare quindi l'applicazione in periodi eccessivamente freddi (con temperature minime inferiori a 5° C) o estremamente caldi (con temperature massime superiori a 35° C).

LEDAN TA3 è applicabile con pistole ad aria compressa ed apparecchiatura a coclea con alimentazione continua, tali da consentire il totale riempimento della lesione senza interruzioni.

CARATTERISTICHE CHIMICO FISICHE

PESO SPECIFICO	1,2 Kg/Dm ³	MEDIO	ADERENZA	0,9 N/mm ²	BUONA
INIZIO PRESA	5 ORE	MEDIO	ESSUDAMENTO	NESSUNO	OTTIMO
FINE PRESA	8 ORE	MEDIO	PERMEABILITÀ AL VAPORE	8 μ	BUONA
LAVORABILITÀ	30 minuti	MEDIO	MODULO ELASTICO SEC. A COMP.	15.000 N/mm ²	MEDIO
RESISTENZA A COMPRESSIONE	25 N/mm ²	MEDIA	RITENZIONE D'ACQUA	> 85%	OTTIMA
RESISTENZA A FLESSIONE	6 N/mm ² (28 gg)	MEDIA	RITIRO	1,80 μm	OTTIMO

N.B. Il materiale è stato caratterizzato tenendo conto delle proprie modalità d'applicazione. I valori numerici si riferiscono a medie rilevate su supporti di laboratorio riproducenti problematiche inerenti a strutture murarie.

EFFLORESCENZE

Per valutare se eventuali sali solubili presenti in una malta possono provocare indesiderati fenomeni di alterazione chimica e cromatica, è possibile eseguire in laboratorio un test secondo la norma RAL 544/3. Il formulato **LEDAN TA3** sottoposto a tale prova non provoca fenomeni d'efflorescenza.

**SPERIMENTAZIONI ESEGUITE IN CANTIERI CONTROLLATI DAL
MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITÀ CULTURALI**

Un prodotto da utilizzare nel settore dei **Beni Culturali**, oltre che di severi studi di laboratorio, necessita anche di attente verifiche in cantiere, finalizzate ad appurare il reale comportamento nel tempo, la stabilità, l'assenza di effetti negativi diretti ed indiretti e la possibile reversibilità.

LEDAN TA3, messo a punto in una ricerca promossa e finanziata dal **Ministero per i Beni e le Attività Culturali**.

Le prove applicative effettuate durante la ricerca hanno dimostrato che il materiale corrisponde ai requisiti-obiettivo e può, per assenza di effetti negativi, essere utilizzato in interventi di restauro monumentale.

DURABILITÀ

Alcuni campioni di **LEDAN TA3** sottoposti ad un ciclo di invecchiamento accelerato, simulante un invecchiamento naturale di circa **20 anni**, hanno mostrato un decadimento delle prestazioni inferiore al **4%**.

VOCE DI CAPITOLATO

Iniezioni per riadesione e riempimento di vuoti in sistemi ornamentali, con composto a **basso peso specifico e bassissimo contenuto di sali solubili**, eseguito con il premiscelato denominata **LEDAN TA3**.

Il premiscelato per la particolarità dell'applicazione deve essere sperimentato da almeno 5 anni in ricerche promosse dal **Ministero BB.AA.CC.**

Del prodotto utilizzato dovranno essere dichiarate le principali caratteristiche chimico fisiche, i luoghi e la data dell'avenuta sperimentazione. Il produttore dovrà inoltre fornire gli elaborati relativi all'attività di ricerca svolta, ratificati dall'Ente Pubblico preposto al controllo della stessa.

STOCCAGGIO

Se conservato in luogo asciutto ed in contenitori chiusi il prodotto si conserva per **12 mesi**.

CONFEZIONI

Secchi da: **15 Kg**

TECNO EDILE TOSCANA s.r.l.
via Monti Lepini, 14 04100 LATINA (ITALY)
Tel (+39) 0773241293 Fax (+39) 0773611023
www.tecnoediletoscana.com

31104 Injection Mortar PLM-I

Injection mortar used to strengthen colored plasters.

Description:

The injection mortar PLM-I is used to strengthen colored plasters. It consists of a mixture of hydraulic binding agents and selected inert additives, as well as further additives for better handling.

Properties:

Lack of soluble salts, does not have any water-repellent or permeable reducing properties. Injection mortar PLM-I does not change the vapor permeability in brickwork, has similar physical-chemical properties as lime mortar, simple injection application with syringes, does not contain any aggressive or corrosive components for pigments, simple wiping of blooming.

Recommended applications:

Due to its special properties, the injection mortar PLM-I is suitable to affix colored plasters on mural surfaces and is also a good undercoat for new painting.

Technical Data:

- White powder
- Setting time: 24 - 48 hours
- Density: 1.2 kg/dm³
- Strength: Rg 25.9 kg/cm²

Instructions:

Add up to 70 %-weight of water to obtain the required fluidity. Mix carefully at a low rate for about 5 minutes to obtain a homogenous liquid state. Sieve through a 1 mm metal screen. Inject manually and at continuous rate to avoid the formation of air bubbles; mix well after each break.

Amount required depends on the state of the object.

Precautionary measures:

Preliminary tests are recommended before use. Remove excess mortar with wet sponge. Wear protective gloves and goggles.

31106 Injection Mortar PLM-M

Suitable injection mortar to reinforce the structure of brickwork.

Description:

The injection mortar PLM-M is suitable to reinforce the masonry structure. The mortar consists of a mixture of hydraulic binding agents and selected inert additives. It can be used for all kinds of brickwork.

The mortar has the following properties: PLM-M is free of soluble salts, it does not have any water-repellent or permeable reducing properties, and can be easily be applied by injecting.

Recommended applications:

Due to its special properties, the injection mortar PLM-M is suitable to reinforce the masonry structure.

Technical Data:

- White powder
- Setting time: 12 - 24 hours
- Density: 1.4 kg/dm³
- Strength: Rg 46.5 kg/cm²

Instructions:

About 70%-weight of water is added to obtain the required fluidity. Mix carefully at a low rate for about 5 minutes to obtain a homogenous liquid state. Sieve through a 1 mm metal screen. Inject manually and at a continuous rate to avoid the formation of air bubbles; the hollow spaces should be blown out or exhausted before injecting the mortar. Mix well after each break.

Amount of mortar required depends on the state of the object.

Precautionary measures:

Preliminary tests are recommended before use. Remove excess mortar with wet sponge. Wear protective gloves and goggles.

31430 Syton[®] X 30

Syton[®] X 30 ist eine wässrige Kieselsäuredispersion mit 30 %, 1200 g/Liter.
Beim Trocknen verfestigt sich die Dispersion zu einer Trockengelstruktur mit hoher chemischer Bindekraft.

Syton[®] X 30 wird wegen seiner hohen chemischen Beständigkeit und wegen seiner Temperaturbeständigkeit verwendet als

- als Bindemittel in Mörteln
- Oberflächen-Modifiziermittel, erhöht auf praktisch jeder Oberfläche den Reibwert
- Füllstoff

Syton[®] X 30 wird zum Beispiel verwendet für

- schmutzabweisende Anstriche auf Wänden, schmutzabweisende Ausrüstung von Textilien
- zum Griffigmachen von Wachs-Dispersionen, dabei verliert das Wachs nicht seinen Glanz
- zum Schönen und Klären von Wein und Fruchtsäften
- bei Emulsionsfarben bewirkt die Zugabe von 5-10 % Syton[®] im Pigmentanteil eine deutliche thixotropische Strukturverbesserung und eine Verringerung der Pigmentabscheidung beim Lagern
- für Steinersatzmassen hat sich Syton[®] X 30 besonders bewährt:
Die Werte für Festigkeit und Elastizität sind günstig.

Syton[®] X 30 ist kein Gefahrgut. Die Wassergefährdung ist WGK 0. Das getrocknete Syton[®] in Pulverform, z.B. als Aerosol, ist atemwegsgefährdend, Schutzmaske empfohlen.

Analysenzertifikat:

Dichte (20°C):	1,203 g/cm ³
pH (25°C):	10,0
Rückstand:	28,6 % m/m
Viskosität (20°C):	5,0 mPa.s
Na ₂ O:	0,33 % m/m
Spezifische Oberfläche - SOF (m ² /g SiO ₂):	242
Partikelgröße:	klein
Sediment (% v/v):	0,5 max

Lagerung

Behälter dicht verschlossen und trocken aufbewahren.
Produkt bei Temperaturen > 2°C lagern.
Produkt vor Frost schützen.
Produkt vor Erwärmung / Überhitzung schützen.