



Restauration de la charpente bois de la flèche et de la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Programme de recherche scientifique et universitaire

piloté par la

Commission de Coopération Scientifique, Technique et Universitaire
de Restaurons Notre-Dame (rND) - Association culturelle d'intérêt général

Monsieur Franck Besançon, président de la Commission

Maître de Conférence et Directeur de la chaire partenariale

« *Architecture et construction bois : du patrimoine au numérique* »

En collaboration avec :

L'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN)

L'École Nationale Supérieure des Technologies et des Industries du Bois d'Épinal (ENSTIB)

L'École Supérieure du Bois à Nantes (ESB)

L'École Supérieure de Sarrebruck, Allemagne (HTW SAAR)

L'École Nationale de Météorologie à Toulouse (ENM)

Le Centre de recherche en architecture et ingénierie de Nancy (MAP CRAI)

Le Laboratoire d'histoire de l'architecture contemporaine de Nancy (LHAC)

RESTAURONS NOTRE-DAME

Maison des associations, Bal N°118 – 5, Rue Perrée 75003 F-PARIS

www.restauronsnotredame.org - contact@restauronsnotredame.fr

Association Loi 1901, reconnue d'intérêt général à caractère culturel
déclarée en Préfecture de Paris sous le N° W751252846 – Siret N° 8837429000011

1 – Avant-Propos

L'association française **Restaurons Notre-Dame (rND)** a été créée au lendemain de l'incendie des 15 & 16 avril 2019 de la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris avec deux objectifs principaux : d'une part, apporter toutes les informations d'ordre technique auprès des autorités et décideurs publics, de la presse et des médias et du grand public dans l'objectif d'une restauration de la charpente en bois de la cathédrale et, d'autre part, présenter dans cet objectif, toutes les options possibles de restauration de cette charpente (notamment géométrique, essences de bois, mixité avec d'autres matériaux).

Restaurons Notre-Dame s'est constituée à partir des grands acteurs français de la filière bois. Ses membres proviennent de tous les secteurs de la construction. 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 sûr des Compagnons.

Elle compte aussi, parmi ses membres, des associations, des institutions représentant la filière forêt-bois, des écoles professionnelles, des Grandes écoles, des universités, des centres de recherches et des sociétés appartenant aux mondes de la construction, de la restauration, de l'ingénierie, de la modélisation numérique 3D et du BIM.

Son Comité de soutien est composé de personnalités prestigieuses : Madame **Florence DELAY** de l'Académie Française, Messieurs **Stéphane BERN** et **Yann ARTHUS-BERTRAND** (parrain de rND).

L'association Restaurons Notre-Dame défend prioritairement l'emploi du chêne pour la nouvelle charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris. L'un de ses fondements est aussi de respecter la Cathédrale en tant que patrimoine historique mondial et de démontrer que le patrimoine du XIX^{ème} siècle (la flèche et le transept) est tout aussi important que celui médiéval (XIII^{ème} siècle : nef et chœur) et qu'il fait partie du patrimoine mondial à part entière.

Elle milite pour une véritable restauration-reconstruction de la cathédrale dans les règles de l'art et la prise en considération des chartes et conventions du patrimoine mondial pour ce faire. Elle entend aussi démontrer que Notre-Dame de Paris est une expression majeure de l'« Art de la Pierre et du Bois » et que ce sont des chefs d'œuvre de bois (la charpente médiévale « La Forêt » et la flèche médiévaliste (néo-gothique) de Viollet-le-Duc qu'il s'agit de reconstruire. L'objectif ultime consiste à démontrer que le matériau bois occupe une place très particulière à prendre en considération, à la fois « d'authenticité » mais aussi d'inégalable « durabilité » (plus de huit siècles !) à l'encontre de tout autre matériau.

Pour autant, l'association Restaurons Notre-Dame est consciente que reconstruire une charpente en bois strictement identique ne sera probablement pas possible ne serait-ce que par les modifications qu'avait subi la charpente médiévale au fil du temps en particulier au niveau du transept au XIX^{ème} siècle. Par ailleurs, cette reconstruction sera inexorablement fonction des conclusions attendues du diagnostic et de la pathologie architectonique de la cathédrale. Ce sont ces paramètres qui fixeront les hypothèses de conception de la nouvelle charpente et, en particulier, la définition de la position et la nature des appuis. La conception géométrique de la future structure devra être compatible avec l'état des structures de pierre et des mesures de confortement relevant de ce diagnostic.

2 – Le projet d'études scientifiques & universitaires

2.1 – Pilotage

Au cours du premier semestre 2020, RESTAURONS NOTRE-DAME (rND) s'est doté d'une « *Commission de coopération scientifique, technique et universitaire* » chargée de concevoir une nouvelle charpente en bois pour la cathédrale Notre-Dame de Paris. Monsieur **Franck BESANÇON**, préside cette commission. Il est également Maître de Conférences et Directeur de la Chaire partenariale d'enseignement et de recherche "*Architecture et construction bois : du patrimoine au numérique*", labellisée par le Ministère de la Culture en 2016, rattachée à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy et à ses laboratoires de recherche avec le MAP-CRAI (Centre de recherche en architecture et ingénierie) et au LHAC (Laboratoire d'histoire de l'architecture contemporaine). Il est accompagné par Monsieur **Gilles DUCHANOIS**, Professeur-chercheur à l'École Nationale Supérieure d'architecture (ENSA) de Nancy.

L'objectif de cette Commission est celui de fournir des éléments et des outils d'aide à la décision et de contribuer à une conception optimale de la restauration de la charpente bois, de la flèche et de la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Elle s'appuie, d'une part sur des acteurs universitaires nationaux et internationaux (11 enseignants), d'un groupe de 30 étudiants dans le cadre du Master 2 Génie Civil « Architecture Bois Construction » et de 21 étudiants dans le cadre de PFE (Projet de fin d'études d'ingénieurs) et de formations tutorées. Cette commission d'appuie également sur un Comité d'Experts composés de 20 professionnels des charpentes, des toitures et du patrimoine.

L'état précis de l'édifice après sinistre conduit la Commission de Coopération Scientifique, Technique et Universitaire à concevoir un prototype de charpente en bois paramétrable, évolutif et adaptable en fonction des connaissances et réponses qui résulteront des études et diagnostic en cours ou de la formulation d'hypothèses d'un état sanitaire présumé de la maçonnerie. Toutes les options, quant au matériau bois, à la modélisation géométrique, aux fonctionnalités et l'adaptabilité méritent d'être envisagées, sachant que le chêne sera, in fine, l'essence privilégiée.

Comme le Président de Restaurons Notre-Dame (rND), Monsieur **Pascal JACOB**, s'y était engagé le 20 juin 2019 lors de son assemblée constituante, tous les travaux de notre organisation qui pourraient contribuer à une restauration optimale de la charpente, flèche et toiture de la Cathédrale Notre-Dame de Paris seront communiqués à la Présidence de la République. Pour ce faire, nous les communiquons aux autorités publiques, à la maîtrise d'ouvrage et à la maîtrise d'œuvre, en charge de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris ainsi qu'aux parlementaires chargés de veiller au bon déroulement de cette restauration dans le cadre de la loi. Un point d'étape sur l'avancée de cette étude scientifique et universitaire a été réalisé le 18 décembre 2020. Les travaux présentés font l'objet de cette communication à :

- L'établissement Public en charge de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris.
- L'Architecte en Chef des Monuments Historiques en charge de la cathédrale Notre-Dame de Paris.
- La Commission Nationale du Patrimoine et de l'Architecture.
- La mission parlementaire d'information pour le suivi de l'application de la loi pour la conservation et la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

2.2 – Genèse du projet d'études scientifiques & universitaires

La commission de coopération scientifique, technique, et universitaire est chargée de mener à bien l'étude d'une nouvelle charpente en bois et de sa couverture pour la nef, le transept, le chœur et la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

2.21 – Caractérisation des études

Ces études prennent en compte :

- la spécificité du matériau chêne, dans des concepts compatibles avec l'état des structures de pierre, relève du diagnostic et des mesures de confortement. Dans l'hypothèse où la maçonnerie serait conservée en l'état, c'est-à-dire sans renforcement, la légèreté au niveau des descentes de charges sera privilégiée,
- les connaissances contemporaines en particulier aux niveaux des techniques d'assemblages en matière d'étanchéité à l'eau pour minimiser les maintenances ultérieures et plus particulièrement pour la longévité de la flèche,
- la compatibilité avec les matériaux de couvertures.

2.22 - Analyses préparatoires aux études de structure

- Caractérisation des fournitures de bois : le classement par la méthode ultrasons ou rayons X, la définition des classes de résistances mécaniques au moyen des données récoltées, les mesures des singularités des bois, les mesures d'humidité et de séchage.
- Faisabilité de la structure bois en fonction des critères : réglementaires (Eurocodes), normatifs, le site, les charges climatiques, les usages, la durabilité, ...
- Recherche historique et documentaire (anciennes charpentes) : collecte d'informations relatives au matériau bois initialement utilisé et des analyses de son comportement à partir des bois calcinés.
- Textes et documents relatifs aux structures bois de charpente et flèches successivement réalisées : Pré-étude technique définissant : l'état des lieux et principe des systèmes constructifs, avant sinistre (contreventements, appuis, portées...), le dimensionnement indicatif des structures porteuses et les caractéristiques des matériaux (mécaniques, essences, traitement...)

2.23 - Études structurelles

Elles comprennent l'établissement de documents définissant les propositions de la structure bois des ouvrages, le dimensionnement des ouvrages plans 2D, coupes et élévations définissant :

- Forme, position, encombrement de tous les éléments de structure bois et le cas échéant des parois
- Cahier des principaux assemblages,
- Principes d'appuis sur gros œuvre.
- Images 3D
- Descriptif détaillé des travaux de construction bois.

2.24 - Méthodologie

Pour mener son projet d'études, la Commission de Coopération Scientifique, Technique et Universitaire s'appuie sur :

- Plusieurs Grandes Écoles sous tutelle du Ministère de la Culture, dans le cadre du Master 2 Génie Civil « Architecture Bois Construction » et de projets de fin d'études d'ingénieurs (PFE) faisant l'objet de conventions entre ces organismes académiques et Restaurons Notre-Dame (rND).

- La commission « Culture, Patrimoine historique mondial & Art de la Pierre et du Bois », présidée par Monsieur **Alain HAYS**, qui procure un cadre général, une philosophie d'action et favorise un déploiement au niveau international, des missions de Restaurons Notre-Dame (rND) (*)
 - (*) voir opuscule : HAYS Alain (2020), Restaurons Notre-Dame - Culture et Patrimoine mondial. Trois impératifs – Trois sujets – Trois piliers.
- La Commission « Ressource forestière », Présidée par Madame **Geneviève REY**, qui inscrit les actions de Restaurons Notre-Dame (rND) dans une perspective environnementale et une démarche écologique, à la fois didactique et opérationnelle de gestion de la forêt et d'utilisation du matériaux bois, en tant que ressource naturelle renouvelable à forte valeur ajoutée pour la charpente et flèche de Notre-Dame de Paris,
- Les trois grandes fédérations compagnonniques et sociétés indépendantes, avec leurs Compagnons experts dans l'art du bois, de la pierre et des toitures.
- Des partenariats extérieurs : entreprises spécialisées (forêts, structures, MH, numériques ...), centres scientifiques et ou techniques.

2.25 – Pôle bois & coopération

Pour mener à bien ses actions, la Commission de Coopération Scientifique, Technique et Universitaire contribue à la constitution d'un « Pôle Bois » dans une perspective de « Coopération » institutionnelle et opérationnelle :

- Pôle Bois : Restaurons Notre-Dame (rND) se veut un bâtisseur. L'organisation s'efforce de jouer un rôle d'initiateur, de catalyseur et de facilitateur utile à tous.
- Coopération : Cette stratégie consistera à mutualiser les outils et fédérer les initiatives. Il y a derrière ce mot l'idée de travail en « Open Source » mobilisateur de savoirs et de volontés d'échange. Toutes les actions et projets menés dans le cadre de cette coopération ont aussi pour but de faire reconnaître la validité et la pertinence de l'« option bois » et des options architecturales à défendre pour la cathédrale : reconnaissance du patrimoine mondial à la fois médiéval et du XIXème siècle. Deux niveaux de coopération sont à déployer :
 - La coopération entre institutions : Passation d'accords de coopération entre institutions universitaires, grandes écoles, bureaux d'études, centres scientifiques et ou techniques, fédérations ou sociétés compagnonniques,
 - La coopération individuelle : Participation de personnes et professionnels motivés et bénévoles, de tous les horizons susceptibles de collaborer utilement aux actions et projets à développer sur les thèmes énoncés antérieurement.

2.3 - Les acteurs du projet d'études scientifiques & universitaires

Le projet d'étude, piloté par Messieurs Franck BESANÇON et Gilles DUCHANOIS, mobilisent les institutions suivantes :

2.31 – Les Grandes écoles, universités, laboratoires de recherche :

- ENSA Nancy : École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
- ENSTIB d'Épinal : École Nationale Supérieure des Technologies et des Industries du Bois d'Épinal
- ESB Nantes : École Supérieure du Bois de Nantes
- ENM Toulouse : École National de Météorologie de Toulouse
- HTW SAAR : École Supérieure de Sarrebruck (Allemagne)
- MAP-CRAI : Centre de recherche en architecture et ingénierie
- LHAC : Laboratoire d'histoire de l'architecture contemporaine.

Au total, 62 enseignants et étudiants participent au projet d'études soit dans le cadre du Master 2 Génie Civil « Architecture Bois Construction » soit dans le cadre de PFE (projet de fin d'études d'ingénieurs) ou de formations tutorées.

2.32 – Le « Comité d'Experts » de rND

Un comité d'experts est composé de 20 personnalités reconnues pour leurs compétences dans les domaines de l'histoire des patrimoines, des monuments historiques et de leur restauration, des études scientifiques et techniques (ingénierie des charpentes bois), des métiers de la pierre et des toitures. Il est associé aux travaux menés par les équipes universitaires qui bénéficient de leurs appuis et expériences.

3 – Déroulement des études

3.1 – Les trois phases du projet d'études scientifiques & universitaires

Le projet d'études scientifiques et universitaires porté par Restaurons Notre-Dame comprend trois phases distinctes :

- La phase 1 : Études de différents scénarios de charpente, flèche et toiture réalisées dans le cadre du Master 2 Génie Civil « Architecture Bois Construction » ,
- La phase 2 : Études de points techniques, climatiques et environnementaux spécifiques réalisées dans le cadre de plusieurs projets de fin d'études d'ingénieurs (PFE),
- La phase 3 : Synthèse générale établie par la Commission Scientifique, Technique et Universitaire de Restaurons Notre-Dame en collaboration avec le Groupe d'Experts.

3.2 – Phase 1 : Le Master 2 Génie Civil « Architecture Bois & Construction »

L'objectif est d'élaborer **six scénarios de restauration de la charpente, flèche et toiture** de la cathédrale Notre-Dame de Paris reposant sur autant d'équipes d'étudiants (6 équipes de 5 ingénieurs architectes déjà diplômés soit 30 étudiants).

Il s'agit d'établir une série de propositions en s'inscrivant dans la forme, la géométrie et l'aspect extérieur d'origine de la toiture. En restant dans le champ de la conservation du patrimoine, il est important de tester et de montrer la valeur pédagogique des solutions.

Ces propositions pour la charpente, flèche et toiture de Notre-Dame prendront en compte différents critères comme le nombre de points d'appui, la conservation ou la réduction du poids propre de l'ensemble de la charpente, le choix du matériau de couverture, la maintenance de la charpente et de la couverture, la sécurité incendie,

L'ensemble des propositions permettra d'établir des comparaisons sur les choix pris et développés par chaque projet. À l'instar d'une étude de faisabilité, la série de propositions s'intéressera aux moyens de productions actuelles, aux enjeux environnementaux, aux questions de santé par les matériaux employés, au développement de la filière bois et de ses métiers.

Pendant le temps d'étude, les équipes sont amenées à interagir entre elles et faire état de leur avancement dans l'idée de pouvoir intégrer les résultats ou orientations dans les recherches en cours. Il s'agit de travailler sur des modules paramétriques qui permettront de s'adapter à l'inconnu et aux aléas du diagnostic de l'état de la maçonnerie de Notre-Dame. Cela va concerner principalement : les points d'appuis de la charpente, le choix d'une ou de plusieurs essences, la forme et la géométrie de la nouvelle charpente, le poids total de la toiture, le choix du matériau de couverture.

L'idée est de « fouiller » parmi de multiples possibilités et voir comment la restauration en bois de la charpente et de la flèche ainsi que la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris peuvent se faire.

3.3 – Phase 2 : Les PFE (Projet de Fin d'Études)

Ce projet d'études se répartit en cinq thèmes distincts d'études.

Thème N° 1 : Assemblages bois de la charpente de Notre-Dame.

Si la charpente de Notre-Dame a su passer 800 ans, il est aujourd'hui nécessaire pour reconstruire la charpente de caractériser les assemblages de la charpente d'origine. Ensuite, il faudra mener une étude comparative avec d'autres types d'assemblage permettant d'envisager leur évolution en s'adaptant et tenant compte de nos moyens contemporains d'usinage.

- Il s'agit à partir d'une étude comparative sur la performance des assemblages bois de regarder la performance mécanique et la résistance au feu.
- L'idée est de rechercher et d'envisager si un assemblage unique pour l'ensemble de la charpente peut répondre aux différentes contraintes et sollicitations. L'usinage des assemblages par robot doit être une piste pour garantir la précision et la complexité de taille.
Les assemblages seront étudiés en prenant en compte un choix de l'essence de bois comme non prédéfinie mais de manière à être le plus optimal selon les efforts à reprendre.

Équipe : ENSTIB Epinal + ENSA Nancy

Thème N° 2 : Les effets gravitaires et climatiques sur la charpente de Notre-Dame

- Il s'agit d'élaborer un module calculatoire permettant de faire varier toutes les sollicitations gravitaires et climatiques sur la charpente. en donnant des scénarios climatiques avec les précipitations, les vents, le soleil et des scénarios géographiques liés au sol avec l'aléas sismique. La quantification de ces éléments permettra de préciser les effets de charges sur la charpente.
- L'objectif est de vérifier la température et l'hygrométrie dans le comble et d'en maîtriser les effets dans le temps pour éviter les dégradations ou les situations d'inconfort. Pour cela, la compréhension du fonctionnement de la couverture et de son impact sur le comble et la charpente est fondamental pour travailler sur des solutions cohérentes pouvant réduire l'entretien et les réparations dans le temps.

Équipe : ENM Toulouse + ENSTIB Epinal + HTW Sarrebruck + ENSA Nancy

Thème N° 3 : La fabrication de la nouvelle charpente de Notre-Dame

Il s'agit ici d'étudier la fabrication de la nouvelle charpente en bois de Notre-Dame avec la prise en compte de la ressource bois et son optimisation d'utilisation. L'objectif est de vérifier l'intérêt d'une préfabrication industrialisée pouvant garantir des délais optimaux que sont ceux de la filière sèche en construction et de réduire l'impact carbone et environnemental de l'ouvrage.

- Industrialisation, contrôle, détection des défauts et classification d'emploi des bois utilisés pour la charpente.
- Recherche d'optimisation des bois d'une même grume dans la charpente.
- Quel(s) bois pour la charpente de Notre-Dame ?

Équipe : ESB Nantes

Thème N°4 : Impact environnemental de la toiture de Notre-Dame

Aujourd'hui, l'analyse de cycle de vie (ACV) dans la construction permet de mesurer l'impact environnemental de tout ou partie d'un édifice en quantifiant son impact sur l'effet de serre, la consommation de ressources, la consommation d'énergie primaire, les déchets générés, la consommation et pollution de l'eau, l'acidification des sols... autant de critères pour lutter contre le réchauffement climatique.

- Il s'agit de connaître l'ACV de la charpente existante et de la comparer à une nouvelle charpente en chêne.
- L'étude détaillera en particulier l'impact environnemental de la couverture à l'origine en plomb pourvue de sculptures. Aujourd'hui, quelle nouvelle couverture est-il possible de proposer pour la toiture de Notre-Dame et quel peut être son impact environnemental ?
- Il est aussi question de définir le protocole de l'ACV pour qu'il puisse être comparé à d'autres études de la charpente réalisées par les autres filières que sont l'acier et le béton.

Équipe : ESB Nantes + ENSTIB Epinal

Thème N° 5 : Patrimoine

Ce thème se réfère à l'aspect patrimonial de la Cathédrale. Notre-Dame de Paris est un monument historique de premier ordre formant partie intégrante des « Rives de la Seine » classées au patrimoine mondial de l'Unesco.

Il est indispensable de nous interroger sur toutes ses dimensions patrimoniales et les contraintes qui en découlent. La conception et réalisation de la charpente, de la flèche, de la toiture, de la couverture, des composants de toiture et de ses ornements en seront impactées.

À la fois Patrimoine mondial médiéval et du XIX^{ème} siècle, il sera important d'étudier les conventions, chartes et documents qui régissent le Patrimoine culturel de l'humanité classé par l'Unesco. Il sera également intéressant d'étudier des exemples de restauration-reconstruction d'autres édifices prestigieux dans des contextes culturels différents, occidentaux et lointains (Italie, Japon etc.).

Seront ici abordés :

- Les aspects législatifs et/ou normatifs liés à la classification de la Cathédrale en tant que Monument historique.
- Les exigences et « bonnes pratiques » liées à la classification de la Cathédrale en tant que Patrimoine mondial de l'Unesco (Convention du Patrimoine mondial, chartes, documents, etc).
- Étude et réflexion autour de « bonnes pratiques » de restauration-reconstruction observées sur d'autres bâtiments de grand prestige en France et à l'étranger.

Ce thème N° 5 est actuellement particulièrement abordé par la Commission « Culture, Patrimoine historique mondial & Art de la Pierre et du Bois » de rND. Dans un esprit de coopération, de partage et mise en commun des savoirs et expériences, on abordera les notions de « restitution », d'« authenticité » et d'« identique » au cœur la problématique complexe de la restauration-reconstruction de Notre-Dame de Paris.

Equipe : ENSA Nancy + Commission Culture et Patrimoine mondial de rND et son réseau international (actuellement de 240 membres de 33 pays).

3.4 – Phase 3 : Synthèse générale et propositions

Ces travaux universitaires doivent permettre au Comité d'Experts et à la Commission de coopération Scientifique, Technique et Universitaire de Restaurons Notre-Dame de mener une réflexion en profondeur en vue d'élaborer une proposition de restauration de la charpente, flèche et toiture de Notre-Dame destinée à l'Établissement public (synthèse collective). Cette réflexion comportera les étapes suivantes :

- Questions, modifications, réorientations posées à partir des 6 approches initiales (projets des étudiants en master),
- Avantages et inconvénients de chaque projet Master (évaluation architecturale, patrimoniale et structurelle),
- Analyse des points spécifiques étudiés par les PFE (évaluations techniques, évaluations environnementales et évaluations patrimoniales),
- Poursuite d'une coopération opérationnelle avec la Maîtrise d'Ouvrage et la Maîtrise d'œuvre pour la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris – Aide à la conception.

