

# LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI. CONTEXTUALISATION ET RESTAURATION

*Sous la direction de Françoise Duperroy & Yves Desmet*

SPW | Éditions



Patrimoine



Études et Documents

Monuments et Sites

12



Études et Documents

Monuments et Sites

12

La série **MONUMENTS ET SITES** de la collection  
**ÉTUDES ET DOCUMENTS** est une publication  
du **DÉPARTEMENT DU PATRIMOINE** (SPW/DGO4)

Service public de Wallonie  
Direction générale opérationnelle de l'Aménagement du Territoire,  
du Logement, du Patrimoine et de l'Énergie  
Département du patrimoine  
Pierre Paquet, Inspecteur général f.f.  
Rue des Brigades d'Irlande, 1  
B-5100 Jambes

#### DIFFUSION ET VENTE

Institut du Patrimoine wallon  
Service Publications  
Rue du Lombard, 79 – B-5000 Namur  
Tél. : +32 (0)81.230.703 ou +32 (0)81.654.154  
Fax : +32 (0)81.659.097  
publication@idpw.be  
www.idpw.be



Possibilité également d'acquérir les ouvrages  
à la **boutique** de l'IPW :  
Résidence du Grand Cortil,  
Place des Célestines, 21 (derrière l'hôtel Ibis)  
B-5000 Namur  
Ouverture du lundi au vendredi de 9h à 12h

Pour tout renseignement complémentaire :  
Tél. : +32 (0)81.654.154  
Fax : +32 (0)81.231.890

En cas de litige, Médiateur de Wallonie :  
Marc Bertrand  
Tél. : 0800.191.99 – le-mediateur.be

*Le texte engage la seule responsabilité des auteurs.  
L'éditeur s'est efforcé de régler les droits relatifs  
aux illustrations conformément aux prescriptions  
légalles. Les détenteurs de droits qui, malgré ses  
recherches, n'auraient pu être retrouvés sont priés de  
se faire connaître à l'éditeur.*

Tous droits réservés pour tous pays  
Dépôt légal : D/2015/13.063/6  
ISBN : 978-2-930711-10-2

#### ÉDITEUR RESPONSABLE

Pierre Paquet,  
Inspecteur général f.f.

#### COORDINATION ÉDITORIALE

Liliane Henderickx

#### CONCEPTION GRAPHIQUE DE LA COLLECTION

Ken Dethier

#### MISE EN PAGE

Manta Graphic, Liège

#### IMPRIMERIE

AZ Print, Grâce-Hollogne

#### COUVERTURE

Cathédrale Notre-Dame de Tournai. Porte du Capitole. Détail du trilobe.  
Photo : Guy Focant © SPW/DGO4

#### RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

DUPERROY F. & DESMET Y. (dir.), 2015. *Les portails romans de la cathédrale  
de Tournai. Contextualisation et restauration*, Namur (Études et  
Documents, Monuments et Sites, 12), 200 p.

#### Avertissement

Depuis le 1<sup>er</sup> août 2008, les nouvelles  
appellations « Service public de Wallonie.  
Direction générale opérationnelle de  
l'Aménagement du Territoire, du Logement,  
du Patrimoine et de l'Énergie. Département  
du patrimoine » remplacent « Ministère de  
la Région wallonne. Direction générale de  
l'Aménagement du Territoire, du Logement  
et du Patrimoine. Division du Patrimoine ».

# LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI. CONTEXTUALISATION ET RESTAURATION

---

**Sous la direction de Françoise Duperroy & Yves Desmet**

Actes du colloque international organisé les 31 janvier et 1<sup>er</sup> février 2013 au Séminaire de Tournai par la DGO4/Département du patrimoine, avec la collaboration scientifique de l'IRPA

ÉTUDES ET DOCUMENTS

Monuments et Sites, 12

Namur, 2015

Service public de Wallonie  
Direction générale opérationnelle de  
l'Aménagement du Territoire, du Logement,  
du Patrimoine et de l'Énergie  
Département du patrimoine







Colloque

31 Janv. 2013 | 1 Févr. 2013

# LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI : CONTEXTUALISATION ET RESTAURATION

Auditoire du Séminaire de Tournai



Patrimoine

Jeudi 31 janvier 2013

Vendredi 1<sup>er</sup> février 2013

10:00	À l'auditoire du Séminaire de Tournai Accueil des participants – café
10:30	<b>Discours introductifs</b> L <sup>Carlo di Antonio</sup> , Ministre du Patrimoine L <sup>Pierre Paquet</sup> , Inspecteur général a.i., SPW / DGO4 / Département du patrimoine L <sup>Christina Ceulemans</sup> , Directeur général a.i., IRPA
	Présidence de séance : L <sup>Dany Sandron</sup> , Université de Paris-Sorbonne - Paris IV
11:00	<b>La place des portails dans la chronologie du chantier roman de la cathédrale de Tournai</b> L <sup>Laurent Deléhouzée</sup> SPW / DGO4 / Département du patrimoine
11:30	<b>La porte Mantile et la porte du Capitole dans l'histoire de l'art roman : une historiographie par défaut</b> L <sup>Benoît Van Den Bossche</sup> , Université de Liège
12:00	<b>Considérations sur les particularités constitutives des portails romans de la cathédrale de Tournai</b> L <sup>Jean-Claude Ghislain</sup> , Docteur en histoire de l'art et archéologie – Université de Liège
12:30	Questions-réponses
13:00	Lunch
	Présidence de séance : L <sup>Xavier Barral i Altet</sup> , Université de Rennes 2 et Venise, Ca'Foscari
14:00	<b>Typologie architecturale et composition formelle des portails latéraux de la cathédrale de Tournai</b> L <sup>Jeroen Westerman</sup> , Het Gelders Genootschap – Arnhem – Universiteit Leiden
14:30	<b>Les portails du groupe d'Aulnay et leurs rapports avec les portails latéraux de la cathédrale de Tournai</b> L <sup>Marcello Angheben</sup> , Université de Poitiers
15:00	<b>La psychomachie de la porte Mantile. Approche comparée</b> L <sup>Jacqueline Leclercq-Marx</sup> et L <sup>Constantin Pion</sup> , Université libre de Bruxelles
15:30	Pause-café
16:00	<b>Les portails romans de l'ancienne priorale clunisienne Saint-Pierre de Nantua : archéologie du bâti, archéologie de l'image et restitution des programmes effacés</b> L <sup>Nicolas Reveyron</sup> , Université Lumière – Lyon 2
16:30	Questions-réponses
<b>Conférence publique</b>	
18:00	<b>Les images des grands portails romans dans la ville médiévale ou l'ordre féodal du monde entre religion et politique</b> L <sup>Xavier Barral i Altet</sup> , Université de Rennes 2 et Venise, Ca'Foscari

9:00	Le rendez-vous est fixé à l'Evêché, salle « Bâtir » où se tiendra la première communication Accueil des participants – café
09:30	<b>Introduction aux travaux de restauration, présentation de la philosophie de restauration</b> L <sup>Vincent Brunelle</sup> , architecte en chef des monuments historiques - auteur de projet de la cathédrale
10:00	<b>Visite commentée de la cathédrale</b> L <sup>Vincent Brunelle</sup> , architecte en chef des monuments historiques - auteur de projet de la cathédrale et L <sup>Laurent Deléhouzée</sup> , SPW / DGO4 / Département du patrimoine
12:30	Repas libre
	Présidence de séance : L <sup>Francis Tourneur</sup> , Université de Liège
14:00	<b>Les portails romans de la cathédrale de Tournai : caractérisation technique et matérielle des mécanismes de dégradation de la pierre de Tournai</b> L <sup>Laurent Fontaine</sup> , L <sup>Roel Hendrickx</sup> , L <sup>Hilde De Clercq</sup> , IRPA, L <sup>Michiel Duser</sup> , L <sup>Eric Groessens</sup> , Service géologique de Belgique, et L <sup>Francis Tourneur</sup> , Université de Liège*
14:30	<b>Etudes préalables dans le cadre de la restauration ou de la réhabilitation d'ouvrages patrimoniaux</b> L <sup>Fabrice Dagrain</sup> , Université de Mons
15:00	Pause-café
15:30	<b>Condition assessment and conservation methodology for the Romanesque Portals of the Notre-Dame Cathedral of Tournai</b> L <sup>Lieselote Hoornaert</sup> , IRPA
16:00	<b>The mausoleum of Maarten Tromp (Old Church, Delft) : investigation of the decay affecting the Tournai stone elements</b> L <sup>Barbara Lubelli</sup> , Université de Delft, et L <sup>Timo G. Nijland</sup> , Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO
16:30	Questions-réponses
17:00	<b>Conclusions :</b> L <sup>Françoise Duperoy</sup> , SPW / DGO4 / Département du patrimoine, et L <sup>Pierre-Yves Kairis</sup> , IRPA
17:30	Drink de clôture
Adresses: Séminaire de Tournai : rue des Jésuites, 28 - 7500 Tournai Evêché de Tournai : place de l'Evêché, 1 - 7500 Tournai	

\*Modification du titre de la communication le 27/11/2012.

## TABLE DES MATIÈRES

### DISCOURS INTRODUCTIFS/INTRODUCTORY SPEECHES

FRANÇOISE DUPERROY 11

CARLO DI ANTONIO 13

## PREMIÈRE PARTIE

CONTEXTUALISATION 17

### LA PLACE DES PORTAILS DANS LA CHRONOLOGIE DU CHANTIER ROMAN DE LA CATHÉDRALE DE TOURNAI

LAURENT DELÉHOUZÉE 17

### LA PORTE MANTILE ET LA PORTE DU CAPITOLE DANS L'HISTOIRE DE L'ART ROMAN

BENOÎT VAN DEN BOSSCHE 31

1. Les portails de Tournai, remarquable exemple de sculpture ogivale belge . . . . . 32
2. Les portails de Tournai, remarquable exemple de sculpture scaldienne . . . . . 33
3. Les portails de Tournai, remarquable exemple de sculpture européenne romane . . . . . 37

### CONSIDÉRATIONS SUR LES OPTIONS CONSTITUTIVES DES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI

JEAN-CLAUDE GHISLAIN 43

1. Chronologie . . . . . 43
2. Le portail occidental . . . . . 44
3. La porte Mantile . . . . . 48
4. La porte du Capitole . . . . . 50

### EMPLACEMENT, TYPOLOGIE ARCHITECTURALE ET COMPOSITION FORMELLE DES PORTAILS LATÉRAUX DE NOTRE-DAME DE TOURNAI : LEUR IMPORTANCE DANS L'ENSEMBLE DE LA CATHÉDRALE

JEROEN WESTERMAN 57

1. Le portail principal . . . . . 57
2. Les portails latéraux . . . . . 58
3. L'emplacement des portails latéraux dans l'édifice . . . . . 58
4. L'emplacement des portails latéraux dans les édifices contemporains . . . . . 59

5.	La combinaison des portails avec l'abside . . . . .	62
6.	L'emplacement des portails dans les églises sur plan tréflé . . . . .	62
7.	Les portails et la topographie du site cathédral de Tournai . . . . .	63
8.	La distribution intérieure de la cathédrale au 12 <sup>e</sup> siècle . . . . .	65
9.	Situation architecturale des portails latéraux et changement de projet . . . . .	66
10.	Des portails prestigieux pour des façades d'apparat . . . . .	67

## **DES PORTAILS DU GROUPE D'AULNAY AUX PORTAILS LATÉRAUX DE LA CATHÉDRALE DE TOURNAI**

MARCELLO ANGHEBEN

**71**

1.	Les portails du groupe d'Aulnay . . . . .	72
2.	L'absence de tympan . . . . .	74
3.	Les voussures figurées . . . . .	75
4.	Le motif de l'oiseau juché sur un quadrupède . . . . .	75
5.	L'âne à la lyre et les félins aux cous allongés . . . . .	77
6.	le cycle de David . . . . .	78
7.	La psychomachie des ébrasements . . . . .	78
8.	L'homme à la bourse chevauchant un diable . . . . .	80
9.	Le « tympan supérieur » de la porte Mantile . . . . .	81
10.	Conclusion . . . . .	83

## **LA PSYCHOMACHIE DE LA PORTE MANTILE (CATHÉDRALE DE TOURNAI). APPROCHE COMPARATIVE**

JACQUELINE LECLERCQ-MARX & CONSTANTIN PION

**87**

## **ARCHÉOLOGIE DE L'IMAGE : LE PORTAIL DU SACRIFICE À SAINT-MICHEL DE NANTUA**

NICOLAS REVEYRON

**101**

1.	L'ancienne abbaye de Nantua . . . . .	102
2.	Méthodologie . . . . .	103
3.	Analyse archéologique des six chapiteaux du portail . . . . .	104
4.	Conclusion . . . . .	109

## **QUESTIONS-RÉPONSES**

**111**

## DEUXIÈME PARTIE

### RESTAURATION

117

#### LES « PIERRES DE TOURNAI » : UN ÉTAT DES QUESTIONS

FRANCIS TOURNEUR

117

1. Tournai et la géologie. . . . .	117
2. Tournai et l'industrie extractive. . . . .	118
3. L'expansion tournaisienne grâce à l'industrie de la pierre . . . . .	119
4. Les « pierres de Tournai » et leur comportement en œuvre . . . . .	120

#### LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE DE TOURNAI : CARACTÉRISATION TECHNIQUE ET MATÉRIELLE DES MÉCANISMES DE DÉGRADATION DE LA PIERRE DE TOURNAI

LAURENT FONTAINE, ROEL HENDRICKX, HILDE DE CLERCQ, MICHIEL DUSAR,  
ÉRIC GROESSENS & FRANCIS TOURNEUR

123

1. Contexte de la recherche . . . . .	123
2. La pierre de Tournai . . . . .	123
3. Mode de mise en œuvre . . . . .	126
4. Degré d'exposition . . . . .	126
5. Examen pétrographique . . . . .	126
6. Identification des argiles. . . . .	128
7. Résistance au micro-forage . . . . .	129
8. Module délasticité . . . . .	130
9. Mesures d'absorption . . . . .	131
10. Mesures de dilatation. . . . .	133
11. Conclusions et mesures de protection . . . . .	134

#### ÉTUDES PRÉALABLES DANS LE CADRE DE RESTAURATION OU DE RÉHABILITATION D'OUVRAGES PATRIMONIAUX. CAS DE L'ÉGLISE SAINT-CHRISTOPHE DE RACOUR

FABRICE DAGRAIN

137

1. Introduction . . . . .	137
2. Les études préalables . . . . .	137
3. La méthodologie suivie. . . . .	138
4. Cas d'étude : l'église Saint-Christophe de Racour . . . . .	139
5. Conclusions . . . . .	145

## LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI : ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE CONSERVATION ET MÉTHODOLOGIE DE CONSERVATION

LIESELOTE HOORNAERT

147

1. Introduction . . . . .	147
2. Description technique, interventions antérieures, histoire technique et matérielle . . . . .	148
3. Causes de dégradation . . . . .	149
4. Étude macroscopique des détériorations de la pierre de Tournai des portails. . . . .	150
5. Étude de l'état de conservation des portails . . . . .	151
6. Approche théorique et éthique du traitement de conservation-restauration. . . . .	156
7. Faisabilité et durabilité du traitement de restauration . . . . .	157
8. Le degré de traitement . . . . .	157
9. Conclusion : conservation préventive . . . . .	158

## HET GRAFMONUMENT VAN MAARTEN TROMP IN DE OUDE KERK IN DELFT: ONDERZOEK NAAR HET AANTASTINGSMECHANISME VAN DOORNIKSE KALKSTEEN

BARBARA LUBELLI &amp; TIMO G. NIJLAND

161

1. Inleiding . . . . .	161
2. Onderzoekopzet en methode . . . . .	163
3. Resultaten . . . . .	164
4. Discussie en conclusie . . . . .	168

## TROISIÈME PARTIE

### CONFÉRENCE PUBLIQUE DU 31 JANVIER 2013 171

### LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE DE TOURNAI : UN PROGRAMME RELIGIEUX ET POLITIQUE ORIGINAL POUR LA VILLE MÉDIÉVALE

XAVIER BARRAL I ALTET

171

### CONCLUSIONS 189

### LISTE DES FIGURES 192

### ADRESSES DE CONTACT DES AUTEURS 197



# LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE DE TOURNAI : CARACTÉRISATION TECHNIQUE ET MATÉRIELLE DES MÉCANISMES DE DÉGRADATION DE LA PIERRE DE TOURNAI

LAURENT FONTAINE<sup>1</sup>, ROEL HENDRICKX<sup>2</sup>, HILDE DE CLERCQ<sup>1</sup>,  
MICHEL DUSAR<sup>3</sup>, ÉRIC GROESSENS<sup>3</sup> & FRANCIS TOURNEUR<sup>4</sup>

## 1. CONTEXTE DE LA RECHERCHE

L'étude préalable à la restauration des portails latéraux de la cathédrale Notre-Dame de Tournai est menée depuis juin 2012 par l'Institut royal du Patrimoine artistique, à la demande de la Direction de la restauration du patrimoine (SPW/DGO4). Cet article est consacré aux premiers résultats de la recherche des causes d'altération de la pierre. La description de l'état de conservation fait l'objet de l'article de L. Hoornaert (voir infra). La compréhension du phénomène de dégradation apparaît

comme un prérequis indispensable à toute intervention de conservation-restauration. L'identification des facteurs responsables et leur importance relative permettent en effet de déterminer les mesures de protection capables d'atténuer le processus d'altération.

## 2. LA PIERRE DE TOURNAI

### 2.1. Généralités

Chefs-d'œuvre de la sculpture romane, les portes Mantile et du Capitole ont été réalisées en pierre de Tournai, la pierre du pays. Cette

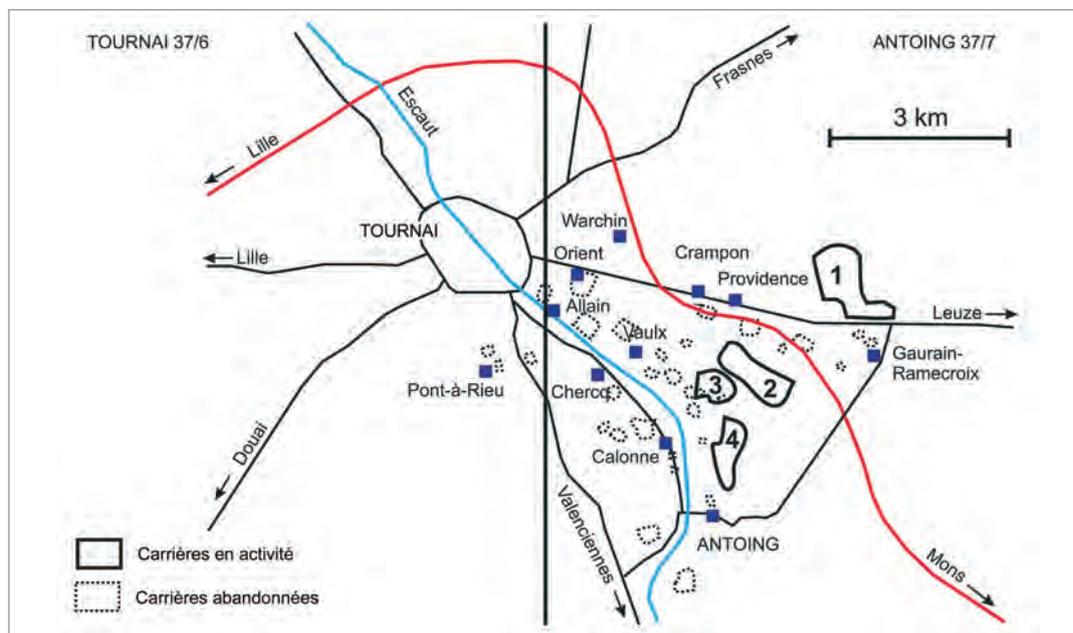


Fig. 71

Localisation des principales carrières exploitant le calcaire de Tournai (d'après HANCE, POTY & DEVUYST, 2006, p. 48, fig. 2).

1. Carrière CCB, à Gaurain-Ramecroix ;
2. Carrière du Milieu, à Gaurain-Ramecroix ;
3. Carrière Lemay, à Vaulx ;
4. Carrière d'Antoing, à Antoing.

<sup>1</sup> Institut royal du Patrimoine artistique (IRPA), Laboratoire des Monuments, parc du Cinquantenaire, 1, B-1000 Bruxelles ; courriels : laurent.fontaine@kikirpa.be, hilde.declercq@kikirpa.be.

<sup>2</sup> Institut suisse pour l'étude de l'art (SIK-ISEA), Zollikerstrasse, 32, CH-8032 Zürich ; courriel : roel.hendrickx@sik-isea.ch.

<sup>3</sup> Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRScNB), Service Géologique de Belgique, rue Jenner, 13, B-1000 Bruxelles ; courriels : michiel.dusar@naturalsciences.be, eric.groessens@sciencesnaturelles.be.

<sup>4</sup> Pierres et Marbres de Wallonie asbl, rue des Pieds d'Alouette, 11, B-5100 Naninne ; courriel : francis.tourneur@pierresetmarbres.be.

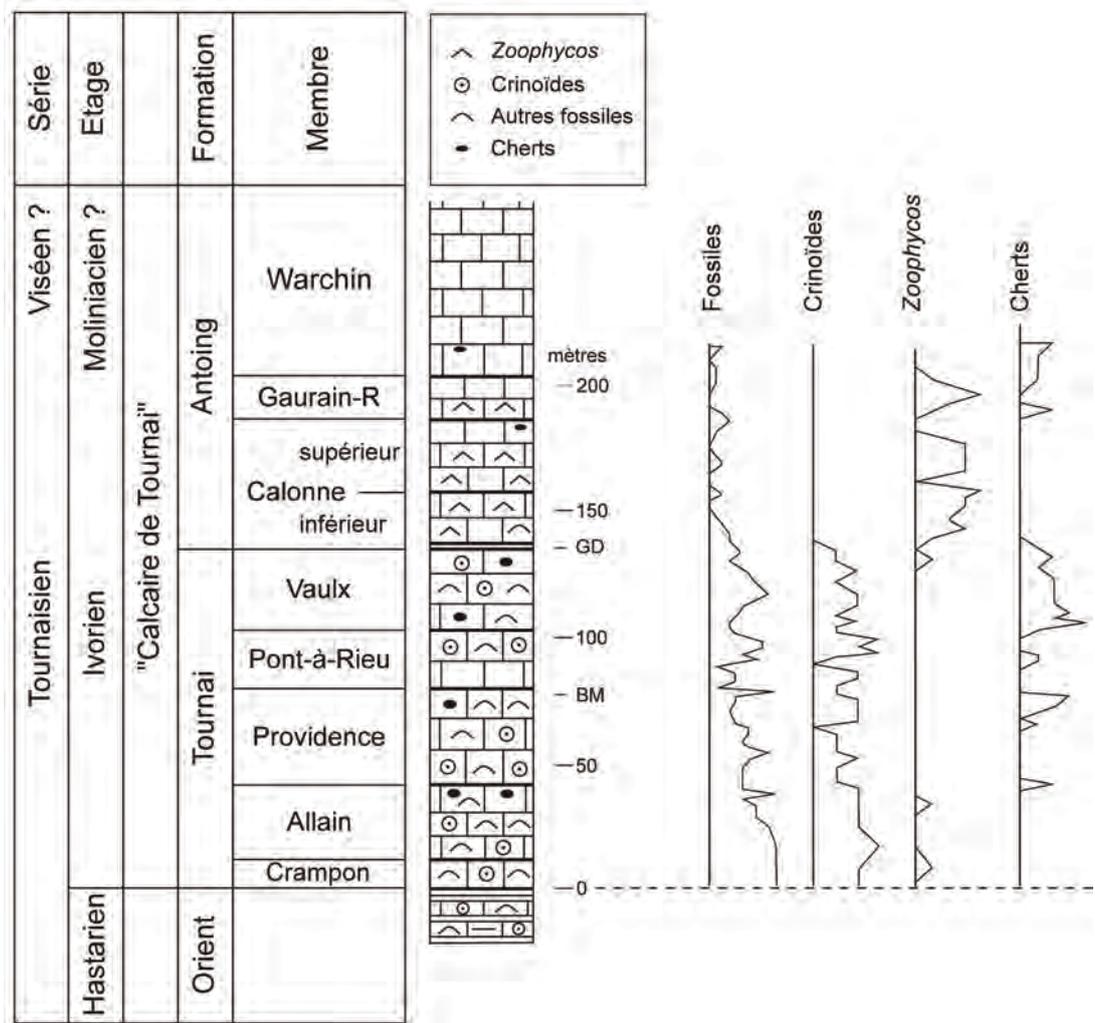


Fig. 72

Synthèse stratigraphique du « Calcaire de Tournai » (d'après HENNEBERT & DOREMUS, 1997, p. 12, fig. 2). GD : Gras Délit, BM : Banc à Moulés.

pierre calcaire affleurant dans la vallée de l'Escaut, entre Tournai et Antoing, a été de tout temps l'objet d'une importante extraction. Il y a de nombreuses preuves de son utilisation dans le Tournaisien depuis l'époque gallo-romaine, tant comme pierre de taille que comme pierre à chaux (CAMERMAN, 1944). La dernière carrière produisant des pierres de construction était la carrière Lemay (fig. 71). De nos jours, la pierre est exclusivement exploitée pour la production de ciment et de granulats. Autrefois, la pierre a également été extraite à Tournai même. La tradition veut d'ailleurs que la cathédrale ait été bâtie avec des pierres tirées de son propre sol (ROLLAND, 1944).

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 m (HANCE, POTY & DEVUYST, 2006). Il peut être divisé en deux formations : la Formation de Tournai (partie inférieure) et la Formation d'Antoing (partie supérieure), la limite entre l'une et l'autre correspondant au sommet du « Gras Délit »<sup>5</sup> (fig. 72). Tous ces sédiments calcaires d'origine marine se sont déposés sous forme d'une succession cyclique de bancs au Tournaisien (période Carbonifère), il y a près de 350 millions d'années. Les sédiments étaient déjà complètement lithifiés lors de l'orogénèse varisque vers la fin du Carbonifère, il y a environ 300 millions d'années. La structuration postérieure,

<sup>5</sup> Il s'agit d'un niveau d'argilite, de quelques centimètres d'épaisseur, qui constitue un excellent repère stratigraphique dans tout le gisement carrier du Tournaisien (HENNEBERT & DOREMUS, 1997 ; HENNEBERT, 2012).

rendant accessibles les bancs calcaires dans les environs de Tournai, s'est produite vers la fin du Crétacé inférieur, il y a ca 100 millions d'années.

Les bancs de pierre de Tournai présentent d'ordinaire des croûtes d'aspect schisteux jusqu'à quelques centimètres d'épaisseur. Il s'agit de croûtes superficielles, et parfois de croûtes intermédiaires, qui sont toujours gélives. Pour bien faire, les pierres de taille doivent donc être soigneusement débarrassées de ces croûtes pour ne garder que le cœur ou le noyau du banc. De manière générale, la pierre de Tournai, même provenant de bancs non gélifs, ne doit pas être placée en délit à l'extérieur. Cette disposition favorise le processus de dégradation et la pierre se fissure ou s'écaille fréquemment (CAMERMAN, 1944 ; GÉRARD & GUYON DE MONTLIVAUT, 1986).

La pierre de Tournai est un calcaire impur, la teneur moyenne en calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) n'étant que de 78 % en poids. Une caractéristique générale de la pierre est son imprégnation de silice ( $\text{SiO}_2$ ) microcristalline ( $\pm 12\%$ ) et la présence d'argile ( $\pm 8\%$ ) (CAMERMAN, 1944), cette dernière étant plus abondante dans les croûtes que dans le noyau. La pierre de Tournai est ainsi qualifiée de calcaire argilo-siliceux. On y retrouve également sous forme de traces, de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), de la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) et de la matière organique (responsable de la coloration foncée de la pierre).

## 2.2 La pierre des portails romans

La pierre de Tournai utilisée pour les portails romans est très finement grenue, peu fossilifère, ne contient pas de crinoïdes et ne renferme pas de cherts (les « carbonniaux » des anciens carrières). L'ensemble de ces caractéristiques permet de restreindre au Membre de Calonne la provenance des bancs de pierre employés (fig. 72). 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 (CAMERMAN, 1944 ; NYS, 1993). Anciennement dénommé « Marbre de Calonne », on fait aujourd'hui référence à ces matériaux sous l'appellation de « Noir de Tournai » (PMW, 2004 ;

GROESSENS, 2008). Le Noir de Tournai est considéré comme gélif par le Centre Scientifique et Technique de la Construction (GÉRARD & GUYON DE MONTLIVAUT, 1986).

Dans les portails romans de la cathédrale, le noyau des bancs est généralement assez compact et en meilleur état. Les bords sont davantage dégradés et présentent souvent un aspect schisteux (fig. 73-74). Ceci suggère que les croûtes de part et d'autre du noyau n'ont pas été suffisamment éliminées, sans doute pour obtenir des blocs à sculpter de plus grand format.



Fig. 73

Claveau de la voussure trilobée avec bordures schisteuses bien visibles (porte du Capitole). Pose selon le lit de carrière (bloc n° 9 de la voussure trilobée).

© IRPA-KIK, Bruxelles



Fig. 74

Claveau de la voussure trilobée avec bordures schisteuses bien visibles (porte du Capitole). Pose en délit avec lit en joint (bloc n° 20 de la voussure trilobée).

© IRPA-KIK, Bruxelles

### 3. MODE DE MISE EN ŒUVRE

Les blocs des portails ne sont pas tous posés de la même manière. Trois types de pose peuvent être reconnus sur base de l'orientation du litage :

- selon le lit de carrière (fig. 73),
- en délit avec lit en joint (fig. 74),
- en délit avec lit en face, c'est-à-dire parallèle au parement (fig. 75-76).

Le mode de mise en œuvre de chaque bloc est représenté aux figures 77-78. Vu le remplacement par de la pierre bleue au 19<sup>e</sup> 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.

La pose en délit avec lit en face est toujours défectueuse car elle favorise le délitage de la pierre (fig. 76). Sans surprise, ce sont les blocs placés de cette façon qui sont bien souvent les plus dégradés, la perte de matériau — parfois pluri-centimétrique — entraînant la disparition progressive des reliefs sculptés (fig. 77-78). 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 ceux 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). Dans le cas d'un mode de mise en œuvre avec lit en joint, le type d'altération rencontré autour du noyau est un délitage couplé à une fragmentation en esquilles (fig. 73-74), selon la terminologie du glossaire ICOMOS-ISCS (2008).

### 4. DEGRÉ D'EXPOSITION

De par son orientation globale sud-ouest, la porte du Capitole est naturellement exposée à l'action de la pluie battante et du soleil. Ceci permet d'expliquer pourquoi la dégradation y est nettement plus avancée qu'à la porte Mantile. La comparaison entre portails de l'état de conservation des écoinçons sous tympan parle d'elle-même (fig. 75-76). De façon générale, les parties saillantes des sculptures, telles que têtes, etc., ont été perdues. Quant aux croûtes noires, elles se sont développées sur les zones abritées de la pluie battante et du ruissellement. Enfin, l'état de conservation désastreux du cordon-larmier de la porte Mantile ainsi que son orientation nord-est ont entraîné le développement d'une colonisation biologique non négligeable.

### 5. EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE

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 Tournai (VAN WELDEN, 1965 ; DINGELSTADT



Fig. 75

Écoinçon sous tympan posé en délit avec lit en face. État de conservation à la porte Mantile.

© IRPA-KIK, Bruxelles



Fig. 76

Écoinçon sous tympan posé en délit avec lit en face. État de conservation à la porte du Capitole [les trous ont été laissés par les mesures de résistance au micro-forage].

© IRPA-KIK, Bruxelles



Fig. 77

Porte du Capitole. Cartographie du mode de mise en œuvre des blocs originaux. L'orientation des hachures montre le litage, les hachures croisées indiquant la pose en délit avec lit en face (bleu = interventions postérieures). Les cartographies détaillées de l'état de conservation des portails romans sont présentées dans l'article de L. Hoornaert (voir infra).

Réalisation : Lieselote Hoornaert (IRPA).

& DREESEN, 1996). La pierre peut être classée géologiquement comme un *wackestone* bioclastique (selon la nomenclature de Dunham) et comme une biomicrorite (selon la nomenclature de Folk et la norme NBN EN 12670, 2002). Les lames minces réalisées dans les noyaux des bancs révèlent que la pierre est encore en 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 microfissures, dont les ramifications s'intensifient vers la surface

extérieure (fig. 79). L'orientation globale des fissures suit le litage. Certaines d'entre elles présentent un angle allant jusqu'à 45° avec le litage. Il en résulte la formation d'esquilles, également visibles à l'œil nu. 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 (GÉRARD & GUYON DE MONTLIVAUT, 1986 ; PMW, 2004 ; DUSAR, DREESEN & DE NAEYER, 2009).

Fig. 78

Porte Mantile.  
Cartographie du mode de mise en œuvre des blocs originaux. L'orientation des hachures montre le litage, les hachures croisées indiquant la pose en délit avec lit en face (bleu = interventions postérieures). Les cartographies détaillées de l'état de conservation des portails romans sont présentées dans l'article de L. Hoornaert (voir infra).

Réalisation : Lieselote Hoornaert (IRPA).

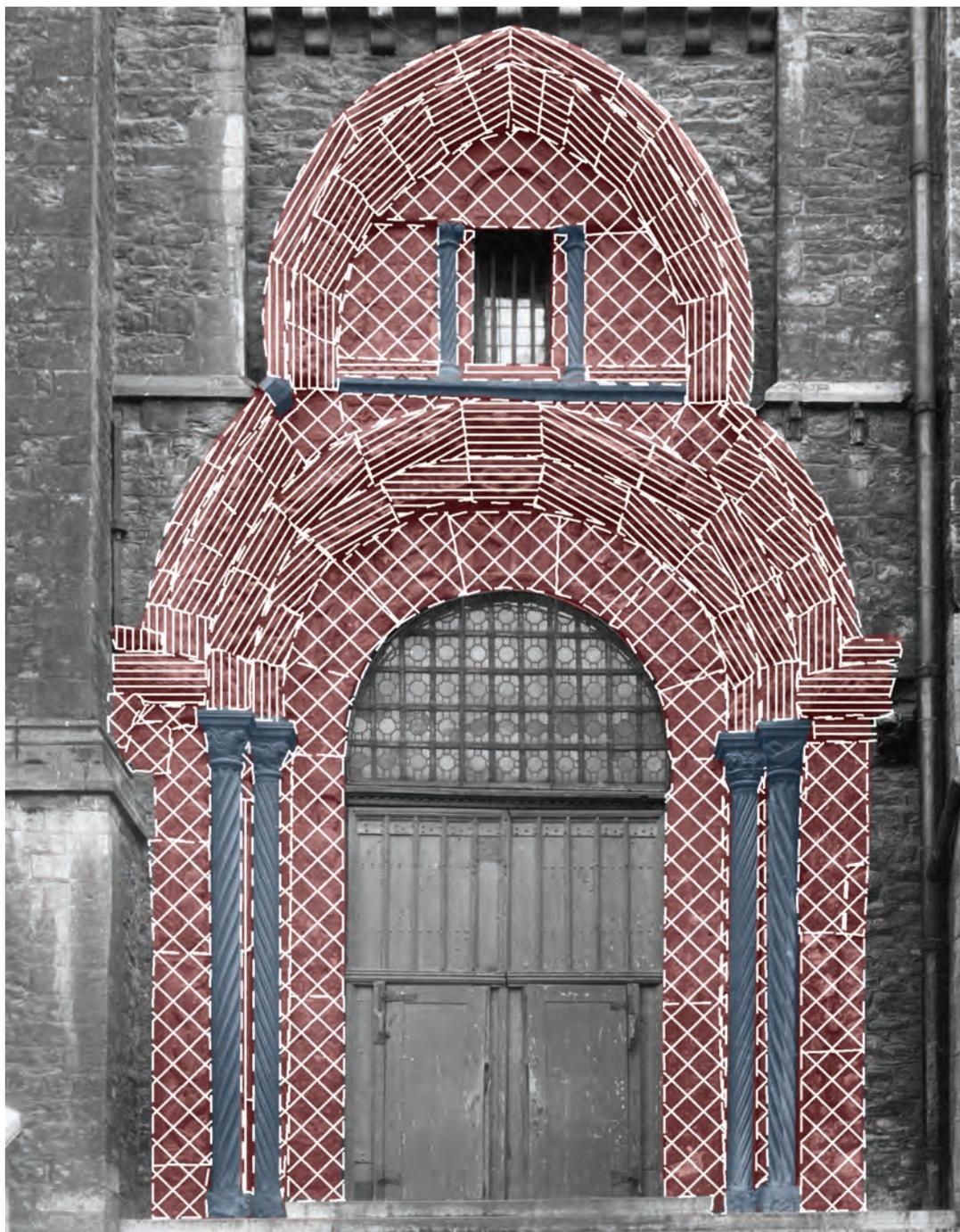


Fig. 79

Microphotographie d'une lame mince réalisée au niveau d'un bord de banc (lumière naturelle). À gauche, l'ouverture de la plus grande microfissure fait près de 200 µm.

Le réseau de microfissures est plus développé du côté extérieur de la pierre (à droite), favorisant ainsi la formation d'esquilles (porte du Capitole, claveau n° 25 de la voussure trilobée).



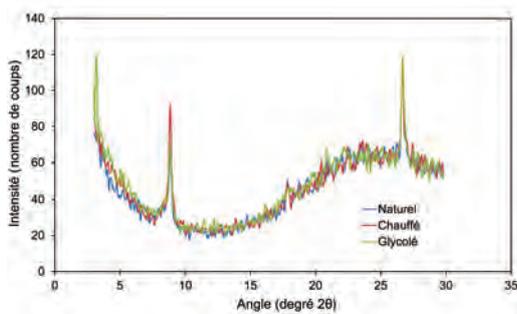
## 6. IDENTIFICATION DES ARGILES

Classiquement, sur base des études menées par Carl Camerman dans les années 1940, le phénomène de fissuration responsable de la sensibilité au gel de certains bancs de pierre de Tournai serait lié à l'abondance et à la répartition des minéraux argileux (CAMERMAN, 1944 ; GÉRARD & GUYON DE MONTLIVAUT, 1986).

Afin de déterminer le(s) type(s) d'argile et l'éventuelle présence d'argiles gonflant au

contact de l'eau, des mesures de diffraction des rayons X ont été réalisées par l'Université de Namur (Département de géologie) sur la fraction argileuse de plusieurs fragments de pierre. La préparation des échantillons a été réalisée selon le protocole de T. Holtzapffel (1985). Chaque échantillon a fait l'objet de trois traitements distincts : (1) traitement naturel, (2) traitement par chauffage et (3) traitement par saturation à l'éthylène-glycol, les deux derniers engendrant des modifications diagnostiques de l'espacement interfoliaire dans le cas d'argiles gonflantes. Les résultats d'analyse sont tous très comparables. Un exemple de diagramme obtenu est présenté à la figure 80. La position des deux pics visibles n'est pas modifiée par le type de traitement, ce qui indique la présence d'argile non-gonflante<sup>6</sup>. Les pics à 10 Å (8,85°2θ) et 3,33 Å (26,69°2θ) sont caractéristiques de l'illite dont la formule simplifiée est  $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ . L'absence quasi totale de pic à 5 Å suggère qu'il s'agirait d'illite contenant du fer (ESQUEVIN, 1969), résultat logique pour un calcaire marin à diagenèse profonde.

La dégradation de la pierre ne s'explique donc pas par un gonflement cristallin des particules argileuses, c'est-à-dire par absorption de molécules d'eau dans l'espace interfoliaire, puisque le déficit de charge structural de l'illite est occupé par des ions potassium qui ne sont pas échangeables, ou du moins très difficilement. En concertation avec les spécialistes de l'ETH Zürich, il a donc été conclu qu'un autre mécanisme devait entrer en ligne de compte pour expliquer la dégradation de la pierre :



<sup>6</sup> L'absence d'argiles gonflantes (telles que smectites) paraît logique vu qu'elles sont plutôt caractéristiques des roches cénozoïques et non des roches paléozoïques ayant subi une orogénèse, comme c'est le cas du Calcaire de Tournai.

le gonflement osmotique interparticulaire, c'est-à-dire l'adsorption de molécules d'eau sur les surfaces externes des particules argileuses afin de contrebalancer la concentration en ions liés électrostatiquement à la surface de celles-ci (STEIGER & CHAROLA, 2011, p. 239).

Sachant que l'argile présente est de nature illitique, il devient alors possible de quantifier sa répartition dans un banc de pierre de Tournai, à partir des teneurs moyennes en alumine ( $Al_2O_3$ ) mentionnées dans l'étude de Camerman (1944) et ce, en supposant que l'entièreté de celle-ci est contenue dans le réseau cristallin de l'illite. La teneur recalculée en illite dans le noyau serait ainsi de l'ordre de 5 % en poids (2 % d'alumine), pour environ 10 % au niveau des croûtes (4 % d'alumine).

## 7. RÉSISTANCE AU MICRO-FORAGE

Afin de caractériser l'état de dégradation de la pierre sous la surface, une trentaine de mesures de résistance au micro-forage a été réalisée au moyen d'un appareil DRMS (*Drilling Resistance Measurement System*). Ce type de mesure permet d'obtenir un profil de résistance de la pierre en profondeur, les zones de moindre résistance correspondant aux parties dégradées.

Il est important de mentionner ici deux limitations techniques de l'appareil. D'une part, la résolution du pas de mesure étant d'un dixième de millimètre (100 μm), seules les fissures plus grandes (≥ 600 μm en pratique) pourront être détectées. Les microfissures visibles en microscopie optique (fig. 79) sont donc virtuellement gommées ou bien provoquent, si elles sont groupées, une diminution significative de la résistance au micro-forage. D'autre part, le profil obtenu est bien souvent limité à 3 cm pour les mesures in situ, empêchant de se prononcer sur l'état de dégradation de la pierre plus en profondeur.

Fig. 80

Diffractogramme sur la fraction argileuse (particules inférieures à 2 μm) d'un fragment de pierre (porte du Capitole, claveau n° 25 de la voussure trilobée). Analyse réalisée par le Département de géologie de l'UNamur.

L'exemple de deux mesures réalisées dans un bloc posé selon le lit de carrière (fig. 81) montre que la résistance au micro-forage est sensiblement plus élevée dans le noyau de la pierre que dans le bord, plus argileux. Une fissure est détectée dans le noyau à environ 7 mm sous la surface, alors qu'aucune fissure ne l'est dans le bord. Toutefois, les valeurs de résistance nettement plus faibles du bord, enregistrées au niveau des 7 premiers millimètres, suggèrent la présence de nombreuses microfissures rapprochées. Un profil obtenu sur un bloc posé en délit avec lit en face met bien en évidence l'alternance répétée d'esquilles et de fissures sur toute l'épaisseur recoupée (fig. 82).

Fig. 81

Profils de résistance au micro-forage : vert = noyau du banc, bleu = bord du banc (bloc posé selon le lit de carrière, porte du Capitole, claveau n° 15 de la voussure trilobée).

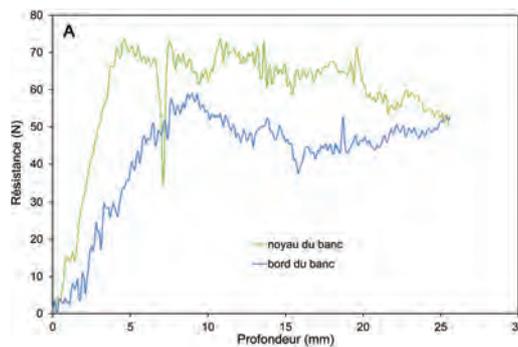


Fig. 82

Profil de résistance au micro-forage : pose en délit avec lit en face (bloc de droite du tympan, porte Mantile).

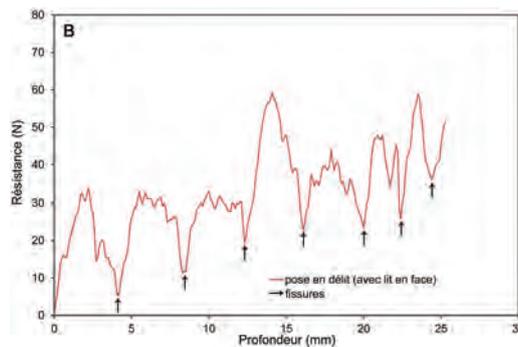


Fig. 83

Illustration de la méthode de mesure de la vitesse du son (cordon-larmier de la porte Mantile).



Plusieurs constats peuvent être tirés sur base de 12 mesures réalisées sur des blocs placés en délit avec lit en face, présentant des degrés de fragmentation divers : (1) 64 fissures sont recensées au total, ce qui représente une moyenne d'environ 5 fissures par profil, soit une fissure tous les 6 mm ; (2) le nombre maximum de fissures détectées sur un profil est de 12, soit une fissure tous les 2,5 mm ; et (3) dans 2/3 des cas (8 profils sur 12), la présence de fissures est détectée sur l'entièreté de l'épaisseur recoupée, soit sur au moins 3 cm. Cinquante pourcents des fissures ont une ouverture comprise entre 1 et 2,5 mm, les plus petites fissures détectées étant de 0,6 mm, la plus grande atteignant 6 mm (ce qui entre déjà dans le domaine des vides).

## 8. MODULE D'ÉLASTICITÉ

Le module d'élasticité dynamique est une indication de la résistance mécanique de la pierre. Il a été quantifié avec un appareil qui permet de mesurer le temps de propagation d'une onde sonore à travers le matériau (appareil de type *Steinkamp* ; fig. 83). Le temps nécessaire au signal pour passer d'une face à l'autre doit être divisé par la distance à parcourir pour obtenir la vitesse de propagation  $V$  (m.s<sup>-1</sup>). Le module d'élasticité dynamique  $E_{\text{dyn}}$  (GPa) est calculé au moyen de la formule suivante :

$$E_{\text{dyn}} = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

où  $\rho$  est la densité (kg/m<sup>3</sup>) et  $\nu$  le coefficient de Poisson (par défaut 0.20) (SIEGSMUND & DÜRRAST, 2011). En plus des mesures réalisées directement sur les blocs des portails, plusieurs références ont été mesurées comme base comparative : (1) des blocs originaux du parement du transept nord, (2) de nouveaux blocs, sciés et taillés par l'entrepreneur et prêts à être insérés dans le parement sud de la nef (chantier en cours d'exécution durant cette recherche), et (3) de petits échantillons parallélépipédiques découpés dans des blocs originaux mis au rebut lors de la restauration actuelle de la nef. Ces derniers ont également été utilisés dans le cadre des mesures d'absorption et de dilatation.

Plusieurs constats d'ordre général peuvent être tirés des mesures sur les blocs pris comme référence. Tout d'abord, le module d'élasticité est nettement plus élevé en direction parallèle au litage (48 GPa en moyenne) qu'en direction perpendiculaire (30 GPa en moyenne). Ceci s'explique par la microstructure de la pierre : quand l'onde passe parallèlement au litage, elle emprunte le milieu le plus rapide, c'est-à-dire la matrice calcitique du noyau. Par contre, si la propagation de l'onde est perpendiculaire au litage, les lamines argileuses sont autant de discontinuités qui devront être traversées à moindre vitesse. Deuxièmement, la propagation des ondes est plus lente si une des faces est taillée, l'emploi du ciseau ayant sans doute provoqué une microfissuration superficielle. La diminution apparente du module d'élasticité peut ainsi varier de 20 à 50 %. Enfin, les nouveaux blocs présentent d'ordinaire un module d'élasticité plus élevé que les blocs originaux. L'exposition pluriséculaire aux intempéries en fournit l'explication, bien que des différences en termes de provenance (lieu d'extraction et/ou niveau stratigraphique) ne soient pas à exclure.

Les mesures in situ sur les portails révèlent que la plupart des blocs sculptés présente des valeurs de module d'élasticité très faibles comparativement aux blocs de référence. Bien qu'il soit certain que les pierres sculptées proviennent de niveaux stratigraphiques différents des pierres de construction, et notamment de bancs plus riches en argile qui se laissent tailler plus facilement, de telles valeurs montrent le caractère très dégradé de la pierre. En outre, si les surfaces taillées à plat contiennent des

microfissures affaiblissantes, cela est d'autant plus vrai pour les blocs sculptés sur plusieurs faces. Les différences de qualité entre blocs, pris individuellement, sont très prononcées et grandement déterminées par l'état de conservation. Les valeurs obtenues varient sur 5 ordres de grandeur, d'une roche dure à une roche très friable (tabl. 1).

## 9. MESURES D'ABSORPTION

### 9.1. Absorption capillaire (eau liquide)

Vu la porosité très faible de la pierre (de l'ordre du pourcent), on peut s'attendre à une absorption capillaire peu importante, du moins en valeur absolue. Néanmoins, sa responsabilité supposée dans le mécanisme de dégradation justifie une quantification détaillée. Pour mesurer le coefficient d'absorption, 8 échantillons parallélépipédiques (2 × 2 × 4 cm) ont été soumis à un essai d'absorption capillaire unidirectionnelle (4 présentant un allongement parallèle au litage et 4 un allongement perpendiculaire). Les échantillons ont été prélevés sur différents blocs afin d'obtenir une gamme de degrés d'altération aussi représentative que possible. L'absorption se fait verticalement à travers la surface basale des échantillons, mise en contact avec de l'eau désionisée. Pour les besoins de l'essai, les faces latérales des échantillons ont été enrobées de ruban adhésif. L'augmentation de masse a été suivie pendant 32 heures. Les courbes moyennes sont représentées dans la figure 84. Il en ressort que l'absorption parallèle au litage est

État de conservation	$E_{dyn}$ typique (GPa)	Pourcentage (n = 17)
Bon état général	50-100	12 (2 mesures)
Relativement bon état avec quelques fines fissures	2-15	41 (7 mesures)
Fortement dégradé	0,001-2	47 (8 mesures)

Tabl. 1

Valeurs typiques du module d'élasticité dynamique de la pierre de Tournai des portails. Les mesures ont été réalisées après plusieurs jours sans pluie, de manière à limiter autant que possible l'effet de l'eau d'imprégnation.

beaucoup plus importante que l'absorption perpendiculaire ; les coefficients étant respectivement 2,7 et 0,6  $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$ . Compte tenu des grandes variations entre échantillons des deux groupes et de la longue durée de l'essai, il est difficile de poursuivre les mesures jusqu'à saturation. Cependant, les résultats de deux mesures permettent d'estimer la saturation capillaire de la pierre entre 1,7 et 3,2 % en volume.

L'absorption a également été mesurée sur les blocs en pierre de Tournai des portails mêmes avec la méthode de la pipe de Karsten. Il s'agit de fixer à la pierre une sorte de cylindre gradué et de le remplir d'eau. L'eau est ainsi absorbée par capillarité via la surface de contact ronde (fig. 85). L'observation du déroulement des essais permet de distinguer

clairement deux modes d'absorption, selon l'orientation du litage de la pierre. Si l'absorption parallèle au litage (fig. 85) est généralement plus élevée que l'absorption perpendiculaire, le critère dominant reste cependant l'état de dégradation. Pour les mesures réalisées parallèlement au litage, le coefficient d'absorption varie entre 6 (bon état) et 84  $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$  (fortement dégradé).

## 9.2. Absorption d'humidité ambiante (hygroscopicité)

En plus de l'absorption par contact direct avec l'eau liquide, la pierre absorbe l'humidité de l'environnement (absorption hygroscopique). Dans le cas de la pierre de Tournai, ce processus est amplifié par la présence des particules argileuses. Pour le quantifier, les mêmes échantillons parallélépipédiques ont été exposés, après séchage, à une humidité relative (HR) de 95 % dans une enceinte climatique à 20 °C et pesés après 28 jours. La teneur en eau hygroscopique mesurée est de 0,6 % en poids, ce qui correspond à un pourcentage volumique de 1,58 %. Un tel pourcentage représente une proportion appréciable de la teneur maximale en eau capillaire (pour rappel : 1,7 à 3,2 %, voir point précédent).

Nous avons trouvé que l'absorption hygroscopique est inversement proportionnelle au module d'élasticité, la teneur en argile de la pierre favorisant l'absorption hygroscopique et diminuant de ce fait le module d'élasticité. Le rôle de la pyrite finement disséminée dans la pierre, susceptible de former par oxydation des oxydes de fer et des sulfates, paraît ici négligeable. Bien qu'en théorie la formation de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dans les pierres calcaires puisse contribuer à diminuer le module d'élasticité suite aux pressions de cristallisation et à l'augmentation de l'absorption hygroscopique, la faible quantité de pyrite présente — moins de 1 % en poids (DUSAR, DREESEN & DE NAEYER, 2009) — et les observations microscopiques, indiquent qu'il doit s'agir d'un phénomène assez limité sans effet notable.

Fig. 84

Courbes moyennes d'absorption capillaire, chacune basée sur 4 mesures.

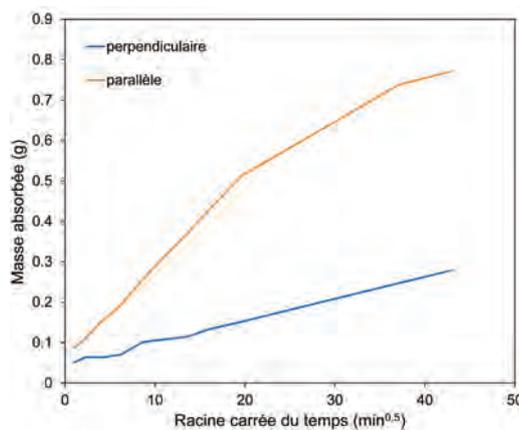


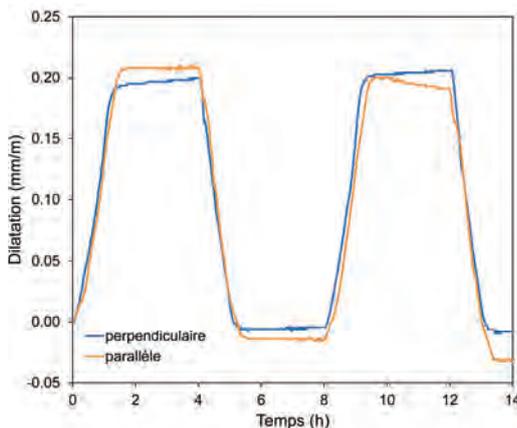
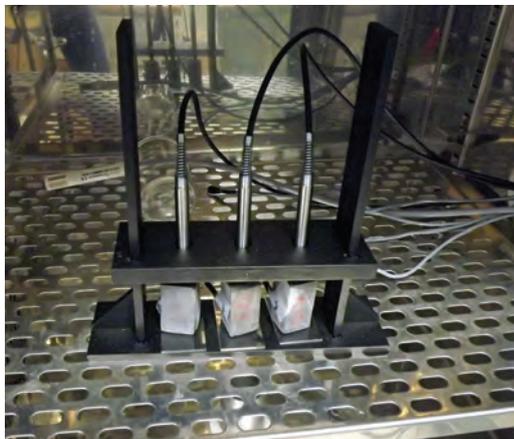
Fig. 85

Essai d'absorption capillaire avec la pipe de Karsten. L'aurole suit clairement l'orientation du litage (cordon-larmier de la porte Mantile).



## 10. MESURES DE DILATATION

De manière générale, les matériaux pierreux subissent des variations dimensionnelles lorsqu'ils sont soumis à un changement de température, d'humidité relative ou en cas de contact avec l'eau (BIGAS & MARTINET, 2009 ; SIEGSMUND & DÜRRAST, 2011). Ce comportement peut être plus marqué dans certaines directions pour les matériaux anisotropes, comme la pierre de Tournai. Compte tenu de leur emplacement dans un édifice, la dilatation des blocs des portails peut causer d'importantes contraintes menant au développement de fissures. Pour mesurer l'influence de la température, de l'humidité relative et de l'eau liquide sur la dilatation de la pierre, un dilatomètre a été conçu et réalisé en *Invar*, un alliage métallique peu sensible aux changements de température (fig. 86). Les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique et leur déformation a été mesurée à l'aide de capteurs de très haute résolution (0,20 µm).



### 10.1 Dilatation thermique

Les résultats des cycles thermiques de 10 à 60 °C montrent que la déformation est réversible et qu'il n'y a pas de différences fondamentales selon l'orientation du litage (fig. 87).

Dans l'optique de compenser la déformation du dispositif en *Invar* mais surtout celle des capteurs mêmes, une correction des mesures s'est avérée indispensable. Les paramètres de correction ont été calculés sur base d'une calibration réalisée avec du verre de quartz, matériau reconnu pour sa dilatation exceptionnellement basse. Après correction, un coefficient de dilatation thermique de  $5,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  a pu être déterminé, valeur normale pour des pierres calcaires (SIEGSMUND & DÜRRAST, 2011).

### 10.2 Dilatation hygrique

La déformation sous l'influence des variations d'humidité relative (HR) du milieu, appelée dilatation hygrique, a été mesurée au cours de cycles journaliers de 40 à 80 % d'HR et lors d'un choc hygrique de 95 à 40 % d'HR. Les résultats des cycles hygriques (fig. 88) montrent une augmentation de l'amplitude de dilatation du premier au deuxième cycle ainsi qu'une légère différence selon l'orientation du litage, un litage perpendiculaire à la direction de mesure entraînant une dilatation légèrement plus haute. Le nombre d'essais réalisés est cependant trop faible pour être statistiquement représentatif. Il est intéressant de noter que la dilatation suit l'augmentation de l'HR avec un retard d'à peu près 5 heures, tandis que le séchage se fait nettement plus rapidement.

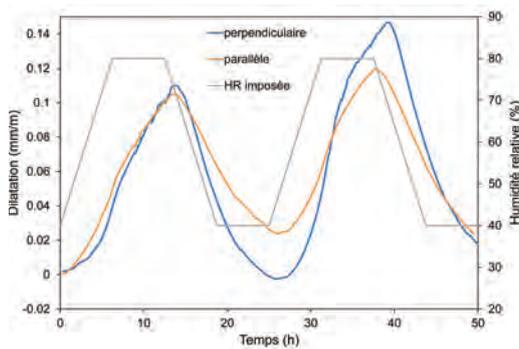


Fig. 86

Le dilatomètre avec 3 échantillons, placé dans une enceinte climatique.

Fig. 87

Courbes moyennes de dilatation thermique pendant les cycles de 10 à 60°C.

Fig. 88

Courbes de cycles hygriques à humidité relative (HR) imposée. Chaque courbe représente la moyenne de 2 mesures.

Les résultats d'un choc hygrique sont représentés dans la figure 89. Le conditionnement de longue durée (56 jours) à 95 % d'HR a conduit à une saturation presque complète de la pierre. Dans le cas d'un choc hygrique, l'orientation du litage est déterminante et les valeurs du rétrécissement sont beaucoup plus élevées que pour les cycles journaliers. À nouveau, le nombre d'essais réalisés est cependant trop faible pour être statistiquement représentatif.

### 10.3 Dilatation hydrique

Les essais de dilatation hydrique ont été réalisés dans un récipient en acier inoxydable, les échantillons ayant été fixés sur un dispositif légèrement surélevé. Ce système permet de remplir d'eau (ou de vider) le récipient, tout en continuant les mesures. La figure 90 présente des résultats de dilatation hydrique dans le sens perpendiculaire au litage. La dilatation se fait très lentement (il faut près de 3 jours pour atteindre un quasi-équilibre) et la déformation est largement réversible, sauf pour un échantillon. Dans ce cas particulier, l'apparition d'une fissure en début d'essai a provoqué une

déformation irréversible. Ce phénomène de fissuration induite pendant l'absorption d'eau a également été observé sur d'autres échantillons, ce qui montre la fragilité actuelle de la pierre des portails.

Une série d'essais a également été exécutée indépendamment à l'ETH Zürich. La mise en commun des résultats permet de disposer de résultats significatifs pour la dilatation hydrique (tabl. 2). Il est clair que c'est le contact avec l'eau sous forme liquide qui provoque la dilatation la plus importante et que celle-ci présente une forte anisotropie selon l'orientation du litage. Les valeurs de dilatation hydrique sont très élevées pour une pierre calcaire et sont plutôt comparables à celles d'un grès argileux ou d'une ardoise (SIEGSMUND & DÜRRAST, 2011).

## 11. CONCLUSIONS ET MESURES DE PROTECTION

Les portails romans de la cathédrale Notre-Dame de Tournai ont été réalisés en Marbre de Calonne (Noir de Tournai), un matériau local se prêtant bien au façonnage mais sensible au gel (et donc plutôt à réserver aux applications intérieures).

Si le mauvais état de conservation des portails peut être partiellement expliqué par la nature même de la pierre calcaire utilisée (présence de fins lits argileux à l'origine du litage), la dégradation a été amplifiée par :

- le recours fréquent à la pose en délit avec lit en face — mode de mise en œuvre défectueux favorisant la perte de matériau par délitage ;
- l'utilisation de blocs dont les croûtes schisteuses, gélives, paraissent avoir été insuffisamment éliminées, sans doute afin de disposer de blocs à sculpter de plus grande dimension.

Le meilleur état de conservation manifeste de la porte Mantile s'explique surtout par sa situation abritée des vents dominants et donc de l'action de la pluie battante.

Fig. 89

Courbes de rétrécissement hygrique en conditions de laboratoire ( $40 \pm 5$  % d'HR à  $20 \pm 2$  °C) après conditionnement à 95 % d'HR. La courbe bleue est la moyenne de 2 échantillons.

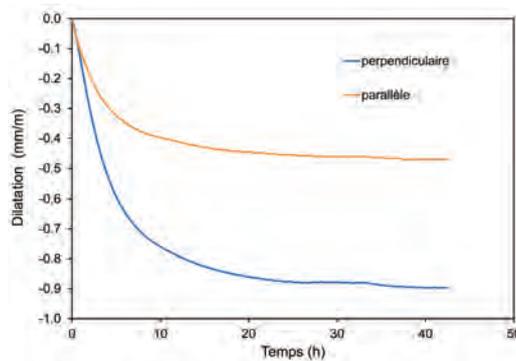
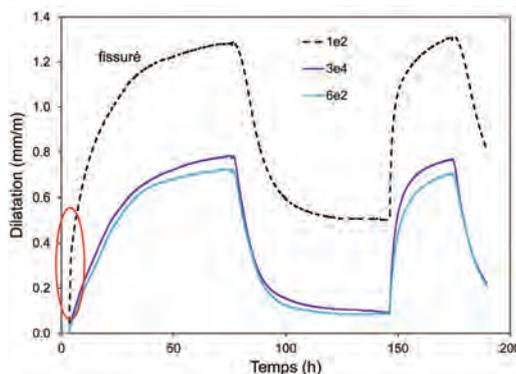


Fig. 90

Cycles hydriques de 3 échantillons dans le sens perpendiculaire au litage. Un échantillon (1e2) s'est fissuré au début de l'essai.



	Dilatation perpendiculaire (mm/m)	Dilatation perpendiculaire (mm/m)
Moyenne	0,97	0,3
Déviatation standard	0,28	0,14
Nombre d'échantillons	4	5

Tabl. 2

Résultats des mesures de dilatation hydrique. 5 analyses ont été réalisées par l'ETH Zürich.

La dilatation par contact direct avec l'eau liquide a été identifiée comme le principal moteur de la dégradation, l'amplitude de la déformation anisotrope étant trois fois plus importante dans le sens perpendiculaire au litage. Les changements d'humidité relative et de température entraînent une dilatation nettement moins prononcée (sauf en cas de choc hygrique où l'amplitude de la déformation est comparable à la dilatation hydrique). Le gonflement osmotique induit par la présence des particules argileuses illitiques est en grande partie responsable de la forte dilatation hydrique, la texture orientée planaire de ces particules expliquant la déformation moins marquée dans le sens parallèle au litage.

Réversibles au départ, les variations répétées de volume des blocs, innombrables durant près d'un millénaire, ont provoqué un effet de fatigue inexorable comme en témoignent les nombreuses (micro)fissures constatées. En augmentant de manière exponentielle la surface d'absorption de la pierre, elles contribuent au développement de l'altération tout en diminuant progressivement sa résistance mécanique. La stabilité des portails est ainsi fragilisée, certaines cassures et déplacements de blocs pouvant être attribués au tassement. L'effet des cycles gel-dégel n'a pas été abordé directement dans le cadre de cette étude, mais il est évident qu'il joue un rôle aggravant dans le processus de fragmentation de la pierre.

Les résultats de cette étude montrent que les mesures de protection à prendre doivent contribuer à limiter efficacement l'influence des facteurs climatiques, et principalement le contact direct avec l'eau (pluie, ruissellement, infiltration et condensation). Néanmoins, ces mesures ne permettent pas de renverser la situation et de rendre toute leur cohérence aux pierres dégradées.

Pour la porte Mantile, la mise en place d'un auvent (protection contre la pluie, le soleil direct et le rayonnement infrarouge), ou mieux, d'un abri fermé régulant l'humidité relative et offrant une protection supplémentaire au soleil indirect, paraît réalisable en pratique. Ceci permet d'éviter d'autres interventions plus radicales sur le matériau authentique, telles que le remplacement du cordon-larmier. Toutefois, l'impact visuel moins important d'un auvent le fera peut-être préférer à un abri fermé, compte tenu de considérations d'ordre esthétique. Sans l'un de ces aménagements, le remplacement intégral du cordon-larmier de la porte Mantile devra être envisagé, son état de dégradation ruinant sa fonction protectrice.

Quant à la porte du Capitole, la plus fortement dégradée, comment sauver ce qui peut l'être encore ? Placer un auvent ou un abri fermé ? Ou bien démonter, mettre en musée les quelques reliefs encore bien lisibles et remplacer ? Par quoi ? Un choix à éclairer d'une réflexion de fond entre décideurs et experts.

## REMERCIEMENTS

Cette recherche est le fruit d'une collaboration étroite entre le Laboratoire des Monuments et l'Atelier Sculpture en pierre de l'Institut royal du Patrimoine artistique (Bruxelles). Les auteurs tiennent à remercier le Docteur J. Yans et G. Rochez (Département de géologie, UNamur) pour les analyses diffractométriques et les Docteurs T. Wangler et R. Flatt (ETH Zürich) pour les mesures de dilatation hydrique. Merci à eux pour les discussions fructueuses dans le cadre de cette étude.

## BIBLIOGRAPHIE

- BIGAS J.-P. & MARTINET G. (dir.), 2009. *Pierre et Patrimoine : Connaissance et conservation*, Actes Sud, 214 p.
- CAMERMAN C., 1944. *La pierre de Tournai : son gisement, sa structure et ses propriétés, son emploi actuel*, Bruxelles (Mémoires de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie, Nouvelle série in-4°, 1), p. 186.
- DINGELSTADT C. & DREESEN R., 1996. *Atlas pétrographique des principales roches calcaires et roches calcaires gréseuses utilisées dans les monuments de Wallonie*, Liège, rapport inédit.
- DUSAR M., DREESEN R. & DE NAEYER A., 2009. *Renovatie & restauratie : Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden*, Kluwer, 562 p.
- ESQUEVIN J., 1969. Influence de la composition chimique des illites sur leur cristallinité, *Bulletin du Centre de Recherche de Pau – SNPA*, 3, p. 147-154.
- GÉRARD R. & GUYON DE MONTLIVAUT F., 1986. *Les roches et les minéraux. Annexe 1 : La pierre de Tournai*, Bruxelles, Centre Scientifique et Technique de la Construction (Note d'information technique, 163.1), 12 p.
- GROESSENS É., 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 tournaisienne de géologie, préhistoire et archéologie*, X, 7, p. 197-216.
- HANCE L., POTY E. & DEVUYST F.-X., 2006. Tournaisian, *Geologica Belgica*, 9/1-2, p. 47-53.
- HENNEBERT M., 2012. Chapitre 2 : Le contexte géologique. In : BRULET R. (dir.), *La cathédrale Notre-Dame de Tournai. L'archéologie du site et des monuments anciens, vol. 1, Cadres généraux, structures et états*, Namur (Études et Documents, Archéologie, 27), p. 44-61.
- HENNEBERT M. & DOREMUS P., 1997. *Hertain-Tournai*, Namur (Carte géologique de Wallonie, échelle : 1/25 000, planche 37/5-6).
- HOLTZAPFFEL T., 1985. *Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination* (Société géologique du Nord, Publication n° 12), 130 p.
- ICOMOS-ISCS, 2008. International Council on Monuments and Sites — International Committee for Stone. *Illustrated glossary on stone deterioration patterns – Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre* (Monuments and Sites, XV), 78 p.
- NBN EN 12670, 2002. *Natural stone — Terminology*, NBN — Bureau de normalisation, Bruxelles, 49 p.
- NYS L., 1993. *La pierre de Tournai. Son exploitation et son usage aux XIII<sup>ème</sup>, XIV<sup>ème</sup> et XV<sup>ème</sup> siècles*, Tournai-Louvain-la-Neuve (Tournai – Art et Histoire, 8), 411 p.
- PMW, 2004. Pierres et Marbres de Wallonie. *Les carrières Lemay : Pierre de Tournai' – Noir de Tournai*, dépliant, 4 p.
- ROLLAND P., 1944. *La pierre de Tournai : son emploi dans le passé*, Bruxelles (Mémoires de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie, Nouvelle série in-4°, 1), p. 87-115.
- SIEGISMUND S. & DÜRRAST H., 2011. Physical and mechanical properties of rocks. In : SIEGISMUND S. & SNETHLAGE R. (éd.), *Stone in Architecture : Properties, Durability*, 4<sup>e</sup> éd., Springer, p. 97-225.
- STEIGER M. & CHAROLA A.E., 2011. Chapter 4 : Weathering and Deterioration. In : SIEGISMUND S. & SNETHLAGE R. (éd.), *Stone in Architecture : Properties, Durability*, 4<sup>e</sup> éd., Springer, p. 227-316.
- VAN WELDEN J.-P., 1965. Contribution à l'identification des « pierres de Tournai », *Bulletin de l'Institut royal du Patrimoine artistique*, VIII, p. 149-166.

# LES PORTAILS ROMANS DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE TOURNAI. CONTEXTUALISATION ET RESTAURATION

L'étude des portails médiévaux connaît depuis quelques années un regain d'intérêt. La Porte Mantile et la Porte du Capitole de la cathédrale de Tournai, monument inscrit sur la liste du patrimoine mondial UNESCO, figurent parmi les plus intéressants de Belgique. Leur forme trilobée semble relativement exceptionnelle et leur confère tout leur cachet. La sculpture de ces portails du 12<sup>e</sup> siècle n'a pas dévoilé tous ses mystères, notamment quant à sa place dans le programme iconographique global de la cathédrale.

Une pré-étude initiée en 2012 pour mieux comprendre leur structure s'inscrit dans le cadre du vaste projet de conservation de la cathédrale. Dans le prolongement de celle-ci et dans la perspective de leur restauration, le Département du patrimoine a organisé une rencontre internationale avec la collaboration scientifique de l'IRPA. Ce colloque devait être l'occasion de mettre à jour et approfondir les connaissances des portails dans leurs aspects les plus larges, qu'ils soient techniques, typologiques, stylistiques, iconographiques, tant sur le plan de l'architecture que de la sculpture. La dimension comparative avec des portails contemporains, en France en particulier, a également été au cœur des discussions.

*The study of medieval portals experienced in recent years renewed interest. The Mantile door and the Capitol door of the Tournai Cathedral, a monument listed as a World Heritage Site, are among the most interesting of Belgium. Their trilobal shape seems relatively exceptional and gives them their character. The sculptures on these portals from the 12th century have not revealed all their secrets, particularly with regard to their place in the global iconographic programme of the Cathedral.*

*A preliminary study initiated in 2012 to better understand their structure is part of the vast project of conservation of the Cathedral. In this context, and with the prospect of their restoration, the Heritage Department organized an international meeting with the scientific collaboration of the IRPA. This Conference was to be an opportunity to update and deepen our knowledge of church portals in their widest aspects — technical, typological, stylistic, iconographic — both in terms of architecture and sculpture. Comparisons with contemporary portals, in France in particular, was also at the heart of the discussions.*

Prix de vente : 20 €

ISBN : 978-2-930711-10-2



Service public  
de Wallonie

DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE  
DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DU LOGEMENT, DU PATRIMOINE ET DE L'ÉNERGIE

