

Notre-Dame de Paris en 2021 : Reconstruire à l'identique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Onaïa SAVARY - Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le
31/01/2022

école
normale
supérieure
paris—saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Onaïa Savary, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

La cathédrale Notre-Dame de Paris est une cathédrale catholique de style gothique, classée Monument Historique et inscrite au Patrimoine mondial. Accueillant plus de 14 millions de personnes par an, il s'agit du monument le plus visité d'Europe et l'un des plus visités au monde. Le 15 avril 2019 en fin de journée, un incendie se déclare dans la charpente, laissant une quinzaine d'heures plus tard, le bâtiment largement endommagé.

Cette ressource après un rapide historique de la construction, revient sur les dommages et présente les différentes étapes et organismes en charge de la reconstruction, certaines spécificités propres à la consolidation temporaire de la structure, puis enfin une des propositions de reconstruction sur les six projets présentés.

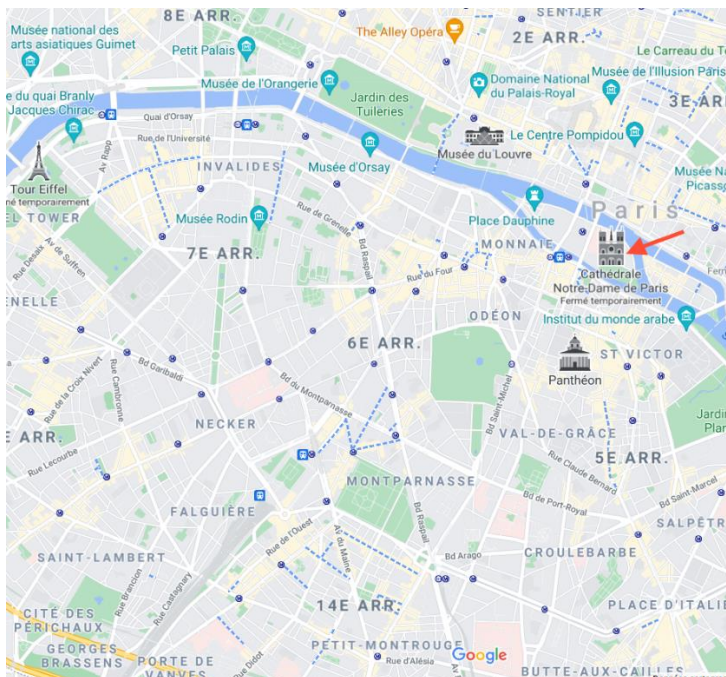


Figure 1 : Notre-Dame de Paris en 2013 et sa localisation à Paris, sources [1] [2]

1 – Introduction

1.1 - Notre-Dame, 850 ans de vie

Un édifice imposant

Située sur l'Île de la Cité à Paris (figure 1), voici la cathédrale Notre-Dame en quelques chiffres :

- 127 m de long
- 48 m de large
- 69 m de haut - 96 m avec la flèche
- Capacité d'accueil : 9 000 personnes (600, jauge Covid)

Les matériaux prépondérants sur la structure de Notre-Dame sont :

- Pierre de taille (calcaire) provenant des carrières de Paris pour la structure hors charpente ;
- Bois de chêne pour la charpente ;
- Plomb pour la couverture de la charpente et la flèche.

Historique de construction

Bien que les dates de début et de fin de construction de la cathédrale ne soient pas précisément connues, on estime que la construction de la cathédrale a eu lieu de 1160 à 1370 environ. Depuis, elle a déjà été rénovée ou modifiée à maintes reprises et, contre toute attente, la cathédrale n'est que peu touchée par les deux grandes guerres mondiales [3].

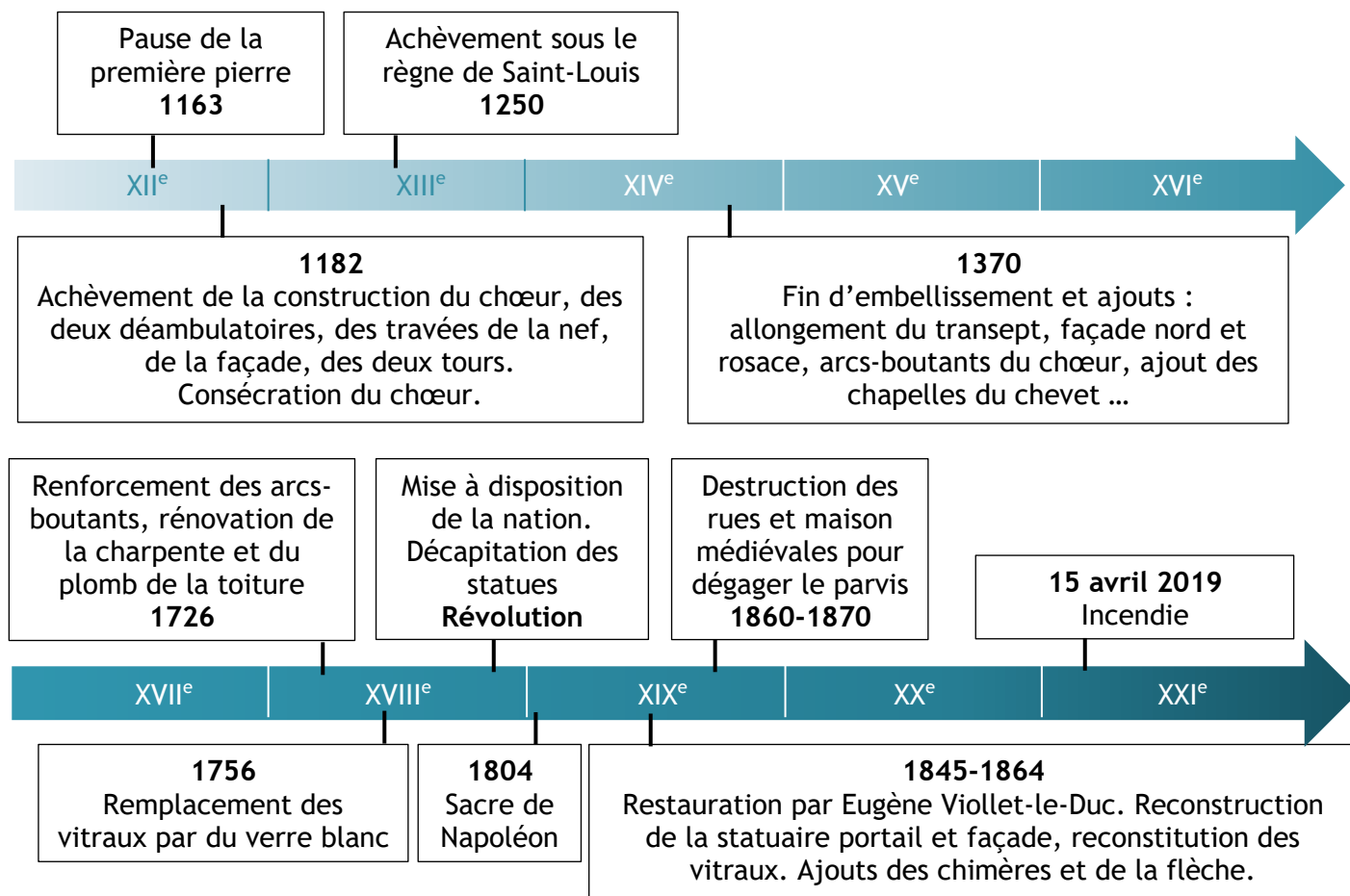


Figure 2 : Les principales étapes de construction de Notre-Dame de Paris

1.2 - L'incendie du 15 avril 2019

Chronologie des événements

- **15 avril, 18h18** : Une première alarme incendie se déclenche pendant une messe, qui doit être interrompue mais reprend suite à une levée de doute faussement négative ;
- **18h50** : Deuxième alarme, la levée de doute est cette fois positive ;
- **18h58** : Arrivée des pompiers, qui entrent et montent par les escaliers pour atteindre la charpente et les corniches ;
- **19h50** : La flèche s'effondre ;
- **16 avril, 9h** : L'incendie est officiellement éteint.

C'est donc un combat de plus de 15 heures, mené par 600 pompiers et deux bateaux-pompes qui s'est déroulé dans la nuit du 15 au 16 avril 2019. Selon les pompiers, les flammes sont apparues au niveau des échafaudages installés sur la toiture, puis se sont propagées extrêmement vite. L'horaire tardive d'arrivée des pompiers est expliqué par une erreur réalisée lors de la levée du déclenchement de la première alarme : la vérification du risque réel ou non ne s'est pas déroulée à la localisation de l'alerte.



Figure 3 : Notre-Dame avant (26/09/2010) et après (16/04/2019) l'incendie, source [4]

Le bilan

- 2/3 de la toiture (dont toute la charpente en bois de chêne) est réduite en cendres ;
- 250 tonnes de plomb ont fondu et se sont en partie vaporisées ;
- Les voûtes en pierres, pièces maîtresses de la structure, ont été gravement touchées ;
- La flèche de Viollet-le-Duc a été entièrement détruite.

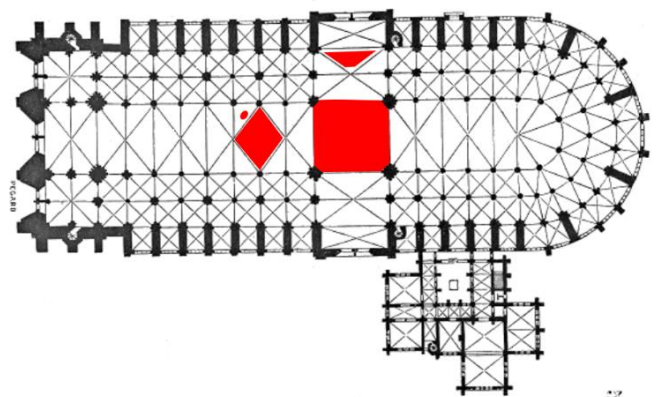
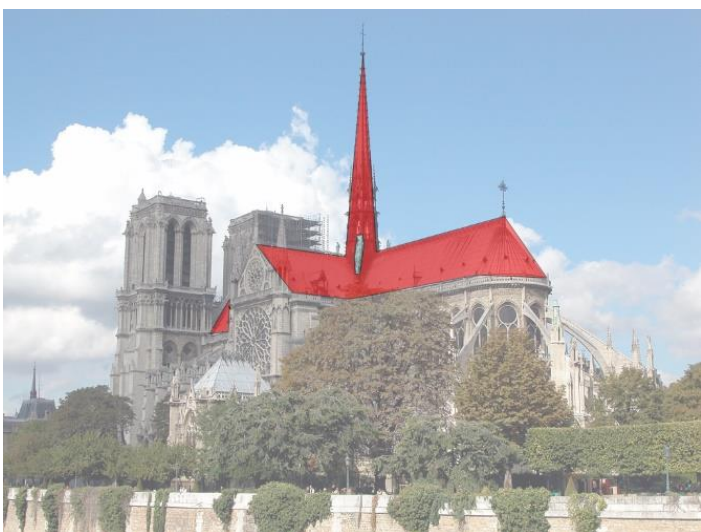


Figure 4 : En rouge les parties détruites de la toiture et des voûtes, sources [5] [6]

L'incendie serait survenu suite à une combinaison de malchance et de négligences. Le problème que posait l'installation de cloches électrifiées, contraire à toute norme pour un bâtiment de cet âge, avait été préalablement soulevé à de maintes reprises, tout comme la présence de fils électriques dans les combles ou encore de mégots de cigarettes.



Figure 5 : Charpente et flèche en flamme, sources [7] [8]

1.3 - Et maintenant ?

Immédiatement après la fin de l'incendie, le président Macron a annoncé une reconstruction de la cathédrale en 5 ans. La reconstruction s'amorce sous l'égide de l'association *Restaurons Notre-Dame*, fondée le 20 juin 2019 [9][10][11]. On y trouve des professionnels de la conservation et de la restauration des monuments historiques, des spécialistes de la forêt, des charpentiers, des structures bois et des toitures. S'y rencontrent des conservateurs, des architectes, des experts du patrimoine, des scientifiques, des ingénieurs, des universitaires, des chercheurs, des forestiers, des entrepreneurs et bien entendu des Compagnons du Devoir. Enfin, le représentant de l'État sur le site des travaux est le général Jean-Louis Georgelin, désigné par Emmanuel Macron comme le superviseur des travaux. Il accompagne Philippe Villeneuve, architecte en chef chargé de la rénovation, et donc la reconstruction, de Notre-Dame de Paris depuis 2013.

L'association *Restaurons Notre-Dame* est constituée de trois commissions, chacune remplissant un rôle spécifique :

- La Commission ressources forestières ;
- La Commission culture & patrimoine ;
- La Commission scientifique, technique & universitaire.

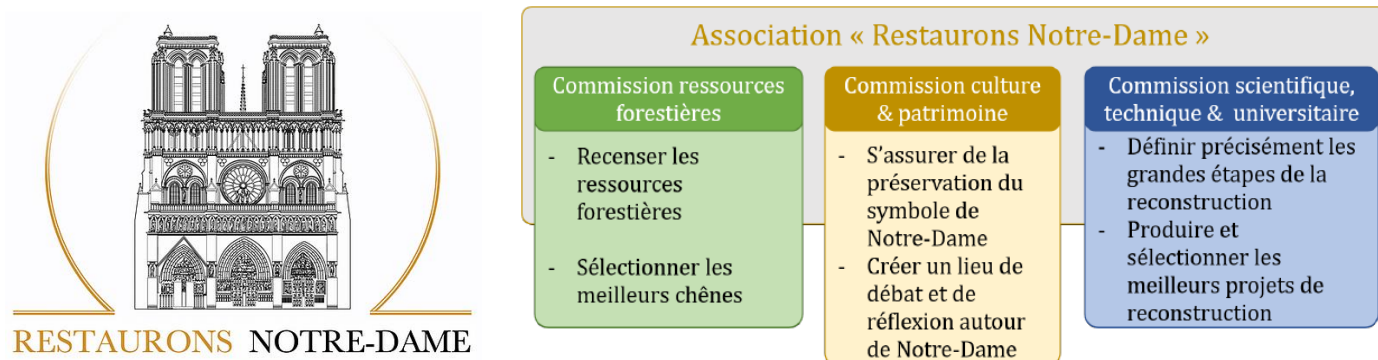


Figure 6 : Logo de l'association et rôles des trois commissions, source [12]

La Commission ressources forestières : La restauration de Notre-Dame nécessitera 2000 m³ de chênes. La commission ressources forestières a été chargée d'établir, dans un premier temps, un recensement des ressources forestières françaises, plus importantes semble-t-il qu'à l'époque de la construction de Notre-Dame. Dans un second temps, cette commission a été chargée de sélectionner les meilleurs chênes français pour amorcer la restauration de la charpente, leur abattage a commencé au printemps 2021.

La Commission culture & patrimoine : La cathédrale Notre-Dame est un symbole fort, aussi bien sur le plan historique ou culturel que religieux. Cette commission est chargée de veiller à ce que ce symbole soit respecté et conservé au cours de la restauration. C'est en outre de cette commission qu'est venue la défense la plus virulente pour une reconstruction à l'identique de la charpente et de la flèche.

La Commission scientifique, technique & universitaire : Cette commission est chargée de déterminer avec précision la façon dont la restauration s'effectuera. Pour cela, cette commission est composée de scientifiques et d'ouvriers, mais également de Compagnons. Ils doivent, ensemble, évaluer l'ensemble des caractéristiques du bâtiment et les nombreux défis qui s'annoncent (temps nécessaire à la conception, à la reconstruction, arbitrage sur la solution retenue, choix des intervenants, planning, coûts de la rénovation, concrétisation ou non des promesses de dons, de mécénat, etc.) pour ensuite produire des plans de reconstructions.

Dans la suite de ce document, une attention toute particulière sera portée sur la commission scientifique et universitaire, et plus spécifiquement aux différents projets étudiants. En effet, les projets de restaurations sont proposés par des groupes d'étudiants en grandes écoles d'ingénieurs de génie civil, de technologie du bois ou en école d'architecte, selon un planning précis. Ils sont encadrés par leurs enseignants et une équipe de membres de la commission scientifique de l'association. La présentation des travaux de ces six équipes peut se retrouver références [13][14][15][16][17][18].

Le planning suivi est découpé en trois phases, chacune faisant intervenir des acteurs différents. Les détails de chaque phase sont donnés figure 7.

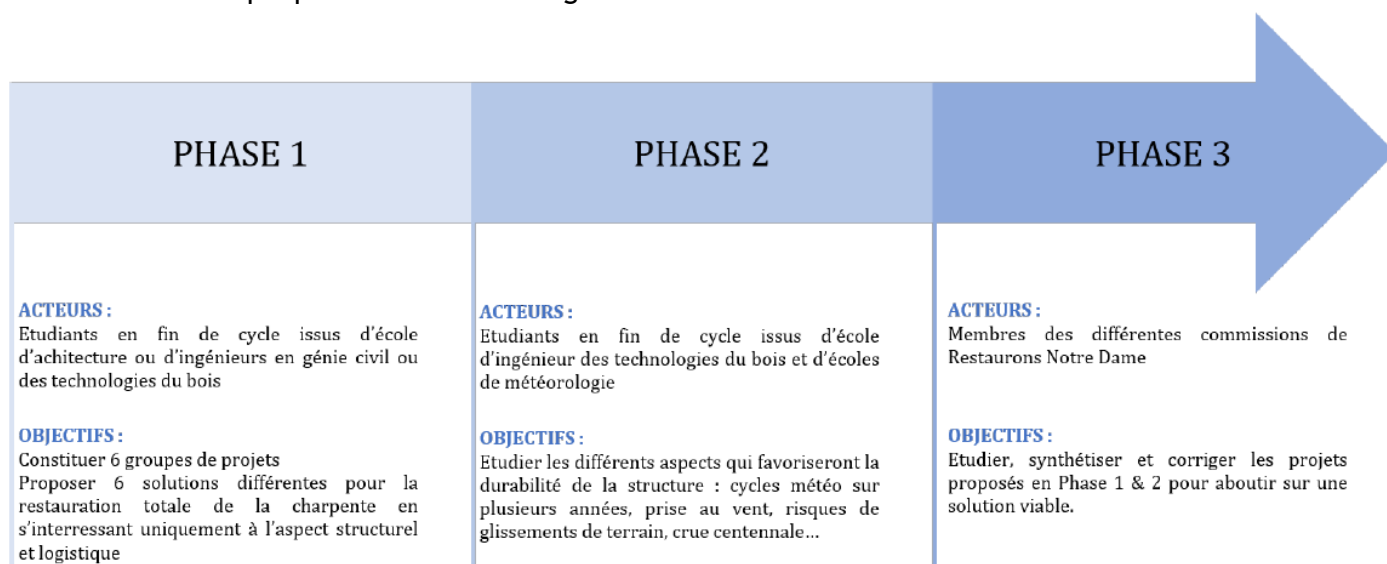


Figure 7 : Planning des acteurs universitaires du projet

2 – Conforter la structure

2.1 - Préparer le terrain : une nécessité

L'incendie du 15 avril a laissé derrière lui un véritable champ de ruines, notamment à l'intérieur de la structure [19]. La charpente qui s'est effondrée a éventré une partie des voûtes avant de s'écraser au sol du bâtiment. En outre, les pierres de Notre-Dame ont été endommagées, reste à savoir à quel point.

Avant d'aborder la restauration de Notre-Dame, il est donc nécessaire de **consolider la structure** afin de :

- Dégager les débris de l'incendie ;
- Eviter une destruction accentuée de la structure lors de la phase de travaux ;
- Sécuriser le site ;
- Mettre en sécurité les différentes reliques et autres objets de valeurs compris dans l'enceinte.

2.2 - Dégager la structure

Lors de l'incendie, la charpente a totalement brûlé, tout en s'effondrant sur le plafond de pierre de la cathédrale. En certains endroits, la voûte est percée et les décombres se sont engouffrés à l'intérieur, dans le chœur. Il est donc nécessaire d'évacuer tous les débris avant de débiter la rénovation.

Un autre problème se pose : la flèche de la cathédrale était en rénovation, par l'entreprise *Le Bras Frère*, ces travaux nécessitaient la présence d'un échafaudage. Selon Didier Cuiset, directeur d'*Europe échafaudage* [20] : « *Quand l'incendie ravage la toiture de la cathédrale, un vaste échafaudage est en court de pose. L'ouvrage auto-stable atteint les 56 m de hauteur et la base de la flèche. Pendant l'incendie, les pompiers, impuissants, n'ont pu qu'arroser cette structure métallique pour la refroidir. Résultat : l'ouvrage de 500 tonnes a tenu bon* ». Il est impératif d'évaluer à quel point la structure a été endommagée, de la consolider pour éviter son effondrement sur les compagnons, puis par la suite de l'évacuer.



Figure 8 : Débris ayant atteint le chœur, et échafaudage après l'incendie, sources [21] [22]

Première étape : Pour compenser la disparition des pannes sablières dans les flammes (figure 9), des vérins sont mis en place en pied de structure dans les jours qui suivent l'incendie.

Afin de surveiller les mouvements de la structure, des capteurs de mouvements *Osmos* (figure 10), usuellement utilisés pour surveiller l'évolution de fissures, sont installés en des points stratégiques de la structure. L'objectif était de surveiller si la fibre neutre de l'acier était atteinte, cas dans lequel les poutres pourraient se briser.

Cependant, toujours selon Didier Cuiset, « *les capteurs ont mis en évidence la ductilité de l'acier* ». L'acier se déforme, mais ne rompt pas.

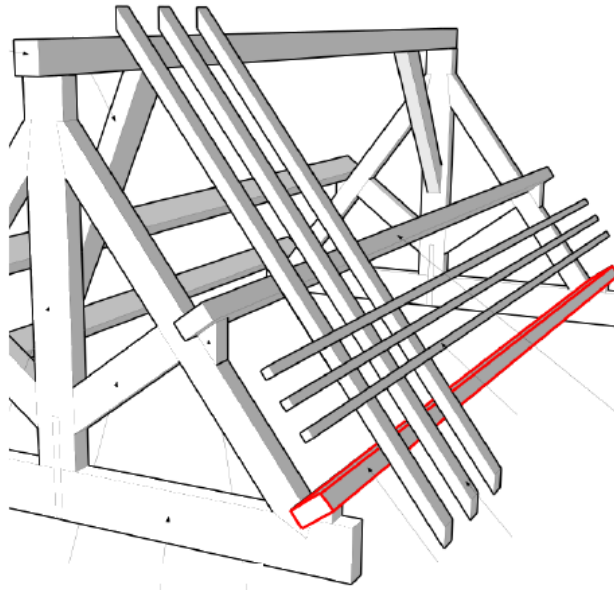


Figure 9 : Panne sablière sur une charpente, source Projet N°5 [23]



Figure 10 : Corde optique OSMOS utilisée pour surveiller les mouvements de l'échafaudage, source [24]

Deuxième étape : Afin de consolider la structure existante, un deuxième échafaudage a été installé début 2020. Comme décrit dans cet article du Moniteur paru le 15 avril 2020 (un an après l'incendie) [25], « *Sa tenue est assurée par un double dispositif : sur l'extérieur, un "cerclage" sur trois niveaux, en pied, en tête et au centre, empêche son effondrement. Plus précisément, des poutres quadrilobes de 28 et 26,5 m de long viennent ceindre le premier échafaudage pour former trois carrés. En tête, d'autres poutres métalliques viennent rigidifier l'existant et empêcher cette fois qu'il ne se referme sur lui-même* ».

Troisième étape : Finalement, une grue fabriquée à Moulins, spécialement pour ce chantier, (aujourd'hui la plus grande grue d'Europe de ce modèle, culminant à 75 m au-dessus de la cime de la toiture) est utilisée pour démonter et évacuer (=déposer) l'ancien échafaudage [26]. La difficulté est de taille : un étage, qui représente environ 2 m de hauteur, pèse environ 35 tonnes pour une charge maximale admissible par la grue de 13 tonnes. Débutée le 8 juin 2020, le chantier de dépose s'est terminé le 24 novembre 2020.

2.3 - Évaluer les dégâts

Afin d'évaluer l'ampleur de dégâts, de nombreuses technologies sont employées. L'objectif est avant tout de déterminer rapidement l'état de la structure et sa capacité à résister aux chargements qui auront lieu lors de la phase de rénovation.

Plusieurs équipes, chacune avec un rôle différent, sont déployées. On retrouve deux axes majeurs dans cette mission d'évaluation des dégâts :

- Numériser entièrement la cathédrale après incendie afin de pouvoir comparer ces données aux données pré-incendie, tout ceci dans le but d'optimiser les travaux de rénovation ;
- Évaluer l'état de la pierre afin de déterminer leurs propriétés mécaniques, et les possibles altérations de ces dernières.

Numérisation de la cathédrale

La numérisation post-incendie s'est faite suite à une convention entre l'association Restaurons Notre Dame et Autodesk. Des technologies bien particulières ont été déployées, telle que la photogrammétrie divergente et convergente, (de préférence lorsque les mesures se font en mouvement), la vidéogrammétrie infrarouge pour des relevés rapides toujours en mouvement, l'utilisation de laser infrarouge en décalage de phase, du laser temps de vol, des drones.



Figure 11 : Installation d'un dispositif de numérisation façade numérisée de Notre-Dame par le CNRS, image extraite de source [27]

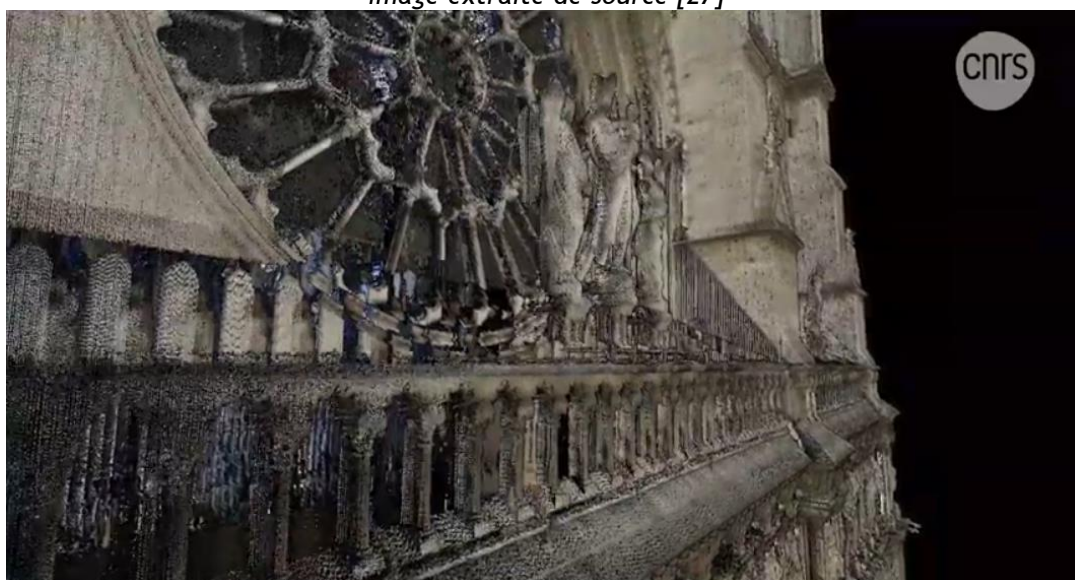


Figure 12 : Numérisation de la façade de Notre-Dame par le CNRS, image extraite de source [27]

Ces données seront comparées avec les données numériques [28] pré-incendie. En particulier, un modèle 3D de la charpente pré-incendie a été réalisée par le laboratoire MAP à l'aide de divers documents :

- La campagne de Rémi Fromont et Eric Trentesaux, réalisée en 2014 et ayant pour but de combler les lacunes dans nos connaissances de la charpente ;
- La campagne de relevés lasergrammétriques menée par Andrew Tallon entre 2006 et 2012 ;
- La campagne de relevés lasergrammétriques menée par Art Graphique Patrimoine en 2014. Une vidéo présentant le nuage de points est par ailleurs disponible sur le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=3PBYiDFdO0A> ;
- La campagne de relevés lasergrammétriques menée par le groupement *d'entreprises GEA - Life 3D* pour le compte de l'entreprise *Le Bras Frères* en 2018.

Étude des pierres

L'état des pierres est une problématique majeure de la reconstruction. C'est pourquoi Lise Leroux, ingénieure au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques du ministère de la Culture [29], a été invitée à expertiser l'état des pierres de Notre-Dame.

Elle définit elle-même les objectifs de son étude, dans un article se trouvant sur le site du ministère de la culture : Il est primordial de répondre aux questions « *Quelle a été leur résistance face aux températures très élevées de l'incendie ? Ont-elles subi des dommages ? Sont-elles réutilisables ?* ». Certaines pierres se sont retrouvées exposées à la chute de débris, au feu et à l'eau pendant plusieurs heures. Seule contrainte : il n'est pas possible de réaliser des essais destructifs sur les pierres encore en place.

Ainsi, Lise Leroux réalise des essais sur des pierres qui ont chuté, entraînées par d'autres. Elle récupère le moindre débris qu'elle puisse trouver, le teste, et le stocke dans l'équivalent d'une bibliothèque des pierres. Pour savoir si les pierres de la cathédrale supporteront la charge nécessaire, Lise Leroux identifie chaque pierre par rapport à sa collection de pierres testées. En outre, Lise Leroux réalise également, en collaboration avec les cordistes, un certain nombre de photos qui lui permettront d'estimer l'état des pierres d'une autre façon.



Figure 13 : Lise Leroux devant la lithothèque de Notre-Dame, source [30]

2.4 - Consolider les arches

Les voûtes de Notre-Dame ont été grandement endommagées lors de l'incendie. L'entreprise *Le Bras Frère* présente sur le chantier lors de l'incendie, a reçu la commande d'éléments permettant de stabiliser la structure [31][32]. Ces éléments ont pour rôle d'être placés sous des parties sensibles de Notre-Dame, et de reprendre les charges auxquelles elles sont soumises afin de les relâcher.

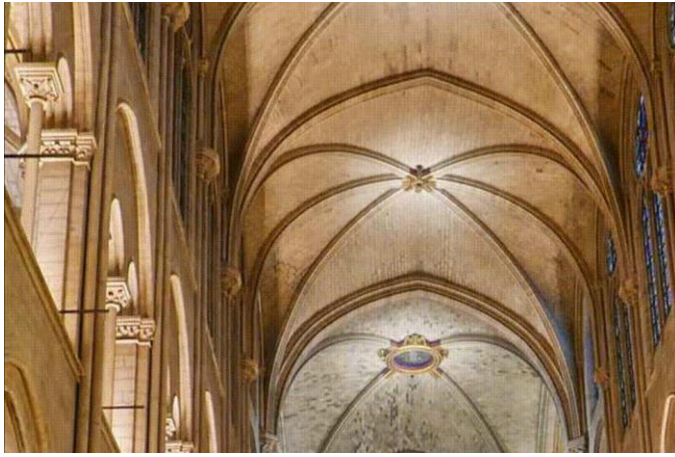


Figure 14 : Les voûtes avant et pendant l'incendie, sources [33] [34]

Posés début février 2021, des cintres en bois soutiennent désormais la structure aux points stratégiques [35]. Conçus sur le site de l'entreprise en Lorraine, ces cintres étaient prévus pour être amenés sur site et montés directement, sans aucune retouche. L'entreprise a donc dû créer des modèles grandeur nature de ces cintres afin de recréer les conditions de poses, l'installation de ces cintres se faisant à l'aide de vérins avec une précision millimétrique.

Les cintres ont été déposés en deux endroits stratégiques :

- Contre les arcs-boutants extérieurs, qui soutiennent la structure (figure 15) ;
- Sous les cinq voûtes de la cathédrale, gravement endommagées / perforées lors de l'incendie (figures 16 à 18).



Figure 15 : Arcs-boutants renforcés par des cintres en bois, sources [36] [37]

C'est le placement des cintres sous les voûtes qui nous intéresse ici, car il a fait appel à des compétences hors normes. Modélisés en premier temps numériquement en 3D, l'entreprise a ensuite produit les cintres à plus de 300 km de la cathédrale. Il s'agit de pièces de plusieurs mètres de haut, en bois et métal, qui doivent être parfaitement conçues pour être assemblées sur le site à l'aide de vérins. L'enjeu est de taille : si elles ne viennent pas épouser parfaitement les formes de la paroi, la reprise de charge ne sera pas suffisante pour assurer la sécurité des ouvriers.

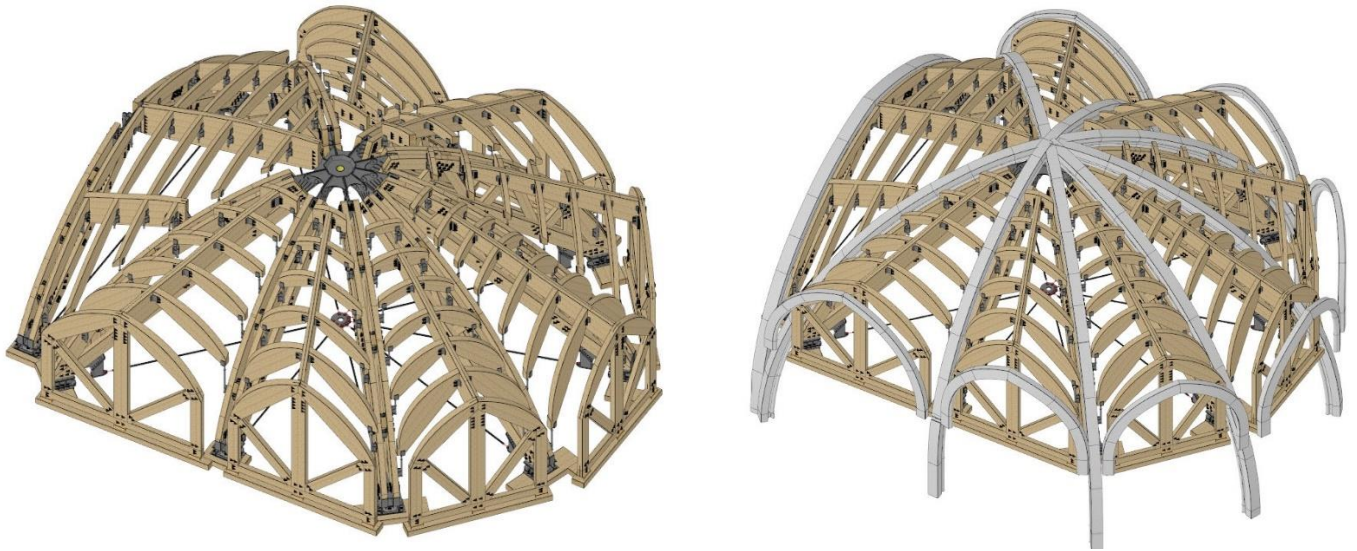


Figure 16 : Modélisation 3D des cintres : à gauche, l'assemblage entier pour une voûte, à droite, affichage de la voûte sur les cintres, source [38]

En outre, chacun des assemblages nécessitait la réalisation sur-mesure d'une clé de voûte métallique de grande taille, élément sensible de toute architecture (figure 17).



Figure 17 : Clé de voûte métallique, source [38]

Finalement, les cintres ont été placés en janvier-février 2021, sans qu'aucun problème majeur ne se pose.



Figure 18 : Une des structures en place sous une voûte, source [38]

3 – Solliciter les corps universitaires

3.1 - Le cahier des charges

Parallèlement à la stabilisation de la structure, des élèves d'un certain nombre d'écoles d'ingénieurs et d'architectures ont été contactés pour se voir proposer le projet de conception de plan pour la reconstruction de la charpente de Notre-Dame. En janvier 2021, ils ont rendu les résultats de leurs travaux. Les six groupes en compétition à travers la France ont dû composer avec un certain nombre de contraintes, les plus importantes étant :

1. Reconstruire « à l'identique » la charpente, suite à la décision prise par Emmanuel Macron en Novembre 2019 [39] ;
2. Respecter les matériaux initialement présents : utiliser les mêmes essences de bois, et s'obliger à réaliser la couverture en plomb ;
3. Soigner particulièrement le côté écologique de la reconstruction, en proposant uniquement des solutions éco-responsables.

Le choix a été fait de présenter ici uniquement le projet N°5, après avoir observé que c'est celui qui respectait le plus les contraintes fixées (comme souligné par la commission scientifique). Outre ce point-là, les six projets sont fortement semblables et l'étude du projet N°5 uniquement donne un bon aperçu de l'ensemble des solutions proposées.

3.2 - Projet 5 : De fil en aiguille : démarche suivie par les étudiants

L'équipe des cinq personnes ayant participé à ce projet sont :

- Inés Belaid, architecte D.E. ;
- Larbi Ben Abdallah, ingénieur en génie civil ;
- Robin Chabert, ingénieur en génie civil ;
- Hélène Lefebvre, étudiante ENSTIB ;
- Victor Petitjean, architecte D.E.

L'équipe du projet N°5 a fait un choix fort lors de la conception du projet : ils ont décidé de prendre un élément unitaire de l'ancienne charpente, une « ferme », pour ensuite la simplifier en ne conservant que les parties structurellement importantes, et enfin concevoir une structure entière à partir de cet élément.

La démarche suivie est peu ou prou la suivante :

1. Conception d'une structure par reproduction d'éléments simples
 - (a) Identification des éléments importants sur un élément ferme
 - (b) Simplification de l'élément ferme
 - (c) Couture par treillis afin de stabiliser la structure

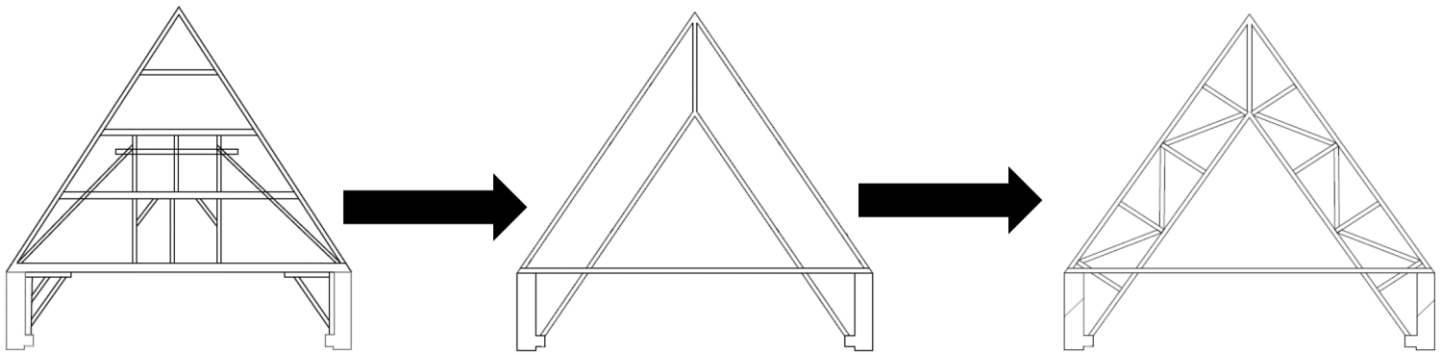


Figure 19 : Simplification de l'élément ferme, couture par treillis, source Projet N°5 [17]

- (d) Placement des poinçons et des entrails moisés pour supporter les arbalétriers en treillis
- (e) Placement des arbalétriers en treillis. L'ensemble des éléments placés constitue alors une **ferme principale** qui est placée sur les corbeaux

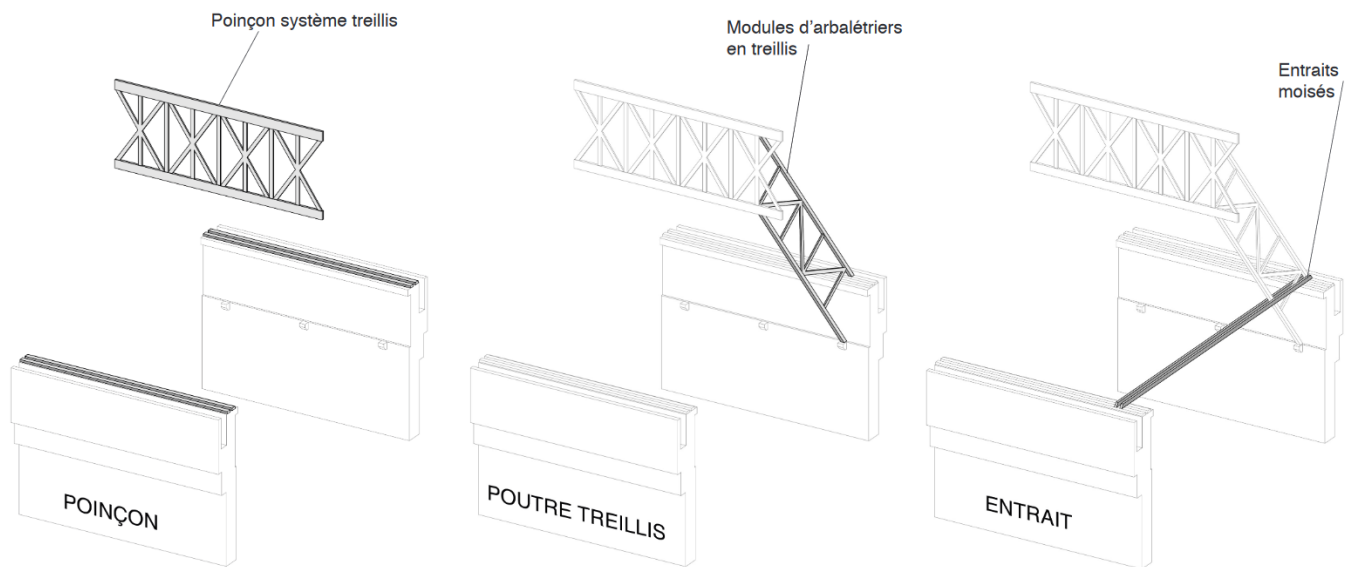


Figure 20 : Placement des poinçons et des entrails moisés, puis des arbalétriers en treillis, source Projet N°5 [23]

- (f) Reproduction des fermes principales tous les 7 mètres
- (g) Intercalage de **fermes secondaires** entre chaque ferme principale (deux fermes secondaires entre chaque ferme principale)
- (h) Ajout de treillis reliant les différentes fermes afin de **prévenir le déversement par contreventement**. À noter que les systèmes de contreventement ne sont pas présents entre chaque ferme, mais qu'il y en a plus à proximité de la flèche, là où les efforts à reprendre sont plus importants.

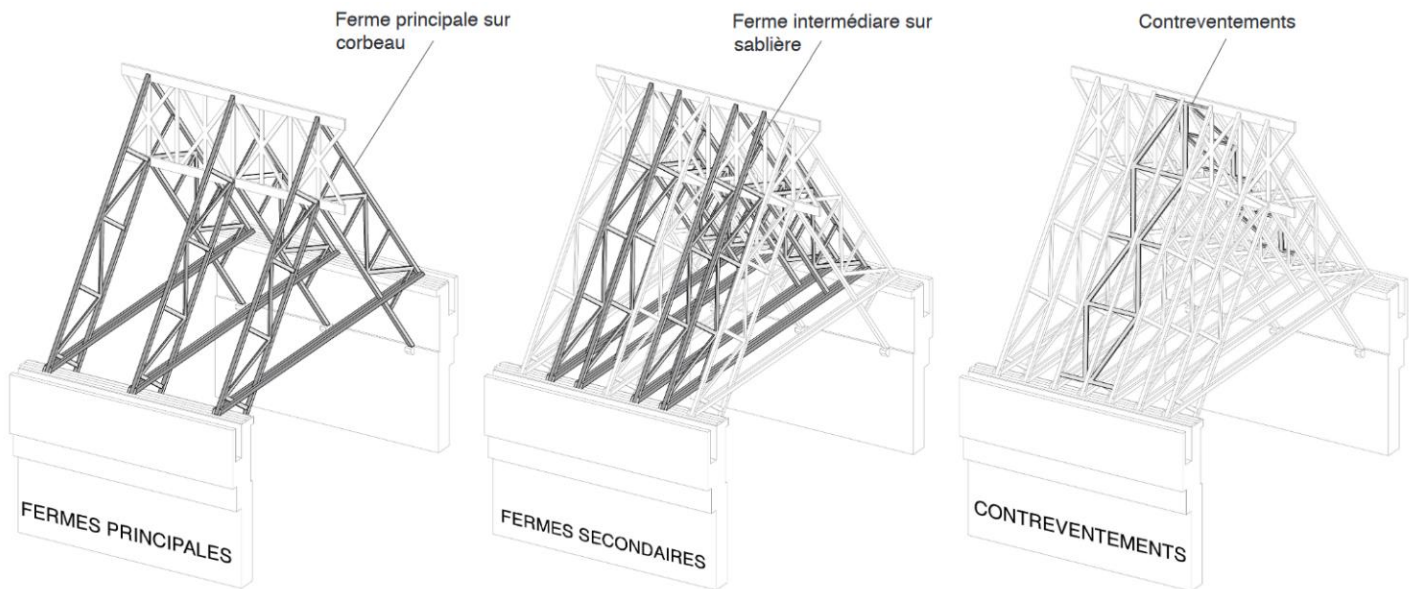


Figure 21 : Reproduction de la ferme tous les 7m, Intercalage des fermes secondaires, Mise en place de système de contreventement, source Projet N°5 [23]

2. Dimensionnement de la structure
 - (a) Identification des différents chargements
 - (b) Choix du chargement propre à l'action du feu comme chargement dimensionnant
 - (c) Dimensionnement de la structure afin d'assurer une tenue au feu de 60 mn
 - (d) Dimensionnement de la structure aux différentes charges : de vent (43 m de haut), de neige, permanente, d'exploitation...
3. Changement de conception afin d'assurer une tenue au chargement correct
4. Comparaison de la structure pensée avec la structure d'origine
5. Proposition d'une installation anti-incendie supplémentaire

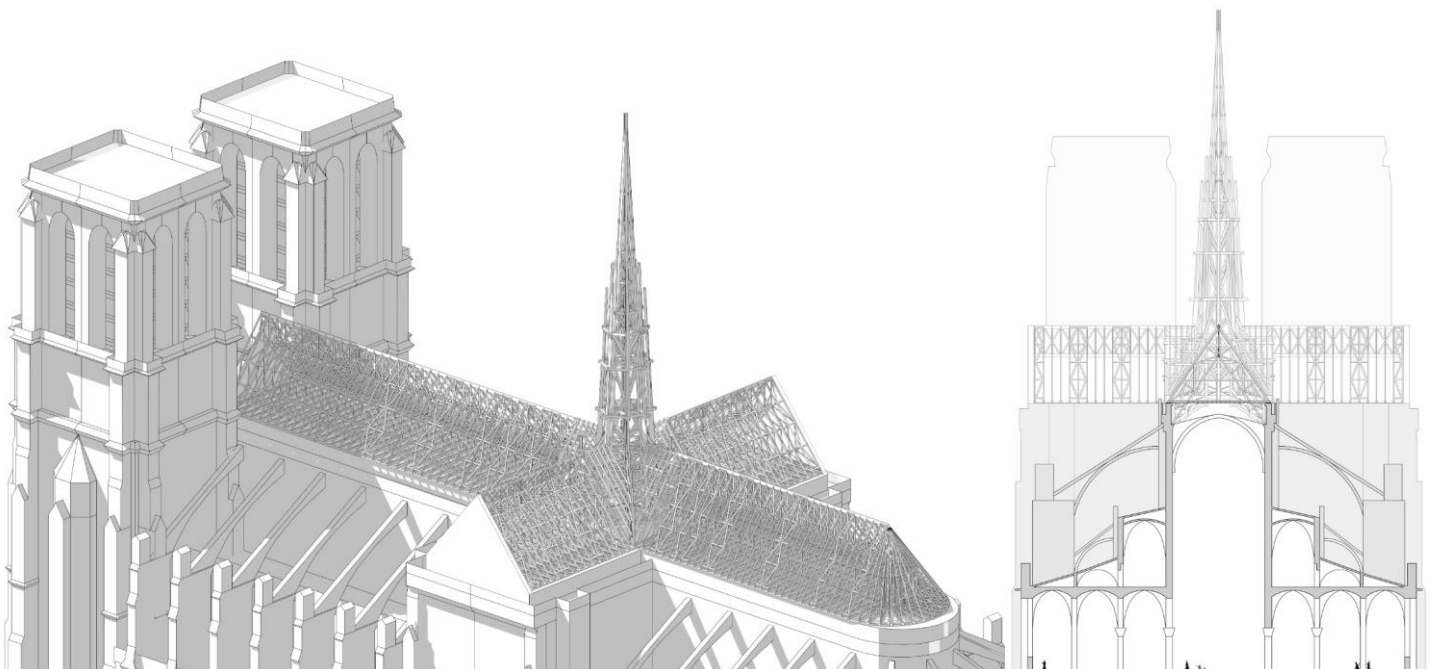


Figure 22 : Illustrations de la charpente conçue, source Projet N°5 [23]

3.3 - Dimensionnement de la structure aux chargements

La sécurité incendie mise en place sur la structure fait l'objet de la dernière partie de ce document. On s'intéresse ici uniquement au dimensionnement propre aux différents cas de chargement, et à la comparaison entre l'ancienne structure et celle proposée.

L'essence de bois

L'équipe du projet N°5 a étudié en premier lieu les caractéristiques de l'essence de bois qui sera, par contrainte, prédominante sur la structure finale : le chêne. En effet, malgré l'autorisation d'utiliser d'autres essences pour des éléments secondaires comme les portes ou le plancher, la contrainte « reconstruction à l'identique » impose une utilisation stricte du chêne pour la charpente. Le document rendu par les élèves explique assez bien le choix du chêne à l'époque de la construction, et ses principales caractéristiques :

« Cette essence a autrefois été utilisée pour la simple raison qu'elle était la principale ressource bois en France, disponible et proche. De plus, les feuillus représentent près de 2/3 de la ressource forestière française. Elle est aujourd'hui un parti pris dans notre projet, le fruit d'une véritable réflexion sur ses forces, ses avantages et ses faiblesses. Du point de vue mécanique et structurel, les essences de feuillus ont toujours été fortement présentes dans la réalisation de charpente. En effet, protégés correctement de l'humidité, ces bois peuvent présenter de très bonnes caractéristiques mécaniques et une densité intéressante. Le seul point faible pourrait être la masse volumique de ces derniers, comparée aux essences de résineux, plus légères. »

Les caractéristiques principales du chêne (bois) sont les suivantes :

- Masse volumique $\approx 700 - 800 \text{ kg.m}^{-3}$
- Module d'Young = 12500 MPa
- Dureté $\approx 3 - 5 \text{ N.mm}^{-1}$

Quelques mots sur le bois nécessaire

1000 chênes issus des forêts françaises ont été sélectionnés pour la reconstruction de la flèche de Notre-Dame. Choisis pour leurs longs troncs sans branches donc sans nœuds, certains d'entre eux sont âgés de plus de deux siècles et présentent des diamètres de plus d'un mètre pour une hauteur de 35 m du pied à la cime. Une première vague d'abattage s'est faite au printemps 2021 avant la montée de sève. Pour atteindre un taux d'humidité inférieure à 30%, le bois doit sécher de 12 à 18 mois [40].

La charpente de Notre-Dame sera reconstruite avec les chênes de la France entière : 300 d'entre eux sont issus des forêts de la Nièvre et de l'Yonne, 150 de l'Île-de-France, une centaine de la forêt de Mormal dans le Nord, environ 60 chênes viennent de Haute-Saône, une cinquantaine d'Alsace, puis une trentaine sort de la forêt de Loches en Indre-et-Loire, et d'autres encore du Maine-et-Loire, la Sarthe, les Ardennes, l'Eure, la Vienne Le cahier des charges impose la sélection des arbres robustes, droit, exempt de nœuds, sans gélivure (défaut causé par le gel). Leur diamètre est compris entre 50 à 90 cm et leurs troncs mesure de 5 à 14 m lorsqu'extraits de domaines privés et de 15 à 21 m lorsqu'issus des forêts domaniales [41].

La reconstruction de la charpente de Notre-Dame représente quelques 2 000 m³ de bois ce qui est l'équivalent d'environ 1 500 arbres [42].

Identification des chargements

L'équipe a alors dimensionné la structure aux efforts maximum ELU¹ et aux déplacements maximum ELS² grâce à différentes combinaisons des charges suivantes :

- **Charges permanentes G** , poids propre de la structure, déterminé grâce à la masse volumique des matériaux ;
- **Charges d'exploitation Q** , charges qui surviendront lors de la maintenance ou des travaux de rénovation/ reconstruction ;
- **Charges de vent W** ;
- **Charge de neige S** .

Les **charges permanentes** correspondent donc au poids propre de la structure. Pour le déterminer, les équipes ont observé le poids propre d'un élément de structure ferme. Comme ils connaissent le nombre et le positionnement des fermes dans toute la structure, il est possible d'en déduire le poids propre de l'ensemble. Ils obtiennent un Poids propre de $G = 8366$ kg par unité de ferme (en considérant le poids de la ferme sur corbeau, de la ferme intermédiaire, de la couverture et du plancher).

Les **charges d'exploitations** sont fixées quant à elle à 40 daN.m^2 sur la couverture et 150 daN.m^2 sur le plancher.

La **charge de vent** est calculée en fonction de la **pression spécifique de pointe**, q_p , fonction de différents coefficients dépendent, entre autres, des caractéristiques du bâtiment et du zonage défini par l'Eurocode 1 pour les charges de vent :

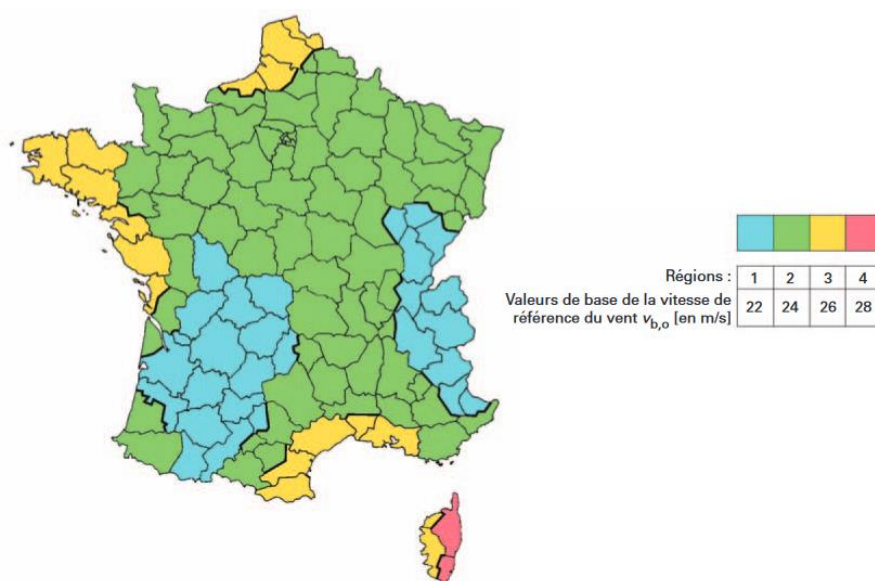


Figure 23 : Répartition des charges de vent sur le territoire français, source [43]

De même, les charges de neige sont déterminées en fonction des caractéristiques du bâtiment et du zonage défini par l'Eurocode 1 :

¹ ELU : États Limites Ultimes

² ELS : États Limites de Service

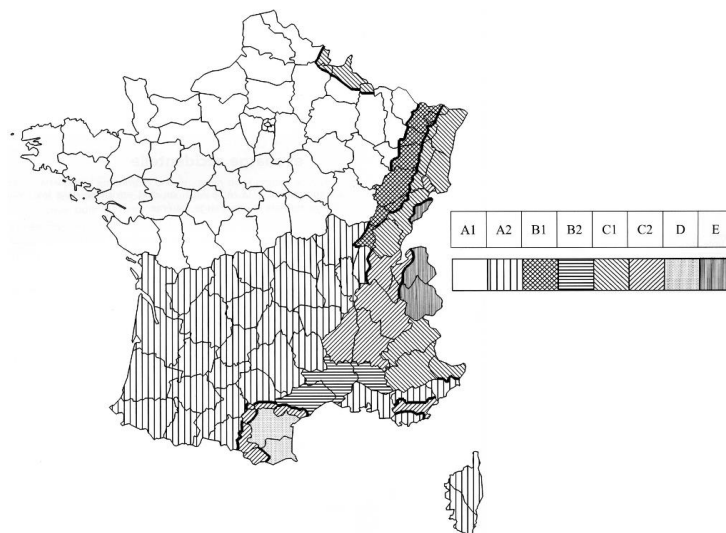


Figure 24 : Répartition des charges de neige sur le territoire français, source [44]

Ce dimensionnement a conduit l'équipe du projet N°5 à revoir leurs plans : initialement, elle souhaitait épurer le concept présenté plus haut en adaptant la hauteur à laquelle les arbalétriers se croisaient afin d'avoir « un jeu de volume intéressant ». Cependant, la structure n'était pas assez stable et résistante face aux différents chargements et elle a dû revenir à la solution initiale.

4 – Sécurité incendie

La sécurité incendie est selon l'équipe du projet N°5, le chargement dimensionnant de la structure. Les étudiants se sont fixés **un objectif de tenue au feu de 60 min.**

Toujours pour un élément élémentaire de ferme, le comportement de chacune des pièces face au feu a été identifié. Pour cela, il a fallu :

1. Déterminer les faces exposées au feu pour chacune des pièces ;
2. Calculer combien de temps tiendrait la structure en utilisant uniquement le dimensionnement des sections découlant du calcul « à froid » (en l'occurrence 15 min) ;
3. Calculer quelle était l'épaisseur de bois à ajouter afin de se permettre une résistance supplémentaire de 45 min.

Fait intéressant, l'équipe a également proposé un système de protection incendie dans toute la cathédrale. Pour cela, les failles de l'ancien système ont été analysées afin de mettre en place un système ne présentant pas ces faiblesses. Avant l'incendie, des détecteurs haute sensibilité (HSSD) (High Sensitive Smoke Detection) étaient situés dans toute la cathédrale. Ce système était associé à 160 détecteurs de fumée répartis dans toute la cathédrale. Le jour de l'incendie, le système a bien détecté la fumée, mais une mauvaise interprétation de signal a fait qu'en l'espace d'une demie heure, une grande partie du toit avait déjà pris feu. L'incendie s'est ensuite très vite propagé à l'ensemble de la charpente.

En premier lieu, l'équipe a fait le choix d'opter pour le même type de système (High Sensitive Smoke Detection) mais de relier directement les alarmes au service de secours. Ainsi, on réduit le risque de mal interpréter le signal d'alarme. Par ailleurs, l'équipe a opté pour une solution de compartimentage de la charpente afin d'éviter la propagation rapide des flammes qui s'est produite le jour de l'incendie. Les éléments de compartimentages sont des panneaux CLT de 60 mm d'épaisseur, réalisés à partir de planches de bois massif empilées en couches croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface. Ils représentent chacun une surface d'environ 210 m² et sont placés à intervalle régulier dans la structure.

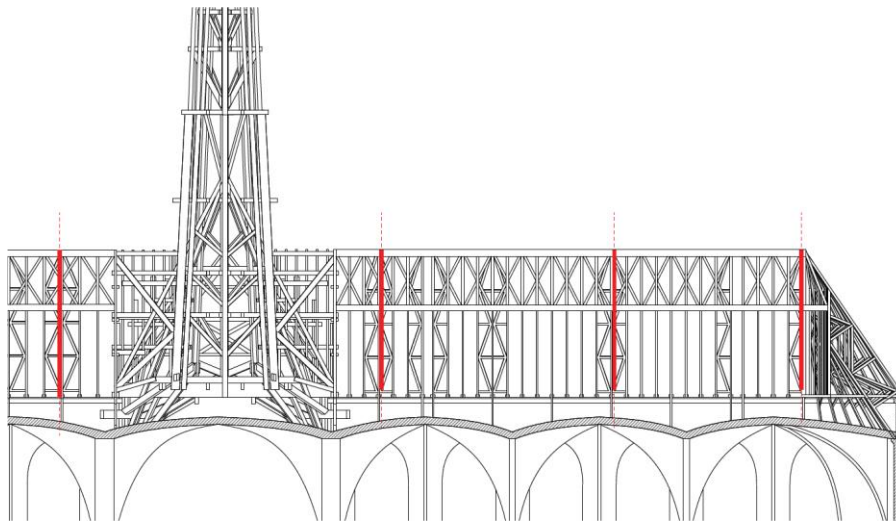


Figure 25 : Répartition des panneaux (en rouge) dans la structure, source Projet N°5 [23]

Le placement des détecteurs est ensuite déterminé en fonction de leurs caractéristiques et d'un logiciel idoine qui permet de déterminer combien de détecteurs doivent être placés dans chaque compartiment et à quelle distance les uns des autres pour allier coût et surveillance optimale :

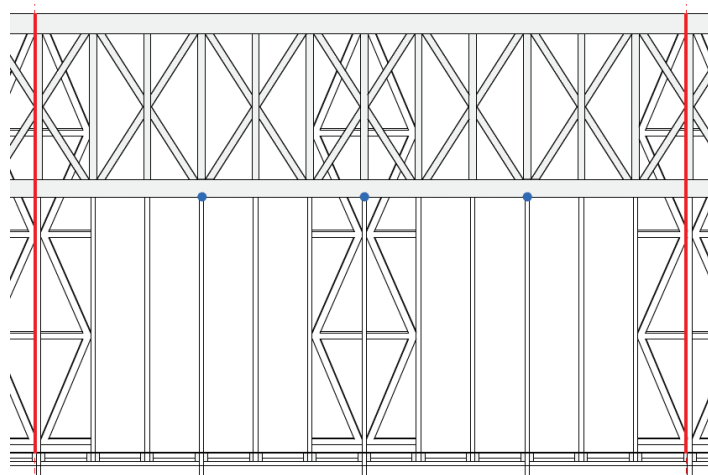


Figure 26 : Répartition des détecteurs (points) dans un compartiment, source Projet N°5 [23]

5 – Conclusion

Connaître le passé de la Cathédrale de Notre-Dame, comprendre l'incendie du 15 avril 2019 et les différents organismes en charge de sa reconstruction, appréhender certaines spécificités de la consolidation temporaire de la structure, et découvrir la proposition de reconstruction par le groupe universitaire N°5 permet d'avoir un éclairage sur ce chantier hors normes. Le chantier de reconstruction de Notre-Dame ne fait que commencer et les aléas qui ont rythmé la vie de ce bâtiment depuis le XII^e siècle surviendront toujours. L'émergence du Covid-19, qui a déjà fortement retardé le chantier, en est un exemple

En novembre 2021, la moitié du planning universitaire imposé aux équipes des six projets dans le cadre de ce programme est passée. Cependant, les délais sur un projet de cette envergure présentent des risques d'être bousculés.

Références :

- [1]: Peter Haas, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32131500>
- [2]: <https://www.google.fr/maps>

- [3]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cath%C3%A9drale_Notre-Dame_de_Paris
- [4]: Crédits : REUTERS/Benoit Tessier, <https://www.lefigaro.fr/flash-actu/avant/apres-des-images-pour-montrer-l-etendue-des-degats-20190417>
- [5]: Umbricht. — File:Notre Dame de Paris by day.jpg, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=78094408>
- [6]: Wikpan, d'après une image des commons wikipedia de domaine public — Ce fichier est dérivé de : Plan.cathedrale.Paris.pngSource for collapsed areas: (April 17, 2019 13:06). "Video Shows Damage Done to Notre Dame Cathedral by Fire - World news". Tasnim News Agency., rough plan source (if you have a better source, please post it here), CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=78091683>
- [7]: Crédits : François Guillot/AFP, <https://www.lefigaro.fr/culture/la-fleche-de-notre-dame-de-paris-en-proie-a-un-gigantesque-incendie-20190415>
- [8]: Levrier Guillaume — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=78092701>
- [9]: <https://www.restauronsnotredame.org/commission-technique>
- [10]: <https://www.restauronsnotredame.org/fondements>
- [11]: <https://www.restauronsnotredame.org/post/les-bois-techniques-et-la-mixit%C3%A9-des-mat%C3%A9riaux-bois-m%C3%A9tal-au-secours-des-voutes-de-notre-dame>
- [12]: <https://www.restauronsnotredame.org/>
- [13]: Projet N° 1 : L'identique consolidée, <https://www.youtube.com/watch?v=SNdd3owIM2w>
- [14]: Projet N° 2 : Racines, <https://www.youtube.com/watch?v=EoHWSW7450k>
- [15]: Projet N° 3 : Équilibre, https://www.youtube.com/watch?v=yZTqL_O7N-E
- [16]: Projet N° 4 : Le rêve Modulaire, <https://www.youtube.com/watch?v=EssnKpJYEnk>
- [17]: Projet N° 5 : De fils en aiguille, <https://www.youtube.com/watch?v=i7NkmZ1Vl>
- [18]: Projet N° 6 : Résille gothique, <https://www.youtube.com/watch?v=ZE57u1XsJdg>
- [19]: <https://www.batiactu.com/edito/notre-dame-paris-premieres-etudes-charpente-et-fleche-61272.php>
- [20]: <https://www.batiactu.com/edito/echafaudage-sinistre-notre-dame-paris-est-desormais-60724.php>
- [21]: https://www.challenges.fr/france/et-si-on-vendait-les-gravats-de-notre-dame-de-paris_760614
- [22]: <https://www.mieuxvivre-votreargent.fr/impots/2019/06/25/notre-dame-debut-dici-un-mois-du-demontage-de-lechafaudage/>
- [23]: Projet N° 5 « De fil en aiguilles » https://8fb77b70-a80b-4b07-be39-9f02acaf4da5.filesusr.com/ugd/6b15df_2c5e1bd949664bf199b59b1fe86005bc.pdf
- [24]: <https://www.osmos-group.com/tr/content/liris-optik-kablo-ve-kablosuz-mini-istasyon>
- [25]: Notre-Dame, une an déjà, Le moniteur, avril 2020, <https://www.lemoniteur.fr/article/notre-dame-un-an-deja.2084966>
- [26]: <http://www.matebat.fr/fr/actualite/montage-uperio-de-la-grue-potain-mdt-809-sur-lesite-de-la-cathedrale-de-notre-dame-de-paris.php>
- [27]: <https://www.youtube.com/watch?v=pKkc265sJZA>

- [28]: <https://youtu.be/3PBYiDFd00A>
- [29]: <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/lise-leroux-fait-parler-pierres-dame-paris-0>
- [30]: <https://www.franceinter.fr/emissions/le-zoom-de-la-redaction/le-zoom-de-la-redaction-10-octobre-2019>
- [31]: <https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2021/01/21/jarny-comment-le-bras-freres-va-securiser-cinq-voutes-de-notre-dame-de-paris>
- [32]: <https://www.franceinter.fr/economie/en-lorraine-on-prepare-la-derniere-phase-de-securisation-du-chantier-de-notre-dame-de-paris>
- [33]: <https://www.leparisien.fr/paris-75/avant-apres-voici-a-quel-point-notre-dame-a-souffert-de-l-incendie-16-04-2019-8054463.php>
- [34]: <https://www.lejdd.fr/Societe/a-linterieur-de-notre-dame-de-paris-de-nombreux-degats-mais-le-pire-a-ete-evite-3892823>
- [35]: <https://www.restauronsnotredame.org/post/s%C3%A9curisation-de-la-cath%C3%A9drale-notredame-de-paris-les-cintres-de-le-bras-fr%C3%A8res>
- [36]: Crédits : Stéphane de Sakutin AFP, <https://www.ledevoir.com/culture/560593/au-coeur-de-la-remise-a-de-notre-dame>
- [37]: Crédits : Rafael Yaghobzadeh AFP, <https://www.ledevoir.com/culture/560593/au-coeur-de-la-remise-a-de-notre-dame>
- [38]: <https://cecobois.com/actualites/des-cintres-en-bois-pour-securiser-cinq-voutes-de-notre-dame-de-paris/>
- [39]: <https://www.batiactu.com/edito/notre-dame-paris-sera-reconstruite-avec-bois-et-plomb-60880.php>
- [40]: Notre-Dame de Paris : les plus beaux chênes de France pour la flèche, son socle et le transept, M. Tellier, France culture, mars 2021, <https://www.franceculture.fr/architecture/notre-dame-de-paris-les-plus-beaux-chenes-de-france-pour-la-fleche-son-socle-et-le-transept>
- [41]: Un tour de France des forêts pour la charpente de Notre-Dame de Paris, A. Devillard, Sciences et Avenir, https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/archeologie/un-tour-de-france-des-forets-pour-la-charpente-de-notre-dame-de-paris_153489
- [42]: Le bois, de la ressource à la reconstruction de notre patrimoine, Fondation France Bois Forêt, consulté en octobre 2021, https://franceboisforet.fr/wp-content/uploads/2020/09/lettre-information_-la-place-du-bois-dans-la-reconstruction-de-notre-dame-de-paris-.pdf
- [43]: Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 - Partie 1-4, Constructions et travaux publics, Les superstructures du bâtiments, Danielle Clavaud, Techniques de l'ingénieur, mai 2014, https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/40694/mod_resource/content/0/Actions%20du%20vent%20sur%20les%20b%C3%A2timents%20selon%20lEurocode%201%20E2%80%9320Partie%201-4.pdf
- [44]: NV65 règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes, <https://www.icab.eu/guide/nv65/>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>