

# Études universitaires pour la reconstruction de la toiture de Notre-Dame conduites pour l'association Restaurons Notre-Dame

Franck BESANÇON  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
Chaire partenariale Architecture et Construction Bois  
Nancy, France



Gilles DUCHANOIS  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
Nancy, France



## 1. Un contexte d'études inhabituel

L'association « Restaurons Notre-Dame » constituée à la suite de l'incendie de la cathédrale (reconnue d'intérêt public et culturel) a renouvelé en avril 2020 sa commission scientifique, technique par une commission de coopération scientifique, technique et universitaire.

Un programme d'actions universitaires est proposé et validé en juin par l'association. Le programme propose 3 phases en adéquation avec le calendrier universitaire et associe 5 écoles. La commission a créé un comité d'experts parmi les adhérents de l'association pour accroître la fiabilité et donner du crédit aux travaux entrepris.

### 1.1. Un programme universitaire

Devant les multiples propositions de reconstruction faites par les architectes les mois suivant l'incendie, le programme universitaire cherche à promouvoir le bois et faire plancher les étudiants en fin de formation initiale à la reconstruction de la toiture de Notre-Dame.

Cette sollicitation de l'enseignement supérieur sur un sujet rare permet aux étudiants de se familiariser à la complexité d'un contexte lié à un édifice remarquable classé monument historique de plus de 800 ans d'histoire, de mettre en application le matériau bois et sa mise en œuvre et de collaborer entre eux avec leurs compétences d'architecte et d'ingénieur sur un programme exceptionnel.

### 1.2. Le programme d'actions

Le programme se déroule en 3 phases sur une durée d'un an de septembre 2020 à septembre 2021. La première phase étudie la reconstruction de la charpente, flèche et couverture. Elle aborde l'ensemble de l'ouvrage et entrevoit les possibles de reconstruction. La seconde phase s'intéresse à traiter des sujets d'études spécifiques à la charpente de Notre-Dame. La troisième phase s'applique à développer un outil de simulation permettant de comprendre les phénomènes s'exerçant sur les charpentes dont la perte d'humidité des bois pendant leur mise en service.

L'ensemble des travaux s'emploie à trouver une continuité de réflexion sur la reconstruction de la charpente et de la flèche en bois ainsi que la couverture en apportant davantage de précisions dans chaque phase.

### 1.3. Les écoles

Pour mener le programme d'actions universitaires, la commission sollicite 5 écoles pour les compétences et leur intérêt sur le matériau bois et sa mise en œuvre. Ce sont l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy et l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois proposant une formation commune de Master 2, l'École Supérieure du Bois, l'université des Sciences Appliquées de la Sarre à Sarrebruck (Allemagne) pour leurs travaux de recherche sur les ambiances dans les églises et la participation de l'École Nationale de Météorologie de Toulouse.

Dans le cadre de ce programme ce sont 50 étudiants qui ont été mobilisés et encadrés par leurs enseignants et accompagnés par le comité d'experts de l'association.

### 1.4. Le comité d'experts

Le comité d'experts de l'association Restaurons Notre-Dame est composé de personnalités reconnues et membres de l'association pour préciser et délimiter les sujets d'études avant qu'ils ne soient entrepris. Pour envelopper l'ensemble des domaines qui touchent à la toiture de Notre-Dame, le comité se compose d'une diversité de métiers : charpentiers, couvreurs, ingénieurs structure, experts du patrimoine, ingénieurs forestiers, chercheurs universitaires, architectes... L'objectif est de recueillir un regard professionnel objectif en toute indépendance et dans leurs domaines de compétences sur les travaux menés et bénéficier d'un espace d'échange et de discussion sur les questions soulevées.

## 2. La reconstruction de la charpente, flèche et couverture

Commencée en septembre 2020, la phase 1 s'est terminée en décembre 2020. Elle propose six scénarios de charpente, flèche et toiture réalisés par les 30 étudiants du Master 2 Génie Civil « Architecture Bois Construction » dans le cadre de leur enseignement de projet.

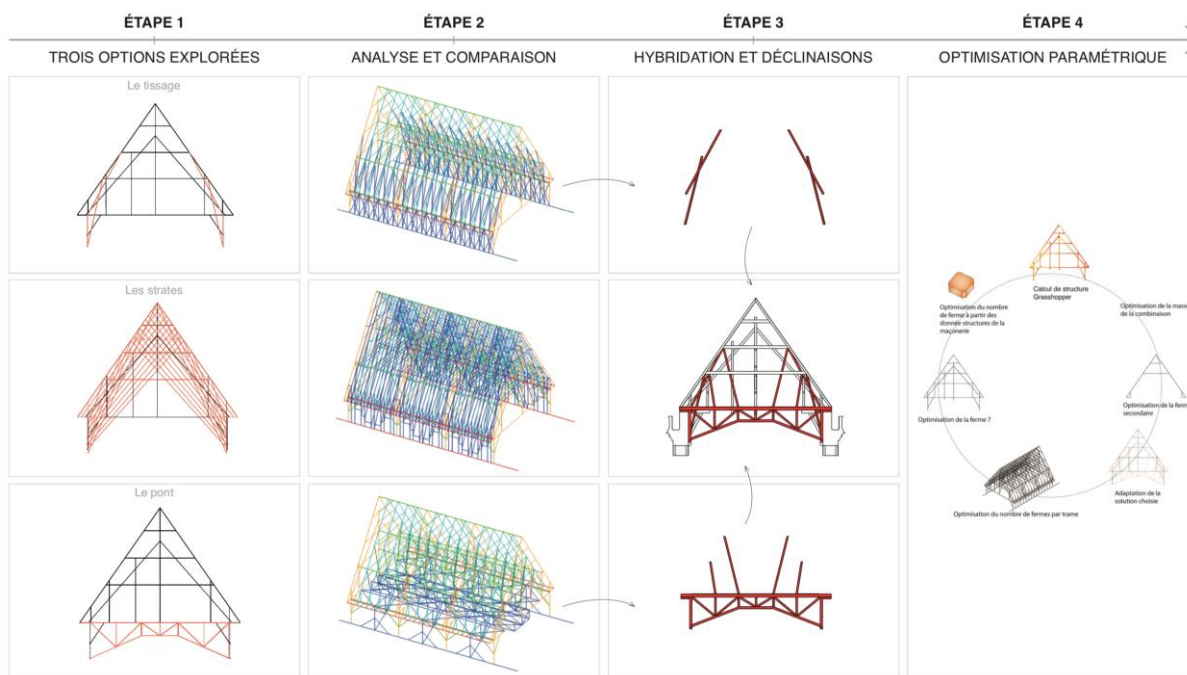
### 2.1. Une documentation importante et des incertitudes

Le projet de reconstruction s'est fait avec un cahier des charges du moment, c'est-à-dire avec les éléments dont nous disposons à la suite de Commission Nationale du Patrimoine et l'Architecture de juillet 2020 annonçant que la charpente sera reconstruite en bois à l'identique.

Si la réflexion entreprise sur la toiture s'inscrit dans la conservation de la volumétrie et de l'aspect extérieur, les travaux ont conduit à utiliser la programmation paramétrique pour rendre les charpentes adaptables aux points d'appuis supposés fragilisés par l'incendie. Il s'agissait de pouvoir faire face aux données certes nombreuses mais pas toujours suffisamment précises. D'autre part, l'état structurel de la maçonnerie et les options de réparation n'étaient pas encore connues.

### 2.2. Six propositions

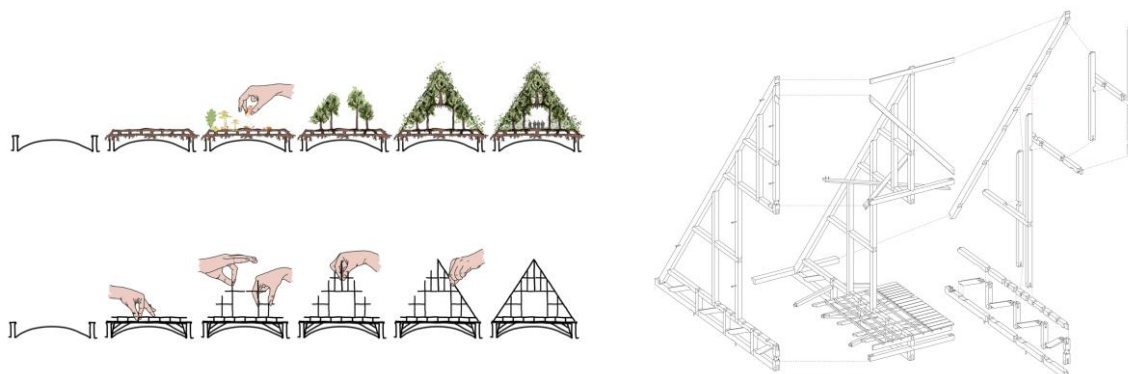
Ce sont six orientations qui ont été restituées à l'association fin décembre 2020. Elles se déclinent en trois propositions contemporaines, une approche modulaire et deux proches de l'identique dont une questionne l'allègement de la charpente et l'autre son renforcement.



Projet « L'identique Consolidé ». Méthode d'optimisation structurelle. Julia VUILELQUEZ, Jacques LIGOT, Salomé VINCIARELLI, Maxime LACOMBE et Aline BURLE, Master ABC.

Si certaines propositions de charpente sont éloignées d'une reconstruction patrimoniale à l'identique, c'est avant tout que « la forêt » est perçue comme un ouvrage qui est peu donné à voir et qui, pour une grande majorité de français, a été l'objet d'une découverte lors de l'incendie et des multiples reportages qui ont été diffusés. La flèche de Viollet-Le-Duc, tout aussi représentatif de Notre-Dame, est dans la plupart des propositions reconstruite à l'identique puisqu'elle est un élément bien visible aux yeux de tous.

Les propositions ne s'arrêtent pas qu'aux charpentes du comble et de la flèche, elles s'intéressent également aux moyens de production actuels, aux enjeux environnementaux, aux questions de salubrité des matériaux employés et au développement de la filière bois.



Projet « Rêve Modulaire ». Interprétation de « La Forêt de Notre-Dame » et dessin de la logique constructive modulaire de la charpente. Maxence LEBOSSE, Michel RAMOS, Vincent MASGONTY, Angela Tatiana ARIAS TEATIN et Mélaïne De BACKER, Master ABC.

L'intégralité de ces études sont consultables en lignes sur le site de l'association Restaurons Notre-Dame ([www.restauronsnotredame.org](http://www.restauronsnotredame.org)) rubrique Actualités : Restaurons Notre-Dame dévoile six scénarios pour la restitution de la charpente, flèche et toiture. Article mis en ligne le 16 février 2021.

### 3. Les Projets de Fin d'Études (PFE)

La phase 2 démarrée en octobre 2020 s'est achevée en février 2021. Trois thèmes ont été retenus et validés par le comité d'experts pour faire l'objet de sujet de projet de fin d'études pour des étudiants ingénieurs en fin de cycle.

#### 3.1. Les assemblages de la charpente d'origine

Refaire la charpente à l'identique en utilisant du chêne frais pour en faciliter l'équarrissage à la main avec une doloire, permet de nous interroger sur le fonctionnement des assemblages de la charpente et leur taux de travail. Dans son ouvrage « Traité théorique et pratique de l'art de bâtir », l'architecte J. Rondelet identifie dans la construction à pans de bois *le relâchement des assemblages causés par la perte d'humidité* (Section deuxième, article premier : *Des pans de bois et des cloisons - p.126*). Il y a tout à penser que la même situation ait été présente dans la charpente de Notre-Dame. De là, l'étude se concentre sur la modélisation des assemblages (tenon-mortaise, embrèvement) pour en définir les jeux et raideurs et pour en quantifier les contraintes de séchage.

L'autre aspect de cette étude travaille sur les types d'appuis de la charpente qui exerceront des déformations du système. L'objectif est d'avoir une transmission des charges de la toiture sur la maçonnerie uniquement par compression. Pour cela, il s'agit de regarder le poids propre minimum de la toiture (charpente + couverture) pour éviter son basculement ou son soulèvement au vent. Pour chacun des cas, le poids de la toiture est supérieur aux efforts de vent et il serait possible d'optimiser en faisant attention de ne pas diminuer ce poids propre de plus de 30%.

#### 3.2. Les effets climatiques sur la charpente

Le travail s'est orienté sur deux volets en lien avec le climat. Le premier a été de regarder la résistance aux vents de la toiture et de la flèche pour en analyser leur comportement respectif. Le second volet de cette étude a été de comprendre l'ambiance hygrothermique du comble et de tester différents dispositifs permettant le contrôle de l'humidité. L'objectif de cette étude est d'évaluer les conséquences d'une modification du climat dans les années sur la charpente de Notre-Dame.

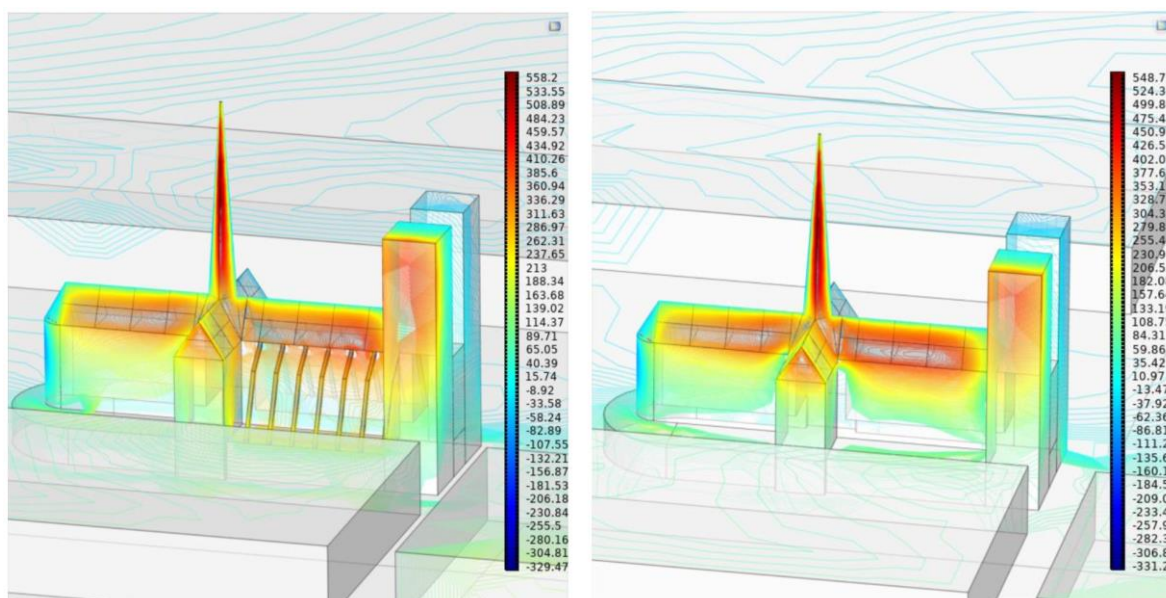
La mise en œuvre de bois de chêne au pourcentage d'humidité de l'ordre de 30% va trouver son équilibre sur plusieurs années. Cependant, si la modification du climat actuel tend vers un scénario de climat chaud et sec, cela va conduire à une perte d'humidité

rapide des bois les deux premières années entraînant de forts retraits avant de se sécher de manière plus constante.

Le séchage des bois pourrait durer en moyenne une dizaine d'années mais selon la nature du climat sur Paris le bois pourrait avoir un équilibre d'humidité variant de 15% et pouvant descendre jusqu'à 5% si l'on prend un climat chaud et sec pouvant amener, dans ce cas, des variations dimensionnelles importantes.

Pour contrôler les variations d'humidité des bois de la charpente dans le comble, l'étude a regardé différentes solutions. Les résultats montrent qu'une couverture étanche à l'air assèche l'air dans le comble. C'est une solution qui pourrait être intéressante pour préserver les bois mais qui devient complexe à mettre en œuvre sur la toiture de Notre-Dame. À l'inverse, une couverture isolée thermiquement humidifie l'air ambiant du comble ce qui n'est pas souhaité. De plus, la solution d'associer un nouveau matériau dans le complexe de couverture peut aller à l'encontre d'une restauration à l'identique.

En ce qui concerne les effets du vent sur la toiture et flèche de Notre-Dame, nous n'avons pas pu avoir de véritables valeurs de prévisions des vents dans les 100 prochaines années. Cependant, la simulation numérique, permet de tester différentes vitesses de vent. Le modèle de la cathédrale a été simplifié et pour le valider, il a été comparé avec un modèle prenant en compte les arcs boutants. Il s'avère que l'impact est très faible sur les pressions du vent que subit la toiture.



Étude sur le vent. Pression sur les surfaces des modèles avec et sans arcs boutants. Kerneils BRIEUC, Maud ROYET-DEMOSTHENIS, ENSTIB. Natali BRAUN, HTW Saar.

### 3.3. Le cycle de vie de la toiture

Cette étude s'intéresse à faire l'analyse de cycle de la toiture de Notre-Dame pour en connaître l'impact à la suite de l'incendie. Pour quantifier les émissions de GES, il a fallu trouver les étapes de la construction et de la maintenance de la toiture de la cathédrale en s'appuyant sur la bibliographie. À cela, s'est ajouté la modélisation des pratiques du Moyen-Âge pour l'abattage, l'équarrissage, la taille des assemblages et le transport des bois.

En s'appuyant sur l'exemple du château de Guédelon, cela a permis de renseigner la fabrication, l'usure et le remplacement des outils utilisés à l'époque.

Il se trouve que la toiture a stocké davantage de carbone lors de sa phase de production qu'elle en a émis dans l'atmosphère lors de sa fin de vie. En effet, la part importante de bois dans les charpentes du comble de Notre-Dame associée à la grande longévité de mise en service (800 ans) et au bois énergie utilisé pour la fabrication des outils ainsi qu'à une énergie humaine et animale non impactantes sont des éléments très favorables et deux fois supérieur à la part affectée à la fin de vie qui elle est positive.

## 4. Synthèse et outil de simulation

La phase 3 qui a commencé en mars 2021 est la synthèse des travaux avec la réalisation d'un outil de simulation paramétrique sur la perte d'humidité des bois et pour se terminer en septembre 2021.

L'outil dans sa version final pourra simuler le comportement des différentes charpentes modélisées de la phase du retrait des bois à son emploi dans le temps. Il permettra aussi de valider le choix des qualités des bois, des caractéristiques minimales des assemblages, des appuis, les types de charges employées, et de l'impact des différents scénarios climatiques possibles (variation des retraits et des vents).

## 5. Conclusion

Ce programme universitaire qui rappelons-le, ne peut se substituer aux études professionnelles et ne peut être considéré pour la phase 1 comme une restauration « à l'identique » sur le plan patrimonial a pu exister par l'intérêt que l'association Restaurons Notre-Dame a vu dans le développement des métiers de la filière bois et des bénéfiques qui pourraient en résulter pour les étudiants, très prochainement, professionnels.