

# Bulletin monumental

Tome 182-4 2024



Société française d'archéologie

Comité des publications	<p>Élise BAILLIEUL Maître de conférences, université de Lille</p> <p>Françoise BOUDON Ingénieur de recherches honoraire, CNRS</p> <p>Isabelle CHAVE Conservateur général du patrimoine, sous-directrice des monuments historiques et des sites patrimoniaux (ministère de la Culture)</p> <p>Alexandre COJANNOT Conservateur en chef du patrimoine, conservation régionale des monuments historiques Grand Est (ministère de la Culture)</p> <p>Thomas COOMANS Professeur, University of Leuven (KU Leuven)</p> <p>Nicolas FAUCHERRE Professeur émérite, université d'Aix-Marseille</p> <p>Pierre GARRIGOU GRANDCHAMP Général de corps d'armée (Armée de terre), docteur en Histoire de l'art et archéologie</p> <p>Étienne HAMON Professeur, université de Lille</p> <p>Denis HAYOT Docteur en Histoire de l'art, université de Paris IV-Sorbonne</p> <p>Dominique HERVIER Conservateur général du patrimoine honoraire</p> <p>Bertrand JESTAZ Directeur d'études à l'École pratique des Hautes Études</p> <p>Clémentine LEMIRE Conservateur du patrimoine, directrice des musées de Châlons-en-Champagne</p> <p>Emmanuel LITOUX Conservateur du patrimoine, responsable du pôle archéologie, conservation du Patrimoine de Maine-et-Loire</p> <p>Emmanuel LURIN Maître de conférences, université de Paris IV-Sorbonne</p> <p>Jean MESQUI Ingénieur général des Ponts et Chaussées, docteur ès Lettres</p> <p>Jacques MOULIN Architecte en chef des Monuments historiques</p> <p>Dominique PARIS-POULAIN Maître de conférences émérite, université de Picardie Jules-Verne</p> <p>Philippe PLAGNIEUX Professeur, université de Paris I Panthéon-Sorbonne, École nationale des chartes</p> <p>Pierre SESMAT Professeur honoraire, université de Nancy</p> <p>Éliane VERGNOLLE Professeur honoraire, université de Franche-Comté</p>
-------------------------	--

Directrice des publications	Jacqueline SANSON
Rédacteur en chef	Étienne HAMON
Actualité	Pierre GARRIGOU GRANDCHAMP
Chronique	Dominique HERVIER
Bibliographie	Dominique PARIS-POULAIN
Secrétaire de rédaction	Morgane MOSNIER
Infographie et PAO	David LEBOULANGER
Relecteur	MARC SANSON

Bulletin monumental  
Tome 182-4  
2024

Société Française d'Archéologie

*Toute reproduction de cet ouvrage, autre que celles prévues à l'article L. 122-5 du Code de la propriété intellectuelle, est interdite, sans autorisation expresse de la Société française d'archéologie et du/des auteur(s) des articles et images d'illustration concernés. Toute reproduction illégale porte atteinte aux droits du/des auteurs(s) des articles, à ceux des auteurs ou des institutions de conservation des images d'illustration, non tombées dans le domaine public, pour lesquelles des droits spécifiques de reproduction ont été négociés, enfin à ceux de l'éditeur-diffuseur des publications de la Société française d'archéologie.*

© Société française d'archéologie

Siège social : Cité de l'Architecture et du Patrimoine, 1, place du Trocadéro et du 11 Novembre,  
75116 Paris.

Bureaux : 5, rue Quinault, 75015 Paris, tél. : 01 42 73 08 07

Revue trimestrielle, t. 182-4, décembre 2024

ISSN : 0007-4730

CPPAP : 0124 G 86537

ISBN : 978-2-36919-208-4

*Les articles pour publication, les livres et articles pour recension  
doivent être adressés à la Société française d'archéologie,  
5, rue Quinault, 75015 Paris  
secretariat-redaction@sfa-monuments.fr*

Les publications de la SFA sont disponibles en vous adressant directement à la SFA

<https://www.sfa-monuments.fr/>

ou auprès de notre distributeur : les éditions Faton

<https://www.faton.fr/editions/sfa/>

# LES VOÛTES MÉDIÉVALES DE NOTRE-DAME DE PARIS

## CONSOLIDATION, RESTAURATION ET RECONSTRUCTION

Pascal PRUNET \*

Le présent article concerne les voûtes médiévales du haut vaisseau de la cathédrale Notre-Dame de Paris, gravement dégradées par l'incendie du 15 avril 2019 qui a détruit les toitures du grand comble et la flèche. Il traitera de leur état avant et après l'incendie, et des dégradations consécutives à ce dernier, puis de leur sécurisation, de leur restauration et de la consolidation des ouvrages qui ont résisté, et enfin de la reconstruction des ouvrages détruits.

L'incendie a entraîné d'importantes dégradations des voûtes mais aussi des murs gouttereaux (ou murs-bahut), soit la totalité des parements du haut comble. Ces ouvrages en pierre de taille ont tous été fragilisés et certains ont été détruits par la chute des charpentes, à commencer par celle du tiers supérieur de la flèche, qui a détruit l'arc doubleau qui séparait les travées 3 et 4 de la nef et les deux voûtains centraux adjacents (fig. 1).

Les voûtes datent, pour la plupart, de la fin du XII<sup>e</sup> siècle et du début du XIII<sup>e</sup>, si l'on exclut les reconstructions ponctuelles à la croisée et dans les bras du transept au XVIII<sup>e</sup> siècle par Germain Boffrand, puis une nouvelle fois au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle pour la voûte de la croisée et la demi-travée adjacente de la voûte du chœur. Les murs gouttereaux ont été surélevés

au début du XIII<sup>e</sup> siècle lors de la modification des élévations et renforcés aux angles de la croisée par Viollet-le-Duc pour recevoir le tabouret de la nouvelle flèche. À une date indéterminée, peut-être dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, une chape de plâtre a recouvert l'extrados des voûtes, probablement pour les protéger des conséquences d'un éventuel incendie. L'intrados a lui-même été restauré, parfois à plusieurs époques, mais les mortiers de hourdage et de finition dans de rares cas sont probablement contemporains de la construction <sup>1</sup>. Le jointoiment, en revanche, a été très largement refait à l'époque de Viollet-le-Duc, avec des mortiers hydrauliques, et probablement à d'autres reprises auparavant. Des traces d'un décor de faux-appareil sont attribuées à Viollet-le-Duc.

Si le haut vaisseau a pu être rapidement mis hors d'eau après le désastre, à l'exception des zones limitrophes des pignons en raison des étalements, la croisée est restée exposée aux intempéries jusqu'à la reconstruction de la nouvelle flèche et de la voûte, cinq ans après leur destruction. Les raisons principales en furent : d'une part, l'opération complexe du démontage de l'échafaudage qui avait résisté à l'incendie ; d'autre part, la nécessité de créer une tour d'échafaudage de 100 m de hauteur, occupant tout l'espace de la croisée depuis le sol, pour le montage de la charpente.

### AVANT L'INCENDIE – GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE

Avant l'incendie, les voûtes étaient déjà affectées par des déformations et des fissures dites de Sabouret, consécutives au fluage des maçonneries sous leur propre poids <sup>2</sup>. Une première topographie a pu en être dressée grâce au scan de la cathédrale qu'avait réalisé l'historien de l'art Andrew Tallon (1969-2018) <sup>3</sup>. Aux déformations des voûtes étaient associées celles des murs gouttereaux, notamment un dévers prononcé du côté nord de la nef.

La géométrie des voûtes n'était donc plus celle de la conception d'origine, que ce soit du fait des difficultés du chantier ou du fluage des maçonneries dans les décennies qui suivirent. L'apparente complexité des formes héritées de cette histoire a fait s'interroger certains historiens sur le tracé des arcs, plus précisément du doubleau effondré de la nef, notamment sur un éventuel dessin à deux centres de chaque demi-arc doubleau (fig. 2). L'état de déformation des murs, des voûtes et des arcs montre cependant qu'il ne peut s'agir de tracés de conception et que les dessins d'origine devaient relever d'une rationalité plus directe, d'autant plus que le contexte d'une mise en œuvre des voûtes à environ 80 pieds du sol (soit 26 m), pour culminer à 100 pieds (soit 32,5 m), coordonnée

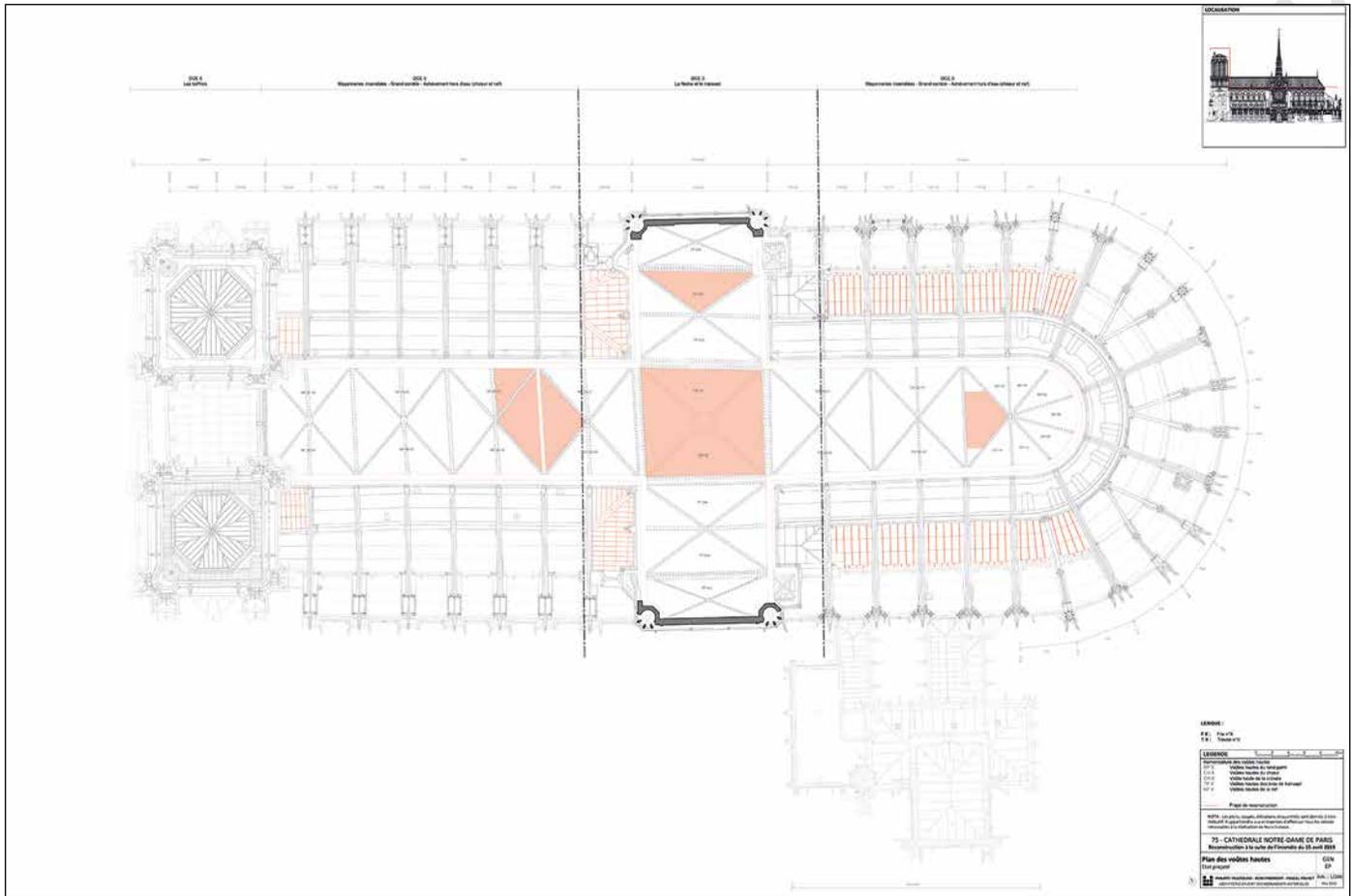


Fig. 1 - Paris, cathédrale Notre-Dame, plan de localisation des voûtes effondrées (© Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH).

avec celle des arcs-boutants et des culées, était particulièrement délicate et risquée.

La conception d'une voûte sexpartite est en soi un ouvrage géométrique complexe, les arcs doubleaux, diagonaux et formerets n'ayant pas le même développement. Les formerets, dont l'ouverture est deux fois plus courte que la travée, s'élèvent à partir de colonnettes plaquées à mi-hauteur des voûtes, soit environ 3 m au-dessus du départ des autres arcs. Les diagonaux ont le plus grand développement (environ 1,4 fois celui des doubleaux) et un tracé en plein cintre qui détermine la hauteur des clefs. Les doubleaux sont des arcs brisés, dont les centres sont éloignés d'un cinquième de la portée, et ceux qui correspondent aux piles fortes et à l'articulation des

travées sont moins élancés que ceux correspondant aux piles faibles, qui culminent au niveau de la clef de la voûte. À cette époque d'invention de l'architecture gothique, chaque arc était construit de façon autonome et clavé depuis les chapiteaux, sans départ en tas-de-charge, contrairement à ce qui allait devenir l'usage plus tard, ce qui augmentait *de facto* leur portée. La hauteur des claveaux (47 cm de haut, soit environ 1,5 pied) et leur largeur (37 cm, soit 1 pied et 2 pouces) en faisaient des ouvrages très élancés. Le grand nombre des claveaux, leur épaisseur réduite, variable, de 4 pouces (10,8 cm) à un peu plus de 9 pouces (27 cm), et leur distribution aléatoire, contribuaient à leur relative fragilité. L'accumulation de ces contraintes exigeait d'autant plus d'en simplifier le dessin.

Les arcs portent les voûtains, qui en retour protègent les arcs des risques de l'incendie, des chocs des charpentes et des hautes températures. Chaque voûtain apparaît en plan comme un triangle mais est en réalité constitué de deux demi-coques, chacune étant formée d'une juxtaposition de rangs de voussoirs qui se rejoignent sur la ligne de clef, à l'instar des méridiens du globe, ou plutôt comme les bordés d'une coque de navire par rapport à sa quille. La ligne de clef est la bissectrice de l'angle qui relie la clef d'un arc (doubleau ou formeret) à la clef de voûte. Cette analogie avec la construction navale est probablement la plus juste pour les décrire. En effet, comme pour les bordés d'une coque, certains rangs de voussoirs ont des bords parallèles, d'autres sont trapézoïdaux, et parfois fuselés, et leur largeur est variable,

comme celle des claveaux des arcs. On y verra une méthode pragmatique d'approche de la construction des voûtains, permettant d'utiliser au mieux les blocs reçus sur le chantier, en limitant les pertes de matière et en optimisant les temps de taille et de mise en œuvre tout en s'adaptant à la forme de la coque.

Du point de vue structurel, les rangs qui les constituent sont très tendus, leur rayon important correspondant, plutôt qu'à un réel tracé, à une contreflèche de construction qui évite ainsi tout risque de décompression. Les coupes transversales sur les voûtains ont, en conséquence, un profil en arc brisé qui donne aux demi-coques une forme à double

courbure qui approxime celle d'un secteur de sphère. C'est cette double courbure qui leur confère leur grande résistance même lorsqu'elles sont très minces, entre 12 et 15 cm pour le chevet et 19 et 24 cm pour la nef<sup>4</sup>.

L'impossibilité de découper de façon raisonnée la surface des voûtains et les développements différents des nervures qui les portaient ont imposé aux constructeurs des mises en œuvre relevant d'approches intuitives. Ainsi, l'épure du raccord entre l'intrados des voûtains et l'extrados des nervures était impossible à tracer, du fait de l'angle variable qu'ils formaient en plan et en coupe selon les situations. Il en résulte un joint de section

triangulaire relativement irrégulier dont la forme affaiblit le caractère incisif du tracé des nervures. Afin de remédier à cela, un filet peint définit l'extrados de l'arc et atténue la perception du raccord approximatif entre nervure et voûtain.

À la cathédrale de Paris, la géométrie des travées est particulièrement irrégulière, aucune travée n'étant orthogonale ni même bâtie sur un plan de trapèze régulier. La raison de cette irrégularité ne peut, à notre avis, provenir de la conception initiale, forcément régulière, mais trouve très probablement son origine dans la complexité du sol de fondation, dans les vestiges des constructions qui ont précédé la cathédrale actuelle,

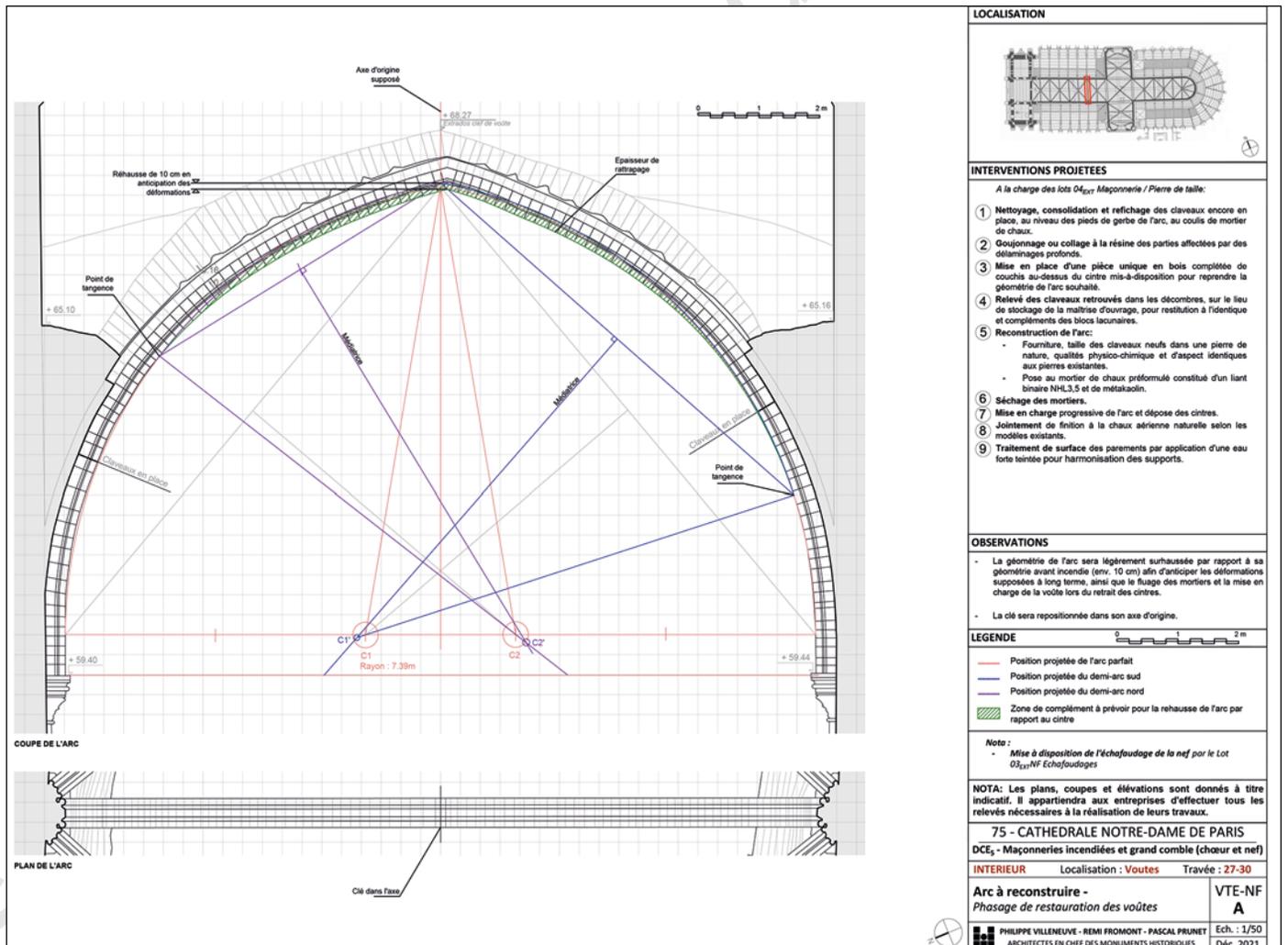


Fig. 2 - Paris, cathédrale Notre-Dame, reconstruction de l'arc doubleau effondré (© Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH).

et peut-être dans la nature même du sol géologique sur lequel elle est construite, le lit du fleuve étant assez mobile. La conséquence en a été une complication certaine de la génération du tracé des voûtes, un certain nombre d'arcs étant constitués de nervures non coplanaires.

Du point de vue des matériaux, les pierres des arcs et des voûtes provenaient toutes de carrières de Paris, mais de bancs de densité et de dureté différentes : les arcs, en pierre calcaire dure, avec des passées coquillées, de densité moyenne égale à 2,4 ; les voussoirs, en lambourde parisienne, plus tendre et légère, d'une densité allant de 1,8 à 2,2<sup>5</sup>. Les claveaux ont un tracé et une section (hauteur et largeur) homogènes mais une épaisseur irrégulière, qui est à la fois celle des lits dont ils sont extraits et le résultat de la découpe, sur le chantier, des blocs reçus de la carrière. Pour des raisons identiques, les arcs des voûtains ont des largeurs différentes, et les voussoirs, des longueurs variables<sup>6</sup>. Par contre, les voussoirs ont en général une section simple, parallépipédique, sauf dans les zones dont la géométrie est plus complexe, comme les pieds de gerbe et les lignes de clef, qui ont un profil en arc brisé.

Les joints des nervures sont en général très minces, infracentimétriques, et ceux des voûtains sont à peine plus importants. Les mortiers de hourdage sont réalisés à la chaux aérienne, avec des sables de Seine de granulométrie très fine<sup>7</sup>.

### SÉCURISATION DES VOÛTES

Au lendemain de l'incendie, l'accès aux voûtes n'a été ni envisageable ni autorisé du fait du risque de chutes de pierres, notamment au droit des zones effondrées. Le déblaiement des décombres au sol, dans lesquels étaient mélangés claveaux des arcs, voussoirs des voûtains et bois des charpentes, a dû être effectué à l'aide de robots conduits à distance.

Les premières mesures de stabilisation de la cathédrale, prises dans les heures qui ont suivi l'incendie, ont été l'étalement des deux pignons nord et sud du transept, dont on craignait l'effondrement, notamment sur la rue du cloître Notre-Dame, puis la mise hors d'eau provisoire par des bâches tendues sur des structures légères, suivie par la mise en œuvre d'un plancher lourd en bois sur les murs gouttereaux, porté par de grandes poutres. Ce plancher verrouillait le mouvement des murs hauts et devait servir d'aire de travail pour le déblaiement des voûtes. L'ensemble des arcs-boutants a été étayé par des cintres de façon à s'opposer à toute rupture d'équilibre des parties hautes.

L'intervention la plus complexe a été le démontage de l'échafaudage de la croisée. Construit pour restaurer la flèche mais fragilisé et dégradé par l'incendie, fendu sur sa face ouest par la chute de la partie sommitale de la flèche, déformé par le feu, devenu un écheveau de barres soudées entre elles, il était resté debout et ses quelque 500 tonnes en équilibre potentiellement instable constituaient une menace pour la cathédrale en son centre. L'impossibilité de vérifier sa stabilité par le calcul et les modifications incontrôlables de l'équilibre des tensions que la dépose par élément risquait de provoquer ont conduit la maîtrise d'œuvre et l'entreprise Europe Échafaudage à l'ajout d'un corset formé de trois niveaux de poutres légères ceinturant l'ouvrage. Le démontage a pu alors se faire progressivement, étage par étage, en sciant les barres sans crainte du relâchement brusque des contraintes, et en enlevant à la grue les derniers blocs de grande dimension, de façon très spectaculaire.

Une purge des pierres instables des murs a alors été opérée, afin d'éviter des accidents et de dégager l'extrados des voûtes des vestiges de la charpente. Cette opération a été menée avec le même protocole de suivi

que pour les décombres des voûtes effondrées, par des cordistes de l'entreprise Jarnias, le tri étant fait après coup par le Service régional de l'Archéologie et le LRMH. Le plomb des couvertures ayant fondu, il y avait essentiellement des bois de charpente, mais aussi des pierres déplaquées par dilatation thermique, provenant des parements des murs gouttereaux et de l'assise sommitale qui portait les charpentes.

La périphérie instable des zones effondrées a ensuite été consolidée provisoirement. Après la dépose des voussoirs les plus instables, des coques de plâtre armées de fibre de verre ont bordé et arrimé les bordures des trous aux zones conservées des voûtes. C'est à partir de ce moment que l'on a pu aller sous les voûtes, monter des échafaudages et, à la périphérie des trous, étayer les arcs par des cintres. Cela fut aussi fait au droit du rond-point, zone où la charpente constituée de chevrons rayonnants était particulièrement dense, et dont la clef avait subi des chocs violents, à l'origine de fractures. Bien avant l'incendie, les poussées combinées des charpentes et des voûtes avaient contribué au déversement des murs gouttereaux et provoqué l'ouverture du voûtain axial.

### DESSALEMENT DE L'INTRADOS DES VOÛTES

Le constat de l'état évolutif de la dégradation des parements de l'intrados par les sels et notamment le gypse a suscité rapidement la nécessité d'une autre intervention conservatoire, celle de la mise en œuvre d'une compresse sacrificielle à base de kaolin et de sable (fig. 3)<sup>8</sup>.

L'intervention a été réalisée à partir de mai 2021, en commençant par une aspiration THE des parements<sup>9</sup>, puis par la purge des zones de dégradation gypseuse et la suppression des joints au mortier de chaux hydraulique du XIX<sup>e</sup> siècle, dont la présence concentrait les zones d'évaporation



Cl. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 3 - Paris, cathédrale Notre-Dame : dessalement des voûtes.

et donc de cristallisation dans l'épiderme des voussoirs (le gypse cristallise dans un contexte hygrométrique). Les mortiers de hourdage pulvérulents ont été purgés, et les voussoirs potentiellement instables ont fait l'objet de calages provisoires : la compresse a ainsi pu entrer dans les joints ouverts. L'objectif de cette opération était de protéger les voûtes humides de la dégradation par l'occurrence de gypse épigénique dans la couche d'évaporation constituée par l'intrados, dont la conséquence était la perte d'une partie significative du nu de taille sur une épaisseur qui pouvait être pluri-millimétrique. Ce traitement a aussi permis de réduire les taux de sels expansifs et hygroscopiques formés par l'apport des eaux d'extinction de l'incendie, et de nettoyer l'intrados des voûtes en supprimant une partie importante des taches brunes (bistre, tanin, acides organiques endogènes...) issues de la percolation des joints par les eaux d'extinction de l'incendie, et absorbées par le kaolin.

#### APRÈS L'INCENDIE – CONSTAT ET CAUSES

Le diagnostic réalisé après la sécurisation des voûtes a montré qu'elles avaient été affectées de plusieurs manières par les conséquences de l'incendie, qui a détruit l'ensemble de la toiture et de la flèche en quelques dizaines de minutes puis a formé sur l'extrados des brasiers dont certains, soit par leur localisation, soit par la masse des bois, ont été actifs plusieurs heures sur l'extrados des voûtes.

Dès la disparition des voliges, immédiatement consommées, les voûtes ont été recouvertes par le plomb fondu des couvertures, qui s'est en partie échappé par les façades mais s'est aussi accumulé dans les reins<sup>10</sup> et déposé en fine couche sur l'extrados.

Presque simultanément, elles ont subi les chocs répétés de la chute des charpentes, dont les chevrons-fermes se sont couchés comme un château de cartes, provoquant des phénomènes d'ouverture des joints, de fracturation des voûtains et jusqu'à la

destruction de certaines d'entre elles en trois endroits de la cathédrale<sup>11</sup>.

L'accumulation des bois brisés glissant vers les reins a formé, au droit des murs gouttereaux, des brasiers qui ont rapidement atteint des températures de plus de 1 000 degrés Celsius. La dilatation thermique des parements en pierre de taille a eu pour conséquence un décollage des voussoirs de l'ordre de 3 cm d'épaisseur à l'extrados<sup>12</sup> mais aussi un décollement des voûtains par rapport aux nervures qui les portaient<sup>13</sup>. En refroidissant, les voûtains se sont progressivement rétractés et ont heureusement retrouvé leur position initiale sur les arcs.

Enfin, après la dissolution de la chape de plâtre qui recouvrait l'extrados des voûtes, le lessivage des joints et le détrempe des maçonneries par les eaux d'extinction de l'incendie ont accentué la dégradation mécanique des voûtes, l'humidité affectant le tiers inférieur des voûtes et s'installant surtout au niveau des pieds de gerbes<sup>14</sup>.

Un dernier phénomène de dégradation, d'ordre physico-chimique, s'est développé dans les mois qui ont suivi : une couche de gypse épigénique s'est formée à l'intrados des voûtes sous l'effet des ions sulfates libérés par la dissolution de la chape de plâtre par les eaux d'extinction de l'incendie, se traduisant par une desquamation des pierres qui a atteint par endroits plus d'1 cm. L'utilisation d'adjuvants (sels) pour optimiser l'efficacité des eaux d'extinction et la dissolution de déchets organiques ont probablement aussi contribué à la formation d'autres sels expansifs et hygroscopiques.

Enfin, il faut mentionner la pollution générale des parements par le dépôt d'oxydes de plomb provenant de l'altération de la couverture par les voliges en chêne, phénomène n'ayant que des conséquences d'ordre sanitaire, sans incidence directe sur la préservation du monument.

## RÉSISTANCE À L'EFFONDREMENT DES CHARPENTES

Il est important de signaler qu'aucune voûte médiévale ne s'est effondrée sous le choc des charpentes médiévales. Les seules voûtes détruites l'ont été du fait de la chute des charpentes de la flèche et du bras nord reconstruites par Viollet-le-Duc, qu'il s'agisse de la partie sommitale de la flèche qui a percuté la voûte de la nef ou du reste de sa charpente qui, jusque tard dans la nuit, a formé un gigantesque brasier, transformant la voûte de la croisée en chaux et la faisant s'écrouler sous son poids, ou enfin d'un voûtain du bras nord, percuté par un arbalétrier ou une panne. Dans le rond-point, la chute de la masse importante des chevrons rayonnants a provoqué des fractures ponctuelles au droit de la clef et plusieurs trous de petite dimension dans le voûtain axial de la demi-travée droite, tandis que les hautes températures de l'incendie ont accentué la dégradation des voûtains.

Deux raisons font que les voûtes ont résisté au choc des charpentes médiévales : le dimensionnement relativement fin des bois et leur poids très régulièrement réparti mais aussi le fait que les triangles des chevrons-fermes s'épurent sur le nu extérieur des murs gouttereaux, qui les a retenus dans leur chute, réduisant ainsi la violence de l'impact. Par contre, les voûtes ont moins résisté aux chocs des arbalétriers des fermes du XIX<sup>e</sup> siècle, qui, épurés sur le nu intérieur, sont tombés de tout leur poids sur les voûtes. L'arborescence des charpentes à panne (arbalétrier, pannes, chevrons) impose aussi un dimensionnement plus important des bois, qui sont donc plus lourds.

Les coques des voûtes médiévales, même celles du chevet, dont l'épaisseur est de 14 cm en moyenne, ont résisté et ont donc fait leur office en protégeant l'espace de la cathédrale de l'incendie. Leur solidité est essentiellement due à leur double

courbure, qui a été très efficace. Elles ont aussi, malgré les déformations subies par les hautes températures de l'incendie, parfaitement protégé les nervures des arcs qui les portaient.

## DÉFORMATION APRÈS L'INCENDIE

L'exposition des voûtains aux multiples chocs des charpentes, les mouvements qu'ils ont subis du fait de leur dilatation par les hautes températures de l'incendie et plus globalement les dégradations mécaniques qui les ont affectés, ont eu des conséquences sur la topographie des voûtes, avec des zones d'affaissement mais aussi de légère surrection<sup>15</sup>. Une typologie de l'organisation des fissures a été établie par les chercheurs du Groupe de travail « Structures » sur la base d'une modélisation des contraintes liées à l'incendie. Ces déformations réelles sont cependant restées assez peu perceptibles et la forme des voûtes s'est globalement maintenue, montrant la grande résilience que leur conception leur a conférée.

Il en a été de même de l'équilibre général des structures, qui s'est conservé, y compris dans les zones où les voûtes se sont effondrées. Dans le cas de l'effondrement des deux voûtains et de l'arc doubleau qui articulait les travées 3 et 4 de la nef, percutés par la partie sommitale de la flèche, les arcs diagonaux à la périphérie du trou été conservés et ont permis le transfert des poussées vers les arcs-boutants qui ne se sont ainsi pas décomprimés.

Il faut signaler qu'aucune voûte de la cathédrale ne s'est effondrée après l'incendie, alors qu'environ quatre années se sont passées avant leur consolidation. Aucun des cintres n'a été mis en charge par des déformations postérieures au traumatisme subi. Cela montre l'équilibre exceptionnel de la construction qu'ont conçue les maîtres d'œuvre de la seconde moitié du XII<sup>e</sup> siècle.

## CONSOLIDATION ET RESTAURATION DES VOÛTES DÉGRADÉES

L'intervention de restauration et de consolidation des voûtes dégradées par l'incendie a eu pour objectif de se rapprocher le plus possible de leur état et de leurs caractéristiques structurelles d'origine. Le projet a été de substituer aux parties dégradées (notamment les pertes d'épaisseur par déplaquage des voussoirs) une chape de confortation, adhérente mais suffisamment souple pour ne pas constituer une deuxième coque pouvant se comporter de façon autonome par rapport à celle des voûtes.

### Consolidation des voûtains

Après la purge des parties dégradées, notamment de la croûte de pierre déplaquée, accompagnée de l'élimination des restes de plomb fondu et d'un nettoyage par aspiration THE, les voûtains ont fait l'objet d'une première consolidation, par purge complète des joints de finition à l'intrados (dans les zones qui n'avaient pas été traitées par dessalement), calage des voussoirs et purge des mortiers de pose pulvérulents à l'intrados et à l'extrados.

La consolidation fut réalisée par reprise complète des joints dégradés. Elle commença par le refichage des voussoirs à l'intrados pour rendre étanche la sous-face de la voûte, refichage arrêté à -2 cm du nu pour réaliser après coup les joints de finition. L'opération fut poursuivie depuis l'extrados et terminée à l'aide d'un coulis de mortier liquide destiné à rendre leur cohésion aux mortiers de pose conservés. Les mortiers furent arrêtés à -3 cm du nu de l'extrados pour permettre l'ancrage de la chape de confortation.

Pour les scellements et le coulis a été retenu un mortier de chaux aérienne plutôt que de chaux NHL 3,5, présumée plus rapidement résistante<sup>16</sup>. Le but était d'éviter tout risque de réaction sulfatique pouvant

entraîner des désordres par gonflement du mortier <sup>17</sup>. Ce choix a été fait en fonction du principe de précaution, sur la base d'essais ayant permis de constater l'efficacité du coulis et la rapidité du séchage de la chaux aérienne, même si un essai à la NHL 3,5 n'avait pas produit de réaction délétère.

#### **Confortation des voûtes par une chape fibrée**

La réalisation d'une chape de confortation (fig. 4) avait pour objectif de reconstituer l'épaisseur perdue des voussoirs (par délamination superficielle consécutive au choc thermique) et de rendre leur résistance aux voûtains dégradés.

Un mortier fibré a été choisi pour conférer à cette chape une résistance aux petits mouvements liés au fluage et au retrait, avec un ancrage dans les joints des voussoirs sur 3 cm pour assurer une bonne cohésion avec la voûte. L'épaisseur de la chape est de 2 à 3 cm dans les zones déplaquées et d'environ 1,5 à 2 cm sur les zones qui ont conservé leur épaisseur d'origine. La réalisation scrupuleuse de ces ancrages a été rappelée aux entreprises lors des travaux.



Cl. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 4 - Paris, cathédrale Notre-Dame, application d'une chape de confortation.

La chape est renforcée par des fibres de verre uniformément réparties pour obtenir une meilleure résistance à la traction et, ponctuellement, par des treillis en fibre de basalte dans les zones les plus fragilisées qu'il a été décidé de ne pas reconstruire (pas de dépose-repose) ou dont l'affaissement léger d'une partie du voûtain ne compromettrait pas la stabilité, la deuxième courbure de la voûte étant conservée. Des armatures ponctuelles en forme de L, en fibre de verre, relie ce treillis aux joints des voussoirs pour augmenter la cohésion du voûtain <sup>18</sup>.

Les chapes recouvrent aussi les liaisons entre les voûtes reconstruites et les parties conservées à leur périphérie pour assurer une continuité de structure et d'aspect ainsi que pour la simplicité de l'entretien de l'extrados des voûtes.

On peut raisonnablement estimer que les voûtes, après consolidation et restauration, sont en meilleur état structurel qu'avant l'incendie.

#### **Réparation des arcs**

Quelques réparations ponctuelles durent être effectuées sur les arcs.

Dans le chevet, aux clefs des deux travées droites du chœur, les tores de la sous-face des claveaux présentaient en quelques points des fractures ou des lacunes, les éléments fracturés s'étant désolidarisés sous l'effet probable du choc des charpentes. Les éléments restés en place ont été recollés et goujonnés et les lacunes ont été reconstituées par des greffes au contact <sup>19</sup>.

Dans le bras nord du transept, le demi-arc diagonal sud-est de la travée adjacente à la croisée présentait une discontinuité de sa courbe probablement consécutive à la chute d'une pièce de charpente. L'ensemble étant resté stable, il a été décidé de ne pas opérer de redressement, ce dernier imposant la dépose-repose d'une partie importante des deux voûtains

qu'il portait. Une consolidation par brochage des claveaux a été préférée.

#### **L'ARC ET LES VOÛTAINS DE LA NEF – PRINCIPES DE RECONSTRUCTION**

La reconstruction des voûtes a été réalisée « à l'identique », c'est-à-dire en restituant la forme et les caractéristiques géométriques et constructives des éléments détruits par l'incendie, tels qu'ils étaient et à leur emplacement d'origine et, ce faisant, en rétablissant l'équilibre des poids et poussées des voûtes et des arcs-boutants (fig. 5). Pour les claveaux et les voussoirs, l'emploi de mortiers de pose en chaux hydraulique naturelle NHL 3,5 a remplacé la chaux aérienne d'origine et a permis d'obtenir une prise plus rapide. Les joints de parement ont été réalisés en NHL 2, moins dure.

#### **L'arc doubleau**

Après la chute de la partie sommitale de la flèche sur la voûte de la nef à l'articulation des travées 3 et 4, l'arc doubleau s'était effondré. Ne restaient en place que les pieds de gerbe, avec les départs du doubleau, conservés sur 3 m de haut au nord et 4 m au sud, soit 42 claveaux sur les 120 qui constituaient l'arc, les 78 autres étant tombés au sol. Des deux voûtains adjacents, seuls des arrachements très affaiblis étaient encore en place.

La couronne de la flèche était restée encastrée dans le voûtain latéral de la troisième travée et la hampe en fer forgé qui la portait, pliée sous l'effet des chocs et de la chaleur, pendait dans le vide au droit de l'ogive nord-est de la même travée.

Les claveaux de l'arc doubleau et les voussoirs, tombés de plus de 30 m de haut, gisaient au sol, mutilés, fracturés, entremêlés avec les bois en désordre provenant des charpentes médiévales et de la charpente de la flèche. Seul le poinçon de cette dernière était identifiable, couché parallèlement à l'axe du vaisseau, la



Cl. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 5 - Paris, cathédrale Notre-Dame, voûtain restauré et voûtain neuf avant réalisation de la chape.

pointe vers l'ouest, à proximité des deux derniers piliers nord qui avaient subi d'importants déplaquages à cause des hautes températures.

Un protocole de repérage photographique et d'identification des vestiges récupérés au sol a été élaboré par le laboratoire MAP, le SRA et le LRMH<sup>20</sup>, suivi d'un projet de reconstruction de l'arc en anastylose.

Le projet devant avancer rapidement, les architectes ont restitué le tracé de l'arc sur la base du scan d'Andrew Tallon. Une bâche à échelle 1:1 a été imprimée à partir de ce dessin pour y installer les claveaux rescapés, ce qui a permis des analyses croisées entre architectes, LRMH, archéologues et historiens de l'art du Groupe de travail « Pierre »<sup>21</sup>. Les deux autres objectifs majeurs du projet ont été, d'une part, de corriger la déformation de l'arc pour rétablir un profil plus régulier basé sur des

centres proches de leur emplacement supposé d'origine, d'autre part d'anticiper son fluage en rehaussant de 4 cm le niveau de la clef. Les anciennes encoches qui recevaient le dispositif de cintrage des voûtains ou des entretoises qui maintenaient l'écartement des arcs n'ont cependant pas été restituées.

La composition des mortiers a été adaptée (chaux de type NHL 3,5 et sable de granulométrie normée). L'épiderme des pierres a été traité avec une bretturée calibrée sur les dimensions des traces relevées sur les claveaux médiévaux pour garantir l'intégration des parements neufs et anciens.

Pour le remontage des voûtains, des cintres reprenant la courbure de l'intrados projeté ont été mis en œuvre. Les pieds de gerbe ont été consolidés, les éléments instables, démontés et remontés. Puis les

nouveaux claveaux ont été installés et posés à bain de mortier soufflant pour assurer une parfaite compression des mortiers de hourdage mais en laissant un retrait pour réaliser plus tard les joints de parement.

Les ACMH ont proposé, pour plusieurs raisons, de ne pas réutiliser les claveaux de l'arc doubleau tombés au sol : ceux-ci avaient en effet subi des chocs violents et les hautes températures de l'incendie, très peu d'entre eux étaient intacts et leurs dimensions insuffisamment différenciées rendaient impossible l'identification de leur emplacement dans l'arc à reconstruire. Il a donc été convenu de réserver les claveaux rescapés à la science et au futur musée de la cathédrale et de reconstruire à neuf la partie détruite de l'arc (fig. 6) sur la base des modèles conservés et selon le scan d'Andrew Tallon.

### Les voûtains

La reconstruction des voûtains s'est faite dans le respect scrupuleux de leur géométrie d'origine, hormis la réduction de leurs déformations. Les variations de géométrie et de largeur des assises (bords parallèles, non parallèles, ou fuselés) ont été reconduites, et seules les longueurs trop différenciées des voussoirs ont fait l'objet d'une réduction à six modules, échelonnés entre 27 et 57 cm. Ce travail exact a été permis par un développement en 3D de chacune des assises des voûtains lors de l'élaboration des plans d'exécution (fig. 7)<sup>22</sup>.

Le remontage des voûtains a été réalisé à hauteur d'homme, en utilisant des lattes de bois souples calées sur les cerces préfabriquées sur la base du scan de l'intrados avant incendie (fig. 8 et 9). Palliant la connaissance incertaine du dispositif de cintrage médiéval, l'intérêt de ce mode de pose était, d'une part, la rapidité de mise en œuvre, avec un bon contrôle simultané de l'intrados et de



Cl. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 6 - Paris, cathédrale Notre-Dame, nef, arc doubleau reconstruit.

l'extrados, et d'autre part la mise en charge progressive du voûtain, rang par rang, sans attendre la dépose du coffrage<sup>23</sup>. L'utilisation de coffrages n'a été retenue que dans les zones sommitales, presque plates.

Comme les arcs, les voûtains ont été remontés à bain soufflant. Puis ils ont fait l'objet d'une légère retaille pour obtenir les courbures attendues, le profil des voussoirs étant droit au moment de la pose.

### HARMONISATION DES PAREMENTS – RESTAURATION DE LA POLYCHROMIE DES CLEFS

Les opérations de consolidation et de reconstruction achevées, une intervention de traitement d'harmonisation des parties neuves et anciennes a été menée, par l'application de badigeons de chaux dans l'objectif de réduire les contrastes entre voûtains neufs et voûtes anciennes encore marquées par le bistre de l'incendie.

Les décors de filets rouges qui soulignaient la géométrie de l'architecture ont aussi été restaurés ou repeints, notamment à l'extrados des arcs, pour réduire la perception de leur jonction irrégulière avec les voûtains (fig. 10).

Le décor polychrome des clefs de voûte et des derniers claveaux des arcs à leur contact (bleu outremer sur les faces, rouges dans les gorges, dorés avec des rehauts noirs pour les traits des visages ou le modelé des feuillages) a été nettoyé et ravivé, parfois repeint, pour retrouver l'éclat d'origine.

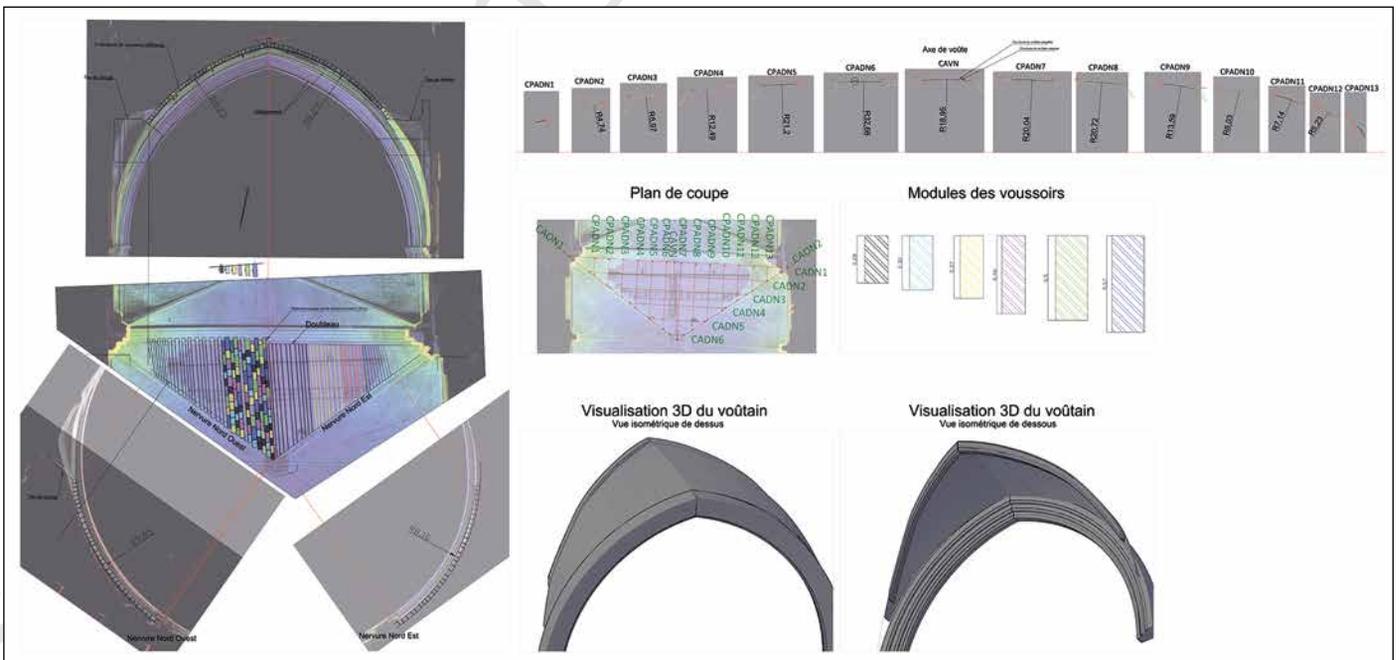


Fig. 7 - Paris, cathédrale Notre-Dame, transept, bras nord : épure du voûtain à reconstruire.



CI. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 8 - Paris, cathédrale Notre-Dame, nef, remontage d'un voûtain à l'aide de lattes calées sur des cerces.



CI. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 9 - Paris, cathédrale Notre-Dame, nef, liaison des deux voûtains en cours de remontage sur l'arc doubleau reconstruit.

## CONCLUSION

À l'issue de cette importante campagne de consolidation et de reconstruction des voûtes du haut vaisseau de la cathédrale de Paris, il est possible d'affirmer que ces ouvrages complexes, expérimentaux lors de leur création il y a plus de huit siècles, prodigieux par leur hauteur, couvrant un immense espace intérieur, ont parfaitement rempli leur mission qui était de protéger ce dernier. Leur résistance à l'incendie de 2019 a été exemplaire, à la mesure de la destruction par le feu et de la chute des charpentes médiévales, les seules voûtes effondrées l'étant du fait de la flèche et des charpentes du XIX<sup>e</sup> siècle.

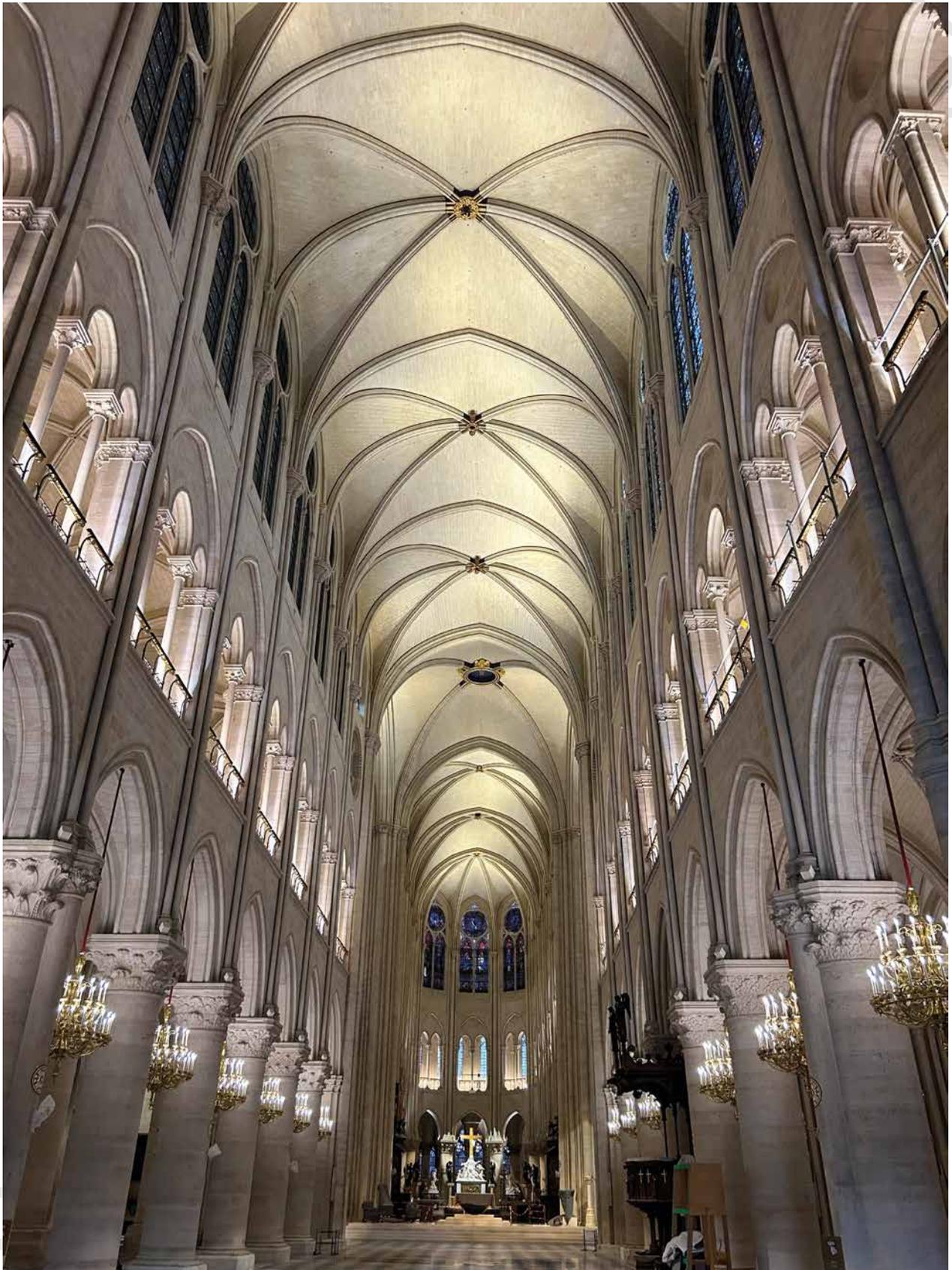
Il est aussi possible d'affirmer que la restauration des voûtes a permis de réparer les dégradations de l'incendie et de rétablir l'équilibre fragilisé de l'édifice mais aussi de rendre les ouvrages en meilleur état qu'avant l'incendie, les désordres anciens ayant été consolidés.

Enfin, l'ouvrage nettoyé des stigmates de l'incendie mais également débarrassé de l'encrassement accumulé par les siècles et depuis la magistrale restauration de Viollet-le-Duc, aura recouvré l'éclat que son statut exige (fig. 11).



CI Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 10 - Paris, cathédrale Notre-Dame, abside, voûte après restauration.



Cl. Agence Villeneuve Fromont Prunet ACMH.

Fig. 11 - Paris, cathédrale Notre-Dame, vue intérieure, après restauration.

## NOTES

\* Architecte en chef des Monuments historiques, associé de Philippe Villeneuve et Rémi Fromont.

Remerciements : Alexis Giroud, Architecte du Patrimoine, chef de projet ; Clara Lhermitte et Nicolas Dupuy, architectes.

1. Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, *Cathédrale Notre Dame de Paris - Bras du transept nord et croisée du transept, Identification et caractérisation des mortiers*, septembre 2020.

2. Voir dans ce volume : S. Morel et Th. Parent, « Le comportement mécanique... », p. 313-318.

3. Le nuage de points issu de ce scan a été généreusement offert par Madame Marie Tallon pour la restauration de la cathédrale.

4. Voir dans ce volume : Y. Gallet et Chr. Camerlynck, « Notre-Dame de Paris et l'épaisseur des voûtes... », p. 319-324.

5. Voir, dans ce volume : L. Leroux et J.-P. Gély, « Les pierres des voûtes de Notre-Dame... », p. 333-340.

6. Voir dans ce volume : D. Nouzeran, « Claveaux et voussoirs... », p. 347-352.

7. Voir dans ce volume : J.-M. Mechling, S. Diliberto et L. Pilloy « Les mortiers des voûtes... », p. 341-346.

8. Cette compresse a été conçue par Véronique Vergès-Belmin, directrice du Pôle « Pierre » du LRMH.

9. Aspiration à Très Haute Efficacité, permettant à l'aide de filtres « absolus » de faire considérablement chuter les taux d'oxydes de plomb au m<sup>2</sup> de parement.

10. Au pied de la flèche, l'épaisseur de plomb refroidi, de l'ordre de 80 cm, a scellé les

départs de la charpente du tabouret de la flèche et permis leur conservation. Jusqu'à 10 tonnes de plomb ont été extraites de chaque rein par les maçons de l'entreprise Lefevre, à la tronçonneuse pour dégager les bois emprisonnés.

11. Nous reviendrons plus loin sur les raisons de la destruction de ces trois voûtes.

12. Ce constat a été fait par sondage manuel systématique lors de l'état sanitaire établi par l'agence des ACMH, puis a été confirmé par une réflectométrie radar réalisée par le laboratoire LERM (*Auscultation radar des murs gouttereaux, des murs pignons, de deux piliers et des voûtes incendiées de la Cathédrale Notre Dame de Paris*, rapport d'étude, 27 novembre 2020). La délamination par la température a été confirmée par carottage par l'université de Bordeaux, la température dégressive de l'extérieur vers l'intérieur de la pierre étant vérifiée par l'évolution de sa couleur, du blanc au gris puis au rouge, ou de 1000 à 650 puis 350 degrés Celsius (Laboratoire BPE, *rapport PMH201173VI - Cathédrale Notre Dame de Paris - Murs bahut*, décembre 2020).

13. Un léger désaffleurlage des joints de calfeutrement entre l'intrados des voûtains et la face verticale des arcs peut être considéré comme un témoignage de ce décollement, dont l'amplitude a été évaluée à 20 cm par les chercheurs du groupe de travail « Structure ».

14. Les nappes de plomb accumulées dans les reins des voûtes ont formé couvercle et bloqué l'évaporation de l'eau.

15. Ces topographies pré- et post-incendie ont été établies par Mathias Fantin (BESTREMA) sur la base du scan du monument réalisé par la société Art Graphique et Patrimoine.

16. NHL : Natural Hydraulic Lime.

17. Sur le conseil de Jean-Didier Mertz (LRMH).

18. Le seul industriel qui présentait un mortier préformulé ayant fait l'objet d'essais jugés compatibles avec l'objectif de renforcement des voûtes était la Société MAPEI. Le choix de ce produit (Planitop HDM Restauo, avec le treillis MAPEGRID) a été fait par les ACMH et Carlo Blasi (Studio Comes, Florence), l'objectif étant d'éviter des variations de qualité lors de la réalisation de la chape.

19. Ces interventions ont été réalisées par l'entreprise Atelier Bouvier (Les Angles).

20. Le laboratoire MAP (Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, UPR CNRS 2002), sous la direction de Livio de Luca, a mis en place un dispositif d'enregistrement de l'enlèvement progressif des décombres, « strate par strate », de façon analogue au suivi d'une intervention archéologique.

21. Voir dans ce volume : É. Baillieul, A. Guillem et A. Gros, « Du claveau physique... », p. 325-330.

22. Les plans d'exécution ont été réalisés par l'entreprise Lefevre.

23. É. Brunet, « La restauration de la cathédrale de Soissons », *Bull. mon.*, 1928, p. 65-99. Ce mode de montage nous a été rappelé par Philippe Pradels, économiste et tailleur de pierre de formation, pour le contrôle de mise en œuvre qu'il permet. Il a été suivi lors des travaux de reconstruction postérieurs à la Première Guerre mondiale, notamment dans les cathédrales de Rouen et Soissons.

## TABLE DES MATIÈRES

### ARTICLES

Introduction : *Les voûtes de Notre-Dame de Paris dans l'architecture gothique*, par Yves Gallet..... 307

#### Étudier les voûtes de Notre-Dame

*Le comportement mécanique des voûtes sexpartites de Notre-Dame de Paris*, par Stéphane Morel et Thomas Parent..... 313

*Notre-Dame de Paris et l'épaisseur des voûtes dans l'architecture gothique*, par Yves Gallet et Christian Camerlynck..... 319

*Du claveau physique aux données numériques. Le travail de restitution de l'arc doubleau de la nef de Notre-Dame*, par Élise Baillieul, Anaïs Guillem et Antoine Gros..... 325

#### LES MATÉRIAUX ET LEUR MISE EN ŒUVRE

*Les pierres des voûtes de Notre-Dame, du Moyen Âge au XIX<sup>e</sup> siècle. Identification, usages, approvisionnement*, par Lise Leroux et Jean-Pierre Gély.... 333

*Les mortiers des voûtes de Notre-Dame de Paris. Analyse et reconstitution*, par Jean-Michel Mechling, Sébastien Diliberto et Léa Pilloy..... 341

*Claveaux et voussoirs des voûtes sexpartites de Notre-Dame de Paris*, par Dylan Nouzeran..... 347

*Ogives et doubleaux de Notre-Dame. Tracés d'épure et de positionnement*, par Andreas Hartmann-Virnich..... 353

*Le système de cintrage des voûtes de Notre-Dame de Paris*, par Arnaud Ybert, Cédric Moulis et Dylan Nouzeran..... 361

#### RECONSTRUIRE LES VOÛTES DE NOTRE-DAME

*Un projet de voûte à liernes et tiercerons pour la croisée de Notre-Dame en 1510*, par Étienne Hamon..... 371

*Les voûtes médiévales de Notre-Dame de Paris. Consolidation, restauration et reconstruction*, par Pascal Prunet..... 381

#### NOUVELLES PERSPECTIVES CHRONOLOGIQUES

*L'apport de la datation dendrochronologique des charpentes à l'histoire médiévale de Notre-Dame de Paris*, par Jean-Yves Hunot, Clara Penagos et Olivier Girardclos..... 395

*Les voûtes hautes de la nef de Notre-Dame. Un réexamen chronologique*, par Élise Baillieul et Arnaud Ybert..... 403

### ACTUALITÉ

Ille-et-Vilaine  
Grand-Fougeray. *La tour Duguesclin* (Mickaël Dufeil) 411

Vienne  
Migné-Auxances. *Église Sainte-Croix, restauration du retable de la Croix : bilan d'étape* (Dominique Hervier et Nicolas Plasson)..... 415

### CHRONIQUE

Architecture. XI<sup>e</sup>-XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècles. Italie  
*Gothique cistercien en Italie méridionale, style et identité* (Thomas Coomans)..... 421

Peinture murale. XI<sup>e</sup>-XII<sup>e</sup> siècles  
*Saint-Sernin de Toulouse : hypothèses iconographiques nouvelles* (Sophie Ducret)..... 422

Mobilier religieux. XV<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles. Angleterre  
*Un ensemble controversé de stalles de la Renaissance* (Évelyne Thomas)..... 423

Décor civil. XVI<sup>e</sup> siècle  
*Toulouse : l'énigme d'un décor intérieur enfin expliquée* [Jean Guillaume (†)]..... 425

Architecture XVIII<sup>e</sup> siècle et restauration XXI<sup>e</sup> siècle  
*Château de Lunéville : restauration en cours et renaissance attendue (2003-2023)* [Isabelle Chave] 425

Projets d'architecture. XIX<sup>e</sup> siècle  
*Architecture thermique et balnéaire de papier, dessins inédits de l'École des Beaux-Arts* (Sophie Cueille)..... 427

Architecture pittoresque. XVII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècles  
*Chalets alpins – Chalets urbains* (Françoise Hamon)..... 428

Architecture du sport et Monuments historiques  
*Monuments historiques, patrimoines et architecture des sports* (Dominique Hervier)..... 428

Muséographie. États-Unis  
*Exposer l'architecture. Le Moyen Âge dans les musées nord-américains (XX<sup>e</sup> s.)* [Fanny Fouché]..... 429

### BIBLIOGRAPHIE

Historien de l'art  
Annamaria Ducci, *Henri Focillon en son temps. La liberté des formes* (Marie Tchernia)..... 431

Architecte  
Geneviève Renaud-Romireux, *Jean-Baptiste Perlat (1814-1889). Un architecte poitevin atypique* (Étienne Vacquet)..... 432

<b>Urbanisme</b>	
Jean-François Reynaud, avec la collaboration d'Olivia Puel, <i>À la recherche d'un Lyon disparu : vie et mort des édifices religieux médiévaux du IV<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle</i> (Nicolas Reveyron).....	434
Étienne Faisant, <i>Caen, architecture à la Renaissance, 1483-1620</i> [Marion Seure (†)].....	435
<b>Architecture religieuse</b>	
Yann Codou, Catherine Poteur, Jean-Claude Poteur, <i>Églises médiévales des Alpes-Maritimes</i> (Andreas Hartmann-Virnich).....	436
<b>Castellologie</b>	
Anne-Marie Flambard Héricher, <i>Le château de Vatteville et son environnement, de la résidence comtale au manoir de chasse royal, XI<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècle</i> (Emmanuel Litoux).....	437
<b>Iconographie</b>	
Christian Heck, <i>Le retable de l'Annonciation d'Aix. Récit, prophétie et accomplissement dans l'art de la fin du Moyen Âge</i> (Piotr Skubiszewski)	438
<b>RÉSUMÉS</b> .....	441
<b>LISTE DES AUTEURS</b> .....	451
<b>TABLE DES MATIÈRES DU VOLUME 182</b> .....	455
<b>TABLE ALPHABÉTIQUE PAR NOM D'AUTEUR</b> .....	459



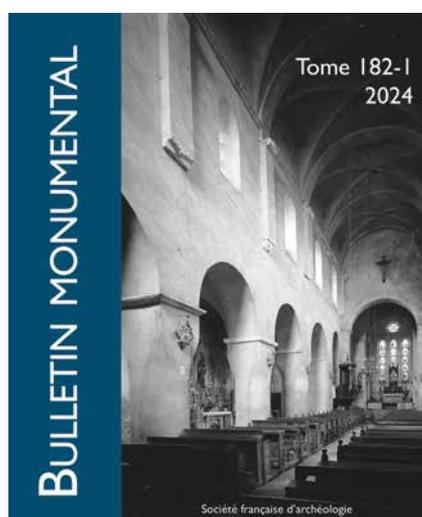
Les autres publications de la SFA sont également disponibles en vous adressant directement à la SFA

<https://www.sfa-monuments.fr/>

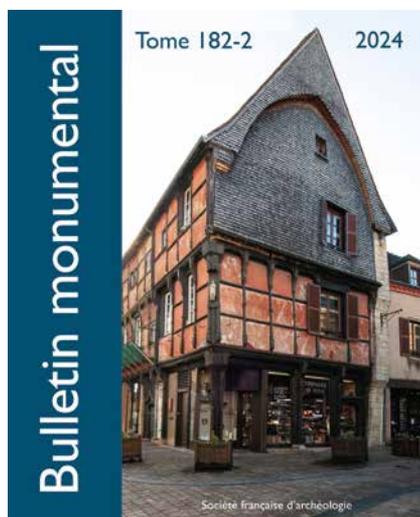
ou auprès de notre distributeur : les éditions Faton

<https://www.faton.fr/editions/sfa/>

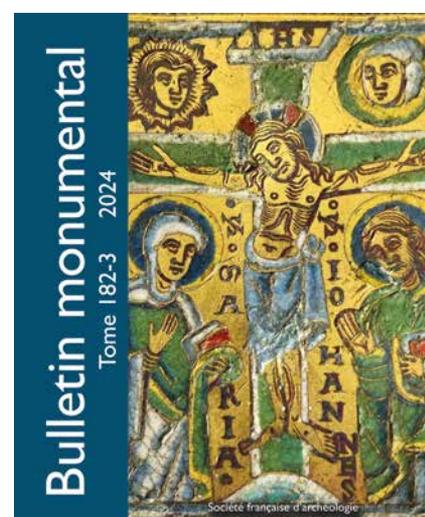
### Numéros précédents du Bulletin monumental



22 x 27 cm  
104 pages  
112 illustrations en noir et blanc et en couleur  
ISBN : 978-2-36919-205-3  
Parution : mars 2024  
Prix : 20 €



22 x 27 cm  
96 pages  
80 illustrations en noir et blanc et en couleur  
ISBN : 978-2-36919-206-0  
Parution : juillet 2024  
Prix : 20 €



22 x 27 cm  
104 pages  
101 illustrations en noir et blanc et en couleur  
ISBN : 978-2-36919-207-7  
Parution : octobre 2024  
Prix : 20 €

Bulletin monumental | Tome 182-4 | 2024

| Revue trimestrielle consacrée au patrimoine monumental  
du haut Moyen Âge à nos jours |

## Les voûtes de Notre-Dame de Paris

Sous la direction d'Yves Gallet et Élise Baillieu

Actualité

Chronique

Bibliographie



**CNL**  
CENTRE NATIONAL DU LIVRE



ISBN : 978-2-36919-208-4

**anr** ©  
agence nationale  
de la recherche

Soutenu  
par



**MINISTÈRE  
DE LA CULTURE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

25 €

<https://www.sfa-monuments.fr/>