

Les portails romans de la cathédrale Notre-Dame de Tournai (Belgique). Résultats de l'étude matérielle et technique en vue de la conservation

Judy De Roy¹, Laurent Fontaine², Lieselote Hoornaert¹, Roel Hendrickx²,
Camille De Clercq¹, Sam Huysmans¹ et Hilde De Clercq²
Institut Royal du Patrimoine Artistique (IRPA), Parc du Cinquantenaire 1, 1000 Bruxelles

(1) Atelier des sculptures en pierre

(2) Laboratoire des Monuments

judy.de.roy@kikirpa.be; judyderoy@gmail.com; laurent.fontaine@kikirpa.be

Résumé : Un aperçu de l'état de conservation actuel des deux portails romans de la cathédrale de Tournai est donné par les mappings de chaque bloc de pierre de Tournai. La forme d'altération la plus courante et la plus destructive, menant à de considérables pertes de matière, est la délamination de la pierre. Cette dernière, ainsi que les croûtes noires et le matériau pierreux en lui-même, ont été examinés en détail, tant in situ qu'en laboratoire, de manière à comprendre les processus de détérioration. Sur la base des résultats, une restauration pilote a été réalisée et des conseils en matière de conservation préventive ont été donnés.

Mots-clés : conservation, altération, pierre, analyses, mapping 2D, Belgique, Tournai

Abstract : The mappings of each block of Tournai stone from the two Romanesque portals of the Tournai cathedral lead to an overview of the actual state of conservation. The most common and most destructive deterioration pattern, leading to severe material losses, is the delamination of the stone. This latter, but also the black crusts and the stone material itself, were examined thoroughly both in situ and in the laboratory in order to understand the deterioration mechanisms. Based on the results, a pilot-restoration was conducted and some hints regarding preventive conservation were given.

Keywords : conservation, decay, stone analyses, 2D mapping, Belgium, Tournai

INTRODUCTION

Dans le cadre des travaux de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Tournai (Belgique), les deux portails latéraux – le portail sud-ouest, la Porte du Capitole (fig. 1), et le portail nord-est, la Porte Mantile (fig. 2) –, ont fait l'objet d'une attention particulière. Datés aux alentours de 1125, il s'agit de portails qui ont été préservés malgré les changements architecturaux successifs apportés à la construction romane. L'étude préalable à la restauration de ces deux portails a été confiée à l'Institut Royal du Patrimoine Artistique (IRPA), à la demande du Département du Patrimoine de la Région wallonne.

La recherche menée par l'IRPA a permis d'établir une cartographie de l'état de conservation du matériau authentique des portails (la pierre de Tournai), afin de comprendre son processus de dégradation et de mettre au point un protocole de restauration.

HISTOIRE TECHNICO-MATÉRIELLE

Les deux portails de la cathédrale, qui est classée depuis 2000 au patrimoine mondial de l'UNESCO, sont constitués de deux types de pierre : la pierre de Tournai et le petit granit de Maffle, ce dernier résultant des interventions de restauration au milieu du XIX^e siècle.

Très tôt, des auteurs d'études iconographiques, comme le Maître d'Anstaing¹, ont en effet souligné l'état de conservation préoccupant des deux portails. Thérèse Van Den Noortgaete réunit dans son *Rapport archéologique préalable à la restauration des sculptures romanes*² des lithographies datant de différentes époques sur lesquelles elle observe le mauvais état de conservation des deux portails. Étant donné que ces dégradations sont mentionnées dès le début du XIX^e siècle, on peut en effet supposer qu'elles avaient déjà commencé au cours des siècles précédents.

L'infobanque 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 mondiale³. 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

1. Le Maître d'Anstaing 1842.

2. Van Den Noortgaete 1995.

3. Piron 2012.



Fig. 1. Porte du Capitole, Tournai, cathédrale Notre-Dame (© KIK-IRPA), Bruxelles, A126815.

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.

ANALYSES DES REVÊTEMENTS DES PORTAILS

Dans sa monographie consacrée à la cathédrale de Notre-Dame (1842), le Maître d'Anstaing ne mentionne aucune trace de revêtements "peints" sur les portails. Les témoins de couches picturales sont effectivement difficilement perceptibles sous les épais encroûtements noirs recouvrant bon nombre des surfaces sculptées (fig. 3).

Néanmoins, les observations minutieuses réalisées in situ à l'aide de lunettes binoculaires ont permis de détecter la présence de plusieurs couches de peinture sur certaines parties des reliefs. Les coupes stratigraphiques et les analyses de composition réalisées à partir de micro-prélèvements ont permis d'obtenir certaines informations sur la technique picturale appliquée sur la pierre de Tournai.

La succession des couches est similaire pour les deux portails romans. C'est dans les creux des reliefs, sur les voussures, qu'est conservé le plus grand nombre de couches de peinture.



Fig. 2. Porte Mantile, photo datant de 1899, Tournai, cathédrale Notre-Dame (© KIK-IRPA), Bruxelles, B3188.

Deux types de peinture, correspondant à des campagnes d'intervention différentes, sont retrouvés : des peintures huileuses et des peintures à la chaux.

Les deux couches les plus anciennes font probablement partie d'une seule et même intervention. Il pourrait s'agir de restes de la polychromie originale. Ces couches sont appliquées directement sur le support en pierre et sont à base d'huile. Malheureusement, leur présence est limitée : elles ne semblent subsister que dans les recoins et au fond des plis des drapés sur les reliefs qui ornent les voussures. La première couche, gris foncé, est appliquée directement sur le support en pierre ; la seconde, gris clair, est appliquée directement sur la première. Les analyses⁴ effectuées par SEM-EDX sur les coupes stratigraphiques révèlent que la première couche est composée principalement de particules de silice et de carbonate de calcium. Il est difficile d'attribuer une fonction à cette couche car nous n'avons encore observé ce genre de couche sur aucune des œuvres lapidaires peintes de cette époque.

4. Sanyova 2014.



Fig. 3. Porte du Capitole, personnage ailé dont la tête a été bûchée et détail de l'aile. Les vestiges de la monochromie blanche sont importants (© KIK-IRPA).

La couche de couleur gris clair, quant à elle, est composée de blanc de plomb, de carbonate de calcium et d'un pigment noir de carbone. L'analyse FTIR indique la présence d'un liant organique gras.

Contrairement à la couche précédente, la composition de la couche gris clair montre des similitudes frappantes avec la majorité des couches de préparation qui ont été identifiées sur un grand nombre de portails romans et gothiques polychromés.

Les résultats des études stratigraphiques entreprises ces dernières années sur de nombreux portails romans montrent en effet que les couches colorées, – à savoir de couleurs bleue, verte, rouge, orangée, jaune, les carnations, le noir et le blanc ; ainsi que les décors métalliques – sont posés sur une couche de préparation similaire à la couche gris clair identifiée sur les portails romans de la cathédrale de Tournai. Les deux couches grises font probablement partie du revêtement original des portails, mais il s'agit probablement de couches préparatoires à la couche de finition originale. À notre grand regret, nous n'avons retrouvé, à ce jour, aucune trace de couches de finition.

La présence très limitée des couches de préparation originales semble suggérer qu'elles ont été autrefois décapées, avant l'application de nouvelles couches de peinture à la chaux.

Ainsi, les reliefs des archivoltes et des voussures sont en grande partie couverts de couches de peinture blanche peu liées et friables, de type peinture à la chaux. On peut imaginer qu'elles ont été appliquées pour protéger les reliefs des intempéries et rendre l'ornementation plus lisible.

On estime que toutes les couches de peinture à la chaux, ont été appliquées avant 1793 car sur les plans de fracture, situés au niveau des têtes des personnages bûchées par les

révolutionnaires en 1793⁵, nous n'avons observé aucune trace de couches picturales.

Elles ont probablement été appliquées aux ^{xvii}e et ^{xviii}e siècles, période où tous les matériaux blancs, tels le marbre, l'ivoire et l'albâtre, étaient particulièrement appréciés.

ASPECT MACROSCOPIQUE DES ALTÉRATIONS ET DÉTÉRIORATIONS

Les altérations de la pierre ont été décrites à l'aide d'une terminologie spécifique basée sur des critères morphologiques. Nous nous sommes référés aux standards internationaux fournis par l'ICOMOS-ISCS dans le *Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*⁶. Ce glossaire permet d'établir un langage commun entre conservateurs, restaurateurs et scientifiques⁷.

La majorité des pertes de matière sont provoquées par le délitage (ou délamination) de la pierre (fig. 4). Le glossaire décrit le délitage comme un détachement selon une orientation préexistante de la pierre et qui conduit à la dissociation d'une ou plusieurs couches de pierre. Des



Fig. 4. Porte du Capitole, détail de la voussure trilobée. Le décor est totalement illisible suite à l'importante perte de matière provoquée par le délitage (© KIK-IRPA), Bruxelles, X057494.

5. Le Maistre d'Anstaing 1842.

6. ICOMOS-ISCS, 2008.

7. Vergès-Belmin et al. 2011.

croûtes noires se sont développées sur les surfaces protégées de l'impact direct de la pluie battante et des ruissellements d'eau (fig. 5). Assez localement, on observe une colonisation biologique sous forme d'algues, de lichens et de mousses (fig. 6).



Fig. 5. Porte Mantile, détail d'un claveau du premier rouleau du bandeau cintré. La surface du décor à faible relief est recouverte d'une épaisse croûte noire (© KIK-IRPA), Bruxelles, X057371.



Fig. 6. Porte Mantile, détail d'un claveau au sommet de la voussure trilobée. Le mauvais état de conservation du cordon-larmier a entraîné le développement d'algues, de lichens et de mousses (© KIK-IRPA), Bruxelles, X057376.

CARTOGRAPHIE DE L'ÉTAT DE CONSERVATION

Un *mapping* détaillé de chaque volume de pierre de Tournai a été réalisé de façon systématique. Ces *mappings* ont été créés avec le logiciel *Metigo MAP 3.0* qui a été 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. À partir des *mappings* individuels, un *mapping* général de chaque portail a été réalisé. Celui-ci permet d'avoir un aperçu de la localisation des différents types de dégâts et de leur fréquence⁸.

Distribution des formes de dégradation

Étant donné que la dégradation se manifeste uniquement dans les volumes de pierre de Tournai d'origine, la pré-étude s'est concentrée essentiellement sur ces éléments. De manière générale, 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 l'ampleur de la dégradation et de la perte de matière.

En ce qui concerne la Porte du Capitole, les volumes de pierre les mieux conservés se trouvent tout en haut du portail, au sommet de la voussure trilobée et sur l'archivolte (fig. 7). Les volumes de pierre sont en moins bon état de l'autre côté du portail, où une grande partie de la voussure trilobée a disparu. Les parties originales des volumes de pierre encore présentes sont les bandes répétitives torsadées. Les éléments les plus figuratifs ont disparu suite au délitage (fig. 8). Sur certains volumes de pierre, aucune trace ni aucun contour de la sculpture n'ont subsisté et jusqu'à 90 % de la surface originale de la pierre a disparu.

Les sculptures originales de la Porte Mantile sont mieux conservées, du fait de l'orientation nord-est du portail. Toutefois, exception faite du bandeau cintré, certains volumes de pierre sont très dégradés. On observe beaucoup de pertes de matière par délitage (fig. 9). 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 romane originale (fig. 10). Dans les zones les plus exposées aux intempéries, on trouve pourtant des volumes de pierre où aucune trace ni aucun contour de la sculpture d'origine n'ont subsisté.

Sur la base de nos relevés, les formes de dégradation qui apparaissent le plus souvent sur la pierre de Tournai sont le délitage et la formation de croûtes noires (fig. 11).

Le délitage est le phénomène le plus répandu sur la pierre de Tournai de la Porte Mantile (présent sur 42,7 % de la surface originale) et de la Porte du Capitole (13,5 %). En fonction

8. Fitzner *et al.* 2002.

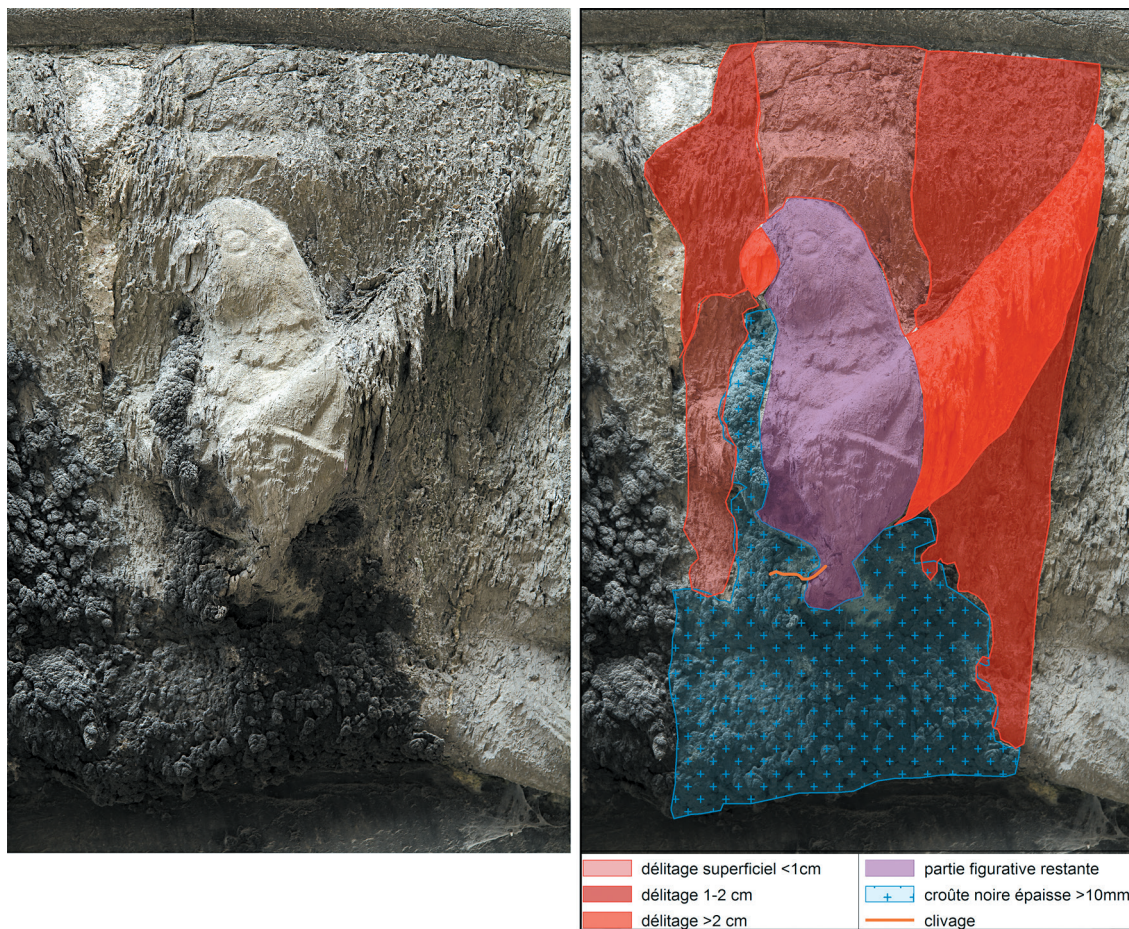


Fig. 7. Porte du Capitole, état de conservation actuel (2013) d'un claveau de la voussure trilobée et mapping correspondant. Les bordures schisteuses entourant le noyau sont bien visibles (pose en délit avec lit en joint) (© KIK-IRPA), Bruxelles, X057496. Mapping réalisée par L. Hoornaert.



Fig. 8. Porte du Capitole, côté nord-est (le plus exposé aux intempéries) : la majorité des éléments figuratifs ont disparu suite au délitage (© KIK-IRPA), Bruxelles, X057512.

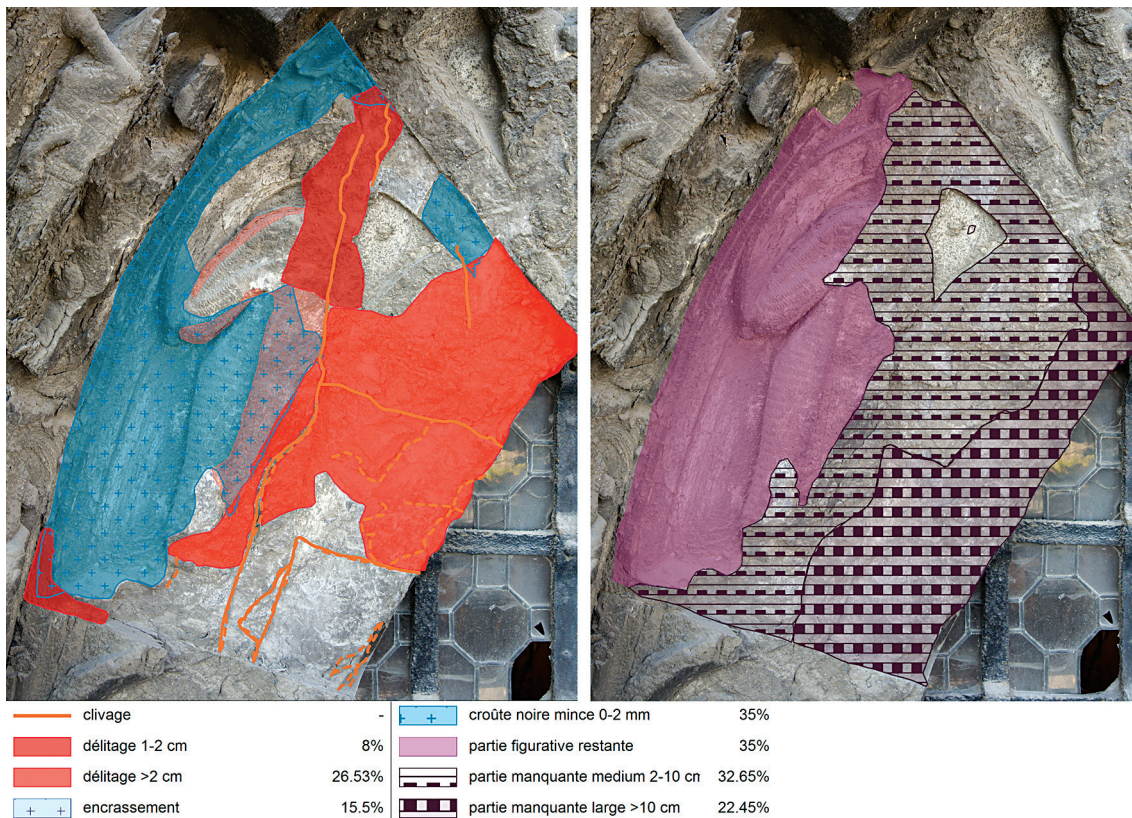


Fig. 9. Porte Mantile, mapping de l'état de conservation actuel (2013) d'un claveau du bandeau cintré dont une grande partie de la sculpture a été perdue. Mapping réalisé par L. Hoornaert (© Hoornaert).



Fig. 10. Porte Mantile, détail du centre du bandeau cintré (bien protégé) dont la majorité de la sculpture romaine originale a subsisté (© KIK-IRPA), Bruxelles, X049701.

de la profondeur observée à l'œil nu, trois catégories de délitage peuvent être distinguées : délitage superficiel (< 1 cm), délitage de 1-2 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.

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 recouverte d'une croûte de gypse. Trois sortes différentes peuvent être distinguées, à savoir une croûte noire bourgeonnante de plus de 10 mm d'épaisseur (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 de pierre originale est recouverte de croûtes noires : 7 % sont très épaisses (> 10 mm), 5 % sont d'épaisseur moyenne (2-10 mm) et 16 % sont minces (< 2 mm).

Influence de la mise en œuvre des volumes de pierre

Le positionnement des volumes 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*, le lit de carrière des différents volumes de pierre dans les deux portails. Trois types de pose peuvent être relevés, en fonction de l'orientation du litage : soit selon le lit de carrière, soit en délit avec lit en joint, soit en délit avec lit en face, c'est-à-dire parallèle au parement (fig. 12). Vu le remplacement par du petit granit au XIX^e siècle des jambages, du tympan et du cordon-larmier de la Porte du Capitole, seul le mode de mise en œuvre des archivoltes peut encore faire l'objet d'une comparaison rigoureuse entre portails.



Fig. 11. Mappings généraux des formes d'altération présentes en 2012 sur la Porte du Capitole (a) et la Porte Mantile (b). Les variations de couleurs indiquent l'intensité de la forme d'altération : rouge clair = délitage superficiel (< 1 cm), rouge = délitage de 1-2 cm, rouge foncé = délitage profond (> 2 cm) ; bleu clair = croûte noire mince (< 2 mm), bleu = croûte noire de 2 à 10 mm, bleu foncé = croûte noire épaisse (> 10 mm). Mapping réalisé par L. Hoornaert (© KIK-IRPA).

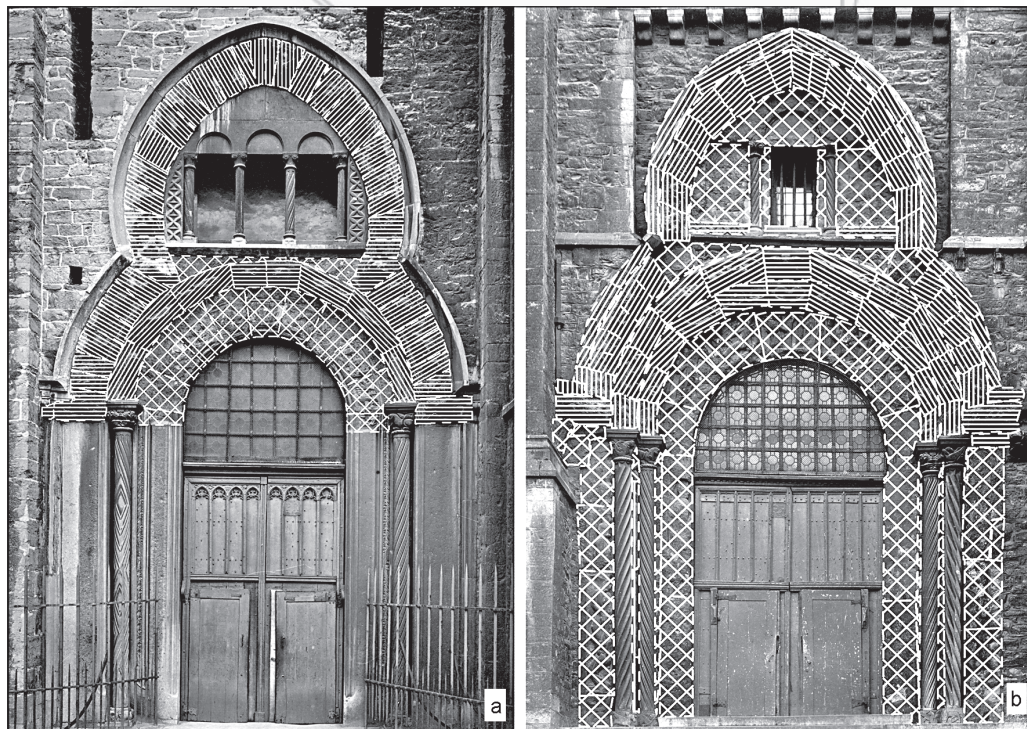


Fig. 12. Mapping de la mise en œuvre des volumes de pierre de Tournai à la Porte du Capitole (a) et la Porte Mantile (b). L'orientation des hachures montre le litage de la pierre ; les hachures croisées indiquant la pose en délit avec lit en face, c'est-à-dire parallèle au parement. Mapping réalisé par L. Hoornaert (© KIK-IRPA).

La pose en délit avec lit en face de la pierre de Tournai est toujours défectueuse, car elle favorise le délitage de la pierre⁹. Sans surprise, ce sont les blocs placés de cette façon qui sont bien souvent les plus dégradés, la perte de matière – parfois pluri-centimétrique – entraînant la disparition progressive des reliefs sculptés. C'est le cas, pour les deux portails, de l'arc en plein cintre et des écoinçons sous tympan, ainsi que des deux claveaux de la Porte Mantile marquant le changement de courbure de la voussure trilobée.

La mise en œuvre des bandeaux cintrés, tant ceux de la Porte du Capitole que de la Porte Mantile, est incorrecte pour des voussoirs (lit en joint parallèle à la courbure d'arc). Il en est de même pour la voussure trilobée de la Porte Mantile, où l'on aurait attendu une pose avec lit en joint perpendiculaire à la courbure. En définitive, seuls les claveaux de la voussure trilobée de la Porte du Capitole sont posés correctement (à une exception près).

État actuel de la détérioration : localisation des zones les plus dégradées

Le *mapping* général des sculptures encore présentes sur les deux portails (fig. 13) 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 savoir ce qu'ils représentaient à l'origine ; troisièmement, des surfaces lisses où l'entièreté des reliefs sculptés a disparu, en conséquence de quoi aucune forme ni aucun contour de la sculpture n'ont subsisté.

Malheureusement, nous pouvons constater que, pour l'ensemble des portails, seule une partie très réduite de la surface de la pierre de Tournai 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 restent 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 plus aujourd'hui qu'une petite partie de leur aspect original.

CAUSES DE DÉGRADATION

Pour comprendre pourquoi les portails sont aujourd'hui à ce point détériorés, les causes de dégradation de la pierre ont été recherchées. Comme bien souvent, un processus de dégradation est le résultat de l'action combinée de facteurs

intrinsèques et extrinsèques. Par facteurs intrinsèques, on entend les propriétés physiques de la pierre (structure, minéralogie, texture et porosité). Les facteurs extrinsèques, eux, regroupent des paramètres aussi divers que le mode de mise en œuvre, les conditions climatiques, le degré d'exposition aux intempéries, etc.

Caractéristiques visuelles de la pierre

Les Portes Mantile et du Capitole ont été réalisées dans une roche sédimentaire compacte : la pierre de Tournai. Il s'agit d'un calcaire argilo-siliceux dont les limites entre bancs sont soulignées par du matériel schisteux, sensible au gel, qu'il était d'usage d'éliminer avant la mise en œuvre (fig. 15). Au niveau des portails, le noyau des bancs apparaît plus compact et en meilleur état. Les bords sont davantage dégradés et présentent souvent un aspect schisteux, reflet d'une teneur en argiles plus élevée (fig. 7). Ceci suggère que le matériel de nature plus argileuse présent de part et d'autre du noyau du banc n'a pas été suffisamment éliminé à l'époque, sans doute pour obtenir des blocs à sculpter de plus grand format.

D'un point de vue géologique, la pierre de Tournai fait partie du "Calcaire de Tournai" qui consiste en un empilement de couches calcaires épais d'environ 310 m¹⁰. Tous ces sédiments calcaires d'origine marine se sont déposés sous la forme d'une succession cyclique de bancs au Tournaisien (période Carbonifère), il y a près de 350 millions d'années. La pierre de Tournai utilisée pour les portails romans ne contient pas de crinoïdes et ne renferme pas de cherts noirs (concrétions siliceuses). L'ensemble de ces caractéristiques permet de restreindre au Membre de Calonne (partie inférieure de la Formation d'Antoing) la provenance des bancs de pierre employés. Historiquement, c'est du Membre de Calonne inférieur qu'étaient extraits traditionnellement les matériaux utilisés en sculpture et en art funéraire, comme les célèbres lames par exemple. Anciennement dénommé "Marbre de Calonne", on fait aujourd'hui référence à ces matériaux sous l'appellation de "Noir de Tournai"¹¹. Le Noir de Tournai est considéré comme gélif par le Centre Scientifique et Technique de la Construction¹².

Caractérisation microscopique de la pierre

De structure microgrenue, la pierre est assez pauvre en fossiles et présente un aspect finement laminé lié à la présence de fins lits argileux. Ces caractéristiques pétrographiques sont diagnostiques pour le Noir de Tournai¹³. La pierre peut être classifiée géologiquement comme un *wackestone* bioclastique (selon la nomenclature de Dunham) et comme une biomicrorite (selon la nomenclature de Folk). Les lames

10. Hance *et al.* 2006.

11. Groessens 2008.

12. Gérard & Guyon de Montlivault 1986.

13. Van Welden 1965 et Dingelstadt & Dreesen 1996.

9. Camerman 1944.



Fig. 13. Mappings généraux des sculptures encore présentes sur la Porte du Capitole (a) et sur la Porte Mantile (b) : en vert les sculptures originales lisibles, en jaune les formes amorphes illisibles, en rouge la perte totale des formes originales et en bleu les interventions postérieures. Mapping réalisé par L. Hoornaert (© KIK-IRPA).

Éléments sous droit d'auteur - © Ausonius Éditions mai 2016 : embargo de 2 ans

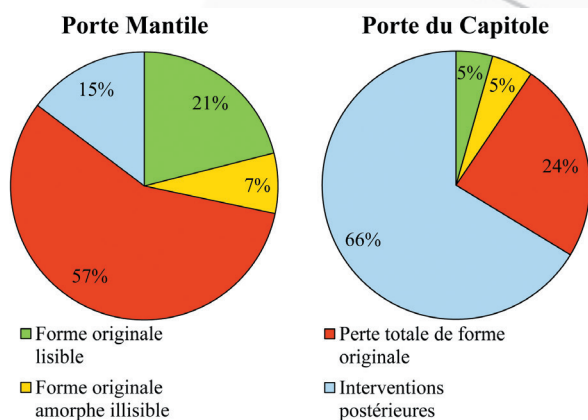


Fig. 14. Diagramme circulaire synthétisant les résultats fournis par les mappings généraux des sculptures encore présentes sur les deux portails (© KIK-IRPA).



Fig. 15. Vue de détail du front d'exploitation de la carrière abandonnée de La Roquette, à environ 7 km à l'est de Tournai. Photo reproduite avec l'autorisation du propriétaire des lieux (SA Sagrex – site des Carrières Lemay) (© KIK-IRPA).

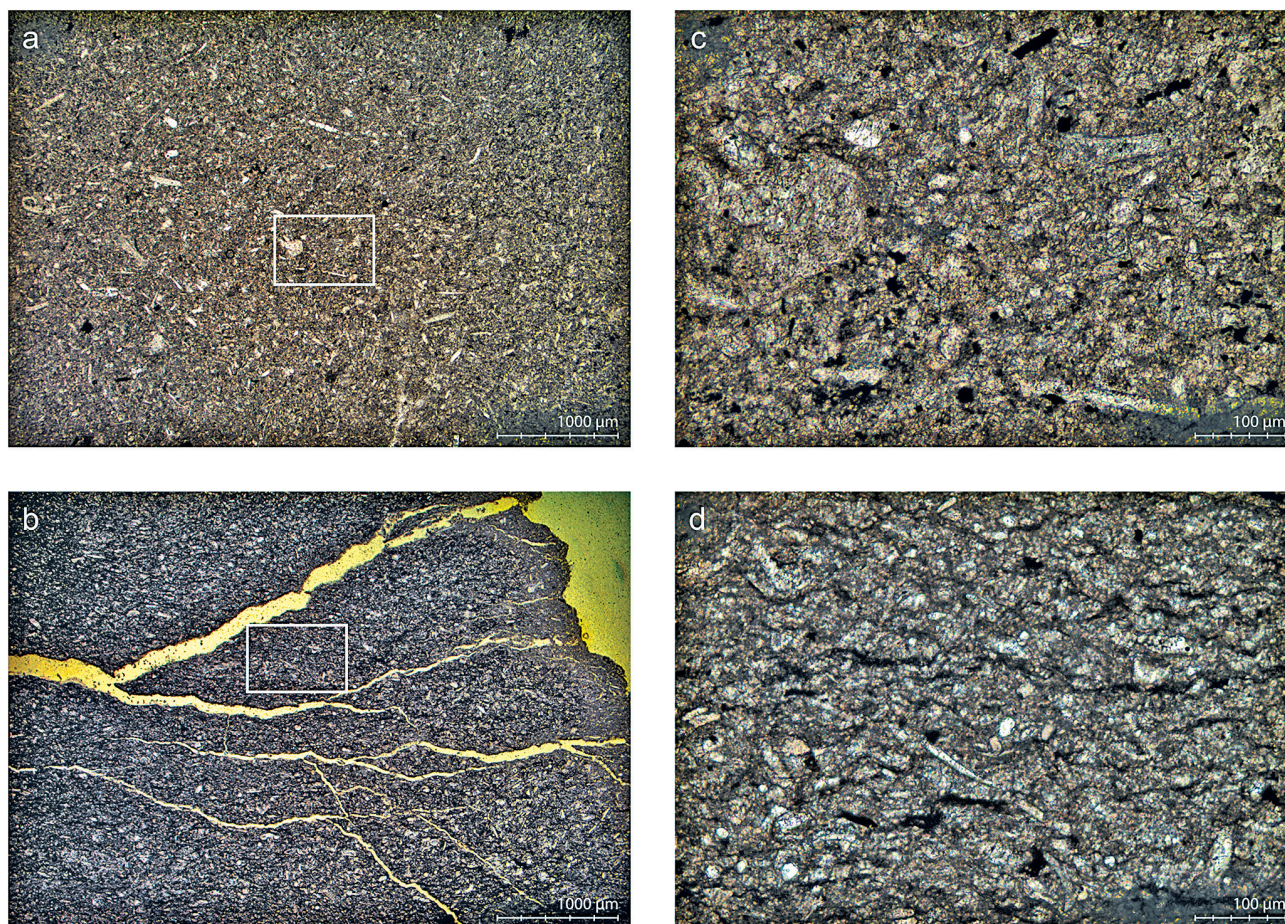


Fig. 16. Microphotos de lames minces. a = vue générale dans un noyau de pierre compact ; b = vue générale dans une bordure extérieure montrant des microfissures (en jaune) ; c = zoom dans le noyau de pierre compact (les grains opaques correspondent à de la pyrite disséminée) ; d = zoom dans la bordure extérieure (les fines lamines argileuses apparaissent en noir) (© KIK-IRPA).

minces réalisées dans les noyaux des bancs ne montrent pas de signes d'altération de la pierre (fig. 16a). Par contre, au niveau des bordures des bancs, de multiples microfissures sont visibles, dont l'orientation suit globalement celle du litage (fig. 16b). À plus fort grossissement, la présence régulière de fines lamines argileuses est très perceptible au niveau des bordures des bancs (fig. 16d), ce qui confère un comportement anisotrope à la pierre. Mis à part la présence de fissures, la porosité de la pierre n'est pas discernable en microscopie optique, ce qui est en accord avec les valeurs de l'ordre du pourcent couramment mentionnées dans la littérature.

Identification des argiles

Afin de déterminer le(s) type(s) d'argile et la présence éventuelle d'argiles gonflants au contact de l'eau, des mesures de diffraction des rayons X ont été réalisées sur la fraction fine de plusieurs échantillons de pierre, obtenue

après la procédure d'extraction traditionnelle¹⁴. Chaque préparation a ensuite été subdivisée en trois parties qui ont été conditionnées différemment avant l'analyse proprement dite : (1) traitement par chauffage à 490°C, (2) traitement par saturation à l'éthylène-glycol durant 12h et (3) pas de traitement spécifique (naturel). Les deux premiers traitements engendrent des modifications diagnostiques de l'espacement interfoliaire dans le cas d'argiles gonflantes. Les spectres de diffraction obtenus sont tous très comparables, quels que soient l'échantillon et le type de traitement (fig. 17). Les pics à 10 Å ($8,85^\circ 2\theta$) et à 3,33 Å ($26,69^\circ 2\theta$) sont caractéristiques de l'illite, un minéral argileux non gonflant dont la formule simplifiée se rapproche de celle d'un mica blanc.

Caractérisation physique et mécanique de la dégradation

Toute une série d'essais de caractérisation de la dégradation ont été réalisés, que ce soit directement sur les blocs des portails, ou que ce soit au laboratoire, à partir de blocs mis

14. Holtzapffel 1985.

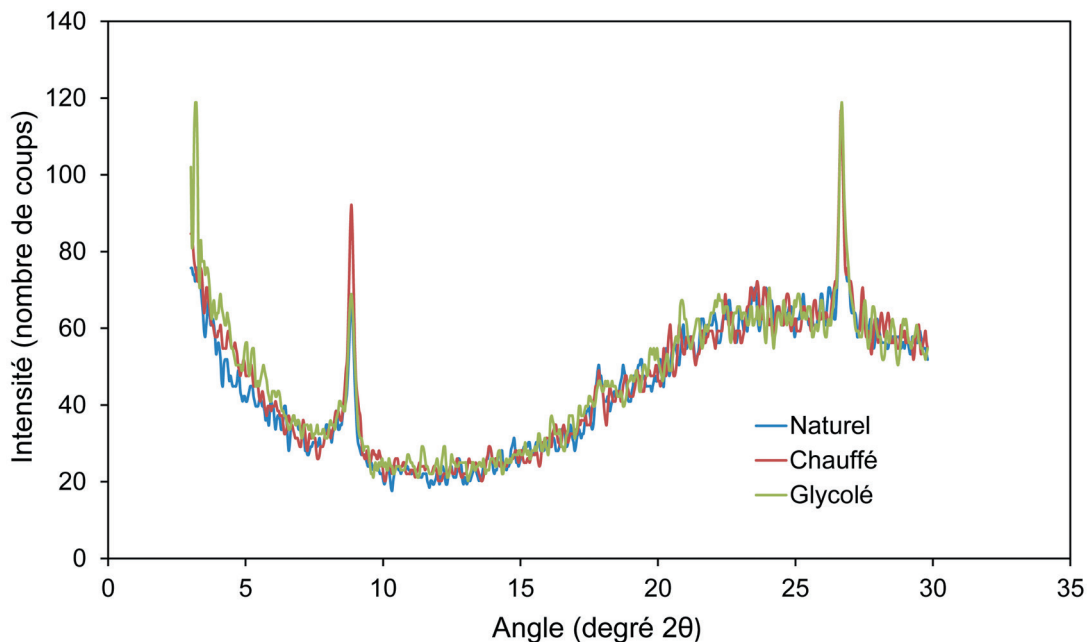


Fig. 17. Diffractogramme sur la fraction fine (particules inférieures à $2\ \mu\text{m}$) d'un fragment de pierre (Porte du Capitole).

au rebut dans le cadre de la campagne de restauration de la nef. Ne seront discutés ici que les résultats d'analyse du module d'élasticité, de la résistance au micro-forage et de la dilatométrie. La caractérisation détaillée de la pierre au niveau de l'absorption d'eau capillaire, de la porosimétrie et de l'absorption d'humidité hygroscopique, ainsi que les liens existants entre ces différents aspects, sont abordés dans un article scientifique¹⁵.

Module d'élasticité

La détermination du module d'élasticité de la pierre donne une indication de sa résistance mécanique. Il a été quantifié par auscultation ultrasonique, c'est-à-dire à partir de la mesure de la vitesse de propagation du son au travers de la pierre. Les seize mesures réalisées directement sur les portails révèlent que la plupart des blocs sculptés présentent des valeurs de module d'élasticité très faibles, montrant le caractère très dégradé de la pierre (tableau 1). Les valeurs obtenues varient sur cinq ordres de grandeur, d'une roche très dure à une roche très friable, ne pouvant que difficilement remplir une fonction mécanique. Les blocs les plus dégradés présentent de larges fissures qui pourraient affecter la stabilité même des portails.

Résistance au micro-forage

Vingt-sept mesures de la résistance au micro-forage ont été effectuées sur certains blocs des portails. Elles montrent

que : (1) le noyau compact de la pierre est caractérisé par une altération limitée, avec présence par endroits de zones de moindre résistance mécanique (fig. 18a) ; (2) une résistance significativement plus basse et une altération plus profonde sont remarquées sur des bordures extérieures légèrement détériorées (p. ex. forage PC6), tandis que la dureté de bordures extérieures sévèrement détériorées (p.ex. forage PM2) est réduite de 50 % et caractérisée par un bruit de fond prononcé reflétant le nombre important de microfissures (fig. 18b) ; (3) les blocs posés en délit avec lit en face montrent un profil en dents de scie correspondant aux écailles et fissures (fig. 18c) ; les épaisses croûtes noires ont une résistance au micro-forage moindre que la pierre sous-jacente et peuvent contenir des inclusions plus dures, correspondant à des fragments de pierre détachés qui y ont été incorporés (fig. 18d).

Dilatométrie

De manière générale, les matériaux pierreux subissent des variations dimensionnelles lorsqu'ils sont soumis à des variations de température, de la teneur en humidité relative ou en cas de contact direct avec l'eau sous forme liquide. Pour mesurer l'influence de cycles thermiques, hygriques et hydriques sur la dilatation de la pierre, des échantillons de pierre prismatiques (parallélépipèdes de $2 \times 2 \times 4\ \text{cm}$), provenant de découpes effectuées dans des blocs mis au rebut dans le cadre de la restauration de la nef, ont été placés dans une enceinte climatique et leur déformation a été mesurée à l'aide de capteurs de très haute résolution ($0,20\ \mu\text{m}$). Afin de tenir compte du caractère anisotrope de

15. Fontaine et al. 2015.

	VPS [m.s ⁻¹]	E [GPa]
Éléments des portails (n=16)		
sain (n=2)	5429; 6122*	69,8; 88,7*
légèrement détérioré (n=7)	1310 (473)	4,1 (3,8)
fortement détérioré (n=7)	312 (272)	0,3 (0,7)
Pierres d'angle du transept nord (n=22)		
parallèle au litage	2839 (1144)	19,1 (17,9)
Blocs mis au rebut dans le cadre de la restauration de la nef (n=30)		
parallèle au litage (n=12)	4513 (1450)	48,2 (11,8)
perpendiculaire au litage (n=18)	3577 (891)	30,2 (15,3)
Nouveaux blocs pour la restauration (n=14)		
parallèle au litage (n=9)	4057 (885)	40,3 (17,3)
perpendiculaire au litage (n=5)	3812 (1546)	35,6 (39,3)

Tableau 1. Aperçu de la vitesse de propagation du son (VPS) et du module d'élasticité (E) calculé (n est le nombre de mesures effectuées par groupe). Les valeurs mentionnées correspondent aux valeurs mesurées (*) ou à des moyennes dont la déviation standard est indiquée entre parenthèses (n>2).

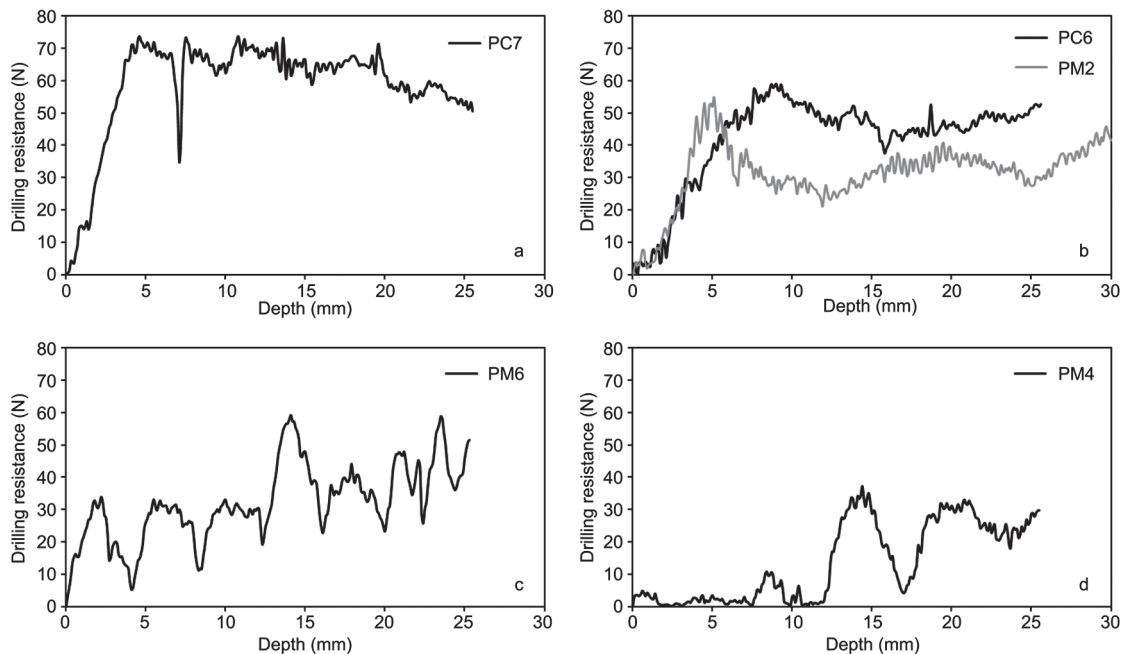


Fig. 18. Profils de dureté obtenus sur site par micro-forage. a = noyau compact de la pierre (résistance plus faible enregistrée à 7 mm) ; b = bordures extérieures détériorées ; c = bloc posé en délit avec lit en face (à remarquer : augmentation de la dureté avec la profondeur) ; d = bloc posé en délit avec lit en joint recouvert d'une épaisse croûte noire jusque 12 mm de profondeur, ensuite successivement écaille de pierre (de 12 à 17 mm) et pierre détériorée (à partir de 17 mm) (© KIK-IRPA).

la pierre lié à la présence de lamines argileuses parallèles au litage, deux types de blocs ont été soumis aux différents essais de dilatation : des blocs présentant un allongement parallèle au litage (représentatifs des blocs posés selon le lit) et des blocs avec un litage perpendiculaire à l'allongement (représentatifs des blocs posés en délit avec lit en face).

Le tableau 2 synthétise l'importance relative des différents facteurs climatiques, calculée pour des conditions réalistes sur la base des résultats des tests de dilatation. Le contact prolongé avec l'eau (pluie battante, ruissellement, condensation de surface, infiltration) provoque une expansion trois fois plus élevée que les variations quotidiennes de l'humidité relative,

Facteur climatique	Dilatation attendue perpendiculaire au litage	Dilatation attendue parallèle au litage
	(mm/m)	(mm/m)
variation journalière de température (15°C)	0,06	0,06
variation journalière de l'humidité relative (40 %)	0,14	0,12
contact avec l'eau liquide durant une demi-journée (12 h)	0,45	0,20

Tableau 2. Dilatation attendue de la pierre de Tournai causée par diverses conditions (micro)climatiques supposées habituelles pour les portails. Les valeurs mentionnées ont été déterminées sur la base des résultats expérimentaux obtenus durant des cycles thermiques, hygriques et hydriques.

dans le cas de blocs posés en délit avec lit en face. Ces valeurs sont très élevées pour un calcaire sédimentaire et la répétition des déformations, même si elles sont largement réversibles au départ, a entraîné un effet de fatigue inexorable au cours des siècles. La forte dilatation hydrique peut être attribuée au gonflement osmotique induit par la présence des particules argileuses illitiques, ces dernières prédisposant la pierre à l'altération. Les variations journalières de la température semblent jouer un rôle nettement moins important, mais qui a pu être significatif dans le cas de la Porte du Capitole, exposée aux radiations solaires directes depuis près de neuf siècles.

Rôle du gel et du gypse dans la dégradation

Bien que des conditions de gel n'aient pas été simulées dans le cadre de cette étude, il est évident que la cristallisation de glace dans les microfissures, initiées par la répétition de cycles thermiques, hygriques et hydriques, accélère le processus de dégradation en les élargissant et prolongeant. En effet, toute fissure connectée à la surface extérieure facilite la pénétration plus en profondeur de l'eau et par là même la dégradation de la pierre.

Dans le cas particulier de la pierre de Tournai (calcaire compact), le développement de croûtes superficielles de gypse à la surface des blocs sculptés ne doit pas être considéré comme une réelle cause de dégradation de la pierre. Par contre, le développement de gypse dans les microfissures n'est pas sans conséquences. En effet, comme dans le cas de la formation de cristaux de glace, la cristallisation de gypse dans les microfissures exerce une pression qui accélère le processus de fragmentation de la pierre. Néanmoins, le comblement des fissures par le gypse a également contribué à maintenir ensemble des fragments de pierre qui, sans lui, se seraient désolidarisés depuis (bien) longtemps.

CARACTÉRISATION ET SÉLECTION DES PRODUITS D'INJECTION

Les résultats des études et les observations visuelles montrent que la pierre de Tournai a été fortement affaiblie par le processus de détérioration et qu'il existe un risque important de perte de matière supplémentaire pour les sculptures romanes subsistantes. Nous avons dès lors effectué des essais de consolidation avec différents coulis d'injection dans le but de fixer les écailles et de combler les fissures. Au vu de l'ampleur des travaux à réaliser, nous avons choisi d'utiliser des formulations commerciales. Des essais préliminaires sur les matériaux de restauration envisagés ont été effectués en laboratoire afin de déterminer certaines de leurs caractéristiques et d'affiner la sélection avant les premiers essais sur site.

Au total, six formules ont été testées (tableau 3). Les matériaux peuvent être divisés en deux grandes catégories : un coulis à base de silicate d'éthyle (Syton) et des coulis hydrauliques commercialisés avec des composants non-spécifiés (Ledan et PLM).

Les propriétés de travail et les caractéristiques de performance, comme la viscosité, l'injectabilité, le temps de prise et la maniabilité, ont été évaluées et comparées avec ce qui a été considéré comme souhaitable.

De nombreux essais de caractérisation ont été réalisés en laboratoire sur les matériaux de restauration envisagés. Sans trop entrer dans les détails, il s'avère que tous les produits testés sont plus flexibles et poreux que la pierre de Tournai en bon état, ce qui implique que leur application comporte a priori peu de risques. De manière générale, on constate que l'ajout d'un agrégat diminue l'amplitude des propriétés de dilatation des mélanges. Les mélanges à base de chaux hydraulique (Ledan et PLM) ont un comportement assez comparable. Ils se dilatent beaucoup plus que les mélanges à base de silicate d'éthyle (Syton). Les coulis au Syton présentent également une meilleure adhérence à la pierre.

Sur la base des résultats d'analyse, deux compositions de coulis, le Syton X30 et le Ledan TA1, ont été soumis à divers essais in situ. Ces deux types de coulis ont été appliqués

Marque	Liant	Charge
LEDAN	LEDAN TA1	Poudre de marbre noir Poudre de granite gris Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle Pigment terre verte
	LEDAN TA2	Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle
	LEDAN TA3	Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle
PLM	PLM-M	Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle Pigment terre verte
	PLM-I	Poudre de graphite Pigment terre d'ombre naturelle Pigment terre verte
SYTON	SYTON X30	Poudre de marbre noir Silice pyrogénée (Aerosil OX 50)

Tableau 3. Type et composition des mélanges testés.

suivant le système modulaire de Wendler¹⁶. Selon cette méthodologie, la fixation des écailles et le remplissage des interstices doivent être effectués avec le même liant lors des différentes étapes du traitement. Une analyse comparative des essais in situ a permis de tirer les conclusions suivantes concernant le Ledan : d'une part, le coulis a une viscosité trop élevée et donc une capacité d'injection insuffisante pour pénétrer dans toutes les fissures et microfissures ; d'autre part, les conditions de travail in situ sont moins favorables vu qu'il faut doser précisément les différents composants et que le mélange doit être réalisé à vitesse constante ; enfin, le court temps de prise entraîne un colmatage trop rapide des trous d'injection.

Le Syton, quant à lui, possède une très faible viscosité, ce qui lui permet de pénétrer plus en profondeur dans les fissures et microfissures. De plus, l'ouvrabilité in situ est excellente et la préparation plus facile à exécuter.

Le coulis d'injection à base de Syton s'est avéré le mieux adapté aux objectifs poursuivis. Par conséquent, il a été décidé de l'utiliser lors de la restauration pilote. Outre les tests des produits d'injection, des essais de nettoyage ont également été effectués, à la suite desquels une restauration pilote a été effectuée sur la Porte Mantile.

RESTAURATION PILOTE ET PROTOCOLE DE RESTAURATION

La zone choisie pour la restauration pilote présente les différents phénomènes de dégradation et les différents types de pose des blocs de pierre. Cette restauration pilote visait à lister toutes les opérations nécessaires pour la restauration, de façon à les mentionner par la suite dans le cahier des charges de la restauration des deux portails.

Le traitement prescrit commence par un léger dépoussiérage, puis l'injection, suivant le système modulaire de Wendler, des coulis à base de Syton X30 pour combler les fissures et fixer les écailles. Ce produit est commercialisé sous la forme d'un liquide prêt à l'emploi qui peut être appliqué pur ou, en fonction de l'épaisseur des cavités à combler, être épaissi avec de l'Aerosil OX 50 et un agrégat de façon à obtenir un coulis ou un mortier. Pour s'accorder au mieux à la couleur de la pierre de Tournai, de la poudre de marbre noir (0.1-0.315 mm, Kremer Pigmente) a été employée comme agrégat. Pour de très grandes cavités ou des zones massives et instables, des précautions supplémentaires doivent être prises lors de l'application, et ce, pour éviter les détachements involontaires. Une fois les injections réalisées, il est possible d'effectuer un traitement biocide local à l'aide d'un produit à base d'ammonium quaternaire. Pour respecter l'authenticité de l'élément restauré, les joints originaux sont conservés au maximum. Les anciens mortiers de restauration présents sur la surface de la pierre et les mortiers durs en ciment doivent, pour des raisons esthétiques, être enlevés sans endommager la pierre. Le mortier de rejointoiement doit correspondre étroitement au mortier original. Selon les résultats d'analyse

16. Wendler 2000.

de la composition, le mortier original est un mortier de chaux moyennement à fortement hydraulique, avec du sable fin comme agrégat.

Les essais de nettoyage par micro-sablage avec différents abrasifs, débits et pressions effectués in situ ont permis de mettre au point deux méthodes de nettoyage conditionnées par l'épaisseur et la dureté des croûtes de gypse, et par la nature du matériau sous-jacent. Les zones présentant une croûte noire mince au-dessus des couches blanches de peinture à la chaux sont dégagées à sec à l'aide d'un scalpel ; un micro-sablage¹⁷ permet ensuite d'harmoniser la surface. Les zones présentant une croûte noire d'épaisseur moyenne à épaisse (plus de 2 mm) sur la pierre de Tournai sont tout d'abord ramollies à l'aide d'une compresse d'ouate imbibée d'eau et puis amincies à l'aide d'un scalpel. Les croûtes de gypse subsistantes sont ensuite éliminées par micro-sablage¹⁸. Des injections complémentaires de Syton X30 devront être réalisées pendant le nettoyage. En effet, des fissures ou des craquelures sont souvent dissimulées par les croûtes de gypse. Les injections ont permis de nettoyer la surface sans perte de matière. Le traitement fait réapparaître les détails et accroît la lisibilité des sculptures (fig. 19 et 20). Après le traitement de conservation, il faut évaluer la nécessité de l'application de retouches. Ces retouches éventuelles viseraient à améliorer la lisibilité des portails. Il est recommandé de les effectuer à l'aide d'un système de peinture correspondant aux couches de peinture encore présentes et donc à base de chaux.

MESURES DE CONSERVATION PRÉVENTIVE

Les mesures de conservation à prendre passent par une diminution de l'influence des facteurs climatiques. Comme on l'a vu, c'est la mise en contact de la pierre avec l'eau sous sa forme liquide qui est le facteur le plus préjudiciable. À ce stade, deux options sont envisagées : soit la mise en place d'un auvent offrant une protection contre la pluie, le soleil direct et le rayonnement infrarouge ; soit – et cela semble être la meilleure option –, la construction d'un abri fermé dans lequel les paramètres climatiques, dont le taux d'humidité relative, peuvent être contrôlés. L'installation d'une protection paraît plus justifiée pour la Porte Mantile, vu que davantage de reliefs sculptés y sont encore préservés. Dans le cadre de la stratégie de conservation des portails sur le long terme et dans le but d'améliorer la durabilité de la future restauration, nous avons incité les autorités compétentes à s'assurer de la stabilité structurelle des portails et à procéder à un suivi permanent de l'état de conservation. Établi sur base annuelle, ce dernier permettrait de planifier de petites opérations de maintenance à réaliser dans des délais raisonnables, de manière à limiter autant que possible les détériorations futures.



17. Abrasifs : carbonate de calcium (Durcal 130) et microbilles de verre (45-90 µm) ; pression : max. 2 bar ; débit : 2-4.

18. Abrasifs : microbilles de verre (45-90 µm) ; pression : 2 à 4 bar ; débit : 2-5.



Fig. 19. Porte Mantile. Détail du bandeau cintré avec à droite la zone de test après traitement (© KIK-IRPA).

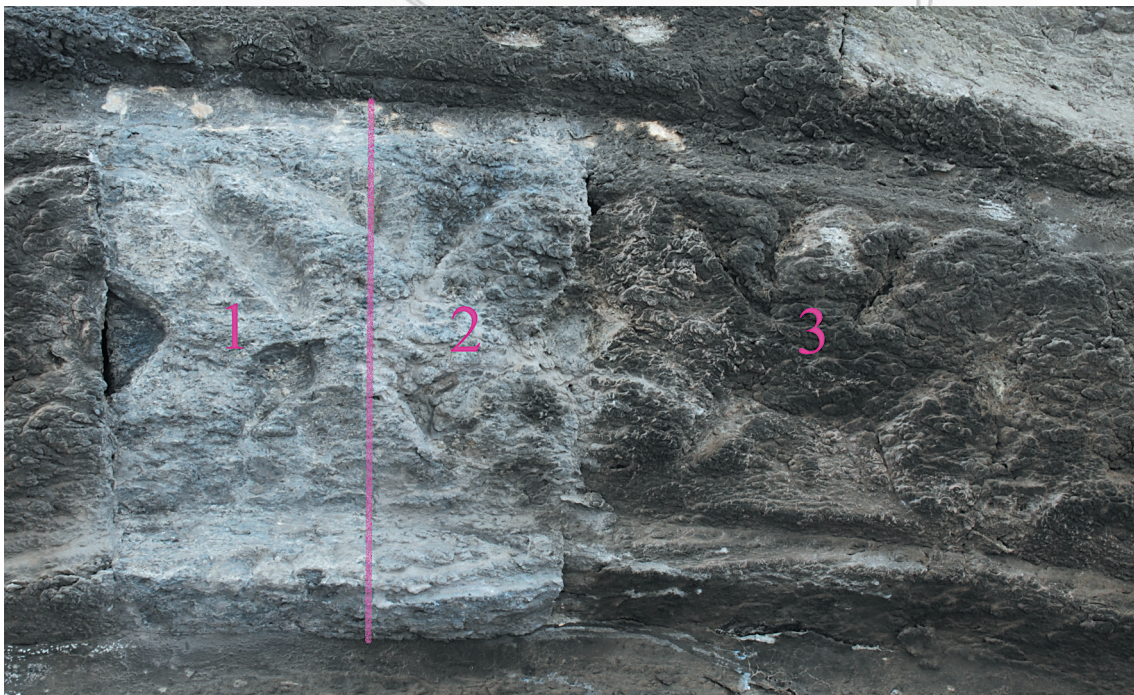


Fig. 20. Porte Mantile, voussure trilobée (© KIK-IRPA).
Nr. 1 : après traitement (injection et nettoyage), nr. 2 : après injection, nr. 3 : avant traitement.

Bibliographie

- Camerman, C. (1944) : "La pierre de Tournai : son gisement, sa structure et ses propriétés, son emploi actuel", *Mémoires de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, Nouvelle série in-4°, 1.
- Dingelstadt, C. et R. Dreesen (1996) : *Atlas pétrographique des principales roches calcaires et roches calcaires gréseuses utilisées dans les monuments de Wallonie*, Liège, rapport inédit réalisé par l'ISSeP pour le compte de la Direction Générale de l'Aménagement du Territoire et du Logement, Division des Monuments, Sites et Fouilles.
- Fitzner, B., K. Heinrichs et D. La Bouchardiere (2002) : "Damage index for stone monuments", in : Galan & Zezza 2002, 315-326.
- Fontaine, L., R. Hendrickx et H. De Clercq (2015) : "Deterioration mechanisms of the compact clay-bearing limestone of Tournai used in the Romanesque portals of Tournai Cathedral (Belgium)", *Environmental Earth Sciences*, 74, 3207-3221.
- Galan, E. et F. Zezza, éd. (2002) : *Protection and conservation of the cultural heritage of the mediterranean cities*, Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the mediterranean Basin, Séville.
- Gérard, R. et F. Guyon de Montlivault (1986) : *La pierre de Tournai*, Bruxelles, Centre Scientifique et Technique de la Construction, Annexe 1 de la NIT 163.
- Groessens, E. (2008) : "La pierre de Tournai, un matériau de choix depuis la période romaine et un des fleurons parmi les autres marbres belges", *Revue trimestrielle de la Société tournaïenne de géologie, préhistoire et archéologie*, X, 7, 197-216.
- Hance, L., E. Poty et F.-X. Devuyt (2006) : "Tournaisian", *Geologica Belgica*, 9/1-2, 47-53.
- Holtzapffel, T. (1985) : *Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination*, Société géologique du Nord, Publication n° 12.
- ICOMOS-ISCS (2008) : *Illustrated glossary on stone deterioration patterns - Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*, Paris, International Council on Monuments and Sites - International Committee for Stone, Monuments & Sites XV.
- Le Maistre d'Anstaing, J. (1842) : *Recherche sur l'histoire et l'architecture de l'église cathédrale Notre-Dame de Tournai*, Tournai.
- Piron, C. (2013) : "Le rôle des services photographiques et du laboratoire des musées royaux d'art et d'histoire dans la sauvegarde du patrimoine artistique belge durant la seconde guerre mondiale. Les raisons d'un succès, la genèse d'un institut", *Bulletin de l'Institut Royal du Patrimoine Artistique*, 33, 257-287.
- Sanyova, J. (2014) : Rapport interne IRPA du Laboratoire des Œuvres Polychromées.
- Scaff, V. (1971) : *La sculpture romane de la cathédrale Notre-Dame de Tournai*, Tournai, Casterman.
- Van Den Noortgaete, T. (1995) : *Étude préliminaire à la restauration de la cathédrale de Tournai. Porte Mantile et Porte du Capitole. Rapport archéologique préalable à la restauration des sculptures romanes*, 2 vol. (rapport inédit).
- Van Welden, J.-P. (1965) : "Contribution à l'identification des 'pierres de Tournai'", *Bulletin de l'Institut Royal du Patrimoine Artistique*, VIII, 149-166.
- Vergès-Belmin, V., J.-M. Vallet et P. Bromblet (2011) : "Le glossaire illustré ICOMOS-ISCS sur les formes d'altération de la pierre : un outil précieux pour les constats d'état de la statuaire des parcs, jardins et cimetières", *Jardins de Pierres : Conservation de la pierre dans les parcs, jardins et cimetières*. 14^e journées d'étude de la SFIC, Paris, 195-204.
- Wendler, E. (2000) : "Elastifizierte Kiseläureester als mineralische Bindemittel für unterschiedliche Konservierungsziele. Praktische Erfahrungen mit dem KSE-Modul-System. Neue Möglichkeiten zur Natursteinkonservierung", *Lönniger Beiträge zur Baudenkmalpflege*, Band I, 24-51.
- Wheeler, G. (2008) : "Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone: Where We Are Now", in : *Stone Consolidation in Cultural Heritage : Research and Practice, Proceedings of the International Symposium*, Lisbonne, 41-52.

