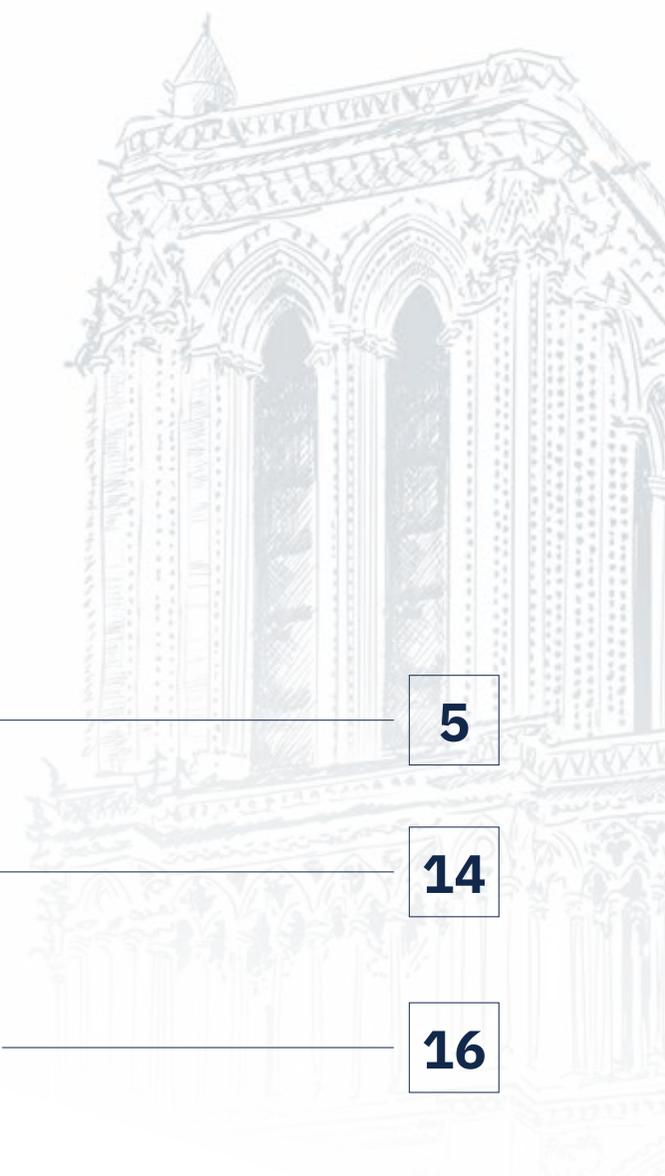


2025



ÉTUDE D'IMPACT SOCIÉTAL

Chantier scientifique
de Notre-Dame



RÉSUMÉ EXÉCUTIF ————— **5**

CONTEXTE EXTERNE INITIAL ————— **14**

**INPUT ET CONTRIBUTIONS DU CNRS
ET DE SES PARTENAIRES** ————— **16**

OUTPUT DES RECHERCHES ————— **26**

**CIRCULATION DES CONNAISSANCES
ET INTERMÉDIAIRES** ————— **39**

IMPACTS ————— **46**

ANNEXES ————— **58**

Crédits illustrations des Groupes de Travail : YourComics © Rebâtir Notre-Dame de Paris

Tous nos remerciements à Inrae et l'équipe ASIRPA pour leurs conseils tout au long de l'étude



Direction de la publication
Auteurs

Antoine Petit
Catherine Dargemont catherine.dargemont@cnrs.fr
Antoine Heidmann antoine.heidmann@lkb.upmc.fr
Camille Portevin

Conception graphique, mise en page

Cette plaquette est éditée par le CNRS

RÉSUMÉ

exécutif

OBJECTIFS

L'objectif de l'étude d'impact du chantier scientifique de Notre-Dame est non seulement de faire le bilan du chantier scientifique au regard de ses ambitions initiales, mais surtout d'analyser l'impact sociétal de cette coopération d'une ampleur inédite entre science et restauration.

D'une part, elle explore comment cette collaboration a pu impacter les scientifiques, les professionnels de la restauration et les citoyens dans leurs pratiques et dans leur compréhension du patrimoine et de la science.

D'autre part, elle examine ce qui a permis d'établir ou de nucléer des convergences d'intérêt qui, si elles sont encouragées, produiront des effets ultérieurs sur l'ensemble de ces acteurs et sur la société.

Enfin, il s'agit d'évaluer le rôle du CNRS (et ses partenaires académiques) et de sa coopération avec le Ministère de la Culture dans le déploiement d'un chantier scientifique et les réponses ainsi apportées à une crise patrimoniale.

MÉTHODOLOGIE

L'étude d'impact a été menée de janvier à mars 2025. Cette étude a consisté à :

1

DÉFINIR LA CHRONOLOGIE PRÉCISE DU CHANTIER SCIENTIFIQUE DE NOTRE-DAME,

de l'élaboration des connaissances mobilisées à la réouverture de la cathédrale **(rendu 1, voir page 10)** ;

2

ANALYSER PRÉCISÉMENT LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU CHEMIN D'IMPACT,

c'est-à-dire le cheminement de la connaissance jusqu'aux effets sur la société, à savoir les « Input » ou moyens mobilisés, les « Output » ou productions scientifiques, les « Intermédiaires » ou acteurs qui s'approprient un produit de la recherche pour le transformer, et les « Impacts » ou effets sur la société **(rendu 2, voir page 12)** ;

3

DÉDUIRE UN RADAR D'IMPACT DANS LES DIFFÉRENTES DIMENSIONS SOCIÉTALES

(culturelle, environnementale, sociale, politique et réglementaire, économique, sanitaire) **(rendu 3, voir page 8)**.

Dans ce but, l'élaboration de cette étude s'est appuyée sur toute la documentation écrite (bibliographie, rapports d'activité, éléments apportés par les scientifiques), audiovisuelle (dont les colloques en ligne du chantier scientifique) et numérique disponible, ainsi que sur une série de 21 entretiens semi-directifs avec les acteurs scientifiques et les intermédiaires.

Le présent document a été relu et révisé par les acteurs sollicités.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Cette étude a clairement démontré la capacité de mobilisation des connaissances et de la méthode scientifiques en réponse à une urgence sociétale et dans des délais de temps très contraints.

Outre la coopération de longue date avec le Ministère de la Culture et la confiance réciproque qui ont favorisé le projet de chantier scientifique commun, cette réactivité tient à **quatre éléments majeurs qui sont caractéristiques du CNRS :**

1

L'ACCUMULATION DE CONNAISSANCES au long cours, fondamentales et appliquées ;

2

LE SPECTRE TRÈS LARGE DE DOMAINES DISCIPLINAIRES et de champs de compétences mobilisés ;

3

LA CAPACITÉ D'ENGAGEMENT EN RÉPONSE À UNE CRISE, qui change les ordres de priorité scientifique, dans le respect du principe de liberté académique ;

4

LA PUISSANCE DE COORDINATION ET DE MOBILISATION de partenariats académiques sur tout le territoire.

Ce chantier scientifique a permis d'une part de mettre les connaissances disponibles en sciences du patrimoine au service de la restauration de Notre-Dame et d'autre part, de profiter d'un accès privilégié à la cathédrale pour renouveler le corpus de connaissances. Ainsi est-il possible de distinguer les travaux qui ont appuyé le chantier de restauration, ceux qui serviront d'autres chantiers, et les productions qui s'adressent à des publics autres que les acteurs de la restauration. Enfin, certains travaux ont permis de renouveler des connaissances sans utilisation prédictible à court terme (donc non reliés à un impact autre que scientifique à ce stade).

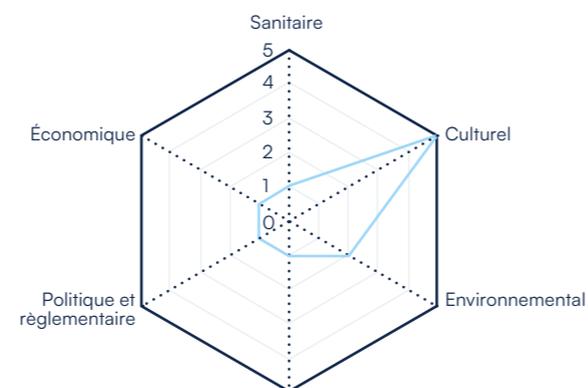
Le chantier de Notre-Dame a pour particularité d'avoir réuni dans un même lieu et dans un même temps acteurs scientifiques et acteurs de la restauration. Cette confrontation quotidienne des sphères de la science et de la restauration du patrimoine a favorisé l'appropriation et la transformation des connaissances issues du chantier scientifique par les acteurs de la restauration et les médias (maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, bureaux d'études, entreprises de restauration, Ville de Paris, médias). ■■■

■■■ Cette coopération étroite associée à une communication intense vers tous les publics a en outre permis d'initier de nouvelles perspectives par d'autres acteurs qui pourront les exploiter et les faire fructifier (établissements de formation, chantiers expérimentaux, futur Musée de Notre-Dame, assureurs).

La diversité de ces « intermédiaires » a mené à des impacts avérés, attendus ou espérés dans différentes dimensions sociétales. **L'impact majeur** de ce chantier scientifique est révélé dans **la sphère culturelle**, par l'apport scientifique dans l'évolution du cadre théorique et des pratiques de la restauration du patrimoine, et par le développement de nouvelles modalités narratives favorisant l'ouverture de la culture patrimoniale à un public plus large. Cette perception patrimoniale renouvelée éclaire dès à présent les politiques de conservation (**Impact politique**). Enfin, le chantier scientifique a contribué à valoriser les métiers de la restauration, à accroître leur attractivité et à initier une réflexion nécessaire sur les formations de tous les acteurs, avec la nécessité de croiser savoirs académiques, connaissances architecturales et historiques du bâti, et savoir-faire des artisans et compagnons (**Impact social**).

Les travaux effectués et leurs transformations par les intermédiaires mènent également à la conception de pratiques de restauration plus durables (réemploi ou utilisation de matériaux plus écologiques, mise en place de circuits courts d'approvisionnement et gestion durable des ressources), qui ont donc un **impact environnemental** notable. Par ailleurs, le chantier scientifique a éclairé la mise en place de processus de surveillance aux pollutions émises par les monuments historiques, révélant un **impact sanitaire** circonscrit en l'état au périmètre francilien mais qui pourrait s'étendre au territoire national. De façon plus inattendue, **l'impact économique** est identifiable, que ce soit par les revenus des multiples productions de médiation patrimoniale sur le chantier scientifique ou par le développement possible d'une nouvelle filière de construction faisant appel au bois vert. La réflexion menée sur les matériaux utilisés lors de la restauration (bois vert, plomb...) pourrait mener à **une évolution réglementaire**, via les normes du bâti.

Radar d'impact



Enfin, ce chantier a été l'occasion de structurer les sciences du patrimoine, de démontrer le rôle transverse du numérique et de renforcer la coopération entre le CNRS (et ses partenaires académiques) et le Ministère de la Culture (**Impact scientifique**). Cette dynamique scientifique sera d'ailleurs poursuivie et élargie grâce à la création du Réseau thématique MAESTRO (« Appréhender les défis des grands monuments : MAtÉriaux, STRuctures, EnvirOnnements ») dont les réalisations permettront sans aucun doute d'amplifier ou concrétiser les impacts observés ou attendus dans cette étude.

Pour conclure, soulignons que ce chantier scientifique a été marqué par une dimension collective remarquable, essentielle à son succès. **Tous les acteurs impliqués, qu'ils soient scientifiques ou professionnels de la restauration, ont partagé le sentiment de participer à une aventure humaine exceptionnelle, caractérisée par une intense coopération et une forte implication personnelle au service d'un patrimoine commun.**

Le chantier de Notre-Dame a pour particularité d'avoir réuni dans un même lieu et dans un même temps acteurs scientifiques et acteurs de la restauration.



CHRONOLOGIE

15 Avril 2019
Incendie

Décembre 2024
Réouverture

PRÉLÈVEMENT ET TRI MÉTHODIQUE

DES VESTIGES ET DÉCOMBRES

DIAGNOSTIC -

SÉCURISATION - CONSOLIDATION

CHANTIER DE RESTAURATION

Extraction des mobiliers, trésors, tableaux

16-19 AVRIL

- Suite de l'extraction
- Acheminement au Louvre
- Inventaire
- Diagnostic visuel
- Début de la sécurisation

29 JUILLET

Adoption de la Loi n° 2019-803 pour la conservation et la restauration et instituant une souscription nationale

24-25 AVRIL

Évacuation des tableaux de la salle haute, des tapis, de la Vierge à l'Enfant

2 MAI

Projet de loi visant à organiser la restauration

28 NOVEMBRE

Décret portant création de l'Établissement public chargé de la conservation et de la restauration

JUIN 2020

Bilan sanitaire global de l'édifice

MARS 2021

Présentation du diagnostic

SEPTEMBRE 2021

Sécurisation et consolidation définitives

Préfiguration du Musée de Notre-Dame

1995

Avril
2019

Mai
2019

Juin
2019

Juillet-Décembre
2019

2020

2021

2024

2025

Production de connaissances

26 AVRIL

Création d'une Task Force CNRS

18 AVRIL

Création de l'Association des scientifiques au service de la restauration de Notre-Dame de Paris

14 MAI

Réunion Ministère de la Culture/ CNRS. Création des GTS

13 JUIN

Première réunion des GT. Mise en place du chantier scientifique

19-20 OCTOBRE 2020

Colloque du chantier scientifique à l'INHA

DÉCEMBRE

Début d'accès au chantier Notre-Dame pour les scientifiques

28-29 MARS 2022

Séminaire Inter GT

22-24 AVRIL 2024

Colloque Naissance et Renaissance d'une Cathédrale

Réseau Thématique Interinstitutionnel MAESTRO

CHEMIN D'IMPACT

CONTEXTE

15 Avril 2019: incendie de Notre-Dame

ENJEUX SCIENTIFIQUES :

- 1 **ACCOMPAGNER** le chantier de restauration
- 2 **RENOUVELER** le corpus de connaissance sur Notre-Dame

CNRS/MITI MINISTÈRE DE LA CULTURE

- Mise en place du Chantier scientifique
- Avenant à l'accord Cadre, mise en place de conventions
- Financements (MITI, Ministère de la Culture)

4 COORDINATEURS 9 GROUPES DE TRAVAIL

- Structure, Pierre, Bois, Métal, Verre et Vitraux, Décor Monumental, Émotions et Mobilisations, Acoustique, Numérique
- 180 scientifiques (20% CNRS)
- Environ 80 laboratoires (dont 50 CNRS)

FINANCEMENT

- 8.5 M€ ressources propres (ANR, Europe...)
- 40 M€ Masse salariale

MOBILISATION de connaissances et compétences des acteurs accumulées pendant 30 ans

INPUT

● Outputs qui ont nourri les intermédiaires

TRAVAUX QUI ONT ACCOMPAGNÉ LA RESTAURATION DE NOTRE-DAME

- Relevés (numérique, manuel...) avant et après incendie
- Diagnostic post-incendie
- Matériaux pour la restauration
- Altérations du plomb et traçage des pollutions
- Études acoustiques
- Construction de l'exceptionnalité et registres de sacralité

TRAVAUX POUR D'AUTRES CHANTIERS (y compris à Notre-Dame)

- Cathédrale numérique
- Évaluation structurale post-incendie des MH
- Caractérisation des bois et de la charpente pour une reconstruction à l'identique
- Captation sonore des métiers et du chantier
- Études du décor monumental de Notre-Dame
- Interaction des dépôts de surface avec les vitraux et reprise des critiques d'authenticité des vitraux

AUTRES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

- Captation de la mémoire sonore et visuelle du chantier, mémoires matérielles, mémoires collectives ou individuelles
- Venir à Notre-Dame : expériences et perception
- Jumeaux numériques acoustiques à différentes périodes
- Podcast de fiction radiophonique et audioguide

TRAVAUX 100% SCIENTIFIQUES (listés en annexe 3)

OUTPUT

MAITRISE D'OUVRAGE : ÉTABLISSEMENT PUBLIC NOTRE-DAME ET DRACS

MAITRISE D'ŒUVRE : ACMH

BUREAUX D'ÉTUDES

ENTREPRISES DE RESTAURATION

CHANTIERS EXPÉRIMENTAUX (Guédelon, Guyenne)

ÉTABLISSEMENTS DE FORMATION (INP, Chaillot, Écoles d'ingénieurs, universités, compagnons..)

VILLE DE PARIS

MÉDIAS (TV, radio, presse écrite, réseaux sociaux)

FUTUR MUSÉE POUR NOTRE-DAME

ASSUREURS

INTERMÉDIAIRES

IMPACT SCIENTIFIQUE

- Structuration des sciences du patrimoine
- Réseau MAESTRO
- Rôle du numérique
- Renforcement de la coopération CNRS/Ministère de la Culture

IMPACT CULTUREL

- Restauration du patrimoine culturel
- Accès de tous à la culture patrimoniale

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- Pratiques de restauration plus durables

IMPACT SOCIAL

- Formation des acteurs de la restauration patrimoniale
- Attractivité des métiers

IMPACT POLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

- Éclairer les politiques de conservation
- Prise en compte de la perception patrimoniale dans les projets
- Évolution des normes du bâti

IMPACT ÉCONOMIQUE

- Revenus des médiations patrimoniales
- Filière bois vert

IMPACT SANITAIRE

- Plan d'action de la Ville de Paris contre la pollution au plomb
- Surveillance des Monuments Historiques

IMPACTS

CONTEXTE externe initial

15 Avril 2019, 18h55, Notre-Dame de Paris brûle !

L'émotion de tous, en France et dans le monde, a conduit quasi immédiatement les scientifiques de tous horizons, spécialistes du patrimoine, à se regrouper en association au service de la restauration de la cathédrale, avec le soutien du Ministère de la Culture et du CNRS, et la volonté de mieux connaître Notre-Dame pour mieux la restaurer. Sous l'impulsion des architectes en chef des monuments historiques en particulier, les laboratoires du Ministère de la Culture à pied d'œuvre dès les premiers jours (LRMH, C2RMF) ainsi que l'INRAP et le service d'archéologie de la DRAC Île-de-France, établissent un protocole précis de prise en charge des décombres, requalifiés plus tard comme vestiges, source inestimable de matériau pour une recherche future. Pour structurer les volontés et les compétences, le CNRS met en place une Task Force dès le 26 avril 2019.

Un mois après l'incendie, le CNRS et le Ministère de la Culture, déjà liés par une convention de coopération et des laboratoires communs, mettent en place le chantier scientifique de Notre-Dame de Paris, nomment des coordinateurs scientifiques, structurent le chantier en groupes de travail. Les contacts sont rapidement établis avec la maîtrise d'ouvrage d'alors (DRAC Île-de-France) et les architectes en chef des monuments historiques afin de coordonner diagnostic, sécurisation et consolidation de l'édifice avec le prélèvement, le tri et la sauvegarde des vestiges, ainsi que le début des projets scientifiques.

Ce chantier scientifique pluri- et interdisciplinaire inédit avait deux objectifs complémentaires, « la Science pour Notre-Dame » et « Notre-Dame pour la Science », pour reprendre les termes de Pascal Prunet, l'un des architectes en chef des monuments historiques impliqués dans le chantier de restauration. Pollution au plomb, pandémie Covid et surtout la contrainte temporelle imposée à la maîtrise d'ouvrage et à la maîtrise d'œuvre pour restaurer la cathédrale en cinq ans sont autant de situations de crise auxquelles les scientifiques académiques sont rarement confrontés. Au-delà des conflits d'agendas souvent mentionnés à raison entre chantier de restauration à court terme et chantier scientifique à long-terme, se sont donc ajoutés les temps d'adaptation logistique aux crises et les temps de compréhension du rôle, des missions, des compétences des acteurs présents sur ces deux chantiers afin de créer un modus vivendi fructueux de coopération.

Le but de cette étude est donc non seulement de faire le bilan du chantier scientifique au regard de ses ambitions initiales, mais surtout d'analyser l'impact de cette coopération d'une ampleur inédite entre science et restauration. D'une part, elle explore comment cette collaboration a pu impacter les scientifiques, les professionnels de la restauration et les citoyens dans leurs pratiques et dans leur compréhension du patrimoine et de la science. Elle examine d'autre part ce qui a permis d'établir ou de nucléer des convergences d'intérêt qui, si elles sont encouragées, produiront des effets ultérieurs sur l'ensemble de ces acteurs et sur la société.

Le but de cette étude est donc d'analyser l'impact de cette coopération d'une ampleur inédite entre science et restauration.



INPUT et contributions du CNRS et de ses partenaires

STRUCTURATION DU CHANTIER SCIENTIFIQUE

La coordination du chantier scientifique fut assurée par **Philippe Dillmann et Martine Regert**, chargés de mission à cet effet auprès du PDG du CNRS, et **Aline Magnien et Pascal Liévaux** pour le Ministère de la Culture. Dès le 14 mai 2019, soit un mois après l'incendie, le Ministère de la Culture et le CNRS (représenté par la Mission aux actions Transverses ou MITI) ont opté pour une organisation en 8 groupes de travail : Bois et Charpente, Métal, Pierre, Verre et Vitraux, Structure, Écosystème Données Numériques, Acoustique, Émotions et Mobilisations, le neuvième groupe de travail, Décors monumentaux, ayant été créé plus tard. Dès la conception du chantier scientifique a émergé l'impérieuse nécessité de mêler disciplines et expertises au sein de chaque GT avec une prise de conscience de la transversalité du numérique.

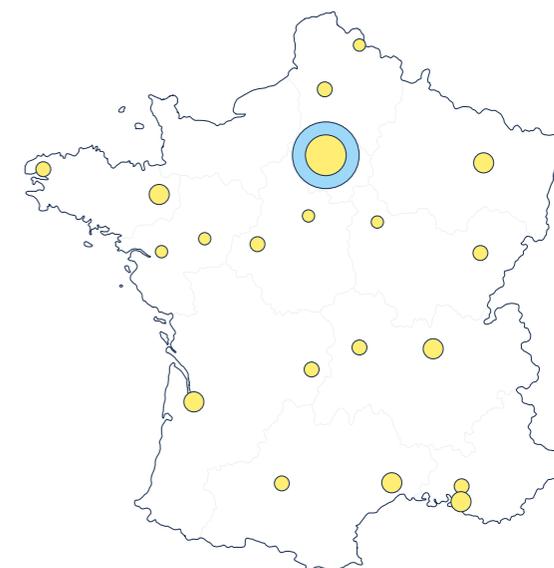
Ces groupes de travail, issus en partie de collaborations et réseaux pré-existants, ont fédéré l'ensemble des forces et compétences en Sciences du Patrimoine qui le souhaitaient, soit environ 180 personnels de recherche de toutes les disciplines (dont 20% d'agents CNRS). Les scientifiques étaient issus d'environ 80 laboratoires ou structures (dont 50 affiliés au CNRS) répartis sur tout le territoire français métropolitain mais aussi à l'étranger, ayant pour tutelles des institutions très diverses : organismes de recherche, universités, Ministère de la Culture pour les principales (voir Annexe 2, page 61).

AMORÇAGE ET FINANCEMENT DU CHANTIER SCIENTIFIQUE

Si la MITI puis le Ministère de la Culture ont rapidement mis des fonds à disposition du chantier scientifique (350 k€ et 60 k€ en 2020) pour initier les projets scientifiques et couvrir les aspects organisationnels et numériques, les scientifiques se sont fortement mobilisés tout au long du chantier pour obtenir des fonds régionaux, nationaux (CNRS, ANR, Fondation des Sciences pour le Patrimoine...), européens (ERC, JPI Cultural Heritage) et via des conventions avec l'Établissement public chargé de la restauration de Notre-Dame (EP-RNDP). Ainsi, ont-ils réussi à mobiliser près de 8.5 M€ (certains projets sont encore en cours) qui ont notamment permis de financer plus de 20 thèses. Si on estime à 80 ETP l'implication des scientifiques sur le chantier, le chantier aura mobilisé environ 40 M€ en masse salariale (soit 78 M€ en masse salariale environnée).

CADRE JURIDIQUE

Afin de faciliter les coopérations scientifiques, l'action transverse de la MITI « chantier de Notre-Dame » a été intégrée dans l'avenant 2020 à l'accord-cadre CNRS — Ministère de la Culture. Des conventions particulières ont été mises en œuvre pour les prélèvements et l'utilisation des données numériques (chartes). Par la suite, des conventions R&D entre le GT Structure et l'EP-RNDP ont été établies afin de fournir un cadre juridique dérogatoire aux codes des marchés publics et adapté aux laboratoires de recherche et, le cas échéant, aux structures de transfert adossées à ces laboratoires, qui ne peuvent engager leurs responsabilités juridiques sur les résultats obtenus.



Répartition des scientifiques sur le territoire

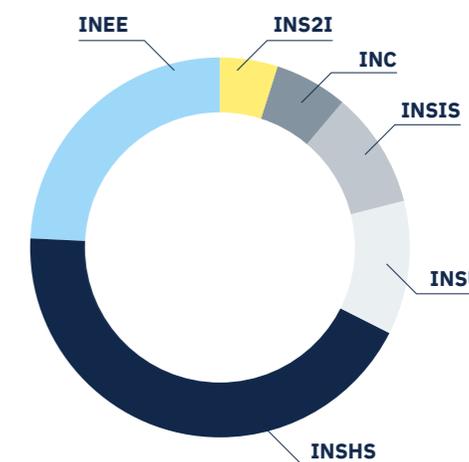
Nombre de scientifiques impliqués par ville



Nombre de scientifiques impliqués en région IDF (60)



Liste des instituts du CNRS impliqués dans les recherches



ANIMATION DU CHANTIER, ARTICULATION AVEC LE CHANTIER DE RESTAURATION, ACCÈS AUX VESTIGES

L'animation et la coordination du chantier scientifique se sont organisées autour de réunions très régulières entre les responsables des GT et les coordinateurs du chantier scientifique (environ tous les deux mois avec une fréquence plus importante au début du chantier) et des séances de travail au format variable dans chaque groupe de travail. Ainsi, le GT Pierre a organisé des réunions annuelles couplées à des visites et des séances de travail autour d'autres cathédrales (Laon, Sens et Bourges).

Mais il s'agissait également de coordonner le chantier scientifique et le chantier de restauration, que ce soit pour organiser la logistique ou échanger sur des questions scientifiques. Au cours de la première année, des réunions mensuelles avec la maîtrise d'œuvre, la maîtrise d'ouvrage et la DRAC ont permis d'assurer la coordination entre le chantier scientifique et les opérations de consolidation, de collecte et de tri des vestiges archéologiques (assurés par la DRAC et le LRMH), et chantier scientifique.

Si l'EP-RNPD a semblé peu sensible aux questions scientifiques au début du chantier, l'organisation d'un premier colloque sur le chantier scientifique à l'INHA en octobre 2020, auquel ont assisté le PDG du CNRS, la ministre de la Culture, la ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, et le Général Georgelin (président de l'EP-RNPD, qui a suivi toutes les sessions), a permis de convaincre toutes les parties prenantes de la pertinence et de l'intérêt de coupler un chantier scientifique au chantier de restauration. Des réunions régulières de coordination avec l'EP-RNPD et la maîtrise d'œuvre ont eu lieu tout au long du chantier ; notons que plusieurs membres du chantier scientifique, dont l'un des coordinateurs, P. Dillmann, font partie du Conseil scientifique de l'EP.

Outre la consolidation de la cathédrale, la forte pollution au plomb due à l'incendie a retardé l'intervention des scientifiques sur le chantier : il a fallu organiser des formations aux risques du plomb et se procurer des équipements de protection. Certains scientifiques (notamment des GT Métal et Acoustique) ont néanmoins pu accéder rapidement au chantier et certains, rares, ont participé au tri des vestiges, tandis que le GT numérique a été tout de suite mobilisé pour fournir les données numériques disponibles sur la cathédrale et une comparaison des états avant et après incendie.



Si l'incendie a eu lieu le 15 avril 2019, le chantier scientifique a en fait démarré des décennies auparavant avec la production, par les acteurs, de connaissances dans chacun des domaines concernés.

TRAVAUX ANTÉRIEURS

Cependant, la plupart des scientifiques n'ont pu accéder à la cathédrale qu'à partir de décembre 2019, peu de temps avant que le chantier de restauration ne soit très perturbé par la crise Covid, jusqu'en juin 2020. Enfin, l'accès des scientifiques aux vestiges archéologiques a été facilité par le développement d'un dépôt de stockage en région parisienne, mis en place en 2021 et financé par l'EP-RNDP.

Pendant la phase de restauration, les scientifiques ont pu profiter des installations du chantier (échafaudages), ce qui leur a permis de faire des observations et des mesures de grande qualité, mais ils devaient éviter de perturber l'intervention des entreprises de restauration. Certains ont déploré un accès trop limité dans le temps ou restreint aux plages horaires où les entreprises n'étaient pas en activité, ce qui a probablement nuit aux interactions fertiles entre scientifiques et entreprises.

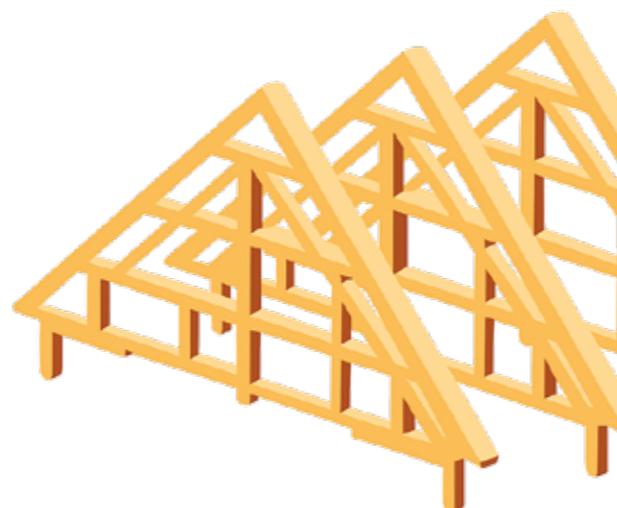
La mobilisation exemplaire des scientifiques à la suite de l'incendie de Notre-Dame était mue non seulement par la vive émotion suscitée par ce drame, ressentie par les scientifiques comme par toute la société française et la communauté internationale, mais également par la volonté de mettre leurs expertises au service de la restauration de la cathédrale et de ses œuvres. D'ailleurs, nombre des scientifiques du chantier ont décidé de mettre en pause leurs projets en cours, voire leurs ambitions scientifiques, pour se consacrer à temps plein aux besoins du chantier.

Si l'incendie a eu lieu le 15 avril 2019, le chantier scientifique a en fait démarré des années, voire des décennies auparavant avec la production, par les acteurs, de connaissances dans chacun des domaines concernés qui ont pu être mobilisées, soit pour répondre à des questionnements urgents liés à la restauration de Notre-Dame, soit pour anticiper les besoins de futurs chantiers de restauration, soit encore à plus long terme pour produire un corpus de données dont l'utilisation par des tiers n'est pas encore prévisible.

Ainsi, sont listés ci-après les principales productions et champs d'expertise (non exhaustives) des différents GT sur lesquels les projets du chantier scientifique se sont fondés.

GT Bois (voir références complémentaires en annexe)

- 1 Prélèvement de carottes de bois à Notre-Dame par l'équipe de G.N. Lambert du Laboratoire de Chrono-environnement dans les années 90 (DEA V. Chevrier). Les données dendrochronologiques ont été mises à disposition par G.N. Lambert au GT Bois. Les archives, stockées au laboratoire de Chrono-environnement ont également été rendues accessibles grâce à O. Girardclos.
- 2 Les compétences de J.Y. Hunot, archéologue des charpentes, au Département de Maine-et-Loire, et associé à l'UMR CReAAH spécialisé depuis 25 ans sur l'archéologie du bâti médiéval et moderne, et dont les recherches l'ont conduit à approfondir les questions de l'usage du bois dans la construction, en particulier sur l'évolution des charpentes de combles et des matériaux de couverture. J.Y. Hunot est l'un des auteurs du livre « Angers, La Grâce d'une cathédrale » aux éditions Place des Victoires.
- 3 Les recherches menées depuis 30 ans par J.L. Dupouey et son équipe (UMR SILVA INRAE) en dendroécologie, écologie historique, écophysologie des forêts, sylviculture, etc.



- 4 Les recherches sur les bois carbonisés du laboratoire BioArch (anciennement AASPE), les développements méthodologiques et la constitution d'un collectif interdisciplinaire en mesure de traiter du bois carbonisé, tant du point de vue anatomique que chimique et isotopique.
- 5 Les travaux du laboratoire LSCE en dendroclimatologie (V. Daux) et datations radiocarbone (C. Hatté).
- 6 Le GdR Sciences du Bois, dont certains membres du GT étaient membres, a permis d'élargir le cercle des compétences à la mécanique du bois notamment, et au travail sur le comportement du bois vert. Enfin, le GT a pu tirer profit de tous les relevés détaillés de la charpente réalisés par R. Fromont et C. Trentesaux en 2016.

GT Métal

Sur Notre-Dame, aucune donnée n'avait été produite, mais le GT avait l'expérience de travail depuis plus de 20 ans sur différentes thématiques liées aux métaux de la construction et sur plusieurs dizaines d'édifices (par exemple, pour revue : « Le fer et le plomb dans la construction monumentale au Moyen Âge, de l'étude des sources écrites à l'analyse de la matière. Bilan de 20 ans de recherches et perspectives », M. L'Héritier, *Ædificare*, Revue internationale d'histoire de la construction 2019).

- 1 Étude archéologique et historique des usages du fer et du plomb dans les maçonneries.
- 2 Études métallographiques et essais mécaniques (qualité du métal et mise en forme).
- 3 Études sur la corrosion du fer.
- 4 Datation des fers archéologiques (depuis 2015 environ).

- 5 Études de provenance sur les fers archéologiques par analyses chimiques (depuis 2010 environ).
- 6 Études chimiques sur la composition des plombs (depuis 2010).
- 7 Traçage isotopique des plombs (études historiques et de pollution) (depuis plus de 20 ans pour la pollution et le traçage, mais non encore appliquées à un monument).



GT Pierre

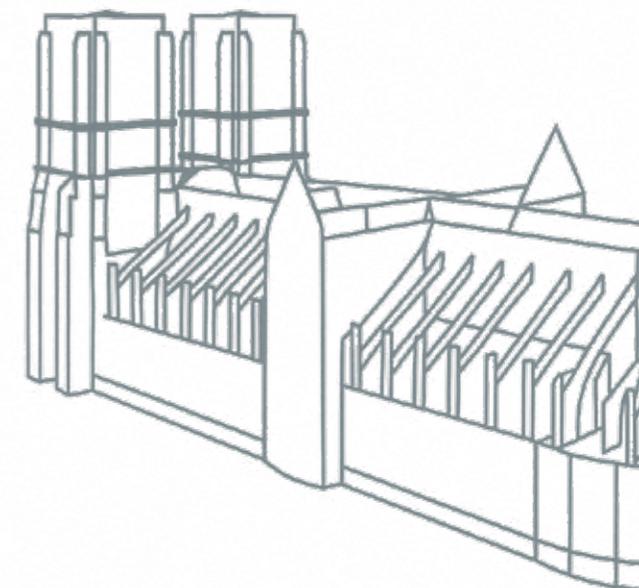
- 1** Recherches sur l'architecture gothique produites par la communauté scientifique en histoire de l'art du Moyen Âge (ex: thèse d'A. Ybert sur les voûtes gothiques en Île-de-France et Picardie, 2014).
- 2** Recherches sur les matériaux de Notre-Dame de Paris à l'occasion de chantiers de restauration antérieurs (années 1980, lithothèque du LRMH, travaux de L. Leroux) et sur la pierre de construction à Paris et en Île-de-France, de l'Antiquité à l'époque moderne (travaux d' A. Blanc, M. Viré, J.P. Gély).
- 3** Recherches sur la composition physico-chimique et le comportement mécanique des mortiers anciens (travaux de J.M. Mechling).
- 4** Expertise en archéologie du bâti et archéologie de la construction, indispensable pour mener à bien la critique d'authenticité (= étude pierre à pierre des élévations pour identifier les parties restaurées à différentes époques et les parties non restaurées).

**GT Verre et Vitraux**

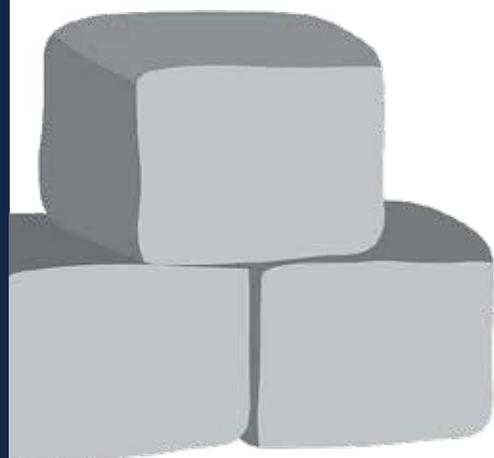
- 1** Dans sa mission d'expertise au sein du LRMH, C. Loisel avait étudié en 2014 l'état des baies hautes de Notre-Dame pour l'élaboration du cahier des charges des futures restaurations programmées par P. Villeneuve, architecte des monuments historiques.
- 2** Les historiens ont repris les ouvrages du Corpus Vitrearum (initié en 1953), inventaire des vitraux, indiquant les critiques d'authenticité des roses (<https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/les-vitraux-du-moyen-age> ; <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/les-vitraux-du-xixe-siecle> ; <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/les-vitraux-du-xxe-siecle>)

GT Décor Monumental

- 1** Études des restaurations des portails occidentaux de Notre-Dame (numéro spécial de la revue Monumental en 2000).
- 2** Participation de plusieurs membres du GT à l'ouvrage collectif paru à l'occasion du jubilé pour les 850 ans de Notre-Dame (« Notre-Dame de Paris », Strasbourg, Nuée bleue, 2012).
- 3** Ouvrage de synthèse paru en 2013 (D. Sandron, A. Tallon, « Notre-Dame de Paris. Neuf siècles d'histoire », Paris, Parigramme, 2013, rééd. 2019 ; édition anglaise 2020) et utilisant les premiers relevés scanner de Notre-Dame effectués par A. Tallon.

**GT Structure (voir références complémentaires en annexe)**

- 1** Travaux depuis 2010 sur le comportement mécanique des ouvrages maçonnés en pierre et sa modélisation.
- 2** Diagnostic de structures maçonnées anciennes.
- 3** Effet des incendies sur les structures maçonnées (depuis 2017).
- 4** Études sur les mortiers et l'adhérence entre pierre et mortier (2019).

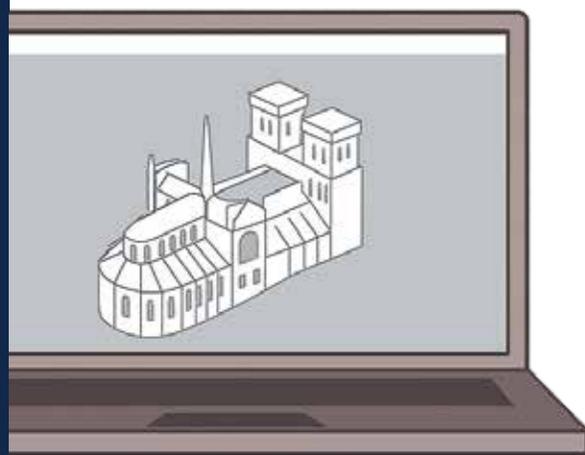


GT Données Numériques

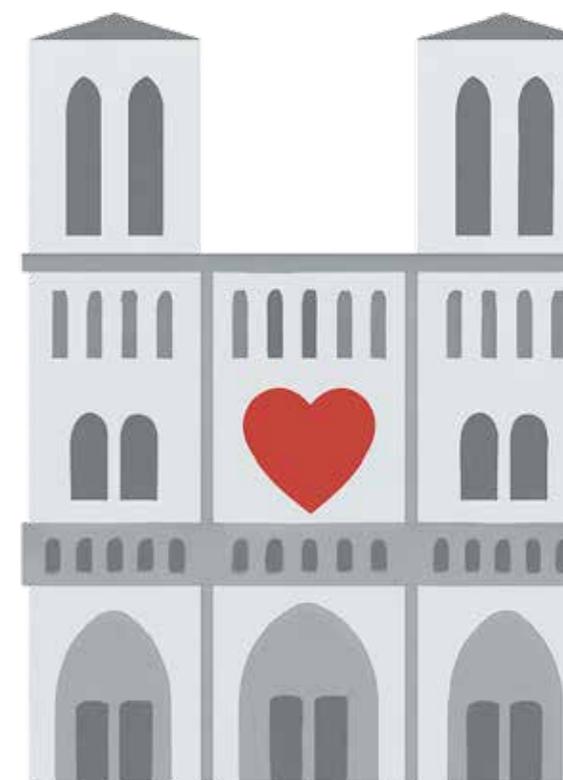
- 1 L. De Luca a participé à un groupe de travail du Ministère de la Culture chargé de définir les lignes directrices de la numérisation 3D des monuments français dans le cadre du Plan national de numérisation. Cette implication a permis au GT d'identifier très rapidement les détenteurs de données 3D sur l'état de Notre-Dame avant l'incendie et d'en évaluer la pertinence en fonction des enjeux de la restauration (spécifications techniques, degré de réutilisabilité).
- 2 Moins d'un an avant l'incendie, le GT (laboratoire MAP) avait finalisé le prototype d'Aïoli, une plateforme web dédiée à l'annotation 3D pour la documentation collaborative des édifices patrimoniaux. Cet outil s'est révélé central pour la collecte, la spatialisation et l'interconnexion des données produites par les scientifiques et les professionnels autour du chantier de Notre-Dame.

**GT Acoustique (voir références complémentaires en annexe)**

- 1 Expertise en paysage sonore développée depuis 2015 : maîtrise de l'intégralité de la chaîne de production, de la recherche d'information dans les sources à leur diffusion immersive, en passant par la captation et la post-production.
- 2 Expertise en patrimoine sonore développée depuis 2020.
- 3 Expertise en acoustique, développements de modèles acoustiques pour l'audio-réalité virtuelle, y compris à Notre-Dame depuis 2010.

**GT Émotions / Mobilisations (EMOBI)**

- 1 L'anthropologie du patrimoine : ce courant de la recherche en anthropologie, a été initié par D. Fabre avec la création du Lahic (Laboratoire d'Anthropologie et d'Histoire de l'Institution de la Culture) en 2001. Il est à l'origine du GT qu'il a irrigué de ses grandes thématiques de recherche comme celle des liens entre le patrimoine historique et matériel, et le patrimoine immatériel.
- 2 Les émotions patrimoniales : de nombreux membres du GT ont fait partie à la fin des années 2000 du groupe de recherche lancé par D. Fabre sur les émotions patrimoniales (voir l'ouvrage collectif « Émotions Patrimoniales » publié en 2013 aux Éditions de la Maison des sciences de l'homme, ainsi que les Carnets du Lahic sur l'incendie du château de Lunéville (2010), le parc du château de Versailles après la tempête de 1999 (2013) ou la mobilisation contre le barrage de la Borie (2010)).
- 3 S. Sagnes avait lancé un terrain à la fin des années 2010 sur les médiations culturelles de Notre-Dame de Paris et plus particulièrement sur le guidage pratiqué par les bénévoles de la Communauté d'accueil sur les sites artistiques, montrant qu'à sa manière, le guidage concourt à la production d'un patrimoine toujours plus consubstantiel à sa médiation (« D'une quête l'autre : la visite de Notre-Dame », Les patrimoines en recherche(s) d'avenir, sous la direction d'E. Anheim, d'A.J. Etter, G. Glasson-Deschaumes, P. Liévaux, Presses universitaires de Paris Ouest, Paris, 2019, pp 109-120).



OUTPUT des recherches

LE CHANTIER SCIENTIFIQUE AVAIT DEUX OBJECTIFS MAJEURS :

- 1 **LA SCIENCE POUR NOTRE-DAME :**
mettre les connaissances disponibles en sciences du patrimoine au service de la restauration de Notre-Dame ;
- 2 **NOTRE-DAME POUR LA SCIENCE :**
profiter d'un accès privilégié à Notre-Dame pour renouveler le corpus de connaissances sur la cathédrale, l'architecture gothique et les savoir-faire ancestraux des bâtisseurs, mais aussi analyser une situation anthropologique inédite avec une émotion patrimoniale clivante, observable et étudiable grâce à l'ampleur inhabituelle des réactions et témoignages suscités.

Comme mentionné précédemment, la contrainte temporelle imposée au chantier de restauration combinée à la pollution au plomb et à la crise COVID ont largement restreint l'accès du chantier et la disponibilité des équipes de restauration au chantier scientifique. Aussi, certains projets ont abouti trop tardivement pour que les conclusions ou recommandations scientifiques puissent être prises en compte dans les décisions de restauration, mais elles pourront alimenter la réflexion d'autres chantiers de restauration, à Notre-Dame ou dans d'autres monuments historiques. D'ailleurs, certains groupes de travail se sont concentrés sur des éléments (Décors monumentaux, Vitraux) qui n'avaient pas ou pas lourdement été endommagés par l'incendie.

AUSSI, NOUS DISTINGUERONS ICI :

- **LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES**
qui ont appuyé le chantier de restauration,
- **CEUX QUI SERVIRONT D'AUTRES CHANTIERS,**
- **ET LES PRODUCTIONS QUI S'ADRESSENT À D'AUTRES PUBLICS,**
que ce soit la Ville de Paris, les visiteurs, les artisans...

Nous avons reporté en annexe 3 (voir page 64) les travaux qui visent à renouveler les connaissances sans utilisation prédictible à court terme (donc non reliés à un impact autre que scientifique à ce stade). Tous les projets décrits ont mené à d'innombrables publications et autres productions scientifiques que nous ne citerons pas ici.



LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES QUI ONT APPUYÉ LA RESTAURATION

RELEVÉS NUMÉRIQUES AVANT ET APRÈS INCENDIE

Le GT Données Numériques, déjà impliqué dans les plans de numérisation du patrimoine culturel, a été mobilisé dès l'été 2019 par la maîtrise d'œuvre pour aider à comparer l'état de la cathédrale avant et après incendie. Il s'agissait en premier lieu de récupérer les données numériques existantes et en particulier celles obtenues par Andrew Tallon, décédé quelques mois avant l'incendie, ainsi que des jeux de photographies sur l'état de la cathédrale avant incendie. Afin d'établir l'état post-incendie, il convenait d'acquérir les données tri-dimensionnelles (acquisition par laser-grammétrie, photogrammétrie, drone) en collaboration avec les cordistes et les entreprises présentes.

Le GT a très rapidement mis en service la plateforme Aïoli pour centraliser et annoter les données du chantier, afin d'intégrer les phases avant et après l'incendie mais aussi assurer un suivi partiel des travaux de restauration. Notons qu'une centaine d'acteurs des chantiers scientifique et de restauration ont eu accès à ces données (plusieurs états de l'édifice représentés en 3D dimensions) à partir d'un visualiser web développé dans le cadre du projet. L'accès à distance à ces données s'est avéré crucial pendant les périodes de confinement (covid-19). Ainsi, le GT a pu réunir une documentation spatialisée des charpentes, des voûtes et extradados des voûtes, avant et après-incendie.

Cette étude a fourni une restitution virtuelle des charpentes avant incendie à l'échelle du détail architectonique, ainsi que l'état des déformations subies par les voûtes à cause de l'incendie. Cela a permis aux architectes, bureaux d'études et GT Structure d'étudier les aspects relatifs au comportement structurel post-incendie.

Par ailleurs, le GT, en coopération avec d'autres acteurs de la maîtrise d'œuvre et du chantier scientifique, a reconstruit numériquement l'arc doubleau de la nef et de l'anneau de compression, basé sur la numérisation et l'analyse des claveaux et fragments retrouvés.



Le chantier scientifique a pu réunir une documentation spatialisée des charpentes, des voûtes et extradados des voûtes, avant et après incendie.

DIAGNOSTIC POST-INCENDIE

Suite aux premiers diagnostics menés par le LRMH sur les murs gouttereaux dès la fin avril 2019 pour en vérifier la solidité, plusieurs GT ont été mis à contribution pour accompagner la maîtrise d'œuvre et les bureaux d'études dans l'établissement d'un diagnostic post-incendie de la cathédrale. En particulier, à la demande de la maîtrise d'œuvre et en concertation avec les bureaux d'étude, le GT Structure s'est attelé à l'évaluation du comportement mécanique post-incendie des voûtes de Notre-Dame (nef, chœur et transept), à partir de l'état d'équilibre initial avant incendie. Cette étude s'est appuyée sur une méthodologie originale dite du point de fonctionnement, basée sur une estimation distincte du comportement des voûtes et de leurs appuis, et a contribué à l'estimation de l'équilibre des voûtes et des réserves de poussée post-incendie. De plus, dans le but de fiabiliser les réponses mécaniques simulées de l'ouvrage, différentes modélisations mécaniques ont été mises en œuvre simultanément et comparées.

Plusieurs études complémentaires ont été réalisées :

- **le comportement post-incendie** des voûtes du chevet en tenant compte des interactions entre voûtains latéraux et murs gouttereaux,
- **des dilatations thermiques** lors de l'incendie et de l'impact de l'eau d'extinction ;
- **les interactions** entre charpente et maçonnerie ;
- **la stabilité** sous l'effet du vent d'une travée confortée du chœur.

Lors de l'incendie, les vitraux historiés ont été protégés dans leur globalité par l'action des pompiers et la résistance de la voûte. En revanche, une couche de particules atmosphériques supplémentaire s'est déposée à la surface des panneaux. La problématique première était donc d'éliminer en toute sécurité pour les restaurateurs ce dépôt riche en plomb tout en préservant les vitraux. Il était donc essentiel de caractériser les dépôts de surface sur les vitraux afin d'optimiser les méthodes de traitements pour leur restauration et d'en tirer des conséquences quant à l'optimisation des protocoles d'urgence face à une telle catastrophe. À ce titre, l'incendie de la cathédrale Saint-Pierre et Saint-Paul de Nantes, au cours duquel les vitraux ont été très fortement endommagés, a alimenté la réflexion.

MATÉRIAUX POUR LA RESTAURATION

Une préoccupation des architectes était de savoir dans quelle mesure certains matériaux de la cathédrale, et en particulier les pierres des voûtes et les agrafes en fer, pouvaient être réutilisées dans la restauration. À ce titre, les GT Pierre et Métal ont été sollicités, d'une part pour remonter à blanc l'arc doubleau de la nef et tester la ré-employabilité des pierres qui la composent et d'autre part pour analyser la qualité du fer post-incendie. Dans le premier cas, il s'est avéré que les pierres d'origine ne pouvaient pas être réutilisées ; dans le second, malgré un bon état des matériaux, la maîtrise d'œuvre a opté pour un remplacement.

LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ONT FAIT L'OBJET D'ANALYSES QUI COMPLÈTENT LA CONNAISSANCE DE LA CATHÉDRALE ET ONT ÉCLAIRÉ LES DÉCISIONS DES ARCHITECTES :

- **CARACTÉRISATION PÉTROGRAPHIQUE,**
- **CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS** de la pierre avec une étude des pierres candidates à la reconstruction des voûtes,
- **CARACTÉRISATION DES MORTIERS.**

Ainsi, une étude physico-chimique des mortiers de Notre-Dame a pu être réalisée et a permis de reconstituer la formulation des mélanges afin que la maîtrise d'œuvre puisse utiliser des mortiers ayant les mêmes caractéristiques que ceux utilisés originellement.

Si les données scientifiques établissaient bien l'utilisation originellement de chênes jeunes et verts pour la charpente de la nef, le GT Bois a pu, grâce aux différentes compétences disciplinaires représentées

(archéologie, dendroarchéologie, mécanique du bois, etc.), éclairer les maitrise d'œuvre, maitrise d'ouvrage et bureaux d'études sur son utilisation et sur les mesures de résistance du bois vert par rapport au bois sec, mais aussi dater l'abattage des bois de la flèche et comparer cette date avec le journal de Viollet-le-Duc.

Le GT structure a ensuite accompagné les bureaux d'étude sur les aspects structuraux liés à l'utilisation du bois vert et en particulier les variations dimensionnelles d'éléments structuraux de charpente dues au séchage du bois. Notons que les charpentiers, et en particulier l'association Charpentiers sans frontières (fondée par François Calame, ethnologue au Ministère de la Culture) a convaincu les maitrise d'œuvre et maitrise d'ouvrage de leur capacité à refaire la charpente de la nef et du chœur à l'identique, en bois équarri. Enfin, le GT structure a accompagné scientifiquement la maitrise d'ouvrage en phases d'études de conception, d'études d'exécution et de travaux, par l'analyse scientifique des DCE.

ALTÉRATIONS DU PLOMB ET TRAÇAGE DES POLLUTIONS

Le GT Métal a été sollicité très rapidement après l'incendie par la Ville de Paris et l'ARS (Agence régionale de santé) pour évaluer l'impact de la pollution au plomb déclenchée par l'incendie. Les travaux menés ont permis d'établir la signature isotopique du plomb de Notre-Dame, qui diffère de la signature du « plomb parisien ». Les comparaisons de pollutions avant et après l'incendie ont pu être réalisées grâce à une collaboration avec la Ville de Paris, dans l'année précédant l'incendie, sur la contamination des sols parisiens.

Les nombreux prélèvements suite notamment aux plaintes de riverains ou d'associations, ont mis en évidence que si le parvis et le chantier de Notre-Dame étaient très contaminés, la majorité de la pollution a été évacuée avec le panache de fumée. La pollution de l'air mesurée entre avril et novembre 2019 par le laboratoire central de la préfecture de police n'a jamais dépassé la valeur guide de l'OMS et est revenue à l'état pré-incendie dès le mois de juillet. Les pollutions au sol, notamment dans les cours d'école n'avaient pas non plus la signature isotopique du plomb de Notre-Dame.

En revanche, les campagnes de mesures de plombémie ont détecté de nouveaux lieux contaminés (indépendamment de l'incendie), en particulier dans des logements historiques parisiens qui présentaient encore des peintures à la céruse. Ces résultats ont engendré un très important suivi de la contamination au plomb par la Ville de Paris.

D'autre part, les études de lixiviation du plomb ont permis de quantifier les teneurs en plomb relargué par les couvertures dans les eaux de pluie et ainsi de concevoir les solutions pour limiter la pollution. L'interaction du plomb fondu avec le métal, le verre ou la pierre constitutifs de l'édifice a engendré la formation de composés plombifères aux couleurs et morphologies variées dont la nature et la composition ont été identifiés, afin de mieux adapter les processus de dépollution de l'édifice.



Des campagnes de mesures acoustiques ont été menées in situ pour caractériser l'acoustique de la cathédrale dans l'état où elle se trouvait après l'incendie et dans son état après restauration.

ÉTUDES ACOUSTIQUES

Des campagnes de mesures acoustiques ont été menées in situ (dès mai-juin 2019) pour caractériser l'acoustique de la cathédrale dans l'état où elle se trouvait après l'incendie et dans son état après restauration, pour éclairer certains choix de restauration (par exemple les interactions avec l'orgue). Si les questions de l'acoustique n'ont pas été considérées directement dans le nettoyage du grand orgue, le GT Acoustique, à la demande de la maitrise d'œuvre et de l'EP-RNDP, a fourni un rapport pour informer sur les choix techniques concernant l'orgue du chœur suites aux propositions des facteurs d'orgue présélectionnés.

CONSTRUCTION DE L'EXCEPTIONNALITÉ ET REGISTRES DE SACRALITÉ

Finalement, le GT EMOBI a analysé comment et par quelles opérations, symboliques et/ou techniques, les nouveaux matériaux qui sont entrés dans Notre-Dame pour la reconstruire ou la restaurer ont été, en quelque sorte, métabolisés par le monument et intégrés à son exceptionnalité, avec un focus sur l'usage des savoir-faire traditionnels et à la manière dont ils ont renforcé le lien entre le chantier actuel et l'histoire de l'édifice. En parallèle, le GT a cherché à décrypter les différents registres de sacralité (religieuse, patrimoniale, expérientielle...) qui alimentent cette exceptionnalité et la façon dont ils se sont hybridés dans le cadre du chantier : débris de l'incendie considérés comme des quasi-reliques, bénédictions des grumes destinées à la nouvelle charpente, transformation du coq de la flèche en un objet mémoriel intégrant à la fois les mêmes reliques que son prédécesseur et la liste des artisans ayant œuvré sur le chantier.

Le chantier scientifique a analysé les savoir-faire traditionnels et la manière dont ils ont renforcé le lien entre le chantier actuel et l'histoire de l'édifice.



LES TRAVAUX SCIENTIFIQUES MOBILISABLES SUR D'AUTRES CHANTIERS DE RESTAURATION, Y COMPRIS À NOTRE-DAME



CATHÉDRALE NUMÉRIQUE

L'ambition de ce travail a été de créer un écosystème numérique autour d'un objet patrimonial pour accompagner l'étude scientifique et la restauration de la cathédrale, en intégrant progressivement les données, les informations et les connaissances provenant de tous les acteurs du chantier autour de quatre aspects complémentaires : la collecte et l'intégration des données numériques existantes, la production de nouvelles données, leur partage et archivage pérenne, leur structuration et enrichissement sémantique. À ce jour, ce dispositif a permis la production d'un corpus unique de plusieurs dizaines de milliers d'annotations, spatialisées, sémantisées, liées à des observations in situ, des diagnostics, des résultats d'analyses et des données de terrain. Il a fallu notamment définir la stratégie de numérisation des vestiges, les approches d'indexation et de catégorisation des données et, à partir de toutes les données collectives du chantier scientifique catégorisées et spatialisées en 3D avec la plateforme Aioli, d'explorer les enjeux d'analyse et de corrélation par l'intelligence artificielle. Ce corpus constitue une mémoire structurée des protocoles d'études, des savoirs et des regards scientifiques portés sur la cathédrale, et offre une base de référence inédite pour des analyses croisées à long terme.

L'ambition a été de créer un écosystème numérique autour d'un objet patrimonial pour accompagner l'étude scientifique et la restauration de la cathédrale.

Ainsi, la cathédrale numérique a intégré des données collectées auprès d'institutions culturelles, laboratoires de recherche et entreprises (200 000 photographies avant/après l'incendie et pendant la restauration, 5000 nuages de points laser 3D, plus de 300 dessins techniques, 5000 sources documentaires concernant l'histoire de la cathédrale), auxquelles se sont ajoutées toutes les données du chantier scientifique (analyses de matériaux, acquisitions acoustiques, simulations mécaniques et acoustiques, études techniques, ressources presse et web, interviews, documentaires vidéo, enquêtes citoyennes...). ■■■

ÉVALUATION STRUCTURALE POST-INCENDIE DES MONUMENTS HISTORIQUES

■ ■ ■ En intégrant dans un même écosystème numérique des données issues de domaines variés (archéologie, mécanique, sciences des matériaux, acoustique, anthropologie...), cette approche interdisciplinaire favorise l'émergence de nouveaux outils d'analyse, de partage et d'exploitation des informations par les scientifiques, les acteurs de la restauration, voire par le grand public. Plusieurs des outils logiciels développés dans le cadre de ce projet, notamment ceux liés à l'annotation, à la visualisation spatiale et à l'analyse sémantique, ont été conçus comme des briques réutilisables pouvant être adaptées à d'autres corpus patrimoniaux. Une charte du CNRS et du Ministère de la Culture pour le dépôt et l'utilisation des données a été établie qui permettra leur disponibilité en accès libre conformément aux dispositions de la licence Etalab 2.0, dès 2025. Le choix de diffuser ces données sous licence ouverte renforce la dimension collaborative de cette initiative, offrant un modèle directement transposable à d'autres études et chantiers patrimoniaux.

Il s'agit donc d'un système socio-technique inédit, qui peut être développé pour d'autres monuments. Il permet non seulement l'archivage mais également une représentation évolutive de l'objet matériel et une structuration progressive des connaissances qui lui sont liées.

Le GT Structure a utilisé des concepts de mécanique non linéaire pour caractériser la sécurité post-incendie du patrimoine bâti, en évaluant les propriétés thermomécaniques des matériaux constitutifs des maçonneries (roche calcaire et assemblages par joints en mortier de chaux). L'approche s'est appuyée sur une modélisation hybride combinant l'interaction entre blocs (modèle de « zone cohésive frictionnelle ») et la prise en compte de l'endommagement quasi-fragile des blocs déformables. Cette méthode a finalement été calibrée et validée avec les données de Notre-Dame afin d'affiner la modélisation thermomécanique. Ces travaux, dont certains résultats sont arrivés trop tard pour servir le chantier de restauration, seront très utiles pour les phases ultérieures du chantier de Notre-Dame et pour d'autres projets de restauration. Le GT dispose maintenant d'outils bien adaptés permettant à la fois d'effectuer rapidement des analyses préliminaires et de produire des modélisations plus détaillées des structures.

Le chantier scientifique dispose maintenant d'outils bien adaptés permettant à la fois d'effectuer rapidement des analyses préliminaires et de produire des modélisations plus détaillées des structures.



Des travaux ont porté sur la morphologie et l'âge des bois pour une reconstruction à l'identique.



CARACTÉRISATION DES BOIS ET DE LA CHARPENTE EN VUE D'UNE RECONSTRUCTION À L'IDENTIQUE

Des analyses ont été menées sur les désordres mécaniques de la charpente en bois d'origine, afin de les corriger dans la nouvelle charpente en proposant des dispositions constructives appropriées. La modélisation mécanique fine, capable de rendre compte des comportements mécaniques à court et long termes de la charpente, a ainsi été réalisée en s'appuyant sur les connaissances physiques et mécaniques du bois mis en œuvre et des méthodes de construction médiévales. La confrontation entre cette modélisation et une réplique construite à l'échelle 1:1 d'un module de charpente a permis de hiérarchiser les comportements mécaniques responsables de la souplesse effective constatée sur cette charpente.

D'autres projets ont contribué à une meilleure compréhension de l'histoire de la construction de la charpente, de ses réparations, des innovations technologiques mis en œuvre, ou encore de certains assemblages. Enfin, des travaux ont porté sur la morphologie et l'âge des bois pour une reconstruction à l'identique, voire de l'espèce de chêne utilisée, du type de sylviculture, de la provenance géographique, des lignées génétiques...

LES CAPTATIONS SONORES DES MÉTIERS ET DU CHANTIER, UN OUTIL DE FORMATION

Les enregistrements non intrusifs réalisés auprès des artisans pendant le chantier ont montré l'importance de l'écoute dans la bonne mise en pratique des gestes et savoir-faire artisanaux, et les problèmes que peuvent poser le bruit du chantier ou l'utilisation de casques anti-bruit. Ces captations pourront être réinvesties dans d'autres projets patrimoniaux, à des fins de sensibilisation, de documentation et de formation. À partir de ces enregistrements, ont été développés des outils de formation pour les artisans, fondés sur la restitution virtuelle du geste et du son (notamment en lien avec le chantier médiéval de Guédelon). Ces approches seront transférables à d'autres chantiers pour la sensibilisation des artisans aux aspects sonores.

LE DÉCOR MONUMENTAL

Le GT Décor Monumental s'est attaché à l'étude du décor monumental de Notre-Dame sous différents aspects : relevés 3D, étude de la polychromie, études comparatives. Les relevés 3D (photogrammétriques et scanner laser) ont été réalisés sur la façade occidentale, le portail occidental et à l'intérieur de la cathédrale (bases, chapiteaux, clés de voûtes), avant d'être versés sur la plateforme numérique. Une étude globale de la polychromie du décor monumental a permis d'alimenter le projet international « Notre-Dame in Color ». Enfin, des études comparatives sont menées, notamment pour analyser l'impact de la cathédrale dans l'organisation du diocèse de Paris, un élément clef de la géographie ecclésiastique avec plusieurs dizaines d'églises à étudier, dont Notre-Dame de Longpont-sur-Orge mais aussi des sculptures conservées dans divers musées dans le monde.

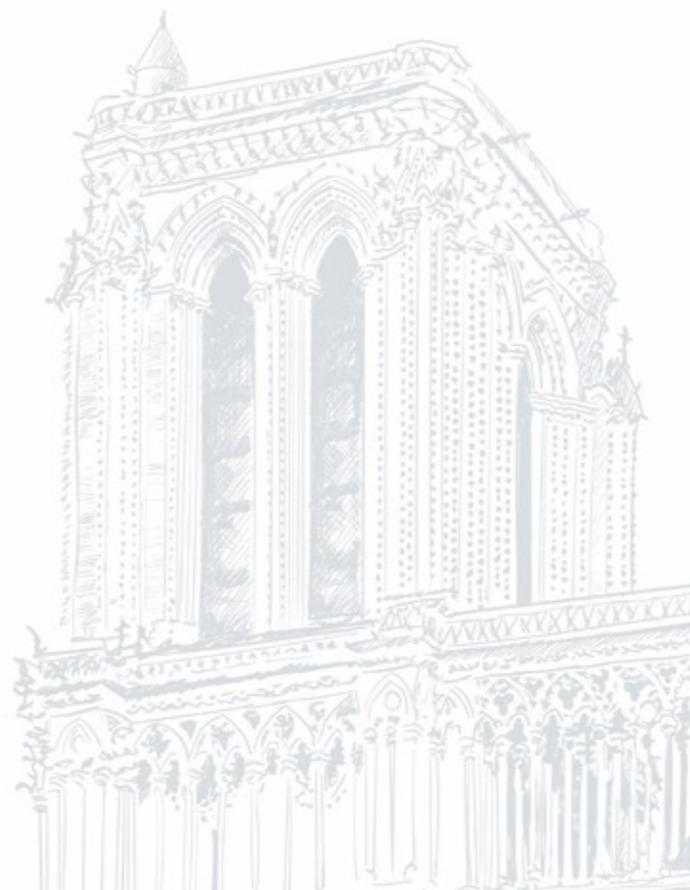
LES VITRAUX

Le GT Verre et Vitraux a développé des projets permettant une meilleure compréhension de l'interaction des dépôts de surface avec les matériaux, en suivant deux directions : l'interaction plomb-matériaux et le développement d'un nouvel outil pour la caractérisation stratigraphique des dépôts (New-AGLAE). Il s'agissait de mieux comprendre la nature des composés plombifères produits lors de l'incendie et leur interaction avec les éléments de vitraux, afin d'élaborer des protocoles de décontamination adaptés.

Dès 2021, le GT a engagé une révision approfondie des critiques d'authenticité des vitraux de Notre-Dame, en particulier des trois grandes roses (occidentale, transept nord et sud). Cette étude visait à cartographier précisément chaque panneau afin de distinguer les pièces d'origine médiévale de celles issues des restaurations successives, notamment celles réalisées au XIX^e siècle. En parallèle, des recherches docu-

mentaires dans les archives historiques ont permis de retracer les interventions passées et documenter les campagnes de restauration, en particulier celles de Viollet-le-Duc. Ces investigations ont été complétées par des analyses physico-chimiques (spectrométrie de fluorescence X, analyses par faisceaux d'ions, spectroscopie optique et spectrométrie Raman), afin d'identifier avec précision la composition des verres et des peintures, ainsi que les techniques employées au cours des différentes époques de production. Ces travaux constituent ainsi une référence essentielle pour la gestion scientifique et patrimoniale des ensembles vitrés de Notre-Dame.

Ces travaux constituent ainsi une référence essentielle pour la gestion scientifique et patrimoniale des ensembles vitrés de Notre-Dame.



LES AUTRES PRODUCTIONS

CAPTATION DE LA MÉMOIRE SONORE ET VISUELLE DU CHANTIER, MÉMOIRES MATÉRIELLES, MÉMOIRES COLLECTIVES OU INDIVIDUELLES



Ces captations constituent une véritable mémoire collective du chantier, reconnue comme telle par ses acteurs.

Plusieurs groupes de travail, notamment le GT EMOBI et le GT Acoustique, ont documenté de manière détaillée la mémoire sonore et visuelle du chantier de restauration de Notre-Dame. Depuis 2020, une ethnographie visuelle menée sur le terrain a permis de recueillir environ 600 heures d'enregistrements vidéo et une centaine d'heures d'entretiens auprès des différents acteurs impliqués. En parallèle, des captations sonores ont enregistré les ambiances et les sons caractéristiques du chantier (bruits d'outils, échanges entre artisans, ambiances générales du chantier). Ces différentes captations révèlent à la fois les savoir-faire mis en œuvre, les gestes techniques, mais aussi les interactions humaines, les émotions ressenties ou la manière dont chacun a vécu le déroulement du chantier. Elles constituent une véritable mémoire collective du chantier, reconnue comme telle par ses acteurs.

Ces données, collectées dans une optique ethnographique, sont actuellement intégrées dans l'écosystème numérique du chantier développé par le GT Numérique, où elles deviennent une ressource précieuse pour de futures recherches interdisciplinaires. Elles permettent d'étudier la mémoire collective et individuelle liée à la cathédrale, qu'elle prenne des formes matérielles (objets, outils, traces physiques) ou immatérielles (souvenirs, récits, émotions partagées).

VENIR À NOTRE-DAME : EXPÉRIENCES ET PERCEPTION

Le GT EMOBI a conduit une large enquête afin de mieux comprendre comment le public visite, perçoit et se représente Notre-Dame. Un questionnaire en ligne a été lancé dès 2020, recueillant plus de 2500 réponses. Une attention particulière a été portée aux pratiques des visiteurs aux abords de la cathédrale et à leurs attentes en matière d'accueil et de médiation autour du monument. Les résultats obtenus sur les pratiques ont intéressé directement la Ville de Paris en vue du réaménagement des abords de Notre-Dame, tandis que les données sur la médiation alimentent les réflexions de l'Établissement public dans la perspective du futur musée de Notre-Dame. Enfin, l'ensemble des informations recueillies fournissent des pistes de réflexion pour les pratiques touristiques et culturelles autour du monument.

JUMEAUX NUMÉRIQUES ACOUSTIQUES À DIFFÉRENTES PÉRIODES

Le GT Acoustique a développé des « jumeaux numériques acoustiques » permettant de recréer virtuellement l'ambiance sonore de la cathédrale à différentes périodes (époque médiévale, avant/après incendie...) ou dans différentes configurations. Fondées sur des relevés sonores et enrichies par des recherches documentaires et archéologiques, notamment sur le mobilier historique et les textiles, les modélisations analysent avec précision l'évolution de l'acoustique intérieure du monument en fonction de sa structure architecturale, de son mobilier et de la présence de différents éléments décoratifs. Pour ces simulations, des sources sonores ont été enregistrées en chambre anéchoïque avec des voix de chanteurs, un chœur d'enfants, des locuteurs de français classique et de latin, et le son d'un grand orgue. Au même titre que la numérisation 3D de la cathédrale, les jumeaux acoustiques sont des vecteurs pour la médiation culturelle et la vulgarisation, en rendant possible des expériences immersives (écoutes virtuelles comparatives, expériences en réalité virtuelle).

Les jumeaux acoustiques sont des vecteurs pour la médiation culturelle et la vulgarisation, en rendant possible des expériences immersives.



PODCAST DE FICTION RADIOPHONIQUE, AUDIOGUIDE ET CONCERT VIRTUEL

Le GT Acoustique a contribué à plusieurs projets de médiation sonore, en utilisant les enregistrements réalisés sur le chantier (ambiances sonores, témoignages, entretiens) pour restituer de manière immersive l'expérience sonore de Notre-Dame. Ces productions mêlent données scientifiques, récits fictifs et témoignages authentiques d'acteurs du chantier. Ainsi, le podcast « À la Recherche de Notre-Dame » est une fiction radiophonique disponible sur Audible et inspirée des réflexions imaginaires de Victor Hugo lors de l'écriture de son roman Notre-Dame de Paris. Conçu comme une exploration sonore du monument au fil des siècles, il s'appuie sur des enregistrements et des simulations acoustiques pour reconstituer différentes ambiances historiques. Par ailleurs, l'application « WhispersND — Murmures du passé à Notre-Dame », disponible sur smartphone, propose un parcours audio immersif autour de la cathédrale. Enfin, un projet d'audioguide pour l'intérieur de la cathédrale est actuellement en réflexion, visant à proposer aux visiteurs un parcours sonore enrichi. Ces différentes productions cherchent à valoriser la dimension sensible du monument tout en tenant compte des aspects liturgiques et culturels, afin de concilier l'identité sacrée du lieu avec une expérience patrimoniale accessible au grand public. Enfin, le concert virtuel « ArchéoConcert », sous la forme d'un moyen métrage, présente 11 pièces musicales associées à Notre-Dame sur une période de plus de 8 siècles, chacune enregistrée en studio et restituée en audio 3D dans l'acoustique appropriée à son époque.

Couplé à des éléments documentaires pour replacer chaque scène dans son contexte musicologique et/ou historique, et complété par un rendu graphique avec des musiciens animés, ce film a été projeté en 2025 lors de la Semaine du Son de l'UNESCO, puis au Congrès Français d'Acoustique, et est disponible en ligne gratuitement à partir de juillet-2025.

CIRCULATION des connaissances et intermédiaires

Le chantier de Notre-Dame a pour particularité d'avoir réuni dans un même lieu et dans un même temps acteurs scientifiques et acteurs de la restauration (maitrise d'ouvrage, maitrise d'œuvre, bureau d'études, restaurateurs, entreprises).

Ainsi, les travaux de recherche ont soit été menés pour répondre à une demande d'acteurs de la restauration, soit co-produites avec certains de ces acteurs, soit diffusés aux intéressés quasiment en temps réel. De l'avis de tous, le chantier de Notre-Dame va devenir une référence mondiale en termes de restauration, y compris sur ses aspects scientifiques qui pourront bénéficier à de futurs chantiers.

Par ailleurs, les scientifiques ont largement communiqué sur leurs travaux par le biais de colloques nationaux et internationaux, de conférences de vulgarisation et d'expositions.

Ils ont également été extrêmement sollicités par les médias (presse écrite régionale et nationale, radio, TV...), contribuant ainsi à ouvrir de nouvelles perspectives d'intérêt.

L'expérience résultant de la confrontation quotidienne des sphères de la science et de la restauration du patrimoine, associée à une communication intense vers tous les publics, a permis et permettra d'initier de nouveaux aspects connexes à cette coopération. Elle favorise également l'appropriation des connaissances issues du chantier scientifique par d'autres acteurs, qui pourront les exploiter et les faire fructifier.

MAÎTRISE D'OUVRAGE ET MAÎTRISE D'ŒUVRE

Dans le cadre de la restauration des monuments historiques appartenant à l'État, les Directions Régionales des Affaires Culturelles (DRAC) assurent la maîtrise d'ouvrage et ont donc pour mission d'assurer la conduite, la coordination et la réalisation des études et des opérations concourant à la conservation et à la restauration, sous la maîtrise d'œuvre des architectes en chef des monuments historiques (ACMH). Pour les Monuments Nationaux, la maîtrise d'ouvrage est assurée par le Centre des Monuments Nationaux (CMN). Dans le cas de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, les travaux de conservation et de restauration ont été confiés à l'établissement public EP-RNDP créé à cet effet par le décret du 28 novembre 2019. Chaque ACMH est normalement affecté à une circonscription territoriale. Compte tenu de l'ampleur du chantier de Notre-Dame de Paris qui requiert de nombreuses compétences, la maîtrise d'œuvre a été confiée à Philippe Villeneuve, qui s'est adjoint deux autres ACMH, Rémi Fromont et Pascal Prunet.

**De l'avis de tous,
le chantier de Notre-Dame
va devenir une référence
mondiale en termes de
restauration, y compris
sur ses aspects scientifiques
qui pourront bénéficier
à de futurs chantiers.**



Suite au chantier scientifique de Notre-Dame, des DRAC (ou d'autres partenaires) ont déjà eu l'occasion de faire appel à des membres du chantier scientifique dans le cadre de la restauration de différents monuments historiques. Parmi divers exemples, le GT Structure intervient sur l'évaluation structurale de la flèche de Bordeaux et le laboratoire MAP (GT numérique) a conclu une convention avec le CMN pour l'intégration des corpus de numérisation 3D de 25 monuments.

Le succès du chantier scientifique de Notre-Dame a aussi eu pour conséquence la création d'un réseau thématique commun au CNRS et au Ministère de la Culture, intitulé MAESTRO (« Appréhender les défis des grands monuments : MAteriaux, STRuctures, EnvirOnnements »). Le Département de la recherche, de la valorisation et du patrimoine culturel matériel et immatériel, la sous-direction des monuments historiques et des sites patrimoniaux, ainsi que les DRAC sont représentés au comité de pilotage de ce réseau.

Ainsi, les DRAC pourront bénéficier de l'accompagnement scientifique des acteurs du chantier scientifique de Notre-Dame, dès la phase de diagnostic jusqu'en phase de travaux, afin d'argumenter voire de conforter leurs décisions en matière de restauration.

Enfin, outre l'approfondissement de leurs connaissances, les ACMH expriment le besoin d'un échange continu et d'une confrontation des visions avec les scientifiques sur les chantiers de restauration, que ce soit pour mieux objectiver leurs choix et décisions ou pour accompagner l'évolution des doctrines et des méthodes de restauration actuelles. De plus, ils souhaitent une réflexion collective sur l'évolution des normes (bois vert, plomb...) fondée sur des données scientifiques rigoureuses et convaincantes pour un tiers.

ENTREPRISES DE RESTAURATION

Les entreprises en charge des éléments structurels (maçonnerie, charpente) des monuments historiques ont un savoir et un savoir-faire complémentaires du savoir académique. Aussi sont-elles demandeuses de plus de contacts et d'une réflexion partagée avec les scientifiques, que ce soit pour parfaire les formations des professionnels (par exemple en utilisant des outils de formation fondés sur la restitution virtuelle du geste et du son), ou développer de nouvelles approches, y compris pour le bâti neuf. Les scientifiques sont ainsi sollicités pour leurs connaissances sur le bois vert (voir paragraphe suivant).

ORGANISMES DE NORMALISATION ET ASSUREURS

Les normes de qualité qui s'appliquent dans le domaine du bâtiment sont exclusivement pensées pour le bâti neuf et non pour les monuments historiques. Or la restauration des monuments historiques obéit à la Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites, dite charte de Venise (1964), un ensemble d'orientations qui fournit un cadre international pour la préservation et la restauration des objets et des bâtiments anciens : « Restaurer doit signifier conserver et révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument, objet des travaux de restauration, en se fondant sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques ». Cette charte a été actualisée en 2000 à Cracovie, en adoptant une approche plus moderniste. Le projet de restauration du bâti historique peut désormais recourir à l'utilisation de matériaux et techniques modernes, à condition d'être rigoureusement testés, comparés et maîtrisés avant application, puis faire l'objet d'un suivi permanent. ■■■

LES BUREAUX D'ÉTUDES

Les bureaux d'études sollicités par les chantiers de restauration ont, par essence une double valence d'ingénierie et d'architecture des monuments historiques : dans un monument historique, approche structurelle scientifique et connaissance historique des édifices sont indissociables. Ils sont donc une interface parfaite entre ACMH et scientifiques. Les modélisations structurelles, quand bien même elles sont développées par des scientifiques experts du domaine, ne permettent pas encore de prévoir avec précision le comportement des bâtis anciens. Toutefois, ces modèles théoriques permettent de questionner et d'approfondir les analyses des bureaux d'études et des architectes sur les points critiques. Par ailleurs, les confronter à la réalité historique des monuments, qu'il s'agisse des techniques de construction ou de l'évolution des structures dans le temps, permet de les affiner progressivement et de les rendre de plus en plus pertinents.

Du point de vue des bureaux d'étude impliqués dans le chantier de Notre-Dame, cette collaboration s'est donc révélée très enrichissante pour toutes les parties et mérite d'être poursuivie lors de futurs chantiers nécessitant une réflexion approfondie sur la structure des monuments.

■■■ La restauration de Notre-Dame avait pour parti pris une restauration à l'identique, en reprenant si possible les matériaux et les techniques de construction. Ainsi, la charpente et la flèche ont été reconstruites en bois vert (taux d'humidité supérieur à 30%). Or, le taux d'humidité du bois à respecter pour la construction de maisons et bâtiments (ossatures bois et charpente) est spécifié dans les DTU 31.1 et 31.2 (« Documents Techniques Unifiés ») : il doit être inférieur à 18% en moyenne et ne doit pas dépasser 22% ponctuellement. De même, la réfection de la toiture en plomb contrevient aux normes européennes en la matière.

Le respect des normes est LA condition pour que le bâti soit déclaré conforme et assurable. Les maîtrises d'œuvre sont donc confrontées à des exigences contradictoires dans un contexte où la responsabilité des acteurs, y compris des entreprises, et leur assurabilité est engagée. Architectes et entreprises souhaitent donc pouvoir s'appuyer sur des données et mesures robustes et objectives, délivrées par les scientifiques, pour faire évoluer les normes et convaincre les assureurs. Cela permettrait d'assouplir le carcan normatif et contradictoire pour les monuments historiques. Les organismes de normalisation (CSTB, AFNOR) et les assureurs sont donc des intermédiaires clés pour une utilisation des données scientifiques en vue d'adapter les normes et développer de nouvelles modalités constructives pour le bâti patrimonial. Ces évolutions pourraient également bénéficier au bâti neuf, notamment pour des raisons économiques et environnementales.

LES CHANTIERS MÉDIÉVAUX EXPÉRIMENTAUX

Le chantier médiéval de Guédelon vise à construire un château « neuf », du premier tiers du 13^e siècle et d'architecture philippine. Chantier d'archéologie expérimentale, conseillé par un comité scientifique, ce projet initié en 1995 permet depuis aux ouvriers de Guédelon, de redécouvrir, transmettre ou perpétuer les savoir-faire des bâtisseurs. Outre le fait qu'il s'agit d'un outil de vulgarisation, avec ses 300 000 visiteurs par an, Guédelon est également une source d'inspiration, de réflexion, de pratiques et d'échanges pour les scientifiques et tous les intervenants de la restauration. Ainsi, de nombreux acteurs du chantier de Notre-Dame, qu'il s'agisse des architectes, des compagnons ou des scientifiques ont profité d'échanges, de formations et d'expérimentation sur le site de Guédelon qui, en retour, se nourrit des réflexions du chantier.

Plus récemment, un autre chantier expérimental a vu le jour, le chantier médiéval de Guyenne, dont l'ambition est de bâtir un ensemble architectural allant du roman au gothique en utilisant les techniques des bâtisseurs de l'époque et tenter ainsi de comprendre, dans une démarche d'archéologie expérimentale, comment ont été bâtis les joyaux de notre patrimoine architectural que sont les cathédrales. Les colloques du chantier scientifique de Notre-Dame ont permis aux scientifiques de rencontrer puis de collaborer avec le chantier médiéval de Guyenne, dont le conseil scientifique est constitué pour partie de membres du chantier scientifique de Notre-Dame.

PROJET DE MUSÉE POUR NOTRE-DAME ET MÉDIATION PATRIMONIALE

Un projet de musée pour Notre-Dame, souhaité par le Président de la République, est actuellement en phase de préfiguration, sous la responsabilité de Charles Personnaz (directeur de l'Institut National du Patrimoine) et Jonathan Truillet (EP-RNPD). Les scientifiques ont été intégrés d'emblée dans la réflexion autour de ce musée. Il s'agirait en effet de l'écrin idéal pour mettre en valeur et partager avec le public les résultats du chantier scientifique mais également pour archiver, en un même lieu, toutes les productions scientifiques, quel qu'en soit leur support (numérique, visuel, sonore, graphique...). De plus, la richesse des données collectées, croisées avec les avancées en annotation 3D et en intelligence artificielle, ouvre la voie à de nouvelles pratiques de médiation patrimoniale. Par exemple, des expériences immersives en réalité virtuelle, développées en collaboration avec Dassault Systèmes, permettent au public d'explorer l'histoire et l'architecture du monument sous un nouvel angle. Les jumeaux acoustiques ouvrent également des perspectives pour la médiation culturelle et la vulgarisation, en rendant possible des expériences immersives (écoutes virtuelles comparatives, expériences en réalité virtuelle) où le public pourra redécouvrir l'acoustique de Notre-Dame selon différentes configurations historiques.

Un projet de musée serait en effet un écrin idéal pour mettre en valeur et partager avec le public les résultats du chantier scientifique.



ÉTABLISSEMENTS DE FORMATION

En dehors de l'effet du chantier de Notre-Dame sur l'évolution des pratiques des différents acteurs actuels de la restauration, une réflexion sur la formation des futurs professionnels, qu'ils soient scientifiques, architectes, compagnons..., a germé suite à l'intrication des chantiers scientifique et de restauration et la confrontation des points de vue. La culture d'un dialogue fécond entre scientifiques (au-delà des scientifiques des laboratoires du Ministère de la culture) et acteurs de la restauration, au service de la restauration du patrimoine, doit, pour perdurer et être amplifié, être intégré aux différents cursus de formation. Stages en entreprise (y compris les artisans et compagnons) des futurs scientifiques du patrimoine pour mieux appréhender les savoirs et savoir-faire des entreprises et compagnons mais aussi les contraintes d'un chantier de restauration, davantage d'interventions de scientifiques lors de la formation des architectes des monuments historiques et dans les formations initiale ou continue aux métiers du patrimoine (licences professionnelles, liens à construire avec le groupement français des entreprises de restauration des monuments historiques GMH ou avec la CAPEB...) sont autant d'initiatives suggérées par les différents acteurs.

VILLE DE PARIS

Les travaux du GT métal sur la pollution au plomb avant et suite à l'incendie de Notre-Dame ont engendré un renforcement du suivi de la contamination au plomb par la Ville de Paris qu'elle avait déjà engagé depuis plusieurs décennies. En septembre 2019, la Ville de Paris a lancé un plan d'actions contre la pollution au plomb, dans la continuité de son Plan Paris Santé Environnement. En particulier, la Ville de Paris a lancé des investigations pour rechercher la présence de plomb dans ses établissements accueillant des enfants (crèches, écoles maternelles et élémentaires). La Ville de Paris et l'Agence Régionale de Santé (ARS) d'Île-de-France assurent une vigilance particulière vis-à-vis de la présence de plomb dans les grands monuments historiques parisiens, en lien avec les institutions impliquées dans leur conservation et leur restauration.

D'autre part, la Ville de Paris a collaboré avec le GT EMOBI dès la phase de programmation du projet de réaménagement des abords de Notre-Dame qui doit débuter en 2025. Le GT a contribué à compléter les études urbaines, sémiotiques et historiques réalisées sur le site par le biais d'un questionnaire visant à recueillir les souvenirs des visiteurs et des parisiens pour mieux connaître leurs attentes (Cf rapport de la présentation du projet et délibération du Conseil de Paris, 2021 SG20).

MÉDIAS

Il est impossible de dénombrer les interventions des scientifiques dans la presse écrite, radio et audiovisuelle nationale et internationale tant elles ont été fréquentes tout au long du chantier, démontrant l'intérêt des médias et du public non seulement pour la restauration de Notre-Dame mais aussi pour le chantier scientifique. À titre d'exemple et selon la base Europress qui référence 8183 titres de presse, le nombre d'articles mentionnant le chantier scientifique s'élève à 160, depuis le 15 avril 2019 jusqu'à aujourd'hui. Au-delà de ces sollicitations individuelles, les scientifiques ont également conçu un ouvrage d'art destiné au grand public, « Notre-Dame de Paris : la science à l'œuvre » paru aux éditions du Cherche Midi en 2022 à l'attention de tous.

Mais surtout, ils ont été au cœur d'une série documentaire de trois épisodes, produite par ZED (C. Le Goff) et diffusé sur Arte, « Notre-Dame de Paris : le chantier du siècle » suivie d'un quatrième opus « Les trésors enfouis de Notre-Dame » centré sur les fouilles réalisées par l'INRAP et décrivant la découverte du jubé et des cercueils de plomb. Tous supports combinés (diffusion en direct, plateforme de rediffusion, YouTube), ces documentaires ont cumulé 17 millions de vues, la première diffusion du triptyque en 2023 et du quatrième volet en 2024 ayant même battu des records d'audience. Leur succès a sans aucun doute

été facilité par un tournage au long cours mené dans un climat de grande confiance entre scientifiques, réalisateurs et producteurs. L'enthousiasme des spectateurs se résume à « *on est au cœur de la recherche, on comprend* » (propos rapporté par la productrice). Notons par ailleurs que certaines séquences du film de Jean-Jacques Annaud « Notre-Dame brûle » ont utilisé des données numériques fournies par le GT numérique. Enfin le chantier scientifique et ses acteurs ont participé à plusieurs expositions, parmi lesquelles « Notre-Dame de Paris : des bâtisseurs aux restaurateurs » à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine, « Capital Image » au Centre Pompidou, « Notre-Dame de Paris : au cœur du chantier » sous le parvis de Notre-Dame, ou encore les Journées Européennes du Patrimoine... À chaque fois, le succès fut au rendez-vous témoignant de l'attachement du public français au patrimoine et à tous les acteurs qui œuvrent à sa restauration et sa connaissance.

L'enthousiasme des spectateurs se résume à « on est au cœur de la recherche, on comprend. »



IMPACTS

Conceptuellement, l'impact de la recherche doit toujours se raisonner par rapport à un contrefactuel, i.e. les effets par rapport à un scénario sans la recherche.

L'analyse des impacts du chantier scientifique de Notre-Dame étant réalisée peu de temps après la fin de ce chantier, il est délicat d'avoir une vision objective de tous les impacts sociétaux. Aussi, nous distinguerons les impacts déjà observables ou avérés, les impacts initiés ou attendus et les impacts dont nous anticipons la réalisation ou espérés.

IMPACT SCIENTIFIQUE

STRUCTURATION DES SCIENCES DU PATRIMOINE ET RÉSEAU THÉMATIQUE MAESTRO (impact avéré et attendu)

De par son ampleur, le chantier a renforcé la structuration des sciences du patrimoine en tant que champ de recherche pluridisciplinaire. La mobilisation de près de 200 chercheurs, le financement de plus de 20 thèses, l'obtention de contrats spécifiques aux niveaux national et européen, et l'organisation collective autour de groupes de travail associant sciences humaines, ingénierie et sciences expérimentales, ont contribué à donner une efficacité accrue à ce domaine. Les travaux du chantier scientifique ont conduit à de nombreuses avancées (nouvelles méthodologies d'analyse des matériaux et des structures, captation de l'émotion patrimoniale, déploiement du numérique...) qui constituent une base de référence pour la structuration des sciences du patrimoine, attendue à l'échelle nationale et espérée à l'échelle internationale grâce à la mise en place de collaborations.

Cette structuration s'est concrétisée par la création du Réseau Thématique MAESTRO en 2025, regroupant la plupart des acteurs scientifiques du domaine. Au-delà des aspects purement scientifiques, ce réseau vise à faciliter l'accès des chercheurs aux chantiers patrimoniaux en France, et à développer des dispositifs d'intervention scientifique adaptés aux contraintes temporelles des restaurations. Cet impact est en cours de consolidation, avec un fort potentiel structurant et des conséquences tangibles pour les métiers de la restauration, si le réseau développe activement des collaborations durables avec les architectes, bureaux d'études, artisans et entreprises.

RENFORCEMENT DE LA COOPÉRATION ENTRE CNRS ET MINISTÈRE DE LA CULTURE (impact avéré) ET GOUVERNANCE INTERINSTITUTIONNELLE (impact avéré et attendu)

Enfin, le chantier a jeté les bases d'une gouvernance interinstitutionnelle renforcée entre le CNRS et le Ministère de la Culture, en lien avec les différentes institutions concernées par la restauration de Notre-Dame (EP-RNDP, DRAC, laboratoires du Ministère de la Culture). Cette coopération, mise en place rapidement après l'incendie, a permis d'expérimenter un cadre logistique, scientifique et juridique dans un contexte de crise. Si elle reste encore incomplète, avec quelques difficultés relevées concernant les lenteurs administratives, l'accès au chantier ou la répartition des responsabilités, son impact est néanmoins avéré pour les acteurs impliqués. Elle constitue ainsi une base pour améliorer les protocoles d'accès et d'intervention scientifique en cas de sinistre patrimonial.

RÔLE PIVOT DE LA DIMENSION NUMÉRIQUE DANS L'ANALYSE DES PATRIMOINES (impact avéré et attendu)

Le chantier a également permis de positionner la dimension numérique comme une composante transverse structurante de la recherche sur le patrimoine, en particulier grâce au développement d'une plateforme dédiée à la gestion, à l'archivage et à la visualisation de données 3D documentées. Cette plateforme ne se limite pas à la visualisation : elle permet l'exploration croisée de corpus multidimensionnels, l'ancrage spatial et temporel des observations, et l'intégration de couches sémantiques structurées, favorisant ainsi des analyses inédites à l'échelle d'un édifice. Ce rôle pivot est désormais reconnu par les différents acteurs, et pourrait à terme constituer un standard pour l'analyse, la documentation et l'archivage des données patrimoniales. Au-delà de ce projet, l'interopérabilité des outils et des méthodes développés ouvre la voie à leur transposition à d'autres contextes patrimoniaux, renforçant la portée nationale et internationale de cette démarche.

IMPACT CULTUREL

L'expérience du chantier scientifique de Notre-Dame associé à une restauration d'une telle ampleur fait déjà date comme référence internationale pour la gestion scientifique d'une crise patrimoniale, tant pour son impact sur la restauration et ses pratiques que pour son impact sur le public, en amplifiant l'intérêt de tous pour le patrimoine.

Comme mentionné par l'un des architectes interviewés, « sans le chantier scientifique, la restauration de Notre-Dame aurait eu lieu mais pas de la même façon ».

RESTAURATION DU PATRIMOINE

(impact attendu)

Aux dires de tous les acteurs, il y aura un avant et un après Notre-Dame pour la restauration des monuments historiques. Ce chantier a en effet amorcé une évolution des pratiques de restauration, qu'il s'agira de perpétuer dans le futur, par une approche associant mieux les scientifiques aux architectes, bureaux d'étude, restaurateurs et entreprises, du diagnostic à la phase de travaux, afin de mieux répondre aux défis d'ordre technique et économique, mais aussi aux défis liés aux changements globaux (y compris climatiques et environnementaux).

D'autre part, il s'agit maintenant de capitaliser sur cette expérience inédite pour mener une réflexion collective sur les doctrines de restauration du patrimoine et en particulier sur les notions de dernier état connu, de réemploi des matériaux, du beau et de l'utile (compromis entre esthétique, authenticité et durabilité), de réponse aux objectifs de développement durable, d'appropriation du patrimoine par tous. En résumé, adapter les principes de la restauration patrimoniale aux enjeux du 21^{ème} siècle pour éventuellement, à terme, réviser la charte de Cracovie.



Le chantier scientifique a engendré de nouvelles formes de narration et de conception du patrimoine, mêlant émotions individuelles, mémoire collective, science et restauration, y compris l'intrication entre savoir-faire ancestraux et innovations technologiques

ACCÈS DE TOUS À LA CULTURE PATRIMONIALE (impact avéré)

Le chantier scientifique de Notre-Dame a engendré de nouvelles formes de narration et de conception du patrimoine, mêlant émotions individuelles, mémoire collective, science et restauration, y compris l'intrication entre savoir-faire ancestraux et innovations technologiques, rôle central du numérique dans l'appropriation du fait patrimonial mais aussi dans l'archivage. Si la cathédrale restaurée et ses vestiges font l'objet de nombreuses manifestations culturelles, l'aventure humaine collective qui a présidé à la restauration de Notre-Dame et dont le chantier scientifique a produit les supports mémoriels analytiques, visuels et acoustiques, est devenue en elle-même un sujet patrimonial. Ainsi, les productions scientifiques dans le contexte du chantier de restauration ont étayé de multiples initiatives de communication qui permettent à un très large public l'accès à la culture patrimoniale, qu'il s'agisse d'expositions, documentaires, ouvrages, podcast, expériences immersives spatiales et acoustiques, conférences grand public et projet d'un futur musée dédié à Notre-Dame. Cet engouement pour le patrimoine et sa restauration se traduit également par le succès des chantiers médiévaux expérimentaux qui constituent des terrains expérimentaux de l'architecture médiévale, des savoir-faire et des approches scientifiques accessibles à tous.



IMPACT ENVIRONNEMENTAL (impact en partie avéré et en partie attendu)

La restauration d'ampleur de Notre-Dame a catalysé la réflexion sur des pratiques de restauration plus durables, faisant appel à des matériaux non seulement appropriés aux contraintes du patrimoine mais également plus respectueux de l'environnement.

Cela passe par le réemploi ou l'utilisation de matériaux plus écologiques, la mise en place de circuits courts d'approvisionnement et d'une gestion durable des ressources, ou encore la prise en compte de la pollution engendrée par certains matériaux.

Ainsi la restauration de la charpente et de la flèche en bois vert, conforme aux techniques d'origine, questionne l'ensemble de la filière bois sur des problématiques variées telles que la place de l'artisanat face à l'industrie (le bois vert doit être en partie équarri manuellement), le mode de gestion des forêts dans un contexte d'évolution des climats, l'usage mesuré de ressources locales ou de réemploi. Si le bois vert offre un avantage écologique évident puisqu'aucune étape de séchage ni de traitement n'est requise, il suppose que les pratiques sylvicoles soient adaptées et surtout anticipées.

Une utilisation plus régulière du bois vert dans les restaurations de monuments historiques (voire de bâtis neufs) nécessitera une réflexion conjointe des restaurateurs, des scientifiques spécialistes du bois mais aussi du climat, de l'Office National des Forêts, de France Bois Forêt (interprofession nationale de la filière forêt-bois) et des Charpentiers sans frontières qui a largement contribué à faire renaître ce savoir-faire. Les travaux scientifiques ont clairement indiqué que le réemploi des pierres à Notre-Dame était à exclure, tant les pierres des voûtes effondrées étaient fragilisées par l'incendie de la charpente. Fort heureusement, l'action concertée du GT Pierre et du BRGM a permis de déterminer précisément les caractéristiques des pierres utilisées à Notre-Dame, d'identifier de nouvelles carrières de même nature dans l'Oise et dans l'Aisne (les anciennes carrières de Paris étant fermées) et capables de subvenir aux besoins de la restauration de Notre-Dame, tant du point de vue qualitatif que quantitatif (1300 m³ de pierre étaient nécessaires !).

L'approvisionnement en circuit court a ainsi été possible, mais cela ne doit pas masquer le fait que la fermeture de nombreuses carrières en France (tant pour des raisons économiques qu'écologiques) risque, à l'avenir, de mettre en péril ce type d'approvisionnement et d'obliger les architectes et restaurateurs à importer des pierres de beaucoup plus loin. Là encore, la réflexion sur les matériaux pour la restauration nécessite de mettre en regard les contraintes patrimoniales de la restauration et la gestion durable des ressources.

Le GT Métal a certes permis de sécuriser l'utilisation du plomb en toiture et de produire les études permettant un suivi rigoureux du plomb de Notre-Dame post-incendie. Mais cela n'obère pas le fait que le plomb est un polluant et un toxique avéré. D'ailleurs, les plaques de plomb pour la toiture ont été importées de Grande-Bretagne où la réglementation de santé au travail est plus souple. Est-il raisonnable à terme de passer outre des réglementations européennes pour respecter à la lettre les recommandations de la charte de Venise/Cracovie ? Là encore, des éléments

et données scientifiques robustes et objectifs doivent permettre d'alimenter un débat nécessaire d'autant plus que, outre la toiture, l'art du vitrail ne peut se faire sans plomb. Personne ne comprendrait que les vitraux soient murés faute de pouvoir les restaurer ! Quelles mesures raisonnées et raisonnables proposer ?

Le chantier de Notre-Dame constitue donc une référence aussi du point de vue de l'impact environnemental de la restauration et des risques que le changement climatique et une gestion inadaptée des ressources font courir à la restauration du patrimoine. Autant de questions que les scientifiques ont participé à mettre au jour, scientifiques dont les compétences pluri- et inter-disciplinaires seront requises pour objectiver les débats futurs et permettre l'adaptation des doctrines et des normes en vigueur.

Le chantier de Notre-Dame constitue une référence aussi du point de vue de l'impact environnemental de la restauration et des risques que le changement climatique et une gestion inadaptée des ressources font courir à la restauration du patrimoine.



IMPACT SOCIAL

Le chantier scientifique de Notre-Dame a contribué à créer une dynamique positive en matière de formation et d'attractivité des métiers de la restauration patrimoniale.

L'ampleur et la complexité du chantier ont mis en évidence l'intérêt de renforcer les formations croisées, associant chercheurs, professionnels de terrain, architectes, entrepreneurs et artisans, pour faciliter les échanges et la compréhension mutuelle entre ces différents acteurs. Bien que ces formations croisées n'aient été expérimentées qu'à une échelle relativement limitée pendant le chantier, la dynamique amorcée pourrait favoriser leur développement à l'avenir.

FORMATION DES SCIENTIFIQUES EN SCIENCES DU PATRIMOINE (impact avéré et espéré)

Sur le plan scientifique, le chantier a permis de former plus de 20 docteurs dans des disciplines variées en lien avec les sciences du patrimoine (histoire de l'art, ingénierie, matériaux, numérique...). Cet impact sur la formation académique est avéré, avec des compétences acquises par des jeunes chercheurs qui pourront être mobilisées sur d'autres projets de restauration patrimoniale, renforçant ainsi le vivier d'experts en sciences du patrimoine.

Le chantier a également amorcé une réflexion sur l'importance de rapprocher davantage la formation académique des scientifiques des métiers opérationnels de la restauration patrimoniale. Des initiatives concrètes comme des stages en entreprises (chez des artisans, compagnons et bureaux d'études) sont suggérées pour permettre aux scientifiques de mieux appréhender les savoir-faire spécifiques ainsi que les contraintes opérationnelles d'un chantier. Si ces formations restent à organiser et à mettre en place, les recommandations issues des échanges pendant le chantier constituent une base solide pour leur intégration future.

INTERVENTION DES SCIENTIFIQUES DANS LES FORMATIONS PROFESSIONNELLES

(impact espéré)

Les scientifiques impliqués dans le chantier sont intervenus ponctuellement dans les cursus de formation initiale ou continue aux métiers du patrimoine (licences professionnelles, CFA, lycées professionnels, compagnonnage). Les acteurs du chantier ont suggéré de pérenniser ces interventions, notamment en renforçant les liens avec des groupements professionnels tels que le Groupement Français des Entreprises de Restauration des Monuments Historiques (GMH) ou la CAPEB. Les échanges réalisés sur le chantier ont également mis en évidence l'intérêt d'utiliser des outils pédagogiques innovants, comme la restitution virtuelle du geste technique ou du son, pour améliorer la formation des professionnels.

D'autre part, des échanges sous forme de tables rondes ou d'ateliers thématiques pour et avec les architectes des monuments historiques seraient appréciés. D'une façon plus générale, les architectes, les bureaux d'étude et l'Institut national du patrimoine ont souligné les insuffisances de la formation dispensée par l'École de Chaillot sur les aspects scientifique et d'ingénierie. Ils ont insisté sur la nécessité de mieux sensibiliser les futurs ACMH à ces approches, ainsi qu'à l'importance d'identifier et de mobiliser les expertises scientifiques qui pourraient être utiles à leurs projets.

ATTRACTIVITÉ DES MÉTIERS DU PATRIMOINE

(impact attendu et espéré)

Le chantier scientifique a indirectement contribué à valoriser les métiers liés à la restauration patrimoniale (charpentiers, tailleurs de pierre, ingénieurs spécialisés dans la maçonnerie...). En mettant en avant leur technicité, leur complémentarité avec le savoir académique et leur valeur culturelle, il a accru leur visibilité auprès du grand public et des jeunes générations. Certaines entreprises, en particulier celles intervenant sur les éléments structurels (maçonnerie, charpente), ont exprimé un intérêt marqué pour une réflexion partagée avec les scientifiques afin de développer de nouvelles approches, y compris pour le bâti neuf, et de valoriser leurs métiers auprès des instances éducatives et professionnelles. Enfin, la présentation de l'expérience du chantier scientifique de Notre-Dame dans les cursus de formations académiques permet d'accroître l'attractivité de certaines filières, comme la maçonnerie dans les formations d'ingénieur en génie civil.

IMPACT POLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

Le chantier scientifique de Notre-Dame a révélé de manière concrète l'importance de la prise en compte des apports scientifiques dans l'élaboration des politiques patrimoniales et réglementaires.

Par ses résultats scientifiques, mais aussi par les échanges qu'il a suscités, le chantier contribue à nourrir et à enrichir les réflexions sur l'évolution des politiques de conservation et des normes applicables aux monuments historiques.

ÉCLAIRER LES POLITIQUES DE CONSERVATION EN INTÉGRANT LA PERCEPTION CITOYENNE (impact attendu)

Le chantier scientifique a permis d'apporter un éclairage inédit sur les attentes et les perceptions des citoyens vis-à-vis de la restauration patrimoniale, notamment à travers les études portant sur les émotions collectives et les mobilisations sociales déclenchées par l'incendie de Notre-Dame. Ces analyses peuvent ainsi alimenter les réflexions institutionnelles (Ministère de la Culture, DRAC, Établissement Public chargé de la restauration) afin que les politiques de conservation patrimoniale tiennent davantage compte de la manière dont elles sont comprises et reçues par les différents publics. Cette dimension apparaît particulièrement pertinente pour orienter des projets sensibles comme la réhabilitation des abords de Notre-Dame, dans ses dimensions urbaines, culturelles et politiques, en lien notamment avec la Ville de Paris.



Le chantier scientifique a permis d'apporter un éclairage inédit sur les attentes et les perceptions des citoyens vis-à-vis de la restauration patrimoniale.

ÉVOLUTION DES NORMES DU BÂTI RELATIVES À L'UTILISATION DU BOIS VERT (impact attendu et espéré)

La restauration de la charpente et de la flèche de Notre-Dame en bois vert, conformément aux techniques d'origine, a mis en lumière des problématiques normatives liées à ce matériau, peu utilisé au cours des dernières décennies dans le patrimoine monumental. Ce choix, validé par les études scientifiques du chantier, questionne désormais les normes techniques, environnementales et réglementaires existantes, et invite à une adaptation de ces normes pour mieux prendre en compte les spécificités techniques du bois vert, notamment en ce qui concerne la durabilité des structures pendant la période critique de leur séchage. De plus, ce choix soulève la question essentielle de l'assurabilité des ouvrages, les normes actuelles imposant des contraintes difficiles à concilier avec les spécificités patrimoniales. Plusieurs acteurs institutionnels (Office National des Forêts, France Bois Forêt, Ministère de la Culture), mais aussi les assureurs et les organismes de normalisation, devront être sollicités pour engager cette réflexion normative, attendue dans les prochaines années. Ces évolutions, fondées sur les résultats scientifiques du chantier de Notre-Dame, pourraient également bénéficier à terme au bâti neuf.



La restauration de la charpente et de la flèche de Notre-Dame en bois vert, a mis en lumière des problématiques normatives liées à ce matériau, peu utilisé au cours des dernières décennies dans le patrimoine monumental

ÉVOLUTION DES NORMES D'USAGE DU PLOMB EN RESTAURATION DES MONUMENTS HISTORIQUES (impact espéré)

L'utilisation du plomb sur les monuments historiques, en particulier dans le cas emblématique de Notre-Dame, a suscité des débats importants sur les normes environnementales et sanitaires. Le chantier scientifique a permis d'approfondir les connaissances sur les impacts du plomb en termes de pollution et de santé publique, mais a aussi révélé la nécessité de clarifier les réglementations applicables à ce matériau, notamment sur le plan européen. Ces éléments scientifiques devront alimenter les réflexions institutionnelles sur la pertinence et les conditions d'utilisation du plomb dans la restauration patrimoniale, ce qui constitue un impact espéré par plusieurs parties prenantes du chantier (DRAC, Établissement Public chargé de la restauration, entreprises et scientifiques impliqués).

IMPACT ÉCONOMIQUE

REVENUS DES MÉDIATIONS PATRIMONIALES

(impact avéré)

Le chantier scientifique de Notre-Dame a donné lieu à de multiples productions de médiations patrimoniales (expositions, documentaires, livres, articles de presse...) qui ont attiré une foule de lecteurs, visiteurs, auditeurs, téléspectateurs... Par exemple, la série documentaire « Notre-Dame de Paris : le chantier du siècle » (ZED production, diffusé sur ARTE) a cumulé 17 millions de vues. Selon la base Europress, le nombre d'articles de presse mentionnant le chantier scientifique s'élève à 160, depuis le 15 avril 2019 jusqu'à aujourd'hui sachant que cette base de données contient 8183 titres de presse référencés. Ces productions ont donc généré des revenus pour les musées, producteurs, éditeurs et médias concernés, même si leur montant précis reste difficile à estimer.



Une action concertée des professionnels, des architectes, des ingénieurs et des scientifiques ne pourra qu'être utile pour convaincre du bien-fondé de la filière du bois vert et ainsi soutenir son développement futur.

LA FILIÈRE DU BOIS VERT POUR LA CONSTRUCTION (impact espéré)

La restauration de Notre-Dame de Paris aura permis de mettre en lumière les techniques de charpente en bois vert qui avaient quasiment disparu au XX^{ème} siècle. Dans un contexte de nécessité de développement durable mais aussi d'évolution du climat, le secteur de la construction, et en particulier la filière bois, interroge ses pratiques et ses sources d'approvisionnement. L'utilisation de bois vert en charpente, validée lors de la restauration de Notre-Dame, attire un nombre croissant de charpentiers, non seulement pour la restauration de bâtis historiques mais également pour le bâti neuf. Ce marché potentiel, dont le développement dépendra des pratiques sylvicoles mais aussi de l'évolution de la réglementation ne peut pas encore être chiffré. Néanmoins, une action concertée des professionnels, des architectes, des ingénieurs et des scientifiques ne pourra qu'être utile pour convaincre du bien-fondé de cette filière et ainsi soutenir son développement futur.

IMPACT SANITAIRE (impact avéré)

REVENUS DES MÉDIATIONS PATRIMONIALES (impact avéré)

Les données scientifiques sur la présence de plomb à Paris et dans le bassin de la Seine, son évolution au cours du temps (y compris avant et après l'incendie de Notre-Dame), accompagné de la détermination de la signature isotopique du plomb provenant de différentes sources (essence au plomb, Notre-Dame...) ont permis à la Ville de Paris de définir, en septembre 2019, un plan d'actions contre la pollution au plomb, dans la continuité de son Plan Paris Santé Environnement. Les études menées suite à l'incendie de Notre-Dame ont démontré l'importance non seulement de mesurer le taux de plomb dans l'air, au sol et dans les habitats, mais également d'identifier précisément l'origine du plomb afin de prendre des mesures adaptées et proportionnées, et de répondre précisément aux inquiétudes de la population. De plus, la Ville de Paris et l'Agence Régionale de Santé (ARS) d'Île-de-France assurent maintenant une vigilance particulière vis-à-vis de la présence de plomb dans les grands monuments historiques parisiens, en lien avec les institutions impliquées dans leur conservation et leur restauration.



Annexes

ANNEXE 1 : LISTE DES LABORATOIRES AYANT PARTICIPÉ AU CHANTIER SCIENTIFIQUE DE NOTRE-DAME (en jaune, les laboratoires sous tutelle CNRS)

GT	LABORATOIRES	TUTELLES	VILLE	NOMBRE DE SCIENTIFIQUES
ACOUSTIQUE	CNSMDP	CNSMDP	Paris	1
	Inst. Jean-Le-Rond d'Alembert	CNRS / Sorbonne Université	Paris	5
	IReMus	CNRS / Sorbonne Université	Paris	3
	MSH-UAR2000	CNRS / Université de Lyon	Lyon	3
	AASPE UMR7209	CNRS / MNHN	Paris	6
BOIS ET CHARPENTE	BBEES UMS3468	CNRS / MNHN	Paris	2
	Biogeco UMR1202	Inrae / Université de Bordeaux	Montpellier	1
	C2RMF	Ministère de la Culture	Paris	2
	CICRP	Ministère de la Culture / Ville de Marseille / Conseil Régional / Conseil Départemental	Montpellier	1
	Conservation départementale du Patrimoine	Département du Maine et Loire	Angers	1
	CR2P UMR7207	CNRS / Sorbonne Université / MNHN	Paris	1
	CRéAAH, UMR6566	CNRS / Université de Rennes	Rennes / Le Mans	5
	Dendrotech	Dendrotech	Rennes / Le Mans	1
	INRAP	INRAP	Paris	1
	Institut Blaise Pascal UMR6602	CNRS / Univ. Clermont Auvergne	Clermont-Ferrand	1
	IPGP UMR7154	IPGP / Univ Paris Cité / CNRS / Univ. Réunion / IGN	Paris	1
	IRHT	CNRS	Paris	1
	ISEM UMR5554	CNRS / Université de Montpellier / IRD	Montpellier	1
	LAMOP UMR8589	CNRS / Univ. Paris1 Panthéon S.	Paris	1
	LCE UMR6249	CNRS / Université de Franche-Comté	Besançon	4
	LEMTA UMR7563	CNRS / Université de Lorraine	Nancy	1
	LIEC UMR7360	CNRS / Université de Lorraine	Nancy	1
	LMC14	CNRS / CEA / IRD / IRSN / Ministère de la Culture	Gif s/Yvette	1
	LMGC UMR5508	CNRS / Université de Montpellier	Montpellier	2
	LRMH UAR3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	1

GT	LABORATOIRES	TUTELLES	VILLE	NOMBRE DE SCIENTIFIQUES
DÉCOR MONUMENTAL	LSCE UMR8212	CNRS / UVSQ / CEA	Gif s/Yvette	3
	METIS UMR7619	CNRS / Sorbonne Université / EPHE	Paris	3
	MONARIS, UMR8233	CNRS / Sorbonne Université	Paris	1
	Navier UMR8205	CNRS / Université Gustave Eiffel / ENPC	Champs s/Marne	1
	PIAF UMR547	Inrae / Université de Clermont / Auvergne	Clermont-Ferrand	1
	SILVA UMR1434	Inrae / Université de Lorraine / AgroParisTech	Nancy	3
	Université de Liège	Université de Liège	Liège	1
	Ausonius UMR 5607	CNRS / Univ. Bordeaux Montaigne / Ministère de la Culture		1
	Centre André Chastel	CNRS / Sorbonne Université / Ministère de la Culture	Paris	3
	CRMH Drac IdF	Ministère de la Culture	Paris	2
ÉMOTIONS ET MOBILISATIONS	EA Religion, Culture et Société	Institut Catholique de Paris	Paris	1
	Indépendants (Restaurateurs...)		Paris	1
	INP	Ministère de la Culture	Paris	1
	LRMH UAR3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	2
	Ministère de la Culture	Ministère de la Culture	Paris	1
	Musée de Cluny	Ministère de la Culture	Paris	1
	Musée du Louvre	Ministère de la Culture	Paris	1
	Musée Granet	Ville d'Aix-en-Provence	Aix-en-Provence	1
	Service des musées de France	Ministère de la Culture	Paris	1
	Université d'Alabama	Université d'Alabama	USA	1
MÉTAL	Université de Bamberg	Université de Bamberg	Bamberg	1
	Archives Nationales/IDPS	Univ. Sorbonne Paris Nord	Villetaneuse	1
	EA4100	Paris 1 Panthéon Sorbonne	Paris	1
	Héritages UMR9022	CNRS / CY Université / Ministère de la Culture	Cergy-Pontoise	8
	IDEAS UMR7307	CNRS / AMU	Aix-en-Provence	2
	IIAC Anthropologie politique UMR8177	CNRS / EHESS	Paris	1
	Institut d'études européennes	Université Paris 8	Saint-Denis	1
	Institut des sc. Soc du politique UMR7220	CNRS / Univ. Paris Saclay-ENS / Université Paris Nanterre	Gif s/Yvette	1
	LISST-CAS UMR5193	CNRS / Univ. J. Jaures Toulouse	Toulouse	1
	Museu nacional	Université fédérale de Rio de Janeiro	Brésil	1
MÉTAL	Service régional de l'Archéologie	Ministère de la Culture	Paris	1
	SOPHIAPOL EA3932	Université Paris Nanterre	Nanterre	1
	ARAR UMR5138	CNRS / Université de Lyon II	Lyon	1
	ArScAn UMR 7041	CNRS / Univ. Paris1 Panthéon S. / Université Paris Nanterre / Ministère de la Culture	Saint Denis	2
	CRBE UMR5300	CNRS / Université de Toulouse / Toulouse INP / IRD	Toulouse	1
	ICMPE UMR7182	CNRS / UPEC	Créteil	1
	IRAMAT UMR 7065	CNRS / Université d'Orléans	Gif s/Yvette / Orléans	2
	LCE UMR6249	CNRS / Université de Franche-Comté	Besançon	1
	LRMH UAR3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	2
	LSCE UMR8212	CNRS / UVSQ / CEA	Gif s/Yvette	2
METIS UMR7619	CNRS / Sorbonne Université / EPHE	Paris	1	

GT	LABORATOIRES	TUTELLES	VILLE	NOMBRE DE SCIENTIFIQUES	
MÉTAL	NIMBE UMR3685	CNRS / CEA	Gif s/Yvette	2	
	TRACES UMR5608	CNRS / Univ. Toulouse II J. Jaures / Ministère de la Culture	Toulouse	1	
	TRAME UR4284	Université de Picardie JV	Amiens	1	
NUMÉRIQUE	Archeoscience UMR6034	CNRS / Univ. Bordeaux Montaigne / Univ. de Bordeaux / EPHE	Bordeaux	3	
	C2RMF	Ministère de la Culture	Paris	2	
	Centre André Chastel Plemo3D	CNRS / Sorbonne Université / Ministère de la Culture	Paris	5	
	CITERES UMR 7324	CNRS / Université de Tour / INSA	Tours	3	
	ETIS	CNRS / CY Université / ENSEA	Cergy-Pontoise	1	
	LASTIG	Université Gustave Eiffel / IGN-ENSG / EIVP	Champs s/Marne	2	
	LRMH UAR3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	3	
	LS2N	CNRS / Université de Nantes / INRIA / IMT-Atlantique / Centrale Nantes	Nantes	1	
	MAP UPR2002	CNRS	Marseille	10	
	MIS UR4290	Université de Picardie JV	Amiens	1	
	MOM Fédération de Recherche Sociétés anciennes	CNRS / Universités de Lyon, Saint Etienne, AMU	Lyon	1	
	TRAME UR4284	Université de Picardie JV	Amiens	1	
	ZEMAS	Université de Bamberg	Bamberg	1	
	PIERRE	ArScAn UMR 7041	CNRS / Univ. Paris1 Panthéon S. / Univ. Paris Nanterre / Ministère de la Culture	Nanterre	
		ARTHEHIS UMR6298	CNRS / Université de Bourgogne / Ministère de la Culture	Auxerre	1
Ausonius UMR 5607		CNRS / Univ. Bordeaux Montaigne / Ministère de la Culture	Bordeaux	2	
Centre André Chastel		CNRS / Sorbonne Université / Ministère de la Culture	Paris	1	
CHEC EA1001		Univ Clermont Auvergne	Clermont-Ferrand	1	
CRBC EA4451		UBO	Brest	1	
HisCant EA1132		Université de Lorraine	Nancy	1	
Institut J. Lamour UMR 7198		CNRS / Université de Lorraine	Nancy	2	
IRHIS UMR8529		CNRS / Université de Lille	Villeneuve d'Ascq	1	
LA3M UMR7298		CNRS / AMU	Aix-en-Provence	2	
LaMé EA7494		Université d'Orléans	Orléans	2	
LAMOP UMR8589		CNRS / Univ. Paris1 Panthéon S. / Univ. Paris Nanterre / Ministère de la Culture	Paris	2	
LISA UMR 7583		CNRS / UPEC / Univ. Paris Cité	Créteil	1	
LRMH UAR3224		CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	3	
METIS UMR7619		CNRS / Sorbonne Université / EPHE	Paris	1	
Université de Bamberg		Université de Bamberg	Bamberg	1	
Université de Cottbus		Université de Cottbus	Senftenberg	1	
Ville de Paris	Ville de Paris	Paris	1		
STRUCTURES	CEGE	Univ. College London	Londres	2	
	GC2D EA 3178	Université de Limoges	Egletons	4	
	GSA	ENSA Paris Malaquais	Paris	2	
	I2M UMR5295	CNRS / Univ. Bordeaux / Arts et Métiers / Bordeaux INP	Bordeaux	7	
	Institut Blaise Pascal UMR6602	CNRS / Univ. Clermont Auvergne	Clermont-Ferrand	2	

GT	LABORATOIRES	TUTELLES	VILLE	NOMBRE DE SCIENTIFIQUES
STRUCTURES	LGE EA4508	Université Gustave Eiffel	Noisy le Grand	2
	LMC2 EA7427	Université Lyon 1	Lyon	2
	LMDC EA3027	Université de Toulouse / INSA	Toulouse	2
	LMGC UMR5508	CNRS / Université de Montpellier	Montpellier	3
	LRMH UAR3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Champs s/Marne	1
VERRE	Navier UMR8205	CNRS / Université Gustave Eiffel / ENPC	Champs s/Marne	3
	CRC LRMH UAR 3224	CNRS / MNHN / Ministère de la Culture	Paris	5
	C2RMF	Ministère de la Culture	Paris	3
	Centre André Chastel	CNRS / Sorbonne Université / Ministère de la Culture	Paris	4
	IMPIC	CNRS / Sorbonne Université / MNHN	Paris	2
	LGE EA4508	Université Gustave Eiffel	Marne la Vallée	2
	LISA UMR 7583	CNRS / UPEC / Univ Paris Cité	Créteil	2
	Synchrotron Soleil	CNRS / CEA	Saint Aubin	1

ANNEXE 2 : RÉFÉRENCES SCIENTIFIQUES COMPLÉMENTAIRES

GT STRUCTURE

Comportement mécanique des maçonneries pierre et aux aspects thermomécaniques des matériaux constitutifs des maçonneries

A. Sellier, G. Casaux-Ginestet, L. Buffo-Lacarrière, and X. Bourbon, "Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing. Part I: Constitutive laws," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 97, no. 0, pp. 148–167, Jan.2013.

F. Dubois, M. Jean, M. Renouf, R. Mozul, A. Martin, M. Bagnéris. LMGC90, in 10^{ème} Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2011. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00596875/document>

Bisoffi-Sauve, M., Morel, S., Dubois, F., 2019. Modelling mixed mode fracture of mortar joints in masonry buildings. *Engineering Structures* 182, 316–330.

Parent, T., Domede, N., Sellier, A., 2017. Multi-Scale Mechanical Behavior of a Gothic Monument Composed of Ashlar Masonry. Application to the Design of a Reinforcement Technique. *International Journal of Architectural Heritage* 11, 399–414. <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1238970>

Parent, T., 2015. Méthodologie de diagnostic de structures maçonnées anciennes (PhD). Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Terrade, B., Colas, A.S., Garnier, D., 2018. Upper bound limit analysis of masonry retaining walls using PIV velocity fields. *Meccanica* 53(7), 1661-1672.

Lacanette, D., Mindeguia, J.-C., Brodard, A., Ferrier, C., Guibert, P., Leblanc, J.-C., Malaurent, P., Siriex, C., 2017. Simulation of an experimental fire in an underground limestone quarry for the study of Paleolithic fires. *International Journal of Thermal Sciences* 120, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.021>

Salmon F, Lacanette D, Mindeguia J-C, et al. Localized fire in a gallery: Model development and validation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;139:144-159. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.025>

Brocato, M., Mondardini, L. 2012. A new type of stone dome based on Abeille's bond. *International Journal of Solids and Structures* 49, 1786–1801 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.03.036>

Brocato, M., Deleporte, W., Mondardini, L., Tanguy, J.-E., 2014. A proposal for a new type of prefabricated stone wall. *International Journal of Space Structures* 29(2), 97–112.

Brocato, M., Mondardini, L., 2015. Parametric analysis of structures from flat vaults to reciprocal grids. *International Journal of Solids and Structures* 54, 50–65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.11.007>

V. Venzal, "Modélisation discrète du comportement mécanique des ouvrages maçonnés en pierre. Aspects expérimentaux - Analyse énergétique", thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux (2020).

V. Venzal, S. Morel, T. Parent, F. Dubois (2020). Frictional Cohesive Zone Model for quasi-brittle fracture: Mixed-mode and coupling between cohesive and frictional behaviors. *International Journal of Solids and Structures* 198, 17-30, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.04.023>.

Peng, S., 2020. Advance on Non-Destructive Evaluation methodologies for the material characterization and damage monitoring of masonry structures (These dedoctorat). Bordeaux.

Comportement hygro-mécanique du bois et des charpentes traditionnelles

Louisa Loulou. Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 2013.

Marie Bonnet. Analyse multi-échelle du comportement hygromécanique du bois : Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne. Matériaux. Thèse de doctorat de Université Paris-Est, 2017.

Leila Rostom. Vieillissement du bois par des méthodes accélérées : effets des évolutions chimiques et physiques sur les propriétés hygro-mécaniques lors de traitements modérés. Thèse de doctorat de Université Paris-Est, 2021.

Sandine Bardet, Sabine Caré, Cédric Montero, Denis Courtier Murias, Présentation d'un projet PEPS CNRS : GREENWOOD. 7^{èmes} journées du GDR 3544 « Sciences du bois », Nov 2018 Cluny, France.

Sandrine Bardet, Sabine Caré. Projet GreenWood : Utilisation du bois vert dans la construction : Effet du séchage sur les propriétés rhéologiques et hydriques. Colloque de restitution des peeps retenus : Objectif développement durable : L'ingénierie se met au vert, Jul 2019, Paris, France. (hal-02272733)

Cointe A., Castéra P., Morlier P., Galimard Ph. 2007. Diagnosis and monitoring of timber buildings of cultural heritage. *Structural Safety*, 29 (4): 337-348.

ANR EFEUR5, Comportements structurels des Essences de bois Feuillus français en vue de leur meilleure intégration aux EURocodes 5 — EFEUR5, <https://anr.fr/Projet-ANR-15-CE08-0027>.

MAURIN E., GALIMARD P., DUMAIL J.-F. : « L'annexe de la bibliothèque du palais du Luxembourg, Paris VI^e. Les premiers résultats du suivi des mouvements de la charpente », Monumental, 2017, semestriel 1, p. 36-39.

MAURIN E., GALIMARD P., « Diagnosis of cultural heritage wooden structures: two case studies », Multidisciplinary conservation: a holistic view for historic interiors: joint interim meeting of five ICOM-CC working groups (Leather and Related Materials, Murals, Stone and Rock Art, Sculpture, Polychromy and Architectural Decoration, Textiles, Wood, Furniture and Lacquer), Rome 23-26 March 2010 / International council of museums

Sorin, Edouard. (2018). Fissuration en mode mixte dans le bois : diagnostic et évaluation des méthodes de renforcement local. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux.

Moutou Pitti Rostand, Frédéric Dubois, Nicolas Sauvat, Eric Fournely, Strain analysis in dried green wood: Experimentation and modelling approaches, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 105, 2013, Pages 182-199, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.04.002>.

Varnier, 2019. Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus : des sciences du bois à l'ingénierie, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

T.A. Nguyen, N. Angellier, S. Caré, L. Ulmet, F. Dubois, 2017. Numerical and experimental approaches to characterize the mass transfer process in wood elements, *Wood Science and Technology*, 51(4), 811 — 830, <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0898-5>

S.E. Hamdi, R. Moutou Pitti, F. Dubois, 2017. Temperature variation effect on crack growth in orthotropic medium: Finite element formulation for the viscoelastic behavior in thermal cracked wood-based materials, *International Journal of Solids and Structures*, 115-116, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.09.019>

N. Angellier, F. Dubois, R. Moutou Pitti, M. Diakhaté, R.S. Adjovi Loko, 2017. Influence of hygrothermal effects in the fracture process in wood under creep loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 177, 153-166, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.009>

S. El Kabir, 2018. Modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique des milieux élastiques fissurés, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

D. Medjelekh, 2015. Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscoPIques, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges

J. Colmars, F. Dubois, J. Gril, 2014. One-dimensional discrete formulation of a hygrolock model for wood hygromechanics, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 18(1), 309-328, <https://doi.org/10.1007/s11043-013-9229-x>

T.A. Nguyen, 2014. Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscoPIques dans le bois, Thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

F. Dubois, J.M. Husson, N. Sauvat, N. Manfoumbi, 2012. Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4), 439-460, <http://doi.org/10.1007/s11043-012-9171-3>

GT BOIS

LAMBERT G. 1996. — Recherche de signaux anthropiques dans les séries dendrochronologiques du Moyen Age. Exemple des séquences de Charavines-Colletières, in COLARDELLE M. (ed.), *L'homme et la nature au Moyen Âge: paléoenvironnement des sociétés occidentales: actes du V^e Congrès international d'archéologie médiévale tenu à Grenoble, France, 6-9 octobre 1993* (Société d'archéologie médiévale), Paris, Editions Errance, p. 143—152. (Archéologie aujourd'hui).

BEPOIX S. & RICHARD H. 2019. — *La forêt au Moyen âge*. Paris, les Belles lettres.

GIRARDCLOS O., DUFRAISSE A., DUPOUEY J.-L., COUBRAY S., RUELLE J. & RATHGEBER C.B.K. 2018. — Improving identification of coppiced and seeded trees in past woodland management by comparing growth and wood anatomy of living sessile oaks (*Quercus petraea*). *Quaternary International* 463: 219—231. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.015>

HUNOT J.-Y. 2004. — L'évolution de la charpente de comble en Anjou : XII^e - XVIII^e siècles. *Revue archéologique de l'ouest* 21 (1): 225—245. <https://doi.org/10.3406/rao.2004.1180>

HUNOT J.-Y. 2010. — Le bois dans la construction : Charpentes et vantaux, XII^e-XIII^e siècles in DORE J. & BENGEL S. (eds.), *Strasbourg, la grâce d'une cathédrale*. Strasbourg, Nuée Bleue.

HUNOT J.-Y. 2022. — La charpente de comble, un élément incontournable pour l'histoire des édifices anciens, in SAPIN C., BULLY S., BIZRI M. & HENRION F. (eds.), *Archéologie du bâti. Aujourd'hui et demain*. Dijon, ARTEHIS Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.artehis.28607>

FEUILLAT F., DUPOUEY J.-L., SCIAMA D. & KELLER R. 1997. — A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy. *Can. J. For. Res* 27: 343—351

PONTON S., DUPOUEY J.-L., BRÉDA N., FEUILLAT F., BODÉNÈS C. & DREYER E. 2001. — Carbon isotope discrimination and wood anatomy variations in mixed stands of *Quercus robur* and *Quercus petraea*: Carbon isotope discrimination and wood anatomy in oaks. *Plant, Cell & Environment* 24 (8): 861—868. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00733.x>

DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., LAFFITE J.D. & MOARES C. 2002. — Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83 (11): 2978—2984. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2978:IOPLU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2978:IOPLU]2.0.CO;2)

DURAND M., ROSE C., DUPOUEY J.-L., LEGOUT A. & PONTON S. 2020. — Do tree rings record changes in soil fertility? Results from a *Quercus petraea* fertilization trial. *Science of The Total Environment* 712: 136148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136148> DECOCQ G., DUPOUEY J.-L. & BERGES L. 2021. — Dynamiques forestières à l'ère anthropocène : mise au point sémantique et proposition de définitions écologiques. *Revue forestière française* 73 (1): 21—52. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.4993>

BATON F., NGUYEN TU T.T., DERENNE S., DELORME A., DELARUE F. & DUFRAISSE A. 2017. — Tree-ring $\delta^{13}C$ of archeological charcoals as indicator of past climatic seasonality. A case study from the Neolithic settlements of Lake Chalain (Jura, France). *Quaternary International* 457: 50—59. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.015>

DUFRAISSE A., COUBRAY S., GIRARDCLOS O., NOCUS N., LEMOINE M., DUPOUEY J.-L. & MARGUERIE D. 2018. — Anthraco-typology as a key approach to past firewood exploitation and woodland management reconstructions. Dendrological reference dataset modelling with dendro-anthracological tools. *Quaternary International* 463: 232—249. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.065>

DUFRAISSE A., COUBRAY S., GIRARDCLOS O., DUPIN A. & LEMOINE M. 2018. — Contribution of tyloses quantification in earlywood oak vessels to archaeological charcoal analyses: Estimation of a minimum age and influences of physiological and environmental factors. *Quaternary International* 463: 250—257. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.070>

DUFRAISSE A., COUBRAY S., PICORNELL-GELABERT L., ALCOLEA M., GIRARDCLOS O., DELARUE F. & NGUYEN TU T.-T. 2022. — Taming Trees, Shaping Forests, and Managing Woodlands as Resources for Understanding Past Societies. Contributions and Current Limits of Dendro-Anthracology and Anthraco-Isotopy. *Frontiers in Ecology and Evolution* 10: 823968. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.823968>

DAUX V. 2013. — Reconstruction du climat à partir de la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des cernes d'arbres. *La Météorologie* 8 (80): 14—22. <https://doi.org/10.4267/2042/48791>

DAUX V., MICHELOT-ANTALIK A., LAVERGNE A., PIERRE M., STIEVENARD M., BRÉDA N. & DAMESIN C. 2018. — Comparisons of the Performance of $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ of *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris*, and *Quercus petraea* in the Record of Past Climate Variations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123 (4): 1145—1160. <https://doi.org/10.1002/2017JG004203>

SAVARD M.M. & DAUX V. 2020. — An overview on isotopic divergences — causes for instability of tree-ring isotopes and climate correlations. *Climate of the Past* 16 (4): 1223—1243. <https://doi.org/10.5194/cp-16-1223-2020>

PAUL A., BALESDENT J. & HATTÉ C. 2020. — ^{13}C - ^{14}C relations reveal that soil ^{13}C -depth gradient is linked to historical changes in vegetation ^{13}C . *Plant and Soil* 447 (1—2): 305—317. <https://doi.org/10.1007/s1104-019-04384-4>

HATTÉ C., ZAZZO A. & SELOSSE M. 2020. — The radiocarbon age of mycoheterotrophic plants. *New Phytologist* 227 (5): 1284—1288. <https://doi.org/10.1111/nph.16637>

GT ACOUSTIQUE

- B. N. Postma and B. F. G. Katz, "Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralizations," *J Acoust Soc Am*, vol. 140, pp. 4326–4337, Dec. 2016, <https://doi.org/10.1121/1.4971422>.
- B. N. Postma and B. F. G. Katz, "Correction method for averaging slowly time-variant room impulse response measurements," *J Acoust Soc Am*, vol. 140, pp. EL38–43, July 2016, <https://doi.org/10.1121/1.4955006>.
- B. N. Postma and B. F. G. Katz, "Creation and calibration method of virtual acoustic models for historic auralizations," *Virtual Reality*, vol. 19, no. SI: Spatial Sound, pp. 161–180, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10055-015-0275-3>.
- B. F. G. Katz, B. Postma, D. Thery, D. Poirier-Quinot, and P. Luizard, "Objective and perceptive evaluations of high-resolution room acoustic simulations and auralizations," in *Euronoise*, (Crete), pp. 2107–2114, May 2018.
- B. N. Postma, D. Poirier-Quinot, J. Meyer, and B. F. G. Katz, "Virtual reality performance auralization in a calibrated model of Notre-Dame Cathedral," in *Euroregio*, (Porto), pp. 6:1–10, June 2016.
- B. N. Postma and B. F. G. Katz, "Acoustics of Notre-Dame Cathedral de Paris," in *Intl Cong on Acoustics (ICA)*, (Buenos Aires), pp. 0269:1–10, Sept. 2016.
- B. F. Katz, B. N. Postma, D. Poirier-Quinot, and J. Meyer, "Experience with a virtual reality auralization of Notre-Dame Cathedral," in *Meeting of Acoustical Society of America*, vol. 141, (Boston), p. 3454, 2017.
- B. F. G. Katz, "International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004," *Applied Research Letters Online*, vol. 5, pp. 158–164, 2004, <https://doi.org/10.1121/1.1758239>.
- B. F. G. Katz, Y. Jurkiewicz, T. Wulfrank, G. Parsehian, T. Scelo, and H. Marshall, "La Philharmonie de Paris - Acoustic scale model study," in *Intl Conf Auditorium Acoustics*, vol. 37, (Paris), pp. 431–438, Institute of Acoustics, Oct. 2015.
- B. F. G. Katz, M. Noisternig, and O. Delarozière, "Scale model auralization for art science and music: The Stupaphonic experiment," in *EAA Joint Symp on Auralization and Ambisonics*, (Berlin), pp. 14–19, 3-5 April 2014, <https://doi.org/10.14279/depositonce-4>.
- P. Luizard, M. Otani, J. Botts, L. Savioja, and B. F. G. Katz, "Comparison of sound field measurements and predictions in coupled volumes between numerical methods and scale model measurements," in *Proc of Meetings on Acoustics*, vol. 19, (Montreal), pp. 015114:1–9, June 2013, <https://doi.org/10.1121/1.4799138>.
- N. Mariette and B. F. G. Katz, "SoundDelta - Largescale, multi-user audio augmented reality," in *EAA Symp. on Auralization*, (Espoo), pp. 37–42, 2009.

ANNEXE 3 : LES TRAVAUX À VOCATION PUREMENT SCIENTIFIQUE

Au-delà des préoccupations immédiates du chantier, l'incendie de 2019 a suscité des recherches fondamentales dans divers domaines des sciences du patrimoine. Certaines ciblent plus directement Notre-Dame, tandis que d'autres visent à approfondir notre compréhension de la construction gothique, des ressources médiévales, de l'environnement, de la sacralité attachée aux monuments et des perspectives offertes par les humanités numériques.

CHRONOLOGIE DE LA CONSTRUCTION DE NOTRE-DAME ET HISTOIRE DE LA CONSTRUCTION

Plusieurs groupes de travail ont exploité l'accès exceptionnel offert par le chantier de restauration pour réaliser des relevés manuels depuis les échafaudages, des scans laser et des prélèvements de pierre et de bois. Ainsi, les travaux d'archéologie du bâti menés par le GT Pierre, complétés par les analyses dendrochronologiques du GT Bois, ont conduit à réviser la chronologie précise du chantier médiéval. Les relevés en haute définition ont porté sur différentes zones de la cathédrale, dont la nef et le chevet. Combinées à des analyses physico-chimiques des pierres et du bois, ces mesures ont permis d'identifier des repères chronologiques très précis, à l'année près :

par exemple, un tirant en bois au niveau du chevet a pu être daté de l'année 1171). Il en résulte que le chantier gothique a débuté plus tôt qu'on ne le pensait jusqu'alors.

Les résultats fournissent aussi des informations sur la séquence de la construction et sur les choix opérés par les maîtres d'œuvre. Les relevés ont par exemple permis de mieux saisir l'enchaînement de la construction des travées et la façon dont les bâtisseurs ont calibré la géométrie de la nef et du chœur, adapté les arcs-boutants, ou anticipé certains renforts. Ces études confirment la grande complexité du chantier de Notre-Dame : la documentation maintenant disponible (photogrammétrie, scans, repères de datation dendrochronologique) apporte un regard neuf sur la succession des phases de construction et sur les facteurs qui ont influencé les bâtisseurs (choix des matériaux, contraintes temporelles, innovations structurelles).

CONNAISSANCE DE L'ARCHITECTURE GOTHIQUE

Plusieurs groupes de travail (GT Pierre, GT Structure, GT Décors monumentaux) ont profité de l'accès sans précédent aux zones hautes de la cathédrale, ainsi que de la grande masse de données recueillies (relevés laser et photogramétriques, prises de vues par drone, etc.), pour revisiter en détail les principes de l'architecture gothique mise en œuvre à Notre-Dame. Les équipes ont examiné la structure des voûtes (morphologie, épaisseurs, courbures), la logique des appuis et des arcs-boutants, ou encore la présence, parfois insoupçonnée, de traces de polychromie dans les parties supérieures de la cathédrale.

Grâce à ces relevés numériques très denses, les scientifiques se sont intéressés à la façon dont la quête de légèreté et de luminosité propre à l'architecture gothique s'est traduite par des ajustements d'épaisseur ou par le recours à des arcs très élancés. Les approches structurelles ont permis de reconstituer la distribution des poussées et l'importance des renforts.

Ces études ont débouché sur un colloque en fin d'année 2023, publié en décembre 2024. Elles ont également nourri une réflexion plus large dans le cadre du projet de l'ANR ALTIOR (2023–2026), portée notamment par des membres du GT Pierre, qui confronte Notre-Dame à d'autres cathédrales gothiques telles que Sens, Chartres, Bourges ou Amiens.

Il s'agit d'étudier la « course à la hauteur » en France aux XII^e et XIII^e siècles, c'est-à-dire comment les architectes de l'époque gothique ont pu élever toujours davantage les voûtes, tout en préservant la stabilité de l'ensemble. Les questionnements portent sur l'équilibre entre innovation technique (nouveaux types d'arcs, maçonneries plus minces) et volonté esthétique et liturgique de dégager de vastes espaces intérieurs (développement de la verticalité, symbolique de l'élévation). L'étude de Notre-Dame contribue ainsi à mieux comprendre sa place dans l'aventure gothique et comment la volonté d'ascension spirituelle s'est concrétisée dans la réalité matérielle des chantiers médiévaux.

PROVENANCE DES MATÉRIAUX (CARTOGRAPHIE, APPROVISIONNEMENT)

Les recherches menées par plusieurs groupes de travail (GT Pierre, GT Bois, GT Métal) ont permis d'approfondir la question de l'approvisionnement en pierre, bois et métal mobilisés au Moyen-Âge pour la construction de Notre-Dame. S'appuyant sur des études d'archives, des analyses physico-chimiques et des approches isotopiques, il a été possible de localiser avec précision les sites d'origine de ces différents matériaux.

Ainsi, le GT Pierre a identifié plusieurs types de roches issues de carrières de l'Île-de-France, révélant l'importance de la logistique nécessaire pour convoyer des blocs parfois très lourds jusqu'au chantier à Paris. Le GT Bois, grâce à la dendrochronologie et aux analyses isotopiques, a mis en évidence un réseau d'approvisionnement plus étendu qu'on ne l'imaginait, regroupant des forêts relativement proches de Paris et des zones plus éloignées. Ces études ouvrent des perspectives à la fois sur l'histoire de la gestion ■■■

■■■ forestière (futaies, types de sylviculture) et sur la logistique mise en œuvre (flottage sur la Seine, transport terrestre, coupe sélective de jeunes chênes, etc.). Quant au GT Métal, il a procédé à des caractérisations métallographiques et chimiques (essais mécaniques, signature isotopique) pour évaluer l'origine du plomb et du fer (agrafes, attaches, scellements, décors, tables de couverture). Les résultats montrent l'existence de plusieurs sources géographiques, locales ou plus éloignées, et confirment le recours à du métal réemployé.

Dans l'ensemble, cette cartographie des ressources et des flux met en lumière la capacité d'organisation dont disposaient les maîtres d'œuvre pour coordonner un chantier d'une telle ampleur. Dans le prolongement de ces études, plusieurs équipes envisagent de comparer les circuits de Notre-Dame à ceux d'autres cathédrales gothiques, afin de mieux comprendre les dynamiques économiques, les contraintes environnementales et les stratégies de construction qui ont accompagné l'essor architectural des XII^e et XIII^e siècles.

BOIS ET CLIMAT

Les chênes utilisés pour les charpentes de Notre-Dame, précisément datés des XII^e et XIII^e siècles, constituent de véritables archives des conditions climatiques médiévales. Le GT Bois a analysé en détail la structure des cernes de croissance ainsi que leur composition isotopique, ce qui a permis d'identifier des épisodes climatiques extrêmes tels que des sécheresses prolongées ou des périodes de froid intense. Ces résultats apportent une contribution importante à la climatologie historique, en renseignant sur les variations du climat dans la période dite de « l'anomalie climatique médiévale ».

Ces recherches s'inscrivent dans le cadre du projet ANR CASIMODO, porté par des membres du GT Bois. Elles permettent également de mieux comprendre les conséquences des conditions environnementales sur la croissance des arbres et sur la qualité du bois utilisé pour la construction de Notre-Dame. Elles apportent ainsi un éclairage nouveau

sur les interactions entre fluctuations climatiques et exploitation des ressources forestières médiévales.

De manière générale, l'étude de la résilience des chênes du Bassin parisien face aux successions d'événements climatiques extrêmes (sécheresse et gel) peut également alimenter la réflexion actuelle sur la gestion forestière, avec un potentiel retour de ces résultats vers les gestionnaires forestiers d'aujourd'hui.

INTÉGRATION DES BOIS DE NOTRE-DAME DANS LA COURBE DE CALIBRATION INTERNATIONALE DU RADIOCARBONE

L'étude des bois de Notre-Dame a ouvert une opportunité unique pour affiner les modèles de datation au radiocarbone à l'échelle internationale. Le GT Bois a conduit un programme d'intercomparaison des mesures radiocarbone réalisées par trois de ses laboratoires (LSCE, LMC14, C2RMF) sur les échantillons de bois médiévaux prélevés dans la cathédrale. Ces travaux ont nécessité la mise au point de protocoles permettant d'extraire la cellulose du bois sans altérer leur teneur en carbone 14, garantissant ainsi une datation la plus précise possible. Quatre protocoles ont été testés sur des échantillons présentant des teneurs en radiocarbone différentes, et deux d'entre eux ont déjà été validés, ce qui garantit leur fiabilité pour une utilisation à grande échelle.

L'objectif à terme est d'intégrer ces données dans la courbe de calibration internationale du radiocarbone, qui sert de référence pour affiner les datations en archéologie et en paléoclimatologie. Les bois de Notre-Dame, précisément datés par dendrochronologie et exposés à des conditions environnementales bien documentées, constituent ainsi un jalon essentiel pour améliorer la calibration des âges radiocarbone et affiner la compréhension des variations du carbone 14 à travers le temps.

ANNEXE 4 : LISTE DES PERSONNES INTERVIEWÉES AU COURS DE CETTE ÉTUDE

ENTRETIENS AVEC LES ACTEURS SCIENTIFIQUES

PERSONNES INTERROGÉES	FONCTION
Martine Regert	Coordinatrice CNRS
Philippe Dillmann	Coordinateur CNRS
Aline Magnien	Coordinatrice Ministère de la Culture et directrice LRMH
Pascal Liévaux	Coordinateur Ministère de la Culture et directrice LRMH
Alexa Dufraisse	Coordinatrice GT Bois
Yves Gallet	Coordinateur GT Métal
Maxime L'Héritier	Coordinateur GT Pierre
Claudine Loisel	Coordinatrice GT Verre et Vitraux
Dany Sandron	Coordinateur GT Décor monumental
Stéphane Morel et le GT Structure	Coordinateur GT Structure
Livio de Luca	Coordinateur GT Numérique
Mylene Pardoën et Brian Katz	Coordinateurs GT Acoustique
Claudie Voisenat	Coordinatrice GT Émotions et Mobilisations

ENTRETIENS AVEC LES ACTEURS NON SCIENTIFIQUES

PERSONNES INTERROGÉES	FONCTION
Jonathan Truillet	EP-RNDP adjoint de la directrice générale déléguée
Pascal Prunet	Architecte en Chef des Monuments Historiques
Rémi Fromont	Architecte en Chef des Monuments Historiques
Charles Personnaz	Directeur de l'Institut National du Patrimoine
Carlo Blasi	Bureau d'études Studio Comes
Matthias Fantin	Bureau d'études Bestrema
Valéry Ossent	Chantier Médiéval de Guyenne
Loïc Desmonts	Entreprise Desmonts (Charpente)
Philippe Giraud	Atelier de la Pierre
Christine Le Goff	ZED Production



3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
01 44 96 40 00
www.cnrs.fr

