



Notre-Dame de Paris, une charpente à l'identique ?

François LE TACON

Directeur de Recherches Émérite à l'INRAE

(05 11 2020)

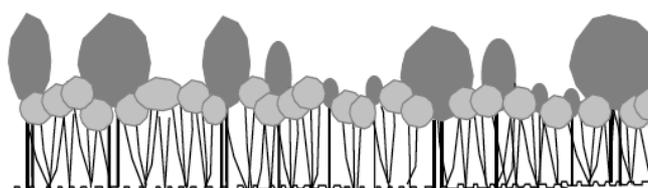
Introduction

Depuis l'incendie de 2019, la question de savoir si Notre-Dame de Paris doit être reconstruite à l'identique ou non fait débat. L'idée d'un geste architectural contemporain semble abandonnée et la reconstruction à l'identique semble devoir l'emporter. Pour la voûte en pierre en partie effondrée, les façades des transepts et les arcs boutants fragilisés, il n'y a guère de question ; ils seront refaits ou reconsolidés à l'identique. Il semble aussi qu'il en sera de même pour la flèche du XIX^e siècle de Viollet-le-Duc et pour le reste de la toiture qui sera à nouveau couverte de plomb. Mais se pose la question de la charpente qui n'est pas visible de l'extérieur et qui peut être reconstituée de différentes manières : bois, métal comme pour la basilique de Saint-Denis ou la cathédrale de Chartres ou encore l'abbatiale Sainte-Marie-Majeure des Prémontrés à Pont-à-Mousson, béton armé avec chevilles en bois comme pour la cathédrale de Reims ou la cathédrale de Nantes. La solution bois, qui semble avoir la faveur des responsables du chantier, présente plusieurs options et mérite que nous nous y attardions.

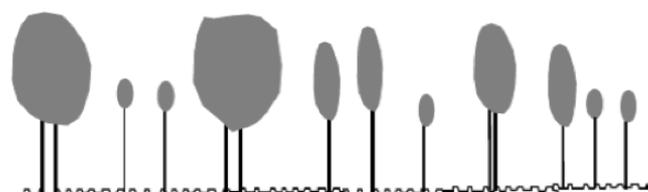
L'état des forêts en France au XII^e et XIII^e siècle

Le bois de charpente fourni par un massif forestier dépend des essences qui le composent et de sa structure, qui résulte du régime qui y est appliqué : taillis, taillis sous futaie ou futaie. Le taillis, qui peut être simple ou fureté, résulte de rejets de souche ou de drageons qui sont coupés à des intervalles de temps variables (révolution de 5 à 50 ans). Dans le taillis simple les rejets sont coupés en une seule fois et ont tous le même âge, alors que dans les taillis furetés seuls quelques brins sont coupés à chaque récolte et ont donc des âges différents. En régime de taillis, les bois obtenus sont donc de petite dimension et sont essentiellement destinés au chauffage. On peut cependant en tirer des poteaux ou des pièces de bois de petits diamètres (20 à 25 cm). Le taillis sous futaie est constitué de deux niveaux, un étage inférieur de taillis et un niveau supérieur de futaie claire constitué d'arbres d'âges variables multiples de la révolution du taillis. Par exemple si la révolution du taillis est de 30

ans, on trouvera des arbres de futaie de 60 ans, 90 ans, 120 ans ou plus. Dans ce régime, on peut donc obtenir, outre le bois de chauffage, des grumes de gros diamètre, mais de hauteur limitée le plus souvent à 10 - 15 m environ.



Taillis sous futaie avant exploitation



Taillis sous futaie après exploitation du taillis
et des arbres les plus âgés de l'étage de futaie

Figure 1 : Représentation schématique du taillis sous futaie avant et après exploitation. Extrait du cours de sylviculture d'Yves Bastien, ENGREF Nancy, 2002.

Dans le régime de la futaie, on obtient des diamètres en général inférieurs à ceux du taillis sous futaie, mais des hauteurs plus importantes de bois d'œuvre, de 15 à 20 m, ou plus.

Au XII^e siècle, la surface forestière française était d'environ 13 millions d'hectares contre 17 millions actuellement. Cette forêt était surexploitée et en très mauvais état. Le régime majoritaire était le taillis ; une partie de la surface était néanmoins en taillis sous futaie. La futaie était quasi inexistante.

Les rois de France ont essayé de remédier à cette désastreuse situation en créant un service forestier. La plus ancienne ordonnance royale est celle de Louis VI en 1115 qui crée *les mesureurs et arpenteurs des terres et bois*.

L'ordonnance de Philippe II Auguste en 1219 à Gisors tente de réglementer l'exploitation de la forêt. En 1291, l'ordonnance de Philippe IV le Bel établit une première ébauche d'administration et crée les maîtres des Forêts. Les premières forêts aménagées, c'est-à-dire exploitées suivant des règles assurant leur pérennité, apparaissent à la fin du XIII^e siècle.

À partir du XIV^e siècle, apparaissent un grand nombre d'édits et d'ordonnances qui réglementent d'abord l'exploitation des forêts royales, puis, dès le début du XVI^e siècle, celle de toutes les forêts du royaume.

Il faudra attendre l'ordonnance de 1669 de Louis XIV, dite de Colbert, pour voir se développer le régime de la futaie qui permet la production de bois de grandes dimensions, en particulier pour les besoins de la marine.

La construction de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Le 24 mars et le 25 avril 1163, le pape Alexandre III aurait posé la première pierre en présence de Louis VII. La construction débute sous la direction de Maurice de Sully (1160-1197) et se poursuit avec Odon de Sully (1197-1208). Le chœur et ses deux déambulatoires sont édifiés de 1163 à 1182. Les quatre premières travées de la nef sont édifiées de 1182 à 1190. De 1190 à 1225 se poursuit l'édification des autres travées de la nef et de la façade ouest. Entre 1225 et 1230, un incendie détruit la charpente supérieure et les combles. En 1250 la construction de la cathédrale est terminée, mais de très nombreux aménagements seront ultérieurement effectués.

La charpente de Notre-Dame de Paris avant l'incendie de 2019

L'état de la charpente avant l'incendie de 2019 est relativement bien connu grâce aux études d'Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc (1), au relevé d'Henri Deneux (2) en 1915, au scanner effectué en 2014 par l'entreprise Art Graphique et Patrimoine, aux différentes études dendrochronologiques (3) et aux relevés des structures réalisés en 2015 par Rémi Fromont et Cédric Trentesaux (4).

La charpente de la nef et du chœur faisait un peu moins de 100 m de long (38 m pour le chœur et 60 m pour la nef) sur 13 m de large et celle du transept 48 m de long pour une largeur de 14 m (5). La toiture faisait dix mètres de hauteur pour une pente à 55%. Après le renoncement de la construction des flèches sur les deux tours, une flèche à charpente en bois a été édifée à la croisée du transept de 1220 à 1230, probablement après le premier incendie. Elle s'est affaissée au XVIII^e siècle et a été démontée de 1786 à 1792. Elle a été reconstruite par Jean-Baptiste Antoine Lassus et Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc et inaugurée en 1859.

Si la structure de la charpente de Notre-Dame de Paris avant incendie de 2019 est relativement bien connue, son histoire pose beaucoup de questions. Selon les 70 prélèvements effectués en 1991, 1994 et 1996,

la moyenne des âges cambiaux des chênes constituant la charpente était de 100 ans avec un maximum de 120 ans, ce qui est compatible avec un régime de taillis sous futaie dégradé avec peu de réserves âgées. Plusieurs échantillons de chêne dataient de la fin du XI^e siècle. Un lot du XII^e siècle a été utilisé près de la façade ouest (date d'abattage la plus ancienne : 1156). D'autres échantillons dataient du XIII^e siècle et provenaient d'arbres abattus avant 1226. Une reprise a été faite au XIV^e siècle vers 1360 et une réparation effectuée au début du XVIII^e siècle vers 1725. La flèche est évidemment en chêne du XIX^e siècle. Pour la reconstruction de cette flèche, Lassus et Viollet-le-Duc ont dû refaire une bonne partie de la charpente ancienne au niveau du transept en reprenant trois travées de chaque côté de la flèche (6). De plus, Viollet-le-Duc a entièrement reconstruit les fermes du transept en utilisant des éléments de diamètre plus important que ceux du Moyen-Âge et plus espacés. La flèche qui culminait à 96 m de hauteur était également en chêne avec certains éléments plus longs que ceux de la charpente du Moyen-Âge de la nef ou du chœur. La charpente de la flèche du XIX^e siècle était très complexe et formait une pyramide à base octogonale. Elle reposait sur les quatre piles du transept qui ne forment pas un quadrilatère régulier.

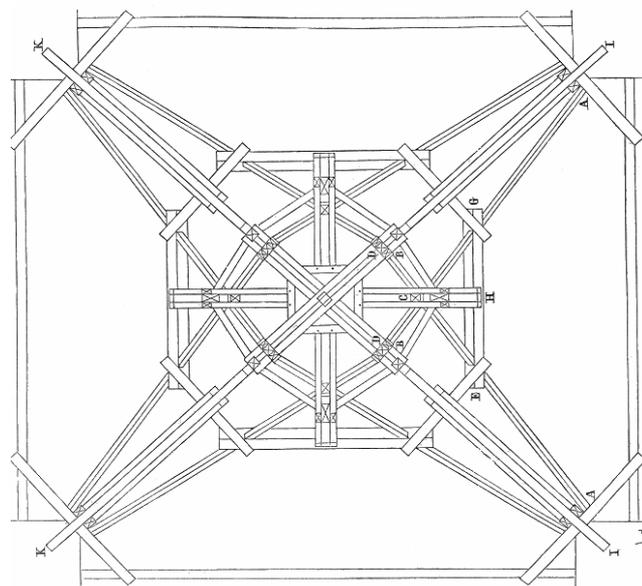


Figure 2. La base de la charpente de la flèche du XIX^e siècle reposant sur les quatre piles du transept. Viollet-le-Duc - *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1854-1868, tome 5.djvu/449

Il apparaît donc que la charpente détruite en 2019 n'était plus celle d'origine, elle-même construite en trois fois, vers 1182 pour le chœur, vers 1190 pour les quatre premières travées de la nef et à la fin du XII^e siècle pour le reste de la nef. Cette première version du XII^e siècle a été construite en partie avec des chênes anciens abattus à la fin du XI^e siècle et qui provenaient probablement de récupération. Nous ne connaissons pas l'ampleur de l'incendie du début du XIII^e siècle,

dont les traces ont été décrites par Viollet-le-Duc. Il a probablement détruit la majeure partie de la charpente du XII^e siècle, dont des éléments ont cependant pu être réutilisés au XIII^e siècle. Nous ne connaissons pas non plus l'ampleur des réparations faites au XIV^e siècle, puis au XVIII^e siècle avant la restauration de la flèche au XIX^e siècle et de la reprise complète de la charpente du transept par Viollet-le-Duc. Il n'en reste pas moins que l'essentiel de la charpente de la nef datait des XII^e et XIII^e siècles. Cette charpente était constituée d'environ 5000 m³ de bois et provenait d'environ un millier d'arbres différents.

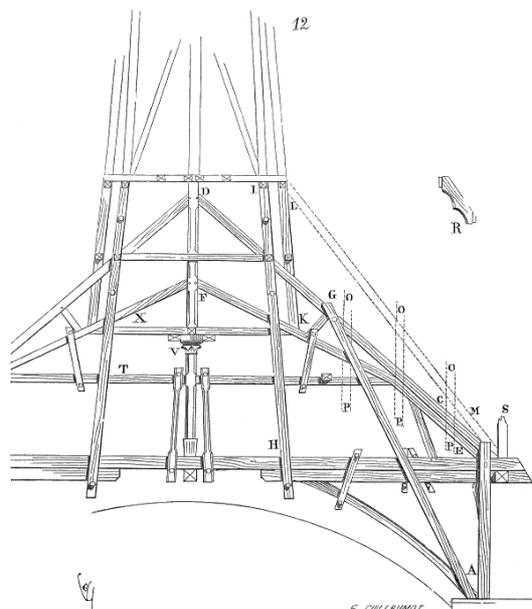


Figure 3. Structure de la charpente de la flèche du XIX^e siècle. Viollet-le-Duc - *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1854-1868, tome 5.djvu/450.

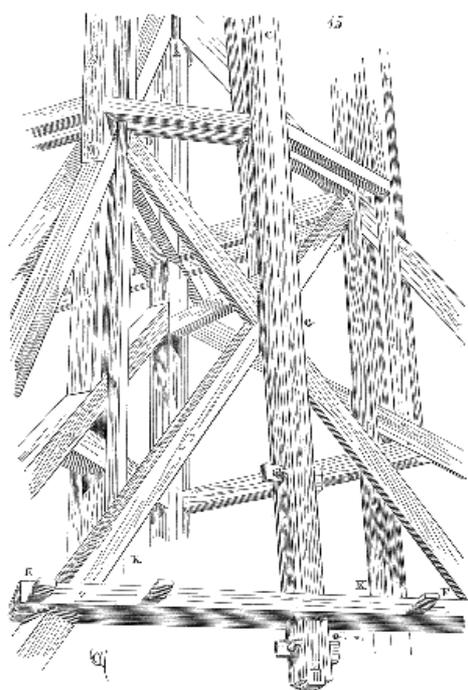


Figure 4. Détail de la charpente du XIX^e siècle. Viollet-le-Duc - *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1854-1868, tome 5.djvu/452.



Figure 5 : La charpente du chœur datant du Moyen-Âge avant l'incendie de 2019. Entrails, premier niveau de faux entrails, chevrons et sous chevrons. Extrait de Fromont et Trentesaux, 2016.

Les éléments les plus importants, les entrails ou poutres transversales, reposaient directement sur les murs. Ils faisaient de 13 à 14 m de longueur pour 25 à 30 cm de diamètre. Ils étaient d'un seul ou plusieurs tenants et provenaient de forêts traitées en taillis sous futaie et plus exactement de l'étage supérieur de futaie claire et irrégulière qui dominaient le taillis. Ces arbres étaient dispersés, peu nombreux et le plus souvent de hauteur insuffisante. Il fallait donc prospecter des surfaces importantes pour trouver les arbres nécessaires, probablement quelques centaines d'hectares ou plus. Ces difficultés nous sont bien connues par les écrits de Suger (vers 1081-1151), abbé de Saint-Denis. L'abbé Suger lui-même a dû prospecter des centaines d'hectares de forêt du bassin parisien pour trouver les chênes nécessaires à l'édification de la charpente de la basilique de Saint-Denis, le premier édifice gothique, dont le chevet a été consacré le 11 juin 1144. On peut imaginer que les difficultés ont été les mêmes pour trouver les entrails de Notre-Dame.

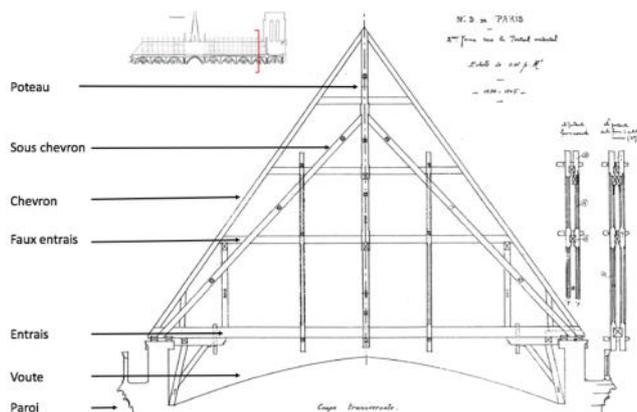


Figure 6. Relevé de la seconde ferme à partir du portail occidental de la nef de Notre-Dame de Paris par Henri Deneux, 1915. © MAP / CRMH, D6988.

La charpente de la nef de Notre-Dame de Paris est dite à chevrons-formant-fermes. Les chevrons constituaient la structure porteuse de la toiture et se répétaient tous les 70 centimètres pour la nef et tous les 80 cm pour le chœur. Les chevrons étaient eux-mêmes doublés par des sous-chevrons. Cette faible distance entre les

chevrons faisait de la charpente de Notre-Dame de Paris une structure particulièrement lourde et dense, d'autant plus que les charpentiers n'avaient pas lésiné sur les pièces secondaires. Ces caractéristiques ont valu à la charpente de Notre-Dame le qualificatif de « forêt ». Tous les cinq intervalles, les chevrons reposaient sur les entrails et constituaient les chevrons maîtres ou fermes. Les chevrons étaient un peu plus courts que les entrails et avaient un diamètre moindre. Ils étaient en un seul ou plusieurs tenants. Entre les chevrons, tous les 250 cm, existaient trois niveaux de faux-entrails dont la longueur diminuait avec la hauteur. Tous les faux-entrails étaient d'un seul tenant. Les assemblages entre faux-entrails et chevrons se faisaient par tenon et mortaise. L'ensemble de la structure était stabilisé par des poteaux avec de nombreuses consoles ou chaises, par des moises (7)

et par des pannes (8) dont une panne faitière. Les assemblages les plus anciens, probablement du XII^e siècle, étaient passants, ce qui signifie que le tenon traversait le chevron de part en part. En raison de leurs dimensions plus faibles que celles des entrails, les faux-entrails ont probablement été moins difficiles à trouver dans les taillis sous futaie (9).

La forêt française actuelle peut-elle fournir le bois nécessaire à la construction d'une nouvelle charpente à « l'identique » ?

Depuis les XII^e et XIII^e siècles la chênaie française a beaucoup évolué. Le taillis a été progressivement remplacé par du taillis sous futaie, lui-même remplacé par la futaie. La chênaie française s'est considérablement enrichie en volume de bois sur pied avec des arbres de plus grande dimension qu'au Moyen-Âge. La France possède actuellement 4,5 millions d'hectares de chênaie (chêne sessile, *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., 1784) ou chêne pédonculé (*Quercus robur* L., 1753). En 2018, les forêts soumises au régime forestier (forêts domaniales et des collectivités) ont mobilisé 1,2 millions de m³ de chêne (sciages, coffrages, tranchages, merrains). Les 5000 m³ de chênes nécessaires à la reconstruction de la charpente de Notre-Dame ne représenteraient qu'un 240^e de la mobilisation annuelle du chêne en forêt publique, qui elle-même ne représente qu'une partie de la production française.

Le prix moyen du m³ de chêne des forêts publiques, de diamètre supérieur à 50 cm, était en 2018 de 275 € et celui du chêne de 30 à 45 cm de diamètre de 50 €. Les diamètres de 30 à 45 cm sont suffisants pour Notre-Dame, ce qui représenterait aux prix de 2018 une somme à l'achat de l'ordre de 250 000 €, ce qui est

peu par rapport à l'estimation totale du coût des travaux de restauration (300 à 600 millions d'euros). De plus un contrat d'approvisionnement passé avec l'Office National des Forêts ne poserait aucun problème.

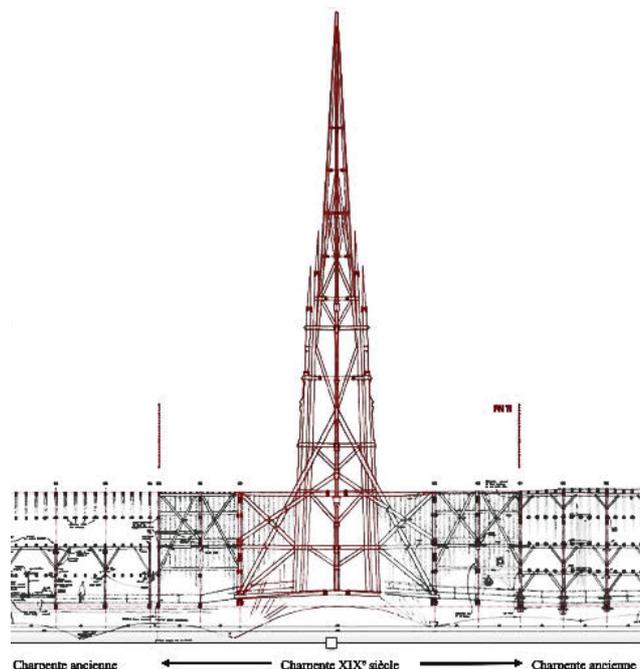


Figure 7. Relevé en coupe longitudinale de la charpente du XIX^e siècle et de la charpente ancienne de la nef au niveau de la croisée du transept avec la flèche de Lassus et Viollet-le-Duc. Extrait de Fromont et Trentesaux, 2016.

Quelle méthode de reconstruction ?

La ressource en bois ne présentant pas de difficulté, il reste à choisir entre charpente industrielle, charpente traditionnelle et charpente à l'ancienne, c'est-à-dire exécutée selon les méthodes du Moyen-Âge.

Une charpente industrielle est constituée d'éléments emboîtables préfabriqués en usine à l'aide de machines à outillage numériques et assemblés à l'aide de connecteurs métalliques. La fabrication des pièces élémentaires et le montage sont très rapides et peuvent être exécutés en quelques mois.

Bien que ses éléments constitutifs puissent être réalisés en usine avec des outils modernes de sciage, la charpente traditionnelle est plus lourde que la charpente industrielle. L'assemblage ne fait jamais appel à des connecteurs métalliques et peut être réalisé avec tenon et mortaise.

Dans une charpente du Moyen-âge, la plupart des éléments n'étaient pas sciés, mais équarris à la doloire, c'est-à-dire avec une hache particulière à large tête. La construction d'une telle charpente demanderait beaucoup de temps et serait évidemment beaucoup plus chère que celle d'une charpente industrielle ou traditionnelle. Elle nécessiterait aussi des charpentiers capables d'effectuer un tel travail.

Discussion

Reconstruire la charpente de Notre-Dame de Paris telle qu'elle était à l'origine n'a guère de sens en raison des multiples modifications qui ont eu lieu au cours des siècles. La reconstruire de façon aussi proche que possible de l'aspect qu'elle était avant l'incendie de 2019 semble plus raisonnable, encore que tout dogmatisme semble devoir être exclu. L'essentiel est que l'apparence de la toiture reste inchangée (10). Les options pour reconstruire cette charpente sont nombreuses. N'étant pas visible de l'extérieur, l'option béton ou métal pour une nouvelle charpente est parfaitement envisageable. Ces deux matériaux étant non combustibles, les risques d'incendie en seraient fortement limités. Ils auraient par contre l'inconvénient d'avoir un mauvais bilan carbone. Le bois étant un matériau renouvelable, son bilan énergétique serait évidemment meilleur que celui du béton ou du métal, d'autant plus que le carbone serait fixé dans la charpente pendant des siècles ou des millénaires à condition qu'il n'y ait pas d'incendies ou d'attaques d'insectes ou de champignons. Le principal problème du bois est le risque d'incendie qui est toujours présent. Il serait probablement souhaitable pour la charpente de Notre-Dame de s'orienter vers des bois ignifugés sous vide qui permettraient de retarder l'embrassement généralisé. Ces bois ignifugés sont en outre peu sensibles aux attaques de champignons. Le bois pourrait aussi être protégé des champignons et des insectes xylophages par des traitements complémentaires (11). L'utilisation de bois traités implique presque nécessairement la mise en œuvre d'une charpente industrielle ou d'une charpente plus traditionnelle, ce qui en termes d'esthétique n'aurait guère d'inconvénients puisque cette charpente n'est pas visible de l'extérieur. Ce type de charpente, plus léger que les charpentes du Moyen Âge, serait aussi rapidement monté.

Il reste l'option charpente de type Moyen-Âge pour la nef avec des chênes équarris à la hache et en vert, c'est-à-dire non séchés au préalable. Le coût serait évidemment beaucoup plus élevé que celui des deux options précédentes, ce qui ne semble cependant pas un problème en raison de l'importance des dons déjà effectués. Par contre, les délais de réalisation seraient beaucoup plus importants. Ils seraient cependant compatibles avec une fin des travaux en 2024 comme souhaitée par le Président de la République. En effet, la construction de la charpente du XIII^e siècle de la cathédrale de Bourges aurait demandé seulement 19 mois de travail par une équipe de 15 à 20 charpentiers pour l'équarrissage de 925 chênes et la mise en place des fermes (12). Récemment, une équipe de 25 charpentiers de la fondation *Charpentiers sans*

frontières a réalisé une copie de l'une des 25 fermes de Notre-Dame en une semaine. Cependant, l'utilisation de bois en vert, ne nous semble pas la meilleure solution en raison des risques accrus d'attaque de champignons lignivores. Le poids élevé d'une telle charpente pourrait aussi faire courir des risques à la structure en pierre fragilisée par l'incendie.

Plusieurs options sont donc ouvertes pour la reconstruction de la charpente de Notre-Dame de Paris. Un compromis entre les différentes options serait probablement la meilleure solution avec des variantes selon les âges de la charpente : charpente du Moyen-Âge pour l'essentiel de la nef, charpente du XIX^e siècle pour le transept, la flèche et six travées de la nef.

Notes

(1) Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné*, 1859, t. III, p. 15, Charpente.

(2) MAP/CRMH, D6988.

(3) Georges-Noël Lambert, Patrick Hoffsummer, Vincent Bernard, Virginie Chevrier. Note sur l'étude dendrochronologique de la charpente de Notre-Dame de Paris. ARCADE. Approche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement, Direction Régionale des Affaires Culturelles de Provence-Alpes-Côte d'Azur, pp. 201-204, 2019, ARCADE. Approche diachronique et Regards croisés : Archéologie, Dendrochronologie et Environnement. hal-02144000.

(4) Fromont R. et Trentesaux C., Le relevé des charpentes médiévales de la cathédrale Notre-Dame de Paris : approches pour une nouvelle étude in *Monumental*, Semestriel 1, Editions du patrimoine, Paris, 2016, p. 70-77.

(5) En projection horizontale, la charpente couvrait 2000 m².

(6) La flèche d'origine était devenue au XVII^e siècle un clocher abritant cinq cloches. La flèche de Viollet-le-Duc est purement ornementale et n'a jamais abrité de cloches.

(7) Une moise ou assemblage moisé consiste à remplacer un élément unique par deux pièces parallèles qui l'enserrent et qui sont fixées par des chevilles.

(8) Les pannes sont posées sur les fermes et supportent les chevrons.

(9) Une passerelle de visite de 160 à 190 cm de large a été édiflée dans la nef et le chœur.

(10) L'association des familles victimes du saturnisme (AFVS) milite pour ne pas recourir à nouveau à un revêtement en plomb. En juillet 2020, le conseil de la ville de Paris a considéré comme *absurde et dangereux* d'avoir à nouveau recours au plomb.

(11) En 2018, l'entreprise Aubriat d'Epinal avait effectué un traitement antifongique et insecticide par pulvérisation d'un gel sur une petite partie de la charpente de Notre-Dame de Paris à la suite d'observations d'attaques de champignons par une entreprise de couverture de Verdun. Une analyse préalable avait montré que la mérule n'était pas présente dans la charpente.

(12) Frédéric Epaud, *La charpente de la cathédrale de Bourges. De la forêt au chantier*, PUFR, Coll. Perspectives historiques, Tours, 2017.