

# Notre-Dame de Paris : matériaux et reconstruction

*Architectes en chef des Monuments Historiques.*

## 1 Le matériau pierre

### 1.1. L'état des lieux après l'incendie

Lorsque l'incendie a eu lieu le 15 avril 2019, les charpentes en feu sont tombées sur les voûtes de la cathédrale et ont entraîné en partie leur effondrement. Sur la **figure 1**, les parties blanches sont les voûtes manquantes : la voûte<sup>1</sup> de la croisée qui s'est effondrée avec le tabouret de

la flèche, côté nef<sup>2</sup>, l'effondrement d'un arc-doubleau<sup>3</sup> lorsque la flèche s'est couchée sur les voûtes, et la perte d'un voûtain du transept Nord causée par la chute d'une ferme de charpente de Viollet-le-Duc. Il ne restait plus que des décombres sur les voûtes,

---

2. La nef est une salle d'une basilique ou d'une église allant du portail à l'hémicycle (pour la basilique), de la façade à la croisée du transept ou à l'entrée du chœur (pour l'église avec ou sans transept) et qui est fermée par deux murs latéraux.

3. Un arc-doubleau est un arc perpendiculaire à l'axe de la voûte et appuyé contre la face intérieure des murs.

---

1. Ouvrage de maçonnerie cintré, fait de pierres spécialement taillées, s'appuyant sur des murs, des piliers, des colonnes, et servant de couverture.

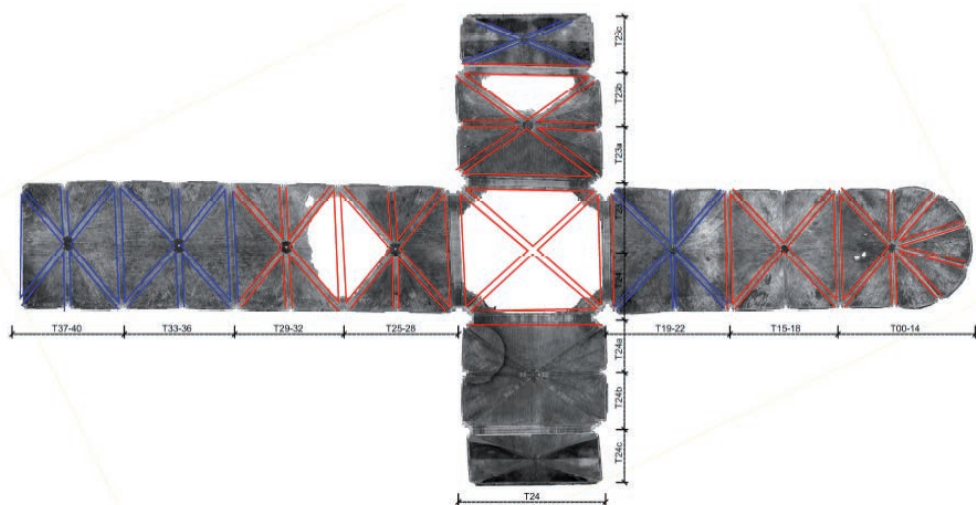


Figure 1

Les voûtes de Notre-Dame après l'incendie ; blanc : voûtes manquantes ; bleu : voûtes à mettre sur cintre ; rouge : voûtes fragilisées par l'incendie.

constitués de vestiges de bois et ferrures de charpente et de plomb fondu venant des couvertures. Les hautes températures et les eaux d'extinction ont aussi dégradé les parements de pierre des murs gouttereaux et l'extrados des voûtes malgré la présence d'une chape de plâtre qui protégeait ces dernières.

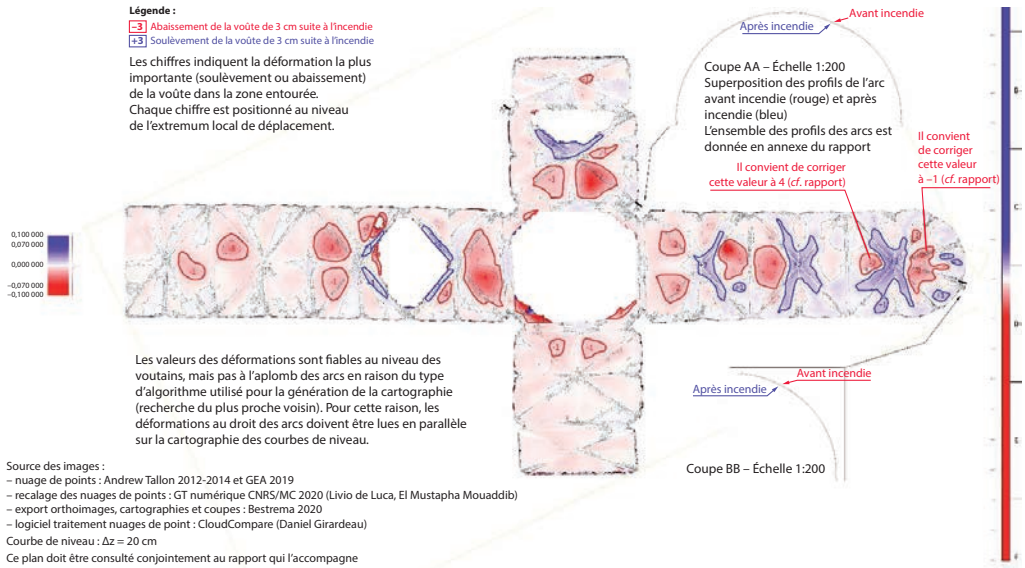
Les voûtes les plus dégradées par le feu mais encore en place sont indiquées en rouge sur la **figure 1** et ont été étayées par des cintres en bois, installés sous les arcs dans le cadre des travaux de sécurisation tandis que les zones bleues indiquent des voûtes moins dégradées qui n'ont de ce fait, pas toutes été étayées aujourd'hui.

La **figure 2** est une cartographie qui représente la modification de la topographie des voûtes avant et après incendie par comparaison des relevés

altimétriques. On distingue nettement des zones d'affaissement (en rouge) et de soulèvement (en bleu) des maçonneries consécutives aux mouvements qu'elles ont subis du fait de leur dilatation thermique liée aux hautes températures de l'incendie. En effet, les voûtains se sont dissociés des arcs puis sont retombés, refroidis par les eaux d'extinction (**figure 3**).

La phase de sécurisation de la cathédrale a duré près de deux ans pendant lesquels on a procédé à un déblaiement<sup>4</sup>, une aspiration des voûtes en extrados pour ensuite sécuriser les franges des parties effondrées (**figure 4**). Ces dernières ont été consolidées avec du plâtre fibré et de la filasse

4. Action de déblayer : débarrasser un lieu de ce qui l'encombre, l'obstrue.



**Figure 2**

Cartographie des déformations des maçonneries après l'incendie.



**Figure 3**

Zone d'inflexion sur un voutain du chœur.

pour encapsuler les voussoirs (pierres qui constituent les voutains) qui menaçaient de tomber, et pour permettre ensuite une intervention

sécurisée par le dessous pour le montage des échafaudages intérieurs et des cintres en bois que l'on peut voir sur la **figure 5**.

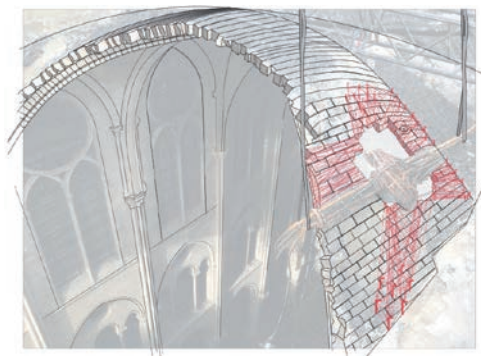


Figure 4

Consolidation des franges lacunaires par le dessus.

Figure 5

Croisée du transept vue de l'intérieur de la cathédrale pendant la consolidation.



Pendant la phase de sécurisation, la maîtrise d'œuvre a dressé un diagnostic des parties altérées : principalement des voûtes et des murs affectés par l'incendie mais également des pignons du transept.

Certains désordres étaient antérieurs à l'incendie mais ils concernaient surtout les ouvrages extérieurs. Concernant l'intérieur (figure 6), les désordres principaux constatés étaient des affaissements





Figure 6

Mur bahut, angle sud-ouest et extrados du chœur.

ponctuels des voûtains, des fissures, des déplacements<sup>5</sup> ou délaminations et des dégradations physico-chimiques de la pierre, identifiables par des changements de couleur corrélés à leur exposition aux températures de l'incendie, phénomènes concernant à la fois les murs bahuts et les voûtes. Certaines couleurs correspondent à des températures d'exposition de l'incendie qui étaient de l'ordre de 1 000 °C, ce qui a été confirmé par l'analyse des charbons de bois incendiés (par spectrométrie Raman, *figure 7*)<sup>6</sup>.

Le même travail de cartographie réalisé sur l'intrados des voûtes montre (*figure 8*) des pathologies différentes car pendant très longtemps, il y a eu des résurgences d'humidité liées aux infiltrations

de l'eau des pompiers et de leur exposition aux intempéries. Cela a entraîné des cristallisations de sels dans les zones d'évaporation à la surface de l'intrados, notamment la transformation des pierres calcaires des voûtains en gypse caractérisée par une dégradation de l'épiderme de la pierre mais aussi par une perte des nus de taille qui constituent la mémoire des mises en œuvre et techniques anciennes/historiques.

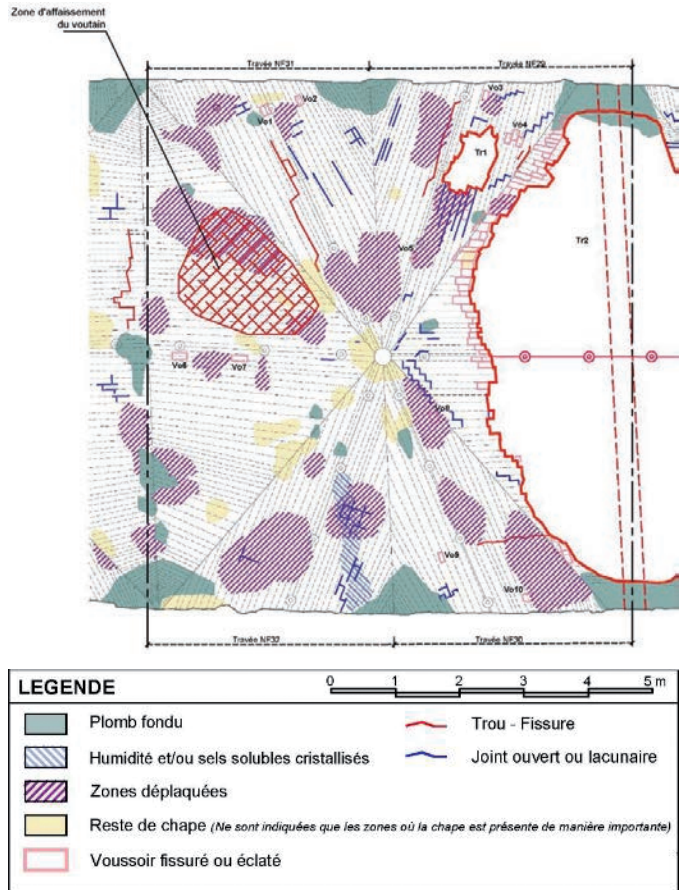
Il faut savoir que les eaux d'extinction de l'incendie, le choc des charpentes et le feu ont dégradé la chape de plâtre qui avait pour objectif de protéger les voûtes de l'incendie. Ces dernières constituant elles-mêmes un bouclier contre le risque d'incendie des charpentes. Un certain nombre de grandes cathédrales françaises au cours de l'histoire ont brûlé : la cathédrale de Reims

5. Rupture d'adhérence entre la surface de la pierre et sa profondeur.

6. J.-N. Rouzaud et D. Deldicque.

Figure 7

Exemple de cartographie dressée par la maîtrise d'œuvre des pathologies identifiées sur l'extrados des voûtes.



au xv<sup>e</sup> siècle, ayant à nouveau brûlé durant la Première Guerre mondiale ; la cathédrale de Metz au xix<sup>e</sup> siècle, celle de Chartre aussi... ces catastrophes sont malheureusement statistiquement récurrentes. Pour améliorer la protection des voûtes contre le feu, ces chapes de plâtre ont donc été mises en œuvre probablement assez tôt dans l'histoire et probablement de manière systématique au xix<sup>e</sup> siècle (ordonnance d'Henri IV ayant décidé d'habiller tous les pans de bois en plâtre pour limiter les risques d'incendie à l'intérieur de la ville).

Le problème, à Notre-Dame de Paris, est que le plâtre a été dissous par les eaux d'extinction de l'incendie, qui elles-mêmes comportaient vraisemblablement des adjuvants à base de sels pour optimiser leur efficacité. Quand l'eau s'est évaporée, ces sels ont cristallisé dans la zone d'évaporation de l'intrados de la voûte comme on peut le voir sur la **figure 9** (présence de gypse mais aussi de sels solubles hygroscopiques et expansifs – sulfate de sodium, nitrate de potassium/ salpêtre...).

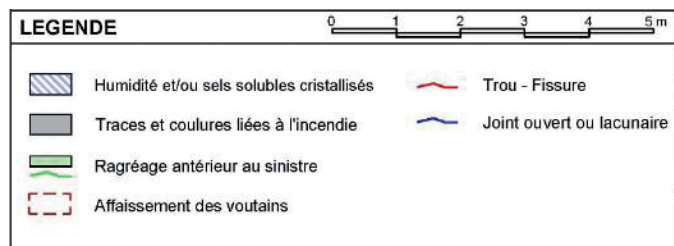
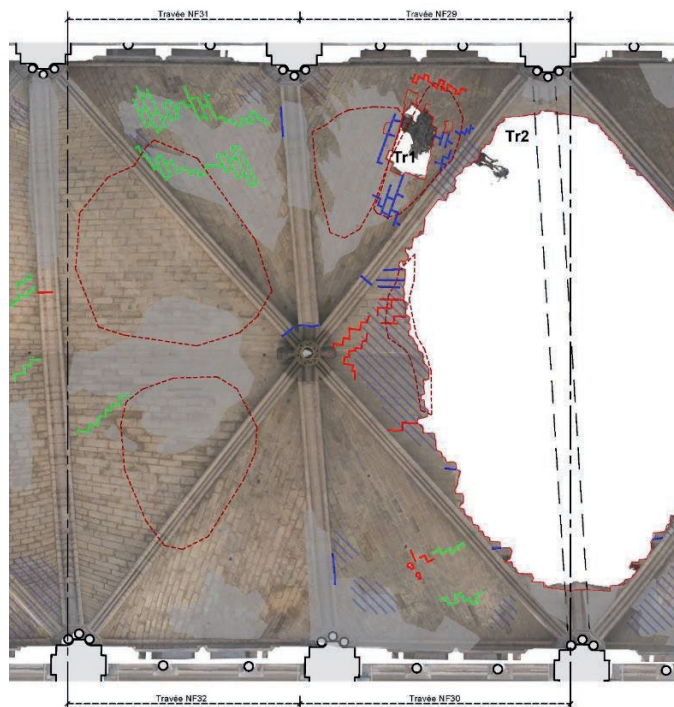


Figure 8

Cartographie des pathologies en intrados.



Figure 9

Zone d'humidité importante (à gauche) de l'intrados de la voûte et cristallisation des sels (à droite).

La saturation des sels dans le système poreux fait éclater l'épiderme de la pierre, avec des desquamations<sup>7</sup> pour conséquence (*figure 10*). Cette pathologie a été accentuée à Notre-Dame par le fait que les joints avaient été refaits au XIX<sup>e</sup> siècle avec des mortiers hydrauliques assez étanches et que l'évaporation s'est donc faite essentiellement par la pierre.

Ce phénomène de dégradation évolutive (constitution de gypse à partir des sulfates libérés par la chape de plâtre ; le gypse cristallisant à 98 % d'humidité) ou cristallisation des sels solubles lors des périodes d'assèchement des voûtes (étés 2019-2020) sont récurrents, du fait de la difficulté de bien étancher le bâtiment et plus particulièrement,

7. Élimination des couches superficielles de l'épiderme sous forme de petites lamelles (squames).

la zone de la croisée du transept, ce en raison du grand échafaudage (démonté en 2021).

Pour préciser notre diagnostic, plusieurs études scientifiques ont été menées en partenariat avec des laboratoires d'analyse des matériaux privés sous le contrôle du LRMH et des architectes.

## 1.2. Analyses de la nature et de l'état des pierres

La cartographie radar (*figure 11*) de quatre assises de l'élévation du mur bahut intérieur met en évidence des zones plus ou moins denses d'anomalies, repérées après l'incendie à différentes profondeurs : de 0 à 5 cm affectant à peu près 80 % du parement, anomalies ponctuelles sur 5 à 10 cm de profondeur et des anomalies profondes plus rares entre 10 et 17 cm de



Figure 10

*Desquamation de l'épiderme et joints anciens perméables.*



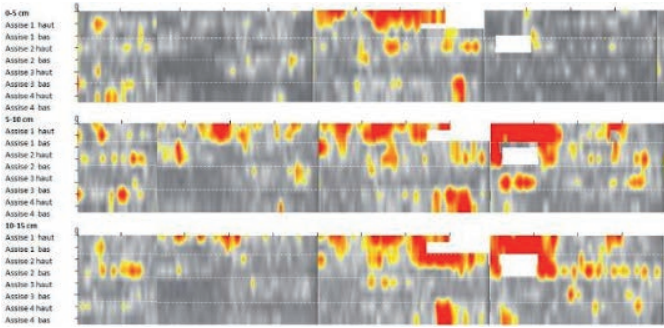


Figure 11

*Cartographie des discontinuités les plus marquées par tranche de profondeur.*

profondeur (moins de 5 % de l'altération du mur). Ces dernières restent très localisées autour des événements (zones d'aération). C'est le cas notamment des zones qui apparaissent en rouge, qui correspondent à des points où le feu était particulièrement oxygéné.

Il faut savoir que les zones des murs bahuts correspondent au bas des voûtes, et que les charpentes qui se sont effondrées, se sont fragmentées puis ont roulé vers le bas des voûtes où elles se sont consumées. Il y a donc eu des brasiers et des températures élevées au pied des murs bahuts et le long de la périphérie de ces murs pendant un temps relativement long et donc, une altération plus importante des parements verticaux. Les délaminations sont la conséquence de contraintes de cisaillement à l'interface entre la pierre chaude et la pierre froide.

L'épaisseur des voûtes a perdu 2 à 3 cm à l'extrados au contact du feu. Il y a eu d'abord une dilatation thermique de l'épiderme de la pierre puis un

retrait lors du refroidissement, entraînant une fissuration interne parallèle au parement et un déplacement. Ce constat a été fait sur les voûtes et dans des proportions plus importantes sur les murs bahuts (fissurations plus profondes). Actuellement, un consortium scientifique travaille en parallèle de la maîtrise d'œuvre, notamment des voûtes, en modélisant leur comportement structurel en relation avec leur exposition à des températures d'incendie pendant une période donnée (1000 °C pendant 1 heure, 500 °C pendant 5 ou 6 heures) puis après exposition aux eaux d'extinction.

Des carottages ont été effectués afin d'identifier les caractéristiques de la fissuration (orientation, profondeur, etc.) mais aussi afin d'analyser l'évolution des propriétés physiques (résistance, porosité, etc.) des pierres en œuvre. Ces études ont été réalisées par les laboratoires LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques)

et BPE. Ils ont nourri le projet de restauration de la maîtrise d'œuvre, notamment les hypothèses de résistance des murs aux contraintes des charges transmises par la toiture (*figure 12*).

Ces carottages réalisés sur des zones représentatives des murs bahuts ont permis de conclure au maintien en place des maçonneries dégradées, seules certaines pierres ayant un rôle structurel spécifique étant remplacées (supports des pièces de charpente). Ils ont aussi permis d'identifier la nature des pierres en œuvre pour trouver les pierres de substitution. La *figure 13*, montre les transformations de faciès des pierres en œuvre en fonction de la température de l'incendie.

La cartographie de la *figure 14* présente l'origine de l'ensemble des pierres utilisées dans la cathédrale. Néanmoins, la plupart des carrières médiévales et celles utilisées par Viollet-le-Duc<sup>8</sup> au XIX<sup>e</sup> sont maintenant fermées et il faut recourir à d'autres carrières dont les pierres présentent des caractéristiques identiques.

Une campagne de recherche a donc été menée en partenariat avec le BRGM pour trouver ces carrières et des pierres ayant des caractéristiques compatibles par leur aspect et leurs propriétés physico-chimiques à celles d'origine.

8. Eugène Viollet-le-Duc : architecte français mort en 1879 ayant restauré Notre-Dame de Paris et plusieurs autres monuments.



Figure 12

Après carottage, analyse pétro-physiques des maçonneries.

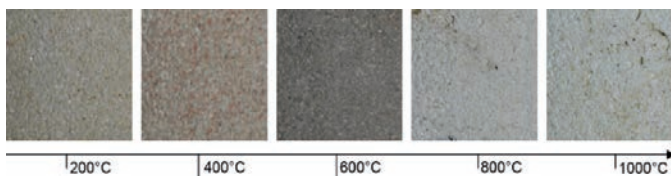


Figure 13

Transformation des faciès des pierres en œuvre en fonction de la température de l'incendie.



elles étaient à Paris à proximité du chantier, au XVIII<sup>e</sup> siècle dans les environs très proches, dans le Vexin. Au XIX<sup>e</sup> siècle, Viollet-le-Duc a quant à lui élargi les choix des gisements de pierre pour faire face aux besoins conséquents de son chantier de reconstruction.

### 1.3. Projet de reconstruction et de restauration

Après ces différentes études menées sur les pierres, l'analyse de projets analogues de reconstruction a permis une familiarisation avec les problématiques de reconstruction des voûtes qui n'avaient plus été pratiquées depuis la Seconde Guerre mondiale. Les travaux de restauration des grandes cathédrales, notamment dans le nord de la France, consécutifs aux destructions des deux guerres mondiales sont comparables aux problématiques de Notre-Dame de Paris aujourd'hui. La **figure 15** présente la reconstruction des voûtes de la cathédrale de

Soissons dans les années 1930 et montre la pose des claveaux sur les cintres en bois.

La **figure 16** présente le projet de reconstruction de la voûte de la croisée : des cintres de bois principaux reliés entre eux par des cerces (cercles de bois) secondaires qui permettront de régler la forme des voûtains et aux maçons d'intervenir.

#### 1.3.1 Restauration et consolidation des voûtes

##### A) DESSALEMENT

Une intervention d'urgence a dû être programmée afin de sauvegarder et de dessaler le parement de l'intrados des voûtes. Un schéma de la méthode utilisée est décrit en **figure 17**. Elle consiste à appliquer une compresse (sorte d'enduit sacrificiel) à base de sable et de kaolin contre la paroi des voûtes. Les sels sont absorbés par cette compresse dans laquelle ils migrent, ce qui permet d'éviter la dégradation de la pierre, notamment la transformation du calcaire en



Figure 15

Exemple de la cathédrale de Soissons vers les années 1930 : reconstruction des voûtes de la nef, pose des voussoirs à la cerce mobile.





les espaces laissés libres par la suppression du mortier des joints, ce qui permet d'optimiser son action sur les sels.

L'intérêt majeur de la compresse a été sa grande résistance à la pression des cristallisations de sels, lui permettant d'adhérer pendant plusieurs mois et d'éviter toute nouvelle formation de gypse dans les parements de pierre. Cette compresse a aussi permis d'éliminer des sels solubles délétères qui auraient pu contribuer à la dégradation des parements.

Le processus de dessalement par compresse doit être renouvelé jusqu'à ce que les taux des sels solubles diminuent en dessous des seuils pathogènes.

Il n'a cependant pas été nécessaire de renouveler les compresses, hormis dans les zones inondées accidentellement par des orages et qui ont eu pour conséquence leur dissolution.

L'objectif de cette intervention est de mettre les voûtes à l'abri de la dégradation par les sels/gypse jusqu'au moment de leur restauration.

La purge des mortiers de finition a permis de constater que l'état d'une proportion importante des joints de pose des voussoirs était très mauvais. Cet état dégradé est en partie dû au traumatisme des voûtes sous le choc de l'effondrement des charpentes, à la fragmentation consécutive à la dilatation thermique des voûtains exposés aux hautes températures de l'incendie, enfin au lessivage des mortiers de chaux aérienne qui les constitue, par les eaux d'extinction

de l'incendie, puis par les eaux pluviales dans les zones exposées aux intempéries.

#### B) CONSOLIDATION

Pour rendre aux voûtes leur capacité structurelle amoindrie par l'incendie, leur renforcement et la reconstitution de leur épaisseur initiale (qui a été réduite d'environ 20 % par les déplacements) ont été proposés. Une chape de chaux fibrée recouvrant l'extrados a été mise en œuvre et est ancrée dans les joints afin d'optimiser son adhérence en lui donnant un meilleur accrochage avec la voûte pour fonctionner un peu comme un système réticulé en relation avec les voussoirs.

La chaux sélectionnée contient de la pouzzolane<sup>10</sup> afin de lui donner l'hydraulicité qui permet sa résistance. Enfin, il est suggéré de protéger cette chape et la voûte restaurée par une chape de plâtre contre les conséquences d'un éventuel incendie.<sup>11</sup>

Dans les zones d'affaissement des voûtes, la résistance pourra être renforcée avec un filet armé, connecté avec des goujons en fibre de verre, scellés dans les joints.

#### 1.3.2. Restauration des murs bahuts

Les murs bahuts constituent la partie supérieure qui se situe

10. La pouzzolane est une roche volcanique légère et poreuse.

11. Cette chape de plâtre a finalement été abandonnée, son usage n'étant plus nécessaire du fait de l'élaboration du dispositif de protection incendie de la charpente restituée et au regard du risque de re-pollution des voûtes en cas d'exposition accidentelle à l'eau.



Figure 18

État avant (à gauche) et après (à droite) restauration (chantier test préalable aux travaux).

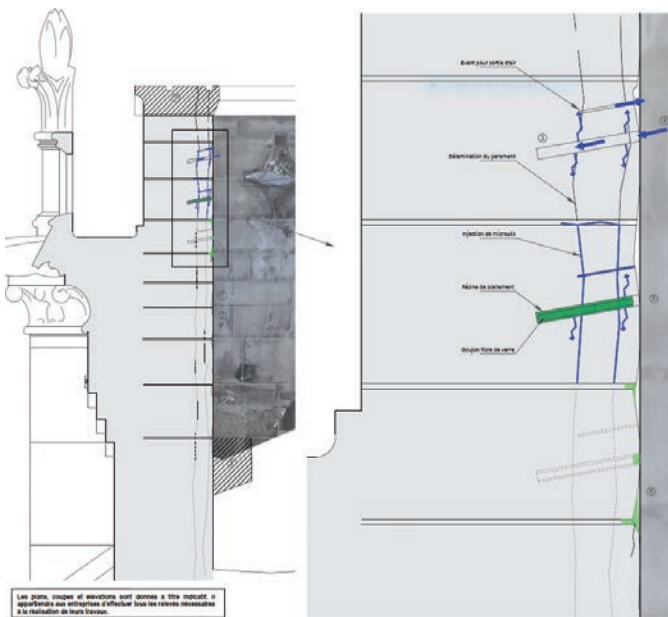


Figure 19

Principe de consolidation/ restauration des murs bahuts.

au-dessus des voûtes. Puisque les altérations n'affectent pas leur capacité structurelle, il a été préconisé de conserver/figer l'état d'altération des parements en se limitant à une opération de consolidation. Cette dernière est formalisée par un protocole dont l'objectif est de solidariser à nouveau les éléments déplaqués par les

hautes températures de l'incendie. Il commence en premier lieu par un dépoussiérage fin des parements afin d'identifier les zones fissurées et/ou déplaquées. Il faudra ensuite réaliser une première série de forages à travers les pierres déplaquées, avec une faible pente vers l'intérieur, pour injecter un coulis de micro-mortier thixotropique

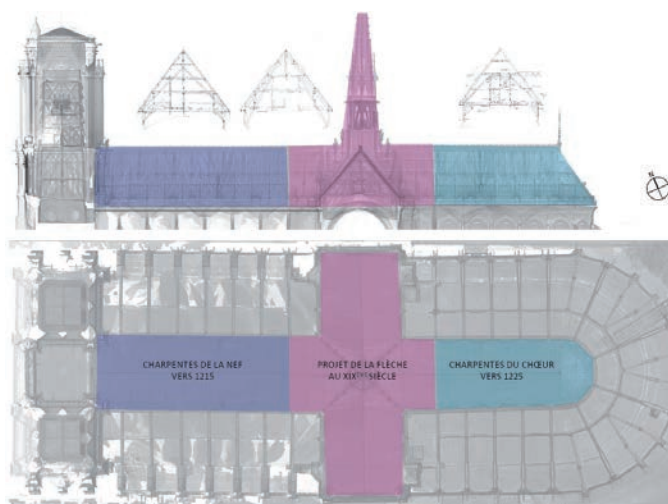


Figure 20

La forêt : les charpentes de Notre-Dame de Paris.

de chaux (LEDAN TA2) qui se diffusera dans le réseau de fissures. Une seconde série de forage permettra alors de sceller des tiges en fibre de verre à la résine ; elles maintiendront les couches déplaquées sur les parties saines/stables de la pierre (figure 19).

La dernière intervention sur la structure des murs bahuts concernera les pierres sommitales aussi appelées pierres d'arase qui seront remplacées en totalité en pierre neuve. Leur état étant particulièrement dégradé du fait de leur exposition sur deux faces à l'incendie, leur conservation n'était plus envisageable pour répondre à leur objectif premier, à savoir : servir de base à la charpente restituée.

## 2 Le matériau chêne

Le matériau chêne intervient dans la reconstruction des charpentes de la cathédrale

Notre-Dame de Paris : à la fois dans les charpentes qui avaient été érigées au XIX<sup>e</sup> siècle (la flèche et les bras de transept), mais aussi dans les charpentes disparues qui dataient du Moyen Âge (le chœur et la nef).

### 2.1. La forêt disparue

Ce que l'on appelle la forêt n'est pas un seul ensemble de charpente mais finalement trois ensembles issus de périodes de construction distinctes (figure 20) :

- les charpentes de la nef, édifiées aux alentours de 1215 ;
- les charpentes du chœur, construites vers 1180, puis démontées et reconstruites vers 1225, ce dernier état ayant subsisté jusqu'au soir de l'incendie ;
- les charpentes de la flèche, des transepts et des travées de la nef et du chœur les plus proches de la flèche, reconstruites entre 1858 et 1864 par Viollet-le-Duc.



Le dessin de la flèche de Viollet-le-Duc était inspiré de celui de la flèche du XIII<sup>e</sup> siècle, tel que l'avait analysé et compris l'architecte. De même, il s'était inspiré de celui des charpentes gothiques du chœur pour composer les charpentes des bras du transept.

Les dispositions des charpentes médiévales qui couvraient les bras de transept sont totalement inconnues.

L'ensemble Viollet-le-Duc (flèche et bras de transept) et l'ensemble médiéval (chœur et nef) avaient en commun la nature des bois en œuvre, d'excellente qualité : des bois de brin, très droits, comportant très peu de défauts et très peu de nœuds. Entre les deux ensembles, la technique de transformation diffère : la flèche et le transept étaient réalisés en bois de sciage, issus d'un sciage mécanique à vive arête (*figure 21*) alors que les bois du chœur et de la nef étaient des bois verts (frais d'abattage) taillés manuellement, à la doloire.

L'intervention d'Eugène Viollet-le-Duc au XIX<sup>e</sup> siècle sur la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris formait un ensemble cohérent, indissociable structurellement. Dans cette logique, la CNPA<sup>12</sup> 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. »

Pour les charpentes dites médiévales, la CNPA, qui s'est tenue le 25 mars 2021, a opté pour un parti de reconstruction en reconstitution raisonnée.

« À l'unanimité moins quatre abstentions, la Commission nationale du patrimoine et de l'architecture se prononce en faveur de la proposition [...] de restauration en reconstitution raisonnée, consistant en une reconstitution fidèle des charpentes, dans leur état Viollet-le-Duc pour le transept et la flèche, et dans leur état médiéval pour la nef et le chœur, sans reproduire les éléments correspondant à des modifications ou réparations de la charpente originelle, destinés à pallier



Figure 21

Les bois du fût de la flèche.

12. Commission Nationale du Patrimoine et de l'Architecture.

*des accidents survenus au fil du temps et qui n'auraient plus d'utilité pour la stabilité de l'ouvrage. Concernant la découpe du bois, elle valide le principe d'un façonnage par sciage pour la charpente de la flèche et du transept, et d'un dégrossissage par sciage puis d'une finition manuelle pour la charpente de la nef et du chœur. »*

## 2.2. La restauration des charpentes

La restauration des charpentes a pour objectif la restitution, le plus fidèlement possible, des charpentes disparues dans leur état de référence mais également la restitution des savoir-faire, façons et procédés ancestraux utilisés et mis en œuvre à l'occasion de la construction originelle des charpentes incendiées. Ils sont en effet indispensables à la bonne satisfaction de l'objectif de restitution fidèle des ouvrages de charpente disparus, enjeu principal de cette opération.

Les très bonnes caractéristiques mécaniques du chêne (grande résistance mécanique et souplesse), en font un matériau parfaitement adapté aux contraintes de l'édifice. L'usage de bois longs est généralisé : les pièces de plus de 13 m de longueur sont courantes (extraits notamment).

Les observations sur les ouvrages (charpentes gothiques et charpentes du <sup>XIX</sup><sup>e</sup> siècle) montrent que la conception des charpentes va de pair avec l'emploi parfaitement maîtrisé du matériau bois. Celui-ci, loin d'être homogène, continue de vivre de nombreuses années

après abattage. Le bois est donc largement tributaire de son mode d'abattage, de sa taille et de son séchage.

L'emploi de bois de brin, soigneusement choisi et taillé à la hache en respectant le fil du bois, permettant un excellent contrôle des déformations au séchage, et garantissant à terme un usage optimisé de ses propriétés mécaniques, semble avoir garanti la longévité des charpentes gothiques.

La stabilité de la flèche a quant à elle été garantie pendant cent cinquante ans par l'emploi de bois secs ou ressuyés parfaitement choisis, donc maîtrisés et stables quant à leurs variations dimensionnelles et géométriques.

Les deux usages procèdent de la même logique : une maîtrise et une connaissance approfondie du matériau, dans un processus de prélèvement et de transformation donnés et totalement contrôlés.

Enfin, le chêne est un matériau noble, durable et dont la culture s'inscrit dans une tradition nationale comme nous le verrons ci-après.

La restitution des charpentes est rendue possible grâce à une très grande quantité de documents issus de sources variées et complémentaires.

L'état de la connaissance des charpentes et couvertures disparues s'avère remarquablement complet.

Les sources authentiques sont d'une grande variété :

- dessins originaux de projet (pour les travaux du <sup>XIX</sup><sup>e</sup> siècle) ;
- nombreux vestiges ;
- descriptions écrites ;

- descriptions graphiques (relevés bi-dimensionnels et tri-dimensionnels) ;
- milliers de photographies, larges ou de détails ;
- mémoires vivantes (couvreurs, charpentiers, architectes) ;
- savoir-faire technique (charpentiers, couvreurs, mais aussi ingénieurs, forestiers, ...).

Ces sources offrent une description quasi exhaustive des ouvrages :

- pour les charpentes gothiques, sont ainsi connus :
  - les développements et évolutions historiques ;
  - la description géométrique complète ;

- les modes constructifs (assemblages, caractéristiques et taille des bois) ;
  - le comportement statique ;
  - l'état sanitaire avant incendie ;
- pour les charpentes XIX<sup>e</sup> siècle, on atteint le même niveau d'information que pour les charpentes gothiques.

La **figure 22** est un extrait du relevé réalisé par Rémi Fromont et Cédric Trenteseaux en 2014.

Le relevé de 2014 (**figure 22**), donne des informations à la fois sur la géométrie générale de l'ouvrage mais aussi sur les sections qui étaient employées, sur la nature des

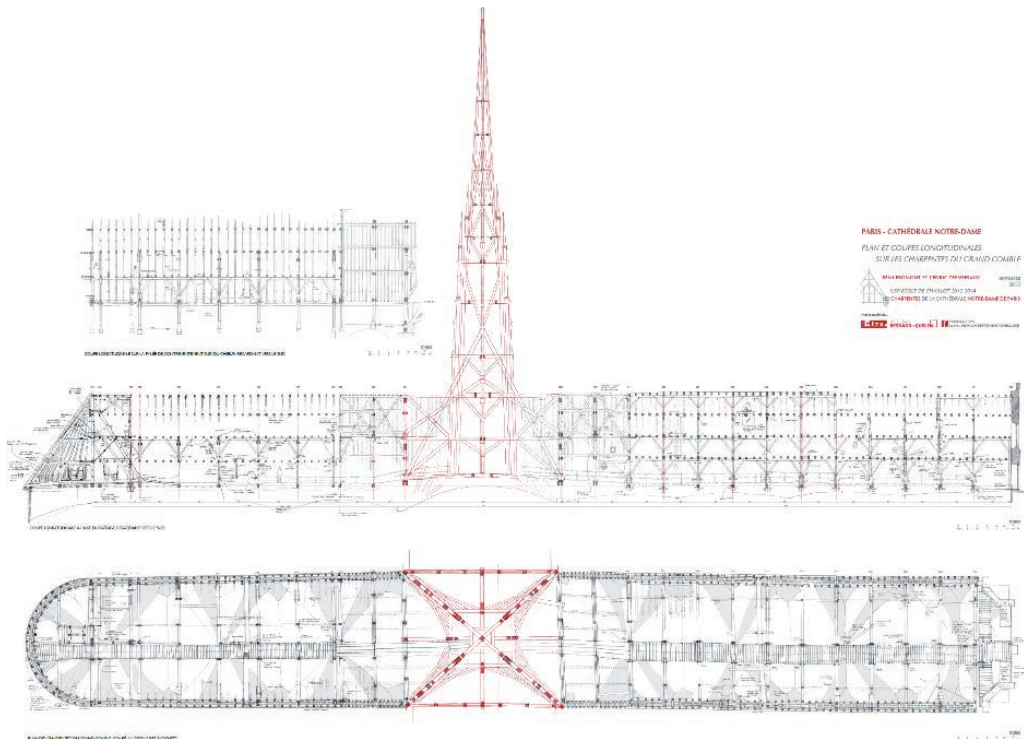


Figure 22

Les charpentes du chœur et de la nef : un exemple de la richesse des données sur les détails de la charpente.

assemblages, sur certaines pathologies.

Le projet de la flèche était lui aussi extrêmement bien documenté, notamment grâce aux archives de Bellu, le charpentier de Viollet-le-Duc au XIX<sup>e</sup> siècle. Les plans d'exécution de la flèche, réalisés par Bellu, ont été conservés à la médiathèque de l'architecture et du patrimoine de Charenton-le-Pont. Ces documents, extrêmement précis et parfois cotés au millimètre, ont permis de redessiner et comprendre certaines subtilités de la structure de la flèche.

Le projet de reconstruction de la flèche et des charpentes de la cathédrale Notre-Dame de Paris découle donc d'une analyse détaillée des ouvrages disparus, par une équipe variée et complémentaire dans les profils qui la composent : architectes, ingénieurs, charpentiers, spécialistes du matériau bois ou chercheurs,

forestiers, dendrochronologues. L'étude de la somme de documentations dont nous disposons nous a permis de comprendre davantage la charpente disparue en avril 2019 et de la redessiner avec précision, y compris les assemblages qui la composaient (*figure 23*).

Notre analyse a également porté sur la compréhension des quelques pathologies que l'on pouvait constater dans cette structure.

L'exemple suivant (*figure 24*) montre un assemblage reliant dans la longueur (par enture) des poteaux arêtiers, pièces longilignes qui s'élèvent jusqu'au sommet de la flèche. On constate dans cet assemblage qu'une des deux pièces s'est comme enroulée sur elle-même (on dit qu'elle est vissée), menant à l'ouverture de l'assemblage.

On retrouve certains exemples de cette pathologie dans les vestiges de l'incendie (*figure 25*).

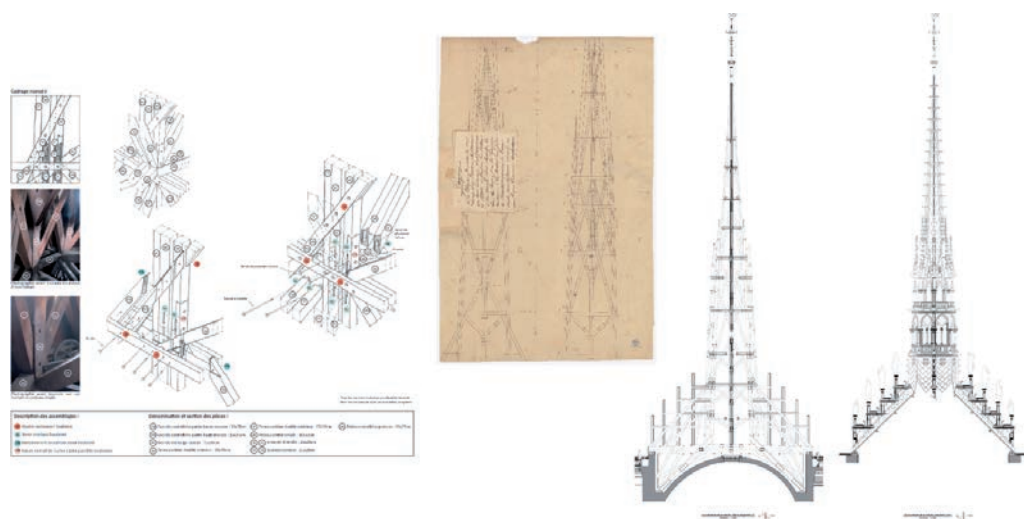


Figure 23

Les charpentes de la flèche et du transept.



Ce défaut est inhérent au matériau même. Il s'agit d'un comportement du bois qui se déforme lors de son développement : il est donc possible de déceler ce défaut lorsque l'arbre est sur pied mais aussi au moment du choix de l'arbre. Sur la **figure 26**, la grume est torse, le défaut est présent avant même que la pièce n'ait été taillée et mise en œuvre. Le choix de la matière première est donc indissociable du projet de conception de la restauration.

L'analyse des défauts à proscrire nous a conduits assez naturellement à élaborer un cahier des charges permettant d'orienter la sélection des bois et d'identifier les pièces de charpente les plus sollicitées sur lesquelles des défauts devaient absolument être proscrits. Ce cahier des charges s'orientait vers des bois très droits, non nerveux, au port centré, peu décroissants, c'est-à-dire dont le diamètre en tête diffère peu du diamètre en pied, sans branches mortes ou alors des branches qui n'avaient pas des diamètres importants dans la longueur utile, purgés de tous les défauts que l'on peut imaginer (la roultre<sup>13</sup>, la gélivure<sup>14</sup>, la pourriture) et dont l'abattage se déroulerait en période de sève basse.

En effet, il est traditionnellement important d'abattre les arbres en période de sève basse (période hivernale), pour éviter les attaques d'insectes

lignivores<sup>15</sup>, la présence de sève favorisant les piqûres. Le chêne étant un matériau vivant, les arbres exempts de défauts correspondent à une culture du matériau bien spécifique, dont la France possède le savoir-faire. La sylviculture est l'art de conduire la forêt de façon durable en contrôlant la croissance des arbres pour pouvoir les utiliser dans un usage précis. L'art de la sylviculture, théorisé sous Colbert<sup>16</sup>, apparaît surtout pour produire des bois capables d'approvisionner la production de tonnellerie et de charpente de Marine.

Cet art participe également à la régénération de la forêt : l'abattage a lieu à une période contrôlée, décidé par des experts forestiers ou techniciens de l'ONF qui conduisent la croissance des arbres sur plusieurs générations. Ainsi, l'abattage d'une parcelle permet-il à des petites pousses (**figure 27**) de trouver leur place et de pousser de la façon la plus rectiligne possible en allant rapidement chercher de la lumière. Un exemple d'une des plus belles forêts de France correspondant à ce type de culture des chênes (en futaie régulière, **figure 28**), est la parcelle de la Futaie des clos, dans la forêt de Bercé dans la Sarthe. Il s'agit d'une forêt domaniale protégée, composée de sujets extraordinaires par leur dimension et régularité et dont aucun arbre n'a été abattu pour la reconstruction de Notre-Dame.

13. Maladie des arbres, décollement des couches ligneuses dû au gel.

14. Fente creusée par le gel dans les arbres.

15. Se dit d'un insecte qui se nourrit de bois.

16. Cet art existait peut-être auparavant mais ce mot n'est connu qu'à partir de Colbert.

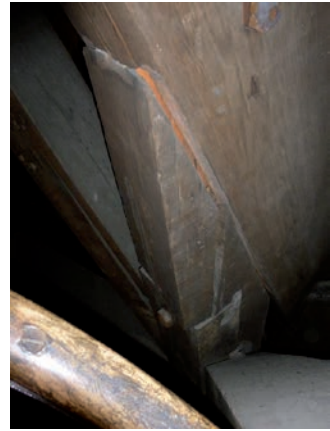


Figure 24

Exemple d'une pathologie du bois : une pièce vissée.



Figure 25

Pathologie de bois.



Figure 26

La grume de bois.



Figure 27

*Petites pousses d'arbres.*



Figure 28

*Futaie des clos, forêt de Bercé, Sarthe.*

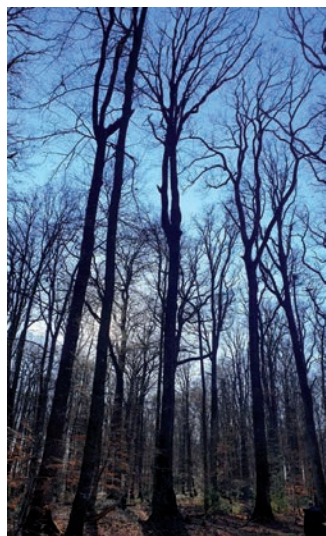


Figure 29

*Présence d'un charpentier à côté d'un arbre qui permet d'évaluer la taille de l'arbre.*

Sur la **figure 29**, on appréhende la dimension de ces arbres en distinguant une silhouette en bas à droite.

Pour la reconstruction de la flèche, les arbres ont été sélectionnés dans des forêts françaises permettant de répondre à un cahier des charges construit selon trois catégories :

- les pièces courantes ;
- les pièces exceptionnelles par leur longueur (à partir de 14 m de long) ;
- les pièces exceptionnelles par leur rôle : le poinçon<sup>17</sup> par exemple qui est la pièce centrale, composée de plusieurs pièces mises bout à bout et qui constituent la colonne vertébrale de la flèche.

17. Instrument métallique terminé en pointe pour percer, entamer les matières dures.

Pour ces trois catégories, tout en s'appuyant sur la norme qui caractérise le matériau chêne et aidés de spécialistes, nous avons pu déterminer les défauts à éviter dès la sélection des bois sur pieds ou une fois abattus. Ont ainsi été pros crits les arbres vissés, pour les raisons que nous avons énoncées avant, les cœurs étoilés comme sur la (**figure 30**), les nœuds morts ou pourris, les fentes. Ont été acceptés, dans certaines conditions, les nœuds sains dans une limite de diamètre et de quantité.

Les bois sélectionnés sont bien répertoriés afin d'assurer leur traçabilité. Ils ont été débités par des scieurs et sont en cours de ressuyage dans des conditions particulières : en extérieur, à l'abri du soleil ardent pour éviter un séchage trop rapide qui permettrait de créer des fentes, dans une zone fraîche et ventilée, les pièces étant espacées les unes des autres et stockées en palanquées sur des tasseaux appelés chantiers.

Pour la reconstruction des charpentes médiévales, les enjeux ne sont pas exactement les mêmes : les bois seront taillés selon une technique très particulière, à la doloire (taille manuelle), ce qui nécessite que les bois soient frais. Les arbres doivent alors se situer entre 50 et 60 % d'humidité, sachant qu'un arbre sur pied est environ à 60 % d'humidité, et la taille doit se faire dans les quelques mois qui suivent l'abattage. Cette technique de taille manuelle consiste à ébaucher ou à équarrir<sup>18</sup>,

18. Tailler pour rendre carré, régulier.



Figure 30

Cœur étoilé.

c'est-à-dire enlever l'écorce à la doloire<sup>19</sup>. Cette taille permet de respecter le fil du bois, ce qui confère à l'ouvrage taillé une grande souplesse et une grande résistance puisque les fibres du bois ne sont pas entaillées.

La technique de taille manuelle n'est pas courante de nos jours, il s'agit pourtant d'une

technique datant au moins du Moyen Âge et dont certaines organisations assurent une transmission des savoir-faire. C'est le cas de Charpentiers sans frontières qui ont réalisé deux fermes témoins dont une qui a été présentée sur le parvis, lors des journées du patrimoine : cette dernière image (figure 31) permet de conclure en se projetant sur le chantier, lequel démarrera dans les prochains mois.

19. Petite hache.



Figure 31

Ferme témoin des Charpentiers sans frontières.

