



CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS



RECONSTRUCTION À LA SUITE
DE L'INCENDIE DU 15 AVRIL 2019

LA FLÈCHE ET LE TRANSEPT

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

(PHASE CANDIDATURE)



Fiche de renseignement

RENSEIGNEMENTS GENERAUX

- . Département
- . Commune
- . Nom de l'édifice
- . Propriétaire
- . Affectataires
- . Époques principales de construction
- . Nature, étendue et date de la protection

Seine
Paris – IV^{ème} arrondissement
Cathédrale Notre-Dame de Paris
État – Ministère de la Culture
Clergé
XII^{ème} et XIII^{ème} siècles, XIX^{ème} siècle
Classement M.H. par liste de 1862

Opération

RECONSTRUCTION DE LA CATHEDRALE NOTRE-DAME
DE PARIS A LA SUITE DE L'INCENDIE DU 15 AVRIL
2019

Sous opération n°3

La flèche et le transept

Phase étude

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES



ANNEXE – Présentation de toutes les sous-opérations liées à la RECONSTRUCTION DE LA CATHEDRALE NOTRE-DAME DE PARIS A LA SUITE DE L'INCENDIE DU 15 AVRIL 2019

Sous-Opérations anticipées		Indice
	Mutation des bases vie « propre » (BV1) et « plomb » (BV2ter)	BV
	Mutation des installations de chantier	INCH
	Décontamination 2D et aspiration 3D	2D/3D
	Dessalement des voûtes hautes	VTE
	Curage	CUR
Sous-Opérations		Indice
DCE 1	Nettoyage intérieur – Baies hautes et sacristie – Mise hors d'eau Décontamination des parements intérieurs et objets mobiliers de la cathédrale et de la sacristie - Restauration des baies hautes et des baies de la sacristie - Mise hors d'eau des parties basses de la cathédrale	DC
DCE 3	La flèche et le transept	TP
DCE 2/4	Restauration intérieure, en accompagnement des lots techniques et aménagements liés au programme / Le plateau liturgique	INT
DCE 5	Maçonneries incendiées - Grand comble- Achèvement hors d'eau (chœur et nef) Restauration des maçonneries incendiées - Reconstruction des charpentes et couvertures du grand comble - Achèvement de la mise hors d'eau des parties basses - (chœur et nef)	EXT
DCE 6	Les beffrois	BF
DCE 7	Les abords	AB



LISTE DES INTERVENANTS

Maître d’Ouvrage	ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE LA CONSERVATION ET DE LA RESTAURATION DE LA CATHEDRALE NOTRE-DAME DE PARIS Établissement public administratif, créé par la loi n°2019-803 du 29 juillet 2019 et le décret n°2019-1250 du 28 novembre 2019 2 bis Cité Martignac - 75007 Paris
AMO Plomb	ING2E Sébastien BAUDRY 56 rue de Bercy - 75012 Paris Tél. 06 76 23 92 55 E.mail : sebastien.baudry@ing2e.com
Maître d’Œuvre	Philippe VILLENEUVE, Rémi FROMONT, Pascal PRUNET, ACMH Chantier Notre-Dame de Paris Rue du Cloître Notre-Dame - Poste de sécurité - Porte P5 – 750004 Paris Tél. 01 87 76 11 63 E-mail : notre-dame@villeneuve-acmh.fr
Économiste	CAMEBAT SAS 34 rue Saint-Dominique - 75007 – PARIS Tél. 01 40 60 45 65 / 06 84 98 51 49 E-mail : camebat@camebat.fr
MOE plomb	ANTEA™ GROUP Antony Parc I – 2-6, Place du Général de Gaulle - 92160 ANTONY Tél. 06 10 77 54 53 E-mail : maria-rosa.pira@anteagroup.com
OPC	Setec Planitec BTP (en cours de renouvellement) 42-52, Quai de la Rapée CS 71230 – 75583 Paris Cedex 75012 Tél. 06 10 29 13 23 E-mail : clement.gilbert@setec.com
SPS	APAVE (en cours de renouvellement) Jacques Gameiro Tél. 06 50 03 36 12 E-mail : jacques.gameiro@apave.com





CATHEDRALE NOTRE-DAME DE PARIS – Reconstruction à la suite de l’incendie du 15 avril 2019

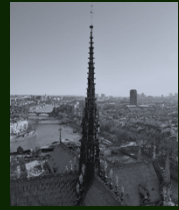
DCE 3 – *La flèche et le transept*

Philippe VILLENEUVE, Rémi FROMONT, Pascal PRUNET, Architectes en Chef des Monuments Historiques

Juillet 2021

CATHÉDRALE
NOTRE-DAME DE PARIS

RECONSTRUCTION À LA SUITE DE
L'INCENDIE DU 15 AVRIL 2019



RAPPORT DE PRÉSENTATION

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES 3

La flèche et le transept

Juillet 2021



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE
LA CONSERVATION ET DE LA
RESTAURATION DE LA CATHÉDRALE
NOTRE-DAME DE PARIS

2 bis Cité Martignac - 75007 Paris

Maîtrise d'Œuvre :

Philippe VILLENEUVE
Rémi FROMONT
Pascal PRUNET
Architectes en Chef des Monuments Historiques

Chantier Notre-Dame de Paris
Rue du Cloître Notre-Dame - Poste de
sécurité - Porte P5 – 75004 Paris
Tél. 01 87 76 11 63
E-mail : notre-dame@villeneuve-acmh.fr

Nota

Dans le rapport figure un certain nombre de renvois à des planches graphiques, annexes etc... Ces documents seront transmis aux entreprises retenues en phase offre.



Préambule

L'incendie du 15 avril 2019 a profondément meurtri la cathédrale Notre-Dame de Paris. La flèche, la totalité de la toiture, et une partie des voûtes du vaisseau principal ont ainsi disparu dans les flammes et les effondrements. Les maçonneries des parties hautes ont résisté aux destructions, mais ont été profondément altérées par le contact de l'incendie.

Les travaux de mise en sécurité de la cathédrale ont été engagés dès le lendemain du sinistre. Ils sont à l'heure actuelle toujours en cours, et leur achèvement est prévu pour juillet 2021.

Les études menées afin de permettre la restauration de l'édifice en vue de sa réouverture au culte en 2024 ont été menées parallèlement : une étude d'évaluation remise en juin 2020, ainsi qu'un diagnostic dressé en décembre de la même année ont permis de détailler les opérations nécessaires à la bonne réalisation des travaux prévus.

Dans l'objectif d'une réouverture rapide de la cathédrale, un nettoyage 2D/3D a été anticipé afin de permettre rapidement l'abaissement maximal des taux de plomb à l'intérieur de l'édifice. Ce nettoyage sera réalisé préalablement à toute autre intervention, et sera achevé en avril 2022.

La présente opération concerne la restauration du transept et de la flèche.

Elle se présente en quatre volets d'intervention :

- La reconstruction de la flèche, des toitures des bras de transept et des travées nef et chœur adjacentes à la croisée du transept ;
- La reconstruction de la voûte de la croisée et la restauration et reconstruction des voûtes des bras de transept ;
- La restauration des murs bahuts et du chemin de ronde des bras de transept et des travées nef et chœur adjacentes à la croisée du transept, compris les appuis de la flèche ;
- La restauration des pignons Nord et Sud des bras de transept.

Ce dossier de consultation des entreprises est le deuxième volet des opérations destinées à la reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris à la suite de l'incendie.



1

La reconstruction de la flèche, des toitures des bras de transept et des travées nef et chœur adjacentes à la croisée du transept



- Définition des limites de la présente opération ;
- Description de la flèche ;
- Description détaillée des toitures des bras de transept et des travées adjacentes à la flèche ;
- Interventions projetées ;
- Le levage de la charpente et la mise en œuvre de la couverture.



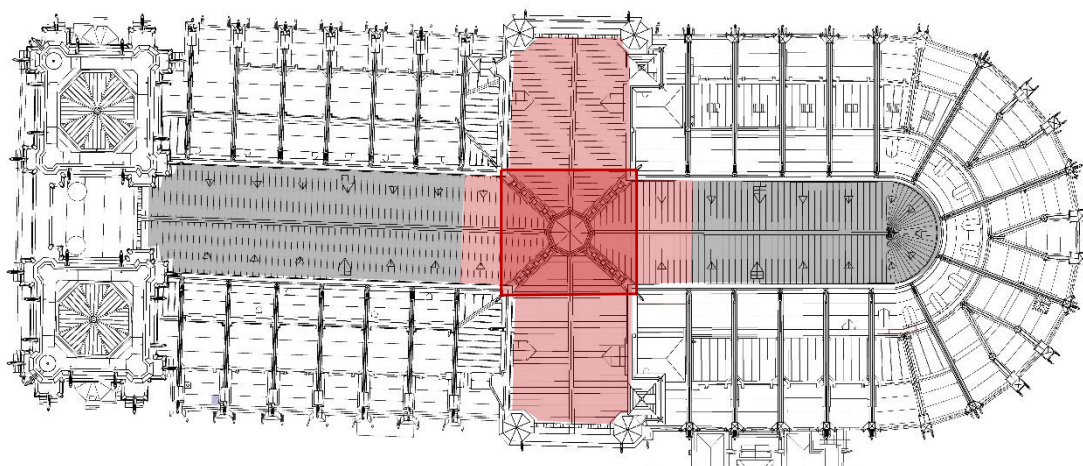
1. Définition des limites de la présente opération

La reconstruction de la flèche, des toitures des bras de transept et des travées nef et chœur adjacentes à la croisée du transept concerne la zone du comble correspondant aux charpentes qui avaient été mises en œuvre par Eugène Viollet-le-Duc au XIX^{ème} siècle. Cette zone est localisée entre les fermes FN11 et FC03, incluant les bras de transept et la flèche (en rouge sur l'illustration ci-dessous).

En effet, l'intervention d'Eugène Viollet-le-Duc au XIX^{ème} siècle sur la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris formait un ensemble cohérent, indissociable structurellement.

Dans cette logique, la CNPA qui s'est tenue le 9 juillet 2020, a opté pour un parti de reconstruction global de cet ensemble, à savoir, sa restitution à l'identique.

« La Commission nationale du patrimoine et de l'architecture approuve à l'unanimité le parti de restauration proposé consistant à rétablir l'architecture de Viollet-le-Duc, notamment en ce qui concerne la couverture et la flèche, dans le respect des matériaux d'origine : le chêne pour la charpente et le plomb pour la couverture. »



Flèche d'Eugène Viollet-le-Duc
 Charpentes d'Eugène Viollet-le-Duc
 Charpentes médiévales

Cet ensemble se compose :

- De la **flèche**, chef d'œuvre majeur de l'architecte et insigne de son intervention sur l'édifice.
- Des **charpentes du transept et des travées adjacentes à la flèche de la nef et du chœur**, cet ensemble ayant permis d'accompagner structurellement le projet de la flèche.

Les toitures des zones du chœur et de la nef dont les charpentes dataient du Moyen-Age seront traitées dans le cadre d'une autre opération (DCE 5 – Maçonneries incendiées – Grand comble – Achèvement hors d'eau (Chœur et nef)).



Pour cette zone, sont inclus dans cette étude :

- La charpente en chêne ;
- La couverture en plomb ;
- Les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales en cuivre ;
- Les crêtes de la couverture en plomb ;
- Les lucarnes et le local vitré abritant le mécanisme des horloges ;
- Les outeaux et lentilles de verre ;
- Les planchers et l'édicule des niveaux ajourés de la flèche ;
- L'escalier en vis suspendu de la flèche et les divers barreaudages d'accès ;
- Les ornements :
 - La croix en fer forgé ;
 - Le coq en cuivre surmontant la flèche ;
 - Les armatures de support (fourchettes) des statues en cuivre des apôtres, la récupération des statues à la CAPA et la repose sur site. La restauration des statues est exclue de la présente opération.
- Les passerelles du comble ;
- Les dispositifs anti-volatiles au droit de l'aiguille.

Sont exclus :

- Les horloges du transept, leur mécanisme et les cloches de la flèche et de l'oculus ;
- La restauration des 16 statues en cuivre des apôtres et des évangélistes qui était prévue avant l'incendie dans le cadre d'un marché de restauration (MOA DRAC). Les armatures support des statues (fourchettes) et la repose des statues sont incluses dans l'opération ;
- Les dispositifs de sécurité incendie active et passive du comble qui seront traités dans une opération ultérieure.

•

2. Description de la flèche

Coiffant la croisée de la cathédrale, elle-même au cœur de Paris, la flèche marquait symboliquement le centre de la capitale. Dans le paysage urbain, la flèche procurait à la cathédrale - et à ses abords - un élancement extraordinaire.

La flèche appartenait au paysage parisien au même titre que tout autre édifice emblématique de la ville. Elle donnait son caractère à la Cathédrale, classée Monument Historique et inscrite sur la Liste du patrimoine mondial en 1991 dans le cadre du site du patrimoine mondial de « Paris, rives de la Seine ».

Composition générale de la flèche

La flèche était composée selon un agencement savant, à six niveaux : une souche de forme pyramidale, émergeant des couvertures du grand vaisseau et du transept, supportait un court fût octogonal. Le fût était lui-même surmonté de deux niveaux à claire voie, sur lesquels reposait une longue aiguille. Au sommet de l'aiguille se trouvait une grande croix, ornée d'une corbeille. La composition était parachevée par un coq aux ailes déployées.

La flèche, comme les couvertures, dont elle formait le prolongement naturel, était entièrement recouverte de plomb.

La souche octogonale était éclairée sur chacune de ses faces de baies quadrilobées garnies de vitraux losangés. Les arêtes de cet octogone étaient ornées de crochets qui, prolongeant les décors des noues, contribuaient à donner un premier effet d'élancement.

Une corniche ornée de motifs floraux marquait le passage au premier étage à claire voie, constitué de huit baies géminées surmontées d'un quadrilobe et séparées par des colonnettes adossées à un petit contrefort à glacis. Un garde-corps trilobé ceinturait cette plateforme et seize gargouilles rejetaient les eaux, de part et d'autre des colonnettes.

Séparé du premier niveau par une corniche à crochets ornée de seize autres gargouilles, le second niveau était quant à lui composé de huit baies en arc trilobé, légèrement en retrait du premier niveau, séparées par des colonnettes surmontées de pinacles, placées dans le prolongement des contreforts de l'étage inférieur. Elles étaient séparées par un garde-corps à lancettes. Des gâbles à crochets, très élancés, percés au centre d'un quadrilobe, flanqué de deux trilobes et surmonté d'une petite ouverture en arc cintré, couronnaient les huit baies. Les pinacles qui s'élevaient depuis les colonnettes étaient interrompus par les moises d'une enrayure, qui, formant glacis, étaient ornées de griffons ailés. Ces pinacles étaient doublés à l'arrière par un second pinacle couronné par



La flèche vue depuis la tour Sud, juin 2013, cliché RÉA

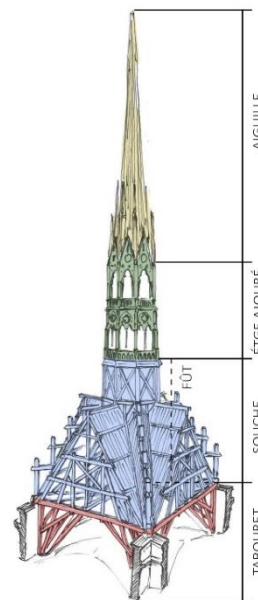
des rapaces (ou grands ducs – signature de l'architecte). Les huit arêtes saillantes de l'aiguille étaient ornées de douze crochets qui se rejoignaient au sommet, laissant s'épanouir une corbeille qui supportait une colonnette, elle-même portant la grande croix en fer forgé.

Description détaillée de la charpente de la flèche

La charpente de la flèche remplissait plusieurs rôles et fonctions. Elle était une **ossature conçue pour être stable, solide, et cohérente** en parfaite adéquation avec sa ligne architecturale. Elle formait également un ensemble **porteur de structure secondaire** (planchers, escaliers, balustrades...), **support de couverture**, et **support d'ornementations et de décors** (statues, colonnettes, gargouilles, crochets... recouverts de tables de plomb).

L'exceptionnel élanement de la flèche était rendu possible grâce à la superposition de quatre grands ensembles structurels complémentaires :

- Le **tabouret**.
- La **souche** qui assurait le raccord des quatre volumes de comble irréguliers du chœur, de la nef et des deux bras de transept pour y faire émerger un fût octogonal régulier. Dans la souche s'entrecroisaient des **fermes périphériques**, des **fermes diagonales**, et des **faitages/pan de bois**, décrits plus loin.
- Deux **étages ajourés** portés par le fût de la souche composés de baies, de colonnettes, d'arcs, et de gâbles élancés. Les poteaux arêtières, légèrement inclinés, soulignaient les arêtes de ces deux niveaux ajourés et se terminaient par deux niveaux de pinacles acérés.
- L'**aiguille** très élancée qui couronnait la flèche.

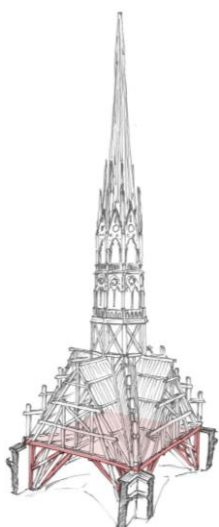


La charpente de la flèche est le fruit d'une étroite collaboration entre l'architecte Eugène Viollet-le-Duc, son maître charpentier Auguste Bellu et le compagnon charpentier « gâcheur » (chef de chantier) Henri Georges dit Angevin, l'enfant du Génie. Elle est indissociable de l'Art du Trait, art du tracé en charpenterie, inscrit par l'Unesco depuis 2009 sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'Humanité. Le tracé géométrique complexe où s'entrecroisent et s'assemblent plusieurs éléments d'ossature dans plusieurs plans de références, forme une épure qui permet de déterminer les coupes et longueur de chaque pièce qui compose la structure.

L'épure de la flèche est complexe pour plusieurs raisons :

- La flèche est implantée sur la base d'un trapèze irrégulier ;
- Elle raccorde des volumes de combles de différentes largeurs ;
- Elle forme la jonction entre la nef et le chœur dont les axes ne sont pas alignés entre eux (ils ont une légère inflexion). Le même constat est fait sur les deux bras de transept
- Elle s'appuie sur des murs gouttereaux qui ne sont ni parallèles ni perpendiculaires entre eux et dont les hauteurs d'arases diffèrent ;

Le tabouret



Le **tabouret** au large empâtement situé au revers des murs bahuts de la croisée du transept permettait d'asseoir la souche en enracinant efficacement la flèche à son socle de maçonnerie (les tas de charges de la voûte de la croisée du transept et les angles des murs bahuts).

Il était composé :

- De deux poutres diagonales composées de trois niveaux de poutres courbes superposées
- De quatre piètements composés
- Du plan d'enrayure du tabouret de la flèche (ou premier plan d'enrayure de la flèche)

Poutres diagonales courbes composées

Les deux poutres diagonales étaient composées de trois niveaux de poutres courbes superposées portées par les quatre angles des murs bahuts.

Chaque niveau de poutre était constitué de plusieurs éléments aboutés entre eux au moyen d'enture en trait de Jupiter à tenon (sans clef). Les joints des poutres s'entrecroisaient d'un niveau à l'autre. Les éléments de poutre des trois niveaux étaient unifiés et serrés ensemble par plusieurs boulons verticaux répartis sur la longueur de la pièce.

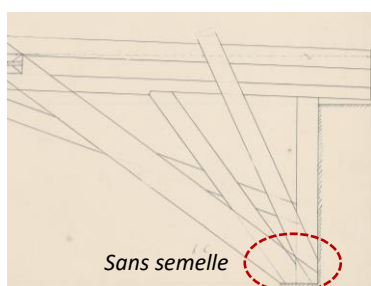
Les deux poutres diagonales, d'une longueur de 21 et 22m, avaient une contre-flèche de 40 cm en leur milieu. L'intersection des poutres à cet endroit s'effectuait par le croisement alterné des éléments de poutre d'un niveau à l'autre (le détail de ce nœud d'assemblage reste encore à préciser et à définir).

Les poutres reposaient sur de larges et courtes semelles posées à plat sur les rehausses des angles de mur. Elles étaient assemblées entre elles par une coupe à onglet avec un tenon mortaise à la manière d'une rainure et languette.

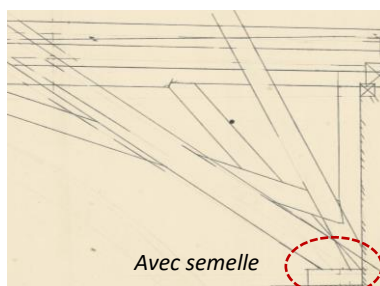
Les doubles cours de sablières des charpentes des combles avoisinants semblaient venir buter en coupe sur les rehausses d'angle de mur et sur les larges semelles. Les extrémités des poutres diagonales composées étaient tenues sur leur plan horizontal par les poutres entrants moisées des fermes périphériques qui étaient assemblés en double tenon mortaise avec mordâne. Ces assemblages à tenon mortaise n'étaient pas chevillés, mais maintenue par un boulon qui traversait dans les angles pour maintenir l'ensemble.

Piètements composés

Les piètements semblaient reposer directement sur les tas de charges des voûtes de la croisée, seul un des plans de construction du tabouret de Bellu pourrait laisser penser que les piètements



Sans semelle



Avec semelle



A gauche et au milieu : dessins des piètements du tabouret (plans de construction de Bellu, 1858)

reposaient sur une semelle de répartition. La voûte de la croisée a été dégagée des vestiges mais le plomb fondu accumulé dans ses pieds de gerbe ne permet pas de vérifier la présence avant incendie de ces semelles en pied de poteaux.

Chaque piètement était constitué :

- D'un poteau,
- D'une croix de potence, assemblées dans le 1er niveau de poutre en tenon mortaise avec embrèvements
- De grandes contrefiches moisées se profilant jusqu'au 2ème niveau ajouré, assemblées en double moisement dans les trois niveaux de poutres superposées
- De jambes de force pentagonales moisées reprenant le pied des poteaux-arêtières du fût octogonal
- De croix de Saint-André à dévers qui s'assemblaient à tenon-mortaise sur les jambes de force pentagonales moisées, en coupe et barbe dans les grands goussets de l'enrayure et à mi-bois avec embrèvement entre elles.

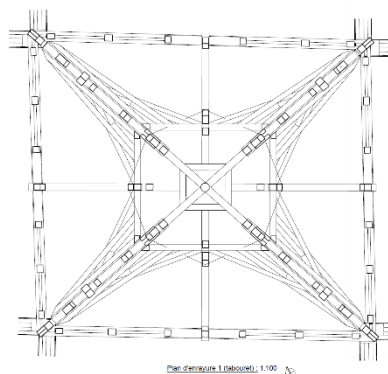
Les têtes des branches de croix des potences, les jambes de forces pentagonales moisées, et les contrefiches moisées soulageaient la portée libre des poutres diagonales. La triangulation des piètements contreventait les poutres diagonales dans leurs plans verticaux.



A gauche : Photographie des croix de Saint-André à dévers avant l'incendie – A droite : photographie des vestiges
Plan d'enrayure du tabouret (ou premier plan d'enrayure de la flèche)

Il était constitué :

- De deux rangées de goussets (quatre petits et quatre grands goussets) qui contreventaient le tabouret dans le plan horizontal
- Des quatre entrails moisés des fermes périphériques
- Des quatre poutres sommiers des faîtages/pans de bois qui étaient assemblées d'un côté dans le petit gousset de l'enrayure, reposaient sur le grand gousset de l'enrayure au tiers de leur portée et venaient enfin reposer à leur extrémité sur les entrails des fermes périphériques au moyen d'une semelle épaisse posée à plat entre les poteaux latéraux.

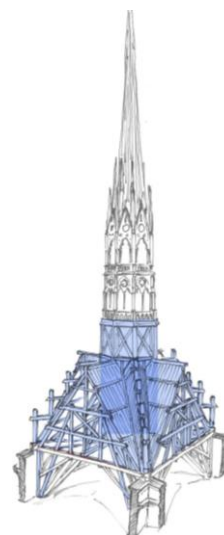


Les divers plans de contreventement du tabouret -horizontaux, verticaux, et obliques- en faisaient un ensemble homogène, cohérent et indéformable.

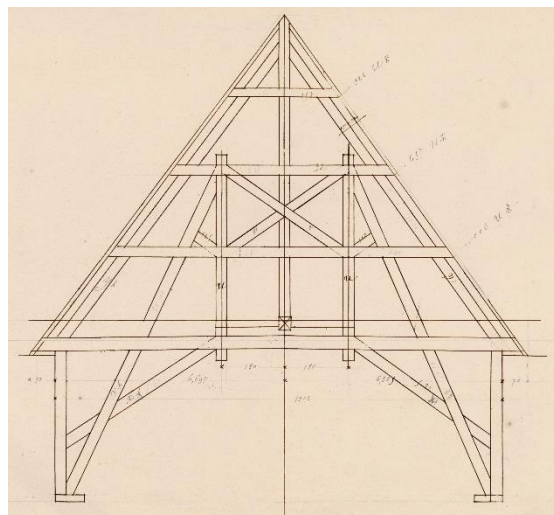
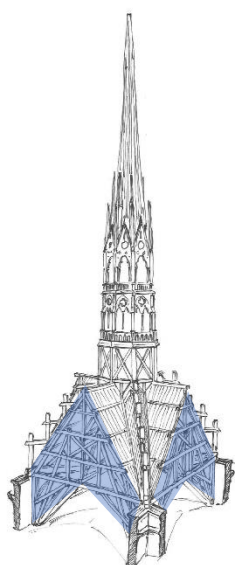
La souche

La souche de la flèche, à l'instar de la souche d'un arbre, formait le socle où débutait véritablement la superstructure de la flèche et où s'unissaient les quatre branches des combles de la nef, du chœur, et des bras de transept nord et sud.

La souche était composée de six sous-ensemble : les fermes périphériques, les fermes diagonales, les faîtages/pan de bois, le fût, les noues, et le poinçon (sorte de colonne vertébrale de la flèche) que nous décrivons ci-après.



Les fermes périphériques

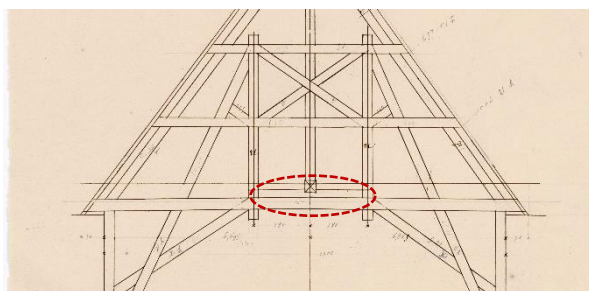


Dessin de la ferme périphérique de la nef (Plan de construction de Bellu, 1857)

Les quatre **fermes périphériques** délimitaient l'emprise de la flèche ; leurs lignes d'épures correspondaient à celles des travées des fermes des charpentes qui s'y raccordaient. Ces fermes ceinturaient la souche et reprenaient d'importants efforts au droit de leur poinçon, ce qui leur octroyait un rôle structural important au sein de la souche. Elles prenaient appui à la fois sur les angles des murs bahuts, de part et d'autre des poutres diagonales, et sur les tas de charge des arcs doubleaux de la croisée.

Les grandes dimensions des poutres/entrails avaient amené à devoir rallonger les moises au moyen d'entures en trait de Jupiter a tenon (sans clef) : les joints des entures étaient croisés au niveau des jambes de force pour assurer une continuité.

Une **semelle épaisse** posée sur le dessus des entrails moisés, et en enfourchement dans les poteaux latéraux, permettait de reprendre et de répartir les charges importantes du faitage pan de bois. La semelle était également nécessaire pour reprendre efficacement les charges de compressions du système de poutre portique.

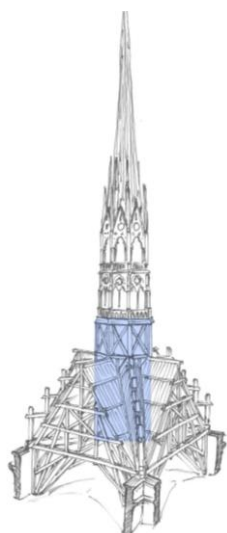


Localisation de la semelle épaisse sur la ferme périphérique de la nef (Plan de construction de Bellu, 1857)



Photographie avant incendie de la semelle épaisse

Le fût octogonal



Le **fût** est la partie octogonale centrale de la souche où se raccordaient les huit éléments principaux qui structurent la souche : les quatre demi-fermes diagonales et les quatre faitages/pan de bois (situés dans les axes des faitages des combles avoisinants).

Cet octogone était inscrit dans un cercle d'un diamètre de 7,44 m, tracé sur le plan fictif horizontal à 52cm au-dessus du plan de ramèneret¹. Les arêtes de l'octogone étaient délimitées par huit **poteaux arêtières** de près de 28m de haut², inclinés vers le sommet de l'aiguille et situés à l'intersection entre le cercle et les axes des faitages et les diagonales. Les lignes d'axes des faitages n'étant pas perpendiculaires entre elles, l'octogone de la flèche comportait donc des faces et des angles irréguliers. Le différentiel entre la face la plus large et la face la plus étroite de l'octogone, mesuré à la base du tracé (pour une largeur moyenne de 2,85 m) était de 43,49 cm. Ce différentiel était proportionnel sur toute la hauteur de la flèche, mais n'était pas perceptible à l'œil nu car la modénature et la richesse des décors estompaient ces différences de largeur.

Les pieds des **poteaux arêtières double** et les **poteaux arêtières simples** étaient dotés de tenons juste engagés dans des mortaises de positionnement situées dans les axes des poutres diagonales et les axes des poutres-sommier des faitages/pan de bois : les arasements des tenons n'étaient pas en contact avec les mortaises. En effet, afin de ne pas faire supporter les descentes de charges des poteaux arêtières sur les poutres diagonales, et sur les poutres sommier des faitages/pan de bois, un jeu volontaire d'environ 4 cm avait été étudié. Les descentes de charge de la flèche transitaient

¹ Plan de référence chez les charpentiers. Le plan de ramèneret décrit ici est celui représenté dans les plans d'exécution du charpentier Bellu conservés à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine.

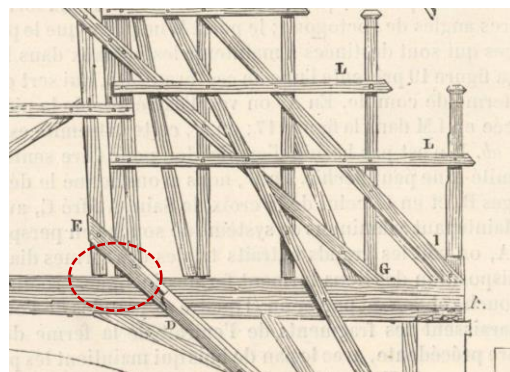
² Pour satisfaire le besoin de ces grandes longueurs, les poteaux/arêtières doubles et simples ont été réalisés en trois ou quatre éléments aboutés entre eux, avec des entures de type trait de Jupiter de menuisier avec tenon renforcés par deux boulons.

donc par les contrefiches, décharges et jambes de force pentagonales moisées auxquelles les poteaux arêtières étaient assemblés.

Les enrayures des 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} niveaux s'inscrivaient dans le volume du fût. D'un niveau à l'autre, les entrails étaient tantôt positionnés dans l'axe des diagonales tantôt positionnés dans l'axe des faîtages. L'orientation alternée des structures d'enrayure permettait alors de rigidifier la structure pour éviter d'éventuels mouvements de torsion de l'ensemble. Le fût octogone était également contreventé par un double cours de croix de St André, placées dans les chambrées des poteaux/arêtières, sur deux niveaux (entre la 2e et la 4e enrayure) sur toutes les faces de l'octogone.



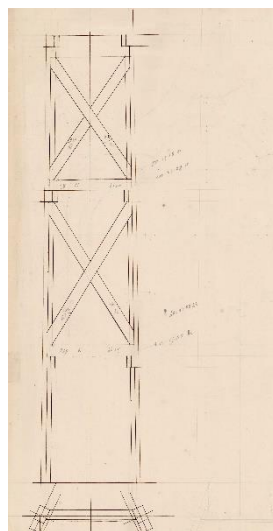
Photographie avant incendie des pieds de poteaux.



Jeu entre les pieds des poteaux et la poutre diagonale. (Dictionnaire raisonné de l'architecture, Viollet-le-Duc, 1861)



Photographie du fût avant l'incendie



*Elévation et plan des assemblages du fût
(Plans de construction de Bellu, 1858)*



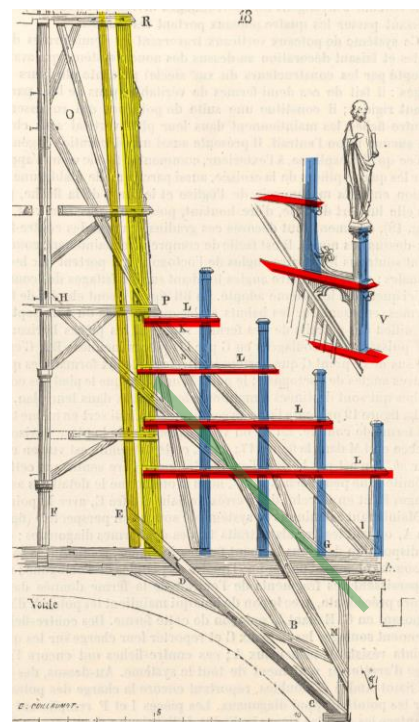
Les demi-fermes diagonales

Les quatre **demi-fermes diagonales**, dont les structures imposantes émergeaient du volume des toitures, marquaient les axes diagonaux des noues/arêtiers. La structure des **demi-fermes diagonales** était très dense, et s'assimilait à la structure d'un pan de bois. Chaque demi-ferme était rythmée par quatre poteaux desquels émergeaient les statues. Quatre niveaux de moises étagés maintenaient les poteaux.

Les poteaux et leurs moises (qui dépassaient de la toiture) étaient disposés en gradins et formaient les arcatures ajourées qui mettaient en scène la série des quatre statues.

La hauteur des poteaux était progressive et régulière, l'alignement des têtes de poteau étant sensiblement parallèle à la pente de l'arêtier/contrefiche.

L'arêtier/contrefiche remplissait deux fonctions : il contrebutait la flèche, et il unifiait les moises et poteaux des arcatures ajourées.



Assemblage des poteaux et de l'arêtier des gradins du fût (Dictionnaire raisonné de l'architecture, Viollet-le-Duc)

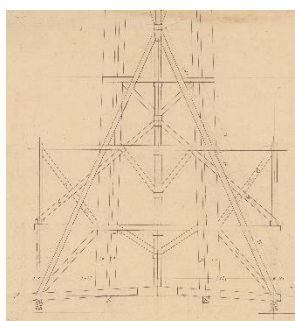
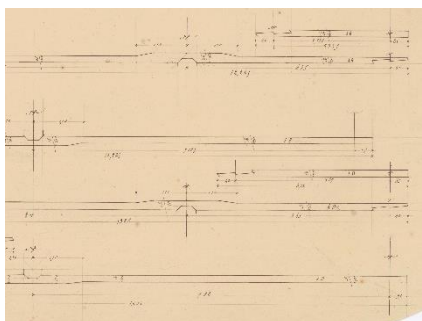
■ Moises ■ Poteaux ■ Poteaux/Arêtiers
■ Arêtier/contrefiche

Le faîtage/pan de bois

Les deux **faîtages/pan de bois** étaient positionnés sur les axes Est/Ouest, et Nord/Sud de la flèche.

Ces deux ensembles transversaux prenaient appui sur une poutre sommier portée par les fermes périphériques d'une part et les goussets du tabouret d'autre part. Les faîtages et sous-faîtage étaient moisés, leur longueur étant importante, ils étaient réalisés en deux pièces aboutées à joints alternés. Les entures étaient à trait de Jupiter (à champ) avec clef, renforcée par deux boulons.

La disposition des éléments de l'ossature des faîtages/pan de bois situés de part et d'autre du fût de la flèche contreventait la flèche sur la hauteur de la souche.



A gauche : Joints alternés des sous-faîtages (Plans de construction de Bellu, 1857) – A droite : Photographie d'un joint de sous-faîtage avant l'incendie.

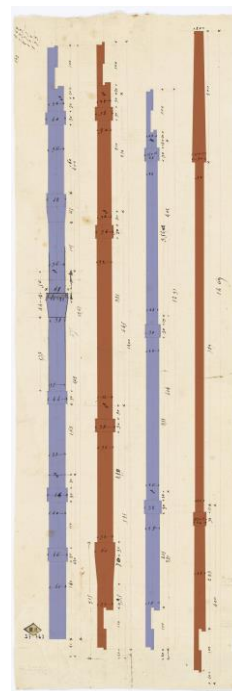
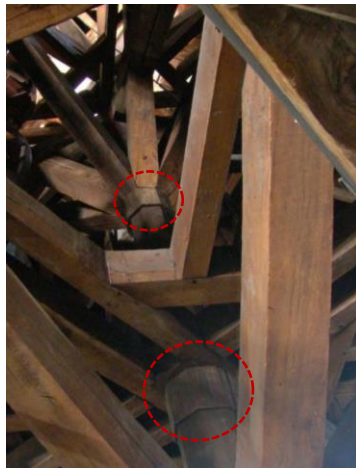
Le poinçon central

Le **poinçon**, sorte de colonne vertébrale de la flèche, mesurait près de 52 m de longueur et était constitué de quatre éléments de 13 à 14 m chacun, aboutés entre eux par des entures en trait de Jupiter de menuisier. Les entures étaient situées à environ 50cm au-dessus des 4^{ème}, 7^{ème}, et 10^{ème} enrayures.

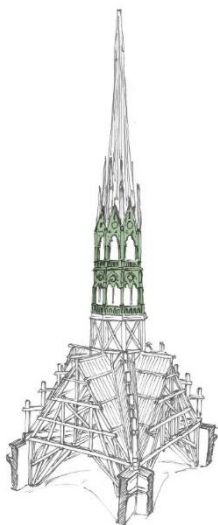
Les sections octogonales du poinçon étaient dégressives sur la hauteur de la pièce : 46 x 46cm au plus large, au niveau du 1^{er} bossage et 20x20cm au sommet support de la croix.

Des bossages octogonaux rythmaient la pièce afin de porter les niveaux d'enrayure et de recevoir les contrefiches qui venaient y buter.

*A gauche : Photographie du poinçon central et des bossages
A droite : Plan du poinçon et de ses éléments aboutés (Plans de construction de Bellu ; 1857)*



Les étages à claire-voie

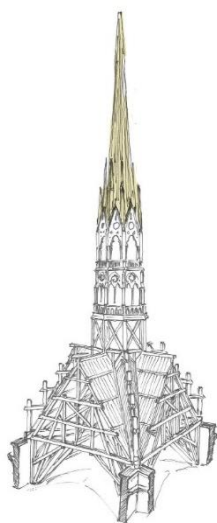


Les deux étages à claire-voie se situaient entre les 4^{ème} et 6^{ème} enrayures, dans le prolongement du fût octogonal qui émergeait de la souche.

Ces deux niveaux étant ajourés, ils étaient donc moins denses structurellement que les autres parties de la flèche, et étaient également plus délicates à traiter en termes d'étanchéité, pour lui assurer la pérennité dans le temps.

A ce niveau, ossature principale et structure secondaire se confondaient pour former la riche ornementation composée de colonnettes, garde-corps, gâbles et baies géminées.

L'aiguille



L'aiguille constituait la partie sommitale de la flèche. Sa structure débutait au niveau de la 6^{ème} enrayure et se terminait sur le dernier élément du poinçon auquel était fixée la croix surmontée de son coq en girouette. Sur la 6^{ème} enrayure étaient fixés les huit gâbles et leurs 16 noulets, les pieds d'arêtiers étaient quant à eux assemblés en coupe sur la face intérieure des poteaux/arêtiers simples. La 7^{ème} enrayure permettait d'assembler les huit petits faitages des gâbles avec leurs noulets, et de recevoir les huit départs de noues placées en fort retraits.

L'alternance des noues, en fort retraits par rapport aux arêtiers, accentuait l'élancement et la légèreté de l'aiguille bien nommée.

Les enrayures 7 à 11 étaient constituées de deux petites enrayures à quatre branches assemblées l'une sur l'autre, avec un décalage de 45° qui formaient alors une étoile à huit branches.

Des éléments de contreventement de types petites contrefiches et petites jambes de force se croisaient et se chevauchaient, aux différents niveaux des enrayures, et des bossages du poinçon, afin de consolider l'ensemble de l'aiguille.



Photographie de l'aiguille de la maquette des compagnons du devoir (1970)

Description détaillée du second œuvre et de la couverture de la flèche

La flèche d'Eugène Viollet-le-Duc était intégralement recouverte de plomb et ornée d'un riche décor conçu dans ce même matériau.

Ce chapitre décrit en détail les différentes parties composant la flèche, en rappelant leurs dispositions, la mise en œuvre de l'habillage en plomb et la gestion des eaux pluviales.

Les défauts de conception éventuels, observés au travers des différentes campagnes de travaux, sont également évoqués.

Cette présentation s'organise, du bas de la flèche, vers son sommet. Ainsi, sont détaillés, dans l'ordre :

- La couverture :
 - du fût de la flèche (compris les quadrilobes),
 - des deux niveaux à claire-voie,
 - de l'aiguille,
 - des noues.
- Les accès aux différents niveaux de la flèche :
 - L'escalier,

- Les planchers intermédiaires,
- Les barreaudages d'accès aux niveaux les plus hauts.
- Les ornements :
 - Les griffons, les grands ducs et les gargouilles,
 - Les crochets,
 - Les pinacles et fleurons,
 - Les chapiteaux,
 - Les frises,
 - Les voussures de baies du 1^{er} étage.
- Les statues des apôtres et évangélistes.
- La couronne, l'embase, la croix et le coq et ses reliques.
- L'horloge des bras de transept et les cloches de la flèche.

La couverture de la flèche

Le fût de la flèche

La base de la flèche, émergeant de la croisée du transept, se composait d'un fût octogonal plein, éclairé, sur chaque face par une baie quadrilobée, assurant la pénétration de la lumière naturelle à l'intérieur des combles. A chaque angle, ce fût était flanqué de pilastres, ornés de crochets sur leurs faces principales. Le support de couverture du fût se composait d'un voligeage, posé verticalement. Le fût de la flèche était habillé d'un revêtement en plomb posé en fougères, selon une composition axiale. Le contour de l'oculus quadrilobé était traité en relief par rapport au nu de chacune des huit face du fût.

Cette technique, soignée et esthétique, répondait à une nécessité de pérennité de l'ouvrage en limitant l'arrachement des feuilles de plomb du fait de leur poids.

Cette mise en œuvre est décrite dans l'article « *Les couvertures en plomb* » rédigé en 1866 par l'ingénieur C. Détain et publié dans la Revue générale de l'Architecture et des Travaux publics. Chaque feuille de plomb, de petite dimension, était assemblée aux autres, sur toute sa périphérie, par des joints enroulés, dans lesquels se trouvent des pattes en cuivre étamé clouées sur le bois des parois.

Dans l'axe des noues et des faîtages du grand comble, des pilastres particulièrement saillants, marquaient les angles du fût de la flèche. Ils correspondaient, en charpente, aux contreforts qui venaient en applique contre les poteaux arêtières « extérieurs ».

Leurs faces principales étaient ornées de trois crochets s'échelonnant, à intervalles réguliers, sur la hauteur.



Vue des tables de plombs posées en fougère de l'une des faces du fût (photographie agence Philippe Villeneuve, 2013)

L'habillage en plomb des pilastres se décomposait d'une succession de trois feuilles venant en recouvrement de celles en fougères des parois. Seules les pattes maintenant les feuilles sur la chambrée des bois, en cuivre étamé, étaient visibles.

Les baies quadrilobées

Chaque face du fût était percée, en partie haute, d'une baie quadrilobée. Leur forme était identique à celle des ouvertures en partie basse des abat-sons des beffrois des tours, mis en œuvre par Eugène Viollet-Le-Duc, elles-mêmes inspirées des baies du massif occidental. Ces huit ouvertures assuraient l'éclairage des combles de la souche et de l'escalier conduisant à la première plateforme extérieure de la flèche.

Ces ouvertures étaient garnies de vitraux losangés blancs, montés sur une ossature métallique. Celle-ci se composait d'un cadre périphérique faisant office de barlotière, d'un feuillard formé de huit pièces distinctes et de deux vergettes. L'ensemble, vissé sur la volige, était monté de façon à permettre une dépose extérieure des panneaux de vitraux.

La moulure périphérique en bois était habillée en plomb repoussé. La table de plomb était maintenue à l'extérieur par des pattes en cuivre étamé, et rabattue à l'intérieur sur la volige et clouée sur la tranche. L'ensemble était mis en œuvre sous les feuilles de plomb posées en fougères en partie haute, et en recouvrement en partie basse. L'intersection de cette moulure et du motif en fougère des élévations n'était pas strictement identique sur l'ensemble des faces. Cette légère variation de dessin était probablement liée à la géométrie légèrement irrégulière de la flèche telle que nous l'avons décrite précédemment.

L'observation de photographies avant incendie, montre que de nombreuses infiltrations, en partie basse des quadrilobes altéraient la volige, ainsi que les bois de charpente situés à l'aplomb.

Plusieurs de ces armatures, en assez bon état ou profondément déformées, furent retrouvées dans les décombres de l'incendie.

Les deux niveaux à claire-voie

Les deux niveaux à claire-voie étaient composés de façon identique : une corniche à frise supportait le garde-corps à arcature et lisse. Largement ajourées, les huit faces de la flèche se découpaient en huit arcades. Aux angles des corniches de plan octogonal, deux gargouilles à tête de chien servaient d'exutoires.

Les arcades du premier niveau étaient recoupées d'un réseau de plomb composé de deux lancettes et surmonté d'un quadrilobe, tandis que celles du second niveau étaient plus étroites. Elles comptaient une seule lancette coiffée d'un trilobe, au-dessus duquel s'élevait un gâble orné de deux trilobes, d'un quadrilobe et d'une lancette, tous aveugles. Les rampants étaient ornés de crochets et d'un fleuron.

A la base du 2^{ème} niveau, des piques en fer anti-intrusion ont été installés, dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Elles étaient fixées par cerclage autour du pied des balustrades.



*Les deux niveaux à claire-voie
(Photographie de Loyer De Graaf, 2015)*

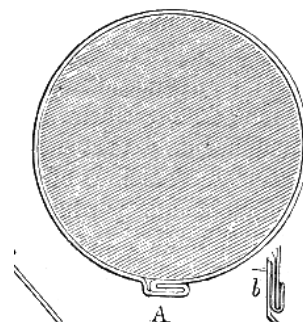
Aux angles de l'octogone, s'élançaient les hauts poteaux arêtières verticaux de la charpente. On distinguait deux types de poteaux distincts :

- Le premier, disposé à l'intérieur, s'élevait jusqu'au 13^{ème} crochet de l'aiguille. De section carrée, le poteau arêtier était pourvu de colonnes engagées au droit des lancettes du 2^e niveau. L'extrémité adoptait la forme d'un haut pinacle pourvu de crochet et coiffé d'un aigle.
- Le second, disposé à l'extérieur, s'élevait à un niveau médian entre le fleuron du gâble et l'aigle du premier poteau arêtier. Au premier niveau de la flèche, il adoptait la forme d'une colonne engagée sur un puissant pilastre. De part et d'autre, les colonnettes engagées de l'arcade complétaient la composition. Au-dessus du chapiteau, le pilastre se poursuivait jusqu'au deuxième niveau. Il adoptait une forme de colonne soutenant un haut pilastre décoré de crochets et d'un griffon ailé. Chacun des pinacles était maintenu par deux pièces de bois transversales, également habillées de plomb.

En termes d'usage, le premier niveau servait de palier haut à l'escalier hélicoïdal, tandis que le second niveau abritait les trois cloches de la grande sonnerie.

A l'intérieur des deux plateformes ouvertes, les bois étaient entièrement habillés de plomb. Chacune des pièces de bois composant ces deux niveaux à claire-voie étaient habillées par des feuilles de plomb fixées par pinces en cuivre étamé ou double agrafure.

La complexité de l'habillage en plomb de ces deux niveaux et les choix esthétiques du nombre de feuilles de plomb, limitant le découpage lors de la construction de la flèche en plusieurs parties des ouvrages (fûts de colonnes, etc.) entraîna très vite l'apparition de désordres.



En 1885, plusieurs rapports révèlent l'apparition de déchirures et la transformation en poudre blanchâtre des tables de plomb habillant les colonnettes isolées supportant les arcatures de la première galerie, quelques points des arcatures et balustrades des deux niveaux, les gâbles du second niveau et la partie haute des pinacles. L'emploi de trop grandes feuilles de plomb, incompatibles avec la dilatation de ce matériau en est la raison principale.

Le rapport dressé par l'entreprise Monduit fils, en 1885, à l'attention de M. Bailly, architecte des édifices diocésains, dans le cadre de l'appel d'offre lancé pour la restauration de la flèche, explicite ces désordres³ :

« La cause première des dégradations de certaines plomberies de la flèche est leur manque de dilatation. Toutes les plomberies qui ont été posées à dilatation libres sont et resteront intactes; celles qui au contraire ont été posées sans dilatation (et heureusement elles constituent des exceptions) se sont altérées, oxydées d'abord et carbonatées ensuite au contact du chêne sous l'influence de l'humidité atmosphérique (eau de pluie ou eau de condensation). »

« Une fois que le plomb s'est déchiré par suite d'un manque de dilatation, l'eau de la pluie s'est introduite par les cassures du métal entre le plomb et le chêne et a produit en agissant simultanément sur le chêne et sur le plomb la carbonisation du plomb. D'une part, en effet, l'eau de pluie, en mouillant le chêne, redonne une certaine énergie à des propriétés nuisibles et d'autre part

³ Archives nationales, F₁₉8041

elle a sur le plomb une action oxydante très sensible qui est sans effet fâcheux dans les conditions ordinaires, mais qui devient dangereux en présence des acides du chêne humide.

C'est encore l'eau de pluie qui, dans les mêmes conditions, a amené la détérioration des colonnettes supportant les arcatures de la 1re galerie ; car le plomb qui recouvre le fût de ces colonnettes ne remontant pas assez haut sous le chapiteau, l'eau s'est infiltrée librement entre ce plomb et la bague du chapiteau. En outre, à l'intérieur de certains plombs privés de dilatation, ceux par exemple qui recouvrent les arcatures et les pinacles des deux galeries, il se forme, ainsi qu'en un véritable vase clos, une condensation assez intense qui se dépose à la fois sur le plomb et sur le chêne et qui a sur eux une action absolument semblable à celle que je viens de reconnaître à l'eau de pluie. Il est facile de se convaincre de l'existence de cette condensation. Lorsqu'en effet on relève le métal qui enveloppe hermétiquement certains bois de la flèche, on trouve fréquemment, surtout le matin et le soir, une humidité abondante qui ne peut provenir que du refroidissement de la vapeur d'eau enfermée à l'intérieur des plomberies. »

Des travaux, sur la base de ces observations, sont conduits par cette même entreprise. Ils ont pour objectif de corriger ces défauts de mise en œuvre pour stopper la dégradation des plombs par la multiplication des feuilles destinées à habiller les ouvrages et donc la diminution des surfaces de chacune, propice à la dilatation du matériau. De plus, pour limiter les entrées d'eau, certains recouvrements furent revus à la hausse.

Ainsi, la partie supérieure des gâbles sera composée de « *tables de plomb une hauteur moitié moindre de celle qu'elles ont actuellement afin d'avoir un joint horizontal au-dessus de chaque rangée de crochets en plomb. En outre, au lieu de ne faire qu'une seule agrafure, j'en établirais deux comme cela existe déjà au-dessous du gable.* » Au droit des colonnettes du premier niveau, le recouvrement des chapiteaux fut, quant à lui, augmenté. Ces modifications avaient vraisemblablement permis de résoudre les problèmes rencontrés puisque ces parties ne présentaient plus de dilatations ou de déformations anormales.

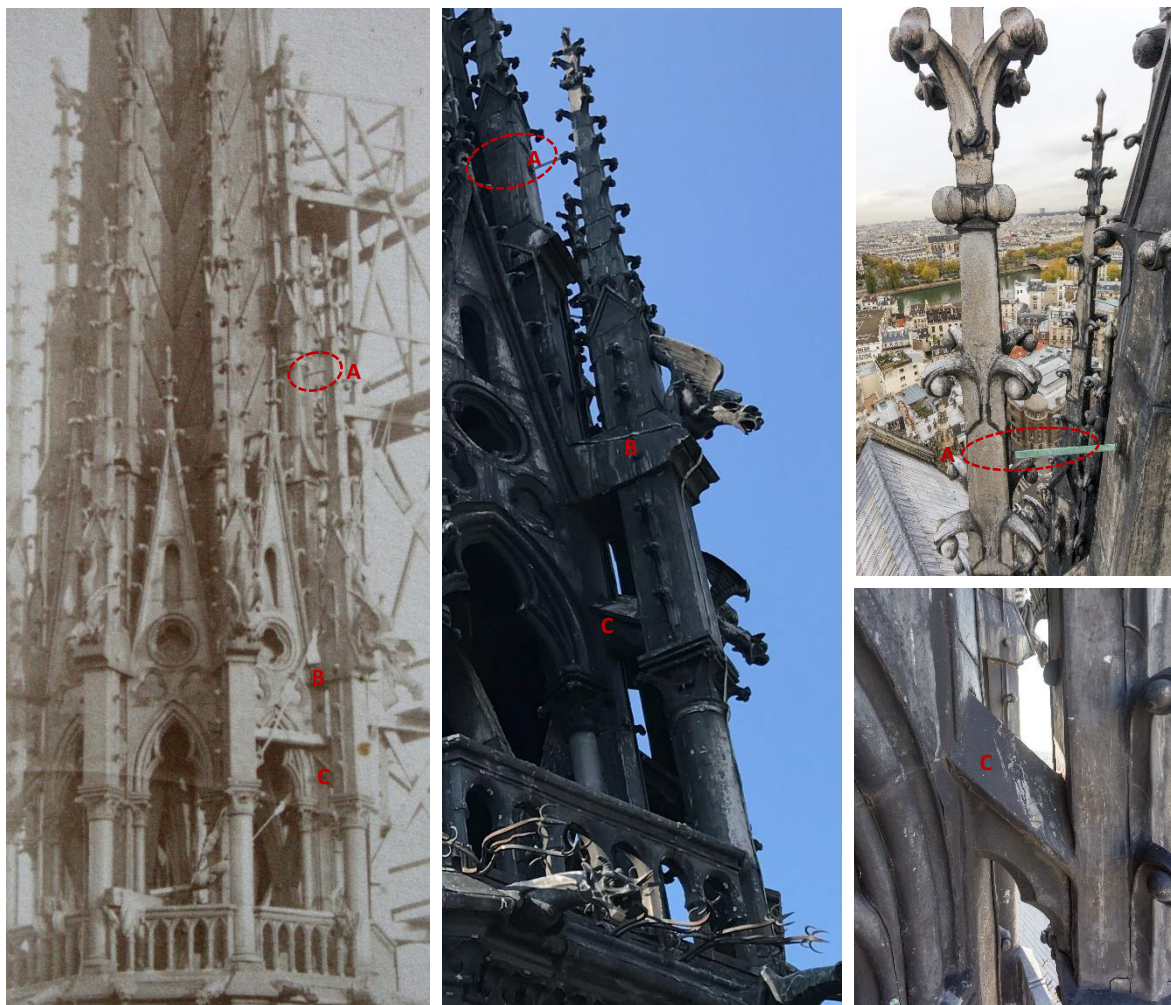
Les renforts des bois de charpente isolés

La légèreté de la flèche est obtenue visuellement par le traitement en retrait du deuxième niveau à claire-voie, l'achèvement du poteau d'arêtier, étant traité à cet étage, comme une colonne « isolée » et, par l'élancement des pinacles achevant les deux poteaux arêtiers (intérieur et extérieur).

Pour assurer la rigidité de l'ensemble et éviter le déversement de ces ouvrages, des « colliers en cuivre méplat (...) avec trois boulons bronze et deux tirefonds » furent « posés avec cales en cuivre et en plomb ». (Ci-contre, photographie de Loyer De Graaf, 2015). Si ces ouvrages sont cités dans l'attachement du 25 janvier 1936 de l'entreprise Philippe Monduit, ils ne semblent pas exister sur les photographies précédents cette campagne de travaux.



Des entretoises en cuivre relient également en tête, le pinacle extérieur à celui intérieur (A sur photographies ci-dessous). Le même devis signale le remplacement de ces renforcements, originellement en fer. Enfin, en partie basse, ce pinacle extérieur était maintenu par moisage des bois de l'enrayure n°6 (B) et une pièce de décor, entre le poteau arêtier intérieur et extérieur, placée au-dessus du chapiteau achevait de raidir l'ensemble (C).



A gauche, vue de la flèche lors de la campagne de travaux des années 1880-1890 (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Photothèque, boîte rouge 3, n°14096B [clichés RÉA]) Au centre et à gauche, détails de la partie haute du pinacle extérieur (photographie agence Philippe Villeneuve et Loyer De Graaf, 2015)

La gestion des eaux pluviales

Les deux plateformes extérieures de la flèche, largement ouvertes, étaient soumises aux intempéries. Le sol couvert de plomb était pourvu de formes de pente guidant les eaux jusqu'aux gargouilles placées au droit des huit angles. Ces plateformes déversaient les eaux directement dans les noues situées à l'intersection des couvertures du comble.

Au droit du premier étage, le vide entre les grandes contrefiches est habillé de plomb, permettant l'écoulement des eaux pluviales sur le sol de la terrasse. Ce dernier se compose d'un ressaut.

La plateforme du second étage, dont le point culminant correspondant au poinçon, se composait de trois ressauts parallèles aux garde-corps. Les recouvrements horizontaux ou « baguette de dilatation »⁴ longeaient la ligne reliant le centre aux angles de la plateforme.

⁴ Devis de M. Rattier du 28 juin 1928 - [Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives, 81-75-04-0009, article 23, dossier 17]

L'aiguille de la flèche

La partie haute de la flèche comptait huit faces, alignées sur celles des étages à claire-voie et du fût. Chacune des faces était constituée d'une noue, formant un angle rentrant et, de deux arêtes saillantes de part et d'autre. Les arêtes étaient ornées de 13 crochets chacune (dont un tronqué, placé à l'arrière des aigles des pinacles).

Le support de couverture de l'aiguille était composé de voliges jointives, clouées en diagonal sur les bois de charpente formant les noues et les arêtières. Leur mise en œuvre, lors de la construction de la flèche, s'opéra après la pose des fourchettes, supports des crochets (ces derniers sont traités en détail dans le chapitre « ornements »). La volige venait en recouvrement de la partie assurant la fixation de l'armature du crochet sur la charpente.



A gauche, croquis en marge du 20 juillet 1859, du « *Journal des travaux de Notre-Dame de Paris* » (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine) - A droite, vue intérieure du voligeage (Photographie Loyer De Graaf, 2015)

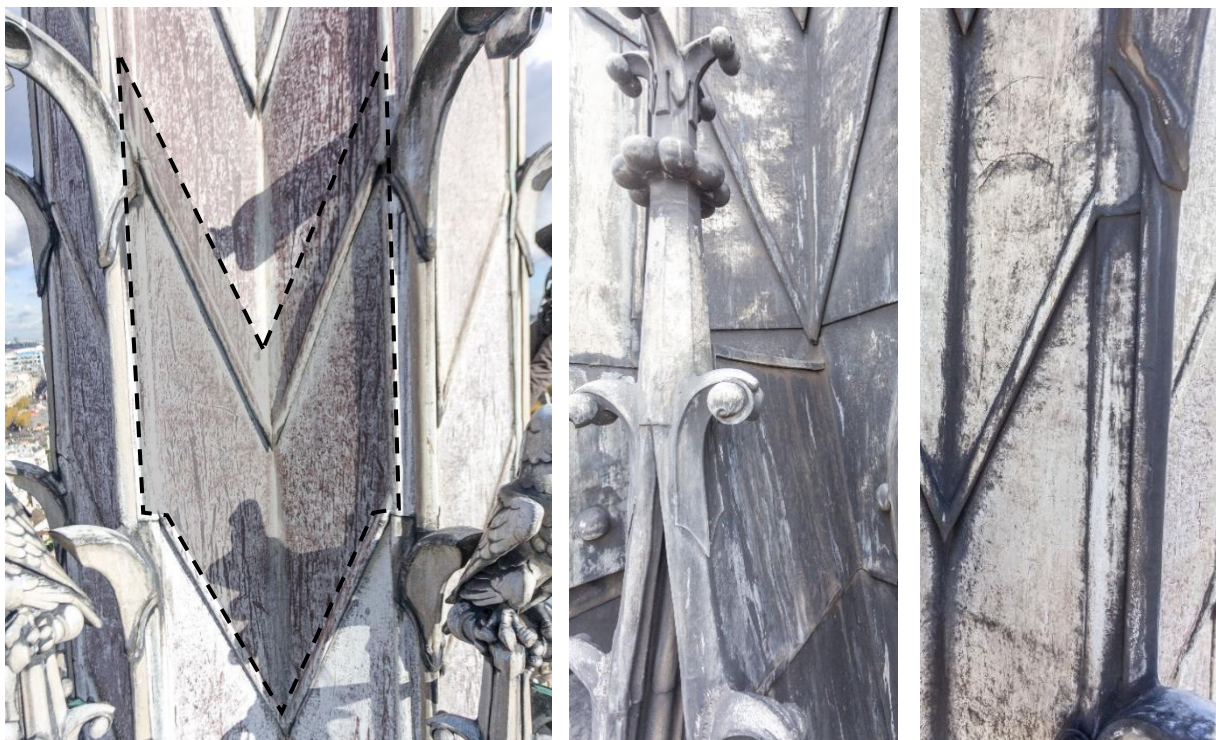
Outre le voligeage et l'armature des crochets, le journal des travaux d'Eugène Viollet-Le-Duc mentionne la pose « d'arêtières » venant en complément des pièces de charpente jouant structurellement ce rôle.⁵ Ces éléments permettraient d'expliciter la saillie des arêtes entre les motifs en épis. Une coupe sur les ornements en plomb de la partie sommitale de la croix, en date du 20 novembre 1935⁶, indique qu'à partir de la bague inférieure de la couronne, le plomb situé sous celle-ci « repose sur des fourrures en bois ».

L'aiguille, à l'identique des autres parties constitutives de la flèche, était habillée de tables de plomb. La largeur de table habillait une face entre deux arêtières. Un léger pli central marquait la noue. La survivance de certaines de ces tables après l'incendie retrouvées dans les vestiges, a permis d'identifier que celles-ci étaient clouées en tête sur le voligeage, tandis que les bords latéraux l'étaient sur les « arêtières ». En partie basse, ces tables étaient découpées en épis afin d'accentuer l'élancement de la flèche tout en conférant à l'aiguille une échelle. L'extrémité inférieure de ces tables, venant en recouvrement de la table posée en-dessous, était marqué par un ourlet rechassé, donnant au trait une certaine épaisseur et contribuant à le rendre visible au lointain. Un couvre-joint, composé de deux feuilles de plomb, la première clouée sur les « arêtières », et la seconde repliée sur la première, couvrait la jonction verticale entre les deux tables de plomb.

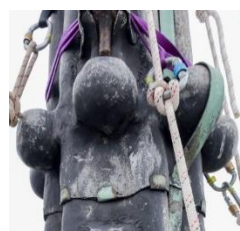
En partie haute, l'habillage des têtes des tirefonds reliant les extrémités des arêtières formait le motif décoratif appelé « perles ». En partie basse, des noues assuraient l'évacuation des eaux pluviales à la jonction de l'aiguille avec les gâbles des baies du deuxième niveau à claire-voie.

⁵ « On continue la pose des fourchettes en fer destinées à maintenir les crochets, celle des arêtières en chêne et de la volige. » - 20 juillet 1859 - Extrait du « *Journal des travaux de Notre-Dame de Paris* », rédigé par Maurice Ouradou, assistant de Jean-Baptiste Lassus et d'Eugène Viollet-le-Duc (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine)

⁶ Dessins techniques correspondants à la campagne de restauration conduite par Emile Brunet entre 1935-1938 - Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives des Monuments Historiques, 81-75-04-0009, article 23, dossier 17 [clichés RÉA].



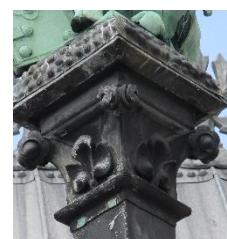
En haut, à gauche, vue en pointillé, de l'emprise d'une feuille supposée d'une table de plomb d'une face de l'aiguille – Au centre: vues de détails des noues formées par les faces de l'aiguille avec les gâbles des baies du deuxième niveau à claire-voie – En haut à droite, vue détaillée d'un arêtier, compris du couvre-joint - A gauche en bas : détails du motif des « perles » en partie haute de la flèche (photographies Loyer De Graaf, 2015) – A droite, en bas : vue de détail du système de double feuille en plomb composant un couvre-joint, retrouvé après incendie



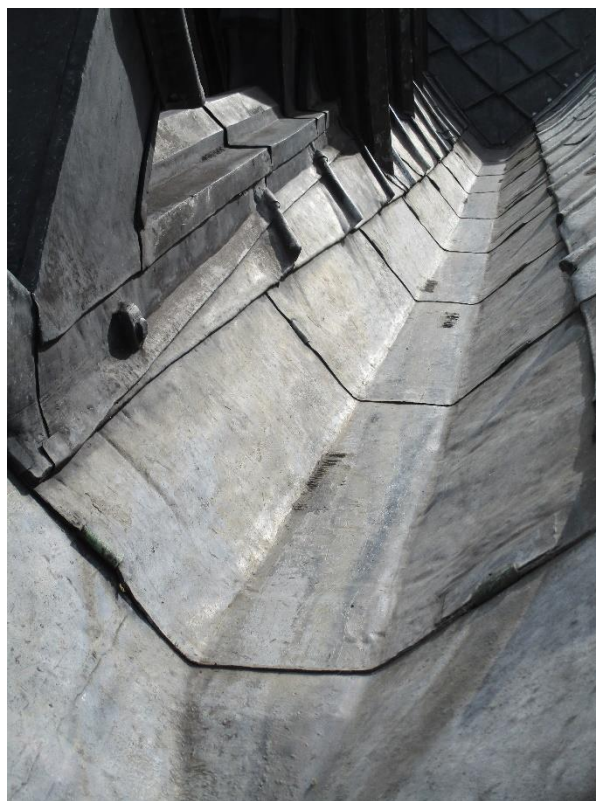
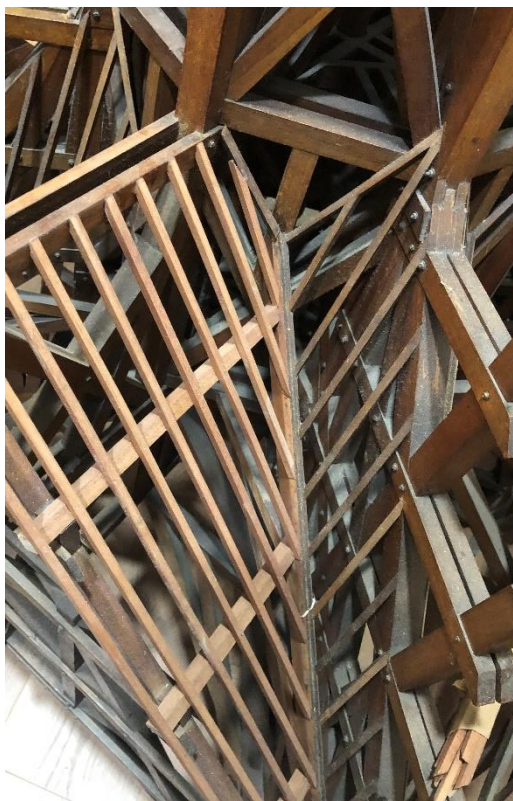
Les noues et les contrefiches

En partie basse de la flèche émergeait, dans les noues du grand comble, la partie haute des contrefiches diagonales de la flèche sur lesquelles trônaient les statues en cuivre.

La partie visible des contrefiches composait un décor néogothique. Ainsi, les poteaux figuraient des colonnes de section carrée, surmontées de chapiteaux composés de quatre crochets aux angles et de feuilles à trois folioles sur les faces, dont les dessins diffèrent des types identifiés au droit des niveaux à claire-voie, décrits dans le chapitre « ornements ». L'abaque sur lequel prenaient appui les évangélistes était façonné pour représenter un motif de terre. Afin d'évacuer facilement les eaux pluviales, les moises horizontales formaient un glacis mouluré. Sous ces dernières, des lancettes trilobées liaisonnaient les poteaux aux rampants des noues tandis que des motifs en grappes, rappelant les épis des crêtes de faîtage, ornaient la partie haute des gradins. Ce dernier en bois, était rapporté sur la structure principale. L'ensemble de ces contrefiches était habillé en plomb.



L'articulation des couvertures du chœur de la nef, du chœur et des bras de transept était assurée par des noues doubles mises en œuvre de part et d'autre des contrefiches en gradins de la flèche. Entièrement en plomb, elle se composait de tables en recouvrement et de deux pentes à ourlets creux correspondants, d'un côté à la couverture, de l'autre à la base du socle des statues.



A gauche, vue de la structure des noues sur la maquette réalisée par les Compagnons en 1970 – A droite, vue de détail d'une des noues, avant incendie (photographie agence Philippe Villeneuve, 2015)

Les accès

La flèche était accessible sur toute sa hauteur, jusqu'à la couronne à la base de la croix. Néanmoins, à mesure de l'ascension, les accès étaient de plus en plus exigus et dangereux.

« Aux moyens d'escaliers intérieurs, les deux plateformes seront rendues accessibles. Mais, à moins que les modes ne changent, il est douteux que les dames puissent parvenir jusqu'à la seconde plateforme sur laquelle on n'arrive que par une trappe de 70 cm de diamètre. Une échelle extérieure, dont les échelons bascule se rabattent verticalement dans un des angles rentrants de la pyramide, permet aux ouvriers d'arriver jusqu'à la croix. Bien que cette échelle présente toute sécurité, c'est là une ascension que tout le monde ne voudra pas tenter. »

Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, *Gazette des Beaux-Arts*, Paris, 1er avril 1860, tome VI, p. 35-39

S'il nous est parvenu l'ensemble des plans de construction de la charpente de la flèche, les ouvrages en second-œuvre -de l'époque de la construction- ne sont pas documentés et seuls quelques photographies et relevés 3D permettent aujourd'hui de comprendre leur structure.

L'escalier en vis

Un escalier en bois hélicoïdal donnait accès, depuis la passerelle de visite des charpentes du grand comble, au premier niveau à claire-voie de la flèche. Extrêmement léger, celui-ci se composait d'un noyau central et d'un limon mouluré de hauteur importante, interrompu à intervalles réguliers par les montants verticaux du garde-corps, composés comme des clés pendantes. Entre les deux s'encastraient les marches, chanfreinées, sans contremarche.

Un édicule en bois, pentagonal, assurait la sortie de l'escalier sur le plancher du premier niveau à claire-voie. En partie haute, des vitraux losangés, sur cadres métalliques, garantissaient l'éclairage naturel de l'escalier. Pourvu d'une couverture pentagonale, cet édicule était entièrement revêtu de plomb. Au droit des ouvertures, les feuilles, se retournant dans les embrasures, étaient fixées par clouage dans l'épaisseur de ces dernières.

Les planchers et trappes des deux niveaux à claire-voie

Le plancher du premier étage était constitué d'une structure métallique en appui sur la quatrième enrayure de la charpente de la flèche et recevait un remplissage composé de briques plates hourdées au plâtre. Pour bâtir ce plancher, Eugène Viollet-le-Duc choisit une structure moderne, loin des techniques traditionnelles médiévales comme il a pu le faire, notamment pour les supports de couvertures des réserves des tribunes du chœur. Une trémie permettait à l'escalier hélicoïdal d'accéder à ce plancher.

Le plancher du deuxième étage était composé, plus traditionnellement, d'un plancher bois cloué sur les bois de charpente de la 5^{ème} enrayure. Une trémie circulaire permettait l'accès depuis l'étage inférieur à ce niveau de plancher, fermé par une trappe métallique amovible en cuivre. L'accès entre les deux niveaux s'effectuait par un système de barreaudage rapporté sur la chambrée d'une des grandes contrefiches moisées de la flèche.

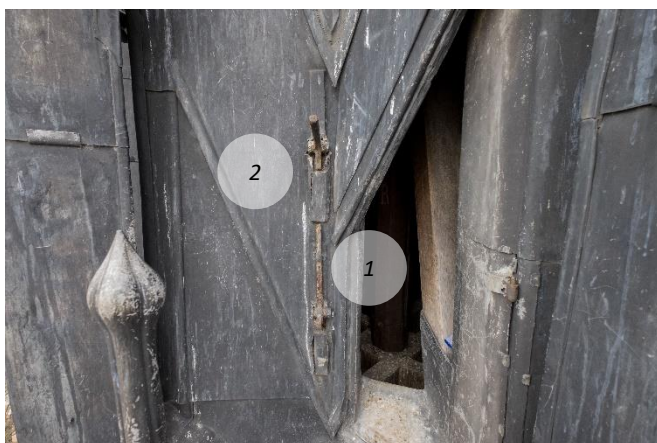
Les barreaudages d'accès aux niveaux les plus hauts

Un système de barreaudage similaire permettait également l'ascension entre le deuxième niveau et la sixième enrayure. Sous cette dernière, un système de filets empêchait les volatiles de monter et de nicher dans la charpente de l'aiguille.

En partie basse de l'aiguille, accessible depuis la sixième enrayure, était ménagée, dans la couverture de la face Nord-Nord/Est, une trappe donnant accès à des barreaudages amovibles, fixés sur les bois formant les noues et s'échelonnant jusqu'à la couronne de la croix.

Beaucoup de barreaudages furent retrouvés dans les décombres de l'incendie.

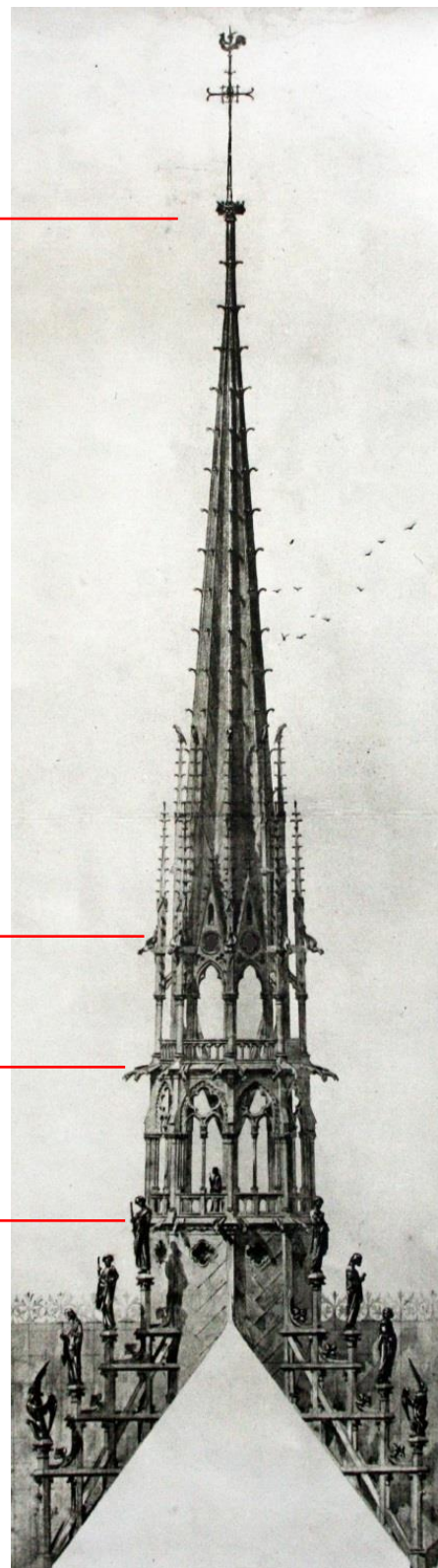
De la 6^e enrayure au sommet de la flèche : l'ascension s'effectuait sur la face extérieure de la flèche. Une minuscule porte (1) s'ouvrait à l'arrière du gâble de la face Nord/Nord-Est, et donnait accès de nouveau à des barreaux (2), fixés directement dans la noue de l'aiguille. Ils conduisaient jusqu'à la couronne au sommet de la flèche.



Du 2nd niveau à la base de l'aiguille : le même système d'échelle à barreaux menait au-dessus de la 6^e enrayure. Une trappe grillagée permettait d'y accéder.

Du 1^{er} niveau au 2nd : des barreaux en fer étaient fixés à un des bois de la charpente. Ils conduisaient à une lourde trappe métallique, légèrement désaxée par rapport à l'échelle à barreaux.

Du comble à la 1^{ère} plateforme : un escalier hélicoïdal en bois s'élançait entre les bois de la charpente, jusqu'à un petit édicule situé au premier étage de la flèche (photo ci-contre). Entièrement habillé de plomb, des vitraux losangés blancs étaient disposés en partie haute et laissaient filtrer la lumière dans les escaliers.



Les ornements de la flèche

La flèche est dotée d'un opulent décor, se déployant sur l'ensemble de ses registres. Le présent chapitre a pour objet leur description, ainsi que celle de leur mise en œuvre. Après avoir rappelé le procédé de fabrication qu'Eugène Viollet-le-Duc réhabilita et employa massivement pour concevoir ses ornements, nous énumérerons les décors en plomb repoussés ornant la flèche, de la base à l'aiguille, en passant par les étages ajourés. Suivra une description détaillée des apôtres et évangiles trônant sur les gradins des fermes diagonales, disposés dans les noues puis de la croix sommitale.

Le métal repoussé, une technique médiévale restituée par Eugène Viollet-le Duc

Eugène Viollet-le-Duc dans sa volonté de réhabiliter l'architecture médiévale, poussa sa recherche au-delà des notions constructives, structurelles et esthétiques. Avec la complicité des entreprises avec lesquelles il menait nombre de ses chantiers, il prôna la redécouverte et la restitution dans ses restaurations, des techniques et savoir-faire médiévaux, souvent disparus et oubliés au fil des siècles précédents.

Une de ses redécouvertes majeures fut l'ornementation en métal repoussé.

Le plombier-fontainier Louis-Jacques Durand fut l'acteur majeur de la réémergence de cette technique. Il œuvra sur de nombreux chantiers d'Eugène Viollet-le-Duc et de Jean-Baptiste Lassus tels que la flèche, la couverture et les ornements de la cathédrale d'Amiens, avec le premier, et la flèche de la Sainte-Chapelle, avec le second.

Le procédé de fabrication des décors en plomb repoussé

La création des décors en plomb repoussé respectait le processus de fabrication suivant :

- Des dessins préparatoires étaient réalisés par l'architecte qui pouvaient mener à des échanges entre l'architecte et le sculpteur par lettres et croquis interposés.
- Un modèle en plâtre ou en argile à échelle 1, était façonné par le sculpteur. Il pouvait être amendé par l'architecte jusqu'à obtenir le modèle définitif. Une fois achevé le modèle était confié à l'entreprise.
- A partir de ce modèle un moule était fabriqué dans lequel les « gothiqueurs »⁷ coulaient une épreuve en fonte de fer.
- Sur cette matrice, les feuilles en plomb étaient repoussées avec des maillets à panne arrondie et des chasses en bois de peuplier pour en épouser les formes. « *Le bois tendre de peuplier conv[enait] à ce premier travail parce qu'il repouss[ait] sans le maculer d'empreintes à chaque coup, comme le ferait le bois dur. On achev[ait] l'ouvrage, au contraire, avec des châsses en buis ou charmes, qui permett[aient] ou de marteler le plomb ou de le ciseler pour ainsi dire.* »¹
- Si les dimensions et la complexité de l'œuvre à réaliser l'exigeaient, une armature métallique interne était réalisée pour rigidifier le décor. Parfois un badigeonnage en soudure, souvent à l'étain, pouvait également être réalisé dans ce même objectif.
- Au cours des travaux de restauration conduits entre 1935 et 1937 par Emile Brunet, nombre des décors en plomb repoussé de la cathédrale furent dotés de nouvelles armatures en cuivre. Plusieurs d'entre elles furent retrouvées, après l'incendie du 15 avril 2019, dans les décombres.
- Les feuilles en plomb étaient assemblées entre elles par soudure. Une patine, souvent à base de mine de plomb, était employée pour dissimuler ces raccords.

⁷ Article rédigé par l'ingénieur C. Détain, publié en 1866 dans la Revue générale de l'Architecture et des Travaux publics, volume 24, « Des couvertures en plomb – Plomb repoussé » (pages 253-258)



Cette technique permettait de produire des ornements très précis, aux lignes nerveuses, extrêmement fidèles aux reliefs du modèle original. Très malléable, le plomb offrait par ce procédé une grande liberté de dessin et d'exécution. Les décors en plomb repoussé imitaient souvent les décors en pierre de taille présents sur la cathédrale.

Elle présentait cependant certains défauts. En effet, si le martelage n'était pas correctement réalisé, le décor ne présentait pas une épaisseur uniforme et les zones plus maigres constituaient des faiblesses risquant au fil du temps de se percer. De même, les soudures étaient également des zones de fragilité, facilement propices aux infiltrations d'eau en cas de fissures. A cela, s'ajoutait la multiplication des soudures, points faibles de l'ouvrage en cas d'altération.

Les décors en plomb repoussé de la cathédrale

Lors du chantier d'envergure conduit par Eugène Viollet-le-Duc et Jean-Baptiste Lassus de la cathédrale Notre-Dame de Paris, cette technique ornementale sera largement employée :

- **En plomb repoussé** pour les ornements figurés, architecturaux ou à motifs végétaux, répétitifs, d'échelle assez modeste. L'ensemble des décors de la couverture du grand comble (crêtes de faîtage, embases de la croix du chevet, pinacles des grandes lucarnes et dragons) et de la flèche (couronne et embase de la croix, chimères, grands ducs, crochets, etc.) fut réalisé selon cette technique. « *les ornements [de la flèche] sont (...) en plomb, repoussés au marteau et attachés au moyen de tiges de fer revêtues de plomb.* »

Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, *Gazette des Beaux-Arts*, Paris, 1er avril 1860, tome VI, p. 35-39

- **En cuivre repoussé** pour les sculptures monumentales des apôtres et le coq surmontant la croix sommitale de la flèche.

Les griffons, les grands ducs et les gargouilles

La flèche était rehaussée de tout un bestiaire. On dénombrait :

- **Huit grands ducs**, symboles de l'architecte Eugène Viollet-le-Duc, coiffant la partie sommitale des poteaux arêtiers intérieurs ;
Une armature interne formant le squelette du décor devait rigidifier l'ensemble. Ce dernier devait s'emmancher sur une fourchette « semblables de plus grandes dimensions pour fleurons ou oiseaux [à celles des crochets] »⁸, vissée sur la charpente.

- **Huit griffons** ornant les glacis supérieurs des poteaux arêtiers extérieurs, pesant chacune 115 kilogrammes.

Afin d'éviter tout effet de monotonie, deux variantes étaient mises en œuvre. Le corps identique était réalisé selon un même modèle pour les huit chimères et se composait de deux coques symétriques, soudées entre elles pour former le corps de l'animal sur lequel était rapportées les ailes. Une armature métallique en cuivre, à l'intérieur, rigidifiait ces décors. Deux modèles de têtes étaient par alternance soudés sur ces corps. Des photographies des travaux de restauration de ces ouvrages, réalisés entre 1935 et 1937 par l'entreprise Monduit-Béchet, sont conservées à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine et documentent de manière très importante ces ouvrages.

Afin de renforcer les ailes, relativement isolées du corps, des tiges en cuivre raccordaient l'armature interne du corps de l'animal de celle des ailes.

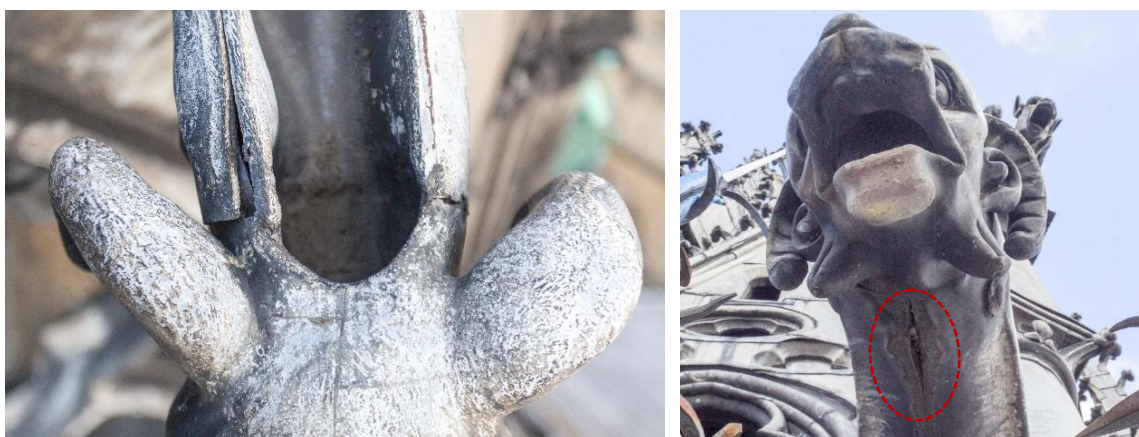
⁸ Série de Prix du 26 juillet 1886 (Archives Nationales F¹⁹⁸041)

Les griffons étaient fixés sur le sommet des poteaux arêtières extérieurs, et soudés sur l'habillage en plomb, en deux points, en partie haute de la queue et sous le thorax.

- **Seize gargouilles** rejetant les eaux des deux plateformes des deux niveaux à claires-voies.

Tout comme les griffons, deux modèles différents par niveau, s'alternaient. Une fois encore, la différence était opérée par les têtes. Chaque gargouille pesait entre 115 et 128 kg. Une armature interne métallique raidissait l'ensemble. Une fourchette en fer forgé assurait le porte-à-faux de ces ouvrages, et fixait ces ouvrages sur les pièces de charpente formant l'armier.

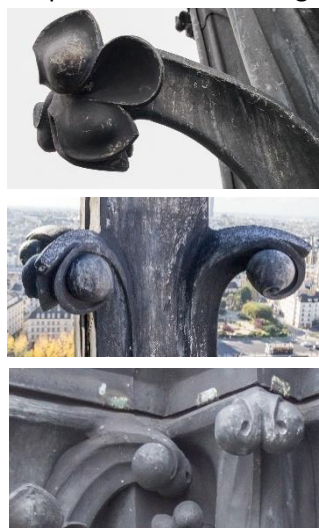
On supposera, après observation attentive des photographies prises en 2015, que chaque gargouille se composait de deux coques pour la tête, deux pour le corps et une cinquième feuille formant le canal de rejet des eaux.



En haut : vue et relevé d'une armature supposée de gargouille, retrouvée dans les décombres de l'incendie (photographies et dessins du LRMH) – En bas : vues de détail des gargouilles du deuxième niveau à claire-voie permettant d'entrevoir les armatures et comprendre le nombre et la répartition des feuilles de plomb employées (Photographie de Loyer De Graaf, 2015)

Les crochets

De nombreux crochets ornaient la flèche. Selon leur localisation, ils formaient un élément de décor propre comme sur les arêtières de l'aiguille ou les pilastres du fût, ou composaient par adjonction un élément de décor plus complexe comme les pinacles, les gâbles, les fleurons ou encore les chapiteaux. On en distinguait trois types :



- **Type 1 :**
 - Les arêtières de l'aiguille de la flèche ;
 - Les pilastres marquant les angles du fût ;
 - La partie basse du fleuron des pinacles ;
 - Les chapiteaux « extérieurs » du niveau 2.
- **Type 2 :**
 - Les pinacles ;
 - La partie basse du fleuron des gâbles.
- **Type 3 :**
 - Les chapiteaux du premier niveau à claire-voie.

L'ensemble de ces crochets en plomb repoussé, raidi par une armature secondaire, était supporté par des fourchettes métalliques fixées sur les bois de charpente.

L'aiguille et les pilastres du fût

La lecture du journal d'Eugène Viollet-le-Duc et l'observation de certains vestiges de charpente de la flèche permettent d'arrêter la chronologie de mise en œuvre suivante : les fourchettes étaient dans un premier temps vissées sur les arêtiers, légèrement engravées dans l'épaisseur du bois puis, dans un second temps, sur les voliges qui devaient venir en recouvrement de celles-ci. Enfin l'habillage en plomb recouvrait les faces de l'aiguille. Le crochet était emmanché sur la fourchette et fixé par un clou (seule la tête du clou était visible sur la face supérieure du crochet). En partie haute, le crochet était soudé à l'habillage, tandis qu'en partie basse aucune fixation n'était visible.



Croquis des fourchettes de l'aiguille, extraite du journal des travaux d'Eugène Viollet-le-Duc

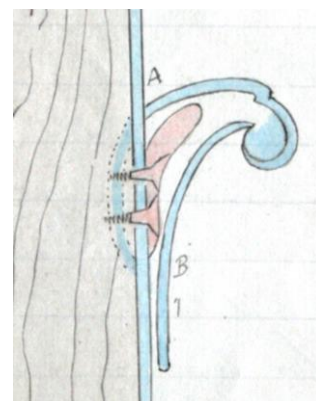
L'étude de diagnostic établie en mai 2015 par Philippe Villeneuve, ACMH, met en évidence un systématisme des désordres affectant les crochets de l'aiguille et les crochets des faces latérales des poteaux arêtiers extérieurs, au-dessus de la deuxième galerie ajourée (soudures et casses systématiques sur la face supérieure des crochets). Cette pathologie était liée à la longueur, trop courte, des fourchettes de fixation.

Les pinacles et fleurons

Plusieurs rapports dressés en 1885, mettent en évidence une mise en œuvre défailante des crochets de pinacles des poteaux arêtiers dans leurs dispositions d'origine. Contrairement aux fourchettes de l'aiguille et du fût, celles de ces ouvrages furent, lors de la construction de la flèche, vissées sur l'habillage en plomb des têtes de pinacles. Cette différence eut un impact conséquent sur la tenue de ces ouvrages dans le temps. En effet, à peine vingt ans après l'achèvement de la flèche, les pinacles présentaient des désordres importants.

Dans son rapport rédigé en décembre 1885 à l'attention de M. Bailly, architecte des édifices diocésains, sur « l'état de la flèche de l'église Notre-Dame, et sur les procédés à employer pour en réparer les plomberies »⁹, Philippe Monduit fils entrepreneur explique très bien la raison des dégradations observées :

« Si on étudie attentivement la façon dont le plomb a été employé, on reconnaît qu'au-dessous du gâble il a été posé à dilatation libre au moyen de deux agrafures situées sur le derrière du contrefort. Au-dessus du gâble, au contraire, le plomb est d'un seul morceau ; et au lieu de deux agrafures il n'en existe plus qu'une seule. Cette disposition regrettable est encore aggravée par la façon dont les crochets en plomb martelé sont fixés sur les pinacles. Ces crochets sont soudés sur les feuilles de plomb qui recouvrent le bois et comme ils ne sont pas soutenus par leurs supports en fer (...) ils tirent de tout leur poids sur le métal. Enfin, les supports en fer sont vissés sur le bois à travers le plomb qui est ainsi complètement bridé de tous côtés et ne peut s'allonger librement dans aucun sens, puisque même à son extrémité inférieure, il est soudé sur la rosace qui termine le gable. On comprend donc facilement que le plomb se déchire. »



Croquis en coupe, vers 1885 d'un pignon par l'entreprise Gaget, Gauthier et Compagnie Gaget ayant réalisé, dans son propre rapport, les mêmes

⁹ Archives nationales, F198041

Cette entreprise propose, toujours dans ce même rapport, des solutions pour palier à ces désordres :

« Au lieu de souder les crochets sur les feuilles de plomb qui forment le revêtement du pinacle, je les laisserais complètement indépendants de façon qu'ils ne pèsent plus comme par le passé sur ces feuilles de plomb et je les fixerais sur les supports spéciaux (...). Ces supports seront vissés sous le recouvrement de la table de plomb supérieure de manière que les vis qui les maintiennent se trouvent au-dessus de la table de plomb inférieure et ne la traversent plus.

Il est bon de rappeler que l'analyse des rendus blanchâtres que j'ai relatée plus haut contenait une quantité certainement peu importante, mais néanmoins très appréciable d'oxyde de fer.

Il serait donc prudent d'employer pour ces supports du fer galvanisé au lieu de fer peint au minium, et de les fixer au moyen de vis en cuivre. »

Une lettre du ministre de l'Instruction publique des Beaux-Arts et des Cultes adressée à l'architecte diocésain Nicolas Bailly le 22 avril 1886 valide la proposition de « rendre les crochets des pinacles plus indépendants de la masse du plomb qu'ils ne l'étaient dans l'origine. »¹⁰ Les travaux seront réalisés entre 1886 et 1887 par l'entreprise Monduit fils.

Les fleurons coiffant les pinacles et probablement ceux des gâbles étaient également « en plomb repoussé garni de soudure à l'intérieur, et repos[aient] sur un poinçon en fer »¹¹.

Les chapiteaux

Au droit des niveaux à claire-voie de la flèche, il existait trois types de chapiteaux, se distinguant par le dessin des ornements composant la corbeille, à savoir les crochets marquant les angles et le motif végétal réhaussant les faces et formant une certaine hiérarchie :

- **Type 1 :**

Les chapiteaux ornant les colonnes isolées (poteaux arêtières extérieurs) du deuxième niveau à claire-voie, composaient des crochets de type 1 décrits précédemment et d'un motif en feuille constitué de cinq folioles.

- **Type 2 :**

Les chapiteaux ornant les colonnes des angles du premier niveau à claire-voie (poteaux arêtières extérieurs), composaient des crochets de type 3 décrits précédemment et d'un motif en feuille identique aux chapiteaux de type 1.

- **Type 3 :**

Les chapiteaux des réseaux des deux niveaux à claire-voie, se composaient des crochets de type 3 décrits précédemment et d'un motif en feuille composé en partie supérieure d'une foliole trilobée et en partie basse, de deux folioles lancéolées disposées en symétrie. Un motif en tulipe, faisant écho aux motifs ornant la partie supérieure de l'embase de la croix, séparait les deux derniers chapiteaux du premier niveau à claire-voie.

A cette variation de composition s'ajoutait la forme de l'abaque qui permettait également de créer d'une distinction entre les deux niveaux à claire-voie. Ceux du second niveau était traité plus richement d'un point de vue modénature.

¹⁰ Archives nationales, F198041

¹¹ Visite de la flèche par MM. Gaget, Gauthier et Compagnie du 19 décembre 1885, sur la demande de M. Bailly, architecte. [Archives nationales, F198041 ; Planche 45] de Paris pour examiner l'état de la flèche.

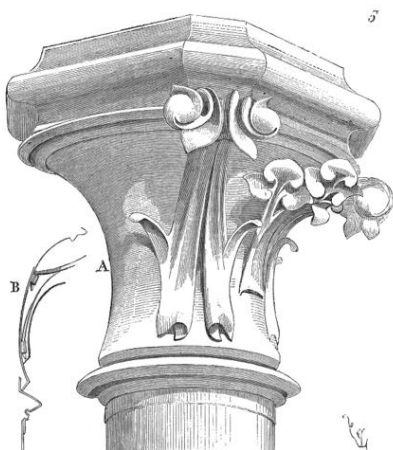




A gauche : vue des chapiteaux du premier niveau à claire-voie – A droite : vue des chapiteaux du deuxième niveau à claire-voie (Photographie de Loyer De Graaf, 2015)

Dans son *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle*, Eugène Viollet-le-Duc donne, dans son article « Plomberie » une description très précise de la fabrication des corbeilles des chapiteaux :

« Avaient-ils, par exemple, un chapiteau à faire, ils formaient la corbeille A, puis la revêtaient de crochets, de feuillages modelés à part, soudés et agrafés au corps principal, ainsi qu'on le voit dans la section B. Mais tout cela, léger, vif, détaché, comme il convient à du métal. La corbeille était alors déprimée à sa partie moyenne, et présentait un diamètre moindre que celui de la colonne, afin que les tiges rapportées, par leur épaisseur sur l'âme n'excédassent pas le diamètre du fût. Souvent ces ornements n'étaient qu'agrafés, ce qui évitait toute brisure et facilitait les réparations. De petites tiges de fer soudées à l'intérieur des feuilles, ou crochets, leur donnaient du roide et les empêchaient de s'affaisser. »



A gauche : illustration extraite de l'article « plomberie » du *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle* d'Eugène Viollet-le-Duc, illustrant le passage ci-dessus – A droite : détail d'un chapiteau du deuxième niveau à claire-voie (Photographie de Loyer De Graaf, 2015)

Les astragales, les abaques et nombre de bases dont celles des colonnes ornant les poteaux arêtières extérieurs étaient probablement également en plomb repoussé.

Les frises

Enfin, les frises rehaussant les deux niveaux à claire-voie étaient composées :

- d'une partie correspondant à la partie moulurée, emboutie sur les pièces en bois de charpente ;
- de décors en plomb repoussé, rapportés à l'identique des crochets des chapiteaux et soudés sur l'habillage en plomb ;



A gauche : Illustration de l'article « plomberie » du Dictionnaire raisonné d'Eugène Viollet-le-Duc – Au centre et à droite : détails de la frise du deuxième niveau à claire-voie (Photographie de Loyer De Graaf, 2015)

Les voissures des baies du premier étage

Enfin, les voissures des baies du premier niveau à claire-voie étaient rehaussées de rosaces, soudées à intervalles réguliers sur l'habillage en plomb de la doucine.

Les statues des apôtres et évangélistes¹²

Les statues de la partie basse de la flèche, au nombre de seize, étaient réparties en quatre groupes, alignés et échelonnés sur des socles en gradins, émergeant des noues de la toiture du grand comble, au croisement de la nef, du transept et du chœur. Ce support était constitué des poteaux piles, rigidifiant les contrefiches diagonales de la charpente de la flèche, bâties comme d'amples pans de bois rigidifiant la structure. Un décor néogothique en rehaussait les parties visibles.

Chaque groupe respectait la répartition suivante : une figure d'évangéliste en partie inférieure, et trois statues d'apôtres en partie supérieure, formant au total les douze apôtres et les quatre évangélistes.

Les douze apôtres figurés sont ceux cités dans le canon de la messe¹³. Ils sont habillés de vêtements drapés et agrémentés d'attributs de taille démesurée, pour être mieux perçus depuis le pied de la cathédrale. Les évangélistes respectaient la représentation codifiée du tétramorphe, figurant les quatre animaux ailés tirant le char de la vision d'Ezéchiel, dont les Pères de l'Eglise y virent l'emblème des quatre évangiles canoniques.

Les statues en cuivre des apôtres et des évangiles étaient posées sur les gradins formés par les contrefiches de la souche de la flèche. Sur ces derniers étaient fixés, après entaille des bois, la fourchette d'une tige métallique sur laquelle s'emboîtait l'ossature interne de la statue, dans laquelle avait été usinée en partie centrale des anneaux. Une fois la statue positionnée, elle était liaisonnée à la base du socle habillé en plomb et maintenu par des pattes, et des boulons en bronze. Plusieurs de ces tiges ont été retrouvées à la suite de l'incendie, dans les décombres.

Les statues après l'incendie du 15 avril 2019

Les douze statues des Apôtres et les quatre statues des Evangélistes furent déposées pour restauration le 11 avril 2019 et réchappèrent aux dégâts de l'incendie. Elles sont aujourd'hui

¹² D'après l'étude de diagnostic de Benjamin Mouton sur les statues de la flèche, de 2013.

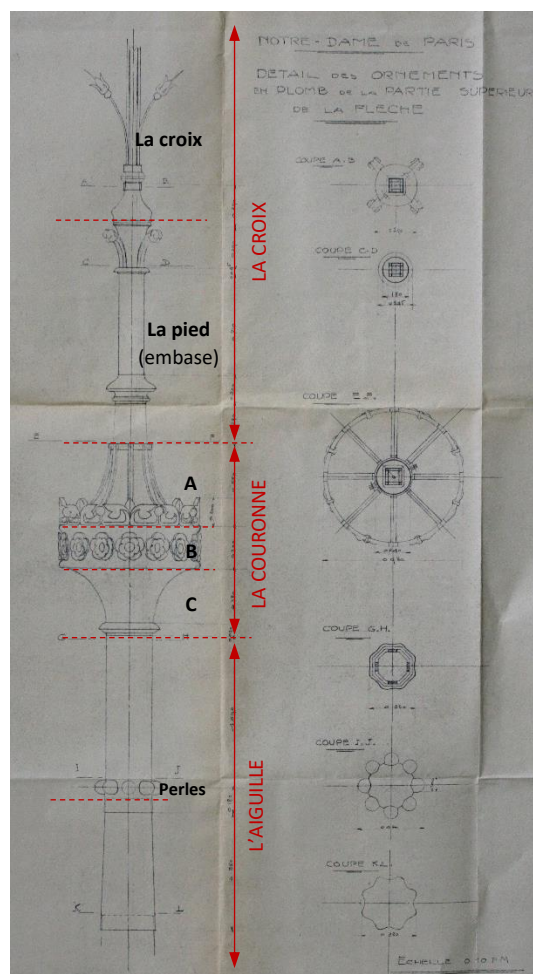
¹³ Article « Apôtres » du Dictionnaire Raisonné de E.E. Viollet-le-Duc

restaurées par l'entreprise SOCRA et présentées à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine dans leur état final, qui sera celui restitué sur la flèche reconstruite.

La couronne, l'embase, la croix et le coq et ses reliques

La flèche s'achevait par une couronne ornée de motifs végétaux au-dessus de laquelle s'élevait une croix en fer forgé. Elle se composait d'un pied habillé de plomb en forme de colonnette, de la croix en tant que telle et au sommet, d'un coq en cuivre abritant des reliques saintes et remplissant le rôle de girouette.

L'ensemble connu, entre 1935 et 1937, une restauration importante sous la direction d'Emile Brunet.



A droite : vue de la croix avant la dépose de l'embase, en 2011 (photographie DRAC Ile-de-France, lors du remplacement du paratonnerre – A gauche : Détail des ornements en plomb de la croix datés du 20 novembre 1935 (MAP, Archives des Monuments Historiques, 81-75-04-0009, article 23, dossier 17 [cliché REA])

La couronne

La couronne achevant l'aiguille de la flèche fut réalisée, comme de nombreux ornements, selon la technique du plomb repoussé. L'ensemble était rigidifié en interne, par des armatures fixées sur le poinçon de la flèche.

Les travaux réalisés dans la première moitié du XX^{ème} siècle par la même entreprise que celle qui exécuta les travaux de création de la flèche sous la direction d'Eugène Viollet-le-Duc, permirent une

documentation importante de cet ouvrage (photographies prises dans l'atelier de l'entreprise Monduit-Béchet et devis très détaillés, conservés à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine). Nous décrivons ci-après les ouvrages tels que mentionnés et observés dans les documents de cette époque après restauration.

L'ensemble se décomposait en trois parties :

- **une partie supérieure (A)**, composée de deux « coquilles » dont les feuilles de plomb étaient fixées par l'intermédiaire de pattes soudées, sur une armature dissimulée à l'intérieur. Celle-ci, formée de plusieurs pièces en cuivre de 0,04/5 vissées entre elles, constituait une résille rigidifiant l'ouvrage.

En partie basse, les fers verticaux liaisonnés par un collier de section circulaire, se repliaient pour assurer l'assemblage avec la structure de la partie centrale.

Les motifs végétaux, disposés en partie haute de la couronne et rappelant dans leur composition, les crêtes de faîtage du grand comble (alternance de boules de 1,3 kgs et de fleurs de lys de 3 kgs) étaient rapportés en partie basse de l'habillage en plomb. Les fleurons soudés en pieds sur l'armature, étaient maintenus par des tringles en cuivre rouge étamé, rabattues sur l'ossature principale. À la pénétration de ces supports, des capotes en plomb de 5 cm de diamètre étaient embouties et soudées.

En partie haute, une collerette rapportée était soudée.

- **Une partie centrale (B)**, définissant la couronne en tant que telle et dont la tranche était ponctuée, à intervalle régulier, de rosaces.

L'ossature principale assemblée par rivetage, se composait :

- En partie haute, d'un ceinturage à l'intérieur duquel s'inscrivait un dispositif rayonnant riveté, composé de 8 pièces (en rouge sur la photographie ci-dessous) ceinturant en son centre le poinçon ;
- En partie basse, d'un ceinturage de section circulaire ;
- De pattes verticales reliant l'ensemble par vis ou soudures et crochetées en partie basse pour se fixer sur l'ossature de la partie inférieure de la couronne ;
- D'un ceinturage intermédiaire sur lequel étaient fixées les rosaces après avoir habillé en plomb l'ensemble de la structure principale.

- **Une partie inférieure (C)**, liaisonnant la couronne au poinçon selon un profil d'entonnoir. La structure principale reprend nombre des principes constructifs décrits ci-dessus. L'ensemble s'achevait, en partie basse, par une bague formant larmier, rapportée et soudée.

L'embase

L'embase constituait le pied de la croix en fer forgé et figurait une colonnette.

L'ensemble était fabriqué selon le même procédé que la couronne. L'habillage plomb, se décomposant en deux coquilles, était constitué de feuilles de plomb repoussées, fixées sur une ossature cuivre interne assurant le raidissement de l'ensemble. Cette armature était vissée, en partie haute, à un ceinturage en cuivre enserrant en sa partie centrale les armatures en fer forgé de la croix.

Si la corbeille du chapiteau faisait partie intégrante des demi-coques, les éléments de décors et de modénatures étaient rapportés et soudés, qu'il s'agisse de l'astragale, ou des quatre crochets

d'inspiration médiévale pesant chacun, 4 kilogrammes. Ces derniers étaient également « maintenus sur l'armature par des supports en fil de cuivre étamé de 6 mm de diamètre »¹⁴.

Enfin, en partie haute, une collerette soudée était rapportée.

Lors des travaux de paratonnerre en 2011, l'embase en très mauvais état de conservation, est déposée pour des raisons de sécurité. Les éléments furent conservés et stockés dans le presbytère.

La structure de croix

La structure en fer forgé de la croix, de 8 mètres de haut, était constituée :

- D'une âme centrale et d'une traverse avec renforts, s'assemblant à mi métal avec boulon pour assurer le maintien de la traverse contre l'âme dans sa mortaise (centre de la croix). Les extrémités de la traverse étaient ornées d'un décor à rinceau et feuilles réalisé dans la masse de la barre de métal tandis que deux rinceaux, maintenus par embrasses, rehaussaient le bras supérieur de la croix. En partie basse, la traverse centrale, formait une fourchette pour se fixer sur le poinçon
- De quatre équerres *maintenues* au moyen de rivets. « Ces équerres sont destinées à empêcher la traverse de fatiguer le tenon, le boulon central, et par suite, de s'incliner d'un côté ou de l'autre »¹⁵ ;
- De quatre montants renforçant, par épaulement (détail ci-contre, Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine), l'âme centrale et formant en partie basse la fourchette double frettée et boulonnée sur le poinçon et en prolongement sur les arêtiers de l'aiguille. Pour recevoir les armatures de la croix, des entailles enduites de minium de plomb étaient pratiquées dans le poinçon ;
- Des embrasses enserrant les renforts et l'âme centrale – 5 unités. Leur serrage était assuré par un système de boulons et écrous ;
- De quatre fleurs sortant au-dessus de l'embase et fixées par serrage dans deux embrasses décrites ci-dessus. Ces « tulipes » sont mentionnées en « cuivre doré » dans les devis de l'entreprise Durand de 1860 (MAP F-1998-035-03 _ 16 cliché 20) ;
- De frettes enserrant les quatre branches de la fourchette sur le poinçon – 2 unités ;
- D'une girouette à l'extrémité du montant de la croix, avec la broche sur laquelle tourne la figure du coq.



Vue en contre-plongée de la partie sommitale de la croix, vers 1935 – Photothèque, boîte rouge 3, M.A.P.)

La croix en fer de la flèche ainsi que la couronne furent fortement dégradées. Ayant provoquées le percement de la voûte de la nef par l'impact qu'elles provoquèrent lors de leur chute, elles sont à ce jour toujours fichées sur l'extrados instables de ces dernières. L'ensemble ne sera déposé, qu'une fois les voûtes mises sur cintres. Au moment de la consultation la croix ne sera donc pas encore déposée.

¹⁴ Extrait de l'attachement du 18 novembre 1935 de l'entreprise Monduit sous l'ordre de M. Brunet, Architecte en Chef. M. Berret, architecte ordinaire - [Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives, 81-75-04-0009, article 23, dossier 17 ; Annexe B & Planches 53-54]

¹⁵ Extrait du Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle d'Eugène Viollet-le-Duc, « croix »

Si l'ensemble des habillages plomb a disparu, les structures en fer forgé et en cuivre semblent encore relativement complètes. Un des bras de la croix s'est néanmoins désolidarisé et fut retrouvé dans les vestiges. Il est actuellement stocké sous les barnums.

Le coq et les reliques

Au sommet de la croix sommitale de la flèche, se trouvait un coq en cuivre repoussé d'environ 30kg, doré à l'or jaune fin. Le modèle fut établi par le sculpteur Adolphe-Victor Geoffroy-Dechaume sur des dessins d'Eugène Viollet-le-Duc et l'œuvre finie fut réalisée par les ateliers Monduit en 1859. Cet ouvrage assurait le rôle de girouette.

Ce coq installé le 29 juin 1859 après avoir été béni par le cardinal archevêque de Paris, contenait les reliques de saint Denis, de sainte Geneviève et une parcelle de la sainte Couronne.

En 1935, très dégradé, il fut restauré par l'ACMH Emile Brunet. Une nouvelle aile en cuivre rouge repoussé fut mise en place ainsi qu'une poche intérieure contenant un nouveau tube à reliques en plomb.

En finition, une nouvelle « dorure à l'huile à l'or jaune fin au titre de 0,925 et pesant 15gr aux 1 000 feuilles sur apprêts à l'huile,

époussetage, mixtion et vernis Soehnée deux couches »¹⁶ fut appliquée. Enfin, un nouveau système de roulement à billes, assurant le bon fonctionnement de la girouette, fut mis en œuvre.

Le coq contenant les reliques protégeant la cathédrale, a miraculeusement survécu à l'incendie. Retrouvé dans les décombres, il contenait toujours la « boîte de plomb » intacte, abritant les reliques.



« Restauration de la flèche, 1935-1936. Doc. E. Brunet » - A gauche : vue du coq avant réparation - A droite : Le coq après réparation. Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Photothèque, boîte rouge 3 [clichés RÉA].

L'horloge des bras de transept et les cloches de la flèche

En 1867, l'horloger Armand Collin construisit l'horloge placée dans les combles de la toiture du vaisseau principal. L'horloge se composait de quatre éléments principaux :

- **Un mouvement**

Le mouvement regroupait l'ensemble des mécanismes élémentaires qui assurait le mouvement régulier du système. Il était installé à l'abri dans un petit local vitré, placé dans le bras de transept Sud, sur la passerelle d'accès, ponctuellement élargie.

¹⁶ Extrait de l'attachement n°1 du « Mémoire des ouvrages de peinture exécutés pendant le mois de [lacune] d'après les ordres de M. Brunet, Architecte en Chef, par MM Fournier, Perret & Cie, entrepreneurs », vers environ 1936 - ordre n° 136 - [Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives, 81-75-04-0009, article 23, dossier 17]



- **Quatre cadrans**

Le mouvement actionnait quatre cadrans placés dans les grandes lucarnes des deux bras de transept, décrites en détail dans le chapitre « couverture du grand comble ». Derrière le cadran, un contre-poids assurait l'équilibre des aiguilles.

- **Des axes de transmission**

Des axes de transmission actionnaient par des systèmes de tringles, les quatre cadrans. Chaque changement de direction était assuré par un cardan. L'ensemble était dissimulé dans la charpente au moyen de goulottes en bois, suspendues à celle-ci par des étriers métalliques.

- **Six cloches**

L'horloge actionnait six cloches, organisées pour assurer deux temps précis de la liturgie :

- La première sonnerie tintait les trois cloches situées immédiatement au-dessus de l'oculus de la voûte de la croisée, sous le plancher de visite des combles, au cours de la messe au moment de l'offertoire, précédant la Consécration.
- La seconde sonnerie tintait les trois cloches situées au deuxième étage de la flèche, qui « ne servaient plus à la sonnerie de l'horloge (assurée par les cloches du beffroi nord) mais de « petite sonnerie » en « fausse volée » préludant à la « grande sonnerie » cultuelle des cloches des deux tours, comme cela s'effectuait traditionnellement sous l'Ancien Régime »¹⁷.

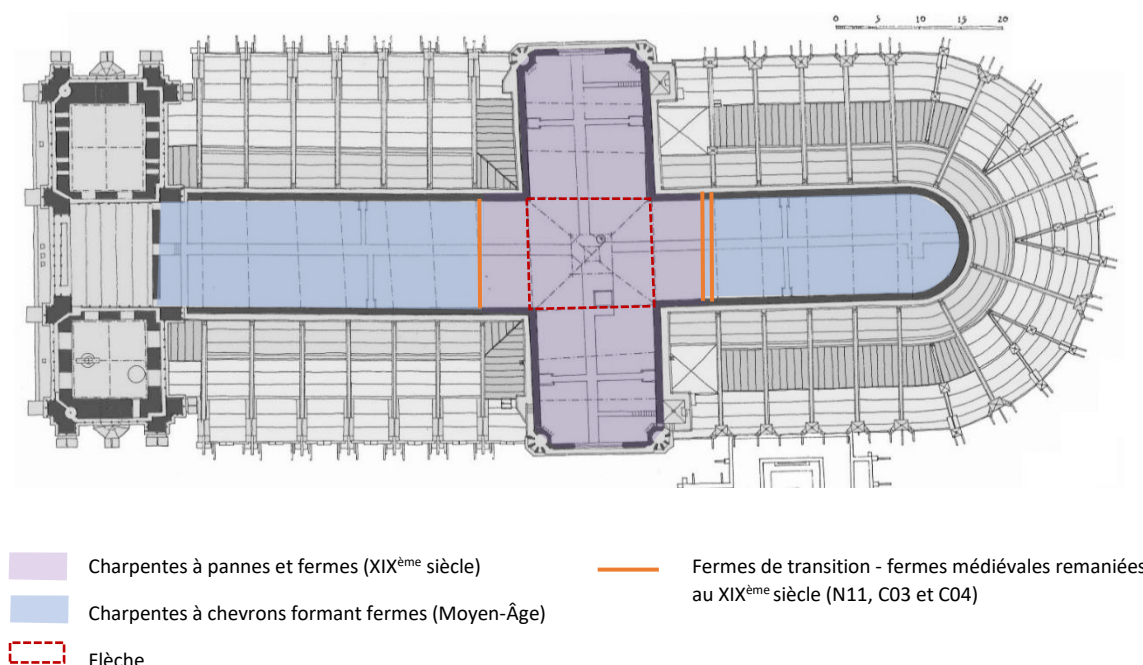
•

¹⁷ La pendule et les cloches de la flèche de la cathédrale-basilique Notre-Dame de Paris avant le 15 avril 2019 par Régis Singer, campanologue, expert pour le patrimoine campanaire auprès du ministère de la Culture – le 18 avril 2019.



3. Description détaillée des toitures des bras de transept et des travées adjacentes à la flèche

Composition générale



En 1858 débutèrent les travaux de la flèche et des bras de transept dessinés par Eugène Viollet-le-Duc, une soixantaine d'années après la démolition de la souche de la flèche primitive du XIII^{ème} siècle qui subsistait jusqu'alors dans les combles à la croisée du transept.

Viollet-le-Duc étudia et dessina pour les bras de transept, une charpente à ferme et pannes permettant d'asseoir la nouvelle flèche qui soit compatible géométriquement et structurellement avec les charpentes médiévales existantes de la nef et du chœur auxquelles elle se raccordait. Cette charpente était localisée dans l'intégralité des deux bras de transept ainsi que dans les travées de la nef et du chœur adjacentes à la flèche : fermes N12 et C02.

Les charpentes d'Eugène Viollet-le-Duc, étaient toutes conçues sur le même tracé d'épure, que ce soit dans les transepts ou dans les travées du chœur et de la nef adjacentes à la flèche. Seules les fermes de transition, diffèrent : il s'agit de fermes médiévales fortement remaniées par Viollet-le-Duc pour assurer la transition avec les charpentes médiévales de la nef et du chœur, tout en participant à la stabilité de la flèche.

Les bois composant cette charpente étaient en chêne, la plupart avaient été équarris à la scie mécanique, certains semblaient avoir été sciés à la scie de long. Les pièces qui composaient la flèche avaient des sections et des longueurs spécifiques et diversifiées qui ont nécessité un débit sur liste complexe et rigoureux. Celles composant les charpentes à pannes du transept étaient des sections relativement courantes et homogènes.

La toiture du transept et des travées adjacentes à la flèche dans la nef et le chœur, disparue à la suite de l'incendie du 15 avril 2019, était une œuvre, à part entière, d'Eugène Viollet-le-Duc.

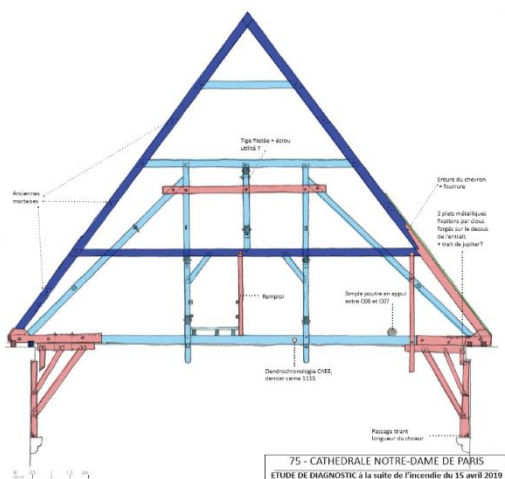
L'architecte engage la réfection complète de cette partie de la toiture entre 1858 et 1863. Dans sa volonté de restituer la cathédrale dans un état médiéval idéalisé, il confère à cet ouvrage, lors de cette campagne de restauration, le visage que nous lui connaissions avant le sinistre. Il modifie, d'une part, la mise en œuvre du cardinal de Noailles datant du XVIII^{ème} siècle, au profit d'une technique de pose s'inspirant de celle observée à la cathédrale de Chartres ou de l'église Notre-Dame de Châlons-sur-Marne, toutes deux datées du XIII^{ème} siècle et dont il fournit, pour la première, une description détaillée dans son article « plomberie » de son dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle. D'autre part, afin d'accentuer l'élancement de la cathédrale, dont la reconstruction de la flèche en est la quintessence, et d'affirmer le caractère néogothique de la couverture, il la dote d'un certain nombre d'équipements et d'ornements d'inspiration médiévale.

Description détaillée des charpentes

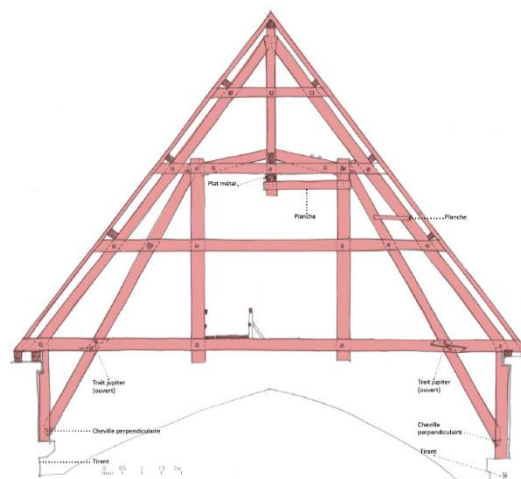
Contrairement à la charpente médiévale du chœur et de la nef à chevrons formant fermes, la charpente des bras de transept était composée de fermes et de pannes. La parfaite transition entre les deux types de charpente mis bout-à-bout de part et d'autre de la flèche assurait une continuité du plan de couverture.

Les charpentes à chevrons formant fermes sont constituées de fermes où le chevron et l'arbalétrier sont confondus, le contreventement longitudinal étant assuré par des palées ou uniquement par le voligeage. Dans ce type de charpente les chevrons sont des éléments structurels, on parle aussi de « chevrons porteurs ».

Dans les charpentes à fermes et pannes, les chevrons sont totalement dissociés des éléments de structure, ils reposent alors uniquement sur les pannes portées par des fermes maîtresses. Ce type de charpente comporte systématiquement une panne faîtière alors que les charpentes à chevrons formant fermes peuvent en être dénuées.



Ferme à chevron formant ferme du cœur (C08)



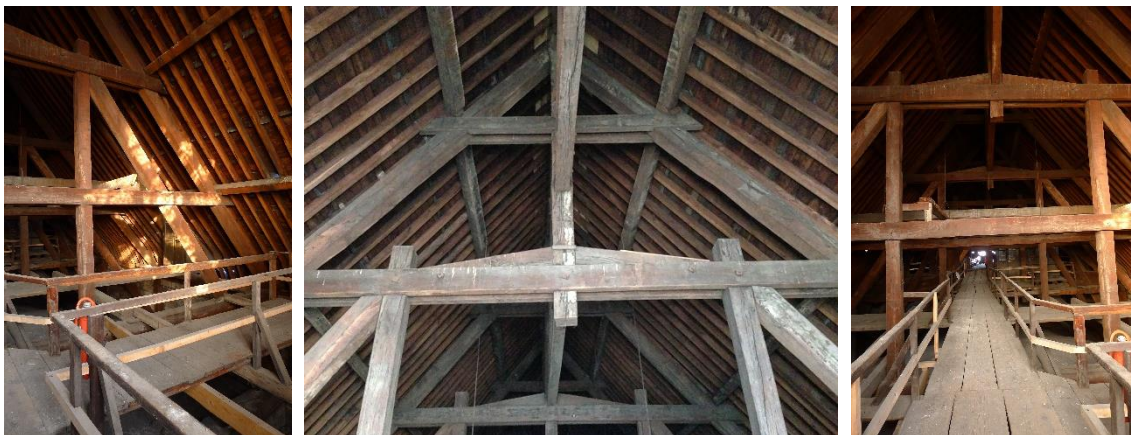
Ferme à pannes de la nef XIX^{ème} siècle (C02)

Relevés de Rémi Fromont et Cédric Trentesaux, 2015

La charpente à fermes et pannes permettait d'asseoir la nouvelle flèche, nécessitant dans le chœur et la nef la démolition des travées de charpentes les plus proches de cette dernière, sur une longueur d'environ 6,50 m. Dans les transepts, cette intervention a été doublée d'une intervention lourde sur les pignons, qui a pu, là encore, nécessiter le démontage partiel des charpentes préexistantes. Pour les bras du transept, l'espace interstitiel entre les deux opérations étant faible, il a été décidé de procéder au remplacement complet des charpentes.

Description

Les charpentes d'Eugène Viollet-le-Duc, étaient toutes conçues sur le même tracé d'épure, que ce soit dans les transepts ou dans les travées du chœur et de la nef adjacentes à la flèche. Seules les fermes de transition (FN11, FC03 et FC04 qui ne sont pas traitées dans ce rapport), diffèrent : il s'agit de fermes médiévales fortement remaniées par Viollet-le-Duc pour assurer la transition avec les charpentes médiévales de la nef et du chœur, tout en participant à la stabilité de la flèche.

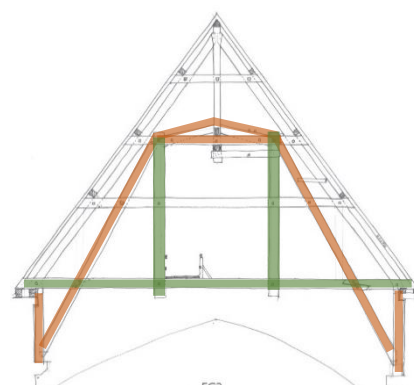


Vues de détails d'une Ferme d'un bras de transept
(Photographie de Rémi Fromont, ACMH et Cédric Trentesaux, Architecte du Patrimoine, 2014)

Comme le décrit F. Epaud :

« Les charpentes des deux bras du transept, du chœur et de la nef sont des structures industrielles à fermes et pannes relativement ordinaires, dont le schéma des fermes s'inspire de celles du XIII^{ème} siècle avec un portique soulagé par deux faux arbalétriers venant prendre appui en pied des consoles. Les fermes sont constituées essentiellement de bois sciés, avec les entrails et faux entrails constitués de moises en bastaings, l'ensemble étant entièrement assemblé par des tiges boulonnées. [...] Ces structures sont propres aux constructions industrielles en vigueur sur la plupart des édifices au XIX^{ème} siècle, contrairement à la flèche qui, elle, utilise une structure plus élaborée avec des bois de brin, venus de Champagne d'après Viollet-le-Duc ».

Les charpentes du XIX^{ème} siècle apparaissent en effet, pour les parties courantes, comme des sortes de fermes latines, à quatre niveaux d'entrails moisants et avec des jambes de force. Ces fermes étaient soulagées par un portique interne qui venait recréer une sous-ferme, qui soulageait les entrails et les arbalétriers. Le portique était lui-même composé de deux jambes de forces qui s'assemblaient dans les poteaux latéraux (entre les moises du 2^{ème} entrail retroussé). Des étrépillons entre les moises venaient reprendre les efforts de compression. Le poinçon montait à mi-ferme, depuis le troisième entrail jusqu'au faîtage. Deux forts poteaux (ou faux-poinçons), disposés sensiblement au tiers de la portée, soulageaient les deux premiers niveaux d'entrails en flexion.



Ferme XIX^{ème} siècle en type

- Elément du « Portique interne » travaillant en compression
- Elément du « Portique interne » travaillant en traction

Description détaillée du second œuvre et de la couverture

La couverture

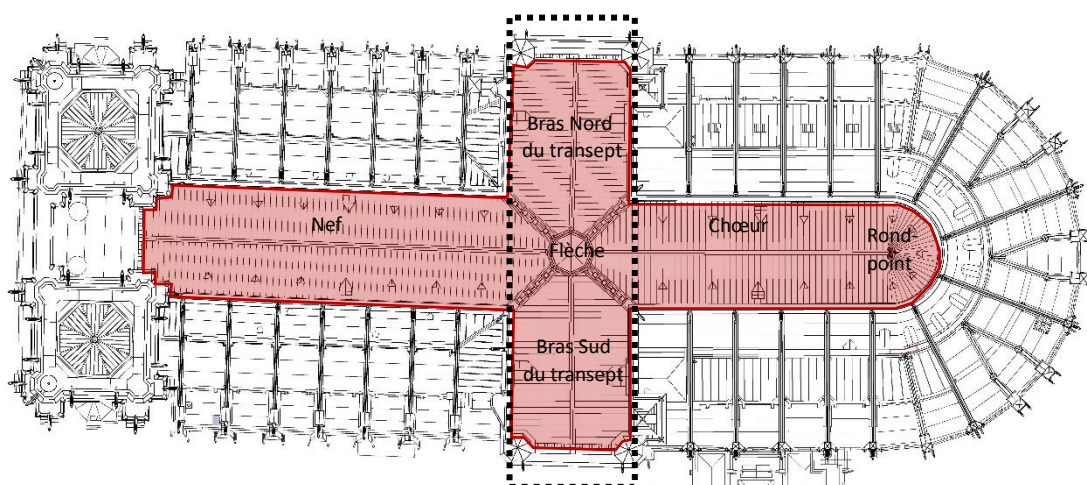
Pour une meilleure compréhension nous donnons ci-après une description détaillée complète de la couverture du grand comble (y compris le chœur et la nef).

La zone couverte par la présente opération ne concernera cependant que les bras de transept tels que défini en introduction du rapport.



*Vue générale de la toiture du grand comble depuis les tours,
(Photographie agence Philippe Villeneuve, mai 2013)*

Le grand comble de la cathédrale couvrait le vaisseau central de la nef, du chœur ainsi que les bras des transepts selon un volume unique au centre duquel se dressait, à la croisée du transept, la flèche.



Zone concernée par la présente opération de reconstruction des couvertures.

Ce volume était défini par une toiture à deux versants, habillée de tables de plomb, dont l'altimétrie de l'égout et celle du faîtage régnaient au même niveau sur l'ensemble du vaisseau. Le bas de pente se situait à 35 mètres environ au-dessus de la rue et le sommet des crêtes de faîtage à 45 mètres environ. La pente de chacun des versants, très raide, atteignait 55° environ.

La couverture s'achevait par des pignons maçonnés à l'extrémité Ouest de la nef et des deux bras de transept, et par une croupe semi-circulaire au-dessus du rond-point du chœur. Cette dernière était surmontée d'une croix, tandis qu'une crête aux motifs végétaux rehaussait l'ensemble des linéaires de faîtages. À intervalles réguliers, des outeaux et lucarnes punctuaient la partie basse de la couverture.

La jonction entre les quatre parties de la Cathédrale (Nef, chœur et bras de transept) était assurée par un dispositif de double noues, séparées par les contrefiches des fermes diagonales de la flèche, sur lesquelles prenaient place les statues en cuivre représentant les apôtres. Les noues sont décrites, en détail, dans le chapitre « flèche ».

Chaque pan de toiture mesurait près de 11,80 mètres de haut (hauteur développée) et était composé de 8 rangées de tables de 1,30m à 1,50m de haut, et d'un bas de pente de 40cm de haut environ.

L'ensemble était recouvert de tables de largeur régulière (0,56 m de large entre ourlets de 4 cm), parfaitement alignées sur les ornements du faîtage : on comptait deux tables de plomb entre chaque épi. Les deux versants de la nef comptaient 83 travées, les quatre versants du transept en comptaient 35, la partie droite du chœur était composée de 61 travées par versant et la partie tournante du rond-point comptait 24 travées tournantes.

Cette composition régulière conférait un aspect particulièrement homogène à la couverture en plomb de la Cathédrale.

La mise en œuvre des tables de plomb

Techniques de pose et d'assemblage

Les tables de plomb de la couverture du grand comble avaient une épaisseur comprise d'environ 3mm¹⁸ et mesuraient 80 cm de large avant d'être battues. Elles étaient posées, sans interface, sur des voliges en chêne flotté. Ces dernières, de 12 cm de large en moyenne sur 2,7 cm d'épaisseur étaient clouées, non jointives, sur les bois de charpente. Outre leur rôle de support de couverture, le voligeage participait également au contreventement de la charpente. Ce point est développé plus précisément dans le chapitre « Charpente ».

En 1866, l'ingénieur C. Détain détaille avec une grande précision, dans son article « les couvertures en plomb » paru dans la *Revue de l'architecture et des travaux publics*, la mise en œuvre des tables de la couverture du grand comble de la cathédrale. Fondamental, malgré quelques imprécisions, pour la connaissance des modes de fixations et d'assemblage, nous en donnerons, ci-après, quelques extraits.

¹⁸ L'épaisseur indiquée par C. Détain dans son article, de « 4/5 lignes » (soit 2,82mm) est également mentionnée pour l'exécution des chéneaux dans le « Détail de l'attachement n°29 du 28 août 1857 » (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives des Monuments Historiques, 98-35-03-16 - planche 2) et concorde avec celui des tables de plomb du transept Sud rescapées de l'incendie. L'épaisseur plus importantes des tables de plomb observée dans la nef lors d'un sondage effectué le 17 mars 2015, s'élevant entre 3,5 et 4 mm, résultait d'un phénomène de fluage.



Les joints verticaux – ourlets creux

Latéralement, les tables étaient maintenues, entre elles, par des ourlets creux verticaux.

« [...] Pour former les enroulements, les rebords en contact sont ménagés plus grands sur la gauche que sur la droite de chaque joint, dans la proportion de 2 à 3 (0,12m pour l'un et 0,08m pour l'autre). La partie débordante du plus grand rebord est repliée sur le rebord plus petit, et ce premier assemblage est replié encore sur lui-même pour former le joint définitif. [...] »

Dans son *Dictionnaire raisonné*, Eugène Viollet-le-Duc soulève, pour ce type d'assemblage, la nécessité de ne pas serrer, lors de leur mise en œuvre, ces « bourrelets enroulés », afin de ne pas empêcher la dilatation ou le retrait de chaque feuille.

« [...] Les enroulements sont relevés au-dessus du niveau général de la couverture par des champs en chêne de 0,027m d'épaisseur, fortement biseautés sur les côtés, de manière à les garantir contre l'affluence des pluies. [...] »

Ces chanlattes de section trapézoïdales étaient clouées sur la volige en chêne. Leur entraxe (60 cm environ) était totalement dissocié de celui des chevrons formant ferme de la charpente médiévale, dont celui de la nef (Entraxe entre chevrons formant ferme secondaires : 0,65 m, entre chevrons formant ferme secondaires et chevron formant ferme principaux : 0,80m) différait de celui du chœur (entraxe entre chevrons formant ferme secondaires : 0,70 m, entre chevrons formant ferme secondaires et chevrons formant ferme principaux : 0,90m).

Favorisant une homogénéisation de la couverture du grand comble afin de créer une harmonie visuelle extérieure, Eugène Viollet-le-Duc opta pour un rythme constant des tables de plomb en s'affranchissant, par un voligeage continu, de celui plus irrégulier de la charpente. Il crée ainsi deux ouvrages quasi « indépendants » dans leur conception.

On notera un léger biais des joints verticaux que la géométrie générale du grand comble explique. En effet, les murs d'égouts n'étant pas parallèles avec la ligne de faitage d'une part, et entre eux d'autre part, la pente des versants était générée perpendiculairement par rapport aux lignes d'égouts et les ourlets creux étaient mis en œuvre perpendiculairement à ces dernières.

Les joints horizontaux

« [...] Les joints horizontaux sont formés par un simple recouvrement à plat de 0,20m environ, qui se manifeste par un renflement dans les enroulements, où les feuilles se retrouvent réunies en quadruple épaisseur. Chaque feuille est clouée par le haut avec des clous forgés, à la large tête plate, espacés de 0,10m environ ; et, de plus, elle est rabattue à la forme de crochet sur le champ d'épaisseur du haut de la volige supportant le clouage. [...] »

« Le bord inférieur des feuilles est maintenu par deux agrafes en fer, peintes au minium, et fixées chacune par trois fortes vis ; ce bord ne descend pas à fond dans les agrafes afin de ménager la place suffisante pour la libre dilatation des feuilles [...] ».

Les fortes pattes en fer, attestée par un devis de l'entreprise Monduit datant de 1860¹⁹, furent remplacées, dans la première moitié du XX^{ème} siècle²⁰, par des agrafes en cuivre fixées. Celles-ci

¹⁹ Minute de travaux de plomberie pour le compte de M. Monduit, exercice 1860 (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, F-1998-035-03 _ 16)

²⁰ Rapport présenté par E. Brunet au Ministère de l'Instruction publique et des Beaux-Arts, le 30 mai 1930 (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives des Monuments Historiques, 98-35-17-09) : « *Achèvement du travail de*

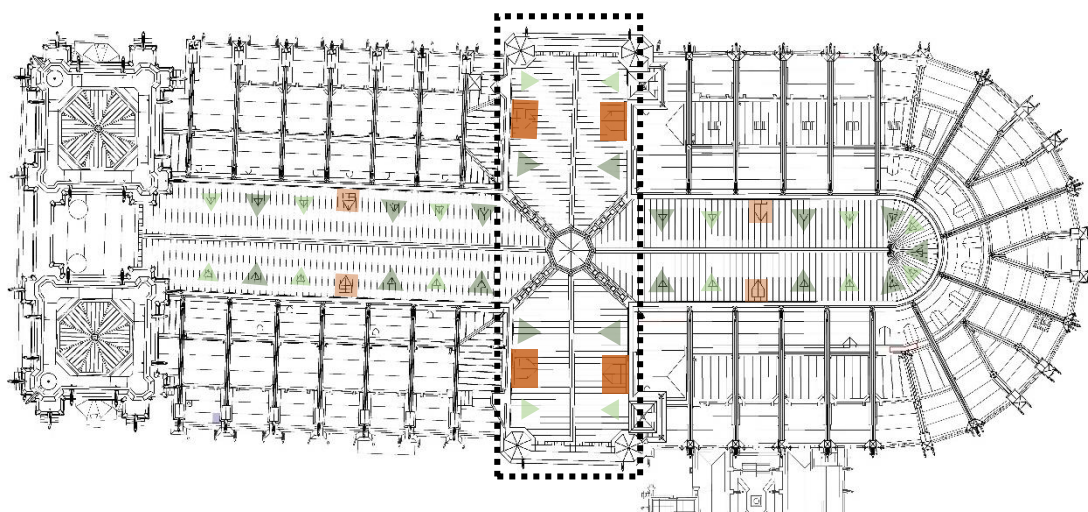
étaient majoritairement vissées, en quatre point au voligeage (3 sur la volige située au-dessus de la table à recouvrir, et une dans cette dernière). Parfois, certaines pattes étaient soudées à la table intérieure, comme au droit des tables de la dernière rangée de tables.



À gauche : Vue du rabattement des tables de plomb sur la volige (Photographie R. Fromont et C. Trentesaux, 2015)
À droite : Vue de détail du versant Nord de la nef (Photographie agence Ph. Villeneuve, mai 2013)

Les lucarnes, les outeaux et les lentilles de verre

Lors de la réfection de la couverture, Eugène Viollet-le-Duc scande la toiture de petits ouvrages en partie basse des versants, selon une composition extrêmement hiérarchisée.



Localisation des lucarnes et outeaux de la couverture du grand comble

■ Lucarne de « type 1 » ■ Lucarne de « type 2 » - Horloge ▲ Petit outeau ▲ Grand outeau

Zone concernée par la présente opération de reconstruction des couvertures.

Chaque versant était doté, en son centre, d'une lucarne. Celles du chœur et de la nef, de type 1, formaient des accès complémentaires, en toiture, au chemin de ronde. Celles des bras de transept, de type 2, abritaient les cadrans d'une horloge installée dans les combles.

remplacement des anciennes pattes d'attache des feuilles de plomb des grands versants, en fer oxydé, par de fortes pattes en cuivre étamé. »

De part et d'autre de ces lucarnes, prenaient place, selon un rythme relativement régulier, des outeaux de formes triangulaires. L'intervalle entre chacun de ces ouvrages oscillait légèrement, entre 9 et 10 tables de plomb au droit du chœur et de la nef et, entre 7, 8 et 9 tables de plomb au droit des bras de transept afin de s'adapter au rythme de la charpente sous-jacente et permettre leur positionnement entre deux chevrons formant ferme.

Deux typologies d'outeaux permettaient de créer une alternance de rythmes « forts » (grand format) et « faibles » (petit format), limitant ainsi tout effet de monotonie. La répartition de ce rythme binaire était étudiée de telle sorte, que les points forts de la composition, tels que l'axe du rond-point du chœur ou encore les noues de la croisée du transept, correspondaient à des grands outeaux.

Une harmonie d'ensemble était assurée par l'alignement des faîtages des lucarnes de type 1 et des outeaux au tiers, environ, de la hauteur de la couverture, avec crête (correspondant à la mi-hauteur de la 3^{ème} rangée des tables de plomb – au-dessus du niveau du 1^{er} faux-entrait des charpentes médiévales). Seules les grandes lucarnes des bras de transept de type 2, faisaient exception. Cette ligne fictive correspondait, pour ces ouvrages, à leur ligne d'égout.

Dans la continuité de son parti, Eugène Viollet-le-Duc les compose et les dote d'ornements d'esprit néo-gothique.

L'ensemble de ces ouvrages avait pour rôle majeur de garantir une atmosphère saine du comble en assurant une aération constante, indispensable à la bonne conservation des charpentes.

Nous décrivons ci-après, dans le détail, les ouvrages spécifiques des toitures des bras de transept.

Les lucarnes de type 2 et l'horloge (4 unités)

Les lucarnes de type 2, étaient positionnées au centre des versants des bras de transept. Imposantes, elles mesuraient au plus large, environ 4,00 mètres et, en hauteur environ 5,00 mètres jusqu'au faîtage et 6,40 mètres jusqu'au sommet du fleuron. Elles abritaient les cadrans de l'horloge mise en œuvre dans les combles du vaisseau principal.



Élévation principale et jouée de la lucarne du versant Est du bras de transept Sud (Photo. agence Ph.Villeneuve, 2013)

Les lucarnes déclinaient au droit de leur pignon, un motif trilobé (motif beaucoup plus allongé et non recoupé par le poinçon central). Elles étaient ornées de trois fleurons identiques : un au faîtage, et deux, de part et d'autre de la partie centrale abritant le cadran. Ces derniers étaient probablement réalisés, à l'identique des décors de la flèche, en plomb repoussé, selon les mêmes principes. En partie basse, la lucarne s'élargissait, ménageant des ouvertures destinées à accentuer les entrées d'air dans le comble.

Les lucarnes de type 2 étaient couvertes de tables de plomb assemblées par ourlets creux tant sur les jouées que sur la toiture en bâtière. Faisait exception, l'égout est majoritairement traité par une feuille continue sur toute sa longueur, maintenue par des pinces. Quatre noues (une pour chaque versant de la toiture de la lucarne et une à la jonction de chaque côté de l'élargissement triangulaire inférieur) assuraient la jonction avec la couverture du grand comble et la bonne gestion des eaux pluviales.

La charpente

Les lucarnes de type 2, furent conçues simultanément à la charpente des bras de transept, cette dernière étant complètement refaite à neuf par Eugène Viollet-le-Duc selon un principe de fermes et pannes. Malgré cette temporalité, la largeur des lucarnes, et plus particulièrement de son corps principal, ne résultera pas du rythme régulier des chevrons et en sera complètement indépendant.

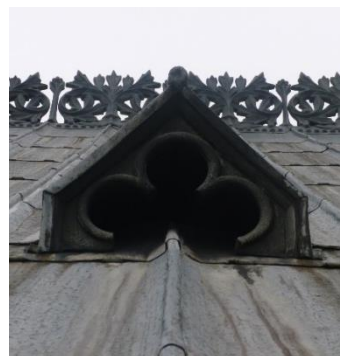
Les outeaux

Afin d'assurer la bonne ventilation des combles, une succession d'outeaux scandait l'ensemble des versants du grand comble. S'ils étaient déjà présents sur la couverture du XVIII^{ème} siècle à l'époque du Cardinal de Noailles, ces ouvrages étaient alors dépourvus de tout effet stylistique et ornemental. Lors de la réfection de la couverture, Eugène Viollet-le-Duc leur confère un caractère néogothique par l'ajout en élévation, d'un motif trilobé.

Deux types d'outeaux, couverts en bâtière, alternaient :

- Type 1 - les « petits » outeaux (14 unités)
Leur hauteur correspondait au motif trilobé. Ce dernier était marqué par un contour en relief semi-circulaire.
- Type 2 - les « grands » outeaux (17 unités)
Le motif trilobé de ces ouvrages, chanfreiné, prenait appui sur un système de consoles composées de deux rangs de feuilles superposées.

L'ensemble, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur (sous-face des deux versants et revers de la façade), était recouvert de plomb. À l'intérieur, afin d'éviter la pénétration de volatiles dans les combles, un grillage à nid de poule, cloué directement sur le voligeage de la charpente du grand comble, obstruait l'ouverture.



En haut petit outeau, en bas grand outeau (Photographies agence Philippe Villeneuve, mai 2013)

Supports existants pour la restitution à l'identique ;

- Vestiges suite à l'incendie
 - Petit outeau conservé dans son intégralité, conservé sous un des barnums (section métal) ;

Les entrées de lumières complémentaires : les lentilles de verre

Afin d'augmenter les apports de lumière à l'intérieur du grand comble, assurés principalement par les vitraux losangés garnissant les roses des trois pignons et partiellement par les lucarnes, Eugène Viollet-le-Duc insère ponctuellement des lentilles de verre, de 50 cm de diamètre environ, dans la couverture.

Le premier ensemble, mis en œuvre le 15 octobre 1857²¹, se composait de deux lentilles disposées à l'extrémité du chevet, au centre des tables de plomb mises en œuvre de part et d'autre de l'axe du rond-point. Situées en partie haute de la huitième rangée, une bande périphérique circulaire, maintenue par des pattes métalliques, borde la pièce de verre tandis qu'une table de plomb, découpée en partie basse selon un arc de cercle, en recouvre la partie supérieure.

Le second ensemble, destiné à éclairer la souche de la charpente de la flèche était mis en œuvre le 21 janvier 1861²². Huit lentilles étaient disposées de part et d'autre des noues de la croisée auxquelles s'ajoutaient deux autres lentilles côté nef. Elles se composaient d'une simple pièce de verre épais maintenu par des pattes, à cheval entre la troisième et quatrième rangée des tables de plomb. La table supérieure, découpée selon un demi-cercle, assurait le recouvrement supérieur de la pièce de verre.



Les deux lentilles du rond-point du chœur (agence Philippe Villeneuve, 2013)

Les ornements

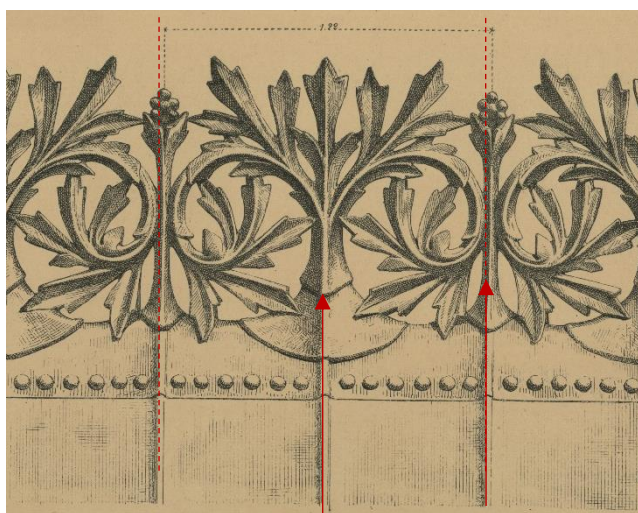
Lorsque Eugène Viollet-le-Duc et Jean-Baptiste-Antoine Lassus engagent la réfection de la couverture en plomb du grand comble, ils rehaussent cette dernière en complément des ouvrages décrits précédemment, d'un ensemble de décors néo-gothiques.

Les crêtes d'Eugène Viollet-le-Duc

Eugène Viollet-le-Duc orne le faîte du grand comble d'une crête ornementale de type néo-gothique. Il s'inspire, pour l'esquisser, de celles qui décoraient les châsses au XII^{ème} siècle, et alterne des épis de graminées et des fleurons composés, de part et d'autre d'un axe, de deux rinceaux feuillagés. Le dessin des motifs végétaux, s'inspirant des feuilles de persil, est relativement proche de celui que l'architecte met en œuvre à la basilique Saint-Denis, lorsqu'il y restitue, vers 1846, pour la première fois, une crête d'inspiration médiévale en plomb.

²¹ *Journal quotidien des travaux effectués à la cathédrale Notre-Dame de Paris* sous la direction d'Eugène Viollet-le-Duc et Jean-Baptiste Lassus, rédigé de 1844 à 1865 par l'Inspecteur en chef des travaux, (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine : E-80-14-10), Transcription par REA en 2020

²² Ibid.



Fleuron



Épis

À droite, dessin d'archive extrait de la Médiathèque du Patrimoine - MAP 2012 024 028 Fonds Famille VLD

À gauche, photographie avant incendie (Agence Philippe VILLENEUVE, 2014)

Un motif complet de crête se développe sur une longueur d'environ 1,22 mètre, correspondant à la largeur de deux tables de plomb, chaque épi et axe du fleuron correspondant à un ourlet creux vertical sur tasseau trapézoïdal et sur une hauteur de 1,00 mètre. Le poids de la crête est estimé à 200 kg par mètre linéaire.

On dénombre :

- 41 fleurons sur la couverture de la nef ;
- 30 fleurons sur la couverture du chœur ;
- 17 fleurons sur la couverture de chacun des bras de transept.

Pour la mise en œuvre de ces ornements, Eugène Viollet-le-Duc réhabilite une technique employée au Moyen-Âge à savoir le plomb repoussé : le plomb laminé est modelé au marteau sur une forme. Le dossier documentaire des ouvrages exécutés rédigé par B. Mouton, ACMH, à l'issue de sa campagne de restauration, décrit avec précision, la structure interne et le mode constructif des crêtes et épis mis en œuvre par l'architecte au XIX^{ème} siècle :

- Des formes en plomb de 3mm sont embouties sur une forme en bois afin de former les deux demi-coques composant la partie ornementale de chaque fleuron. Afin d'être probablement rigidifiée, chacune d'entre elle est chargée, sur sa face intérieure, d'étain coulé sur une épaisseur d'environ 10 mm ;
- Une ossature métallique, composée de trois éléments façonnés à la forge et assemblés par un anneau, l'ensemble étant liaisonné par vis et écrous, est incorporée dans une des deux formes et est maintenue par des petits pontés en fer doux brasés sur le plomb : deux éléments courbes formant équerre en partie basse, reliés par une bague centrale et boulons traversant, à un tuteur vertical en fourchette en partie basse pour être fixé, par vis, sur les chanlattes épaisses, constitutives du faîtage.



Photographie extraite du DDOE « Restauration des crêtes de faîtaae et des couvertures », B. Mouton, ACMH, avril 2011

- Les deux demi-coques sont assemblées à l'aide d'une brasure à l'étain, dont la finition est réalisée, après refroidissement, à l'aide d'une grosse râpe.
- Des trous sont ponctuellement percés pour assurer un parfait calage de l'ossature métallique dans la forme finale par coulage d'étain.
- A la base des crêtes, une « jupe » en plomb, recouvrait le faîtage et était rehaussée de cabochons décoratifs pour dissimuler la fixation des tables de plomb.

Les campagnes de restauration de la fin du XX^{ème} siècle et du début du XXI^{ème} siècle.

En 1930, un premier rapport signale qu'une partie du vaisseau s'est déversée²³. E. Herpe, ACMH du 21 mars 1945 propose la « réparation sur la crête et le faîtage avec fourniture de pièces et soudures »²⁴. Des travaux sur la couverture sont conduits en 1954 par l'entreprise Monduit, sous la direction de ce même architecte. Le mémoire de l'entreprise, ainsi que le devis approuvé en 1967 ne permettent pas de statuer si les travaux prévus ponctuellement sur la crête furent réalisés.

A la fin du XX^{ème} siècle, le déversement très prononcé de la crête de faîtage, ainsi que son mauvais état de conservation enclenchent une importante campagne de travaux. Celle-ci se divisera en trois chantiers de restauration successifs : en 1978, sous la direction de Bernard Vitry, ACMH, entre 1980 et 1986, sous la direction de Bernard Fonquernie, ACMH et, enfin, entre 2009 et 2010, sous la direction de Benjamin Mouton, ACMH.

Outre le déversement, l'observation rapprochée des crêtes lors de ces différentes campagnes de restauration, met en évidence :

- l'ouverture ou fissuration des brasures à l'étain, plus cassantes en vieillissant que le plomb ;
- la fissuration de certains ornements, majoritairement au droit des amincissements de matière liés probablement à une mise en œuvre en plomb repoussé, difficilement maîtrisée dans des parties demandant une très grande technicité comme les arêtes ou les parties les plus travaillées.
- la corrosion des armatures et le pourrissement des bois de charpente situés dessous, suite aux infiltrations d'eau induites par les désordres décrits précédemment.

Afin de pallier ces désordres et améliorer les dispositifs d'origine, les techniques de mises en œuvre retenues lors des travaux conduits sur les trente années pendant lesquelles s'étalèrent la restauration de la crête, sont légèrement modifiées.

²³ Ministère de l'Instruction publique et des Beaux-Arts. Beaux-Arts. Monuments Historiques. Rapport présenté le 30 mai 1930 par M. l'architecte E. Brunet le 30 mai 1930 à l'appui d'un projet de restauration. (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives des Monuments Historiques, 98-35-17-09)

²⁴ Devis de 677 723,65F du 21 mars 1945 établi par E. Herpe, ACMH pour le Ministère de l'Éducation nationale. Beaux-Arts. (Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Archives des Monuments Historiques, 81-75-23-28-19)

Ainsi, les armatures en fer forgé, sont remplacées par des aciers galvanisés à chaud²⁵ ou traitées par injection de passivant type « Rustol » lorsque conservées²⁶.

La technique du plomb repoussé pour la confection des parties ornementales est, quant à elle, remplacée par celle du plomb coulé.

Les fleurons, ainsi fabriqués, conservent, sous la direction de Bernard Fonquernie, la division en double coque. Afin de ralentir le risque de déchirure, les soudures à l'étain sont cependant remplacées par des soudures autogènes tandis que le blocage des armatures est assuré par le « remplissage des coquilles de résine par injection (résine liquide, non cassante, sans fibre de verre »¹⁴.

Sous la direction de Benjamin Mouton, une solution technique, par monocoque, permet de s'extraire, en grande partie de la problématique des soudures. Le remplissage à la résine est abandonné pendant cette dernière tranche de travaux.

Le support de pose des crêtes

Description des ouvrages mis en œuvre par Eugène Viollet-le-Duc

Comme nous l'avons décrit plus haut, lorsqu'Eugène Viollet-le-Duc engage la réfection de la couverture du grand comble, il la dissocie complètement des charpentes sur lesquelles elle est mise en œuvre. Aucune correspondance du rythme des armatures de la crête n'est assuré avec celui des fermes à chevrons formant ferme, tant sur le chœur et la nef, que sur la charpente des bras de transept, dont pourtant, il mène la reconstruction complète. Rebâtie selon un principe structurel à fermes et pannes, il n'adaptera pas spécifiquement le rythme de ces chevrons de cette dernière en correspondance avec celui de la crête.

Ainsi, les fourchettes des crêtes sont vissées, non sur des pièces de charpente maîtresses, mais sur les voliges et d'épaisses chanlattes. Des tirefonds liaisonnaient ces dernières entre les deux versants.

Afin de ne pas créer de surépaisseur, les fourchettes des crêtes étaient embrevées dans l'épaisseur du support de couverture, rigidifiant le système.

Lors des travaux conduits par Benjamin Mouton, ACMH, la découverture des faîtages du bras de transept Nord et de la partie orientale du chœur met en évidence trois dispositions de charpente différente pour assurer la fixation du support de couverture et reprendre la charge et les efforts aux vents des crêtes de faîtage :

- **La couverture de la nef, travées médiévales (et du chœur)**

La charpente médiévale de la nef était dépourvue de panne faîtière. La partie sommitale se composait de chevrons porteurs et secondaires, simplement assemblés en tête (1). Au XIX^{ème} siècle, l'altération profonde de plusieurs têtes de chevrons nécessite, pour assurer le maintien des chanlattes support de crêtes, la mise en place de fourrures latérales, moisant ces derniers (2).

Détail du faîtage d'une travée médiévale de la nef, extraite du DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », B. Mouton, ACMH, 2011



²⁵ Au zinc 80 microns et enrobés en élastomère sous Bernard Fonquernie. Extrait du PAT établi par Benjamin Mouton, reprenant les prescriptions de son prédécesseur.

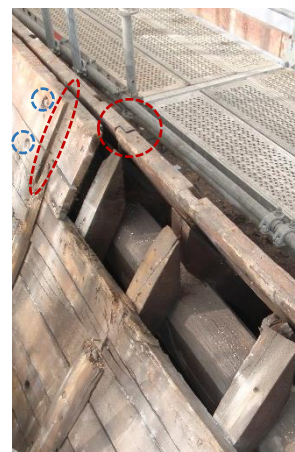
²⁶ DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », rapport de présentation, par Benjamin Mouton, ACMH, avril 2011

• La couverture de la nef, travées « Eugène Viollet-le-Duc » (et du chœur)

Lors de la construction de la flèche, Eugène Viollet-le-Duc modifie les premières travées de la nef et du chœur afin que celles-ci participent aux descentes à la stabilité de cette dernière. La charpente qu'il met alors en place rompt avec le principe constructif médiéval à chevrons formant ferme au profit d'une structure à pannes et chevrons.

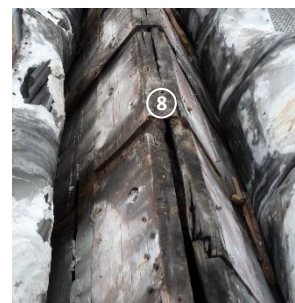
Le faîtage se constitue alors d'une panne faîtière « traditionnelle » assemblée sur les poinçons des fermes, sur laquelle s'appuie un cours de chevrons. Les voligeages sont cloués sur ces dernières.

Détail du faîtage d'une travée XIX^{ème} siècle de la nef, extraite du DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », B. Mouton, ACMH, 2011 – Dans les pointillés rouges, vue d'une engravure d'une crête et d'un assemblage à mi-bois de chanlattes. En bleu, vu

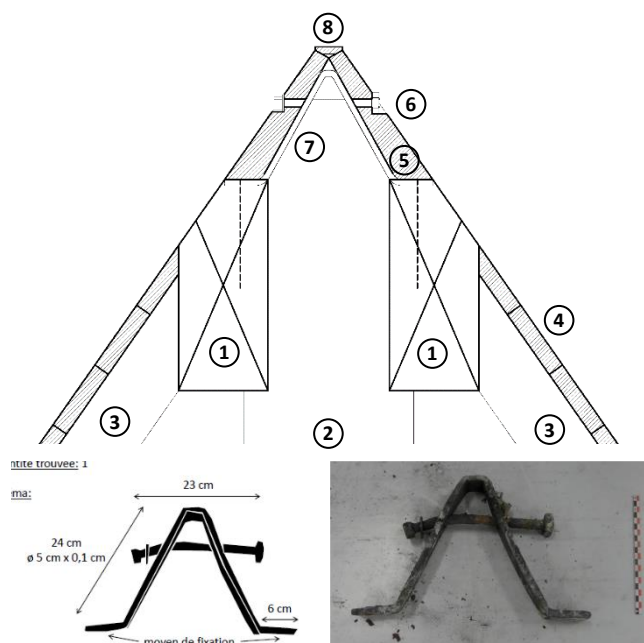
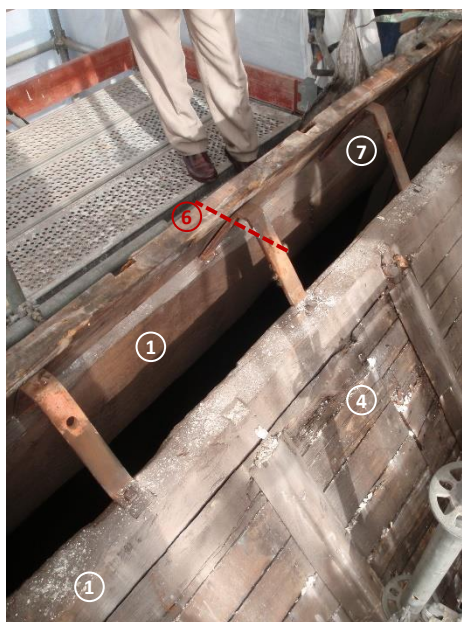


• La couverture du bras de transept Nord (et par analogie du bras de transept Sud)

La charpente des bras de transept est reconstruite, selon une technique moderne par Eugène Viollet-le-Duc concomitamment à celle de la flèche. Son faîtage est constitué de deux pannes moisées (1) sur les poinçons (2), sur lesquelles reposent, en chambrée, les chevrons (3) supportant les voliges (4). Le faîtage support de couverture est constitué de deux chanlattes épaisses (5) maintenues par des boulons transversaux (6) engagés sur des étriers métalliques (en forme de « V » inversé - (7)) tirefonnés sur les pannes. Enfin, sur les chanlattes, une fine pièce de bois est rapportée fermant l'espace entre ces dernières et assurent une surface horizontale au sommet (8) pour le vissage des équerres de renforts des armatures de la crête.



Vue après découverte, avant travaux (entreprise Lebras Frères, entre 2009 et 2011)



Support des crêtes des bras de transept

A gauche : Faîtage du bras de transept Nord, extraite du DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », B. Mouton, ACMH, 2011 – En haut, coupe de principe du faîtage des bras de transept – En bas à droite : Dessin et photographie des étriers métalliques retrouvés dans les décombres après tri, par le LRMH des éléments métalliques (LRMH)

Les Modifications apportées par Benjamin Mouton (2009-2011)

Lors de la découverte de faîtage, Benjamin Mouton, ACMH, constate l'état de dégradation très important des chanlattes supports de faîtage : « *presque toutes, fendues dans la longueur au droit des boulons de maintiens avec des défauts plus ou moins importants au niveau des assemblages entre les différentes longueurs. Par ailleurs, l'assemblage en tête des chanfreins bord à bord n'offrait pas un support adapté au maintien des vis des équerres de renfort des mâts des crêtes de faîtage.* »²⁷

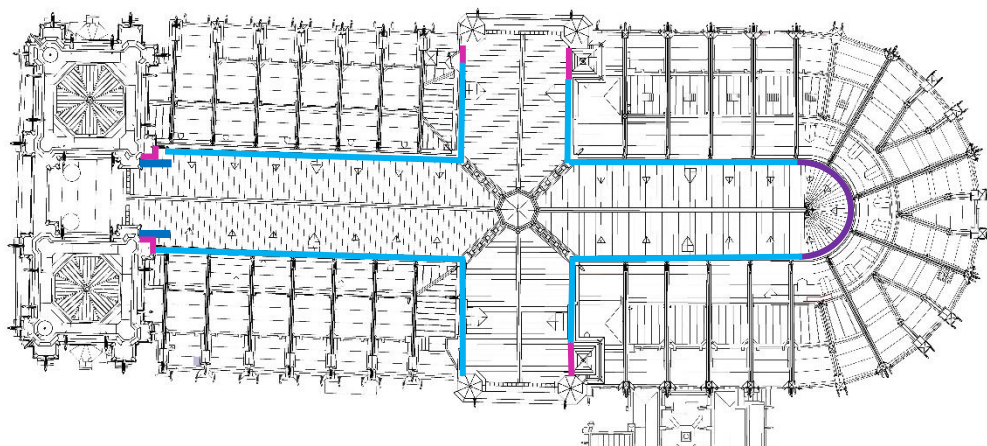
Afin de palier à ces défauts, un nouveau support, se décomposant en trois pièces de bois est alors conçu : deux chanlattes latérales, fixées sur les chevrons, chapeautées, au sommet, après léger écrêtages des chevrons au droit de la nef, ou suppression des étriers métalliques au droit du bras de transept Nord, par une pièce en chêne chanfreinée, tirefonnée sur ces derniers.



Photographie extraite du DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », rapport de présentation, par Benjamin Mouton, ACMH, avril 2011

Le recollement et l'évacuation des eaux pluviales

Le grand comble était doté en bas de versant, avant l'incendie, à l'exception du rond-point du chevet, de gouttières demi-rondes en cuivre. Cette disposition remplaça, en 1940, le chéneau en plomb initialement mis en œuvre par Eugène Viollet-le-Duc. Des descentes en cuivre, reprenant le rythme des arcs-boutants, évacuaient les eaux recueillies sur le chemin de ronde, situé au pied des murs bahut.



Localisation des différentes évacuations d'eaux pluviales du grand comble

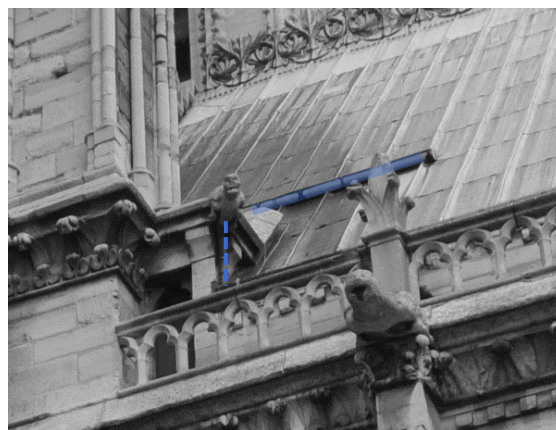
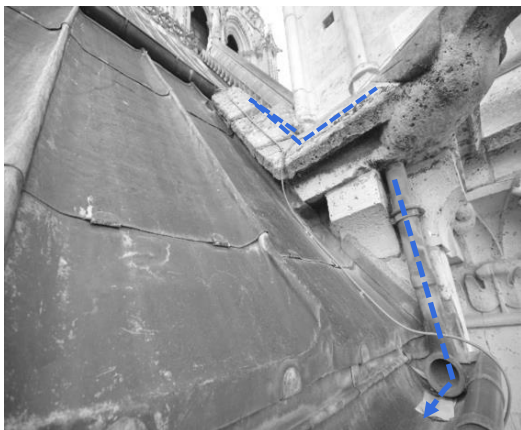
- | | | | |
|--|---|---------------------------------------|----------------------|
| — | Chéneau encaissé en pierre et recouvert de plomb | — | Gouttière déportée |
| — | Gouttière en cuivre disposée sur l'arase du mur du comble | — | Absence de gouttière |

Le chemin de ronde, sur lequel se déversaient les descentes EP du grand comble, était habillé de plomb à l'exclusion de celui au Nord de la nef qui faisait alors office de chéneau secondaire.

²⁷ DDOE « Restauration des crêtes de faîtage et des couvertures », rapport de présentation, par Benjamin Mouton, ACMH, avril 2011

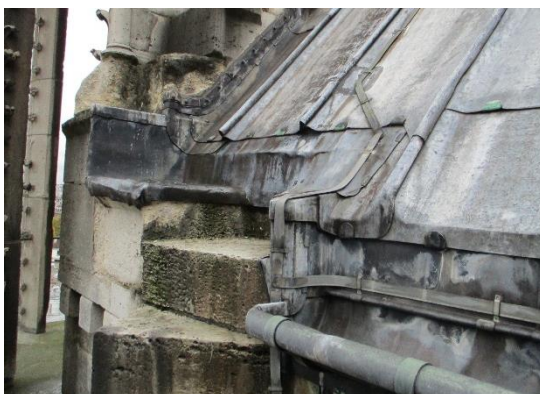
Au droit des articulations complexes rendant impossibles ces dispositions, des chéneaux chemisés en plomb déviaient, en complément, les eaux vers la gouttière ou directement dans le chéneau du chemin de ronde :

- à l'extrémité Ouest de la nef, entre les tours et les versants de toiture et au-dessus des portes d'accès au chemin de ronde, compris l'adjonction de gouttières demi-rondes s'évacuant dans deux chéneaux bâtis dans les combles ;

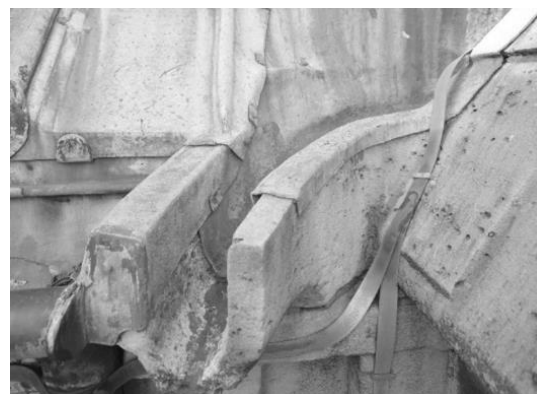


Avant incendie, jonction de la couverture du Grand comble avec le massif occidental

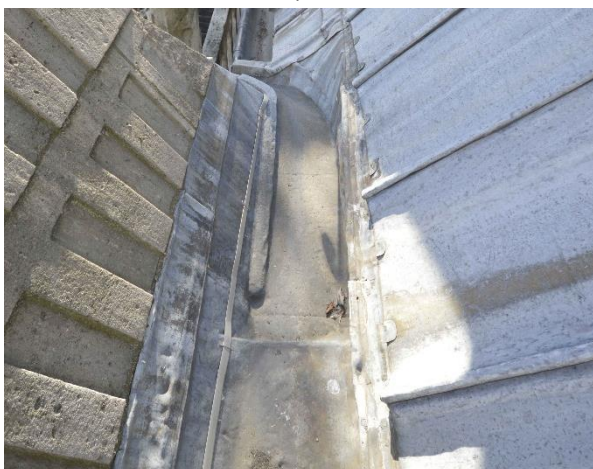
- à l'extrémité du versant Ouest du transept Nord
- Aux extrémités Nord et Sud des versants Est du transept, à l'arrière des édicules d'escalier



Avant incendie, vue de l'extrémité du versant Ouest du transept Nord

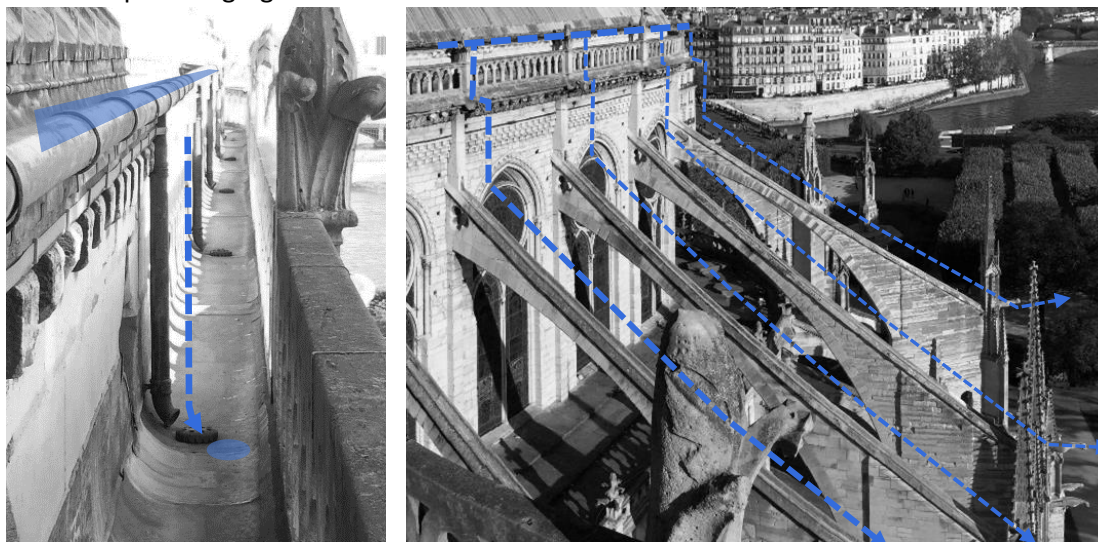


Avant incendie, vue de l'exutoire chemisé en plomb de la tourelle du bras de transept Nord



*Avant incendie, vues de détails des chéneaux des versants Est des bras de transept
A gauche : Bras de transept Nord - A droite : Bras de transept Sud*

Les eaux pluviales déversées sur le sol du chemin de ronde étaient ensuite dirigées vers des évacuations aménagées dans la maçonnerie des murs gouttereaux. Ces percements acheminaient les eaux pluviales jusqu'aux canaux couronnant les arcs-boutants. En partie basse, les eaux étaient évacuées par une gargouille très saillante.



Avant incendie, vue des dispositions d'évacuation des eaux pluviales du grand comble

Les gargouilles sculptées situées en partie haute des murs gouttereaux du vaisseau principal ne remplissent, pour la majorité, qu'un rôle d'ornementation. Les rares, reliées au dispositif d'évacuation des eaux pluviales, ont été percées tardivement et servent aujourd'hui de trop plein.

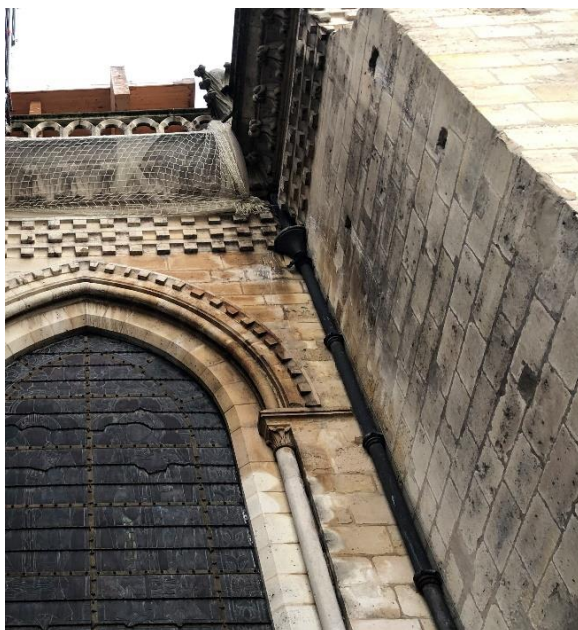
Aujourd'hui, seules dérogent à ce principe d'évacuation des eaux pluviales les extrémités Nord et Sud des bras de transept, équipées de descentes EP s'évacuant, côté Ouest, sur les couvertures des chapelles situées à l'aplomb et côté Est, dans le chéneau des couvertures en croupes (terrasses hautes).



Avant incendie, élévation Ouest du transept Sud



Vue de la descente EP du bras de transept Nord, côté Ouest



Vue de la descente EP du bras de transept Nord, côté Est *Vue de la descente EP du bras de transept Sud, côté Est*

La composition du plomb employé dans la cathédrale Notre-Dame de Paris

Les couvertures d'Eugène Viollet-le-Duc

La composition du plomb mis en œuvre par Eugène Viollet-le-Duc à Notre-Dame de Paris tant sur la flèche et les couvertures de la cathédrale que sur celles de la sacristie, résultait d'un mélange de plomb neuf et de plomb recyclé, issu de la refonte des tables de plomb des couvertures antérieures de l'édifice, y compris de celles de l'ancienne sacristie de Jacques-Germain Soufflot.

Plusieurs devis précisent la refonte des tables de plomb des couvertures antérieures pour la création des nouveaux ouvrages, dont celui signé par Lassus et Viollet-le-Duc de 1848 témoignant d'un réemploi du plomb à hauteur de 45% environ (25 000 kg de plomb neuf pour 20 000 kg de « plomb vieux pour réemploi »)²⁸. Un second devis dressé en 1850 par l'entreprise Durand estime la dépose et la refonte de vieux plomb de l'ordre de 160 046,5 kg et l'emploi de 67 501,58 kg de plomb neuf²⁹ (soit un total de 227 548,08 kg). Pour la nouvelle sacristie, le mémoire des travaux de plomberie de Durand de 1848 précise le réemploi 4 tonnes de plomb de l'ancienne sacristie.

On estime aujourd'hui à près de 450 tonnes la quantité de plomb nécessaire à la reconstruction à l'identique des couvertures et de la flèche.

Premier bilan des analyses sur les tables de couverture et les éléments de décor

Rédigé par Maxime L'Héritier, Guillaume Sarah (CNRS – Chantier scientifique Notre-Dame - GT Métal), Aurélia Azéma et Delphine Syvilay (LRMH, pôle métal)

²⁸ Devis estimatif des travaux de plomberie à exécuter pour la couverture en plomb des combles. 8 mai 1850. MAP, Agence Notre-Dame, cote 1998/35/0007, dossier 31.

²⁹ Devis estimatif plomberie, source : carton n°7 dossier n°28 Agence VLD MAP, devis cathédrale et sacristie 1849-1851).

Les prélèvements

L'analyse du plomb ne nécessite que de très petites quantités de matière (quelques milligrammes), aussi les prélèvements des plombs sont de taille millimétrique. La variabilité de la signature chimique est évaluée par la multiplication des échantillons. Ces prélèvements ont été réalisés au scalpel ou au ciseau afin d'avoir accès à une coupe fraîche dans la matrice métallique, non altérée par la patine.

Type de plomb	Nombre d'analyses
Abat-son	1
Crête de faitage	11
Décor	2
Décor crochet	11
Décor de couverture	1
Lucarne	1
Plomb fondu	6
Scellement agrafe	110
Scellement colonne	14
Scellement goujon	5
scellement pierre	4
Table de couverture	96
Table de zinc	2
Indéterminé	6
Total	6

Nombre d'analyses réalisées à Notre-Dame de Paris par type de plomb

Protocole d'analyse des plombs métalliques

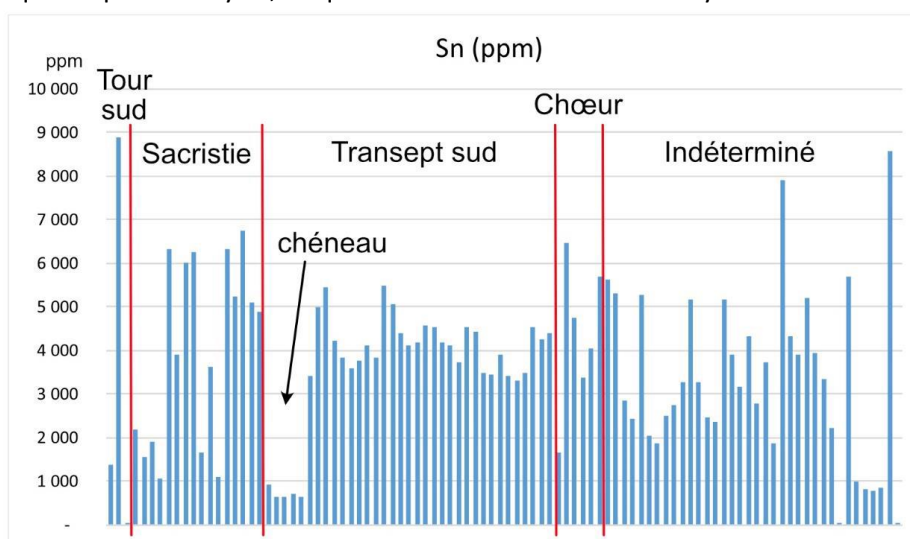
L'analyse élémentaire des prélèvements de plombs est faite en spectrométrie de masse à ablation laser (LA-ICP-MS) à l'IRAMAT-Centre Ernest Babelon (Orléans)³⁰. Elle déterminera la composition élémentaire des plombs avec un intérêt particulier pour les éléments suivants : Ag, Sb, As, Cu, Sn, Zn, Sn, Bi.

Premier bilan des analyses sur les tables de couverture et les éléments de décor

A quelques exceptions près, notamment un chéneau du transept sud, datant vraisemblablement du XX^{ème} siècle, **les tables de plomb prélevées dans la sacristie, le chœur et le transept sud contiennent des quantités d'étain non négligeables, allant de 0,1 à 0,6 % environ. De telles teneurs doivent être reliées à la pratique du recyclage**, qui tend à incorporer au plomb des matériaux riches en étain, notamment provenant de soudures (alliages plomb-étain). La récupération de « vieux plombs » est d'ailleurs bien évoquée dans les archives du chantier de Viollet-le-Duc, qui attestent le recyclage d'au moins 125 tonnes de plomb provenant des tables de l'ancienne couverture et jusqu'à 160 tonnes,

³⁰ Protocole publié dans L'Héritier Maxime, Arles Adrien., Disser Alexandre, Gratuze Bernard, « Lead it be! Identifying the construction phases of gothic cathedrals using lead analysis by LA-ICP-MS », Journal of Archaeological Reports, 6, 2016, p. 252-265.

selon un devis général daté du 8 mai 1850³¹. Une grande partie du plomb de la couverture serait donc à l'époque du plomb recyclé, ce que semblent confirmer les analyses élémentaires.



Teneurs en étain des plombs de couverture analysés (résultats en ppm)

Moyennes de composition par localisation (ppm)	Nb éch.	Ni	Cu	As	Ag	Cd	Sn	Sb	Pb (%)	Bi
Transept Nord	1	2	202	24	58	2	1 364	662	99,77%	32
Tour Sud Pan sud	1	2	178	18	66	1	8 885	386	99,04%	42
Tour Sud Pan ouest	1	1	189	0	28	3	33	4	99,95%	212
Sacristie Pan nord	4	2	135	10	92	1	1 673	101	99,79%	19
Sacristie Pan est	3	3	151	28	89	1	5 413	294	99,39%	30
Sacristie Pan sud	4	2	130	18	98	2	3 168	189	99,64%	23
Sacristie Pan ouest	3	2	139	20	88	1	6 106	332	99,32%	29
Sacristie Terrasse	2	3	197	17	78	2	4 985	262	99,44%	38
Transept sud chêneau	5	2	175	2	51	1,3	715	92	99,88%	126
Transept sud	30	2	202	31	68	1	4 166	286	99,51%	59
Flèche	1	1	263	12	101	2	1 662	238	99,76%	45
Chœur	4	2	188	15	83	2	4 668	414	99,45%	34
Indéterminé	37	2	176	17	74	3	3 423	294	99,58%	115
Moyenne Totale	96	2	181	16	73	2	3 643	275	99,57%	79

Moyennes de composition des tables de couverture analysées (résultats en ppm)

Les compositions moyennes des tables de couverture révèlent des compositions relativement similaires, bien que distinctes d'une zone à l'autre, parfois au sein d'une même structure (différents pans de la sacristie par exemple). **Le taux de plomb est toujours supérieur à 99 % et atteint parfois près de 99,9 %.**

Les concentrations des autres impuretés varient de quelques dizaines de ppm (Bi, Ag) à centaines de ppm (Cu, Sb). On identifie facilement les plombs issus de campagnes de restaurations plus récentes, notamment par leur grande pureté en Pb (99,9 % environ) et leurs teneurs plus importantes en Bi (chênaux, une table de la tour sud). Ces plombs récents ne semblent en outre pas concernés par le recyclage étant donné leurs faibles teneurs en étain.

³¹ Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Notre-Dame, cote 1998/35/0003, dossier 16 and cote 1998/35/007, dossier 31

Type	Localisation	ech	Ni	Cu	As	Ag	Cd	Sn	Sb	Pb (%)	Bi
Abat-son	Tour sud pan ouest	LRMH 144	2	125	10	58	0	3 536	236	99,60%	25
Crête de faîtage	ancienne VLD	2009CVLD-B	2	61	1	95	1	285	231	99,93%	60
Crête de faîtage	ancienne VLD	2009CVLD-E	2	114	2	26	3	457	13	99,93%	58
Crête de faîtage	ancienne VLD	2009CVLD-I	26	607	69	86	5	135 093	111	86,36%	69
Crête de faîtage	Grand comble	14CF1P1	2	48	4	27	4	4 211	220	99,53%	189
Crête de faîtage	Grand comble	14CF1P2	2	56	5	28	4	3 796	213	99,57%	183
Crête de faîtage	Grand comble	14CF2P1	4	174	13	49	4	18 444	148	98,09%	188
Crête de faîtage	Grand comble	14CF3P1	13	429	30	59	1	95 723	151	90,33%	70
Décor	Cursive 2e étage sud	CS2D1	3	153	3	81	3	135	56	99,92%	48
Décor	Cursive 2e étage sud	CS2D2	3	86	12	47	4	7 982	469	99,11%	126
Décor crochet	Flèche	LRMH 119	2	284	1	29	1	276	8	99,92%	217
Décor crochet	Flèche	LRMH 120	4	588	1	21	1	28	5	99,94%	55
Décor crochet	Flèche	8DF1P1	6	525	1	38	1	67	5	99,93%	42
Décor crochet	Flèche	8DF1P3	2	555	1	40	1	371	6	99,86%	305
Décor crochet	Flèche	8DF1P4	5	690	1	36	1	477	4	99,89%	61
Décor crochet	Flèche	8DF2P1	4	571	0	23	-	40	5	99,92%	61
Décor crochet	Flèche	8DF2P2	6	543	6	50	1	4 237	31	99,48%	111
Décor crochet	Flèche	8DF2P4	3	607	1	31	1	38	5	99,93%	33
Décor crochet	Flèche	8DF3P1	2	588	2	46	0	40	3	99,92%	121
Décor crochet	Flèche	8DF3P2	5	685	1	25	1	40	4	99,90%	237
Décor crochet	Flèche	8DF3P3	32	726	163	31	1	237 608	39	76,06%	112
Décor de couverture	Sacristie pan sud	SAC15	0	211	26	70	6	59 970	6 635	92,89%	191
Lucarne	Transept Sud	LRMH 117	3	248	1	30	1	18	6	99,96%	54

Composition des éléments de décor en plomb analysés (résultats en ppm).

La composition des éléments de décor révèle des compositions plus diverses, **parfois très chargées en étain**. Ces teneurs parfois comprises entre 10 et 23 % **doivent toutefois ici plutôt être imputées à la présence de soudures utilisées pour la mise en forme de ces pièces de décor ou bien à l'application d'une couche supplémentaire pour renforcer les parois internes très fines obtenues par emboutissage**. De manière générale, le plomb des anciennes crêtes de faîtage ou encore des divers décors provenant de la flèche semblent relativement dénués d'étain et pourraient donc provenir d'un plomb neuf datant du XIX^{ème} siècle.

Ech.	Loc.	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Sn(%)	Sb	Pb(%)	Bi
CH11P1	Voûtes Chœur	5	267	1	25	82	1	2,10	707	97,77	79
CH11P2	Voûtes Chœur	12	246	0	16	59	0	3,65	111	96,29	34
CH11P3	Voûtes Chœur	2	221	80	7	44	1	0,38	322	99,55	29
CH11P4	Voûtes Chœur	1	135	157	14	64	6	0,42	315	99,50	63
MBPF2	Mur bahut chœur	8	139	59	19	51	8	2,46	206	97,47	86
NDP64	Gouttière	2	84	6	13	76	2	0,95	302	98,98	143

Composition des échantillons de plombs fondus analysés (résultats en ppm)

La composition des plombs fondus révèle d'une part, une **présence importante d'étain dans certains échantillons**, allant jusqu'à plus de 3 %, alors que les tables de couvertures elles-mêmes n'en contiennent que 0,5 % environ. **L'étain peut provenir des soudures, et de certains éléments de décor ou crêtes de faitage** (voir plus haut). En outre, la composition très variable des différents plombs fondus, même pour des échantillons prélevés à proximité dans l'édifice (plombs du secteur CH11 par exemple), révèle qu'elle ne saurait être pleinement représentative de celle des tables ayant fondu.

●



4. Interventions projetées

Parti de restauration

L'avis de la CNPA du 9 juillet 2020

La reconstruction en restitution à l'identique de la flèche a été votée lors de la CNPA du 9 juillet 2020 :

« La Commission nationale du patrimoine et de l'architecture approuve à l'unanimité le parti de restauration proposé consistant à rétablir l'architecture de Viollet-le-Duc, notamment en ce qui concerne la couverture et la flèche, dans le respect des matériaux d'origine : le chêne pour la charpente et le plomb pour la couverture. »

Quelques extraits du Compte-rendu

« C'est l'œuvre de Viollet-le-Duc qui a donné sa physionomie à la cathédrale. Ses interventions sont parfaitement localisées et documentées. Fruit de sa réflexion sur la cathédrale idéale, son œuvre d'interprétation du gothique est talentueuse, parfaitement construite, et remarquablement inscrite dans son époque. C'est un projet global et cohérent dont la flèche est l'aboutissement. Cette restauration fait partie de l'histoire du monument, classé en 1862 alors que le chantier de l'architecte est en voie d'achèvement. Elle en est la période de référence, celle qui est retenue depuis un siècle et demi pour toutes les interventions du service des monuments historiques sur la cathédrale comme sur le château de Pierrefonds ou la cité de Carcassonne. Ainsi aujourd'hui, s'inscrivant dans cette continuité, en confortant la cathédrale dans ses dispositions Viollet-le-Duc, on ne fait pas du néo-gothique, on témoigne du fait néo-gothique.

L'inscription sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco, en 1991, du site Paris, rives de la Seine reconnaît une valeur universelle à cet ensemble urbain qui comprend les grands monuments de Paris situés le long de la Seine, du pont de Sully au pont de Bir-Hakeim, et dont la cathédrale fait partie. Dans ce site, la flèche de Viollet-le-Duc, véritable point de repère, identifie la silhouette paysagère de la capitale dans son rapport d'échelle avec le monument, le quartier, la ville, et le ciel. »

(Expertise de l'inspection du Patrimoine, Régis Martin)

« L'empreinte de Viollet-le-Duc sur la cathédrale est majeure et (...) le classement au titre des monuments historiques en 1862 prend en compte ses dernières interventions, intégrées dans la vision du Paris « haussmannien ». La flèche de Viollet-le-Duc est un témoin majeur de l'architecture du XIXe siècle, au même titre que le palais Garnier ou la tour Eiffel. »

(Intervention de M. Leleu)

Reconstruction en reconstitution à l'identique

L'emprise de l'œuvre d'Eugène Viollet-le-Duc en charpente, dont la reconstruction à l'identique a été validé par la CNPA du 9 juillet 2020 concerne la charpente de la flèche, mais également celle des bras de transept et des fermes de transition au droit de la nef (dernière travée) et du chœur (première travée).

Les études et analyses de diagnostic des charpentes à ferme et pannes et de la flèche qui sont développées dans le précédent chapitre « description architecturale et technique détaillée » n'ont pas révélé de problème majeur, qui remettraient en cause le projet de restitution à l'identique.

Cette reconstitution s'accompagnera de modifications, à la marge, de certaines mises en œuvre afin de corriger les faiblesses identifiées au-dessus. Nombre de ces adaptations ne seront qu'une reproduction de celles déjà apportées lors des travaux qui suivirent la construction de la flèche et étaient déjà envisagées dans le Dossier de Consultation des Entreprises établis en 2017 par Philippe Villeneuve, ACMH.

Sources nécessaires à la reconstruction de la flèche

L'entreprise devra l'établissement d'épures, de plans d'exécution et d'une modélisation 3D des charpentes pour l'étude structurelle (voir paragraphe *Etude Structurelle d'EXE complexe*). Ces documents se baseront sur les relevés et archives écrites graphiques et photographiques existantes. Ces documents sont indispensables à l'entreprise qui sera missionnée. Un dossier numérique d'archives en haute définition sera fourni à l'entreprise titulaire du marché. Nous donnons ci-après la liste des documents principaux (cf Annexe particulière 9 du présent dossier qui contient des documents et analyses historiques sur la flèche, extraits du Diagnostic de la Cathédrale réalisé après l'incendie (Décembre 2020)) :

- Les documents d'exécution du charpentier Bellu ont été conservés à la Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine (MAP). Ces documents sont les plus fidèles à l'ouvrage disparu, ils renseignent tant sur la géométrie, que sur les techniques et dimensions de la charpente. Leur étude approfondie est un pré-requis indispensable à l'élaboration des documents d'exécution de la flèche qui sera érigée prochainement ;
- Deux maquettes des charpentes de la flèche avaient été réalisées par l'entreprise Bellu qui érigea la flèche en 1858 et 1859, elles sont aujourd'hui exposées à la CAPA et à la MAP.
- Le *Dictionnaire raisonné* et l'article de la Gazette écrits par E. Viollet-le-Duc donnent une description assez exacte des dispositions constructives de la flèche et des premières fermes des transepts, mais ne sont pas parfaitement fidèles à l'ouvrage exécuté. Ils constituent en revanche un témoignage authentique sur les intentions du projet, Viollet-le-Duc développant notamment les intentions techniques et architecturales qui ont prévalu à la conception de la flèche.
- Environ un siècle après l'édification de la flèche, en 1970, trois charpentiers apprentis Compagnons passants du Devoir³², exécutent la maquette au 1/20 de la flèche, dans le cadre de la réalisation du chef d'œuvre qui doit sanctionner leur formation chez les Compagnons. Pour ce faire, ils réalisent un relevé exhaustif des charpentes de la flèche, tracent les épures permettant de tailler l'ensemble des bois et assemblages et exécutent la maquette. Cette seconde maquette, de 1970, très proche de l'ouvrage réellement exécuté³³, est aujourd'hui exposée à la Maison des Compagnons, place Saint-Gervais, à quelques centaines de mètres de la cathédrale. Les Compagnons ont aussi conservé les épures ayant permis la taille des bois de la maquette. Ces épures ont été numérisées en haute définition en 2015 grâce à un partenariat avec l'école de Chaillot. Enfin, les trois Compagnons, apprentis à l'époque et aujourd'hui retraités, possèdent toujours la mémoire vivante de leur travail.

³² Landais Larcher, Angevin Drilleau et Limousin Boisne

³³ Elle reprend, par exemple, le plan barlong de la croisée du transept.

- Plusieurs relevés numériques de la Cathédrale par scanner 3D haute définition existent : le relevé de l'ensemble de la cathédrale (hors volume intérieur du comble) par Andrew Tallon a été légué au CNRS pour le chantier de restauration de la cathédrale ; le relevé de l'ensemble des couvertures du grand vaisseau et de la flèche par Art Graphique et Patrimoine (AGP) ; les charpentes du transept et les trois premiers plans d'enrayure de la flèche ont été numérisés par l'entreprise GEA lors du chantier de restauration de la flèche pour l'implantation de l'échafaudage qui a été sinistré.
- Un relevé photographique de la flèche réalisé lors du Diagnostic de l'agence Ph. Villeneuve ACMH en 2015 (cf Annexe particulière 8).

Les charpentes de la flèche et des bras de transept

La flèche devra être reconstruite en reconstitution à l'identique de celle en œuvre avant l'incendie à partir d'une épure complexe et précise. Cette épure est complexe pour plusieurs raisons :

- La flèche est implantée sur la base d'un trapèze irrégulier, à la rencontre de quatre volumes de maçonnerie qui ne sont pas alignés entre eux (chœur, nef et deux bras de transept).
- Elle inclut le raccord entre des volumes de combles de différentes largeurs et dont la hauteur de faîtage est imposée par les pignons maçonnés.
- Elle s'appuie en partie sur les murs bahuts de la croisée du transept dont les hauteurs d'arases sont différentes.

Les charpentes des bras de transept et des travées de la nef et du chœur adjacentes à la flèche seront également reconstruites en reconstitution à l'identique de celles en œuvre avant l'incendie.

Le bois nécessaire à la reconstruction des charpentes sera partiellement fourni à l'entreprise dans le cadre d'un mécénat. La maîtrise d'œuvre a établi un cahier des charges à destination du mécène concernant la sélection des bois, leur abattage, leur débit et leur ressuyage. Au démarrage de la période de préparation, l'entreprise effectuera un état des débits contradictoires. Il appartiendra au charpentier de contrôler la qualité des débits en relation avec les pièces de l'ouvrage auxquels ils sont destinés. Si une partie des débits est écartée, et que les débits excédentaires ne comblent pas le besoin, le charpentier devra proposer conformément à son bordereau de prix unitaire les débits manquants. Les débits réceptionnés par l'entreprise seront transférés en atelier ou sur une aire de stockage de l'entreprise qui garantisse de bonnes conditions de ressuyage dans la continuité du séchage initié avant réception des bois.

Au préalable de la reconstruction de la charpente de la flèche, l'entreprise fournira les épures, les plans d'exécution en 2D, et une modélisation en 3D qui servira à l'étude structurelle complexe (cf paragraphe sur la complexité de l'étude structurelle d'EXE). (infra et CCTP).

Les études d'exécution auront pour objectif de conformer très précisément les ouvrages aux dispositions et dimensions prévues par la maîtrise d'œuvre dans le présent dossier.

Celle-ci déterminera le volume capable / gabarit du grand comble et de la flèche auquel devront impérativement et strictement se conformer les titulaires des différents marchés des sous-opérations constituant l'opération de reconstruction de la cathédrale.

L'épure se basera sur des lignes d'épures déterminées à partir du relevé géomètre et des documents d'exécution des lots Maçonnerie/Pierre de taille des pignons, voutes et murs bahuts, dont les cotes définitives auront été arrêtés collégialement avec l'Architecte en Chef des Monuments Historiques, sur la base du volume donné par ce dernier.

Le travail en atelier inclura :

- Le tri et classement des bois en fonction de l'ordre de façonnage des pièces ;
- Le traçage en grandeur réelle des épures ;
- La taille des pièces aux dimensions exactes générées par les épures y compris les sections spécifiques générées par l'épure telles que les jambes de force pentagonales, les bossages et élégies du poinçon central, les excroissances et épannelages des chapiteaux et pinacles, les délardements et recreusement des noues et arêtiers, les feuillures et rainures, les glacis, coupes biaises, chanfreins, moulures...
- Le piquage, traçage, marquage, taillage et mise dedans (montage à blanc) sur épure des différents éléments qui composent la charpente.
- Le colisage, cerclage, et stockage soigné des éléments en attente de livraison sur le chantier.

Sur site, l'entreprise procèdera à :

- La réception des supports maçonnés
- Le coltinage à pied d'œuvre et le levage des charpentes
- Le resserrage des boulons et tirefonds un an après la livraison de l'ouvrage (y compris la création d'un outillage spécifique et les dispositions dans l'ouvrage pour permettre cette opération).

Synthèse des désordres constatés avant incendie

Les études et l'analyse des charpentes à fermes et pannes du XIX^{ème} siècle, adjacentes à la flèche, n'ont pas révélé de problèmes particuliers. Aucun désordre structurel majeur n'avait été constaté 155 ans après sa livraison en 1864. Les bois et les assemblages étaient en bon état de conservation avant l'incendie.

Pour la charpente de la flèche, les différentes études de diagnostic menées avant l'incendie par les ACMH successifs Bernard Fonquernie, Benjamin Mouton, et Philippe Villeneuve, ainsi que l'analyse de photographies, témoignent de quelques désordres, en particulier au niveau de ces assemblages :

- Torsion de pièces de charpentes les plus longues ayant mené à la rupture de certains tenons, à l'ouverture d'entures et à des fissures de pièces majeures. Ces phénomènes ont été observés en particulier sur les poteaux arêtiers et le poinçon central et sont dus au choix d'arbres tors qui auraient vrillé en séchant.
- Jeux dans les assemblages (cf planche graphique).

Améliorations proposées

- Sélection de bois non tords pour les pièces de charpente les plus élancées
- Resserrage des boulons par l'entreprise un an après la mise en œuvre.

Limites de prestations et coordination

Les fermes FN11 et FC03 sont des fermes conçues au Moyen-Age mais fortement remaniées par Viollet-le-Duc pour assurer la transition entre la charpente à chevrons formant fermes et la charpente à pannes et fermes du XIX^{ème}. Appelées « fermes de transition » dans la présente étude, elles sont, par conséquent, attribuées aux lots 07_{EXT} CH et NF de l'opération Chœur et Nef. Dans l'attente de la construction des fermes FN11 et FC03, l'entreprise en charge du lot 07TP construira les fermes FN12 et FC02 ainsi que les sablières jusqu'à un mètre au-delà des fermes FN11 et FC03. Tous les ouvrages situés entre les fermes FN11 et FN12 et, FC02 et FC03 sont également à la charge de l'entreprise, y compris les éléments assemblés en applique des fermes FN11 et FC03, servant à recevoir les pannes et les faîtages du présent lot, portées par ces fermes.

Il sera demandé une coordination parfaite entre les titulaires des différents lots concernés.

Points de vigilance

Etablissement de l'épure

Le projet de charpente de la flèche nécessite l'établissement de son épure par l'entreprise missionnée, ainsi que l'étude approfondie des documents d'exécution du charpentier Bellu. En effet ces documents renseignent à la fois sur la géométrie (tracée des épures), sur les techniques (tracés et assemblages) et sur les dimensions (les documents sont cotés au millimètre, échelle normalement réservée aux travaux de menuiserie). Nombres de documents listés ci-après permettent d'approfondir la connaissance sur l'ouvrage disparu : archives (documents graphiques, documents écrits, photographies), photographies, relevés scanner 3D partiels.

Le relevé géomètre des structures existantes incluant les murs bahuts, les voutes, les pignons est un préalable nécessaire à l'établissement de cette épure. Ce relevé prendra en compte les différentiels de hauteur des arases de murs bahuts, les localisations et dimensions précises des corbeaux d'appui des fermes ainsi que les trois pignons (ouest, nord et sud) définissant les lignes de faîtage donc les volumes de comble.

Etude structurelle d'EXE complexe

L'étude structurelle aux éléments finis sur la flèche réalisée par Bestrema qui sera fournie dans le cadre de la consultation en phase offre, fournie en Annexe particulière 1 est une étude de vérification et de conception des structures au stade projet.. Cette étude ne constituera pas l'étude d'exécution. Une étude structurelle sera donc fournie par l'entreprise pour la phase d'exécution pour validation de l'ACMH et de son bureau d'études. Au vu de la complexité de l'étude structurelle à fournir, le BET de l'entreprise de charpente devra fournir des références en étude d'EXE concernant des chantiers avec complexité équivalente à celle de la flèche de la cathédrale.

L'étude structurelle d'EXE devra être auto-suffisante et indépendante des calculs de projet réalisés par Bestrema. Cette étude inclura :

- Une note de calcul de vérification du dimensionnement de l'ensemble des éléments de charpente et des assemblages. La mise au point d'une telle note de calcul exige une modélisation 3D de la flèche.

- Les efforts de vent appliqués à la flèche seront conformes aux résultats de l'étude en soufflerie réalisée par le CSTB en 2021 (fournie en Annexe particulière 6).
- Les conditions de symétrie simplificatrices sont explicitement exclues de l'étude d'EXE, un modèle complet de la flèche étant demandé.
- Le modèle de calcul prendra en compte les assemblages, les jeux d'assemblages (en pied des poteaux en particulier) et leur raideur.
- Un calcul modal de la flèche devra être réalisé pour valider le bon fonctionnement du modèle statique sous-jacent.
- Les plans d'EXE incluront une coupe pour chaque demi-ferme de la flèche avec position de toutes les entures (8 plans), les plans de toutes les enrayures avec le positionnement des ancrs (1 plan par enrayure), les plans des détails des assemblages.

Afin de permettre la comparaison des offres des entreprises sur ce point, il sera précisé dans le cadre de l'offre la ventilation du prix des études d'EXE entre :

- La modélisation géométrique 3D de la flèche, préalable à son calcul
- Le calcul 3D de la flèche pour détermination des efforts dans les barres et les assemblages
- La vérification des éléments de charpente et des assemblages
- La production des rapports d'études (dont rapports de synthèse)
- Les plans d'EXE
- Les plans d'atelier.

Dans un souci de qualité et de clarté et pour permettre le suivi de ces études EXE, les prescriptions suivantes devront être respectées :

- Tout document transmis devra être titré, indicé et daté pour permettre son suivi
- Chaque note de calcul doit comporter un premier chapitre donnant son objet et la méthode suivie pour les calculs ainsi que le type et les caractéristiques des matériaux
- Les résultats doivent être lisibles et compréhensibles : la fourniture d'un listing brut de résultats n'est pas suffisante.

La maîtrise du retrait

La construction d'une charpente en bois a toujours impliqué la « maîtrise du retrait » de la part du charpentier. La maîtrise ne désigne pas ici l'annulation du phénomène, mais la compréhension du phénomène dans son expression expérimentale, de manière à minimiser son ampleur d'une part et à minimiser les conséquences de sa manifestation d'autre part.

Définition

Le bois est un matériau vivant, dont l'humidité au moment de l'abattage se situe à environ 60% dans le cas du chêne et diminue progressivement jusqu'à atteindre un équilibre une fois en œuvre aux alentours de 14% (à Paris, pour une charpente abritée selon le DTU 31.1). La perte de l'eau libre une fois l'arbre abattu est désignée par le terme de ressuyage et se situe entre 60 et 30% d'humidité ; de 30% (point de saturation des fibres) au point d'équilibre (14%) on parle plutôt de séchage. C'est au cours de cette phase de séchage que survient le retrait : le retrait dépend alors des conditions de ventilation, température du milieu ambiant mais aussi de la direction considérée dans la pièce étudiée et de la contrainte appliquée sur celle-ci.

On distingue en effet trois types de retrait en fonction de l'orientation des fibres : longitudinal, radial ou tangentiel ; le bois étant un matériau anisotropique.



Les phénomènes de retrait s'expriment à l'échelle de la pièce de bois par :

- L'apparition de fentes de séchage dues à la différence de valeur entre le retrait radial et le retrait tangentiel ;
- La réduction de la section de la pièce (retrait radial et tangentiel)
- La réduction de la longueur de la pièce (retrait longitudinal)
- Ces deux derniers points engendrent des contraintes internes dans les éléments de charpente, et des risques d'ouvertures au niveau des assemblages

Etat de l'art

La connaissance du matériau bois est donc complexe, et encore à l'étude. De plus la charpente contemporaine utilise aujourd'hui du bois sec. L'utilisation de bois humide (bois vert, bois ressuyé) suivant les modes constructifs du Moyen Age et de l'Epoque Moderne ont été délaissés dans la pratique sauf dans le cadre de la restauration des Monuments Historiques. Par conséquent, le phénomène du retrait dans la charpente contemporaine est un phénomène que l'on cherche dans tous les cas à éviter, et qui de ce fait a peu fait l'objet d'études. Il existe donc de nos jours un différentiel de connaissance technique et normatif entre les charpentes contemporaines en bois résineux sec (charpentes lamellé-collé, charpentes à fermettes etc.) pour lesquels il existe un corpus normatif cohérent et complet, et les charpentes en bois feuillus utilisés à forte humidité pour lesquels les connaissances sont plus réduites et le corpus normatif en grande partie inadapté. Cependant la mise en œuvre du bois vert pendant des siècles a permis à l'ensemble de la filière bois de maîtriser les conditions d'apparition des phénomènes et leur ampleur. Ainsi, dès le XVII^{ème}, les traités de charpenterie théorisent les bonnes pratiques (*L'art de charpenterie* de Mathurin Jousse par exemple) et partagent leurs observations et descriptions des défauts liées au choix des arbres. De nos jours cette connaissance est redécouverte par les archéologues du bâti et de nombreux sujets de recherche s'intéressant à la problématique de l'utilisation du bois vert. Dans le cadre du chantier de reconstruction et de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, un projet de recherche est lancé par une équipe de recherche³⁴, menée par Emmanuel Maurin, ingénieur bois au LRMH, qui s'intéresse à la qualification du retrait longitudinal du matériau parfait (éprouvettes de 10cm) ainsi qu'à la qualification du retrait longitudinal dans un environnement multi-contraint à l'échelle d'une pièce de chêne en bois de brin de 12m de long et de section 22x24cm.

Enfin, l'observation de charpentes médiévales construites en bois vert (notamment celles de Notre-Dame) montre un comportement mécanique satisfaisant sur le très long terme, malgré l'existence du phénomène de retrait qui produit ponctuellement des jeux d'assemblages, et a conduit des déformations bien plus importantes que celles communément admises pour les constructions contemporaines. La connaissance du matériau et la maîtrise de sa transformation dans le respect du savoir-faire de tous les acteurs de la filière bois est donc un élément clé pour maîtriser le retrait. Ces prescriptions ont fait leur preuve pendant 150 ans pour la flèche et pendant plusieurs siècles sur les charpentes du chœur et de la nef de la cathédrale Notre-Dame mais également dans de nombreuses charpentes historiques. Nous donnons ci-après une synthèse de ces prescriptions

³⁴ Equipe de recherche composée de Sabine Carré, chercheur (Institut Navier, Champs sur Marne)
Jean-Luc Coureau, maître de conférences (Université de Bordeaux)
Philippe Galimard, maître de conférences (Université de Bordeaux)
Joseph Gril, directeur de recherche CNRS (Institut Pascal, Clermont Ferrand)
Emmanuel Maurin, ingénieur (Laboratoire des monuments historiques, Champs sur Marne)

issues d'échanges avec des experts forestiers, des scieurs, des charpentiers, des chercheurs du CNRS, du LRMH (GT Bois).

Savoir-faire de la filière bois pour la maîtrise du risque

La maîtrise du risque implique un contrôle du matériau à toutes ses étapes de transformation.

Choix de l'arbre.

La maîtrise de la sylviculture depuis Colbert et la connaissance de l'arbre sur pied des experts forestiers permet la production et la sélection des meilleurs arbres selon l'usage qui en sera fait. Le travail réalisé par les experts forestiers missionnés partout en France pour sélectionner les chênes destinés à la reconstruction de la charpente de Notre-Dame de Paris, a permis un premier contrôle de la matière avant sa transformation. Ont été sélectionnés des arbres droits, au port centré, non tords, à la croissance la plus cylindrique possible et exempts de nœuds morts. Les arbres devaient donc être situés en forêt, ni isolés ni en lisière, pour avoir bénéficié d'une croissance rapide et verticale.

Le choix de l'arbre ne permettra pas de diminuer l'ampleur du retrait, mais d'empêcher son expression sous des formes pathologiques, comme par exemple la torsion des éléments de charpente lors du séchage si on utilisait des bois tors.

Abattage

Tout comme la sélection de l'arbre, l'abattage doit avoir lieu à des périodes spécifiques, connues et respectées par les acteurs du secteur (charpentiers, scieurs, experts forestiers). L'abattage est réalisé en période de sève basse et d'absence de feuillage où les arbres sont moins soumis aux attaques des prédateurs du bois qui se nourrissent de la sève, riche en substances nutritives.

La période d'abattage ne joue pas spécifiquement sur le retrait, mais est un autre exemple des bonnes conditions à respecter pour pouvoir employer les bois verts.

Conservation des arbres après abattage et avant débit

Une fois abattus et ôtés de leur branche, on parle alors de grumes, qui doivent être stockées en extérieur pour que les eaux de pluie les lavent de leur tanin, sur des surfaces planes légèrement inclinées (pour permettre l'écoulement des eaux de pluie) à l'ombre pour éviter une dessiccation trop rapide pouvant mener à des fentes de séchage importantes. Certaines techniques appliquées par les scieurs limitent ces phénomènes : on peut protéger les abouts des grumes à l'aide de bouche-pore, bloquer les têtes de grumes par des essés ou crocodiles limitant les amorces de fendage en about. Idéalement les grumes restent en forêt lors de cette phase, en « bord de route », avant d'être transformées chez les scieurs ou directement chez le charpentier pratiquant lui-même l'équarrissage.

C'est à cette phase, par l'observation des abouts de grumes que l'on peut repérer des défauts disqualifiants chez les arbres abattus : roulure, cœur non centré, cœur étoilé... Les bois présentant ces défauts sont alors déclassés, ils pourront être employés pour d'autres usages.

Débit

La transformation de la grume en une ou plusieurs pièces de bois (en fonction du type de débit : de brin, de quartier...) est réalisée par le scieur qui est en charge du débit dans le cas de bois sciés mécaniquement ou par le charpentier si les bois sont équarris à la hache ou semi-mécaniquement à la scie électro-portative. C'est donc l'expertise du scieur qui permet d'attribuer à chaque grume la ou les pièces qu'il pourra extraire du matériau brut à partir de la liste de débit délivrée par le charpentier. Cette attribution est fondamentale.

Un cahier des charges à destination des scieurs reprenant l'ensemble des préconisations ainsi que les prescriptions permettant la caractérisation des bois par classement visuel a été fourni à France Bois Forêt. Ce document sert de guide aux scieurs dans cette tâche décisive..

Mise en œuvre

Tout comme les étapes précédentes, la mise en œuvre des bois par le charpentier doit respecter un ensemble de bonnes pratiques pour que le retrait ne se traduise pas par un ensemble de pathologies

- Le retrait étant différentiel selon les faces du bois, il est possible d'identifier et de privilégier les faces présentant le moins de retrait pour les arasements des assemblages. Au contraire, on peut également jouer avec ce retrait pour l'utiliser de façon favorable pour la structure : pour les pièces moisées par exemple, il est préconisé d'utiliser deux pièces issues de la même grume fendue en deux dans sa longueur et de les placer à contre-cœur (c'est-à-dire le cœur vers l'extérieur) pour que le phénomène de flexion de la pièce provoqué par le séchage différentiel soit favorable à l'assemblage (les moises « pincent » davantage la pièce qu'elles enserrant). Cette bonne pratique est d'ailleurs expliquée par E. Viollet-le-Duc dans son ouvrage *Histoire d'une maison*³⁵.
- Le choix des assemblages permet également de contrôler le phénomène : pour favoriser le placage des arasements, on privilégie le chevillage à tire dans les assemblages à tenons et mortaises.

Compréhension du phénomène

L'ensemble des préconisations données précédemment n'est pas exhaustive, elle témoigne de l'importance du respect du savoir-faire de chaque acteur de la filière qui s'est établi par expérimentation au fil des siècles.

En effet, la « maîtrise du retrait » désigne la compréhension d'un risque inhérent à la nature même du matériau, à l'aide d'un ensemble de connaissances et de techniques de la filière bois, depuis la croissance de l'arbre jusqu'à la mise en œuvre de la pièce au sein de l'ouvrage de charpente dans laquelle elle s'inscrit. Ce terme ne correspond donc pas à l'annulation d'un risque, le retrait étant induit par les caractéristiques du matériau lui-même, mais à la minimisation de l'apparition du phénomène et à ses conséquences. Il est en effet courant de constater des fentes de séchage sur des charpentes anciennes, des fentes de séchage se produiront également sur la charpente de la flèche, de même des décollements d'assemblage se produiront nécessairement. Le caractère fortement redondant des structures hyperstatiques et le faible taux de travail de la structure finale après séchage permet néanmoins à la structure de s'accommoder de ce type de phénomènes comme l'ont largement prouvé la durée de vie des charpentes avant incendie que nous restituons. De plus, l'état sanitaire des assemblages de la flèche avant incendie effectué dans cette étude ainsi que l'état sanitaire de trois ouvrages comparables (flèche de la cathédrale d'Orléans, de Dijon et

³⁵ « Considérant que [...] les fibres internes sont plus dures et plus serrées que ne sont les couches externes, quand on veut poser une pièce de bois horizontalement sur deux points d'appui ou piliers, et lui donner toute la résistance dont elle est susceptible pour porter un poids agissant sur son milieu, on la débite à la scie en deux, dans sa longueur, et, retournant les faces à l'extérieur, on boulonne ensemble ces deux pièces. Alors les cœurs étant en dehors et les deux pièces tendant à se courber en formant deux surfaces convexes, si elles sont bien serrées par des boulons munis de bonnes platines, elles sont obligées de rester droites : la puissance de courbure de l'une neutralisant la puissance de courbure de l'autre, ces deux efforts contraires tendent à donner plus de raide à la pièce [...]. C'est d'après cette méthode qu'il faut poser les moises et toutes pièces doubles. » E. Viollet-le-Duc, *Histoire d'une maison*, Hetzel, Paris, 1873

flèche de la Sainte-Chapelle)³⁶ ont permis d'identifier les dispositions constructives pathologiques pour lesquels le retrait produisait des désordres importants (mais n'existant pas à Notre-Dame de Paris), et également d'identifier la conséquence principale qu'aurait le retrait sur les charpentes : des déformations globales plus importantes que celles qui peuvent être calculées par le biais des modèles numériques. Ce qui montre bien l'importance d'inscrire la restitution de la flèche dans le processus d'expérimentation séculaire dont elle fait partie, et l'importance à accorder à la restitution des techniques, Eugène Viollet-le-Duc ayant utilisé pour sa flèche des bois abattus depuis 1 à 2 ans environ.

Contrôle du phénomène et de ses conséquences

L'hypothèse de l'advenue d'une évolution de certains assemblages consécutivement à l'utilisation de bois verts ou ressuyés, non mesurables prévisionnellement par calcul, pendant les durées de garantie de parfait achèvement et décennale, est considérée comme étant certaine. La limite admissible de ces mouvements est donnée par le retour d'expérience, et par les déformations mesurables sur les relevés avant incendie.

Le contrôle, de l'évolution des assemblages en cours de chantier et pendant la durée de parfait achèvement est due par l'entreprise titulaire du présent lot. Dans l'éventualité du constat d'évolution des assemblages non admissibles et résultant de l'utilisation de bois verts, l'entreprise aura à sa charge tous les travaux permettant le retour des ouvrages concernés dans le champ de tolérance prévu dans le présent dossier d'appel d'offre.

Une vérification ultérieure sera effectuée par la maîtrise d'ouvrage sur une durée correspondant à la couverture de la responsabilité décennale des intervenants.

En complément des actions préventives énoncées précédemment, la surveillance renforcée de l'ouvrage jusqu'à ce que les bois atteignent un taux d'humidité d'équilibre est indispensable. Cette surveillance débutera dès la construction du tabouret pour la flèche.

Outre la mise en œuvre de moyens d'accès adaptés à la maintenance et au contrôle visuel des bois, en particulier les premières années suivant la réception de l'ouvrage, le resserrage des boulons et tirefonds sera effectué un an après la réception puis tous les cinq ans si nécessaire. Ainsi, les revêtements en plomb épousant la charpente de bois en particulier dans les parties les plus hautes de l'ouvrage (étages ajourés et aiguille), seront conçus de façon à permettre cette opération.

Approvisionnement en bois

La charpente de la flèche de Viollet-le-Duc a été érigée en bois de sciage au XIX^{ème} siècle. Des incertitudes persistent sur la datation des bois alors employées. Une étude dendrochronologique de Georges Lambert et Virginie Chevrier³⁷ en 1997 datait l'abattage de certains bois avant 1830 ce qui permettait de penser que les bois avaient été mis en œuvre secs environ 30 ans après. Ces résultats ont été dernièrement remis en question par l'introduction de nouvelles données dans les chronologies moyennes établies par les dendrochronologues. Ces incertitudes nécessitent le prélèvement de nouveaux échantillons parmi les vestiges de la flèche pour consolider les groupes de croissance et la critique d'authenticité de certaines pièces de la charpente. Une opération de

³⁶ Les compte-rendu de visite, rédigés par BESTREMA seront fournis sur demande.)

³⁷ Georges Lambert et Virginie Chevrier, CNRS, UMR 9946, 1997. Cette étude est en cours de relecture.



prélèvement d'échantillons à St-Witz par le dendrochronologue Olivier Girardclos est en cours de programmation, elle sera réalisée courant juin 2021.

Pour répondre à l'exigence de la reconstruction le bois doit idéalement être ressuyé ce qui correspond à une humidité relative du bois de moins de 30%. Le ressuyage dure environ un an et la meilleure période d'abattage des arbres est la période de sève basse qui correspond à la période hivernale. La meilleure période d'abattage pour respecter le calendrier des travaux était en mars-avril 2021. Pour respecter ce calendrier, un cahier des charges de pré-débit a été élaboré par la maîtrise d'œuvre et remis à France Bois Forêt et la maîtrise d'ouvrage en janvier 2021 afin de quantifier le nombre d'arbres à abattre et de réaliser cette opération à temps. Ce pré-débit est consolidé dans la présente étude pour permettre le débit des grumes à partir de début juin 2021.

Le cahier des charges à destination des scieurs qui accompagne ce débit (fourni en annexe) a été élaboré grâce à des échanges avec différents organismes et experts du domaine, parmi lesquels :

- François Auger, Compagnon charpentier du Devoir, meilleur ouvrier de France (charpente), architecte du patrimoine ;
- François Calame, fondateur de « Charpentiers Sans Frontières » ;
- Philippe Gourmain, expert forestier, ancien président des experts forestiers de France ;
- Rodolphe Mauffront, responsable technique charpente-construction bois de l'Union des Métiers du Bois ;
- François Feuillet, Mickaël Renaud, Jacques Ducerf, experts en sciage ;
- Claire Quinones et Aymeric Albert experts forestiers de l'Office Nationale des Forêts (ONF).

Sélection des bois

La sélection des bois nécessaires à la reconstruction de la charpente de la flèche, des transepts et des travées adjacentes à la flèche a été réalisée par des experts forestiers missionnés et coordonnés par le mécène France Bois Forêt à partir du cahier des charges du pré-débit du 14 janvier 2021 fourni en annexe.

Débit sur liste et cahier des charges

Les pièces de bois qui composent la flèche ont des dimensions spécifiques et diversifiées qui nécessitent un débit sur liste complexe et rigoureux. Pour optimiser le temps de ressuyage des bois ceux-ci ont été abattus en mars-avril 2021 et seront débités d'ici l'automne 2021. Dans ce contexte, le débit a été établi par la maîtrise d'œuvre et non pas par le charpentier contrairement à ce qui est réalisé habituellement.

Débit sur liste

Sources

Ce débit a été établi à partir d'une analyse fine de différentes sources d'informations :

- Des sections relevées sur site sur des **vestiges de bois**
- Des documents d'archives conservés à la Médiathèque du Patrimoine parmi lesquels **les plans de construction** d'E. Viollet-le-Duc, architecte, et A. Bellu, charpentier. Ces plans de construction sont caractéristiques des plans d'exécution réalisés par un maître charpentier (probablement par le Compagnon Henri Georges « Angevin l'enfant du génie » gâcheur de l'entreprise de charpente Bellu) et donnent toutes les informations nécessaires pour tracer, tailler et lever la flèche. Les dimensions

pour tracer les épures sont d'une extrême précision, elles sont cotées au millimètres près (niveau de précision qui est habituellement appliqué aux ouvrages de menuiserie).

- Les **épures** des fermes constituant la base de la flèche réalisées par les charpentiers Boisne, Drilleau et Larcher en 1969-1970 pour la construction de la maquette de la flèche au 1/20^{ème} conservée à la Maison des Compagnons, place Saint-Gervais à Paris.
- Des **nuages de points** réalisés par l'entreprise GEA au scan 3D
- Des **ortho images** issues du nuage de point réalisé par l'entreprise Art Graphique et Patrimoine
- Des **éléments d'épure complémentaires**, réalisés à partir des documents précédemment cités et leur analyse réalisée dans le cadre de cette étude pour les cotes manquantes.

Nomenclature

Ont été identifiés différents grands ensembles :

- La flèche
- Les fermes principales de la charpente attenante à la flèche parmi lesquelles :
 - Les fermes périphériques de la flèche : FN13, FC01, FTN01 et FTS01
 - Les fermes standard du transept : FTN02, FTN03, FTS02 et FTS03
 - Les fermes standard des travées adjacentes à la flèche : FN12, FC02
 - Les fermes de rive des transepts : FTN04, FTS04
- Les chevrons secondaires standard : on en compte 120 environ dans la zone de couverture à pannes et fermes, et 40 dans la souche de la flèche.
- Les pièces longitudinales, parmi lesquelles :
 - Les pièces passantes en coupe sifflet et mi-bois : sablières et pannes
 - Les pièces assemblées : panne faîtière, sous-faîtage et Croix de Saint-André (contreventement longitudinal axial)

Au sein de chaque ensemble a été établie une nomenclature fournie en annexe afin d'identifier graphiquement chaque pièce mesurée. Cette nomenclature a été harmonisée entre ensembles afin qu'à un numéro corresponde toujours le même type de pièce. Ainsi tous les arbalétriers des quatre types de fermes du transept portent le numéro 17, les poteaux latéraux le numéro 18 et ainsi de suite.

La nomenclature de la flèche est également subdivisée en ensembles correspondant à ces différents niveaux : tabouret, souche, niveaux à claire-voie, aiguille et enrayures.

Méthodologie et coefficients de sécurité

La méthodologie de détermination des dimensions des pièces permet de répondre à l'urgence du calendrier opérationnel et prévoit différentes marges de sécurité décrites ci-après.

Pour chaque ensemble, l'élément le plus grand a été généralisé comme « élément type ». Ainsi, par exemple, la ferme du transept présentant le plus grand entraxe a été choisie comme « ferme-type » de l'ensemble « fermes standard du transept », il s'agit de la ferme 2 du transept nord FTN02 dont l'entraxe mesure 14,85m. Cette méthode permet une première marge de sécurité.

Pour les pièces longitudinales dont les longueurs correspondent aux longueurs des travées variant significativement, toutes les pièces ont été mesurées.

Pour chaque pièce on donne la section et la longueur maximale de l'élément-type mesuré. Les mesures ont été réalisées en comparant plusieurs sources d'informations : relevés d'archives, ortho-images, épures, dimensions relevées sur vestiges. Lorsque les différentes sources donnent des dimensions divergentes, on considère alors la dimension maximale. On obtient alors une seconde marge de sécurité.

Les longueurs de pièces dépendent des types d'assemblage appliqués en about de pièce. Pour permettre une troisième marge de sécurité, il a été choisi d'appliquer une marge de 50cm à chaque about de pièce. Ainsi la longueur donnée correspond à la longueur utile mesurée, arrondie à 50cm à chaque extrémité. La marge prévue en longueur est donc comprise entre 1m et 1m50, ce qui permet de palier aux problèmes de fissuration des abouts de grumes pouvant survenir lors du ressuyage. Ceci correspond à un troisième niveau de marge de sécurité.

Pour les pièces exceptionnelles par leur longueur et section, plusieurs grumes ont été sélectionnées par France Bois Forêt pour une seule pièce afin de s'assurer qu'en cas de défaut interne du bois (roulure, cassage d'abattage), de défaut de séchage, de taille..., la pièce puisse être réalisée à temps. Cela correspondrait à une quatrième marge de sécurité.

Cahier des charges pour le choix des bois ainsi que pour le sciage, ressuyage et stockage des bois

Cette liste de débit s'accompagne d'un cahier des charges à destination des scieurs précisant la qualité des bois attendue pour la réalisation de la charpente de la flèche, ainsi que les conditions de sciage, ressuyage et stockage des bois.

En effet les calculs structurels établis sur la charpente de la flèche imposent une résistance des pièces de classe D30 ou supérieure. Ce cahier des charges s'appuie sur les normes européennes et françaises EN975-1 qui caractérise les choix d'aspect Q-PA et Q-P1 ainsi que sur la norme NF B 52 001 qui caractérise la classe structurelle des bois équarris de façon visuelle (type 1, 2) et la classe de résistance EN338 (type D30, D24). Cette caractérisation mécanique sur la base de l'observation des bois pourra être complétée par la caractérisation de la classe de résistance EN338 par ultrasons.

Les bois débités seront ensuite entreposés dans un ou plusieurs lieux pour leur ressuyage, ils seront réceptionnés par le charpentier avant leur taille en atelier et assemblage sur site.

Approvisionnement des pièces exceptionnelles

Pour les pièces exceptionnelles, soit par leur longueur soit par leurs caractéristiques géométriques ou rôle dans la charpente, un cahier des charges spécifique.

Parmi ces pièces exceptionnelles, les poutres courbes composées du tabouret de la flèche, longues de 22m et présentant une contreflèche de 40cm en leur centre, ont fait l'objet d'une campagne de sélection spécifique de chênes naturellement courbes en forêt de Bercé par une équipe composée d'experts forestiers, de scieurs, de la maîtrise d'ouvrage, de France Bois Forêt et de la maîtrise d'œuvre. Les huit arbres sélectionnés ont été scannés sur pied pour vérifier que leur courbure naturelle permette d'y extraire les trois à six pièces courbes du tabouret. Cette étude a été réalisée par Microtec qui a effectué l'interpolation entre les modèles 3D des arbres et des pièces courbes de charpente pour déterminer les meilleurs arbres en termes de géométrie pour chacune des six pièces. Cette approche a été complétée par une observation des défauts éventuels des bois abattus (bois tors, fentes, nœuds noirs). D'autres défauts pourraient être détectés lors du débit : la conception en phase projet des poutres courbes prendra en compte les caractéristiques de la

matière et la longueur maximale des pièces que l'on pourra en extraire, et proposera le cas échéant la restitution d'entures à trait de jupiter.

Humidité des bois

La charpente de la flèche de Viollet-le-Duc a été érigée en bois de sciage au XIX^{ème} siècle. Des incertitudes persistent sur la datation des bois alors employées. Une étude dendrochronologique de Georges Lambert et Virginie Chevrier³⁸ en 1997 datait l'abattage de certains bois avant 1830 ce qui permettait de penser que les bois avaient été mis en œuvre secs environ 30 ans après. Ces résultats ont été dernièrement remis en question par l'introduction de nouvelles données dans les chronologies moyennes établies par les dendrochronologues. Ces incertitudes ont motivé le prélèvement de nouveaux échantillons parmi les vestiges de la flèche en juin 2021 pour consolider les groupes de croissance et la critique d'authenticité de certaines pièces de la charpente. L'opération de prélèvement d'échantillons à St-Witz par le dendrochronologue Olivier Girardclos a permis d'obtenir de premiers résultats qui tendent à montrer que les dates de fin des séries de largeurs de cerne des bois analysés de la flèche correspondent à un approvisionnement en bois quelques années avant le chantier de 1858-59.

La majorité des bois fournis par la maîtrise d'ouvrage ont été abattus à la fin de la période de sève basse de l'année 2021.

La couverture de la flèche et des bras de transept

La couverture de la flèche et des bras de transept sera restituée à l'identique de celle en œuvre avant l'incendie. Cette restitution s'accompagnera de modifications, à la marge, de certaines mises en œuvre afin de corriger les faiblesses identifiées dans la description des ouvrages faite plus haut. Nombre de ces adaptations ne seront, pour beaucoup d'entre elles, qu'une reproduction de celles déjà apportées lors des travaux qui suivirent la construction de la flèche et étaient déjà envisagées dans le Dossier de Consultation des Entreprises établis en 2017 par Philippe Villeneuve, ACMH.

Ces modifications seront réalisées, à la marge, sans dénaturer et remettre en question l'œuvre originale, au profit de dispositions plus pérennes. Ainsi, au droit des parties courantes du grand comble, la fixation en tête des tables de plomb sera légèrement repensée. La table de plomb, avant de se retourner sur la volige, sera intercalée, entre deux voliges, puis maintenue par un système de boulon et écrous, engravés côté extérieur dans la volige, compris la mise en place de deux bandes en cuivre, de part et d'autre de ce complexe. En partie basse, le maintien par pattes de fixation en cuivre étamé clouées sur la volige, sera, quant à elle, reconduite à l'identique de l'existant. Les pattes en cuivre seront patinées dans les tons gris.

Au droit des pignons, les relevés d'étanchéité, ne seront, quant à eux, non plus remontée sous les pas de moineau, mais contre la face de ces derniers.

³⁸ Georges Lambert et Virginie Chevrier, CNRS, UMR 9946, 1997. Cette étude est en cours de relecture.

Le type de pose et d'assemblage de la couverture de la flèche respectera celui existant avant incendie (pose en fougère à ourlet creux au droit du fût, agrafage rabattu à joint plats au droit des poteaux arêtières etc...), à quelques exceptions près mentionnées dans les planches graphiques.

Dans les parties présentant un risque de soulèvement, des pontets à bretelles seront intégrés à la conception.

La volige sera en chêne de 27mm non jointive clouée sur la charpente par pointes en cuivre crantées sur le grand comble et l'aiguille de la flèche et de 50mm au droit du fût de cette dernière (sur la base de ce qui a pu être observé au droit des abat-sons du beffroi).

Une interface en papier anglais double épaisseur croisée et fixée par double agrafage sera prévue entre les tables de plomb et le voligeage. Au droit des jonctions des voliges sur les parties courantes du grand comble, cette interface sera ajourée pour permettre la ventilation de la sous-face du plomb.

Les tables de plomb seront réalisées à l'identique de celles mises en œuvre par Eugène Viollet-le-Duc, d'épaisseur 3,5mm et coulées sur sable.

Les études d'exécution de la couverture de la flèche devront inclure le calepin complet de la couverture y compris décors et dessins d'exécution de chacun des ouvrages pour validation par l'ACMH.

La restitution des couvertures de la flèche, des bras de transept et des travées adjacentes à la flèche prévoira la restitution des dispositifs d'évacuation des eaux pluviales incluant la mise en œuvre de l'égout et des descentes d'eaux pluviales en cuivre depuis le chemin de ronde jusque sur les terrasses basses des chapelles ainsi que le chemisage en plomb des chemins de ronde et des chéneaux entre les versants Est des bras de transept et la toiture pyramidale maçonnée des escaliers en vis de ces derniers.

Le traitement de la gestion des eaux pluviales en partie basse sera quant à elle traitée dans une opération ultérieure.

Synthèse des faiblesses constatées avant l'incendie

Les différentes campagnes de travaux qui furent menées depuis la construction de la flèche ont mis en évidence quelques légères faiblesses de conception. Nous les avons évoquées dans la description de la couverture de la flèche et les rappelons ci-après :

- **Un manque de dilatation** de certaines tables de plomb, principalement au droit des deux niveaux à claire-voie, qui, cumulé à une ventilation insuffisante de la sous-face des plombs, conduisait à des déchirures des tables et à un développement de céruse.
- **L'absence d'interface entre les tables de plomb et le chêne** (ou inefficience de la peinture au minium appliqué sur les bois), entraînant la transformation du plomb en céruse en cas de réactivation du tanin, malgré l'emploi de bois sec, par phénomène de condensation lors d'infiltration et manque de ventilation.
- **Des armatures en fer forgé des décors**, susceptibles de se corroder et d'entraîner, par réaction en chaîne, l'altération des plombs ;
- **Des soudures réalisées en partie à l'étain**, devenant au fil du temps, cassant.

Amélioration de la mise en œuvre des tables de plomb et de leur ventilation en sous-face

Le nombre insuffisant de tables de plomb pour l'habillage de certaines parties de décors des deux niveaux à claire-voie de la flèche et le clouage sur celles-ci d'armatures de crochets qui les bridait ont conduit au déchirement de plusieurs tables en contraignant la dilatation du matériau. Ces défauts ont été traités par les différentes campagnes de travaux successives du XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, on reconduira donc les améliorations apportées lors de ces campagnes :

- Multiplication des tables de plomb ;
- Indépendance des éléments de décors et de l'habillage en plomb des parties courantes ;
- Fixation des éléments en plomb par des pattes en cuivre étamées ;
- Ajout de bandes de coulage en cuivre étamé pour renforcer les zones de fragilité si nécessaire ;
- Interface entre la volige en chêne et les tables de plomb pour prévenir l'apparition de céruse composée d'une couche de papier anglais encollé et agrafé et d'une double couche de peinture au minium de zinc ou de peinture anti remontée tanique qui sera appliqué sur les charpentes au contact de la couverture (sur le modèle de ce qui avait été mis en œuvre lors de la restauration de la crête du grand comble de la nef et du transept par Benjamin Mouton ACMH en 2010),
- Mise en place d'évents, notamment au droit des niveaux ajourés de la flèche, et plus particulièrement sur les bois de charpente chemisés en plomb, pour augmenter la ventilation en sous-face des tables de plomb.

Par ailleurs, afin d'améliorer la ventilation du grand comble et l'entretien à venir de la couverture, des passe-cordes seront ajoutés en partie haute des versants du grand comble, à intervalles réguliers.

Les ornements de couverture de la flèche et des bras de transept

Les ornements de la flèche

Les armatures

Lors du tri réalisé dans les décombres de l'incendie sur le sol de la cathédrale et les extrados des voûtes, de nombreuses armatures ont pu être retrouvées.

L'observation et l'analyse des photographies, archives anciennes et avant incendie, ainsi que la lecture des archives écrites ont permis de comprendre les composantes du système d'armature des principaux éléments de décors.

Néanmoins, si de nombreuses armatures ont été retrouvées dans les vestiges, permettant une meilleure compréhension, notamment lorsque certains habillage plomb y sont encore associées, **aucune ne sera réemployée.**

Toutes seront restituées à l'identique des modèles retrouvés, exception faite de celles des crochets ornant les arêtières de l'iguille. En effet, afin de pallier les désordres systématiques observés avant incendie (fissuration et casse des crochets en partie supérieures liées à des armatures trop courtes), **la longueur de ces armatures sera prolongée.**

Aucune fixation sur les tables de plomb ou habillage plomb ne sera autorisée, les armatures seront fixées uniquement sur la charpente en bois (structure principale ou secondaire) ou sur les voliges.

Pour ne créer aucune saillie entre les armatures des décors et les éléments de charpente, ces derniers auront préalablement été entaillés pour accueillir les armatures. La bonne coordination entre les différents lots garantira la qualité des finitions de l'ouvrage.

L'ensemble de ces armatures seront réalisé en acier pur forgé, galvanisé à chaud.

Les décors en plomb sur armature métallique (ornements et bestiaires)

Un protocole détaillé complet de fabrication et dessins sera établi pour validation par l'ACMH, à partir des documents d'archives existants et selon la technique du plomb repoussé.

Un modèle sera réalisé pour validation par l'ACMH dans le matériau choisi par l'entreprise pour valider le dessin et la forme de chacun des ornements, et plus particulièrement les parties figuratives (grands ducs, gargouilles, etc.)

Puis, sur la base de ce modèle, une forme en bois, fonte, ou autre matériau au choix de l'entreprise sera tiré pour permettre le repoussage du plomb. Des prototypes seront également réalisés pour arrêter le protocole exact de fabrication.

Un calepin détaillé des tables de plomb sera soigneusement réalisé pour identifier le nombre d'éléments et la localisation précise des soudures.

Lors du martelage, aucun amincissement ne sera toléré. Les ossatures internes secondaires ou de renfort en cuivre assemblés par rivet seront restituées à l'identique de l'existant.

Lorsque nécessaire, certaines parties de décors seront rigidifiées par le coulage d'étain en face intérieure en évitant l'apparition de fissures.

Toutes les soudures seront autogènes, les soudures à l'étain seront proscrites. Les ouvrages en plomb seront graissés et suiffés.

Les décors en plomb repoussé sur la structure secondaire de la charpente de la flèche

Les modénatures de la flèche, composés des frises, corniches mais également les deux niveaux ajourés seront restitués par le lot charpente. Ces éléments en bois, chantournés, étaient fixés sur la charpente primaire de la charpente de la flèche à l'aide de boulons, dissimulés dans des chapelles. Les éléments les plus complexes, à l'image des réseaux, colonnettes et garde-corps se décomposaient en plusieurs éléments assemblés, sur le principe des ouvrages de type menuiserie : les éléments structurants (montants verticaux, traverses) s'assemblaient entre eux par des tenons et mortaises, tandis que « les panneaux de remplissages » étaient assemblés par rainures et languettes. Ces panneaux se plaquaient, contre les poteaux arêtières, sur toute hauteur, par un système d'embrèvement. Ces ouvrages, de forte épaisseur, participent au contreventement de la flèche.

Comme nous l'avons décrit, ci-avant, peu d'éléments d'archives renseignent ces ouvrages. Les hypothèses de restitution se basent sur les quelques plans datant de la construction, renseignant partiellement, notamment pour le premier étage, la décomposition en panneaux et les assemblages, et quelques vestiges retrouvés après l'incendie (outeau, conservé dans son intégralité), permettant, par extrapolation, sur la base de la compréhension des principes constructifs adoptés, d'arrêter un certain nombre d'hypothèses.

L'ensemble sera habillé en plomb par le lot couverture, par repoussage des tables de plomb, sur les formes en bois et sera ponctuellement rehaussé de décors en plomb repoussés ou coulés, soudés sur cet habillage (voussures du premier étage ajouré, frises, etc.), à l'identique de l'existant.

Les ornements des couvertures du transept

Les crêtes de faîtage

Les crêtes de faîtage seront restituées selon le modèle d'armature et de fabrication (monocoque coulée) arrêtés pour la restitution de la crête lors de la dernière campagne de restauration réalisée par Benjamin Mouton ACMH en 2009. Ce processus de fabrication s'appliquera aussi bien pour les fleurons que pour les épis composant la crête. L'entreprise en charge du lot devra établir les plans d'exécution à partir de l'étude des armatures type et des décors récupérés parmi les vestiges calcinés et stockés dans un lieu désigné par la maîtrise d'ouvrage. Ces armatures se composent d'un tuteur vertical en fourchette, de deux équerres boulonnées au tuteur, le tout enserré par une frette et de deux éléments de supports de volutes boulonnés à un anneau central emboîtés sur le tuteur vertical. La mise en œuvre des crêtes sur site inclura la mise en œuvre d'une jupe de faîtage de 3,5mm d'épaisseur en plomb et des cabochons décoratifs dissimulant les fixations des premières tables de plomb.

La couronne, l'embase, la croix et le coq et ses reliques

Le coq

Le coq en cuivre, retrouvé peu de temps après le sinistre, ne sera pas restauré en vue d'une repose sur site, mais sera conservé comme un stigmate du sinistre et exposé au public (hors opération).

Un nouveau coq, en cuivre repoussé, sera refait à neuf, à l'identique et sera posé au sommet de la croix sommitale de la flèche. Des dessins d'exécution de l'armature, le calepinage des feuilles et un modèle sera réalisé par l'entreprise dans le matériau de son choix pour validation par l'ACMH. Le cuivre sera protégé sur sa face intérieure par une peinture epoxy à l'interface entre le cuivre et l'armature principale assemblée par rivets, ainsi que par des bandes de téflon ou de bitume.

La mise en place du reliquaire à l'intérieur du coq se fera sous contrôle et en présence du clergé.

La croix, l'embase et la couronne

Le très mauvais état de la croix et les exigences structurelles de cet ouvrage ne permet pas d'envisager une restauration et repose de cet ouvrage. La croix existante servira de modèle, après un relevé précis et exhaustif des structures en vue de sa reproduction à l'identique, en fer forgé galvanisé à chaud au zinc.

L'embase et la couronne seront reconstruites selon le procédé décrit ci-avant de plomb repoussé sur armature secondaire en cuivre, sur la base des documents d'archives conservés (dessins de la construction et photographies et plans de la campagne de restauration des années 1930).

Cette nouvelle réplique de la croix, coiffée du coq, sera mise en place au sommet de la nouvelle flèche. Ponctuellement, des dorures souligneront des éléments de décors.

La croix a été déposée et a été placée dans un lieu de stockage de la MOA.

Les statues des apôtres et évangélistes

Quelques jours avant l'incendie qui frappa la cathédrale, les statues des apôtres et des évangélistes avaient été déposées et évacuées dans les ateliers de l'entreprise en charge de leur restauration. Restaurées par l'entreprise SOCRA en charge du marché, elles sont aujourd'hui exposées à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine, à Paris. Conformément à l'avis de la CNPA du 9 juillet 2020 « reposées au sommet de la cathédrale à l'identique des dispositions antérieures à l'incendie ».

Les travaux de la présente opération consisteront, en la restitution des systèmes d'enfourchements métalliques de la croix, permettant la fixation des statues sur les gradins des fermes diagonales, sur le modèle des vestiges conservés, et en coordination avec l'entreprise ayant réalisés la restauration des statues, la récupération des statues à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine, puis de leur repose sur site.

Approvisionnement en plomb

Pour la flèche le plomb sera issu de lingots de plomb neuf. Le réemploi éventuel de plomb fondu sera réservé à l'opération de reconstruction des toitures de la nef, du chœur et des abat-sons du beffroi.

Certaines tables et éléments de décors ayant été retrouvés dans les décombres de l'incendie permettront après analyse, de comprendre la composition du plomb employé pour permettre de reconduire, lors du coulage des tables, une composition sensiblement identique celle employée par Eugène Viollet-le-Duc. La composition du plomb respectera les valeurs préconisées par l'ACMH avant toute opération de coulée (plomb pur à plus de 99,9%).

Les accès

Les passerelles, l'escalier en vis et son édicule de sortie, les planchers des étages ajourés, et les divers barreaudages et trappes constituant les moyens d'accès de la flèche seront restitués.

Les planchers et passerelles du comble seront restitués à l'identique de l'existant (grandes planches de 8cm d'épaisseur posées directement sur les entrails des fermes principales ou sur des solives portées par les entrails). Les garde-corps seront également restitués à l'identique.

L'escalier en vis des premiers niveaux de la flèche sera tracé sur épure, taillé et préfabriqué en atelier. Celui-ci se développant dans un volume conique autour d'un poteau central incliné (dans le plan défini par les poteaux arêtières et le poinçon central) et étant composé de pièces de grandes dimensions insérées au travers de différents niveaux d'enrayures, la méthodologie de levage de l'escalier devra être intégrée à la méthodologie de levage des éléments de structure principale de la flèche.

L'édicule de sortie de l'escalier en vis situé sur le plancher de l'enrayure 4 sera restitué à l'identique y compris les huit vitraux blancs losangés et la porte d'accès à la terrasse.

Les accès dans les parties hautes seront sécurisés afin de faciliter les inspections régulières. Les améliorations apportées seront réalisées sans modifier l'aspect général de cette dernière :

- Des points d'ancrage seront ajoutés, au droit de l'aiguille, pour permettre une sécurisation normée de l'accès.

- Des échelons, fixes, seront légèrement déportés par rapport à leur emplacement d'origine. Initialement placé dans une des noues de l'aiguille, points sensibles d'un point de vue de l'évacuation des eaux pluviales, ils seront déplacés sur une face.
- Des pièces de charpentes, ajoutées à la structure originale, permettront la fixation de ces ouvrages.

Les piques anti-intrusion ajoutées au cours du XX^{ème} siècle, inefficaces, ne seront, quant à elles, pas restituées.

Enfin, des grilles en cuivre et filets seront restitués, notamment au droit de l'aiguille, afin d'empêcher les volatiles de s'introduire dans les charpentes.

L'horloge et les cloches

L'horloge et les cloches de la flèche seront exclus de la présente opération, compris :

- Le local vitré abritant le mécanisme de l'horloge composé d'une structure en bois, de panneaux de remplissage en bois en partie basse et de vitrages en partie haute, d'un plafond mouluré et de trois portes à deux ouvrants sur sa face sud.
- Les goulottes en bois dissimulant les dispositifs de transmission du mécanisme de l'horloge jusqu'aux cadrans situés dans les grandes lucarnes du transept. Ces goulottes sont suspendues par des étriers métalliques aux charpentes ou portées par des solives posées sur les faux-entrants des fermes principales des bras de transept.
- La pose des aiguilles sur les cadrans des horloges.

Seuls les cadrans des horloges sont inclus dans l'opération, à la charge du lot couverture, ceux-ci étant des éléments majeurs des grandes lucarnes des bras de transept traités dans cette opération.

5. Le levage de la charpente et la mise en œuvre de la couverture

L'échafaudage de la croisée

Un échafaudage de pieds, au droit de la croisée, sera mis en œuvre pour assurer :

- La restauration des appuis de la flèche ;
- reconstruction de la voûte de la croisée ;
- La restitution de la charpente de la flèche ;
- La restitution de la couverture, compris les ornements.

Un radier, en bois lamellé collé ou en métal de poutres lamellées, composé d'éléments préfabriqués, posés sur une chappe fibrée de nivellement permettra d'assoir l'échafaudage tout en prenant en compte la présence de substructures (carnaux, crypte Soufflot, etc.), préalablement comblées ou étayées.

L'échafaudage sera conçu pour permettre la pose des cintres de la voûte de la croisée, l'étai des entrants du tabouret pour aider au levage de ce dernier et de la souche, la possibilité de créer des stockages tampons, ponctuellement, de matériel et la mise hors d'eau de la voûte de la croisée.

Il devra prendre en compte, entres autres, dans sa conception, l'impossibilité de se raccorder aux échafaudages existants, situés au pourtour de la croisée, l'encombrement à venir des charpentes du tabouret et de la souche de la flèche, qu'il devra traverser, mais également aux efforts de vent auquel il sera soumis, une fois dépassé le niveau de faitage du grand comble.

Le montage et le démontage de l'échafaudage seront réalisés à l'avancement des travaux de charpente et de couverture, en coordination étroite avec les lots en charge de ces ouvrages. Une équipe en régie, accompagnera, pendant toute la durée de l'opération, les titulaires des autres lots.

Une étanchéité provisoire, sur cet échafaudage, au niveau du comble, assurera la mise hors d'eau de la cathédrale, et plus particulièrement des arcs diagonaux et de l'anneau de compression de la voûte de la voûte de la croisée, préalablement reconstruits avant la construction de la flèche.

Le levage de la charpente

Au regard des moyens de levage contemporains, beaucoup plus performants que ceux utilisés au XIX^{ème} siècle, le levage d'éléments complets de charpente et couverture assemblés et mis en œuvre au sol a été étudié. La conception même de la flèche ne rend pas possible ce scénario : la flèche doit être levée et assemblée pièce par pièce pour respecter la mise en œuvre des assemblages et entures croisées qui donnent à la flèche une rigidité supérieure et diminuent les risques de torsion.

Une proposition de méthode et de chronologie de levage a été étudiée. Cette méthode prévoit le levage des pièces une par une après avoir été débitées, taillées et montées à blanc préalablement, sur site ou en atelier. Cette méthode est fournie à titre purement indicatif, l'entreprise aura à sa charge l'élaboration de sa propre méthode de levage qui devra être soumise à l'Architecte en Chef des Monuments Historiques.

Des moyens de levage sont fournis par la maîtrise d'ouvrage (grue à tour, PPM, nacelles) pour le levage des charpentes. La méthodologie de levage précisera les besoins en levage par charge des pièces à lever.

Les moyens de manutention nécessaires au pré-assemblages sur les aires de stockage tampon seront, quant à eux, fournis par l'entreprise. De même les échafaudages de pied à mettre au-devant des lucarnes sont à la charge de l'entreprise ainsi que tous moyens d'accès aux charpentes.

Des adaptations de l'échafaudage pourront être demandées au lot 03_{TP} Echafaudages durant le mois de préparation (pour intégration de treuils et palans jusqu'à 2T à la charge de l'entreprise par exemple).

La mise en œuvre de la couverture de la flèche

A l'identique d'Eugène Viollet-le-Duc, la mise en œuvre de la couverture sera opérée par grands ensemble, du haut vers le bas, en commençant par l'aiguille, puis les deux niveaux ajourés, le fût, et enfin les contrefiches des noues. Les échafaudages seront démontés au fur et à mesure de l'avancement.

Les éléments de décors, seront, autant que ce peut, préfabriqués en atelier.

Tous les ouvrages plomb, seront préalablement emballés dans des films plastiques, afin d'éviter, lors de l'acheminement de ces éléments sur site, la contamination de toute l'aire de chantier.

Enfin, au droit des parties courantes du grand comble, des échafaudages d'approches seront mis à disposition du lot couverture, par le lot échafaudage de la présente opération.

• • •



2

La reconstruction de la voûte de la croisée et la restauration et reconstruction des voûtes des bras de transept



- Définition des limites de la présente opération ;
- Description de l'ouvrage ;
- Synthèse de l'état sanitaire ;
- Interventions projetées ;
- Moyens d'accès, supports de reconstruction et protections diverses.



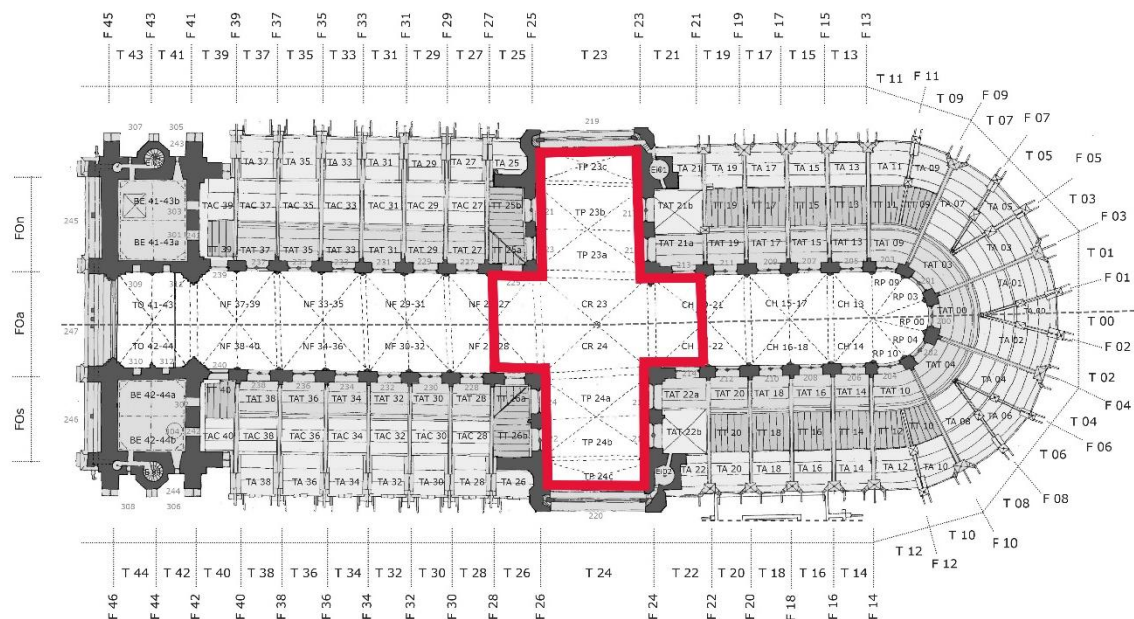
1. Définition des limites de la présente opération

Sont concernées :

- Les voûtes hautes du transept*
- La voûte de la croisée du transept*
- La demi-voûte sexpartite du chœur au contact de la croisée (T21-22)*
- La demi-voûte sexpartite de la nef au contact de la croisée (T25-26)*

L'objet de la présente opération est la restauration des voûtes du transept et des amorces du chœur et de la nef.

Elle comprend d'une part la reconstruction des voûtes effondrées (arcs, oculus, voutains de la croisée et voutain du bras nord) et d'autre part le renforcement des voûtes encore en place mais fragilisées à divers degrés par le choc de l'effondrement des charpentes et par la combustion des bois qui a été à l'origine de dégradations structurelles au niveau de leur extrados.



Zone concernée par l'opération

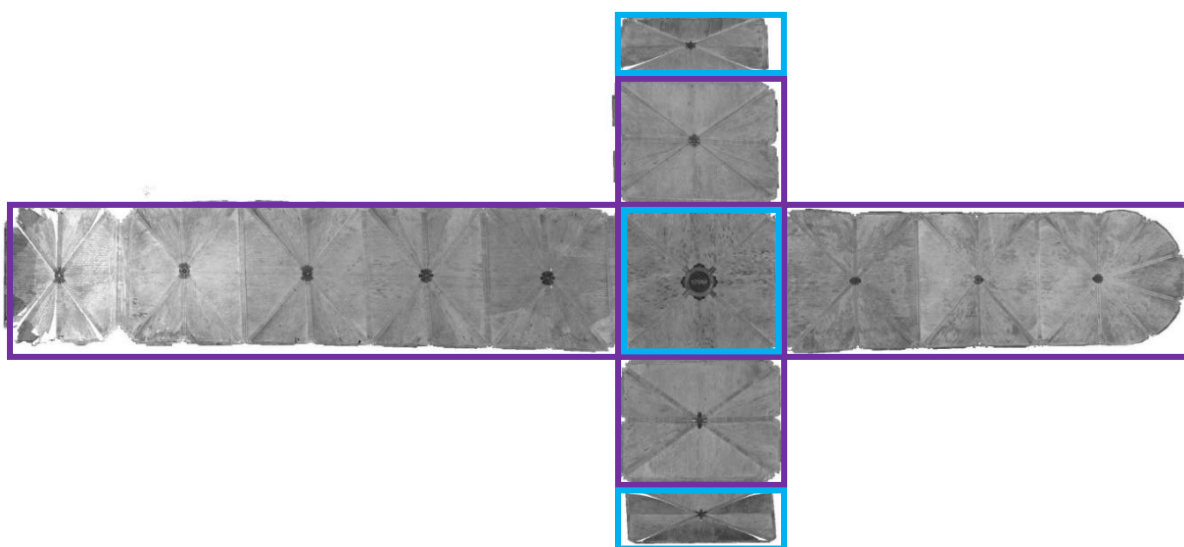
2. Description de l'ouvrage

Typologie des voûtes de Notre-Dame

Généralités

Les voûtes du vaisseau, dont la conception hétérogène, témoigne autant de différentes époques constructives que de nombreuses campagnes de restauration sont constituées de :

- ☐ Voûtes sexpartites qui constituent le couvrement d'origine du vaisseau ;
- ☐ Voûtes quadripartites situées à la croisée du transept et sur les travées au contact des pignons Nord et Sud du transept



Ortho-image de l'intrados du vaisseau central.

Source : Nuage de points A. Tallon (2010), recalage GT numérique (avril 2020), ortho-image, Bestrema (avril 2020)

L'extrados des voûtes était, avant incendie, recouvert d'une chape de mortier en plâtre, à l'exception de la première travée du chœur.

Voûtes sexpartites

Les voûtes sexpartites sont divisées en six secteurs ou voûtains qui reposent sur neuf arcs :

- Deux arcs doubleaux latéraux qui délimitent les travées et reposent sur les piliers majeurs ;
- Un arc doubleau axial qui divise la travée en deux et repose sur les piliers mineurs ;
- Deux arcs diagonaux qui reposent sur les quatre piles correspondant aux angles de la travée ;
- Quatre arcs formerets intégrés aux murs gouttereaux.

Les deux arcs diagonaux et les deux arcs doubleaux latéraux reposent sur les quatre piles d'angle dites majeures. Ils recoupent le doubleau axial sur la clef de voûte qui repose sur les piles centrales dites mineures. Les quatre voûtains mineurs reposent chacun sur un demi-arc doubleau axial, un demi-arc diagonal et un arc formeret qui ourle sur une demi-travée le mur gouttereau. Ils correspondent chacun à environ un huitième de la surface projetée de la travée.

Les voûtes sexpartites du transept correspondent, en plan, à l'espace des doubles collatéraux de la nef et du chœur.

Voûtes quadripartites de la croisée et des voûtes barlongues

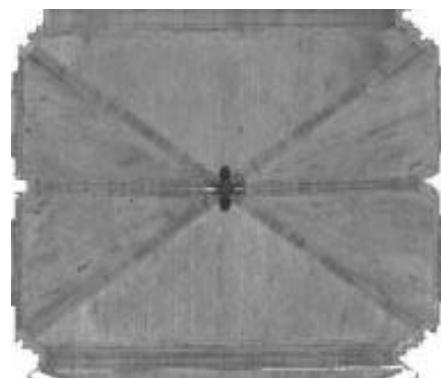
La voûte de la croisée quadripartite comporte quatre grands voutains séparés par les arcs diagonaux. La voûte de la croisée n'a pas de clé en son centre mais un oculus clavé.

Aux extrémités des bras nord et sud du transept, une travée de voûte barlongue raccorde le vaisseau jusqu'au pignon. Cette travée se trouve en plan dans l'alignement des chapelles latérales du rez-de-chaussée. Si l'arc doubleau qui la sépare de la travée sexpartite adjacente est à double rouleau de même hauteur que ceux de la croisée, la hauteur sous clé de la voûte barlongue est inférieure à celle de la voûte sexpartite, du fait de la moindre portée des arcs diagonaux. Les voûtains d'extrémité portent directement sur l'extrados des roses qui ont ici le rôle d'arc formeret. Au-dessus, un vide sépare la voûte barlongue de l'intrados d'un arc de décharge qui renvoie le poids des pignons sur les reins de la rose¹.

Mode constructif des voûtes

Typologies et géométrie

Les arcs sont constitués de claveaux au profil nervuré dont l'intrados et l'extrados sont circulaires et concentriques et dont les plans de lit sont rayonnants. La géométrie des voûtains est complexe. Ils sont composés de deux secteurs déterminés chacun par les deux demi-arcs (formeret et diagonal, ou doubleau et diagonal) sur lesquels ils reposent, et par l'arc tendu sur lequel ils se rencontrent. L'épaisseur des voûtes varie. Les voûtes de la nef et des bras du transept ont une épaisseur moyenne comprise entre 20 et 23cm tandis que l'épaisseur moyenne dans le chœur est comprise entre 12 et 15cm. Celle de la croisée est de l'ordre de 15cm.



Ortho-image de l'intrados de la voûte sexpartite du bras sud du transept

Nature et origines des pierres

Les pierres des voûtes sont des pierres calcaires. Il existe une certaine hétérogénéité sur les types de pierres, liées à la fois aux phases successives du chantier, et aux opérations de reconstructions partielles de voûtes au XIX^{ème} siècle. Les arcs sont des calcaires durs, et les retombés en roche de Laversine et Soissons, de vieilles pierres du Vexin. Les voûtains sont en calcaire tendre, vergelés du Val d'Oise³.



Détail de l'interface entre les voûtains et l'arc diagonal de l'angle sud-ouest de la croisée

¹ Source : Présentation du LRMH du 27/01/2020 intitulé « Bilan documentaire – Voûtes du transept » par Lise Leroux et Alban François.

³ *Ibid.*

Décor et polychromie

Les clés

Les clés des voûtes sexpartites et quadripartites ont un décor sculpté polychrome et doré. Elles sont ornées de couronnes de végétaux parfois flanquées de figures fantasmagoriques de part et d'autre des voutains centraux. Bien que leurs décors polychromes soient issus de la campagne de restauration de Viollet-le-Duc au XIX^{ème} siècle, les clés de voûtes de la nef et du chœur sont probablement toutes médiévales. En revanche, l'anneau de compression de la croisée et les clés de voûte des bras de transept ont probablement été modifiées lors de travaux au XVIII^{ème} siècle. Un millésime de 1728, retrouvé sur l'une des figures fantasmagoriques de la voûte sexpartite du bras Sud par les membres du GT Pierre du CNRS, semblerait confirmer cette hypothèse. .



Clé de la voûte sexpartite du bras Sud

Les nervures et voutains

Nous n'avons aucune information quant à la présence ou non de décors polychromes appliqués sur l'intrados avant le XVIII^{ème} siècle et les campagnes de restauration successives ont pu contribuer à faire disparaître les éventuelles stratifications. Toutefois, l'analyse visuelle in situ du bras Sud du transept nous a permis d'identifier deux trames de faux-appareils peints. La première trame est un faux appareil en coupe de pierre à un filet peint brun-rouge, probablement contemporain des travaux de restauration de Viollet-le-Duc. La seconde trame correspond au rejointoiement des voutains, par Bernard Fonquernie, ACMH, dans les années 1980, peint en blanc afin d'amoindrir leur présence.



Détail de la polychromie des nervures

Les cavets des arcs sont peints de filets brun-rouge, de même que les arêtes des arcs qui marquent la jonction avec les voutains. Les nervures qui forment le départ des arcs depuis la clé sont, quant à elles, réhaussées de bleu.

Enfin, à la présence de polychromie sur les voutains, on constate la présence de plusieurs badigeons dont les teintes ocres ont été révélés mais aussi dégradés par le lessivage intensif des eaux d'extinction couplées aux fortes températures des bois consommés sur l'extrados.

Nature des pierres en œuvre ⁶

Les pierres utilisées pour les voûtes sont caractérisées par une certaine hétérogénéité, liée à la fois aux phases successives de construction, et aux différentes campagnes de restauration et de reconstruction des voûtes au XVIII^{ème} siècle par Boffrand puis au XIX^{ème} siècle par Viollet-le-Duc.

Nef

L'analyse de l'arc doubleau effondré dans la nef a montré que sa construction, bien qu'intégralement médiéval, présente néanmoins des pierres hétérogènes. En effet, la majeure partie des claveaux est en pierre dure issue des *Bancs francs parisiens* tandis que les quelques claveaux les plus larges (dim. supérieure à 30cm) sont dans une pierre plus tendre et poreuse, se rapprochant des *Lambourdes parisiennes*. Ces pierres pourraient provenir du *Banc royal*. Les voutains de la nef sont également construits en *Lambourde parisienne*.

Chœur

Les retombées des voûtes et les nervures du chœur, quant à elles, sont en *Liais* ou en *Cliquart*, en fonction de leur inclinaison dans la voûte (et de la contrainte résultante).

Croisée

La voûte de la croisée est constituée de pierres calcaires de plusieurs origines liées aux reconstructions successives dont elle a été l'objet. Les claveaux anciens des arcs proviennent du Vexin (XVIII^{ème} siècle – reconstruction par Boffrand) alors que les pierres neuves sont des calcaires durs de Laversine et de Soissons. Plusieurs natures de pierres furent employées pour sa reconstruction au XIX^{ème} siècle, car Viollet-le-Duc a remployé de nombreux blocs de la voûte précédente déjà reconstruite au XVIII^{ème} siècle par Boffrand. Les voussoirs des quatre voutains sont en *Vergelés* du Val d'Oise, calcaire tendre de type Saint-Maximin⁷.



Claveau d'arc retrouvé dans les vestiges

Bras du Transept

Les voutains de la voûte sexpartite du bras Sud sont en calcaire tendre, très poreux. Il pourrait s'agir de *Lambourdes parisiennes* ou plutôt de *Pierre du Vexin* comme pour les voussoirs de la voûte du bras Nord, toutes deux reconstruites par Boffrand au XVIII^{ème} siècle⁸. Ces voussoirs ne sont pas taillés dans les mêmes *Vergelés* que ceux mis en œuvre par Viollet-le-Duc dans la croisée, ce qui semble confirmer que la voûte sexpartite du bras Sud est probablement intégralement du XVIII^{ème} siècle.

●

⁶ Leroux Lise, *Tableau récapitulatif des différentes natures de pierres*, Paris, 02/12/2020.

⁷ Source : Présentation du LRMH du 27/01/2020 intitulé « Bilan documentaire – Voûtes du transept » par Lise Leroux et Alban François.

⁸ Source : Leroux Lise, information communiquée le 10/12/2020

3. Synthèse de l'état sanitaire

Les voûtes ont beaucoup souffert de l'incendie qui a ravagé la cathédrale le 15 avril 2019 pour des raisons en partie comparables à celles qui ont causé la dégradation du parement des murs bahuts. Le choc de la chute des charpentes les ont ébranlées, causant en plusieurs endroits des effondrements (nef, croisée, bras nord du transept), mais plus généralement accentuant des désordres datant pour certains de leur construction (affaissements, fissures), et aussi provoquant des désolidarisations entre les pierres et les joints qui les lient. A ces dégradations s'ajoutent celles causées par la combustion plus ou moins longue des bois au contact direct des voûtes, et les hautes températures auxquelles elles ont été exposées. Enfin, elles ont été soumises à un deuxième choc thermique lié aux eaux d'extinction de l'incendie. Ces eaux d'extinction ont aussi transporté des suies et du tanin qui strient l'intrados de filets de bistre au moment de l'incendie, dégradant ainsi leur aspect. Enfin une partie des voûtes, dont l'extrados n'a pu être complètement protégé des eaux pluviales depuis l'incendie, présente des signes de dégradation superficielle du fait de la présence de sels provenant de la chape de plâtre qui les recouvrait à l'extrados. Les sels ont migré à travers les pierres et sont à l'origine d'importantes transformations de l'épiderme de la pierre sous forme de développements de gypse et de dégradations liées à la cristallisation de sels à l'intrados des voûtes et des arcs.

Constat général des suites de l'incendie

Conçues à l'origine pour isoler l'espace intérieur de la cathédrale de la toiture et des risques de destructions liés à un éventuel incendie de la toiture, les voûtes du vaisseau ont subi directement les conséquences de celui du 15 avril 2019.

Il existe actuellement trois états de dégradation structurelle des voûtes après l'incendie : les voûtes effondrées (croisée), les voûtes encore en place mais fragilisées par des trous (Transept Nord) et les voûtes en place et ne montrant pas de lacunes (Transept sud). Les voûtes effondrées sont localisées dans le cadre de l'opération en deux endroits : dans le bras Nord du transept, au niveau du voûtain central Nord de la travée sexpartite et dans la croisée pour l'ensemble de la voûte, soit quatre voûtains, quatre demi-arcs diagonaux et l'oculus central.

Les extrados des voûtes, au-dessus desquelles les charpentes des grands combles se sont embrasées, ont tous été touchés par l'incendie. Si la chape de protection en mortier de plâtre, mise en œuvre sur la quasi-totalité des extrados a contribué à protéger les pierres ou à ralentir les effets du feu sur les voûtes, le choc thermique provoqué par l'incendie et les transformations des pierres liées à la rubéfaction ont provoqué un éclatement et un déplaquage de nombreux voussoirs. La délaminatation correspond à la frontière entre les zones rubéfiées et la partie saine de la pierre du fait des contraintes de cisaillement induites par la dilatation différentielle à l'interface entre la pierre froide et la pierre chaude⁹. De ce fait, les pierres ou voussoirs encore en place, sonnent creux pour la plupart, indiquant une délaminatation. Selon la



Joints dégradés à l'extrados

⁹ Note LRMH



profondeur de délamination, les transformations physico-chimiques de la surface peuvent avoir un impact sur la capacité structurelle des pierres en œuvre.

Désordres structurels

Les voûtes en place et sans lacunes sont majoritaires mais leur examen montre qu'elles ont cependant subi des dégradations importantes. Ces voûtes ne sont pas affectées par des effondrements ou des brèches. Elles ont été longtemps couvertes par les décombres de l'incendie, vestiges de la couverture et de la charpente. Elles ont subi des déformations, même si ces dernières sont très réduites en altimétrie. Elles sont affectées par des fissures, des déplaquages, au moins ponctuels mais souvent assez étendus au niveau de l'extrados, et probablement des altérations physico-chimiques, consécutives à l'exposition prolongée des pierres (extrados) à de hautes températures. Ces déformations pourraient avoir un caractère évolutif et une incidence sur les caractéristiques structurelles des voussoirs concernés mais aussi de certaines zones de voutains.

Outre les pierres, le choc de l'effondrement des charpentes et les hautes températures l'incendie ont également dégradé les joints de scellement des voussoirs malgré la protection de la chape de plâtre qui les recouvrait.

Les multiples chocs résultant de l'effondrement des charpentes sur les extrados ont fragilisé les voûtes encore en place, créant des ruptures de joints entre les voussoirs. Certains voussoirs ont été enfoncés par l'impact d'un bois de charpente, comme celui dont on constate la saillie sous la voûte sexpartite du bras Sud du transept, provoquant aussi une rupture ponctuelle du parement à l'intrados.



Voussoir enfoncé, voûte sexpartite du bras Sud du transept

Les bois qui se sont consumés à de hautes températures pendant plusieurs heures sur les voutains ont dégradé la partie supérieure des joints puis les eaux d'extinction les ont lessivés et traversés passant par les vides, zones de désolidarisation entre voussoirs créés par les chocs des bois effondrés.

A plusieurs endroits, sur l'extrados, les joints dégradés en profondeur se sont partiellement vidés lors de l'aspiration réalisée pour le déblaiement des voûtes ou lors de travaux de consolidation d'urgence.

Seule la voûte de la croisée s'est totalement effondrée, laissant intacts les arcs doubleaux qui ouvrent sur la nef, le chœur, et les bras nord et sud du transept. L'arc de décharge construit par Viollet-le-Duc à l'entrée de la nef est par conséquent toujours en place mais très dégradé par l'incendie. Les claveaux de l'arc, probablement exposés pendant de longues heures aux flammes qui ont consumé le tabouret de la flèche, sont cuits, desquamés, arrondis et rubéfiés par l'éclatement de leur parement, la disparition de leurs arêtes sous l'effet prolongé des hautes



températures et les joints sont ouverts et évidés. Sa partie sommitale apparaît en contact avec la clé de l'arc doubleau et il est possible que cela induise un transfert de charge, sans toutefois que cela modifie le comportement de ce dernier du fait de la surcharge réduite.

Affaissements et/ou déformations

Les déformations et fissures, parfois préexistantes, se sont développées du fait de l'incendie. Les relevés 3D analysés selon les courbes de niveau montrent des zones légèrement affaissées (voutains), et d'autres légèrement surhaussées (arcs). Les inflexions, (et les modifications de l'aplomb des murs) restent presque négligeables toutefois en altimétrie, même si elles se traduisent par l'accentuation de fissures qui ont un caractère potentiellement évolutif et peuvent avoir ponctuellement une incidence sur la stabilité de certaines zones des voutains. Les raisons précises ont été au moins en partie identifiées mais sont probablement diverses : chocs de l'effondrement des charpentes, modification légère de l'équilibre statique associant les voûtes, murs gouttereaux et arcs-boutants liée à la disparition de la charpente, dilatations thermiques et hydriques des maçonneries des murs et des voûtes consécutives aux hautes températures de l'incendie et aux eaux d'extinction... Il faut souligner la déformation exceptionnelle des nervures qui supportent les voutains, comme l'affaissement d'un arc diagonal de la voûte sexpartite du bras Nord TP23a.



Inflexion sur le voutain du chœur – Travée 19-21

Fissures

Les fissures anciennes préexistantes (type fissures de Sabouret) déjà rejointoyées lors de plusieurs campagnes de restauration, se sont souvent développées du fait de l'incendie. Plusieurs séries de joints ouverts ou décollés par perte d'adhérence sont observées sur les nervures et les voutains à la périphérie des parties effondrées et indiquent une décompression consécutive à la rupture de l'équilibre structurel.

Dégradations épidermiques et physico-chimiques

Une première étude radar a permis d'identifier un phénomène étendu de déplaquage superficiel (de l'ordre de 2 à 3cm) de l'extrados de certains voussoirs, sans toutefois que ces parties déplaquées soient toujours complètement désolidarisées, mais avec les mêmes conséquences d'affaiblissement structurel des voutains. Selon l'épaisseur des voussoirs et selon les zones, la perte d'épaisseur à l'extrados peut remettre en cause les capacités structurelles des voussoirs dégradés ou parfois la stabilité du voutain, particulièrement lorsque les voussoirs sont peu épais comme dans le chœur (15cm avant l'incendie), et dans les parties les moins bombées des voûtes, moins rigides et moins résistantes, notamment dans la zone sommitale des voutains centraux.

En parallèle avec les dégradations structurelles liées aux chocs et à l'élévation prolongée de la température à l'origine des déplaquages précités, certaines voûtes (arcs et voutains) présentent au niveau du parement de l'intrados des altérations physico-chimiques liées à la migration de sels solubles transportés par les eaux d'extinction de l'incendie puis par les intempéries auxquelles elles ont été exposées, notamment les eaux météoritiques à la périphérie de la croisée ou au contact avec les pignons. Ces désordres qui se caractérisent pour l'essentiel par le développement d'une couche de gypse superficielle (mais aussi ponctuellement par la cristallisation d'autres sels : nitre...)

ont un caractère évolutif et une incidence sur la conservation de l'épiderme et donc la forme et les proportions des éléments d'architecture (tores des arcs). Ces phénomènes sont principalement constatables dans la partie inférieure des voûtes (reins, pieds de gerbe, arcs formerets), et aussi dans la partie sommitale des murs gouttereaux et des piles (chapiteaux et dernières assises), jusqu'aux arcatures des baies hautes du vaisseau, toutes zones particulièrement affectées par l'humidité.

Enfin, sous l'action de la température, selon son intensité et la durée d'exposition, les parements de pierre peuvent changer de couleur - rouge, puis gris, puis blanc, la pierre dans ce dernier état étant transformée en chaux. Ce phénomène ne concerne toutefois que peu ou pas l'intrados des voûtes mais parfois les parements du mur bahut ou des pignons nord et sud.



Modification chromatique de l'épiderme pouvant traduire un changement physico-chimique de la pierre en profondeur

Assainissement

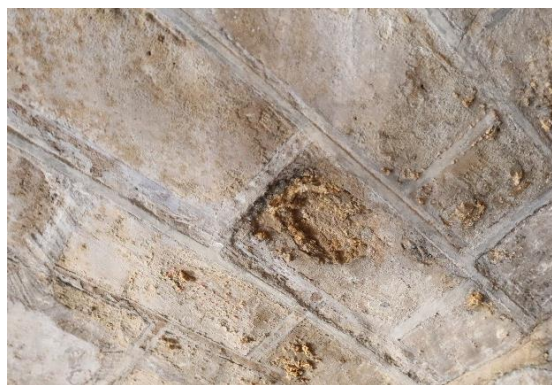
Les dégradations liées à l'humidité sont nettement visibles à l'intérieur de l'édifice sur les murs et les voûtes qui présentent par endroit des tâches sombres (présence d'eau), des formations de sels ou des colonisations microbiologique notamment à l'extrados des arcs doubleaux de la croisée et sur les voûtains adjacents. Les infiltrations et la forte présence d'humidité dans les parements tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'édifice ont des origines diverses. En premier lieu, les eaux d'extinction de l'incendie, très abondantes, ont constitué un important apport d'humidité dans les maçonneries dès le soir du sinistre. En second lieu, l'absence de couverture provisoire a favorisé l'exposition des extrados aux eaux de pluie, qui ont par la suite prolongé l'imprégnation des voûtes et de leurs supports. Enfin, les zones de contact aux revers des pignons présentant des défauts d'étanchéité difficilement contrôlables en raison des étaies qui sécurisent les pignons ont été des lieux d'infiltration. Les dispositifs provisoires mis en place pour l'écoulement de eaux de pluie sont aussi parfois défectueux malgré des vérifications régulières. En conséquence, de nombreuses tâches mais aussi des efflorescences salines se développent sur les intrados.

De récentes améliorations et compléments de bâches provisoires ont permis de mieux contrôler les infiltrations des eaux de pluie des planchers sur les voûtes, à la croisée et au contact des pignons, permettant ainsi depuis peu d'espérer un séchage progressif des parements.

Sels et efflorescences

Bien que leur cause et leur intensité ne soit pas encore complètement identifiés, en raison d'un accès encore limité aux intrados, l'apparition de sels de différentes natures (*gypse* majoritairement lié à la dissolution du plâtre, mais aussi *nitre* au niveau des reins indiquant d'anciennes pollutions organiques / déjections de volatiles...) sur les parements en cours de séchage confirme des transferts ioniques favorisés par l'humidité élevée. La concentration importante de sels est particulièrement visible sur l'intrados du bras Sud du transept et les dégradations de l'épiderme sont évolutives avec des pertes de matière par desquamation, pulvérulence issue de l'alvéolisation des parements. Les sels solubles en provenance des eaux d'extinction de l'incendie (agents mouillants) et des eaux de pluie, associés aux sulfates du plâtre et aux résidus de déjections de volatiles, ont migré vers les zones d'évaporation que sont les parements, cristallisant dans le

système poreux et entraînant sa dégradation au niveau du parement. Ces dégradations liées à la cristallisation des sels continueront à se manifester avec le séchage progressif des voûtes (et des murs support), notamment dans les reins où les eaux se sont accumulées sur de longues périodes (pendant presque deux ans et au cours de deux hivers pluvieux et froids, dans les zones les plus exposées comme la croisée ou les pignons). Dans certaines zones comme les reins de voûtes, la présence de plomb fondu solidifié lors de son refroidissement a créé des films ou même des boucliers épais, empêchant l'humidité de s'évaporer autrement que vers l'intrados, accentuant la cristallisation des sels dans l'épiderme des pieds de gerbe. Ce phénomène de pollution saline est probablement généralisé à l'ensemble des voûtes et des parties des murs gouttereaux sur lesquels elles reposent, et devra faire l'objet d'un suivi sur le long terme et peut-être d'intervention successives postérieures aux travaux de restauration du présent projet.



Efflorescences salines sur l'épiderme des voussoirs

Le contrôle des pathologies liées aux sels est donc un objectif prioritaire afin de stabiliser l'épiderme. Il faut aussi rappeler que les eaux qui ont pénétré les pierres des voûtains des arcs, et migré vers les reins de voûte et les murs, et dont le séchage sera long, peuvent aussi avoir des conséquences structurelles en atténuant la résistance des pierres et des maçonneries.



Desquamation de l'épiderme

Décors

Outre l'état de dégradation apparent de l'extrados, les pierres des voûtains et les clefs de voûtes encore en place, sont altérées dans leur aspect en intrados. Cette altération s'exprime par des changements de tonalité et de coloration qui témoignent de la transformation des ragréages ou des badigeons anciens exposés à des variations de température et aux eaux d'extinction de l'incendie. En effet, les pierres, progressivement détrempées, ont été imprégnées par percolation des eaux infiltrées par les joints désolidarisés jusqu'à l'intrados. Des dépôts brunâtres sont donc visibles en de nombreux endroits en intrados, sous forme de trainées qui montrent un ruissellement des différentes couches de badigeon mêlées aux goudrons, suies et tanins des bois consumés sur le parement. Les coulures blanches sont quant à elles le résultat du lessivage des joints peints au XX^{ème} siècle.



Coulures et variations chromatiques de l'intrados

Enfin, les décors peints et dorures probablement déjà écaillés et fortement encrassés avant l'incendie ont en plus été affectés par les dépôts de l'incendie.

Anneau de compression

L'anneau de compression s'est disloqué avec l'effondrement de la voûte de la croisée et le poids des vestiges de charpente. Il comportait initialement 8 claveaux, dont quatre constituaient la liaison avec les arcs diagonaux et les quatre autres (dans les axes des voutains) étaient décorés de têtes d'anges dont seules deux ont été retrouvées presque intactes, tandis que les deux autres ont disparu, écrasées par le choc de la chute ou consumées par le feu. Toutefois, de nombreux fragments de chevelure ou d'ailes sont facilement repérables grâce aux restes de dorure. Les vestiges tombés au sol étaient mêlés aux débris de charpente qui se sont consumés, au plomb fondu et à l'humidité provenant des eaux d'extinction puis des eaux météoritiques. Par conséquent, les vestiges sont fortement encrassés (couleurs de plomb, suie, poussières) mais aussi particulièrement mutilés en de nombreux points (épaufrures, micro-fissures, lacunes...). Près d'une cinquantaine de fragments, de dimensions variables ont été retrouvés dans les décombres issus des 8 blocs qui constituaient l'anneau à l'origine, ce qui montre la fragmentation et les lacunes consécutives à la particulière violence de l'incendie du fait de l'important potentiel calorifique lié à la densité des bois de la flèche et de son tabouret support. Il faut souligner la disparition de la partie de l'anneau en surcroît par rapport à la voûte, probablement détruite par ces hautes températures avant même l'effondrement de la voûte. Les fragments conservés de l'anneau ne sont pas réutilisables.



Tri des vestiges de l'anneau de compression entreposés provisoirement sous les barnums



Deux des quatre angelots de l'anneau de compression

●

4. Interventions projetées

Travaux préalables en cours ou réalisés

Travaux d'urgence – sécurisation

Les voûtes ont fait l'objet d'un nettoyage et de pré-consolidations ponctuelles provisoires (très localisées) par l'extrados afin de permettre les interventions nécessaires à leur restauration dans un cadre compatible avec la sécurité des intervenants. Les parties instables, notamment les rives des zones effondrées, dont les voussoirs et les claveaux menaçaient de tomber, ont été stabilisées à l'aide de cataplasmes de mortier de plâtre et chaux fibrés et de cloutage dans les joints.

Les prestations réalisées sont les suivantes :

- L'enlèvement des vestiges de la charpente et de la couverture disparues.
- Le déblaiement et l'aspiration THE de l'extrados des voûtes
- La consolidation provisoire de la périphérie des voutes effondrées afin de neutraliser les risques de chute de voussoirs et d'assurer la sécurité des personnes lors du montage des échafaudages et la mise sur cintre des voûtes ;
- Les échafaudages intérieurs donnant accès aux surfaces d'intrados ;
- La mise sur cintre des voûtes fragilisées, arcs et des voutains ;
- Le démontage des parties instables : rive des voutains effondrés, pieds de gerbe de la croisée
- La confortation du voutain central de la travée 24-25 de la nef par renforcement :
 - de l'intrados par purge des joints défectueux et mise en place simultanée de coins en plastique pour garder la voûte en pression, puis refichage au mortier de Chaux NHL3.5 et sable 04 grossier.
 - de l'extrados par purge des joints défectueux et des parties déplaquées des voutains, nettoyage, aspiration et refichage (dans un premier temps des joints ouverts, puis ensuite des autres joints) à la chaux NHL 3.5 et sable 0-4.

DCE – Dessalement des voûtes (Mai 2021)

Une intervention conservatoire de dessalement des parements dégradés par la cristallisation de sels solubles aura été réalisée sur les intrados des mêmes voûtes du vaisseau, concernées par la présente opération (et des zones de murs gouttereaux au contact de celles-ci). L'objectif de cette intervention est de stabiliser la dégradation active des parements affectés par des dégradations alvéolaires progressive, qui perdent leur nu de taille et dont les pertes de matière et dépôts de poussière de pierre tombant sur les planchers d'échafaudage montrent le caractère évolutif. Cette intervention comporte une aspiration THE et l'élimination de la couche de gypse superficielle par brossage des parties pulvérulentes de l'épiderme à l'intrados des voûtes puis la suppression de l'ensemble des joints superficiels des arcs et voutains et enfin l'application de compresses à base de Kaolin et d'agréats légers à base d'amorphes de verre (type perlite), ces dernières étant renouvelées autant que de besoin.

Restauration et consolidation des voûtes existantes

Pour rappel, l'ensemble des cintres seront mis à disposition à la charge du lot n° 07_{TP} – Charpente bois. Le lot n°4_{TP} Maçonnerie/Pierre de taille aura par conséquent à sa charge les compléments de cerces, couchis, etc...

L'arc diagonal déformé de la travée 23a du bras nord

Dans la mesure du possible, la déformation de cet arc qui constitue un point de faiblesse, sera résorbée par dépose des éléments fracturés, réparation par greffe ou remplacement ponctuel de claveaux si nécessaire (désordre affectant la résistance du(des) claveau(x), vérinage, fichage, rejointoiement...)

Les intrados

Un démontage/remontage des zones instables sera effectué en veillant à ce que tous les moyens d'étaisements complémentaires soient mis en œuvre pour déposer les zones de voutains affaissées en sécurité.

Chaque zone à déposer, préconsolidée ou non, fera préalablement l'objet d'un calepin détaillé, compris la numérotation systématique des pierres de la zone concernée. Pour les zones préconsolidées, les joints seront rouverts progressivement par sciotage et l'intervention réalisée en parallèle avec celle de l'extrados. Les zones instables seront préalablement étayées par des couchis discontinus permettant d'intervenir sur les joints.

Après dépose, un examen et un tri des pierres sera réalisé pour réutiliser les pierres saines et évacuer en décharge les pierres altérées qui seront refaites à l'identique. Néanmoins, l'objectif de la maîtrise d'œuvre reste la conservation maximale des pierres existantes. Seules les pierres trop faibles dont le réemploi pourrait présenter un risque structurel seront remplacées. Les voussoirs des zones préconsolidées au mortier de plâtre ou de plâtre et chaux, et considérés comme remployables, feront l'objet d'un dessalement préalablement à leur remise en œuvre.

Les joints de l'intrados seront purgés à 100% (purgé profonde) jusqu'aux parties saines afin de retirer les joints hydrofuges et joints épais des restaurations successives du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle. Ce travail se fera par partie pour ne pas fragiliser la stabilité des voûtes et la réfection du jointoiement sera effectuée au mortier de chaux NHL 2,5 ou de chaux aérienne, selon les modèles existant (motifs de rubans à réaliser au fer le cas échéant).

Le remontage des voutains affaissés sera réalisé en utilisant une cerce mobile et devra respecter la géométrie et les doubles-courbures d'origine ainsi que le calepin préétabli de façon à obtenir un raccord parfait avec les parties restées en place. Les voussoirs ont des formes et des dimensions différenciées, allant du parallélépipède au trapèze et parfois à des formes fuselées, ces différences résultant de la conception des voutains en coques selon des profils croisé à double-courbure.

Après remontage et stabilisation des voutains et des arcs fragilisés, un nettoyage complémentaire des parements de l'intrados par latex ou compresse (méthode la plus adaptée à confirmer selon la nature et l'état du support) sera réalisé.

Enfin, une eau forte d'harmonisation sera appliquée à l'ensemble des surfaces de l'intrados.

Les extrados

Le plomb fondu accumulé au-dessus des arcs doubleaux de la croisée du transept (fonte des couvertures en plomb du grand comble et de la flèche) sera soigneusement déposé pour permettre le retrait des vestiges de bois du tabouret. La dépose du plomb se limitera au strict nécessaire et le protocole sera identique à celui réalisé lors de la dépose du plomb des pieds de gerbe de la croisée, c'est-à-dire un découpage soigné par partie par action mécanique sans vibration et sans altération de la surface de la pierre (emploi d'une tronçonneuse afin d'obtenir des copeaux et limiter la

dispersion de fines poussières de plomb). Le poids du plomb impose ce découpage, et l'attention des entreprises est attirée sur la difficulté de cette intervention du fait du risque d'adhérence du plomb à l'extrados des voûtes.

Aussi, l'ensemble des vestiges encore en place de chape de plâtre du XIX^{ème} siècle seront purgés systématiquement, ainsi que les parties de voussoirs déplaquées, chaque voussoir étant préalablement sonné, ainsi que l'intégralité des joints au minimum sur 2 à 3 cm de profondeur et jusqu'au mortier sain.

Pour les zones préconsolidées, en périphérie des zones effondrées et dans certaines zones d'affaissement, la dépose de la chape sera réalisée sans ébranler la voute, par sciottage progressif, désolidarisation de la chape de l'extrados des voussoirs et dépose progressive et par partie des cloutages en fibre ou en laiton, déjointoiement, déscollement et dépose des voussoirs. Des étalements ponctuels, par couchis seront mis en place en tant que de besoin.

Consolidation des voussoirs fracturés

Les pierres fracturées en profondeur ou fissurées mais considérées comme conservables seront brochées à l'aide d'aiguilles de fibre de verre scellées à la résine après forage sans percussion des parties dissociées. Cette consolidation sera complétée par une injection de micromortier de type LEDAN dans les microfissures après rejointoiement préalable.

Arc de décharge de la nef

La raison pour laquelle Viollet-le-Duc a construit cet arc n'est pas connue, et son rôle dans la stabilité de la croisée et des soubassements de la charpente de la flèche même bien qu'il n'apparaisse pas indispensable, n'est pas certain. Il est donc raisonnable dans ce contexte de maintenir l'équilibre des éléments en place plutôt que de risquer de remettre en cause sa stabilité. Pour cela, l'objectif est de le consolider afin de maintenir cet élément en place. La réponse appropriée est l'utilisation de la méthodologie de consolidation testée pour les parements du mur bahut, c'est-à-dire la reconnexion claveau par claveau des éléments désolidarisés par le feu mais encore en place par la mise en œuvre de goujons de fibre de verre scellés à la résine, et d'injections de micromortier dans les fractures.

Le programme de travaux est le suivant :

- Dépoussiérage et aspiration de l'arc
- Préconsolidation des rives des zones fracturées par réalisations de solins de mortier de chaux
- Forage et mise en place de goujons de fibre de verre scellés à la résine époxydique
- Forage et injection de micromortier thixotropique de type LEDAN TA2
- Bouchement des trous en surface au mortier de chaux
- Purge des joints pulvérulents, non adhérents et réfection au mortier de chaux ; calages pour éviter tout risque de déformation
- Consolidation de l'extrados de la voute par suppression des fragments désolidarisés et mise en œuvre de la chape de chaux structurelle en continuité de celle de la voute

Ces interventions doivent être réalisées par partie afin d'éviter tout désordre et tout affaiblissement de la structure de l'arc de décharge. Les zones de contact entre l'arc de décharge et la voute seront purgées dans la mesure du possible, afin de lui rendre son statut autonome et libérer la voute et l'arc doubleau sur lesquels reposent des surcharges pour lesquelles ils n'ont pas été conçus.

Reconstruction des voûtes effondrées

Les voûtes ou parties de voûtes effondrées seront reconstruites à l'identique en respectant le calepin et la géométrie préexistants à l'effondrement (conception à double-courbure). Les claveaux de la croisée à remployer (environ 50) seront dépoussiérés à la brosse douce (et aspiration THE) puis soigneusement nettoyés dans un bain d'eau déminéralisée (Complément de nettoyage à réaliser à la gomme Wishab si nécessaire).

Les voussoirs des franges des voutes déformées (voute du bras nord) mais encore en place et consolidées provisoirement, seront déposés selon le même protocole que les zones affaissées et préconsolidées. Après étalement par couchis, et suppression des engobes de plâtre/plâtre et chaux, les voussoirs seront calepinés, puis déposés par sciottage des joints, suppression du cloutage, calage, puis triés selon leur état de conservation pour être remployés, enfin dessalés/nettoyés en bac.

Les claveaux des arcs manquants (environ 95) seront restitués en pierre neuve de même nature, qualités physico-chimique et d'aspect que les pierres existantes. Il en sera de même des voussoirs en veillant au respect du gabarit, de la géométrie, de la quantité et de l'aspect de taille (finition à l'outils) selon l'état existant avant incendie.

Les blocs de l'anneau de compression seront également refaits en totalité en pierre neuve, y compris la sculpture des quatre têtes d'anges à l'identique (par le lot 05_{TP} - Sculpture neuve). Les lits de briques permettant de rehausser le niveau des cloches seront également restitués mais en tenant compte de l'emprise de l'anneau. La restitution du dispositif campanaire n'est pas prévue dans le cadre de cette opération.

Ensemble des voûtes

L'extrados de l'ensemble des voûtes conservées sera renforcé par la mise en œuvre d'une chape de mortier de chaux fibré d'une épaisseur moyenne de 3cm. L'objectif de cette chape sera de rétablir la capacité structurelle des voûtes avant l'incendie, réduites par les pertes d'épaisseur déplaquées. Dans les zones de voutains fragilisées, affaissées et à restaurer, la chape sera renforcée au moyen d'un filet armé noyé dans son épaisseur. Il en sera de même des zones de liaison entre voutes conservées et voutes reconstruites. L'épaisseur de 3cm de la chape s'entend au-dessus de l'extrados des voutes, et ne comprend pas les parties de la chape qui s'intégreront à la partie superficielle préalablement refouillée des joints, dont la hauteur sera de 3cm supplémentaires au minimum.

Les voussoirs particulièrement fragilisés (pierres délaminées en profondeur identifiées par l'analyse radar), pourront être consolidés et reliés à la chape par des connecteurs en fibre de verre en forme de « L » scellés avec de la résine, qui seront mis en place localement, dans la mesure où leur mise en œuvre ne risque pas de dégrader l'état des pierres.

Au préalable, une aspiration THE permettra d'assainir le support pour éviter qu'une couche de poussière interstitielle n'interfère entre la chape et les pierres. Le mortier préformulé de la chape de chaux NHL 3,5 doit permettre l'intégration d'un filet d'armature en fibres de verre.

Chape structurelle

Il apparaît opportun que le mortier constituant la chape donne des garanties de régularité. L'utilisation de mortiers préformulés, prêts à l'emploi, est demandée aux entreprises, plutôt que des mortiers à mettre en œuvre sur le site en associant des chaux et des sables différents et dans des proportions difficiles à contrôler, ce qui selon les opérateurs donnerait probablement des résultats plus ou moins dosés et variables. Un mortier compatible avec les exigences de rapidité de séchage et de résistance est proposé à titre d'information aux entreprises, sachant que les voûtes devront être remontées et libérées de leurs supports rapidement, selon les objectifs du planning des travaux. Ce mortier répond aux exigences attendues par la maîtrise d'œuvre et fait l'objet de réflexions partagées avec le LRMH.

- **Mortier de chaux Planitop HDM Restauro de chez Mapei ou techniquement équivalent**
Mortier bi-composant NHL (chaux hydraulique naturelle /sans ciment) renforcé par des fibres, associant de l'Eco-Pouzzolane, du sable et des adjuvants spécifiques et polymères synthétiques; compatible avec le plâtre. Dans les zones particulièrement fragilisées (surface estimée à 30% de l'extrados correspondant aux arcs doubleaux et diagonaux encadrant le voutain du bras nord et renforçant des zones fragilisées et/ou affaissées) ou dans les zones de raccord entre les voûtes neuves reconstruites et celles existantes, ce mortier sera renforcé par un treillis de fibre de verre ou de basalte de type MAPEI Mapegrid G220 ou techniquement équivalent (maille 22 mm).

La composition de la chape reste encore à affiner dans le cadre d'études complémentaires en laboratoires (par le LRMH) dont les résultats seront communiqués lors de la phase préparatoire du chantier à l'entreprise titulaire. Le projet pourra donc évoluer en fonction des résultats qui seront obtenus.

Chape ignifuge

Après l'application de la chape de renforcement, la réfection d'une chape de plâtre ignifuge de 4 cm d'épaisseur en moyenne réalisée sans joints permettra de protéger les voûtes contre les incendies et de suivre l'évolution d'éventuelles déformations dans le temps, mais aussi lors de la mise en charge des voûtes lors du repli progressif des cintres. La chape de plâtre est sans incidence notable sur la masse supplémentaire apportée sur les voûtes.

Interface entre les chapes structurelle et ignifuge

Les deux chapes devront être indépendantes et séparées par une couche interstitielle de type géotextile épais, permettant de résorber les phénomènes de condensation qui pourraient se former à l'interface et favoriser des transferts de sel de la chape de plâtre à la chape de chaux. Elle permettra aussi de désolidariser le comportement des chapes en cas d'incendie.

Décors et finitions

L'ensemble des percements existants seront conservés, restaurés ou restitués (pour les voûtes à reconstruire) y compris les chainettes et capuchons pour le passage des lustres. Un système autobloquant/plaques de répartition à installer sur l'extrados et un dispositif antichute des lustres (en cours d'étude) seront proposés ultérieurement en fonction du programme d'éclairage (non encore validé).

Les décors de peinture des voutes seront restitués à l'identique à la charge du lot n°16_{TP} Peinture murale-dorure. L'oculus sera peint avec pigments et liants acryliques en deux couches et doré à la

mixture selon l'état existant avant incendie. La trappe en bois calfeutrant l'oculus sera coupe-feu¹⁰ et sera restituée en double cours de planches et raidisseurs en chêne avec ferrures et système d'ouverture manuel (à la charge du lot 07 Charpente bois). La vierge à l'enfant peinte sur toile en sous-face sera restituée en atelier puis marouflée sur contre-plaqué marine, y compris enduit de préparation.

Choix des mortiers (de pose et de rejointoiement)

Après avoir interrogé différents fabricants¹¹ dans l'objectif de déterminer les mortiers les plus adaptés aux différentes opérations concernant les voûtes, un certain nombre de critères de sélection ont été identifiés suivant l'état d'altération des voûtes.

Voutes effondrées à reconstruire

La reconstruction des arcs diagonaux de la croisée et des voutains effondrés nécessite un séchage et une résistance à la compression rapides. Pour cela, un **mortier de pose préformulé** chaux/métakaolin de chez Saint-Astier ou techniquement équivalent pour les claveaux peut s'avérer opportun et permettre ainsi une cohérence avec la chape de renforcement qui sera utilisée à l'extrados des voutains reconstruits. Cette solution consiste en un mortier constitué (données en % massique) :

- D'un liant binaire NHL 3,5 (70 à 80 %), métakaolin (20 à 30%),
- D'une charge minérale composée d'un sable siliceux 0/1,5 mm.
- D'un rétenteur d'eau en adjuvantation (cellulose modifiée < 0,1 %) pour limiter la déshydratation précoce du mortier.

Cette formulation de mortier répond au critère souhaité d'au moins 80% des résistances mécaniques acquises à 28 jours compte tenu des délais inhérents du chantier.

Extrados

En ce qui concerne la reconstitution des joints dégradés en profondeur depuis l'extrados, il est préconisé d'utiliser, plutôt qu'un mortier préformulé, un **mortier reprenant les caractéristiques du mortier de joint d'origine (chaux aérienne, granulométrie des sables (roulés de Seine))**, jusqu'à -3cm de la surface, la suite étant constituée par le mortier de la chape structurelle. Si cette intervention s'avère trop résiduelle, il sera préféré l'utilisation du mortier de la chape structurelle.

Intrados

Le rejointoiement à l'intrados sera réalisé avec un **mortier à réaliser avec de la chaux aérienne naturelle ou NHL 2,5** légèrement hydraulique associée à du sable de Seine dont la granulométrie sera à définir.

Approvisionnement en pierre

Les natures des pierres mises en œuvre dans la cathédrale sont connues par les analyses effectuées par carottage (ainsi que par les attachements figurés produits lors de la restauration de Viollet-le-Duc). Ces dernières ont permis, outre la caractérisation des résistances mécaniques des pierres, de

¹⁰ Le temps de résistance au feu sera communiqué pendant le mois de préparation suivant les études qui auront été menées et validées.

¹¹ Mapei, Saint-Astier, Lafarge (qui arrête la production de ses mortiers de chaux)

renseigner sur les diverses natures de pierres mises en œuvre lors de la construction et des restaurations/reconstructions successives.

Les carrières ayant servi tant à la construction de la cathédrale à l'époque médiévale, qu'à sa restauration au XVIII^{ème} siècle par Boffrand, et au XIX^{ème} siècle par Viollet-le-Duc ne sont pour la plupart plus en activité. La restauration de la cathédrale nécessitant un volume important de pierre neuve, les propriétés physico-chimiques des pierres de référence ont été identifiées pour sélectionner des pierres de substitution (carrières actuellement en exploitation) dont les caractéristiques sont proches ou identiques à celles en œuvre. Une mission confiée au BRGM (dont le rapport sera fourni au titulaire du lot maçonnerie) a permis de recenser les carrières susceptibles d'être compatibles avec les maçonneries en œuvre, tant d'un point de vue esthétique, mécanique ou en termes de disponibilité correspondant aux besoins du chantier.

Pour les voûtes, les pierres similaires qui semblent le mieux correspondre aux maçonneries en place sont les suivantes :

- Voûte de croisée :
 - Claveaux d'arcs : Pierre calcaire de type H4 dure de la Croix-Huyart
 - Anneau de compression : Saint-Maximin : Liais ½ fin
- Voussoirs : Saint-Maximin (pierre de vergelé en roche fine ou roche franche fine, porosité 20-30%)

•

5. Les moyens d'accès, supports de reconstruction et protections diverses

Les moyens d'accès

L'ensemble des échafaudages de pieds à l'intérieur du vaisseau central (pour la restauration des voûtes et le nettoyage des parements verticaux) et de la croisée (pour la reconstruction de la voûte effondrée et de la flèche) seront mis à disposition des entreprises. Chaque partie de ces échafaudages sera conçue de façon à recouvrir et donner accès à la totalité de l'intrados des voûtes. Aussi, l'ensemble des ouvrages connexes avec les agrès nécessaires (sapines, escaliers, planchers complémentaires sous voûtes, etc...) seront mis à disposition des différents lots.

Les moyens d'accès utiles à la restauration des voûtes sont :

- Un échafaudage de pied aux 4 angles de la croisée sur le plancher de l'échafaudage de reconstruction de la croisée après nettoyage et consolidation des reins de voûtes des pieds de gerbe ;
- Des échafaudages de pied le long des murs gouttereaux jusqu'au niveau de la naissance des voûtes ;
- Des platelages d'approche adaptés à la géométrie des voûtes et des arcs, permettant de travailler à hauteur pour la consolidation et/ou la reconstruction des arcs et des voûtes ;
- Des sapines et monte-personnes/matériaux pour acheminer les personnels de chantier et approvisionner les matériels, matériaux, etc...

Les étaielement - cintres

Une partie des voûtes sera déjà mise sur cintres (les voûtes du bras Sud du transept ne nécessitent pas d'être étayées) à l'issue des travaux de sécurisation de l'édifice afin de sécuriser l'accès aux intrados et de préparer la reconstruction des parties effondrées.

Le cintrage de la voûte de la croisée sera par contre monté durant la phase de reconstruction (après la sécurisation) par le *lot n°7 charpente bois* et devra tenir compte des contraintes et emprises nécessaires liées au plancher de travail et à l'échafaudage de pied sur lesquels il prendra appui. Il se composera :

- de veaux moisés à disposer sous chaque arc (arcs doubleaux et arcs diagonaux) ;
- de pannes intermédiaires et de cerces qui servent à étayer les voutains et relient les cintres entre eux (*Nota : les cerces seront usinées suivant la courbure spécifique de chaque voûtes*)
- d'un chevêtre au droit des têtes d'anges sculptées de l'anneau de compression, pour la reprise des cerces destinées aux lignes de clé des voutains, tout en permettant un bon report des charges dans les appuis du cintre ;
- d'un dispositif complémentaire d'étaielement pour permettre la reconstruction de l'anneau de compression (sorte de coffrage qui laissera le passage libre de l'oculus pour les besoins de la reconstruction de la flèche ;



Cintres du rond-point du chœur

- de ferrures servant de raidisseurs ou d'assemblages boulonnés pour maintenir l'ensemble des pièces de bois entre elles.

Des couchis, placés avec du jeu entre les cintres et les arcs des voûtes, serviront de calage et seront non jointifs pour faciliter leur insertion sous les surfaces et pour permettre la surveillance de l'intrados des parties saines. Les couchis seront également utilisés ponctuellement dans le cas de déposes/reposes ponctuels des voutains fragilisés encore en place.

Les cerces mobiles

La reconstruction des voutains sera réalisée à l'aide de **cerces mobiles** permettant le montage des rangs de voussoirs à hauteur d'homme et le contrôle simultané de la qualité de l'ouvrage à l'intrados et à l'extrados, notamment les calages et le jointoiement de finition à mesure de l'avancement. Cette technique permet d'une part d'écarter majoritairement le recours à un coffrage en couchis et mortier qui ne pourrait garantir de résultat pour les finitions de l'intrados avant dépose de ce dernier, et imposerait par conséquent de nombreuses reprises de l'intrados après le décoffrage. D'autre part, la réalisation d'un coffrage nécessiterait un temps important, la solution du montage à l'aide de cerces mobiles permettant, par contre, d'engendrer un gain de temps. La reconstruction des lits de voussoirs à l'aide de coffrage sera donc limitée aux zones sommitales des voutains (ligne de clé et deux ou trois lits adjacents de part et d'autre) zone où la courbure du voutain est proche de l'horizontale, ce qui lui confère une stabilité plus précaire.



Construction d'une voûte à la cerce ¹⁰

Les protections

Les entreprises devront mettre en place toutes les protections nécessaires à la conservation des ouvrages fragiles (moulurés et sculptés) non concernés par l'intervention : élévations des murs gouttereaux, chapiteaux... Avant tout démarrage du chantier, tous les moyens nécessaires pour protéger les clés de voûtes, les éléments de décors moulurés ou sculptés et les vitraux restés en place (roses des bras du transept) devront être mis en œuvre.

Protection provisoire des extrados contre les eaux pluviales

Sur l'ensemble des extrados des voûtes du Transept ainsi que des travées adjacentes côté Nef et côté Chœur, un dispositif provisoire étanche et souple pour la mise hors d'eau et la collecte des eaux pluviales sera installé à l'avancement des travaux (après restauration des intrados et extrados des voûtes) et restera en place jusqu'à l'achèvement des travaux de reconstruction des charpentes et couvertures. Cette bâche sera tendue et agrafée sur des tasseaux de bois courbes permettant de créer un espace interstitiel entre la bâche et la voûte, permettant la ventilation du parement grâce à la création d'ouïes qui seront uniformément réparties sur la surface de la bâche. La mise en œuvre par forage à travers le mur bahut d'exutoires en cuivre de diamètre 60mm en pied de noue de part et d'autre des têtes d'arcs-boutants, des contreforts et des angles de la croisée permettra de rejeter

¹² FROIDEVAUX Yves-Marie, *Techniques de l'architecture ancienne, construction et restauration*, Ed. Pierre Mardaga, Bruxelles, (1985), p.33.



les eaux de pluie et d'optimiser la ventilation. Ces derniers seront utilisés après les travaux pour le rejet des eaux de brumisation des combles en cas d'alerte incendie.

Une étanchéité souple disposée au droit des échafaudages suspendus (avec une légère pente pour le ruissellement de l'eau) permettra de répondre aux problèmes d'étanchéité au contact des pignons lorsque les bacs aciers des bras du transept seront progressivement déposés. Cette prestation sera à la charge de l'entreprise titulaire des échafaudages suspendus positionnés dans le cadre des travaux de sécurisation. L'entreprise titulaire du lot 04TP devra donc se coordonner avec cette dernière à l'avancement du chantier pour prendre en compte les interfaces d'étanchéité dans les zones concernées et se raccorder aux ouvrages mis en œuvre au cours de la phase de sécurisation.

Protection des arcs reconstruits de la voûte de la croisée

Afin de répondre aux objectifs de délai de réalisation de cette opération, la reconstruction des arcs diagonaux et de l'oculus de la voûte de la croisée est envisagée dès la mise en place des cintres, avant la construction du tabouret de la flèche. Par conséquent, dans l'attente d'assurer une mise hors d'eau complète au-dessus de la voûte, il sera envisagé la mise en place d'une protection provisoire, dès l'achèvement de la pose des arcs (à la charge de l'entreprise en charge du lot 04_{TP}-Maçonnerie – Pierre de taille). Le dispositif de protection étanche sera installé sur l'extrados des arcs diagonaux et de l'anneau de compression, avec retombées verticales sur les jouées de ces derniers et des cintres. Des tasseaux de bois ou matériaux rigides inertes seront préalablement mis en place sur l'extrados des arcs afin d'assurer la ventilation entre la pierre et la protection étanche. Un système de récupération des eaux de pluie complètera le dispositif avec évacuation par les baies hautes du vaisseau principal.

• • •

3

La restauration des murs bahuts et du chemin de ronde des bras de transept et des travées nef et chœur adjacentes à la croisée du transept, y compris les appuis de la flèche



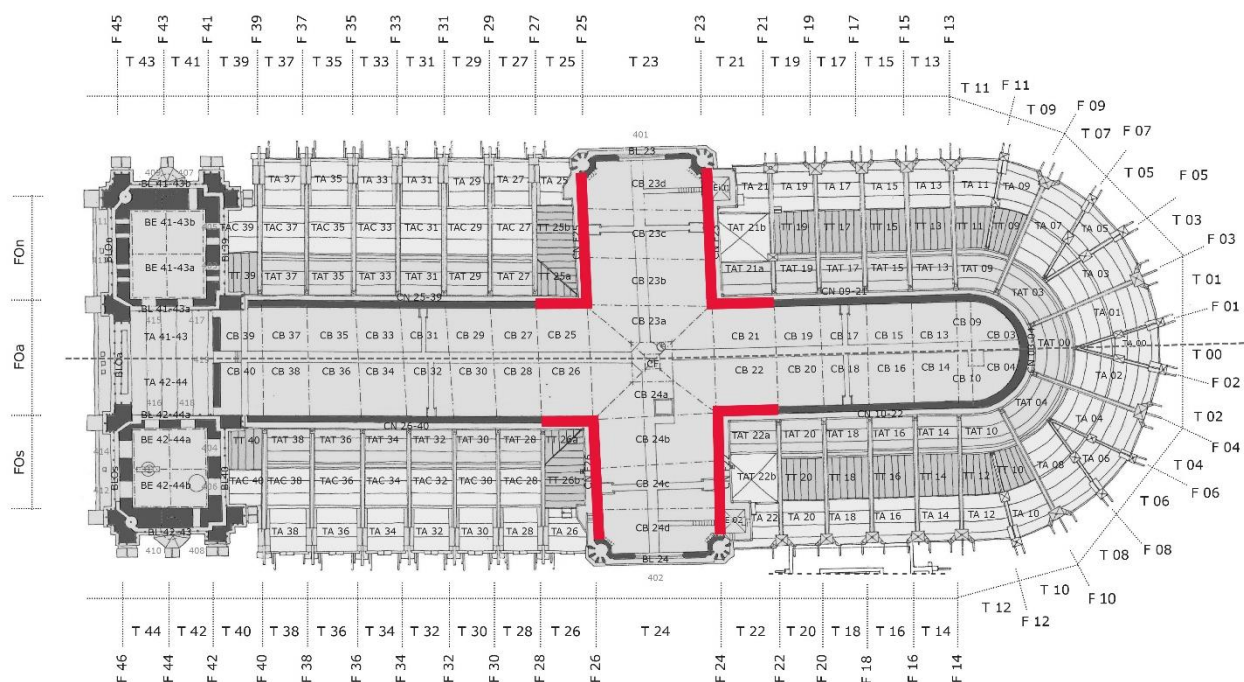
- Définition des limites de la présente opération ;
- Description de l'ouvrage ;
- Synthèse de l'état sanitaire ;
- Interventions projetées ;
- Moyens d'accès et protections diverses ;



1. Définition des limites de la présente opération

Sont concernés :

- Les murs-bahuts de la croisée du transept et les appuis de la flèche*
- Les murs bahuts des bras du transept Nord et Sud*
- Les murs bahuts des premières travées du chœur et de la nef près de la Croisée*



Zones concernées par l'opération

2. Description de l'ouvrage

Dernier élément de l'élévation des murs gouttereaux, le mur bahut de la cathédrale Notre-Dame comprend, sur l'élévation extérieure, l'ensemble des maçonneries bâties au-dessus du chéneau du chemin de ronde, sur lesquelles prend appui la charpente du grand comble.

Cette partie se compose de trois assises traversantes posées en parpaing, percées, à intervalles réguliers, par des ouvertures de plan centré. Ces dernières assurent l'éclairage et la ventilation du grand comble disparu. L'ensemble est couronné, sur toute l'épaisseur du mur, par une corniche à denticules formant arase. Un habillage en plomb du chéneau recouvre aujourd'hui l'assise inférieure.

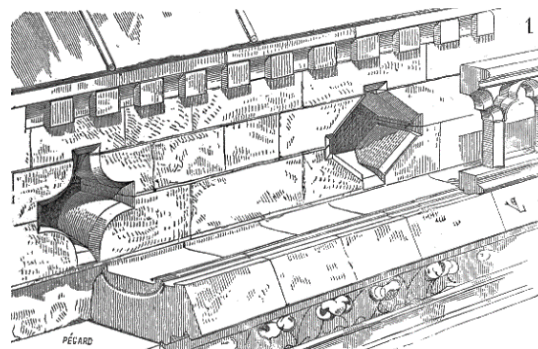
Sur l'élévation intérieure, ce mur descend jusqu'à l'extrados des voûtes et son appareillage se compose de boutisses et panneresses. En partie basse, une chape de plâtre et chaux, destinée à protéger les voûtes des incendies, se retourne sur les parements verticaux. Cette partie est composée dans le chœur de modules de pierre de plus petites dimensions qui constituent le parement d'origine avant qu'il ne soit remanié au XIII^{ème} siècle. En effet, le mur fut surélevé en cours de construction pour retrouver une symétrie avec le système constructif qui avait été utilisé pour la nef.

La dernière assise dispose de corbeaux en pierres intégrées dans la maçonnerie, qui supportent les consoles des fermes maitresses de la charpente.

Au XIX^{ème} siècle, Eugène Viollet-le-Duc engage une restauration importante de cette partie de l'édifice, à l'image du reste de la cathédrale. De nombreuses pierres du mur bahut sont, au-dessus du chéneau du grand comble, remplacées et un dispositif de confortation par adjonction de tirants métalliques est mis en œuvre.

Les pierres mises en œuvre

Les murs bahuts présentent, en œuvre, plusieurs faciès de pierres : *Pierre de Saint-Nom* (calcaire à Mesalia) et très ponctuellement, en plaquage, *Pierre de Saint-Leu* pour les restaurations du XIX^{ème} siècle et de la pierre issue des bancs francs parisiens pour les blocs les plus anciens. Ces pierres ont toutes un comportement mécanique similaire permettant de rendre la structure des murs homogène vis-à-vis des efforts et contraintes qui s'y appliquent.



Mur bahut de la cathédrale, Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle, E. Viollet-le-Duc



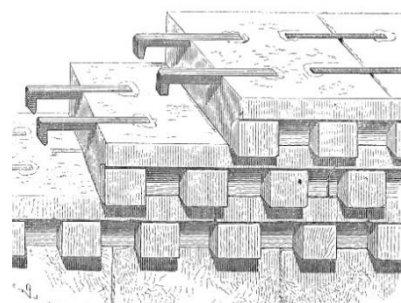
Appui des consoles sur les corbeaux des murs bahuts

Aux angles de la croisée du transept, sur le parement intérieur, des maçonneries de briques ont été, ponctuellement, mises en œuvre par Viollet-le-Duc lors de la reprise des appuis supportant la flèche afin de chemiser le mur pour rattraper les écarts d'épaisseur du nu du parement qui mêle des vieilles pierres, des roches de Laversines ou des pierres du Moulin.

Le chaînage médiéval

Avant le rehaussement des murs gouttereaux, le niveau d'arase primitif de la cathédrale correspondait à la frise à denticules ornant la partie supérieure des élévations du vaisseau principal. Une rangée de denticules sur la nef et les élévations Ouest du transept et trois rangées de denticules sur le chevet et les élévations Est du transept.

L'arase médiévale est, lors de sa mise en œuvre originale, renforcée par une double rangée de crampons coulés au plomb dans les parties courantes, et par une rangée simple au niveau du rond-point du chœur formant un chaînage qui permet de s'opposer aux poussées des charpentes exercées sur le mur. Au XIX^{ème} siècle, Viollet-le-Duc conforte la continuité du chaînage au droit du chœur avec la mise en œuvre d'une ceinture métallique extérieure reliée à une ceinture intérieure placée en pendant de la première afin de ne pas démonter la corniche à modillons médiévales altérées par l'oxydation des agrafes. Le dispositif, qui se retourne à l'extérieur sur les élévations Est du transept, ne fait pas partie des limites de l'opération et sa structure sera restituée dans le cadre du marché de travaux de restauration du chœur.



Chaînage, Cathédrale Notre-Dame de Paris, Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^{ème} au XVI^{ème} siècle, E. Viollet-le-Duc



Vue des agrafes au droit des arases du rond-point du chevet

L'analyse radar n'a pas permis de révéler la présence d'agrafes au droit de la corniche médiévale primitive car cet outil n'est pas adapté pour ce type d'investigation. L'hypothèse d'un refouillement de l'assise entre la corniche à denticules et la corniche à crochets depuis le parement extérieur pour restaurer une partie des agrafes altérées n'est donc pas exclue.

Analyse structurelle des murs bahuts

Le mur bahut endosse un double rôle structurel : d'une part, il supporte le poids et les poussées de la charpente, et, d'autre part, il constitue un support contre les efforts du vent s'exerçant sur cette dernière.

Supporter le poids de la charpente

La charpente de la cathédrale prend appui sur un double cours de sablières mis en œuvre sur l'assise supérieure des murs bahuts. Ces dispositions permettent de répartir le poids de la charpente uniformément sur ces derniers. Le mode constructif de ce mur, ainsi que ses propriétés dimensionnelles, permettent, sans difficulté, de recevoir les charges verticales de la couverture originelle de la cathédrale.

Reprendre les efforts au vent

Articulation de la charpente avec le mur bahut

A la suite du rehaussement des murs gouttereaux au XIII^{ème} siècle, le rythme des chevrons maîtres est dissociée de celui des travées, et leur implantation éloignée des têtes d'arcs-boutants (distances d'environ 2,60m dans la nef et de 4,20m dans le chœur). Les murs gouttereaux sont pourtant destinés, outre la reprise des poussées des voûtes, à absorber les efforts au vent repris par la charpente.

Afin de remédier à cette conception défavorable et de réduire les sollicitations dans la partie haute des murs gouttereaux (murs bahuts), les fermes maîtresses furent complétées par des « chaises » constituées de poteaux et d'aiseliers afin de transmettre les efforts au vent de la charpente au plus près des têtes d'arcs-boutants, et de limiter la sollicitation de la partie supérieure des murs, non conçue et trop légère pour résister à de tels efforts. Ces « chaises » prennent appui sur des corbeaux de pierre qui reportent l'essentiel de la poussée du vent sur partie basse du mur bahut.

Dans la nef, la surélévation des murs gouttereaux, moins large que le mur d'origine, a eu pour conséquence la création d'un ressaut. Les corbeaux en pierre, créés pour servir d'appui aux « chaises » des fermes principales (photographie de gauche ci-dessous), sont implantés au niveau de ce ressaut, appuyés sur la saillie de maçonnerie. Dans le chœur, le parement intérieur est continu de l'extrados des voûtes à l'arase supérieure du mur bahut et les poteaux de charpente prennent appui sur des corbeaux en pierre ancrés au niveau de la dernière assise de l'arase médiévale.

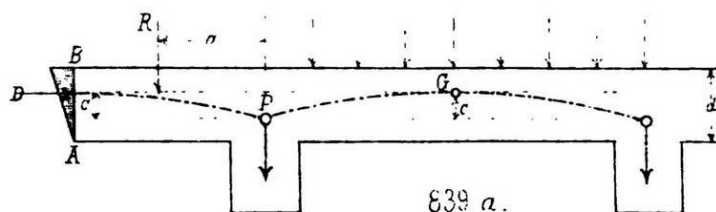


Rythme des appuis des fermes maitresses dans la nef



Rythme des appuis des fermes maitresses dans le chœur

Cette conception a permis d'exploiter les propriétés du chaînage préexistant, les appuis de charpente étant au niveau de la corniche à denticules. Les agrafes scellées au plomb qui liaisonnent les pierres fonctionnant en « plate-bande » pour redistribuer vers les arcs-boutants les poussées engendrées par les efforts au vent. Ces dispositions sont d'autant plus importantes que certains corbeaux surplombent les baies hautes, points de fragilité structurelle.



Fonctionnement en plate-bande des murs gouttereaux pour redistribution des efforts de vent des charpentes vers les contreforts (ou les arcs-boutants) – d'après Ungewitter (1901)

3. Synthèse de l'état sanitaire

Le parement des murs bahuts de la cathédrale a beaucoup souffert de l'incendie qui a ravagé la cathédrale le 15 avril 2019. Si les dégradations observables sur l'élévation extérieure étaient, pour la majorité, déjà présentes avant le sinistre, celles affectant les parements intérieurs sont pour l'essentiel la conséquence directe du drame qui toucha l'édifice.

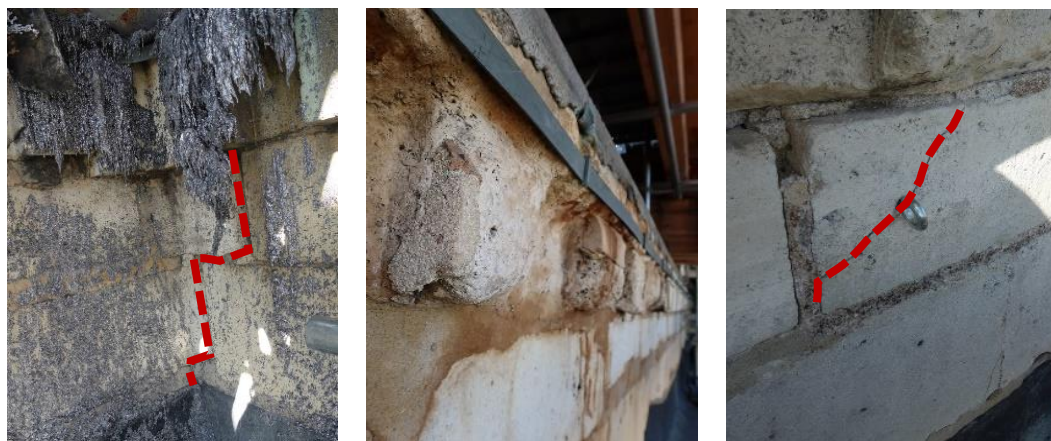
Le parement extérieur

Des désordres antérieurs à l'incendie

- **Pierres desquamées et pulvérulentes** sur le parement courant et la corniche à denticules aujourd'hui peu lisible.
- **Hétérogénéité des natures de pierres et joints** souvent néfaste, tant pour la conservation de la pierre (joints durs, comprenant du ciment, ou du plâtre, entraînant une érosion accélérée des pierres plus tendres situées à proximité direct) que du point de vue esthétique (joints très larges, dissimulant les arêtes altérées des pierres).
- **Fissuration des joints durs** anciens qui tombent par plaques et érosion des ragréages de pierre, de teinte ocre, qui recouvrent ponctuellement des surfaces relativement importantes du fait de la cristallisation de sels (présence de ragréages anciens et injections de résine derrière l'habillage en plomb de l'assise basse du chemin de ronde).
- **Coulures d'oxyde de cuivre** sur les pierres, provenant du conducteur du paratonnerre, de certaines attaches de couvertures ou encore des descentes d'eaux pluviales et **développement de croûtes noires** en sous-face des ébrasements des ouvertures ventilant le comble.

Des pathologies liées à l'incendie

- **Concrétions ou rejaillissements de plomb fondu** puis solidifié provenant des tables de plomb de la couverture disparue du grand comble sur les parements extérieurs (principalement présents sur la recharge en ciment des arases ainsi que dans les angles de la croisée)
- **Fissures** aux angles de la croisée du transept, à proximité des ancrages de l'échafaudage incendié liées aux chocs subis lors de la chute de la flèche qui ébranla l'échafaudage et les maçonneries. Fissures locales dans certains blocs liés aux travaux de sécurisation de la cathédrale lors de la pose des ancrages des bâches provisoires pour protéger les voûtes des intempéries, fixés en pleine pierre.



Désordres antérieurs au sinistre sur les différentes assises extérieures du mur bahut du chœur

Le parement intérieur

Les parements intérieurs des murs bahuts, donnant sur les combles où brula la charpente du vaisseau, ont été très affectés par les hautes températures de l'incendie.

Les désordres altèrent de façon relativement homogène l'ensemble des parements. Les pierres saillantes sur lesquelles étaient posés les éléments de charpente (« chaises » des fermes et pannes sablières), ainsi que les ébrasements des ouvertures par lesquelles s'échappèrent une partie des flammes, plus exposées aux hautes températures de combustion des bois, furent plus dégradées que le reste des parements.

La rubéfaction des parements et les éléments saillants (types corbeaux)

- **Eclatement et déplaquage de la pierre** par le choc thermique provoqué par l'incendie. La délamination est occasionnée par la création de contraintes de cisaillement induites par la dilatation différentielle à l'interface entre la pierre froide et la pierre chaude¹. Les pierres dont le parement est encore en place sonnent creux et d'après les campagnes de carottages menées pour les analyses pétrophysiques, la pierre saine se trouve en moyenne à une quinzaine de centimètres de profondeur.
 - Une **délamination superficielle** généralisée de l'ordre de 0 à 5cm, touchant près de 50% de la surface des parements
 - Des **délaminations intermédiaires**, de 5 à 10 cm de profondeur, peu nombreuses et localisées, se composent de fractures ponctuelles et d'emprise limitée, souvent obliques ou arquées pouvant aller jusqu'à 17 cm de profondeur.
 - Des **délaminations profondes** au-delà de 10 cm de profondeur, très rares (environ 5% de la surface) qui affectent principalement :
 - Les parements situés à proximité de la croisée (côté Sud et Nord du chœur et bras des transept);
 - Les parements du chœur situés au Sud du rond-point, (travée 04/06/08 sur les deux assises correspondant aux ouvertures) et de la travée 14 ;
 - Le parement de l'élévation Orientale du transept Nord.



Localisation des principales zones de délaminations profondes (en rouge)

¹ Note du LRMH



- **Déshydratation de la pierre calcaire** sous l'effet de la chaleur extrêmement importante. Transformation chromatique en profondeur ainsi que de l'épiderme qui a ponctuellement subi en surface un phénomène de calcination impliquant une transformation de la pierre en chaux (réaction de décarbonatation).



Rubéfaction et délaquage du parement interne sur les différentes assises du mur bahut

- **Dégradation du chaînage métallique** mis en œuvre au XIII^{ème} siècle. En effet, on repère ponctuellement l'éclatement de certains blocs, probablement consécutif à l'oxydation et à la dilatation des agrafes présentes dans les maçonneries. Dans les bras du transept, des retailles dans les blocs d'arase du mur, au droit des « chaises » qui soutenaient les entrails des charpentes de Viollet-le-Duc ont mis à nu ces agrafes, accélérant leur oxydation. Au droit du transept Sud, une importante fissure est visible sur l'élévation orientale du mur bahut.
- **Altération des joints et de l'enduit ignifuge** présents en partie basse des murs. Le phénomène de décarbonatation peut également y être constaté, dû à la présence de chaux dans leur composition. A plusieurs endroits, les joints sont évidés en profondeur et certaines pierres sont aujourd'hui descellées.
- **Ruptures locales et phénomène d'écaillage** en surface sur les briques du chemisage (modifications physiques et chimiques des briques). Bien que les joints aient certainement joué un rôle important dans la résistance au feu en contribuant à limiter l'introduction de ce dernier dans le mur lors du retrait des mortiers, ces derniers sont, par endroit, dégradés.



Fissure importante sur le mur Est du bras Sud du transept



Parement de briques dans les angles de la croisée du transept

Les conséquences du plomb

L'exposition à l'incendie des tables de plomb de la toiture du grand comble eu deux impacts sur les maçonneries des murs bahuts et des trois pignons de la cathédrale.

- **Dépôt d'oxyde de plomb** (massicot et litharge) manifesté par une couche verdâtre d'environ 1 à 2 μm sur la surface des parois : transformation de fines particules de plomb sous l'effet d'une réaction chimique en présence d'oxygène et sous les hautes températures de l'incendie (600°C).
- **Blanchiment** (faible épaisseur d'environ 0,5mm) d'un nombre important de pierres des parements par pseudomorphose d'une partie de l'épiderme, produit par la réaction entre l'oxyde de calcium, produit par la calcination des pierres calcaires lorsque leurs surfaces sont chauffées au-delà de 825°C par l'incendie, et les aérosols chargés de plomb libérés à ce moment-là. La composition chimique de cette strate superficielle de la pierre s'est modifiée, intégrant désormais de l'oxyde de calcium et du plomb solide en remplacement de la chaux.

Analyse pétrophysique des maçonneries en oeuvre

Des analyses pétrophysiques dans l'épaisseur du mur ont été menées sur des carottes prélevées depuis les parements intérieurs par le LRMH et le laboratoire BPE. Les 6 zones d'échantillonnage retenues par rapport aux caractéristiques physiques et aux altérations liées au feu sont représentatives de l'état général du mur bahut.² Outre la connaissance des conséquences de l'incendie sur les pierres (profondeur des altérations, ampleur thermique), cette étude a eu pour objectif d'apporter des réponses complémentaires aux analyses radar afin de déterminer la profondeur de la perte de résistance mécanique des pierres touchées par le feu, et de connaître la capacité des murs gouttereaux à supporter les charges de la future toiture, charpente et couverture.

Aussi, le programme analytique³ mené pour la phase de caractérisation pétrophysique à partir d'analyses destructives a permis d'identifier les pierres en œuvre pour sélectionner les pierres de substitution mécaniquement compatibles, selon le cahier des charges suivant :

- Détermination de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente
- Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité
- Mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores
- Détermination du module d'élasticité dynamique
- Essai de résistance à la compression



Carotte provenant du mur bahut Nord de la nef – Diamètre 80 mm.

Fissures induites de 52 mm à 102 mm de profondeur

Fissures de décompression thermique de 16 mm à 52 mm profondeur

Coloration perceptible jusqu'à 41 mm de profondeur

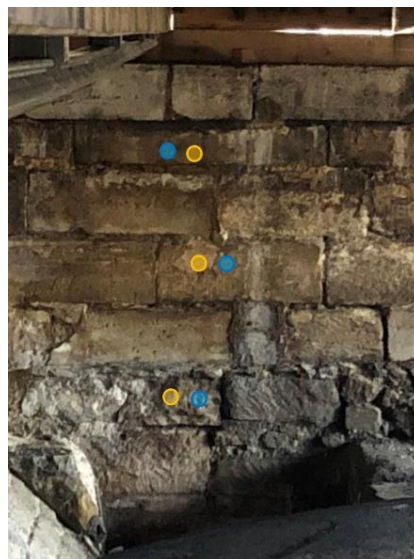
² Mur Nord de la nef (Nn) ; rond-point (ChRP) et mur Nord du chœur (Chn) ; mur Est du bras Nord du transept (TNe) et mur Ouest du bras Sud du transept (TSw) ainsi que le mur Est du bras Sud du transept (Tse).

³ Voir Logel Stéphane, Laboratoire BPE, *Diagnostic post-incendie et identification des matériaux*, Dimbsthal, 04/12/2020, p.134.

Pour chaque pierre, deux carottes prélevées parallèlement au litage stratigraphique du mur, ont été réalisées :

- Une première de diamètre de 35 à 50 mm et d'une longueur de 24 à 30 cm
- une seconde de 80 mm de diamètre sur une longueur d'environ 60 cm.

Bien que l'on observe visuellement des variations chromatiques dans l'épaisseur superficielle des carottes prélevées, les investigations menées en microscopie électronique à balayage en coupe, n'indiquent pas de modifications majeures des morphologies initiales des pierres au-delà d'une profondeur moyenne estimée à 45 mm. Les minéraux semblent alors exempts de dégradation et peu de fissurations matricielles sont observées. La morphologie initiale semble par conséquent avoir été conservée de manière satisfaisante au-delà de cette limite .



Localisation des échantillons prélevés sur le mur Ouest du bras Sud du transept

•

4. Interventions projetées

Le diagnostic précédemment mené a permis de constater que les murs gouttereaux ne présentent pas de désordres structurels majeurs mais que toutefois, l'impact du feu a été le plus grand facteur de dégradation observé. En effet, bien que le déplaçage des parements intérieurs causé par les chocs thermiques affecte environ 10 à 15 cm de l'épaisseur des murs, leurs capacités portantes ne sont pas remises en cause⁴. La consolidation et la restauration de l'épiderme dégradé des murs bahuts et des compléments structurels réalisés par Viollet-le Duc reste cependant nécessaire avant d'envisager la reconstruction des charpentes et de la flèche de la cathédrale qui y prennent appui.

Cet état de fait permet d'envisager une intervention conservatoire de l'aspect des parements issus de l'exposition aux températures de l'incendie. Un protocole⁵ a donc été mis au point afin de consolider et de préserver l'aspect des parements intérieurs comme témoignage de l'incendie et pour conserver le plus possible la matière d'origine et limiter les interventions structurelles à la reprise des charges et des poussées transmises par la charpente. Seules seront remplacées les pierres dont le mauvais état de conservation engage la stabilité de l'ouvrage, ou qui sont nécessaires à la reconstruction de la charpente. La restauration de l'épiderme des pierres n'a pas pour objectif le rétablissement des propriétés structurelles et mécaniques initiales des murs bahut, mais plutôt de conserver et à maintenir la matière originelle même affectée par les traces de l'incendie. En effet la restitution du nu de taille initial impliquerait soit de reconstruire l'essentiel du parement intérieur, soit de lui substituer un enduit qui masquerait tout l'appareil de pierre encore visible malgré les dégradations du feu.

Les travaux porteront sur les parements intérieurs et extérieurs, y compris le chemin de ronde et la frise à crochets et se décomposeront en quatre étapes :

- Restitution des angles de la croisée en pierre neuve ;
- Pré-consolidation des parements instables intérieurs ;
- Remplacement de l'assise d'arase en intégralité ;
- Restauration des parements extérieurs et du chemin de ronde.

Travaux préalables, en cours ou réalisés

Un certain nombre d'interventions ont été réalisées dans le cadre du chantier de sécurisation du monument afin de contrôler l'évolution des désordres. Parmi les interventions intérieures relatives aux murs bahuts, une purge des parements instables susceptibles de présenter un risque pour la sécurité des personnes intervenants à leur contact, ou encore des opérations de dépoussiérage de

⁴ *Op. Cit.* Fantin Mathias, *Etude statique des murs bahuts*, p.14-15. « Pour rappel, les modélisations ont montré que les charpentes transmettaient probablement 50 % des efforts de vent en tête des murs bahuts, et les autres 50 % en pied des consoles de charpente. Ces valeurs sont indicatives mais donnent une appréciation des phénomènes en jeu. Par conséquent, dans le cadre de la reconstruction des charpentes, il conviendra de ne pas surévaluer la résistance et la rigidité des murs bahuts en respectant rigoureusement cette répartition des efforts ou même en l'optimisant en transmettant plus de charges en bas du mur. »

⁵ Mertz Jean-Didier, *Complément de protocole de consolidation pour le traitement en conservation des parements intérieurs endommagés des murs bahuts*, Paris, décembre 2020, p.1.

l'ensemble des parements associé à une aspiration THE/HEPA visant à abaisser le taux de plomb émissif sur les parements ont été réalisées.

Aussi, à l'extérieur, des déposes ponctuelles des garde-corps ou de l'habillage en plomb recouvrant la première assise du parement ont permis d'établir le premier diagnostic. Tous les ouvrages techniques (paratonnerre) et de récupération des eaux pluviales du grand comble (descente EP, fixations diverses, plomb cristallisé) seront déposés afin de dégager tous les parements de pierre et d'entreprendre une dépollution complète de la zone d'intervention.

Enfin, des travaux sur les parements intérieurs ont fait l'objet d'un chantier test sur deux travées (T16 du chœur et T34 de la nef) afin d'élaborer un protocole de consolidation fiable des parements et une réponse architecturale-esthétique de qualité.

Travaux à réaliser

Travaux de restauration sur les parements intérieurs

Appuis de la charpente de la flèche

La restauration traitera en priorité les appuis de la flèche. Les angles de la croisée seront **intégralement reconstruits en pierre neuve** en totalité et **montés au mortier de chaux** selon le calepin de restauration de Viollet-le-Duc, après restauration et consolidation de l'extrados des pieds de gerbe.

En premier lieu, les parements de briques mis en œuvre par Viollet-le-Duc et les pierres d'angle dégradées seront déposés sur toute la hauteur et sur une longueur variable de part et d'autre de l'angle chanfreiné selon l'emprise horizontale illustrée dans les plans de la maîtrise d'œuvre. La pré-consolidation

préalable et l'étalement/blindage des parements adjacents seront mis en œuvre préalablement afin d'assurer la stabilité du parement au moment des remplacements de pierres.

En parallèle, le relevé de l'appareil de pierre d'origine (médiéval) dégagé en arrière-plan sera réalisé afin de le reconduire si possible dans la reconstitution du parement neuf. Les pierres saines qui seront identifiées seront conservées tandis que les pierres traversantes seront si nécessaire intégralement remplacées par des pierres neuves, ainsi que les parements de brique mis en œuvre par Viollet-le-Duc.



Avant/après consolidation (T16 du chœur)

Massifs en maçonnerie support de la charpente de la flèche

Les massifs en maçonnerie de pierre de taille et de moellons équarris qui supportaient les départs du tabouret de la flèche, et qui ont été mis au jour par le démontage et de la consolidation des assises supérieures des pieds de gerbe seront restaurés et consolidés :



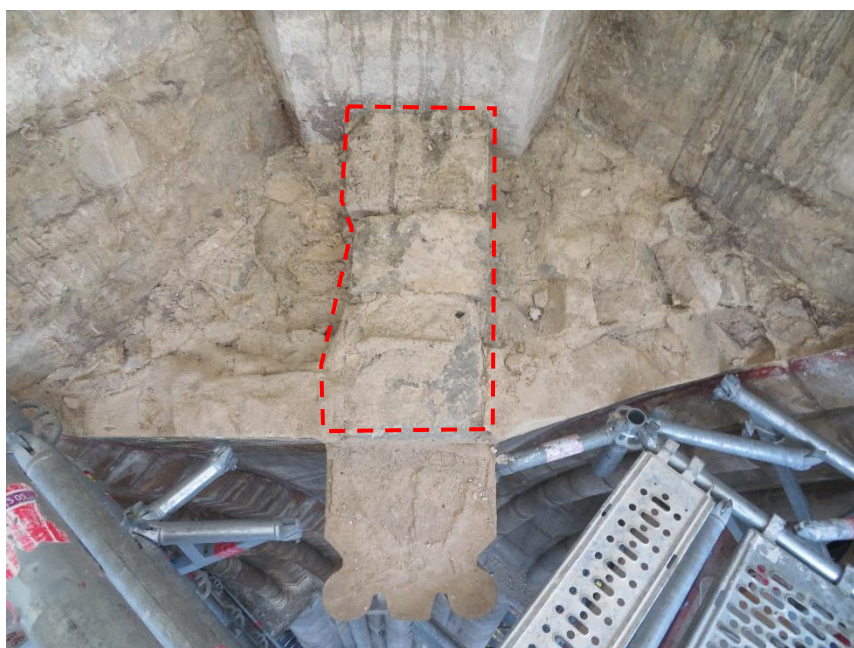
Massif du pieds de gerbe Nord-Ouest

- Dépose et réfection des plaques d'arase en plomb et fer et repose (à la charge du lot n°07 Charpente bois).
- Refouillement des joints dégradés et pulvérulents, dessalement des parements (2 cycles), injections de micromortier puis rejointoiement.

Murs-diaphragme clavés adossés aux arcs diagonaux et maçonnerie de blocage

Les murs diaphragme en pierre de taille (XIX^{ème} siècle / Viollet-le-Duc) qui bloquent les reins des arcs diagonaux seront assainis (sels solubles accumulés par les eaux d'extinction de l'incendie et les eaux météoriques) et consolidés et complétés pour les parties qui ont été démontées en même temps que les claveaux désolidarisés des arcs lors de la sécurisation des pieds de gerbe :

- refouillement des joints dégradés et pulvérulents, dessalement des parements (2 cycles), injections de micromortier Ledan, complément jusqu'à la hauteur d'arase des arcs doubleaux, rejointoiement.



Mur diaphragme clavé des arcs diagonaux

Murs-diaphragme adossés aux arcs doubleaux

Les murs diaphragme en pierre de taille (XIX^{ème} siècle / Viollet le Duc pour l'arc doubleau de la nef et l'arc de décharge créé au-dessus) en moellons assisés (médiévaux ou XVIII^{ème} pour le chœur et les bras du transept) qui bloquent les reins des arcs doubleaux, seront assainis et consolidés :

- refouillement des joints dégradés et pulvérulents, dessalement des parements (2 cycles), injections de micromortier Ledan, consolidation de l'arase, rejointoiement.



Mur-diaphragme adossé à l'arc doubleau de la nef

Pieds de gerbe Nord-Ouest

Maçonnerie de doublage à la base du mur bahut de la nef et appuis de la charpente du haut comble

Les maçonneries de doublage en moellons construites à la base du mur bahut et posées sur l'extrados des voûtes sont interrompues au droit des reprises de parement de l'angle par Viollet-le-Duc, hormis les dégradations complémentaires que l'on peut attribuer à l'incendie. Elles seront, et les parties lacunaires, reconstruites sur la base des dispositions existantes :

- Consolidation des pierres apparentes selon le principe adopté pour les parements du mur bahut : solins de rive au droit des vestiges de parement déplaqués, forages, injection de micromortier Ledan, pose d'aiguilles en fibre de verre scellées à la résine, dépose ponctuelle des moellons trop dégradés, instables, réfection de joints et compléments, patine d'harmonisation
- Restitution de l'enduit en plâtre à la base de la maçonnerie en continuité de la chape de plâtre réalisée à l'extrados de la voûte (épaisseur 4cm)
- Les corbeaux en pierre qui supportent les chaises des fermes de la charpente de toiture, et qui ont été dégradés par l'incendie, seront remplacés par des pierres ancrées en profondeur dans le mur bahut dont l'appareil sera préalablement refouillé (8 corbeaux soit deux par côté nord et sud, et pour les départs de la nef et du chœur.



Maçonnerie de doublage à la base du mur bahut de la nef – Relancis de moellon et mortier

Parements intérieurs du mur bahut compris baies des événements

Le protocole établi a été adapté et confirmé lors du chantier test réalisé sur un linéaire défini de deux travées (T16 du chœur et T34 de la nef) préalablement choisies en fonction des résultats de l'analyse radar, là où les délaminations étaient les plus marquées. **Pour rappel, l'objectif est la conservation maximum des parements épargnés, non détruits par l'incendie.** Le remplacement des pierres, en recherche, sera limité à celles dont l'état de dégradation serait susceptible de remettre en cause la stabilité de l'édifice ainsi qu'aux corbeaux qui portent les « chaises » des fermes maîtresses de la charpente du comble.

Au préalable, un dépoussiérage par brossage (brosse douce) de l'ensemble des parements intérieurs avec aspiration simultanée THE à la source sera réalisé pour retirer le plus possible les poussières résiduelles du chantier de sécurisation. Les vestiges d'enduit de plâtre ignifuge présents en partie basse des murs seront purgés à l'outils avec aspiration soignée, de même que les joints pulvérulents. Pour les parement courants dégradés par l'incendie, un repérage et un référencement de chaque pierre et des zones fissurées/fragilisées sera effectué sur le calepin en élévation. Le diagnostic se fera en sonnant chaque pierre à l'aide d'une « baguette de résonance » afin d'obtenir

une information qualitative de la réponse acoustique des pierres en œuvre. Cela permettra d'identifier les zones fracturées/déplacées et d'implanter le nombre de percements à réaliser pour les injections de coulis de micro-mortier. Les percements seront réalisés avec une faible pente vers l'intérieur de la pierre pour permettre l'écoulement gravitaire du coulis. La méthode et l'outil de forage (foret diamanté...) seront adaptés à l'état des parements et à la résistance des pierres en œuvre afin que les vibrations n'accentuent pas la fragilisation des plaques de pierre (la percussion est évitée le plus possible). Des solins au mortier de chaux pure seront systématiquement réalisés en rives des pierres déplacées pour contrôler les pertes et coulures du coulis. La quantité de coulis injecté dans chaque trou sera enregistrée par l'entreprise en charge de l'opération.



Ensuite, une injection systématique au refus de coulis de micro-mortier de type LEDAN TA2 (mortier qui a des qualités thixotropiques particulières permettant d'optimiser les coulis dans les maçonneries fissurées) sera réalisée pour la reconstitution de l'adhérence des parements.

Un brochage perpendiculaire au parement sera ensuite mis œuvre afin de relier les strates désolidarisées et de rétablir la cohérence des parements déstabilisés. Les pierres fracturées seront goujonnées à l'aide de tige en fibre de verre (diam. 4mm) scellées à la résine Epoxy pour maintenir les plaques en cas de perte d'adhérence du coulis. L'extrémité des goujons sera légèrement cisailée, ouverte, afin d'augmenter la surface de contact avec la résine. La densité des goujons sera adaptée en fonction de l'épaisseur et de la taille/du



Avant/après consolidation (T16 du chœur)

pooids des plaques préalablement resolidarisées par coulinage. Les essais réalisés donnent comme ordre de grandeur la mise en œuvre d'environ 1 à 4 goujons par pierre déplacée. La profondeur de forage va jusqu'à 20cm et les goujons ont une longueur au moins supérieure de 5 cm (soit 23cm) par rapport à la profondeur de la fissure détectée pour assurer un bon ancrage et sont installés entre 5 et 10mm en retrait du nu, de façon à permettre de boucher le trou avec du mortier.

Pour finir, un refichage après purge des mortiers dégradés, et un rejointoiement complet des parements existants au mortier de chaux parachèveront l'opération de consolidation. Les solins de rive et le rejointoiement (refichage et joints de finition) seront effectués au mortier NHL 3,5 de Saint-Astier. En variante, on pourrait utiliser un mortier MAPEI.

Des raquettes neuves (cadre en laiton et maille en cuivre 15x15mm) seront remises en œuvre au droit des événements des murs bahuts, fixées dans les joints du parement intérieur.

Remplacement de l'assise d'arase

L'assise d'arase, particulièrement altérée par l'incendie côté intérieur, et par les intempéries côté extérieur sera remplacée en totalité avec une pose au mortier de chaux. Un calepin précis des pierres en place sera établi, avant toute opération de dépose, pour assurer une restitution à l'identique de l'existant. Une attention particulière sera portée aux réservations dans la pierre d'arase permettant les passages des descentes d'EP à leurs emplacements actuels. Les agrafes de fer qui relient les pierres (deux cours d'agrafes pour l'assise de l'arase soit environ 226 pour cette opération) seront descellées (le plomb récupéré), déposées, brossées à blanc, traitées contre la corrosion par métallisation afin d'être remployées. Les agrafes incomplètes seront remplacées par de nouvelles agrafes en fer pur forgé à finition martelée et scellées au plomb pour restitution du chainage.



Arase avec agrafes à nu (T34 de la nef)

Corbeaux formant appuis de charpente

L'ensemble des corbeaux ou pierre d'appui des pieds de fermes-maîtresses de charpente, très dégradés, seront remplacés, de même que l'assise sous-jacente formant sommier, par des pierres de calcaire dur posées au mortier de chaux NHL 3,5. Les pierres à remplacer seront refouillées par forages ponctuels pour faciliter le retrait de la pierre par partie sans ébranler les maçonneries adjacentes. Les parements adjacents seront préconsolidés et étayés/blindés au préalable.



Parement obtenu après consolidation de l'état d'altération – Chantier Test (T34, Nef)

Locaux pompiers

Des locaux dédiés à la sécurité incendie des combles seront créés à l'entrée des escaliers des bras du transept Nord et Sud donnant accès aux combles. Ces derniers font l'objet d'études techniques en cours. L'entreprise titulaire du lot 04TP Maçonnerie- Pierre de taille devra

se coordonner avec l'entreprise titulaire chargée de la conception des locaux pompiers dans les combles et prendre en compte les interfaces susceptibles d'impacter ses travaux. Outre les locaux pompiers, des locaux vannes et colonnes sèches seront prévus dont leur position dans les combles est toujours en cours d'étude.

Les parements extérieurs

Nettoyage

A l'issue de l'opération de dépollution, un nettoyage complémentaire des parements extérieurs sera réalisé par brossage et aspiration THE à la source. Ponctuellement, les croûtes noires présentes sur les parties abritées, seront supprimées manuellement au scalpel, de même que la suppression de concrétions ou éclaboussures de plomb fondu sur les parements en pierre de taille (sans endommagement de l'épiderme des parements par action mécanique). Des essais préalables de ramollissement du plomb par source de chaleur seront à effectuer en début de chantier. Aussi, un traitement biocide sera appliqué jusqu'à saturation et brossage après incubation pour supprimer les colonisations microbiologiques, mousses et lichens. Le produit envisagé devra être compatible avec le support et avec les produits de consolidation, et autres appliqués sur les parements avant livraison. Le produit utilisé devra avoir l'agrément du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

Assises courantes

Ponctuellement, les pierres, dont les parements extérieurs présentent des desquamations importantes, seront remplacées en recherche. Aucune dépose ne sera réalisée avant la consolidation par injection des parements intérieurs. Les pierres dégradées seront remplacées en totalité ou partiellement par incrustation (minimum 30cm). Afin d'éviter d'ébranler les parements intérieurs, le recours au démontage-remontage permettant un remplacement des pierres altérées par le dessus sera privilégié à un remplacement en tiroir si possible. La conservation de la matière, et celle du calepin seront privilégiées. Les pierres d'encadrement des événements seront conservées, et leurs parties désolidarisées refixées à l'aide de goujons en fibres de verre. Concernant l'assise inférieure, habillée de plomb et formant le relevé d'étanchéité du cheneau, afin d'éviter tout risque de déstabilisation des pierres côté intérieur, un ragréage des parements altérés sera privilégié (mortier fibré/armé de type Altar).

L'intégralité des ragréages existants (ciment et plâtre) seront purgés et les parties desquamées (présence de gypse) recevront en rive un solin au mortier Altar. Les joints du parement extérieur seront également purgés en totalité et rejointoyés en totalité au mortier de chaux NHL 2,5.

Les ragréages de teinte ocre seront également purgés et refaits à l'aide de mortier préformulé Altar® ou d'un mortier dont le module élastique est similaire ou légèrement inférieur à celui de la pierre. Les ragréages ne seront pas appliqués à des surfaces étendues mais uniquement sur des zones très ponctuelles et localisées. Un travail de finition du mortier devra permettre de s'approcher de la teinte et de l'aspect des pierres adjacentes (coquillées ou non, veines d'oxyde de fer, aspect des grains, etc.). Des solins discrets seront réalisés à la périphérie des zones altérées afin de cicatiser les lèvres des



Exemple de ragréages anciens à purger (T04, Choeur)

épidermes, permettre les refixages par injections de mortier de chaux, et de cristalliser l'état altéré des parements de pierre, à l'instar des rides d'expression d'un visage. Les supports auront été en tant que de besoin préalablement dessalés à l'aide de compresseurs, les taux de sels contrôlés après chaque cycle afin de vérifier l'efficacité du dessalement.

Enfin, l'habillage en plomb ainsi que de tous les ouvrages techniques seront remis en œuvre à l'identique selon les dispositions existantes de même que les descentes d'eau pluviale en cuivre et les fixations diverses.

Redonner une cohésion globale à la maçonnerie du mur

Aux deux faces (intérieure et extérieure), l'ensemble des parements sera refiché et rejointoyé au mortier de chaux afin de retrouver une cohérence d'ensemble. Des coulis en cœur de maçonnerie, seront réalisés sous le niveau du chéneau (assises en moellons).

Travaux de restauration du chemin de ronde

Les déposes ponctuelles des garde-corps, fleurons et de l'habillage en plomb recouvrant la première assise du parement seront poursuivies sur l'ensemble des éléments restants pour permettre le montage des échafaudages extérieurs des gouttereaux.

Garde-corps

L'intégralité des garde-corps en pierre de taille seront refaits à l'identique, y compris les scellements et joints coulés au plomb selon les modèles et le calepinage existants. Les pierres dégradées du glacis seront remplacées ponctuellement en recherche et celles demeurant en bon état de conservation seront nettoyées. Un vieillissement des parements neufs à l'outils et l'application ponctuelle d'une patine d'harmonisation seront réalisés pour permettre l'intégration des pierres neuves. Les fleurons déposés et conservés seront reposés à leur emplacement d'origine au mortier de chaux tandis que les ouvrages dégradés seront refaits à l'identique ou consolidés lorsque possible par la restitution des décors sculptés brisés. Les greffes seront réalisées par goujonnage à l'aide de tiges en fibre de verre et collage à la résine époxydique et l'épidermes des parties sculptées fragilisé par les sels solubles sera consolidé par application de silicate d'éthyle ou bio-minéralisation.

Enfin, un traitement biocide préventif sera appliqué systématiquement sur les appuis et éléments neufs.

Frise à crochets et corniche de support du chemin de ronde

Les pierres dégradées de la frise à crochets seront remplacées ponctuellement en recherche et celles demeurant en bon état de conservation seront nettoyées. Des greffes ou ragréages ponctuels sur les pierres de la frise à crochets présentant des lacunes pourront être réalisées en recherche par goujonnage à l'aide d'armatures en fibre de verre ou en titane et collage à la résine époxydique si la pierre d'origine peut être conservée. Un vieillissement des parements neufs à l'outils et l'application ponctuelle d'une patine d'harmonisation seront réalisés pour permettre l'intégration des pierres neuves.

Les gargouilles en mauvais état de conservation ayant perdu leur lisibilité seront refaites à l'identique. En cas de lacunes documentaires ne permettant pas une restitution certaine des sculptures disparues, des propositions pourront être soumises à la maîtrise d'œuvre à partir des

fonds iconographiques disponibles datant de la restauration du XIX^{ème} siècle. La réalisation de maquettes pourra être demandée pour validation par les ACMH.

Le chaînage métallique extérieur du chœur en retournement sur le transept sera brossé et passivé par l'application d'un inhibiteur de corrosion à la charge du *lot 04_{EXT-TP} du DCE5 Maçonneries incendiées et grand comble (chœur & nef)*.

Les traces d'oxydation, liées au chaînage métallique extérieur du chœur, difficiles à effacer en raison de leur pénétration dans la pierre, seront, suivant les essais pratiqués sur place, atténuées soit par micro-abrasion, soit par l'application d'une patine à base de lait de chaux additionnée d'un fixatif.

Les exutoires mis en œuvre lors des travaux préparatoires de restauration au niveau des reins de voûtes seront vérifiés avant la dépose des échafaudages extérieurs et serviront pour le rejet des eaux de brumisation des combles en cas d'alerte incendie.

Enfin, un traitement biocide préventif et systématique sera appliqué sur les éléments neufs en saillie tels que glacis, gargouilles, bandeau, corniche, etc.

Chaînage métallique

Le chaînage métallique extérieur et le dispositif complémentaire de chaînage / tirants intérieurs seront rétablis dans leur fonctionnement dans le cadre des travaux du chœur (hors opération transept)) afin d'être restauré d'un seul tenant.

Approvisionnement en pierre

Les natures des pierres mises en œuvre dans la cathédrale sont connues par les analyses effectuées par carottage (attachements figurés). Ces dernières ont permis, outre la caractérisation des résistances mécaniques des pierres, de renseigner sur les diverses natures de pierres mises en œuvre lors de la construction et des restaurations/reconstructions successives.

Les carrières ayant servi tant à la construction de la cathédrale à l'époque médiévale, qu'à sa restauration au XVIII^{ème} siècle par Boffrand, et au XIX^{ème} siècle par Viollet-le-Duc ne sont pour la plupart plus en activité. La restauration de la cathédrale nécessitant un volume important de pierre neuve, les propriétés physico-chimiques des pierres de référence ont été identifiées pour sélectionner des pierres de substitution (carrières actuellement en exploitation) dont les caractéristiques sont proches ou identiques à celles en œuvre. Une mission confiée au BRGM (rapport provisoire en annexe) a permis de recenser les carrières susceptibles d'être compatibles avec les maçonneries en œuvre, tant d'un point de vue esthétique, mécanique ou en terme de disponibilité correspondant aux besoins du chantier.

Pour les murs bahuts, les pierres similaires qui semblent le mieux correspondre aux maçonneries en place sont les suivantes :

- Angles de la croisée : Roche franche de Sébastopol;
- Parement courant : Croix-huyart H4 demi-dure ;
- Consoles/pierres d'appui : Liais ½ fin de Saint-Maximin ;
- Arases : H4 dure ou H4 coquiller de la Croix Huyart
- Assise inférieure (parement extérieur) : Roche franche ½ fine de Saint-Maximin.

- Murs-diaphragmes/Remplissage des pieds de gerbe : Roche fine ou roche franche fine de Saint-Maximin.

Pour le chemin de ronde, les pierres similaires qui semblent le mieux correspondre aux maçonneries en place sont les suivantes :

- Garde-corps et glacis : Pierre H4 dure de la Croix Huyart (Aisne) ;
- Fleurons : Pierre dure H4 - Croix Huyard (Aisne) ;
- Gargouilles : Liais de Saint-Maximin ou de Sébastopol ;
- Frises à crochets : Roche ½ dure de Saint-Maximin.

•

5. Les moyens d'accès et protections diverses

Les moyens d'accès

L'ensemble des échafaudages de pieds à l'intérieur du vaisseau central (pour la restauration des voûtes et le nettoyage des parements verticaux) et à l'extérieur de la cathédrale (pour la restauration des pignons, des baies hautes et du chemin de ronde) seront mis à disposition des entreprises. Chaque partie de ces échafaudages sera conçue de façon à recouvrir et donner accès à la totalité du linéaire intérieur et extérieur des murs bahuts. Aussi, l'ensemble des ouvrages connexes avec les agrès nécessaires (sapines, escaliers, planchers complémentaires sous voûtes, etc...) seront mis gracieusement à disposition des différents lots.

Les moyens d'accès utiles à la restauration des murs bahuts sont :

- Un échafaudage suspendu aux planchers provisoires au contact des pignons Nord et Sud pour permettre la consolidation des maçonneries inférieures des pignons ; y compris les plateformes sécurisées. L'accès se fera par le dessus depuis les planchers bois provisoires en tenant compte de l'encombrement des planchers liée à la présence des contrefiches des pignons. Cet échafaudage suspendu est mis en place dans le cadre des travaux de sécurisation et n'est donc pas à la charge du lot 03_{TP} Echafaudages.
- Un échafaudage de pied aux 4 angles de la croisée sur le plancher de l'échafaudage de reconstruction de la croisée pour permettre la consolidation des supports maçonnés de la flèche, des murs diaphragmes clavés adossés aux arcs diagonaux et maçonneries de blocage : Intervention à pieds d'œuvre depuis l'échafaudage.
- Des échafaudages de pieds sur les reins de voûtes reliés dans les angles de la croisée par des passerelles (après consolidation et restauration de l'extrados des voûtes au contact de la croisée et pose d'une étanchéité souple provisoire) pour la reconstruction en pierre neuve des angles des murs bahuts, puis à l'avancement des travaux, pour la restauration du parement intérieur courant et le remplacement de arases.
- Des échafaudages extérieurs avec planchers de travail au droit du chemin de ronde pour permettre la dépose et repose des éléments de garde-corps et la restauration des glacis et frise à crochets.

Les protections

Les entreprises devront mettre en place toutes les protections nécessaires à une réalisation optimale des travaux et à la conservation des voûtes (coactivité possible avec les travaux de consolidation des voûtes) et des ouvrages fragiles (sculptés et moulurés) non concernés par l'intervention.

• • •

4

La restauration des pignons Nord et Sud des bras de transept



- Définition des limites de la présente opération ;
- Description de l'ouvrage ;
- Synthèse de l'état sanitaire ;
- Interventions projetées ;
- Les moyens d'accès et protections diverses.



1. Définition des limites de la présente opération

Les pignons des bras de transept ont été sévèrement altérés par l'incendie du 15 avril 2019. Avec les murs bahuts, ils constituaient la clôture maçonnerie du grand comble. Déjà naturellement soumis aux altérations climatiques au vu de leur localisation dans les parties les plus hautes de la cathédrale, l'incendie les a fragilisés, mettant en péril leur stabilité.

Les deux pignons Nord et Sud sont ainsi concernés par cette opération, ainsi que les tourelles ajourées qui les flanquent. Les escaliers d'accès situés sur la façade Ouest des transepts qui permettent l'accès aux pas de moineaux sont également concernés par cette opération.



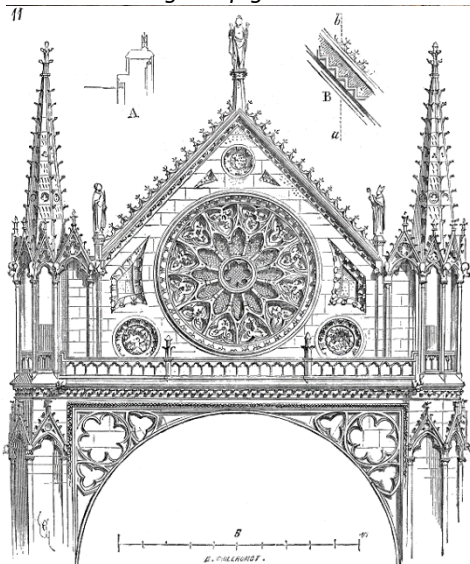
Zones concernées par l'opération

2. Description de l'ouvrage

Le pignon SUD



Arc de décharge du pignon Sud



*Le pignon du transept Sud
Extrait d'Eugène Viollet-le-Duc, Dictionnaire
raisonné de l'architecture française du XIe au
XVIe siècle, tome VII, Paris, 1864, p. 143,
Médiathèque de l'Architecture et du
Patrimoine, F-2012-24-28[cliché MAP].*

Le pignon Sud se trouve au sommet de la façade du transept Sud, surplombant la grande rose. Il s'appuie sur la frise à crochets qui court tout autour du monument, qui est ici dotée de deux rangs de crochets. Le larmier qui repose sur cette frise reçoit le garde-corps de la troisième galerie de circulation, qui se situe devant le pignon. Celui-ci se retrouve ainsi en léger décalage vers le Nord, ce qui lui permet de ne pas reposer directement sur la rose mais sur un arc de décharge qui est visible depuis les voûtes. Celui-ci a pour rôle de reporter les charges du pignon sur les contreforts du transept.

Reprenant la même composition que son symétrique Nord, ce pignon a toutefois été beaucoup plus ornementé. La morphologie générale de la rose centrale a été conservée par le Viollet-le-Duc, elle a donc gardé, contrairement à la grande rose située dessous, un caractère dynamique affirmé.

Autour de l'oculus central polylobé, douze pétales se déploient, et viennent buter contre des arcs brisés renversés contenant des trèfles. Les pétales sont constitués de meneaux de taille égale ornés de chapiteaux, qui se terminent en arc brisé inscrivant un arc trilobé. L'oculus et les pétales sont garnis d'un vitrail blanc, permettant l'éclairage des combles, tandis que les trèfles sont aveugles. Au centre des trèfles de la périphérie ont été ajoutés par Viollet-le-Duc, de larges décors feuillagés. Il a également restitué la frise à crochets végétaux (sans doute purgée au XVIII^{ème}) sur le pourtour extérieur de la rose, ainsi que des décors végétaux en dépression dans les parties planes des maçonneries.



Détails des ornements du pignon, Photos Didier Groux



Le couronnement des rampants du pignon est constitué d'une frise feuillagée coiffée par un chaperon, surmonté par une suite de redents trilobés ajourés, chapeautés de fleurons. Trois statues, installées au XIX^{ème} siècle par Viollet-le-Duc, couronnent le pignon.

De part et d'autre, faisant office de pinacles aux contreforts de la façade, se trouvent les tourelles sur colonnettes, comme au Nord. Restituées par Viollet-le-Duc au XIX^{ème} siècle, elles sont surmontées de couvertures pyramidales plus élancées qu'au Nord, et ornées de redents en applique et de crochets feuillagés sur les arêtes. Chapiteaux et figures historiées coiffent les colonnettes, qui sont de ce côté dépourvues de crochets. En revanche, le garde-corps absent au Nord, est ici présent dans les espaces entre les colonnettes.

On trouve par ailleurs à l'intérieur de cette tourelle une structure métallique en forme de roue, qui a pour rôle de parer à toute déformation éventuelle liée aux vents.



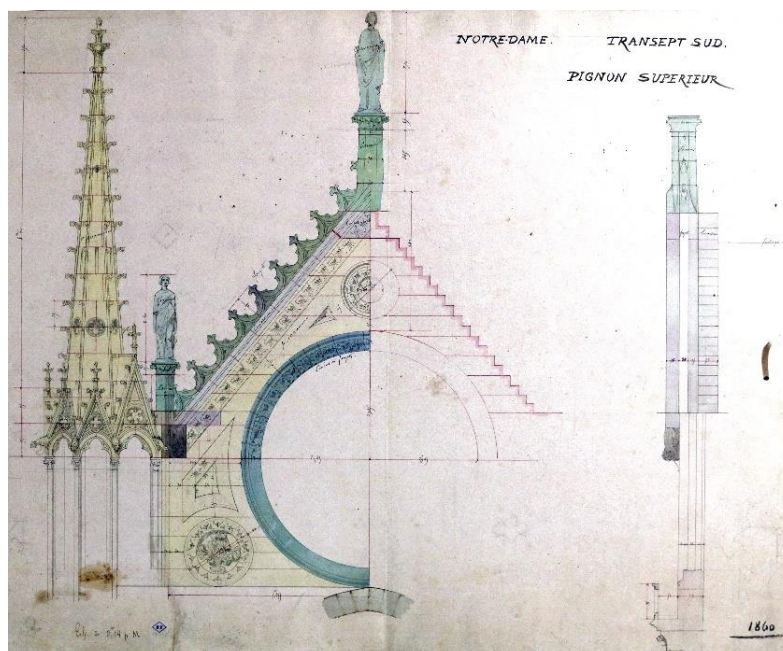
Statue de saint Etienne, Photo Didier Groux



Structure métallique dans les tourelles

Nature de pierres

Sur un attachement figuré de Viollet-le-Duc daté de 1860, les natures de pierre souhaitées par l'architecte sont indiquées. Cependant, nous ne disposons pas des dessins d'exécution qui confirmeraient ces données. On peut cependant constater l'emploi de la pierre des Forgets pour les crochets des rampants, eux-mêmes en Laversine, la pierre de Saint-Maximin en jaune est utilisée pour les maçonneries constituant le pignon, ainsi que pour les couvertures pyramidales des tourelles. Les statues sont indiquées en roche de Chauvigny. La frise qui borde la rose est quant à elle en roche des Forgets.



Eugène Viollet-le-Duc, architecte, « Notre-Dame. Transept Sud. Pignon supérieur », 1860. Médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine, Planothèque, F-1996-083, Agence 5, n°37607[cliché MAP 04R03985].

Le pignon NORD



Photo Lionel Bonaventure/AFP



Ci-dessus Tourelle Ouest du pignon/ ci-dessous Rose du pignon Nord ; Photo Didier Groux



Le pignon qui couronne la façade du transept Nord reprend la même composition que son symétrique au Sud. Quelques différences sont cependant remarquables. La frise végétale présente sur la totalité du monument est surmontée d'un larmier, servant lui-même de support au garde-corps à motifs trilobés, que l'on retrouve également sur l'ensemble du chemin de ronde. Les tourelles encadrant le pignon ont fait l'objet d'une importante restauration au XIX^{ème} siècle. Faisant office de pinacle aux contreforts de la façade, ces tourelles sont formées de colonnettes ornées de crochets et coiffées de chapiteaux à décors végétaux. Elles soutiennent des arcs trilobés aux gâbles ajourés de trèfles et flanqués de figures historiées, de crochets, portant décor de dentures et crochets végétaux, coiffées de fleurons. Entre les colonnettes qui reposent sur le larmier, le garde-corps s'interrompt et est remplacé par une simple lice en métal. A l'intérieur comme au Sud, une structure métallique permet de reprendre les efforts au vent et de pallier toute déformation.

La rose qui occupe la partie centrale du pignon est cerclée d'une frise à rinceaux végétaux, et son décor joue des différentes épaisseurs de pierre. Elle est composée d'un oculus vitré central habillé d'un polylobe, et entouré de six cercles de même dimension qui sont en second plan. Dans chacun de ces cercles se trouvent trois trilobes vitrés, qui participent de l'éclairage des combles, et trois autres trèfles plus petits, logés dans les écoinçons formés entre les ouvertures, avec des pétales en forme d'ogive. Ces derniers sont opaques et se situent donc sur un troisième plan de pierre. Au centre de la composition, on trouve en alternance des rosaces à motifs végétaux et des



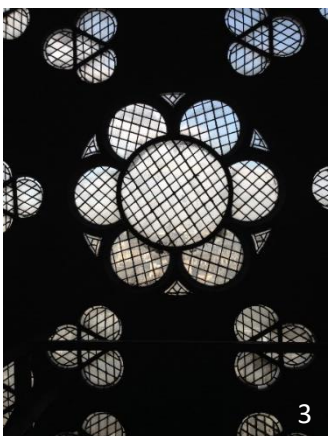
maskarons. Six autres trèfles occupent les écoinçons dégagés sur la périphérie et sont ornés en leur centre des mêmes motifs. On retrouve les petits trèfles à pétales en forme d'ogive autour de l'oculus central.

Le vitrail contenu dans les ouvertures de cette rose est losangé et suit l'orientation des différents lobes. Dans les écoinçons du polylobe central, ainsi que pour les petits trèfles adjacents, une bordure souligne les losanges.



Autour de la rose, à chacun des angles du triangle formé par le pignon, se trouvent trois quadrilobes, avec une rosace au centre et une frise végétale sur leur pourtour.

Sur les rampants du pignon, un chaperon est souligné par une frise à rinceaux végétaux. Ils ont été couronnés au XIX^{ème} siècle par des crochets en arc de cercle, ponctués de petits fleurons. Au sommet du pignon, une statue installée par Viollet-le-Duc lors de la restauration représente saint Denis, et a été sculptée par Geoffroy Dechaume.



1 et 2- Détails des rosaces et de la rose du pignon, Photos Didier Groux/ 3-Détail des vitraux de la rose, Cliché R.Fromont
4 - Crochets sur le rampant du pignon, 5 - statue de saint Denis, Photos Didier Groux

Nature de pierres

Nous ne disposons pas d'attachement figuré pour le pignon Nord, mais un devis de maçonnerie de 1845 détaille les qualités et quantités de pierre nécessaires à sa restauration. Les matériaux employés pour les joints sont également précisés. On constate ainsi que la pierre la plus représentée sur le pignon est le banc royal de Mello. On trouve également en quantité non négligeable de la roche de Laversine et de la roche fine des Forgets. Le devis fait état de 200m³ pour la réalisation du pignon, ainsi qu'environ 45m³ pour la galerie le bordant. Cette partie du monument très exposée aux éléments a fait l'objet de plusieurs campagnes de restaurations depuis sa reconstruction du XIX^{ème} siècle. Ainsi les archives des travaux exécutés par Ernest Herpe dans les années 1930 nous indiquent l'emploi de la pierre de Charentigny pour le remplacement de certains blocs. Plus récemment dans les années 2000, des travaux d'entretien ont fait usage de ragréages et consolidations diverses pour les couvertures des tourelles.

3. Synthèse de l'état sanitaire

Tout comme les murs bahuts, les pignons ont profondément été altérés par l'incendie du 15 avril 2019. Les dégâts liés à l'incendie sont principalement localisés sur les faces intérieures, mais des pathologies sont également présentes à l'extérieur, et étaient préexistantes. Les deux pignons ont rapidement après l'incendie été étayés et mis sous filets afin de prévenir tout risque de chute.

Le Pignon SUD

L'élévation côté combles

Les pathologies que l'on peut constater à l'intérieur du pignon sont relativement identiques à celles que l'on observe sur les murs bahuts.

Les pathologies antérieures à l'incendie sont essentiellement concentrées sur les parties extérieures qui étaient exposées aux éléments. Ainsi sur les pas de moineaux et les tourelles, on peut observer des usures, desquamations et pulvérulences caractéristiques des maçonneries de la cathédrale.



Remplages déplaqués de la rose du pignon Sud

La majorité des désordres observés est directement liée à l'incendie. En effet, la façade du côté du comble a longuement été exposée aux assauts du feu, qui a fait exploser les verres de la rosace, et s'est échappé par les baies ainsi ouvertes, atteignant la façade extérieure. Bien que le sens du vent ait permis qu'une partie de la toiture soit conservée à proximité de ce pignon au lendemain de l'incendie, la totalité de la maçonnerie le constituant a subi d'importants dommages.

- **Eclatement et déplaquage** des maçonneries induits par le choc thermique subi durant l'incendie. Les analyses effectuées sur plusieurs échantillons ont permis de constater que des fissures de décompression thermique sont localisées près de la surface des blocs, à 15 et 19mm ; un seul des échantillons, du côté Ouest, est fissuré entre 15 et 52 mm pour des raisons thermiques, et présente également une fissure préexistante à 188mm. La coloration perceptible est également minime, moins de 2 cm. Ces caractéristiques sont sans doute dues au fait que cette zone du grand comble a été relativement « épargnée » lors de l'incendie (c'est près du pignon Sud qu'un vestige de la couverture subsistait). On note également le relativement bon état de l'arc de décharge soutenant le pignon, sur lequel peu de dégâts ont été constatés.
- **Concrétions ou rejaillissements de plomb fondu** puis solidifié provenant des tables de plomb de la couverture disparue du grand comble sur les parties en saillie des maçonneries intérieures (notamment au-dessus de l'arc de décharge)
- **Fissures** et joints ouverts ont également été constatés dans différentes zones du pignon. Ils ont pu être provoqués par la haute montée des températures, et à l'effet de souffle lié à la chute de la flèche. On note également un phénomène de décarbonatation ayant entraîné l'évidement des joints, dû à la présence de chaux dans leur composition.

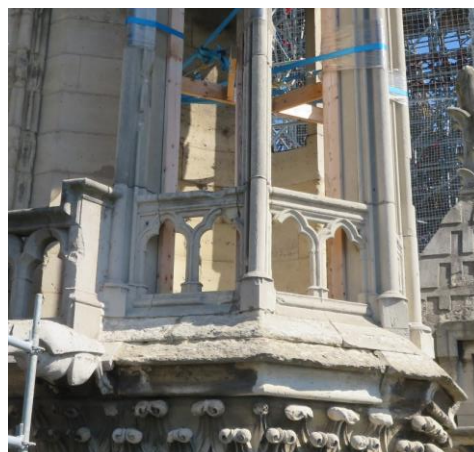
- **Dépôt d'oxyde de plomb** (massicot et litharge) manifesté par une couche verdâtre d'environ 1 à 2 mm) sur la surface des parois : transformation de fines particules de plomb sous l'effet d'une réaction chimique en présence d'oxygène et sous les hautes températures de l'incendie (600°C). Cette couche tend, avec le vent et les intempéries, à disparaître progressivement.
- **Blanchiment** (faible épaisseur d'environ 0,5mm) d'un nombre important de pierres des parements par pseudomorphose d'une partie de l'épiderme, produit par la réaction entre l'oxyde de calcium, produit par la calcination des pierres calcaires lorsque leurs surfaces sont chauffées au-delà de 825°C par l'incendie, et les aérosols chargés de plomb libérés à ce moment-là. Ce phénomène a entraîné une modification de la composition chimique de cette strate superficielle de la pierre.

L'élévation extérieure

Côté extérieur, le pignon a été endommagé par les hautes températures des fumées qui se sont évacuées par la rose après que les vitraux de celle-ci aient été brisés. Cependant, la majorité des désordres constatés sont antérieurs à l'incendie, et sont liés à l'exposition des maçonneries aux pluies et aux vents dominants.

Pathologies antérieures à l'incendie

- **Pierres desquamées et pulvérulentes**, principalement localisées dans les parties supérieures (chaperon, couverture des tourelles, base des rosaces). Ces pathologies sont également présentes dans la maçonnerie des harpages entre les tourelles et le pignon, et sont sans doute liées à des natures et duretés de pierres différentielles. Les décors et figures historiées subissent également ces désordres.
- **Joints ouverts ou hétérogènes** (mortier bâtard constaté sur les couvertures des tourelles et présence de plâtre dans les maçonneries courantes) entraînant des pathologies salines sur les blocs de calcaire. Ces mortiers trop durs ont entraîné des épaufures sur les arêtes des blocs, déjà fortement érodés. Par ailleurs, les couvertures des tourelles avaient été reprises par un ragréage lors de travaux d'entretien dans les années 2000.
- **Encrassement et colonisation biologique** ont également été constatés sur les maçonneries du pignon.



Erosion sur le larmier et la couverture des tourelles

Pathologies liées à l'incendie

- **Rubéfaction et délamination** complète des remplages de la rose par laquelle les fumées de très haute température se sont évacuées
- **Coloration des maçonneries** de la partie supérieure de la rose, indiquant que les qualités mécaniques des pierres sont diminuées.
- **Fissuration importante** courant sur le pourtour ouest de la rose et se développant jusqu'au pied de la tourelle témoignant de mouvements des structures, apparus progressivement, et possiblement liés au séchage des maçonneries.



Rubéfaction sur la face extérieure de la rose

Le Pignon NORD

Consolidé dans les jours qui ont suivi l'incendie, le pignon Nord a subi plus de dommages que son symétrique Sud. Les pathologies constatées sont cependant relativement identiques à celles recensées au Sud.

L'élévation côté combles

Comme au Sud, les pathologies antérieures à l'incendie sont essentiellement concentrées sur les parties extérieures : pas de moineaux, chaperon et revers des tourelles ajourées, où sont présentes pulvérulences et desquamations. La quasi-totalité des désordres constatés est directement due à l'incendie. On constate ainsi comme au sud :



Pas de moineau et chaperon du pignon Nord

- **Eclatement et déplaquage** des maçonneries induits par le choc thermique ; la morphologie de la rose, différente de la rose sud, avec ses multiples et petites ouvertures, a amplifié le phénomène, en créant autant d'évacuations possibles pour les fumées à très haute température. On note par ailleurs ici une rubéfaction importante des blocs de l'arc de décharge, ayant entraîné des pertes de matière importantes
- **Concrétions ou rejaillissements de plomb fondu** sur les parties en saillie des maçonneries intérieures (notamment au-dessus de l'arc de décharge) ;
- **Fissures** et joints ouverts ont également été constatés dans différentes zones du pignon. Le pignon Nord a vraisemblablement subi un mouvement de basculement lors de la chute des éléments de charpente pendant l'incendie, et des fissures importantes en témoignent.
- **Dépôt d'oxyde de plomb**
- **Blanchiment**



Pathologies dues au feu sur la face intérieure du pignon Nord

L'élévation extérieure

Les pathologies constatées sur la façade extérieure du pignon Nord, comme au Sud, ne sont que partiellement dues à l'incendie. En effet, la majorité des désordres étaient antérieures au sinistre, et sont liés à l'exposition de cette partie du monument, doublé d'une difficulté d'accès rendant les travaux d'entretien plus difficiles.



Dépôts de suie sur les décors

Pathologies antérieures à l'incendie

- **Pierres desquamées et pulvérulentes**, principalement localisées dans les parties supérieures (chaperon, couverture des tourelles, base des rosaces). Ces pathologies sont également, comme au Sud, présentes dans la maçonnerie des harpages entre les tourelles et le pignon. Les décors et figures historiées subissent également ces désordres. Bien que moins exposé aux vents dominants, on constate ce phénomène d'érosion de façon beaucoup plus importante sur le garde-corps situé à la base de la façade.
- **Joints ouverts ou hétérogènes** (mortier bâtard constaté sur les couvertures des tourelles et présence de plâtre dans les maçonneries courantes) entraînant des pathologies salines sur les blocs de calcaire. Les couvertures des tourelles ont été réparées par un lourd ragréage dans les années 2000.
- **Encrassement et colonisation biologique** ont également été constatés sur les maçonneries du pignon, et sont beaucoup plus importantes qu'au sud.



Joint au plâtre



Etat de la couverture de la tourelle Est avant l'incendie

Pathologies liées à l'incendie

- **Rubéfaction et délamination** complète des dalles formant la rose par laquelle les fumées de très haute température se sont évacuées.
- **Coloration des maçonneries** de la partie supérieure de la rose.
- **Fissuration importante** observées de part et d'autre de la rose, notamment au travers des quadrilobes latéraux.



Rubéfaction sur la face extérieure du pignon Nord – Fissuration des blocs au droit des quadrilobes

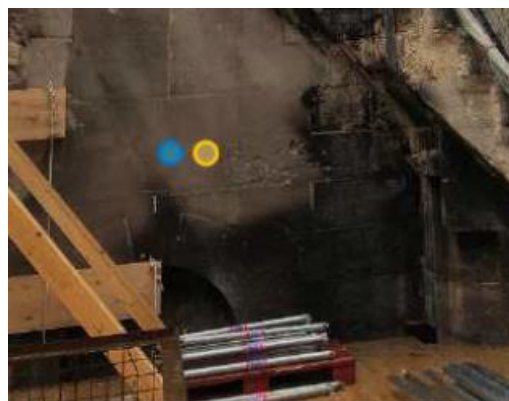
Analyse pétrophysique des maçonneries en oeuvre

Des prélèvements ont été réalisés sur les maçonneries des pignons sous forme de carottage, en vue de leur analyse. Sur les pignons Nord et Sud (respectivement 3 et 4 carottages analysés), ils sont localisés sur la partie supérieure du pignon, sur la face interne. Les analyses pétrophysiques menées conjointement par BPE et le LRMH ont permis de mettre en évidence les profondeurs d'altération des différents échantillons analysés, mais également de caractériser les résistances mécaniques des pierres, et ainsi renseigner quant aux différentes natures de pierre mises en oeuvre.

Pour les pignons Nord et Sud, les fissures de décompression thermiques indiquant la profondeur des délaminations sont relativement proche de la surface (un peu plus profondes au Nord cependant). Au-delà, les qualités mineralogiques et par conséquent mécaniques des pierres ne sont pas impactées.

La caractérisation pétrophysique des carottes couplée à l'analyse des archives a permis de confirmer et d'affiner les natures des pierres mises en oeuvre, en permettant d'obtenir les données suivantes :

- Détermination de la porosité ouverte et de la masse volumique apparente
- Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité
- Mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores
- Détermination du module d'élasticité dynamique
- Essai de résistance à la compression



Echantillon Pn80 (PM001173-1)
Réf. Jambas : @ Pignon Sud Ouest



Carottage réalisé sur la maçonnerie du pignon Sud

4. Interventions projetées

A la lumière du diagnostic précédemment établi, il apparaît que les maçonneries constituant les pignons ont subi des dommages différentiels. Si les parties basses sont sensiblement comparables aux murs bahuts dans leurs dégradations, leur élévation les rendant plus fragile nécessite des reprises plus lourdes et des interventions plus importantes.

Les différents éléments constituant les pignons impliquent des opérations visant à la fois à leur rendre leur cohérence structurelle dégradée par l'incendie, mais aussi à effectuer les restaurations déjà nécessaires avant le sinistre.

Il est ainsi prévu :

- Le remplacement complet des parties hautes, les plus exposées : chaperon, pas de moineaux, couvertures pyramidales des tourelles ;
- Le remplacement des maçonneries des parties supérieures des pignons ayant subi des températures très élevées mettant en péril les qualités structurelles des pierres et de leurs joints ;
- Le remplacement des remplages des roses
- La restauration et la consolidation des maçonneries et décors conservés ;

Travaux préalables, en cours ou réalisés

Les maçonneries des deux pignons ont été étayées dans les jours qui ont suivi l'incendie. Des frettages installés au travers des baies des roses, ainsi que des contrefiches reposant sur les planchers installés sur les murs bahut permettent le maintien des structures. Par ailleurs, des filets ont été installés afin de pallier toute chute de pierre.

Une purge des parements instables et une aspiration THE /HEPA visant à abaisser le taux de plomb sur les parements seront réalisés préalablement aux travaux de restauration.

Il est également prévu la dépose en démolition de tous les vestiges de couvertures encore présents sur les maçonneries des pignons après qu'ils aient fait l'objet d'un relevé par le couvreur.

Un relevé complet des calepinages et des maçonneries sera à réaliser avant toute intervention.

Travaux à réaliser

Travaux de démontage

Il est prévu le démontage des maçonneries les plus altérées par le dessus (grue mobile au nord et grue à tour au sud, ou système de treuil installé sur l'échafaudage). Les couvertures pyramidales des tourelles, les rampants des pignons, Les parties supérieures des deux pignons ainsi qu'une partie de la rose Sud et la totalité de la rose Nord seront ainsi déposés avec en conservation. Ces blocs, notamment ceux portant décors, seront conservés avec soin afin de permettre aux sculpteurs leur prise d'empreinte en vue de la réalisation de copies.

Les étalements en place feront également l'objet d'un démontage soigné au fur et à mesure des démontages des maçonneries par l'entreprise en charge de la restauration des pignons

Le remplacement complet des couvertures des tourelles impliquera leur démontage jusqu'au niveau du renfort métallique, et il sera par conséquent nécessaire d'étayer et de frotter les colonnettes afin d'éviter toute déformation.

L'auscultation radar du pignon Nord a révélé la présence de renforts métalliques au cœur des maçonneries, de part et d'autre de la rose. Bien que les démontages prévus à ce jour ne concernent pas les zones où sont apparus ces éléments, il conviendra d'y être attentif au moment des démontages.

Certaines barlotières des vitraux sont encore présentes dans les vestiges de la rose Nord. Elles seront déposées avec grand soin afin d'être examinées et restaurées si cela s'avère possible, avant d'être remises en place dans le nouveau vitrail. Au Sud, la barlotière circulaire semble avoir plus souffert des affres du feu. Elle sera cependant déposée avec soin afin d'envisager sa restauration, dans la mesure du possible.

Travaux de restauration sur les parements intérieurs

Parties inférieures

Les parties inférieures des parements intérieurs seront traitées de la même façon que les murs bahuts. Les chantiers test réalisés sur deux travées ont permis de déterminer le protocole à mettre en œuvre afin de restaurer les maçonneries rubéfiées. Les contraintes mécaniques supportées par ces assises sont toutefois sensiblement différentes de celles des murs bahuts (poids des maçonneries soutenues plus important). Par conséquent, les consolidations devront être réalisées avec soin, et les blocs seront changés si nécessaire.

Au préalable, un dépoussiérage par brossage doux de l'ensemble des parements intérieurs avec aspiration simultanée THE à la source sera réalisé pour retirer le plus possible les poussières résiduelles du chantier de sécurisation. Les vestiges d'enduit de plâtre ignifuge présents en partie basse des murs seront purgés à l'outil avec aspiration soignée, de même que les joints pulvérulents. Avant toute opération de restauration, les pierres des trois pignons seront systématiquement sonnées afin de s'assurer que l'incendie ne les ait pas affaiblies en profondeur. Chacune des pierres sera testée à l'aide d'une « baguette de résonance » qui permettra d'obtenir une information qualitative de la réponse acoustique des pierres en œuvre. Une fois les zones déplaquées localisées, il sera réalisé l'implantation des percements (en pente légère vers l'intérieur) qui permettront l'injection du coulis de micro-mortier. La méthode et l'outil de forage (forêt diamanté ...) seront adaptés à l'état des parements et à la résistance des pierres en œuvre afin que les vibrations n'accroissent pas la fragilisation des plaques de pierre (la percussion est à éviter le plus possible). Des solins au mortier de chaux pure seront systématiquement réalisés en rives des pierres déplaquées pour contrôler les pertes et coulures du coulis. La quantité de coulis injecté dans chaque trou sera enregistrée par l'entreprise en charge de l'opération. Un micro-mortier sera ensuite injecté à refus, de façon à permettre la reconstitution de l'adhérence des parements.

Un brochage en fibre de verre pourra être ponctuellement mis en œuvre afin de permettre la restitution de la cohésion des parements. Ces brochages seront scellés à la résine et leur extrémité sera cisailée de manière à augmenter la surface de contact avec la résine. La densité des goujons

sera adaptée en fonction de l'épaisseur et de la taille/du poids des plaques préalablement resolidarisées par coulinage. Les essais réalisés donnent comme ordre de grandeur la mise en œuvre d'environ 1 à 4 goujons par pierre déplaquée. La profondeur de forage va jusqu'à 20cm et les goujons ont une longueur au moins supérieure de 5 cm (soit 23cm) par rapport à la profondeur de la fissure détectée pour assurer un bon ancrage et sont installés entre 5 et 10 mm en retrait du nu, de façon à permettre de boucher le trou avec du mortier.

Les joints de la totalité des maçonneries feront l'objet d'une purge suivi d'un refichage, et seront rejointoyés au mortier de chaux.

Arcs de décharge

Les arcs de décharge servant de support à la totalité des maçonneries des pignons feront l'objet d'une attention particulière. Si l'aspect de celui situé au Sud ne reflète pas de dégradation inquiétante, celui soutenant le pignon nord présente des rubéfiations et casses qui pourraient menacer la stabilité des maçonneries. Le changement complet de blocs reste cependant impossible en raison de la difficulté à étayer les structures supérieures, il conviendra donc d'apporter un soin tout particulier à leur consolidation.

Parties supérieures

Les parties supérieures de la face interne des pignons seront traitées suivant le même protocole. Les changements de pierre sont toutefois plus nombreux dans les assises les plus élevées.

Travaux de restauration des parties supérieures des pignons

Maçonnerie

Les pierres lacunaires et les plus endommagées par l'incendie feront l'objet d'un remplacement en totalité ou par bouchons. Un calepin sera préalablement établi et validé par l'ACMH et les blocs seront ensuite fournis, taillés et posés au mortier de chaux, additionné d'hydrofuge pour les parties les plus exposées que sont les pas de moineaux, les chaperons des rampants et les couvertures des tourelles ajourées. Les greffes de pierre seront posées à joint marbrier, et recevront une taille de finition et patine d'harmonisation afin d'être le plus discrètes possible.

Sur les pierres moins endommagées, il est prévu la mise en œuvre de ragréages ponctuels en recherche après purge. De la même façon que pour les bouchons, un traitement de surface et vieillissement pour raccordement discret au parement sera réalisé. En cas de ragréages profonds (supérieur à 30mm), il est prévu la pose d'une armature laiton ou inox.

Les blocs fracturés ou fissurés seront refichés, et la totalité des joints sera purgée et refaite à neuf au mortier de chaux, notamment lorsque la présence de plâtre ou de ciment est avérée.

Enfin une patine d'harmonisation sera appliquée sur l'ensemble des parements restaurés et neufs et un traitement biocide préventif le sera également sur les éléments neufs en saillie.

Sculptures

Un état de diagnostic complet des éléments sculptés sera préalablement établi, comprenant la vérification de la présence éventuelle de sel, et la proposition d'un protocole de restauration. Les éléments les plus fragiles susceptibles de tomber ou de disparaître lors des opérations de nettoyage seront pré-consolidés.

Le nettoyage des parements sculptés sera réalisé en fonction du niveau d'encrassement et différentes techniques seront testées afin de déterminer le meilleur protocole (micro-abrasion au corindon, nettoyage laser nouvelle génération, compresseurs suivant le protocole établi pour les chapelles test). Un dessalement ponctuel sur les efflorescences salines actives pourra être effectué par compresseurs à base de Kaolin, après purge des joints, (notamment ceux contenant du plâtre).

Les parements conservés sculptés seront consolidés par injection PLM, pose de goujons et réalisation ponctuelle de solins à base de chaux, selon cas de figure. Des consolidations ponctuelles des épidermes des parties sculptées légèrement altérées seront faites par bio-minéralisation.

Localement, et avec parcimonie, des ragréages ponctuels à base de poudre de pierre et chaux, seront mis en œuvre. Les surfaces finies seront traitées pour raccordement discret au parement. En cas de ragréages profonds (supérieure à 30mm), il est prévu la pose d'une armature laiton ou inox (Solution à éviter autant que possible).

Une patine d'harmonisation sera appliquée sur l'ensemble des parements restaurés et neufs et un traitement biocide, algicide et fongicide préventif sur l'ensemble des éléments sculptés.

Roses

La rose du pignon Nord du transept, de très faible épaisseur et présentant un nombre important de percements, a profondément souffert de l'incendie. Les nombreuses fissures et délaquages observés sur les pierres remettent aujourd'hui en question la stabilité de l'ensemble. De ce fait, la rose sera ainsi que la frise florale l'encadrant, remplacée en totalité. Les rosaces sculptées formant des inclusions dans les remplacements seront, autant que cela se peut, déposées en conservation en vue de leur copie.

La rose du pignon Sud du transept pourra être partiellement sauvegardée. Seuls seront remplacés les réseaux de la rose polylobée centrale, les lancettes trilobées rayonnant au pourtour de ces derniers, et une partie des trilobes pleins et de la corniche à crochets, lorsque ces éléments ont été affectés par les températures excessives des fumées s'échappant par la rose. Les autres éléments de décor seront, autant que possible, conservés et consolidés.

Les blocs des roses seront posés au plomb.

Des vitraux losangés à verres blancs, à l'identique de ceux existants avant le sinistre, seront restitués au droit des deux roses des combles du transept et de l'oculus du pignon Ouest de la nef. Les barlotières triangulaires de la rose Nord, déposées en conservation, seront autant que possible restaurées et remises en place, après brossage et passivation des fers. La barlotière circulaire de la rose Sud semble plus affectée, mais sa dépose en conservation est également prévue, afin de vérifier son état et d'étudier sa possible remise en place dans les nouvelles maçonneries.

Travaux de restauration des tourelles

Les pyramidions des tourelles ornant les pignons des croisillons du transept seront remplacés à neuf. Les décors sculptés, notamment à la naissance des gâbles, seront autant que cela se peut, conservés et consolidés. Lorsque le corps de la figure sera sain, de simples greffes compléteront les parties manquantes (têtes, etc.).

Le dispositif d'enrayure métallique placé à l'intérieur des tourelles sera conservé et traité en place : les scellements seront vérifiés et éventuellement repris si nécessaire, avant qu'un brossage et un traitement anti-corrosion ne soit appliqué.

Les statues

Les statues ornant le pignon Sud (saint Etienne, le Christ et saint Martin) et Nord (saint Denis) ont été peu affectées par l'incendie. Elles sont actuellement stockées en entrepôt.

Les travaux consisteront à les restaurer dans un atelier mis à disposition sur site afin de permettre leur repose sur les pignons restaurés. Au préalable, les statues seront dépolluées, après pré-consolidation des parties les plus fragiles, par application de compresses ou latex. Elles seront ensuite nettoyées par application de produits algicide et fongicide, pour supprimer les algues et lichen et, ponctuellement par micro-abrasion au corindon, pour supprimer les croûtes noires et autres dépôts encore présents après application des compresses.

Si la documentation d'archives permet, à termes de renseigner avec précisions l'ensemble de ces statues créées par Eugène Viollet-le-Duc, les parties manquantes ou épaufrées (main du Christ, portion de drapés, etc.) seront restituées par greffes. Un goujon assurera le lien entre la partie ancienne et les parties neuves vieillies à l'outil et un joint marbrier dissimulera, autant que possible, cette restauration.

Les parties légèrement pulvérulentes ou partiellement rubéfiées seront stabilisées, après dessalement par bio-minéralisation. Les liens métalliques consolidant les parties les plus frêles à l'image de ceux entre le visage et l'épaule de saint Landry et la crosse seront brossés et traités anti-corrosion.

Enfin, les socles des statues seront refaits à neuf. Les goujonnages existants assurant la liaison entre le piédestal et les œuvres sculptées, seront si possible réemployés après brossage et passivation.

Approvisionnement en pierre

Les natures des pierres mises en œuvre dans la cathédrale sont connues par le biais des attachements figurés, couplés par les analyses qui ont été menées sur différents échantillons.

Les carrières ayant servi tant à la construction de la cathédrale à l'époque médiévale, qu'à sa restauration par Viollet-le-Duc au XIX^{ème} siècle ne sont pour la plupart plus en activité. La restauration de la cathédrale nécessitant un volume important de pierre neuve, il a fallu déterminer les possibilités qui existaient de remplacement ou substitution de pierres. Une mission réalisée par le BRGM (dont le rapport sera fourni aux titulaires des lots maçonnerie et sculpture) a permis de recenser les carrières susceptibles de correspondre le mieux aux maçonneries de la cathédrale, tant d'un point de vue esthétique que mécanique.

Pour les pignons, les pierres qui correspondent le mieux aux maçonneries en place sont les suivantes :

Pas de moineau/chaperon/crochets : Pierre H4 dure ou H4 coquiller de la Croix-Huyart

- Roses : Liais ½ fin de Saint-Maximin
- Maçonnerie courante : Roche Franche fine de Saint-Maximin
- Couvertures des tourelles ajourées : Roche franche fine de Saint-Maximin ou pierre de Bonneuil banc franc (1/2 fine)
- Sculptures et greffes : Pierre H4 dure de la Croix-Huyart



5. Les moyens d'accès et protections diverses

Les moyens d'accès

Les échafaudages de pied permettant l'accès aux pignons (face extérieure, intérieure, et tourelles), ainsi que les échafaudages situés sous le plancher, seront à la disposition des entreprises. L'ensemble des ouvrages connexes avec les agrès nécessaires (sapines, escaliers, planchers complémentaires sous voûtes, etc...) seront mis gracieusement à disposition des différents lots.

L'ensemble des moyens d'accès aura été mis en place lors des travaux de sécurisation.

Les moyens d'accès utiles à la restauration des pignons sont les suivants :

Un échafaudage suspendu aux planchers provisoires au contact des pignons Nord et Sud pour permettre la consolidation des maçonneries inférieures des pignons, y compris les plateformes sécurisées. L'accès se fera par le dessus depuis les planchers bois provisoires, ou par les accès à l'extrados des voûtes depuis les escaliers des faces orientales des transepts ;

Un échafaudage de pied installé au droit des façades des transepts et courant autour des murs gouttereaux permettra la restauration des façades extérieures des pignons, ainsi que celles des tourelles. L'intérieur des pignons sera accessible par un échafaudage construit sur les planchers provisoires ;

Une liaison entre les deux échafaudages de pied sera installée afin de permettre la mise en place de palans et treuils qui serviront au démontage et au remontage des maçonneries ;

Les protections

Les entreprises devront mettre en place toutes les protections nécessaires à une réalisation optimale des travaux (co-activité possible avec les travaux de consolidation des murs bahuts et des voûtes) et des ouvrages fragiles (sculptés et moulurés) non concernés par l'intervention.

• • •

5

Allotissement





Allotissement

Cette opération comportera **9 lots**. Ces lots seront divisés en plusieurs marchés déterminés suivant des localisations géographiques détaillées sur les plans ci-après :

LOT 3_{TP}*	Échafaudages et lifts	<i>1 marchés</i>
LOT 4_{TP}*	Maçonnerie/Pierre de taille	<i>2 marchés</i>
	<i>VTE/MB Voûtes, appuis flèches et murs bahuts, compris chemin de ronde (garde-corps et frise à crochets)</i>	
	<i>PIGNONS Deux pignons des deux bras de transept</i>	
LOT 5_{TP}	Sculpture neuve	<i>1 marché</i>
LOT 6_{TP}	Restauration de sculpture	<i>1 marché</i>
LOT 7_{TP}*	Charpente bois	<i>1 marché</i>
LOT 9_{TP}*	Couverture en plomb	<i>1 marché</i>
LOT 11_{TP}	Vitraux/serrurerie	<i>1 marché</i>
LOT 16_{TP}	Peintures murales – dorure	<i>1 marché</i>
(TOTAL		10 marchés)
LOT 18	Contrôles laboratoire	<i>1 marché</i>
	Ce lot ne sera pas attaché à une sous-opération en particulier mais sera transversal sur l'ensemble de l'opération de reconstruction.	

NOTA

La numérotation des lots correspond à une nomenclature générale pour l'ensemble du chantier de « Reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris à la suite de l'incendie du 15 avril 2019 ». Un indice, suivant le numéro de lot, indique l'opération. Pour cette opération, intitulée « La flèche et le transept », l'indice retenue est TP.

La liste complète des lots du chantier de « Reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris à la suite de l'incendie du 15 avril 2019 » est jointe en annexe à la fin du présent chapitre.

*Plusieurs prestations de ces lots seront à réaliser en 2 x 8 h

• • •

ANNEXE – Allotissement général de l’opération « Reconstruction de la cathédrale Notre-Dame de Paris à la suite de l’incendie du 15 avril 2019 »

N°Lot	Intitulé du lot
Lot n°01	Mutation des bases vie « propre » (BV1) et « plomb » (BV2ter)
Lot n°02	Installation de chantier
Lot n°03	Échafaudages & lifts
Lot n°04	Maçonnerie/Pierre de taille
Lot n°05	Sculpture neuve
Lot n°06	Restauration de sculpture
Lot n°07	Charpente bois
Lot n°08	Charpente métallique et défense incendie passive
Lot n°09	Couverture en plomb
Lot n°10	Paratonnerre
Lot n°11	Vitraux/serrurerie
Lot n°12	Ferronnerie d'Art
Lot n°13	Menuiserie
Lot n°14	Cloches
Lot n°15	Horlogerie
Lot n°16	Peintures murales-dorure
Lot n°17	Aménagements intérieurs
Lot n°18	Contrôle laboratoire
Lot n°19	Dispositifs anti-pigeons
Lot n°20	Restauration d'objets mobiliers, sculpture et statues
Lot n°21	Restauration d'objets menuisés et parquet
Lot n°22	Lustrerie
Lot n°23	Courants faible (CFA)
Lot n°24	Courants forts (CFO)
Lot n°25	Chauffage/ventilation/plomberie (CVC/PLB)
Lot n°26	SSI
Lot n°27	Plateformes élévatrices
Lot n°28	Protection incendie (Brumisation)
Lot n°29	VRD