



Chimie et Notre-Dame de Paris

Sophie Ayrault
Richard Boyer
Philippe Dillmann
Alexa Dufraisse
Rémi Fromont
Jean-Louis Georgelin
Julien Le Bras
Maxime L'Héritier
Claudine Loisel
Aline Magnien
Witold Nowik
Marie Parant-Andaloro
Pascal Prunet
Barbara Trichereau
Véronique Vergès-Belmin



*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et Notre-Dame de Paris

Ce volume fait le point des travaux scientifiques du chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris à la fin de l'année 2021.

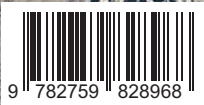
Peu d'événements ont suscité autant d'émotions que ce grand chantier consécutif à l'incendie du 15 avril 2019.

Les questions à examiner vont alors de la caractérisation des dommages exercés par l'incendie sur l'environnement parisien (pollution des rues et des écoles due aux rejets du plomb des toitures) aux diagnostics des dommages aux matériaux, à la sélection des meilleures techniques à employer pour les différents chantiers. Les bois des charpentes, la corrosion des maçonneries, l'état des statues en cuivre de la flèche, les dépôts sur les vitraux des chapelles et les peintures ... ont alors été soigneusement analysés.

Toutes ces études ont été confiées aux meilleurs spécialistes ; elles les ont amenés à adapter et à perfectionner leurs techniques qu'ils exposent ici de manière accessible au grand public. Les architectes et les historiens, qui peuvent confirmer là les hypothèses sur la construction gothique au Moyen Âge, sont aussi présents sur tous les aspects ; il leur revient de comprendre les interactions des matériaux incendiés les uns sur les autres et d'en tirer des conclusions générales sur la restauration et la conservation des objets du patrimoine.

Ce qui ressort avant tout, c'est la nécessité d'une parfaite coordination entre toutes les spécialités, construite sur une organisation complexe pour tout faire dans des contraintes maximum de temps et de qualité.

Cet ouvrage souligne donc l'importance mais aussi la diversité et les difficultés liées aux travaux relatifs à la conservation du patrimoine.



ISBN : 978-2-7598-2896-8

Prix : 25 €

edp sciences

www.edpsciences.org

Chimie et Notre-Dame de Paris



Mercredi 9 Février 2022

Chimie *et* **N**otre-**D**ame
*La science au service
d'une résurrection*

Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et Notre-Dame. La science au service d'une résurrection » qui s'est déroulé le 9 février 2022 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Bernard Bigot

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et Notre-Dame de Paris

Sophie Ayrault, Richard Boyer, Philippe Dillmann, Alexa Dufraisse, Rémi Fromont,
Jean-Louis Georgelin, Julien Le Bras, Maxime L'Héritier, Claudine Loisel,
Aline Magnien, Witold Nowik, Marie Parant-Andaloro, Pascal Prunet,
Barbara Trichereau, Véronique Vergès-Belmin

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Crédits couverture :

Photo AdobeStock : © 235194235 – Adobe Stock – Notre-Dame de Paris Cathedral, France par Mistervlad

Photos CNRS : 20190053_0014 – Section transversale d'un tronc de chêne âgé de 62 ans, avant et après carbonisation © Cyril FRESILLON / AASPE / CNRS Photothèque 20210061_0003 – Observation d'éléments métalliques provenant du chantier de Notre-Dame de Paris © Cyril FRESILLON / IRAMAT / NIMBE / ArScAn / CEA / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS

20210063_0006 – Restitution 3D de l'arc doubleau de la nef effondré de Notre-Dame de Paris © V. ABERGEL/A. GROS/MAP/MIS/Vassar College/A-BIME/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS

20210063_0010 – Superposition de nuages de points 3D de Notre-Dame de Paris et de ses décombres © V. ABERGEL/L. DE LUCA/MAP/SRA-DRAC/AGP/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS

20210063_0011 – Superposition de nuages de points 3D de Notre-Dame de Paris et de ses décombres © V. ABERGEL/L. DE LUCA/MAP/SRA-DRAC/AGP/Vassar College/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS

20190053_0014 - Section transversale d'un tronc de chêne âgé de 62 ans, avant et après carbonisation © Cyril FRESILLON / AASPE / CNRS Photothèque

20200039_0028 – Vue éclatée de la restitution 3D de la charpente disparue de Notre-Dame de Paris © Kévin JACQUOT / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS

20200039_0029 – Relevé photogrammétrique réalisé à Notre-Dame de Paris © Renato SALERI / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS

20210061_0030 – Observation microscopique d'échantillons métalliques issus du chantier de Notre-Dame de Paris © Cyril FRESILLON / IRAMAT / NIMBE / ArScAn / CEA / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS

Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2896-8

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2897-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Sophie Ayrault,

*Directrice de recherche au
CEA. Laboratoire des sciences
du climat et de l'environnement
– Université Paris-Saclay*

Richard Boyer,

Directeur général de SOGRA

Philippe Dillmann,

*Directeur de recherche au CNRS.
Laboratoire Archéomatériaux et
Prévision de l'Altération NIMBE
UMR 3685 et IRAMAT UMR 7065.
CEA Saclay*

Alexa Dufraisse,

*Chargée de recherche au CNRS,
UMR 7209 Archéozologie,
archéobotanique : Sociétés,
Pratiques et Environnements
(ASSPE), CNRS/MNHN, Paris*

Rémi Fromont,

*Architecte en chef des
Monuments Historiques.
Covalence Architectes*

Jean-Louis Georgelin,

*Général d'armée. Président de
l'établissement public chargé
de la conservation et de la
restauration de la cathédrale
Notre-Dame de Paris*

Julien Le Bras,

*Président directeur général
du groupe Le Bras Frères*

Maxime L'Héritier,

*Maître de conférence
en Histoire médiévale à
l'université Paris 8, ArScAn
CNRS, UMR 7041*

Claudine Loisel,

*Coordinatrice du groupe de
travail « Verre », ingénieure
de recherche, responsable
du pôle scientifique « Vitrail »
du Laboratoire de Recherche
des Monuments Historiques
(LRMH), ministère de la Culture*

Aline Magnien,

*Conservatrice générale du
patrimoine, directrice du
Laboratoire de Recherche
des Monuments Historiques,
ministère de la Culture et de la
Communication*

Witold Nowik,

*Responsable du pôle
« Peinture murale et
polychromie » au Laboratoire
de Recherche des Monuments
Historiques*

Marie Parant-Andaloro,

*Restauratrice de peintures
murales*

Pascal Prunet,

*Architecte en chef des
Monuments Historiques.
Prunet Architecture et
Urbanisme*

Barbara Trichereau,

*Ingénieure d'études au pôle
scientifique « Vitrail » au
Laboratoire de Recherche des
Monuments Historiques*

Véronique Vergès-Belmin,

*Responsable du pôle
scientifique « Pierre » du
Laboratoire de Recherche
des Monuments Historiques*

Équipe éditoriale :

*Danièle Olivier
et Paul Rigny*

Sommaire

Avant-propos	9
Préface.....	11

Partie 1 : Le Chantier de Notre-Dame de Paris et les challenges de la restauration

Chapitre 1 : Le Chantier Notre-Dame de Paris : état et perspectives par le général d'armée Jean-Louis Georgelin	19
--	----

Chapitre 2 : De la chimie des matériaux à l'alchimie des équipes par Aline Magnien	35
---	----

Chapitre 3 : Notre-Dame de Paris : matériaux et reconstruction par Pascal Prunet et Rémi Fromont	45
---	----

Chapitre 4 : Tracer les plombs de Notre-Dame de Paris par leur signature isotopique et élémentaire par Sophie Ayrault	69
--	----

Partie 2 : Ils travaillent pour sauver Notre-Dame

Chapitre 5 : Charpente de sécurisation des arcs boutants et des voûtes par Julien Le Bras	85
--	----

Chapitre 6 : La restauration des statues en cuivre de la flèche de la cathédrale de Notre-Dame de Paris par Richard Boyer	95
--	----

Chapitre 7 : Conservation-restauration des peintures polluées par dépôts d'aérosols de plomb par Witold Nowik et Marie Parant-Andaloro	117
---	-----

Chapitre 8 : Conservation des maçonneries endommagées par les sels solubles à la suite de l'Incendie de Notre-Dame de Paris en 2019
par **Véronique Vergès-Belmin**..... 135

Partie 3 : Le chantier scientifique au service des sciences du patrimoine

Chapitre 9 : La conservation-restauration et la recherche sur les vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris
par **Claudine Loisel et Barbara Trichereau**..... 157

Chapitre 10 : Mémoire du bois : apport de la chimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris
par **Alexa Dufraisse** 177

Chapitre 11 : L'apport des analyses chimiques à la connaissance des armatures de fer de Notre-Dame de Paris
par **Maxime L'Héritier**..... 195

Chapitre 12 : Matériaux du patrimoine, compréhension du passé, prévision du futur : quelques exemples
par **Philippe Dillmann** 213

Avant- propos

Les ouvrages de la collection « Chimie et ... », rédigés par la Fondation de la Maison de la Chimie, sont une mise en forme pédagogique du contenu de colloques « Chimie et ... » qui se tiennent deux fois par an. Ils s'attachent à présenter chacun un aspect de la société dans une dimension « recherche scientifique » et plus spécifiquement, de faire ressortir la place de la chimie dans le domaine choisi. La liste des ouvrages publiés depuis 2007 est rappelée à la fin de cet avant-propos.

Le point de vue adopté est de se placer entre les concepts scientifiques proprement dits étudiés dans le monde académique et la mission des laboratoires industriels qui est de connaître et d'étudier les évolutions des besoins sociétaux, culturels ou économiques des citoyens du ^{xxi}^e siècle. De cette double approche, résulte l'identification d'efforts à entreprendre pour améliorer les conditions de vie de tous et donc les programmes techniques des industries.

Du fait de la vocation de la Fondation de la Maison de la Chimie, la place de la chimie est naturellement le

fil conducteur de toutes ces réflexions. Il en ressort la définition de domaines émergents qui permettront aux jeunes chimistes de prendre leur place pour des carrières dans des professions exaltantes et ambitieuses.

Il y a quelques exceptions à la philosophie des livres de la collection telle qu'elle vient d'être citée – des exceptions où ce sont des événements qui sont à l'origine et non pas des champs industriels. Tel a été le cas de « Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité » où l'on rencontre une aventure archéologique incroyable conduisant à la reconstitution d'une vie économique du grand passé – l'étude de la ville d'Alexandrie et du Moyen-Orient de l'époque. C'est aussi le cas du présent ouvrage, inspiré par l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019 – un événement qui a causé une émotion considérable dans tout le pays et plus largement, à l'étranger. Ces livres, ouvrent sur un ensemble de domaines techniquement indépendants – par exemple, traitements des charpentes, des statues de fer, des vitraux, des pierres dans le

cas de Notre-Dame, présentés par les meilleurs professionnels – et simultanément, ils font découvrir la solidarité objective entre ces différents domaines techniques.

Par leur esprit à la fois spécifique et global, ces thématiques « événementielles » montrent d'autres dimensions de la recherche scientifique et industrielle – la gestion de grands programmes totalement pluridisciplinaires, coordonnés au sein d'instances de synthèse ; elles les placent dans les perspectives synthétiques qui montrent comment se préparer à répondre à de nouvelles sollicitations souvent majeures mais difficiles à anticiper. Cette position globale apparaît comme fondamentale dans les présentations du général Jean-Louis Georgelin, représentant du président de la République, Aline Magnien et Pascal Liévaux, représentant le ministère de la Culture qui sont chargés de la présidence et de la direction du chantier de Notre-Dame.

Le contenu des ouvrages de la collection « Chimie et ... » crée au fil de ses parutions une vision des évolutions de l'industrie chimique au ^{xxi} siècle. Elle veut explicitement aider les jeunes en phase de sélection d'une voie professionnelle à se tourner vers des orientations et des partenaires qui leur conviennent. Pour informer et motiver le plus grand nombre, un site internet – **www.mediachimie.org** – a été créé en 2012. Ce site rassemble, au-delà du contenu des colloques dont il vient

d'être question, des « ressources pédagogiques » de tous niveaux et de tous types d'application de la chimie. On appréciera qu'il se soit tourné vers l'actualisation des problèmes et des solutions et de recourir aux moyens médiatiques et pédagogiques (quizz, « petites nouvelles ») typiques de notre époque.

Liste des ouvrages de la collection « Chimie et... »

La Chimie et la mer ; Chimie et santé ; Chimie et art ; Chimie et alimentation ; Chimie et sport ; Chimie et habitat ; Chimie et nature ; Chimie et enjeux énergétiques ; Chimie et transports : vers des transports décarbonés ; Chimie et technologies de l'information ; Chimie et expertise : sécurité des biens et des personnes ; Chimie et cerveau ; Chimie et expertise : santé et environnement ; Chimie et changement climatique ; Chimie dermo-cosmétique et beauté ; La chimie et les grandes villes ; La Chimie et les sens ; Chimie, aéronautique et espace ; Chimie et biologie de synthèse ; Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies ; Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité ; Chimie et nouvelles thérapies, Chimie et lumière, Chimie et énergies nouvelles, Chimie et agriculture durable, Chimie et Notre-Dame.

Danièle Olivier

Vice-présidente de la Fondation de la Maison de la Chimie

Paul Rigny

Conseiller scientifique auprès du président de la Fondation de la Maison de la Chimie

Préface

Depuis 2007, une part importante des actions menées par la Fondation de la Maison de la Chimie est dédiée à l'information scientifique du public, à la formation et à l'orientation scientifiques des jeunes du lycée à l'université.

Dans le cadre de cette politique, les colloques de la série « Chimie et... » et les ouvrages issus de ces colloques sont un outil fondamental dont l'objectif est de rendre les sciences attractives, notamment la chimie. Nous souhaitons montrer l'importance et la diversité de l'apport des sciences à la société et que bien souvent, les progrès des connaissances ou comme dans le cas du chantier de Notre-Dame, la maîtrise des défis techniques et scientifiques résulte d'une approche transdisciplinaire.

Cette politique a été dirigée sans relâche par le président Bernard Bigot qui nous a quittés, emporté par une longue maladie, le 14 mai 2022. Pourtant, malgré la maladie, il a avec un immense courage, présidé le colloque « Chimie et Notre-Dame, la science au service d'une résurrection » du 9 février 2022 dont est issu cet

ouvrage qui est le 27^e de la collection « Chimie et... » et dont l'objectif vise à examiner avec les experts qui y ont collaboré :

– les phénomènes chimiques mis en œuvre lors du terrible incendie qui a ravagé la cathédrale à laquelle le monde entier est attaché et comment la chimie peut contribuer à lui redonner vie ;

– combien la chimie est aussi présente dans la conduite du chantier de restauration et dans le programme de recherche lancé à l'occasion de ce drame, qui associe archéologues, historiens de l'art, chimistes, physiciens et informaticiens, aux architectes et aux « compagnons » présents sur le site.

La première partie de cet ouvrage présente : « Le Chantier de Notre-Dame de Paris et les défis de la restauration ».

Nous n'aurions pu ni organiser le colloque, ni éditer ce livre sans le soutien exceptionnellement généreux du général Jean-Louis Georgelin, président de l'Établissement public chargé de

la conservation et de la restauration de Notre-Dame de Paris. Il nous fait l'immense honneur dans le chapitre intitulé : « **Le Chantier de Notre-Dame : état et prospective** » de nous raconter d'abord, le vécu en direct de la sécurisation du chantier et les énormes défis relevés par les équipes présentes dès le premier jour, puis comment très vite, grâce à l'extraordinaire motivation de toutes les équipes, le nettoyage et la restauration ont commencé et comment s'est organisé cet exceptionnel chantier scientifique de Notre-Dame et enfin les perspectives de son aboutissement.

À travers le second chapitre « **De la chimie des matériaux à l'alchimie des équipes** », Aline Magnien décrit comment, très vite, en réponse à l'incendie de Notre-Dame, le CNRS et le ministère de la Culture se sont mobilisés pour se mettre au service de l'Établissement public de Reconstruction créé par l'État et se sont associés sous la forme « d'un grand chantier scientifique » pour mettre les compétences d'une cinquantaine de leurs laboratoires au service de la résurrection de Notre-Dame et de ses œuvres d'art. À cette occasion, les chercheurs se sont aussi donnés comme objectif le renouvellement des connaissances et des technologies sur les matériaux du patrimoine.

Dès l'incendie, les architectes en chef des monuments historiques Rémi Fromont et Pascal Prunet ont été appelés

sur le site et étroitement associés à toutes les opérations sur le chantier, à la mise en sécurité et à la restauration de l'édifice. Ils nous racontent toutes les étapes et les détails de cette extraordinaire aventure sur l'exemple de deux types de matériaux de reconstruction : la pierre et le bois dans le chapitre « **Notre-Dame de Paris : matériaux et construction** ».

Le plomb est à double titre un défi important du chantier de Notre-Dame : au titre de la sécurisation du chantier, et au titre de la restauration de la toiture. Le chapitre « **Tracer les plombs de Notre-Dame de Paris par leur signature isotopique et élémentaire** » est la réponse apportée à ce défi, décrite par Sophie Ayrault. En avril 2019, l'incendie de la cathédrale Notre-Dame a répandu sur Paris une quantité inconnue de poussières contenant du plomb provenant du toit et de la flèche. Pour différencier l'impact de l'incendie des sources historiques de celles, multiples, de contamination au plomb dans la ville de Paris, il était nécessaire de définir de manière univoque la signature géochimique de la poussière émise par l'incendie. En effet, aucune donnée décrivant l'empreinte géochimique du plomb du toit n'était disponible au moment de l'incendie. Pour caractériser cette empreinte, un protocole géochimique (isotopique et élémentaire) a été mis au point et appliqué aux échantillons de poussières riches en plomb collectés en différents endroits à l'intérieur de Notre-Dame.

Cette empreinte géochimique facilitera l'évaluation future de la contribution de l'incendie à la pollution au plomb dans Paris et de l'étendue réelle de la zone affectée par le panache de poussières contenant du plomb émis par l'incendie

La seconde partie de cet ouvrage, « Ils travaillent pour sauver Notre-Dame », est dédiée à ces quelque trois cents compagnons spécialistes des monuments historiques présents sur le site dès trois jours après l'incendie, et depuis présents chaque jour au chevet de la cathédrale, pour la sécuriser et la faire revivre.

C'est tout particulièrement le cas de Julien Le Bras, directeur de l'entreprise du même nom, qui, en rendant la cathédrale solide sur ses piliers, a été certainement l'un des principaux acteurs de la phase de sécurisation. Son chapitre « **Charpente de sécurisation des arcs-boutants et des voûtes** » et les magnifiques photos de chantier qui y sont associées font prendre conscience de l'ampleur totalement inédite des travaux et des compétences technologiques, de la précision et de la rigueur qui doivent y être associées mais aussi de l'amour de ces « compagnons » pour leur métier.

Dans le chapitre suivant, Richard Boyer nous raconte la belle histoire de « **La restauration des statues en cuivre de la flèche de la cathédrale** » :

en effet, la dépose des statues des douze apôtres et des quatre évangélistes qui ornaient la base de la flèche avaient miraculeusement déjà eu lieu quatre jours avant l'incendie en vue d'une restauration fondamentale dans les ateliers de la société Socra, décidée antérieurement.

Il explique comment elles furent, durant les deux années qui suivirent, restaurées selon des protocoles spécifiques mis au point d'une part, pour le traitement des armatures internes en fer corrodées et, d'autre part, pour la restauration de l'épiderme en cuivre altéré. Ces œuvres retrouveront leur emplacement d'origine à la fin des travaux de reconstruction de la flèche.

Grâce à leur éloignement du centre de l'incendie de la cathédrale localisé sur la toiture du transept et la partie est de la nef, les peintures murales situées dans le déambulatoire n'ont pas été directement endommagées. En revanche, cet incendie a provoqué une dispersion entre autres du plomb couvrant la toiture sous la forme d'un aérosol, résultant en une importante pollution des abords et de l'intérieur du bâtiment sous la forme d'un dépôt de microparticules de plomb, qui a recouvert les sols, mais aussi les murs, y compris les peintures. Marie Parant-Andaloro et Witold Nowik décrivent « **La mise au point du protocole d'élimination du plomb exogène adaptée à la préservation de peintures murales à l'huile** » datant de la

campagne de restauration conduite par Eugène Viollet-le-Duc, ainsi que la mise en pratique et à l'échelle, de ce protocole. Ainsi, à la fin du chantier, tous les éléments constitutifs du décor de Viollet-le-Duc (vitrail, sculpture, pierre) seront restaurés.

Véronique Vergès-Belmin explique ensuite la mise au point **des méthodes de conservation des maçonneries endommagées par les sels solubles** pour donner suite à l'incendie sur deux cas :

- le premier concerne les parements intérieurs et extérieurs des chapelles, et explique l'impact des méthodes de nettoyage et déplombage sur la production de sels ;
- le deuxième est relatif à la voûte du bras sud du transept, dont l'intrados est très affecté par une pollution saline : les raisons de cette pollution sont expliquées ainsi que les méthodes mises au point pour diminuer la charge saline des maçonneries de la voûte.

La dernière partie de cet ouvrage montre sur quatre exemples comment les travaux des équipes du chantier scientifique de Notre-Dame contribuent plus largement au développement des sciences du patrimoine.

Lors de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, les vitraux historiés ont été protégés dans leur globalité par la résistance de la voûte, qui a rempli son rôle de bouclier thermique malgré les quatre

zones perforées. L'incendie a cependant entraîné une réorganisation du programme de restauration des vitraux qui avait été prévu dès 2015. La priorité actuelle étant de faire entrer le public dans la cathédrale en 2024, l'objectif a été donné à une décontamination générale et à la restauration des baies hautes déposées.

L'identification de la nature des dépôts sur les vitraux et la mise au point d'un protocole de décontamination préservant les verres et les peintures sont rapportées par Claudine Loisel et Barbara Trichereau.

Dans ce contexte, un groupelement réunissant historiens de l'art, experts du vitrail, scientifiques de la conservation, et chercheurs universitaires s'est créé afin de coordonner la recherche scientifique autour des vitraux de la cathédrale sur deux thèmes :

- la caractérisation des dépôts de surface sur les vitraux, compréhension de l'interaction avec les matériaux et optimisation des traitements de conservation-restauration ;
- la recherche sur la connaissance des vitraux, du XII^e siècle au XX^e siècle, de Notre-Dame de Paris.

La charpente en chêne de Notre-Dame de Paris est l'un des plus grands chefs-d'œuvre de la charpenterie gothique en France... La destruction de la charpente de Notre-Dame de Paris dans l'incendie a laissé des milliers de fragments de poutres de chêne carbonisés. De ce fait, ces bois médiévaux, rares et précieux, sont aujourd'hui accessibles à la communauté scientifique.

On estime que 800 voire 1 000 chênes ont été nécessaires. Or, tout au long de sa vie, chacun de ces chênes a enregistré certaines variations de son environnement en constituant chaque année un nouveau cerne de croissance. Ainsi, la succession de ces cernes constitue un moyen de datation absolue. De plus, l'analyse de l'anatomie des bois et de leurs compositions chimiques, moléculaires et isotopiques, permet d'obtenir des informations sur l'environnement et la physiologie de ces arbres. Certains marqueurs du bois peuvent ainsi être utilisés comme indicateurs des modes de croissance, des zones de provenance ou du climat passé. Alexa Dufraisse montre ainsi qu'analyser **la « forêt » de Notre-Dame, c'est remonter le temps, en reconstruisant les forêts et le climat des siècles passés.**

L'incendie de 2019 a mis au jour des armatures de fer jusqu'ici inconnues dans la structure de Notre-Dame de Paris. Ces découvertes ont conduit à la documentation systématique de ces usages dans l'évolution des phases de construction des ^{xii}^e-^{xiii}^e siècles aux restaurations des ^{xix}^e-^{xx}^e siècles. Au-delà de l'inventaire archéologique de ces armatures préalable à toute forme d'étude, l'analyse chimique des alliages ferreux qui les composent apporte un éclairage inédit sur les pratiques des bâtisseurs médiévaux et modernes, cela grâce aux méthodologies développées depuis une vingtaine d'années décrites dans le

chapitre de Maxime L'Héritier. Grâce au chantier de restauration et à l'ensemble de ses acteurs, plusieurs dizaines d'armatures (agrafes, tirants, clous, armatures des décors...) ont pu être prélevées pour être soumises à ces investigations. L'analyse des inclusions de scories en éléments majeurs par MEB-EDS, puis en éléments traces par LA-ICP-MS renseigne sur les procédés techniques utilisés, (bas fourneau et haut fourneau), et sur les différentes sources de métal, illustrant l'activité du marché du fer sur la place parisienne.

Philippe Dillman présente sur quelques exemples, dans le dernier chapitre sur « **Les matériaux du patrimoine compréhension du passé, prévision du futur** » comment leur analyse, leur étude physico-chimique, la mise en œuvre de nouvelles méthodologies adaptées et innovantes peuvent être considérées non seulement comme des sources produisant des informations historiques à part entière, mais aussi comme des outils cruciaux pour le diagnostic de leur état de conservation, ou la mise en place de traitements de protection. Ces études servent également à prévoir le comportement des matériaux employés dans le futur sur de très longues durées.

Je vous souhaite donc une excellente lecture de cet ouvrage qui montre que la motivation et les compétences de toutes les équipes du « Chantier Notre-Dame »,

d'une part laissent espérer que non seulement le défi de la réouverture de la cathédrale au public en 2024 sera effectivement tenu, mais que Notre-Dame sera encore plus belle, et que sa résurrection contribuera largement à la protection de notre

patrimoine historique grâce au développement d'un nouveau domaine scientifique transdisciplinaire ciblant les matériaux du patrimoine.

Danièle Olivier

*Vice-présidente de la Fondation
de la Maison de la Chimie*

Partie 1

Le Chantier de Notre-Dame
de Paris et les challenges
de la restauration

Le Chantier de Notre-Dame de Paris : état et perspectives

Général d'armée Jean-Louis Georgelin

Général d'armée. Représentant spécial du président de la République. Président de l'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Introduction

Notre-Dame n'est pas morte, Notre-Dame est restée debout et est toujours debout. Nous nous efforçons de la restaurer, de la consolider et nous la rendrons plus belle. La volonté farouche de l'établissement public que j'ai l'honneur de présider est évidemment d'arriver à cet ambitieux résultat : rendre Notre-Dame de Paris au culte et à la visite en 2024.

Gardons à l'esprit ce que Notre-Dame de Paris a représenté au cours de sa longue histoire, gardons à l'esprit la manière dont les Français ont ressenti son incendie, gardons

à l'esprit le regain d'énergie engendré par sa restauration.

C'est le projet de toute une nation. Il nous oblige, il nous honore et il nous engage. Il en va de l'honneur de la France.

1 Le Chantier de Notre-Dame de Paris, une extraordinaire aventure humaine

1.1. La diversité des acteurs et des talents au service de Notre-Dame de Paris

De nombreux scientifiques travaillent sur le Chantier de Notre-Dame, comme on

pourra le constater à la lecture des différents chapitres de cet ouvrage.

Je tiens à remercier solennellement la communauté des chercheurs pour sa mobilisation de très grande envergure au service de la renaissance de Notre-Dame de Paris.

C'est l'occasion de réaffirmer la volonté de l'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale d'accompagner la démarche ambitieuse des scientifiques. J'adresse un salut tout particulier aux chercheurs qui interviennent dans la rédaction de cet ouvrage, notamment les quatre coordinateurs des groupes de travail de ce chantier scientifique : Aline Magnien, directrice du LRMH¹, Martine Regert et Pascal Liévaux, du ministère de la Culture, ainsi que Philippe Dillmann qui est aussi membre du conseil scientifique de l'établissement public.

J'y associe au premier chef les donateurs, que l'on ne remerciera jamais assez : sans les 340 000 donateurs, venus de France et du monde entier, Notre-Dame ne pourrait renaître.

Bien évidemment, je remercie les architectes en chef des monuments historiques, qui ont eux aussi écrit un chapitre de cet ouvrage et qui sont les premiers artisans des plans de cette résurrection, ainsi que les compagnons et les entreprises mobilisées sur le chantier. Ils ont largement fait la preuve de leur ardeur. Tous ensemble, nous participons à

une aventure sans précédent (*figure 1*).

Je dirige la maîtrise d'ouvrage au titre des services de l'État mais je n'oublie pas de citer le diocèse de Paris. Le monument que nous restaurons est avant tout une église catholique, qui est un peu le centre spirituel de notre pays, ce dont nous nous sommes rendus compte dans la nuit funeste de l'incendie (*figure 2*). Faire revivre Notre-Dame, c'est d'abord la rendre au culte, sa raison d'être.

La restauration de la cathédrale est une extraordinaire aventure humaine. Chaque jour, je mesure sur le chantier la fierté, le talent et la passion qui animent ceux qui veillent sur la cathédrale. C'est un vrai bonheur de travailler avec ces personnes dont la générosité, la fierté, la volonté d'aboutir transcendent tous les débats parfois pénibles auxquels nous devons faire face.

Je suis concrètement très frappé, en discutant avec les compagnons que je rencontre qui viennent de toute la France et de Paris, combien ils sont pour la plupart jeunes et combien ils sont fiers de travailler sur ce chantier emblématique. Ils forment un peu l'avant-garde de cette grande armée, qui, en France et dans le monde entier, s'est levée pour rendre à Paris sa cathédrale (*figure 1*).

1.2. Notre-Dame, les défis d'un chantier devenu laboratoire des sciences du patrimoine

Aventure humaine, le chantier de restauration de Notre-Dame permet aussi de faire se rencontrer, à une échelle

1. LRMH, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques



Figure 1

Photographie d'une partie des entreprises, des architectes en chef et des institutions publiques impliqués dans le Chantier de Notre-Dame, à l'occasion des Journées européennes du patrimoine organisées par l'établissement public les 19 et 20 septembre 2021. Crédits : David Bordes – RNDP.



Figure 2

L'incendie du 15 avril 2019. Crédits : AdobeStock - Image 438660686.

inédite, les sciences dites « dures » comme la chimie – mais pas seulement – et les sciences du patrimoine. Ce croisement entre des disciplines très diverses est utile non seulement au chantier, mais à toute la recherche en général. De ma position, je vois cela avec un grand bonheur.

Ce n'est d'ailleurs pas une nouveauté : c'est un chimiste, Claude Berthollet, qui, chargé par Napoléon de recenser et récolter les vestiges patrimoniaux durant l'expédition d'Égypte, avait à son époque adopté le caractère systématique de cette approche, et cela constituait déjà une piste de réflexion prometteuse.

Comme du temps de Viollet-Le-Duc, Notre-Dame de Paris

reste fidèle à son rôle de laboratoire de la doctrine patrimoniale. Et cette mobilisation est nécessaire pour relever les défis qui sont les nôtres, et d'abord rendre au culte et aux Français leur cathédrale (*figure 3*), avant tout haut lieu spirituel qui est également un chef-d'œuvre de l'art gothique (*figure 4*) et le mémorial de l'histoire de France.

C'est en cela qu'il est un chantier politique, au sens très noble du terme. Pour cette raison, le président de la République a compris dans la nuit du 15 au 16 avril que cet incendie resterait une blessure au sein de la Nation et qu'il lui revenait de prendre en main cette restauration en nommant un représentant spécial pour coordonner la



Figure 3



Figure 4

Médallions représentant la lâcheté et le courage sur la rose ouest de Notre-Dame de Paris, datant du XIII^e siècle. Crédits : RNDP.

renaissance de la cathédrale. Le président a aussi décidé de fixer un cap ambitieux qui nous habite tous les jours : rendre la cathédrale au culte et à la visite en cinq ans. Ce délai, nécessaire pour mobiliser toutes les énergies est le véritable marqueur profond de la vaste opération que j'ai l'honneur de conduire et de diriger.

Notre objectif est bien sûr de réaliser ce chantier en cinq ans mais aussi de le faire avec un haut degré d'exigence pour respecter l'histoire de ce monument. Il ne s'agit pas de faire vite, de bâcler pour respecter une date. Il s'agit de faire les choses dans un délai fixé mais en profondeur, avec sérieux et en respectant l'exigence de notre patrimoine. Sur ce plan précisément, l'expertise et les travaux des chimistes doivent nous permettre d'avancer sur de bonnes bases et sereinement vers la réouverture. Je pense par exemple, au référentiel chimique et isotopique qui a permis de retracer la provenance des chênes d'origine de

la cathédrale afin de préparer la collecte des 1200 chênes nécessaires à la restitution de la flèche et du transept. Il en va de même des études consacrées au plomb, matériau qui avait été utilisé et qui sera bien sûr utilisé de nouveau pour couvrir la cathédrale.

Autre défi : l'intérêt pour ce chantier ne se dément pas, la tension médiatique, extrêmement forte, ne retombe pas. Nous travaillons sous le regard du monde entier. Nous avons, Français, annoncé que nous le ferions en cinq ans. J'utilise souvent pour mes équipes, l'exemple des Italiens qui ont dit qu'ils reconstruiraient le pont de Gênes en deux ans. Tout le monde a ri. Pourtant, deux ans après, le pont de Gênes était à nouveau ouvert. Il serait honteux pour notre pays, compte tenu de tous les talents de tous les horizons que nous possédons, que nous ne soyons pas capables d'arriver au bout de ce défi.

Le chantier est aussi une occasion de mettre en valeur les métiers d'arts et du patrimoine

qui sont une richesse pour notre pays, et d'en transmettre les savoir-faire. La loi du 29 juillet 2019 fixe expressément cette mission à l'établissement public que je préside. Nous nous y employons résolument au travers de clauses d'apprentissages et d'actions régulières, comme l'organisation du Village des métiers installé sur le parvis à l'occasion des Journées européennes du patrimoine, et qui s'est imposé en quelques années comme un événement phare de cette manifestation à Paris. Il est assez frappant de voir le nombre de jeunes présents sur ce chantier, qui après avoir vu des reportages, après avoir participé à telles ou telles actions ont frappé à la porte des entreprises ou des instituts pour se réaliser dans l'exercice d'un métier d'art.

Une autre caractéristique ne facilite pas notre tâche : contrairement à ceux à qui était confiée la reconstruction du pont de Gênes, nous travaillons sans aucune dérogation, sous le régime du droit commun, commandé par le Code du patrimoine, le Code du travail et le Code de la commande publique. Nous sommes évidemment guidés par les grands textes de la doctrine patrimoniale, notamment la charte de Venise, les recommandations de Varsovie et le document de Nara².

2. Le document de Nara sur l'authenticité est un texte de 1994 procurant une compréhension pour la préservation et la restauration des objets et des bâtiments anciens en prenant en compte la diversité culturelle du patrimoine culturel dans le but de pouvoir évaluer la valeur et l'authenticité des biens culturels de façon plus objective.

C'est ce qui a conduit la CNPA³, sur la proposition que nous avons faite en juillet 2020, à valider le pari de la restauration de la cathédrale à l'identique, notamment la flèche de Viollet-Le-Duc en plomb et en chêne, la couverture du grand comble en plomb et la charpente en bois, en conformité avec les textes auxquels nous venons de faire référence. Sur ce chemin, nous pouvons compter sur la vigilance extrême d'un grand nombre d'instances de contrôle. Autant d'éléments par lesquels ce chantier se démarque, outre l'exceptionnelle valeur du monument qu'il concerne et le sentiment de cohésion et d'unité que cela engendre entre tous.

2 Le chantier à la loupe

2.1. La phase de sécurisation et de consolidation de la cathédrale

Depuis 2019, beaucoup a été fait.

Conduite jusqu'à l'été 2021, la phase de sécurisation et de consolidation a constitué la première étape du chantier. Elle a rendu la cathédrale solide sur ses piliers pour envisager la restauration dans de bonnes conditions.

Elle a d'abord permis la sauvegarde de la cathédrale ainsi que la mise à l'abri de ses œuvres d'art. Les « docteurs de l'art » nous disent qu'il y a près de 1500 œuvres d'art à Notre-Dame dont très peu en réalité ont été atteintes par

3. CNPA, la Commission Nationale du Patrimoine et de l'Architecture.

l'incendie. La destruction la plus emblématique est celle de l'autel de Touret qui était précisément dans l'axe du transept et qui a reçu le poids de la flèche et qui a explosé. Le reste a bien supporté à la fois l'eau et la chaleur.

Il a néanmoins fallu commencer par mettre à l'abri ces œuvres d'art, puis mettre les 28 arcs-boutants⁴ sur cintres (figure 5), démonter l'échafaudage sinistré et ses 40 000 pièces de métal, sécuriser les voûtes grâce à de nouveaux cintres (voir chapitre correspondant), pour procéder enfin à l'été 2021 à la mise hors d'eau du bâtiment.

Cette phase de sécurisation a aussi permis de lancer des

4. Pilier ou construction en architecture qui finit en demi-arc et qui sert à soutenir par-dehors une voûte, un mur ou autre.

chantiers dans le chantier (figures 6 et 7).

Ce fut d'abord, la dépose de l'orgue (figure 8) avec ses 8000 tuyaux, ses 116 jeux. Il a seulement souffert de la poussière de plomb et de l'eau, mais encombré de poussières de plomb, il a été démonté en vue de sa restauration, laquelle a maintenant déjà commencé.

Les chantiers tests des chapelles latérales ont débuté ; à la veille de l'incendie, elles étaient toutes dans un état absolument épouvantable. C'est dire si elles seront magnifiées par cette restauration. Un chantier mené dans deux de ces chapelles avec notamment l'aide du LRMH a permis de tester et d'établir un protocole de nettoyage complet de la cathédrale.

Enfin, la phase de sécurisation a été mise à profit par la maîtrise



Figure 5

Photographie de la mise sur cintre des arcs-boutants de la cathédrale. Crédits : Alexis Komenda - C2RMF.

Figure 6

Photographie d'une vue aérienne de Notre-Dame avec l'échafaudage sinistré.

Crédits : David Bordes – RNDP.



Figure 7

Photographie de cordistes démontant l'échafaudage sinistré.

Crédits : Jean-Dominique Barthélemy - Paris Match.



Figure 8

Photographies de la dépose de l'orgue de Notre-Dame de Paris. Crédits : David Bordes – RNDP.

d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre pour commander et réaliser les études d'évaluation et de diagnostic du monument, à notre maîtrise d'œuvre, à notre architecte en chef Philippe Villeneuve et à ses deux confrères architectes en chef, Pascal Prunet et Rémi Fromont.

2.2. La phase de restauration

Nous avons fixé les grands choix de restauration auxquels j'ai fait référence précédemment. Depuis l'été 2021, nous sommes résolument engagés dans cette phase de restauration. Elle commence par des actions qui ne sont pas les plus spectaculaires mais qui sont nécessaires pour que l'on revoie dans le ciel de Paris pointer la flèche de Viollet-Le-Duc restaurée.

Nous avons lancé le dépoussiérage puis le nettoyage de l'ensemble de l'intérieur de la cathédrale. S'il y a eu des polémiques, des bavardages sur l'aménagement intérieur, le point le plus essentiel sera la lumière que Notre-Dame va retrouver, grâce à ses vitraux, à ses parements, à ses

peintures nettoyées. Ce nettoyage n'était jamais arrivé au degré auquel nous le faisons. Il sera sans doute l'occasion de redécouvrir des décors peints pour lesquels l'analyse des chimistes se montrera évidemment indispensable (*figure 9*).

Le chantier monte en puissance, semaine après semaine, au gré des appels d'offres. Nous avons lancé plus de 100 DCE⁵ pour lancer cette phase de restauration. Les compagnons prennent possession des instances et des installations de chantier qui ont été préparées pour eux.

De nombreuses opérations en cours sont réalisées hors les murs, comme la restauration des 77 mays⁶ de la cathédrale de Paris. Ces tableaux

5. DCE pour Dossier de Consultation des Entreprises. C'est un dossier établi par l'architecte permettant de réaliser une consultation pour mettre en concurrence des entreprises.

6. Les mays de Notre-Dame sont des tableaux commandés par la corporation des orfèvres et réalisés entre 1630 et 1707 par des peintres célèbres.



Figure 9

Photographies de la restauration de plafonds et de murs. Crédits : David Bordes – RNDP.

de grands formats, offerts un par un à la cathédrale tous les ans de 1637 à 1703, et dont 13 ornaient encore ses murs, sont restaurés par la DRAC⁷, dans un atelier spécifiquement aménagé aux portes de Paris. La restauration de l'orgue se fait chez trois facteurs d'orgue dans l'Hérault, la Creuse et le Vaucluse.

Fruit d'une planification rigoureuse, la phase de restauration nous emmènera ainsi jusqu'en 2024. Un même délai commande le projet de réaménagement intérieur, qui est évidemment l'affaire du diocèse et permettra de rendre vie à cette cathédrale catholique, ainsi que le lancement du projet de réaménagement des abords, mené par la Ville de Paris.

3 Quelques défis du chantier de Notre-Dame

Le chantier est considéré comme exemplaire notamment sur deux points : la sécurité incendie et la maîtrise des conséquences de l'utilisation du plomb comme matériel de couverture. Et ce dernier point a évidemment depuis longtemps particulièrement retenu mon attention.

3.1. La sécurité incendie

Une fois acquise la décision de restituer les charpentes de Notre-Dame telles qu'elles étaient avant l'incendie, nous devons utiliser toutes les ressources des technologies

contemporaines pour en assurer la sécurité. Le projet de restauration de la cathédrale prévoit une amélioration conséquente des systèmes de protection incendie pour circonscrire tout risque de nouvel incendie et donc de diffusion de particules de plomb dans l'air.

Un retour d'expérience approfondi du sinistre du 15 avril 2019 a été mené pour identifier les points d'amélioration du dispositif de lutte contre les incendies dans le monument.

Afin de prévenir les risques, la charpente en bois intégrera des dispositifs de sécurité incendie permettant de repérer précocement les éventuels départs de feu et de les circonscrire au plus vite.

Des parois coupe-feu, qui n'existaient pas en 2019, seront installées dans les charpentes pour empêcher le feu de se propager.

Un système de brumisation, qui n'existait pas non plus en 2019, renforcera encore les moyens de défense contre l'incendie. Il sera mis en place progressivement après la réouverture de la cathédrale.

3.2. Des avancées significatives en matière de gestion du risque plomb

Le plomb dans la cathédrale, c'est deux sujets : la protection contre les poussières de plomb présentes sur le chantier à cause de la disparition de la couverture, et l'utilisation du plomb pour la nouvelle couverture. Ils doivent être l'un et l'autre gérés avec rationalité.

Les entreprises présentes sur le chantier savent comment

7. DRAC pour Directions Régionales des Affaires Culturelles.

traiter le premier problème, avec les mêmes précautions que celles prises ailleurs dans le domaine du nucléaire pour se protéger.

Il n'y a pas un chef d'État, un chef de gouvernement, une star qui vienne à Paris et qui ne demande à visiter Notre-Dame ; et je suis évidemment celui qui dit non à cause des contraintes d'accès que pose le plomb. La vice-présidente des États-Unis est venue à Paris et j'ai dû dire non. Si madame Harris veut venir à Notre-Dame, elle devra se conformer au protocole de protection. Elle devra suivre une formation plomb de 20 minutes. Ensuite, elle s'habillera d'une combinaison de protection après s'être complètement dévêtue. Après la visite, elle devra prendre une douche après avoir laissé ses vêtements sales, etc.

Il faut noter que cela coûte du temps aux entreprises, environ 25 % du temps, qui sont à défalquer du total des heures de travail passées à Notre-Dame.

Mais revenons au sujet essentiel qui est l'utilisation du plomb pour la couverture du grand comble pour redonner à cette cathédrale cette splendeur, cette noblesse qui caractérise tous les grands monuments de Paris. Rappelons que l'on a mis du plomb sur le dôme du Panthéon, on en a remis il y a quelques mois à Versailles et on en met en ce moment à l'Opéra. Tous les grands monuments sur cet axe magistral qu'est la Seine, sont couverts de plomb. Nous reconstruirons donc en plomb pas seulement pour des caractéristiques esthétiques,

mais parce que le plomb a des caractéristiques physiques et mécaniques, de durabilité etc., qui le désigne aussi comme le matériau par excellence pour refaire la toiture de cette cathédrale.

Les eaux de ruissellement issues des précipitations sont susceptibles d'entraîner en quantités très réduites des particules de plomb libérées par les plaques de plomb des couvertures (phénomène de lixiviation).

La littérature scientifique existante évoque, dans la description de ce phénomène, des fourchettes assez étendues quant aux quantités en cause, conduisant à estimer le rejet de plomb des couvertures de la cathédrale, d'un poids global de 250 tonnes, à un ordre de grandeur de quelques kilos à quelques dizaines de kilos de métal par an *via* les eaux de ruissellement.

Dans ce contexte, l'établissement public a décidé de conduire un examen approfondi de ces questions pour :

- préciser la quantité de plomb susceptible d'être rejetée par les couvertures de la cathédrale chaque année par lixiviation,
- en déduire, à partir de la pluviométrie de la capitale, la concentration moyenne en plomb des eaux de ruissellement en provenance de la cathédrale rejetées à l'égout,
- identifier la réalité du risque d'impact environnemental dans l'environnement parisien et francilien à partir de ces données et proposer, le cas échéant, les mesures d'accompagnement permettant de maîtriser celui-ci.

Ces mesures d'accompagnement peuvent comprendre :

- l'amélioration des dispositifs de recueil et d'évacuation des eaux de ruissellement issues de la cathédrale,
- la mise en œuvre de dispositifs de stockage et de filtration si nécessaire.

Pour ce faire,

- une expérimentation est en cours consistant à mesurer la teneur en plomb de l'eau de ruissellement de plaques de plomb disposées à cet effet dans l'emprise du chantier de la cathédrale. Elle a été confiée par l'établissement

public au Leesu (Laboratoire eau, environnement et systèmes urbains de l'école des Ponts et Chaussées), laboratoire de référence en matière de rejet d'eaux polluées,

- la maîtrise d'œuvre (ACMH) étudie en même temps l'amélioration du dispositif de recueil et d'évacuation des eaux de ruissellement en provenance des couvertures de la cathédrale,

- enfin, une étude de préféabilité de dispositifs de stockage et filtration des eaux de ruissellement est engagée par l'établissement public.

Conclusion : le Chantier de Notre-Dame, un défi pour la recherche scientifique

C'est dans ce contexte global que s'inscrit le chantier scientifique, qui est une composante essentielle pour nous permettre d'être au rendez-vous de 2024. Son moment fondateur fut sans conteste le déblaiement, le tri, et l'inventaire des vestiges. Il fut mené de mai 2019 au début de 2021 et représente un travail inédit. Plus de 10 000 bois et 660 palettes d'éléments lapidaires ou métalliques ont été évacués, inventoriés et seront étudiés par les laboratoires de recherches (*figure 10*). Ce volet scientifique intègre toutes les instances scientifiques de notre pays et rassemble plus de 150 chercheurs français et européens.

Ce chantier permet d'aider la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre : c'est son axe immédiat. Son second axe est de fournir à la recherche fondamentale de quoi s'enrichir dans les années à venir. Cette entreprise scientifique



Figure 10

Photographie de l'inventaire lapidaire. Crédits : David Bordes – RNDP.

est nécessaire, et fait qu'il y a un aller-retour et un partenariat constant entre ces deux volets que sont le chantier scientifique et nous-même, le chantier à proprement parler.

L'établissement public n'est pas l'initiateur de cette démarche. Il veut en être le facilitateur : il veille au respect des délais, à la qualité de la restauration et en même temps, il facilite la recherche scientifique pour notre pays dans le domaine patrimonial. Nous sommes aux côtés des chercheurs lorsqu'il s'agit de commander ou de co-financer des programmes.

Chacun sait combien il est compliqué de rentrer dans la zone du chantier. Aussi l'établissement public a-t-il fait le choix ambitieux, de louer, d'aménager et d'exploiter un lieu de stockage et de recherche de plus de 2500 m² en région parisienne pour poursuivre cet approfondissement scientifique. Il devrait vous permettre d'accéder aux vestiges dans des conditions satisfaisantes. Vous voyez donc que la recherche scientifique sur ces deux niveaux liés à ce chantier est une vraie préoccupation pour moi et que nous sommes là pour la faciliter.

La tâche n'est pas mince. Si je suis là, à la fois comme représentant spécial du chef de l'État et comme président de l'établissement public, c'est pour relever ces défis et être au rendez-vous de 2024. Nous tous, vous, moi, nous devons être présents en 2024 pour réouvrir cette cathédrale.

Je pense que ceux qui liront ces pages sans être directement impliqués dans le chantier scientifique seront impressionnés par la qualité des travaux qui sont menés dans ce cadre, comme ils pourront l'être par les avancées du chantier en lui-même, dans les délais prescrits.

C'est d'excellent augure pour la réussite de ce projet. Je suis extrêmement confiant. Tous ensemble, continuons d'allier compétence et



Figure 11

Photographie aérienne de Notre-Dame de Paris à la fin de la phase de sécurisation. Crédits : David Bordes - RNDP.

humilité au service d'un chantier et d'un monument qui nous dépassent. Notre-Dame de Paris mérite que nous donnions le meilleur de nous-même pour la transmettre aux générations futures et pour témoigner dès aujourd'hui, du génie français (*figure 11*).

De la chimie des matériaux à l'alchimie des équipes

Conservatrice générale du patrimoine, directrice du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, ministère de la Culture et de la Communication

Parmi les sciences du patrimoine qui constituent aujourd'hui un domaine scientifique riche et varié, aux contours cependant mouvants, la chimie occupe une place importante, notamment pour l'approche des objets patrimoniaux dans leur matérialité. Elle est fortement sollicitée pour la compréhension, la conservation et la restauration, tout particulièrement aujourd'hui dans le contexte du changement climatique et des enjeux de la conservation verte qui s'efforce de respecter l'environnement et le vivant.

Les usages de cette science au service des œuvres d'art et de leur restauration s'inscrivent

dans un mouvement historique qui commence avec la révolution scientifique de la fin du XVIII^e siècle, les découvertes de Lavoisier, les premiers essais de nomenclature moderne, avec la naissance de la chimie élémentaire, développée au XIX^e siècle par Alexis Mendeleïev dont la table sert toujours de point d'appui, bref avec ce qu'Alexandre Koyré appelait la « synthèse newtonienne ». Lorsque les académies et les chercheurs de ce XVIII^e siècle se passionnent pour la redécouverte des techniques antiques comme celles de la peinture à la cire, et que la chimie devient un auxiliaire de la création et de la

restauration des œuvres, on peut dire que la voie s'ouvre à ces applications de la science à l'art. Ce mouvement rend possible une approche matérielle des œuvres, préparée par les antiquaires de cette époque et renforcée par le « *connaisseurship* ». C'est cette approche qui prévaut encore aujourd'hui et qui a prévalu lors de la création des groupes de travail, évoquée par Pascal Liévaux dans sa communication. Jean Chaptal, avec la *Chimie appliquée aux arts* en 1807, qui tente d'établir des principes généraux à l'usage des artistes et des manufacturiers, et Louis Pasteur, plus connu du grand public pour ses travaux sur la rage, lequel devient en 1860 le premier titulaire de la chaire de physique-chimie appliquée aux Beaux-arts, sont autant de jalons sur ce parcours. La formation médicale initiale de nombre de ces chercheurs, l'impulsion qu'ils ont ainsi donnée aux laboratoires de recherche, se traduit encore, chez leurs successeurs, par l'omniprésence d'un vocabulaire médical, présent par ailleurs dès le XVIII^e siècle, pour évoquer ce nouveau regard porté sur les œuvres. Et la restauration de Notre-Dame dans ce grand mouvement qui a porté tant de chercheurs à son chevet, est un acte de *réparation*, parfois chirurgical, à la fois matériel et symbolique.

Si donc le titre de cette communication pouvait sembler plaisant, jouant sur les mots et confondant matériaux et humains, chimie et alchimie, ce jeu de mots n'est pas tout à fait innocent. L'incendie de Notre-Dame convoque un

des éléments essentiels de la pensée alchimique : le feu. La cathédrale a subi l'épreuve des flammes et de la combustion, réaction chimique complexe, peut-être LA réaction chimique par excellence, une des forces transformatrices de la matière, la plus puissante, en mal mais également en bien. C'est aussi une puissance symbolique ; certaines des interprétations de l'événement ont été parfois inspirées par une des dimensions mythiques du feu, celle du ciel qui s'abat, frappe et punit.

On retrouve donc, dans l'incendie du 15 avril 2019, certains des éléments fondamentaux de la pensée alchimique : le feu, le plomb, qui a fondu mais ne s'est pas transformé en or, quoique l'on puisse s'interroger à ce sujet, si l'on pense à la générosité des donateurs mais aussi aux sommes investies pour favoriser la recherche par le CNRS et le ministère de la Culture. Toute plaisanterie mise à part, rappelons quelques faits et éléments : chimie et physique sont partout dans les études en vue de la restauration de Notre-Dame et dans les projets de recherche qui se bâtissent pour et à partir de Notre-Dame. Je n'esquisserai ici que quelques pistes complétées par les interventions particulières.

Le feu a provoqué de nombreuses altérations chimiques des matériaux en présence, accompagnées bien sûr d'altérations physiques et mécaniques, comme le montrent les changements d'aspects et de couleurs de la pierre sur laquelle des phénomènes de rubéfaction ont entraîné des modifications de couleurs parfois importantes (*figure 1*).



Figure 1

Pierres altérées et rubéfiées lors de l'incendie de Notre-Dame de Paris.

L'incendie a provoqué la perte de la couverture en plomb de Notre-Dame, ce métal fondant à 360 °C, d'où d'importantes coulures et concrétions spectaculaires de ce matériau à travers les trous de boulins (*figure 2*), mais aussi sa transformation en oxydes. Sous forme de microbilles transportées par les fumées (*figure 3*), ces derniers se sont déposés sur tout l'intérieur de l'édifice et doivent être enlevés pour que soit rendue aux fidèles et au public une cathédrale saine et propre. Ces microbilles sont souvent venues s'ajouter à des plombs plus anciens, dus à la pollution automobile, ou à

la saleté produite par l'activité au sein de la cathédrale, ou encore parfois à des peintures au plomb, usées, supprimées et grattées mais qui restent dans l'édifice à l'état de traces. Le traitement des peintures murales qui sera évoqué dans sa double dimension technique et scientifique montrera le gain important de luminosité et de clarté qui en découlera. Il en va de même des vitraux qui feront l'objet d'une campagne de nettoyage, sinon de restauration.

Ce nettoyage implique aussi bien le métal des grilles que le bois du mobilier liturgique, les peintures murales que les



Figure 2

Coulures de plomb à travers les trous de boulins après l'incendie.

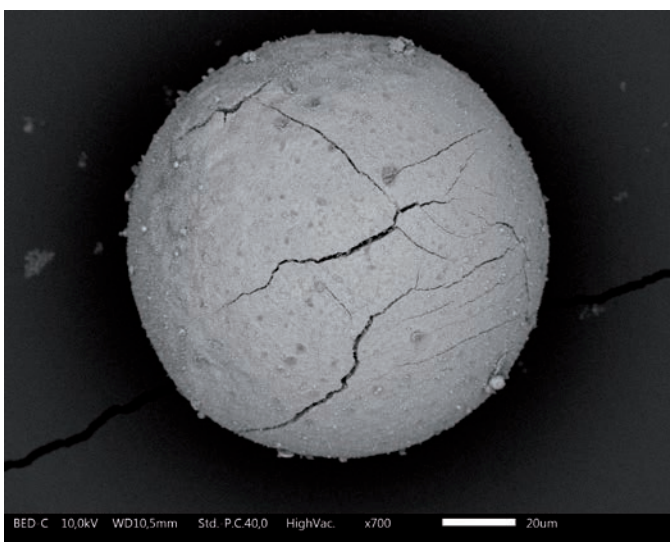


Figure 3

Microbille plombifère collectée sur la console de l'orgue après l'incendie de la cathédrale Notre-Dame. Sa morphologie témoigne de son origine : l'exposition à de fortes chaleurs entraîne la formation de particules sphériques en raison de la tension de surface appliquée sur le métal fondu (© LRMH © Godet).

vitraux où la pierre doit respecter le matériau patrimonial original. Comprendre les interactions entre le plomb, sous ce format post-incendie, et ces différentes matières a été au cœur des protocoles de nettoyage mais aussi d'une étude menée à l'heure actuelle avec le Domaine d'intérêt majeur d'Île-de-France. Une autre étude en cours avec le LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Système

Urbain de l'École des Ponts Paris-Tech), s'intéresse à la lixiviation du plomb – autrement dit son lessivage – pour mieux évaluer les risques que cela représente. Dans certains cas, par ailleurs, ce plomb a fusionné avec la pierre créant quasiment un nouveau matériau, grâce à la pseudomorphose, étrange phénomène étudié par Véronique Vergès-Belmin (*figure 4*).



Figure 4

Phénomène d'altération de la pierre et du plomb sous l'effet de la chaleur appelé pseudomorphose. © LRMH © Véronique Vergès-Belmin.

L'eau utilisée par les pompiers n'a pas moins altéré matières et édifice, en véhiculant différents matériaux à l'état de solutions, de même que celle, venue du ciel, qui a continué de pénétrer dans la cathédrale, altérant pierres, mortiers et autres matériaux, tant que l'échafaudage initial, tordu et soudé par l'incendie n'a pas été enlevé (*figure 5*). Lors des

nettoyages, il convient par conséquent d'éviter une surenchère de réactions chimiques, par des apports de sels, par exemple, à des matériaux qui, par l'eau et le feu, ont déjà été mis à mal. Le choix des compresses et des gels de nettoyage est donc très important (*figure 6*).

Les scientifiques qui se sont portés au chevet de l'édifice

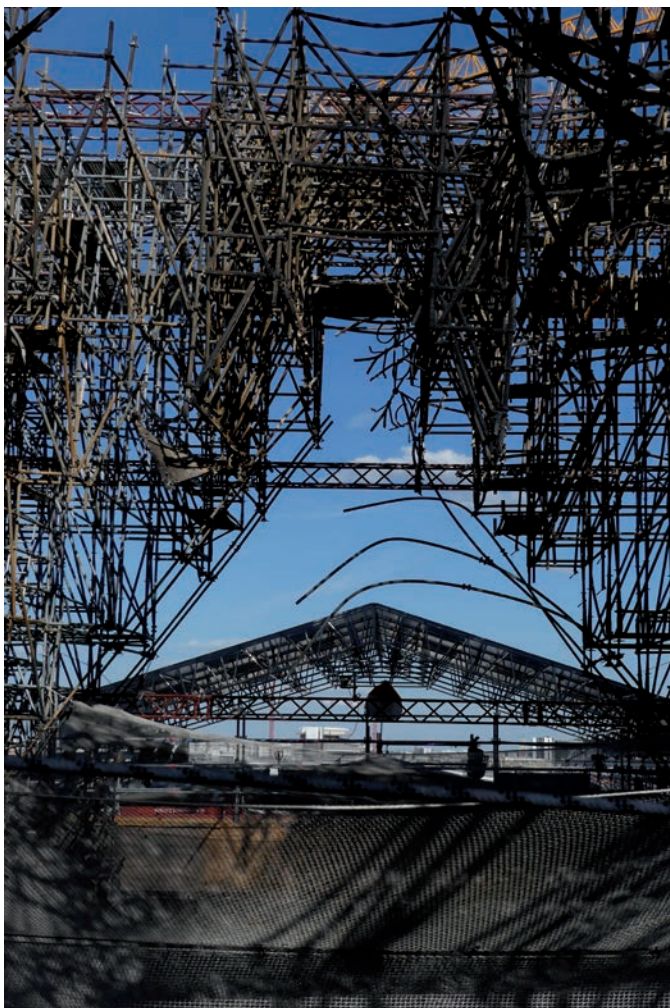


Figure 5

Vue de l'ancien échafaudage avant démontage. © LRMH.



Figure 6

Essais d'application de différents types de compresses afin de décontaminer et nettoyer les murs intérieurs de la cathédrale. © LRMH.

se sont ainsi trouvés confrontés à des altérations de nature diverse. C'est pourquoi Notre-Dame a vu se développer, au sein des neuf groupes évoqués en introduction, des recherches liées à la formation des sels, aux modifications de la pierre sous l'action du feu ; l'analyse des mortiers et de leur composition relève à la fois du constat d'état sur la cathédrale, de l'histoire des techniques constructives, et des matériaux du bâti, mais

aussi des questions liées à la restauration et à la sécurité. Ces mortiers appartiennent au passé mais engagent l'avenir.

Les bois calcinés de Notre-Dame constituent à certains égards une manne pour les chercheurs (*figure 7*). On peut souligner au passage l'importance de la documentation matérielle : lors d'une campagne menée dans les années 1990 par l'équipe de Georges-Noël Lambert, les carottes



Figure 7

Bois calcinés à des degrés divers issus des charpentes de Notre-Dame.
© LRMH.

dendrochronologiques réalisées à cette occasion ont été déposées à Bribacte et vont pouvoir être analysées et comparées à celles qui vont être faites sur les poutres calcinées et nouvellement tombées, afin de constituer un vaste tableau de l'opération. Des études isotopiques sont également prévues, permettant de comprendre d'où viennent les chênes, de connaître le climat dans lequel ils ont poussé ou les conditions de leur sylvi-culture.

Le métal n'est pas en reste. L'incendie a transformé la cathédrale en une sorte d'écorchée, faisant apparaître de nombreux éléments structurels (figure 8). C'est le cas des agrafes de Notre-Dame dissimulées jusqu'alors dans les murs bahuts et qui font l'objet d'une étude métallographique. Celle-ci confirme

une pose médiévale précoce dont parlera plus précisément Maxime L'Héritier. Dans le même domaine, l'analyse des produits de corrosion métallique liés à l'incendie – en étudiant grâce au Raman la présence d'hématite qui n'apparaît qu'à très haute température – peut donner des indications sur les températures atteintes dans la cathédrale (figure 9). L'étude des plombs de scellement, ceux des agrafes des murs bahuts ou des fenêtres hautes du chœur, en fait près de 400 plombs de construction de Notre-Dame au total, permet aussi d'affiner les datations en mettant en évidence différents groupes de composition, en signant des phases de pose distinctes et en permettant de mieux comprendre l'évolution des sources d'approvisionnement et les mélanges de



Figure 8

Réapparition de nombreux fers de scellements, chaînages etc. dans les murs de Notre-Dame à l'issue de l'incendie. © LRMH.



Figure 9

Fers corrodés de Notre-Dame. © LRMH © Aurélia Azéma.

matières, notamment le recyclage des couvertures.

Les différents intervenants de ce colloque vont développer ces points et enrichir ce survol introductif. Il est bien sûr regrettable qu'il ait fallu l'épreuve du feu et ce creuset

douloureux pour que toutes ces bonnes volontés s'associent de façon tout-à-fait unique et originale afin de mieux comprendre et œuvrer à la restauration de Notre-Dame : mais c'est aussi ça l'alchimie...

Notre-Dame de Paris : matériaux et reconstruction

Architectes en chef des Monuments Historiques.

1 Le matériau pierre

1.1. L'état des lieux après l'incendie

Lorsque l'incendie a eu lieu le 15 avril 2019, les charpentes en feu sont tombées sur les voûtes de la cathédrale et ont entraîné en partie leur effondrement. Sur la **figure 1**, les parties blanches sont les voûtes manquantes : la voûte¹ de la croisée qui s'est effondrée avec le tabouret de

la flèche, côté nef², l'effondrement d'un arc-doubleau³ lorsque la flèche s'est couchée sur les voûtes, et la perte d'un voûtain du transept Nord causée par la chute d'une ferme de charpente de Viollet-le-Duc. Il ne restait plus que des décombres sur les voûtes,

2. La nef est une salle d'une basilique ou d'une église allant du portail à l'hémicycle (pour la basilique), de la façade à la croisée du transept ou à l'entrée du chœur (pour l'église avec ou sans transept) et qui est fermée par deux murs latéraux.

3. Un arc-doubleau est un arc perpendiculaire à l'axe de la voûte et appuyé contre la face intérieure des murs.

1. Ouvrage de maçonnerie cintré, fait de pierres spécialement taillées, s'appuyant sur des murs, des piliers, des colonnes, et servant de couverture.

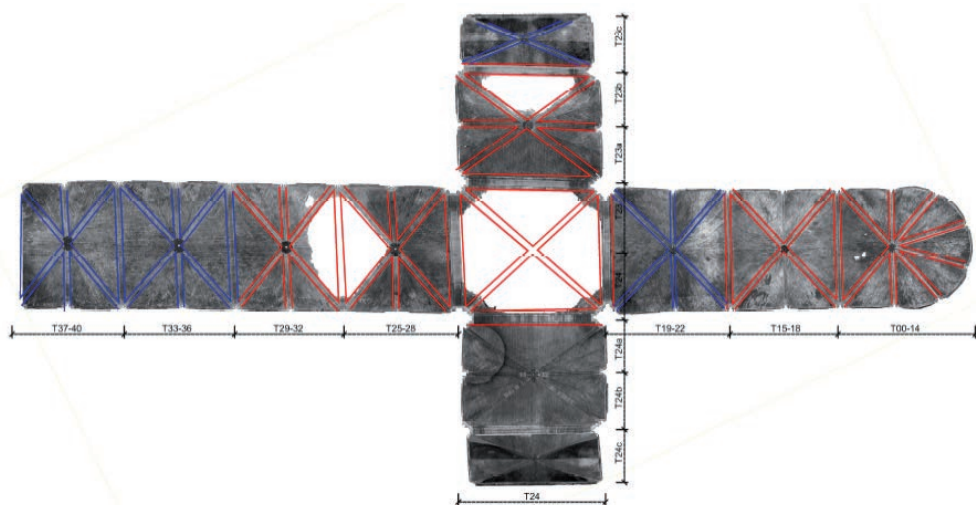


Figure 1

Les voûtes de Notre-Dame après l'incendie ; blanc : voûtes manquantes ; bleu : voûtes à mettre sur cintre ; rouge : voûtes fragilisées par l'incendie.

constitués de vestiges de bois et ferrures de charpente et de plomb fondu venant des couvertures. Les hautes températures et les eaux d'extinction ont aussi dégradé les parements de pierre des murs gouttereaux et l'extrados des voûtes malgré la présence d'une chape de plâtre qui protégeait ces dernières.

Les voûtes les plus dégradées par le feu mais encore en place sont indiquées en rouge sur la **figure 1** et ont été étayées par des cintres en bois, installés sous les arcs dans le cadre des travaux de sécurisation tandis que les zones bleues indiquent des voûtes moins dégradées qui n'ont de ce fait, pas toutes été étayées aujourd'hui.

La **figure 2** est une cartographie qui représente la modification de la topographie des voûtes avant et après incendie par comparaison des relevés

altimétriques. On distingue nettement des zones d'affaissement (en rouge) et de soulèvement (en bleu) des maçonneries consécutives aux mouvements qu'elles ont subis du fait de leur dilatation thermique liée aux hautes températures de l'incendie. En effet, les voûtains se sont dissociés des arcs puis sont retombés, refroidis par les eaux d'extinction (**figure 3**).

La phase de sécurisation de la cathédrale a duré près de deux ans pendant lesquels on a procédé à un déblaiement⁴, une aspiration des voûtes en extrados pour ensuite sécuriser les franges des parties effondrées (**figure 4**). Ces dernières ont été consolidées avec du plâtre fibré et de la filasse

4. Action de déblayer : débarrasser un lieu de ce qui l'encombre, l'obstrue.

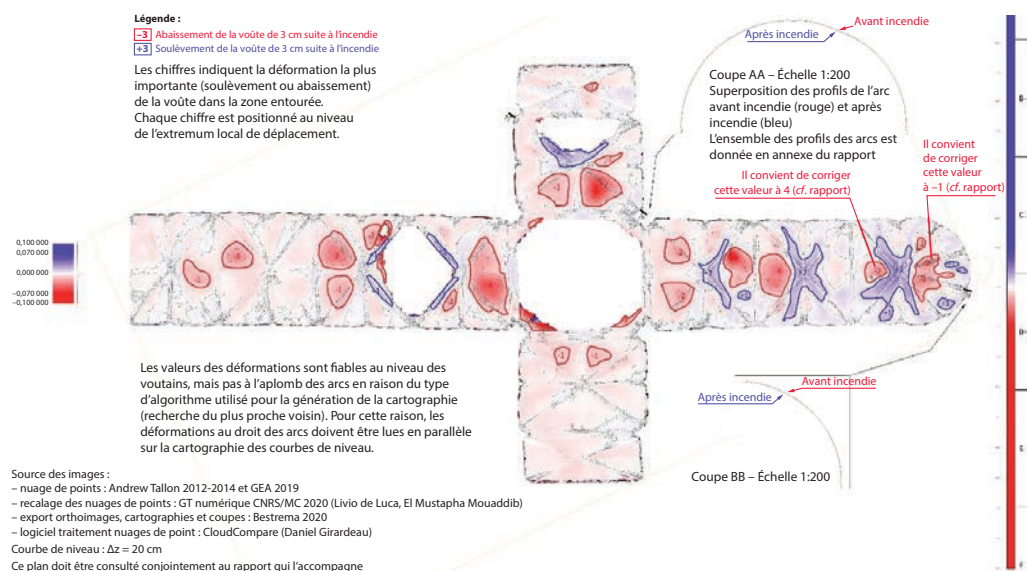


Figure 2

Cartographie des déformations des maçonneries après l'incendie.



Figure 3

Zone d'inflexion sur un voutain du chœur.

pour encapsuler les voussoirs (pierres qui constituent les voutains) qui menaçaient de tomber, et pour permettre ensuite une intervention

sécurisée par le dessous pour le montage des échafaudages intérieurs et des cintres en bois que l'on peut voir sur la **figure 5**.

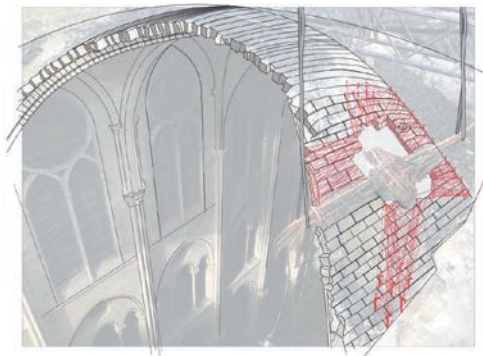


Figure 4

Consolidation des franges lacunaires par le dessus.

Figure 5

Croisée du transept vue de l'intérieur de la cathédrale pendant la consolidation.



Pendant la phase de sécurisation, la maîtrise d'œuvre a dressé un diagnostic des parties altérées : principalement des voûtes et des murs affectés par l'incendie mais également des pignons du transept.

Certains désordres étaient antérieurs à l'incendie mais ils concernaient surtout les ouvrages extérieurs. Concernant l'intérieur (figure 6), les désordres principaux constatés étaient des affaissements



Figure 6

Mur bahut, angle sud-ouest et extrados du chœur.

ponctuels des voûtains, des fissures, des déplacements⁵ ou délaminations et des dégradations physico-chimiques de la pierre, identifiables par des changements de couleur corrélés à leur exposition aux températures de l'incendie, phénomènes concernant à la fois les murs bahuts et les voûtes. Certaines couleurs correspondent à des températures d'exposition de l'incendie qui étaient de l'ordre de 1 000 °C, ce qui a été confirmé par l'analyse des charbons de bois incendiés (par spectrométrie Raman, *figure 7*)⁶.

Le même travail de cartographie réalisé sur l'intrados des voûtes montre (*figure 8*) des pathologies différentes car pendant très longtemps, il y a eu des résurgences d'humidité liées aux infiltrations

de l'eau des pompiers et de leur exposition aux intempéries. Cela a entraîné des cristallisations de sels dans les zones d'évaporation à la surface de l'intrados, notamment la transformation des pierres calcaires des voûtains en gypse caractérisée par une dégradation de l'épiderme de la pierre mais aussi par une perte des nus de taille qui constituent la mémoire des mises en œuvre et techniques anciennes/historiques.

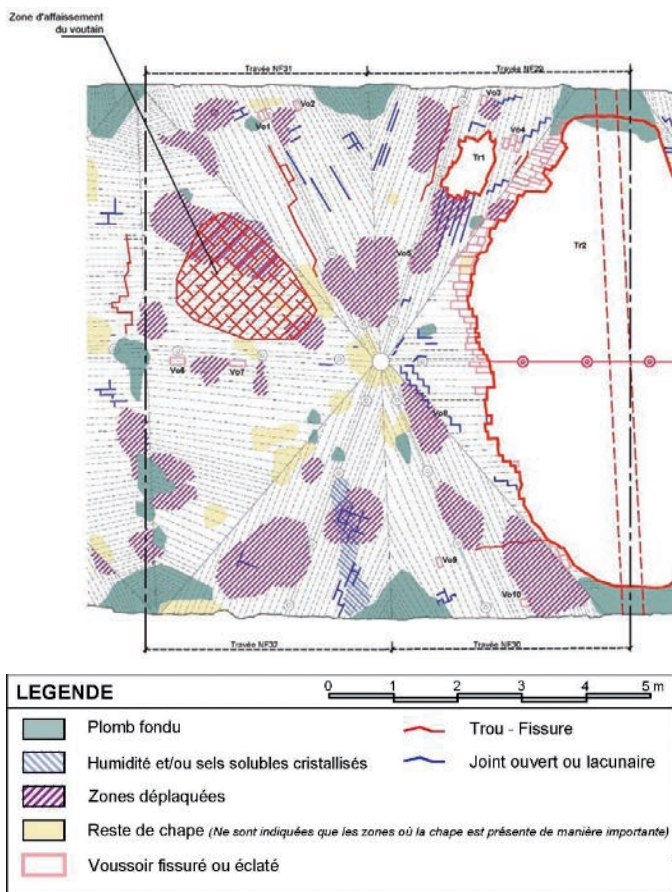
Il faut savoir que les eaux d'extinction de l'incendie, le choc des charpentes et le feu ont dégradé la chape de plâtre qui avait pour objectif de protéger les voûtes de l'incendie. Ces dernières constituant elles-mêmes un bouclier contre le risque d'incendie des charpentes. Un certain nombre de grandes cathédrales françaises au cours de l'histoire ont brûlé : la cathédrale de Reims

5. Rupture d'adhérence entre la surface de la pierre et sa profondeur.

6. J.-N. Rouzaud et D. Deldicque.

Figure 7

Exemple de cartographie dressée par la maîtrise d'œuvre des pathologies identifiées sur l'extrados des voûtes.



au xv^e siècle, ayant à nouveau brûlé durant la Première Guerre mondiale ; la cathédrale de Metz au xix^e siècle, celle de Chartre aussi... ces catastrophes sont malheureusement statistiquement récurrentes. Pour améliorer la protection des voûtes contre le feu, ces chapes de plâtre ont donc été mises en œuvre probablement assez tôt dans l'histoire et probablement de manière systématique au xix^e siècle (ordonnance d'Henri IV ayant décidé d'habiller tous les pans de bois en plâtre pour limiter les risques d'incendie à l'intérieur de la ville).

Le problème, à Notre-Dame de Paris, est que le plâtre a été dissous par les eaux d'extinction de l'incendie, qui elles-mêmes comportaient vraisemblablement des adjuvants à base de sels pour optimiser leur efficacité. Quand l'eau s'est évaporée, ces sels ont cristallisé dans la zone d'évaporation de l'intrados de la voûte comme on peut le voir sur la **figure 9** (présence de gypse mais aussi de sels solubles hygroscopiques et expansifs – sulfate de sodium, nitrate de potassium/ salpêtre...).

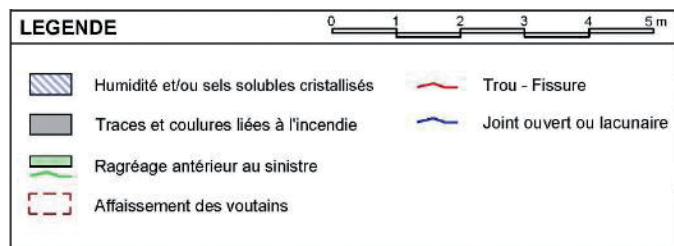
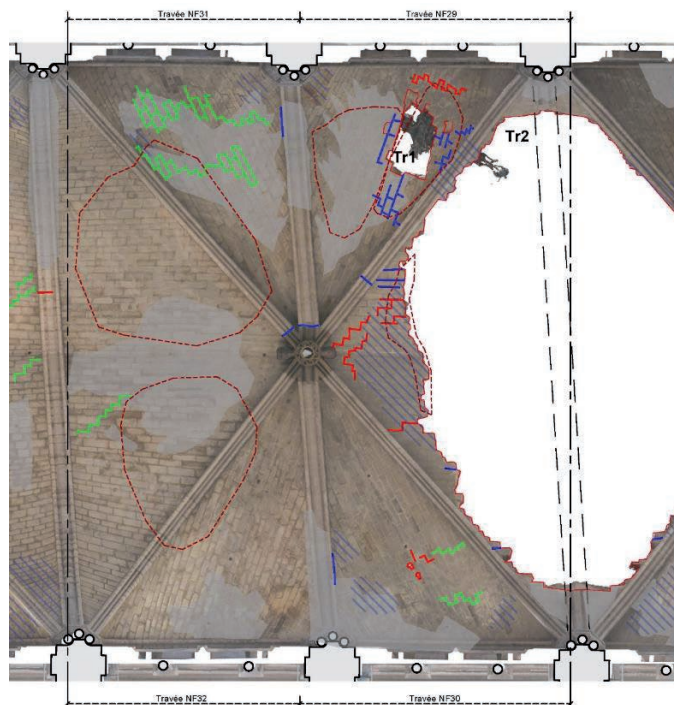


Figure 8

Cartographie des pathologies en intrados.



Figure 9

Zone d'humidité importante (à gauche) de l'intrados de la voûte et cristallisation des sels (à droite).

La saturation des sels dans le système poreux fait éclater l'épiderme de la pierre, avec des desquamations⁷ pour conséquence (*figure 10*). Cette pathologie a été accentuée à Notre-Dame par le fait que les joints avaient été refaits au XIX^e siècle avec des mortiers hydrauliques assez étanches et que l'évaporation s'est donc faite essentiellement par la pierre.

Ce phénomène de dégradation évolutive (constitution de gypse à partir des sulfates libérés par la chape de plâtre ; le gypse cristallisant à 98 % d'humidité) ou cristallisation des sels solubles lors des périodes d'assèchement des voûtes (étés 2019-2020) sont récurrents, du fait de la difficulté de bien étancher le bâtiment et plus particulièrement,

7. Élimination des couches superficielles de l'épiderme sous forme de petites lamelles (squames).

la zone de la croisée du transept, ce en raison du grand échafaudage (démonté en 2021).

Pour préciser notre diagnostic, plusieurs études scientifiques ont été menées en partenariat avec des laboratoires d'analyse des matériaux privés sous le contrôle du LRMH et des architectes.

1.2. Analyses de la nature et de l'état des pierres

La cartographie radar (*figure 11*) de quatre assises de l'élévation du mur bahut intérieur met en évidence des zones plus ou moins denses d'anomalies, repérées après l'incendie à différentes profondeurs : de 0 à 5 cm affectant à peu près 80 % du parement, anomalies ponctuelles sur 5 à 10 cm de profondeur et des anomalies profondes plus rares entre 10 et 17 cm de



Figure 10

Desquamation de l'épiderme et joints anciens perméables.

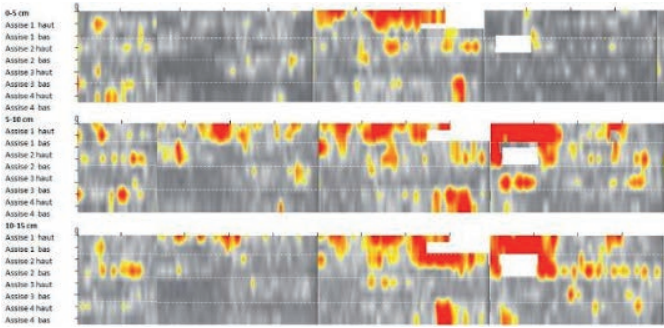


Figure 11

Cartographie des discontinuités les plus marquées par tranche de profondeur.

profondeur (moins de 5 % de l'altération du mur). Ces dernières restent très localisées autour des événements (zones d'aération). C'est le cas notamment des zones qui apparaissent en rouge, qui correspondent à des points où le feu était particulièrement oxygéné.

Il faut savoir que les zones des murs bahuts correspondent au bas des voûtes, et que les charpentes qui se sont effondrées, se sont fragmentées puis ont roulé vers le bas des voûtes où elles se sont consumées. Il y a donc eu des brasiers et des températures élevées au pied des murs bahuts et le long de la périphérie de ces murs pendant un temps relativement long et donc, une altération plus importante des parements verticaux. Les délaminations sont la conséquence de contraintes de cisaillement à l'interface entre la pierre chaude et la pierre froide.

L'épaisseur des voûtes a perdu 2 à 3 cm à l'extrados au contact du feu. Il y a eu d'abord une dilatation thermique de l'épiderme de la pierre puis un

retrait lors du refroidissement, entraînant une fissuration interne parallèle au parement et un déplacement. Ce constat a été fait sur les voûtes et dans des proportions plus importantes sur les murs bahuts (fissurations plus profondes). Actuellement, un consortium scientifique travaille en parallèle de la maîtrise d'œuvre, notamment des voûtes, en modélisant leur comportement structurel en relation avec leur exposition à des températures d'incendie pendant une période donnée (1000 °C pendant 1 heure, 500 °C pendant 5 ou 6 heures) puis après exposition aux eaux d'extinction.

Des carottages ont été effectués afin d'identifier les caractéristiques de la fissuration (orientation, profondeur, etc.) mais aussi afin d'analyser l'évolution des propriétés physiques (résistance, porosité, etc.) des pierres en œuvre. Ces études ont été réalisées par les laboratoires LRMH (Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques)

et BPE. Ils ont nourri le projet de restauration de la maîtrise d'œuvre, notamment les hypothèses de résistance des murs aux contraintes des charges transmises par la toiture (**figure 12**).

Ces carottages réalisés sur des zones représentatives des murs bahuts ont permis de conclure au maintien en place des maçonneries dégradées, seules certaines pierres ayant un rôle structurel spécifique étant remplacées (supports des pièces de charpente). Ils ont aussi permis d'identifier la nature des pierres en œuvre pour trouver les pierres de substitution. La **figure 13**, montre les transformations de faciès des pierres en œuvre en fonction de la température de l'incendie.

La cartographie de la **figure 14** présente l'origine de l'ensemble des pierres utilisées dans la cathédrale. Néanmoins, la plupart des carrières médiévales et celles utilisées par Viollet-le-Duc⁸ au XIX^e sont maintenant fermées et il faut recourir à d'autres carrières dont les pierres présentent des caractéristiques identiques.

Une campagne de recherche a donc été menée en partenariat avec le BRGM pour trouver ces carrières et des pierres ayant des caractéristiques compatibles par leur aspect et leurs propriétés physico-chimiques à celles d'origine.

8. Eugène Viollet-le-Duc : architecte français mort en 1879 ayant restauré Notre-Dame de Paris et plusieurs autres monuments.



Figure 12

Après carottage, analyse pétro-physiques des maçonneries.

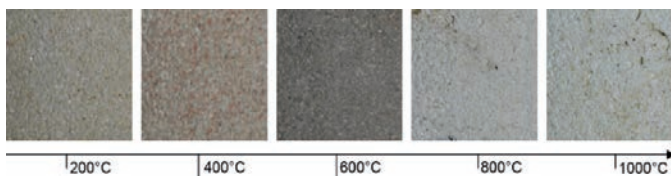


Figure 13

Transformation des faciès des pierres en œuvre en fonction de la température de l'incendie.

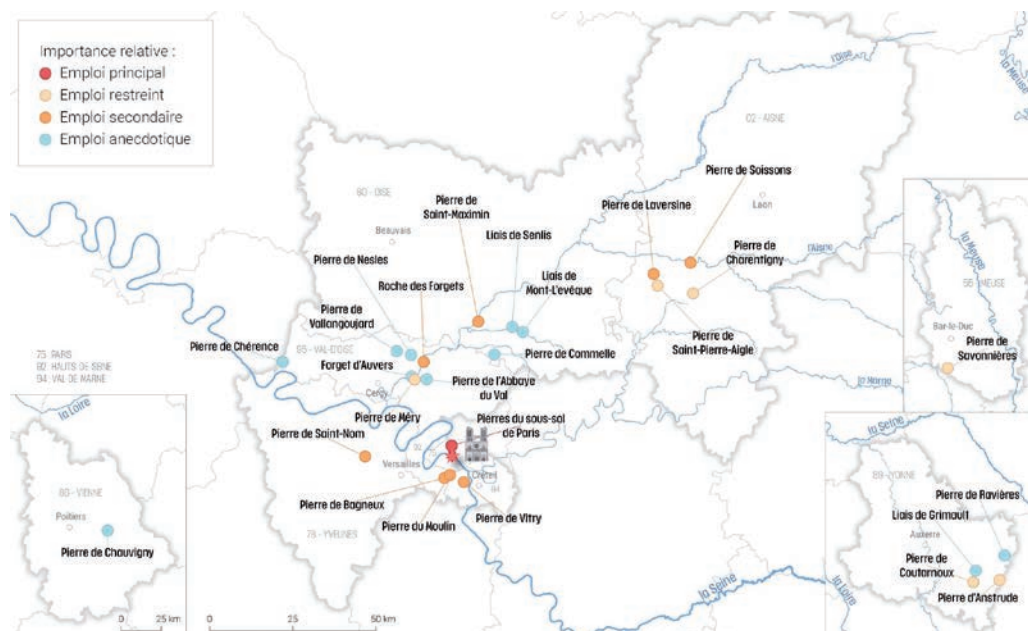


Figure 14

Cartographie des carrières des pierres en œuvre à Notre-Dame de Paris.

Par exemple, la résistance à la compression des claveaux d'origine étant de l'ordre de 39 à 52 MPa (mégapascals), la pierre de substitution ayant les caractéristiques les plus proches – y compris du point de vue de l'aspect – s'est avérée être celle de la carrière de la Croix Huyart (près de Soissons), laquelle oscille entre 31 et 50 MPa⁹. Pour ce qui est des voussiers existants, leur résistance à la compression est de 4 à 9 MPa et la pierre de substitution ayant les mêmes caractéristiques est une pierre de Saint-Maximin (roche franche fine ou roche fine) dont la résistance oscille entre 6 et 10 MPa. La plupart de ces études montrent qu'il y

a des différences de densité et de résistance à l'écrasement dans les pierres utilisées.

Les caractéristiques mécaniques des pierres ne peuvent pas être reliées de façon catégorique à leur localisation dans la construction des arcs et le caractère aléatoire de leur utilisation est certainement lié à une logique d'approvisionnement plus qu'à un choix structural. Ainsi les claveaux (pierres qui constituent l'arc) les plus denses ne sont-ils pas forcément utilisés dans les parties basses des arcs, pourtant les plus sollicitées, ni les plus légères dans les parties hautes. Il en va de même pour les voussiers qui constituent les voûtains.

Les carrières de pierre ont donc évolué : au Moyen Âge,

9. 1 MPa = 10 Bar.

elles étaient à Paris à proximité du chantier, au XVIII^e siècle dans les environs très proches, dans le Vexin. Au XIX^e siècle, Viollet-le-Duc a quant à lui élargi les choix des gisements de pierre pour faire face aux besoins conséquents de son chantier de reconstruction.

1.3. Projet de reconstruction et de restauration

Après ces différentes études menées sur les pierres, l'analyse de projets analogues de reconstruction a permis une familiarisation avec les problématiques de reconstruction des voûtes qui n'avaient plus été pratiquées depuis la Seconde Guerre mondiale. Les travaux de restauration des grandes cathédrales, notamment dans le nord de la France, consécutifs aux destructions des deux guerres mondiales sont comparables aux problématiques de Notre-Dame de Paris aujourd'hui. La **figure 15** présente la reconstruction des voûtes de la cathédrale de

Soissons dans les années 1930 et montre la pose des claveaux sur les cintres en bois.

La **figure 16** présente le projet de reconstruction de la voûte de la croisée : des cintres de bois principaux reliés entre eux par des cerces (cercles de bois) secondaires qui permettront de régler la forme des voûtains et aux maçons d'intervenir.

1.3.1 Restauration et consolidation des voûtes

A) DESSALEMENT

Une intervention d'urgence a dû être programmée afin de sauvegarder et de dessaler le parement de l'intrados des voûtes. Un schéma de la méthode utilisée est décrit en **figure 17**. Elle consiste à appliquer une compresse (sorte d'enduit sacrificiel) à base de sable et de kaolin contre la paroi des voûtes. Les sels sont absorbés par cette compresse dans laquelle ils migrent, ce qui permet d'éviter la dégradation de la pierre, notamment la transformation du calcaire en



Figure 15

Exemple de la cathédrale de Soissons vers les années 1930 : reconstruction des voûtes de la nef, pose des voussoirs à la cerce mobile.

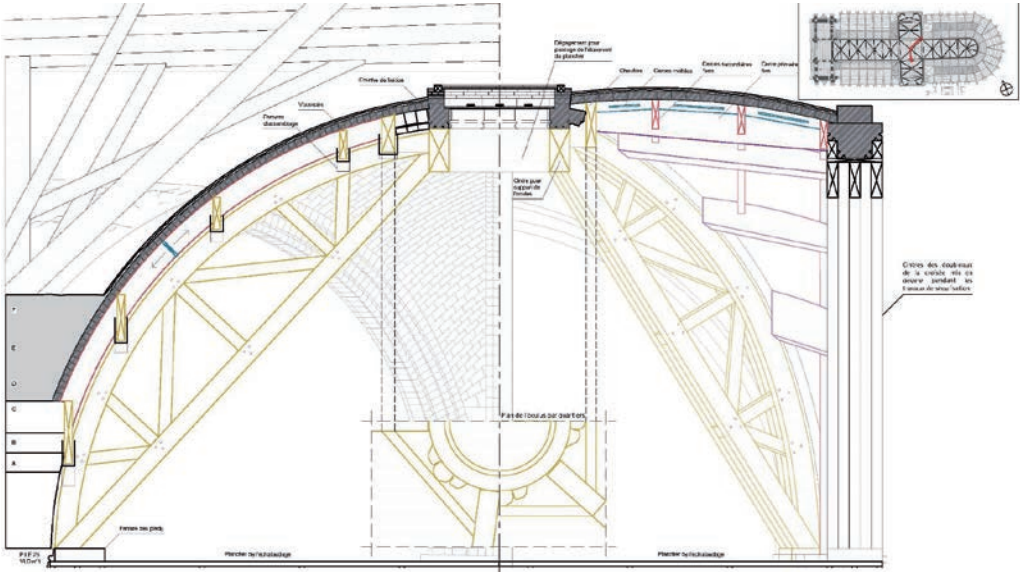


Figure 16

Projet de remontage : voûte de la croisée.

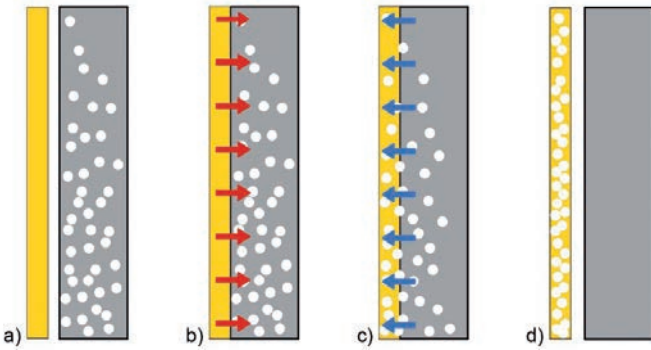


Figure 17

Schéma de principe du dessalement des pierres par une compresse d'argile blanche.

gypse par les sulfates libérés par le plâtre.

Avant l'application des compresse, une première intervention consiste à éliminer les parties dégradées des parements par brossage (gypse) puis

à purger les joints de finition au mortier hydraulique afin d'assurer une surface d'application continue pour les compresse. La compresse est appliquée non seulement dans les parements de pierre mais aussi dans

les espaces laissés libres par la suppression du mortier des joints, ce qui permet d'optimiser son action sur les sels.

L'intérêt majeur de la compresse a été sa grande résistance à la pression des cristallisations de sels, lui permettant d'adhérer pendant plusieurs mois et d'éviter toute nouvelle formation de gypse dans les parements de pierre. Cette compresse a aussi permis d'éliminer des sels solubles délétères qui auraient pu contribuer à la dégradation des parements.

Le processus de dessalement par compresse doit être renouvelé jusqu'à ce que les taux des sels solubles diminuent en dessous des seuils pathogènes.

Il n'a cependant pas été nécessaire de renouveler les compresses, hormis dans les zones inondées accidentellement par des orages et qui ont eu pour conséquence leur dissolution.

L'objectif de cette intervention est de mettre les voûtes à l'abri de la dégradation par les sels/gypse jusqu'au moment de leur restauration.

La purge des mortiers de finition a permis de constater que l'état d'une proportion importante des joints de pose des voussoirs était très mauvais. Cet état dégradé est en partie dû au traumatisme des voûtes sous le choc de l'effondrement des charpentes, à la fragmentation consécutive à la dilatation thermique des voûtains exposés aux hautes températures de l'incendie, enfin au lessivage des mortiers de chaux aérienne qui les constitue, par les eaux d'extinction

de l'incendie, puis par les eaux pluviales dans les zones exposées aux intempéries.

B) CONSOLIDATION

Pour rendre aux voûtes leur capacité structurelle amoindrie par l'incendie, leur renforcement et la reconstitution de leur épaisseur initiale (qui a été réduite d'environ 20 % par les déplacements) ont été proposés. Une chape de chaux fibrée recouvrant l'extrados a été mise en œuvre et est ancrée dans les joints afin d'optimiser son adhérence en lui donnant un meilleur accrochage avec la voûte pour fonctionner un peu comme un système réticulé en relation avec les voussoirs.

La chaux sélectionnée contient de la pouzzolane¹⁰ afin de lui donner l'hydraulicité qui permet sa résistance. Enfin, il est suggéré de protéger cette chape et la voûte restaurée par une chape de plâtre contre les conséquences d'un éventuel incendie.¹¹

Dans les zones d'affaissement des voûtes, la résistance pourra être renforcée avec un filet armé, connecté avec des goujons en fibre de verre, scellés dans les joints.

1.3.2. Restauration des murs bahuts

Les murs bahuts constituent la partie supérieure qui se situe

10. La pouzzolane est une roche volcanique légère et poreuse.

11. Cette chape de plâtre a finalement été abandonnée, son usage n'étant plus nécessaire du fait de l'élaboration du dispositif de protection incendie de la charpente restituée et au regard du risque de re-pollution des voûtes en cas d'exposition accidentelle à l'eau.



Figure 18

État avant (à gauche) et après (à droite) restauration (chantier test préalable aux travaux).

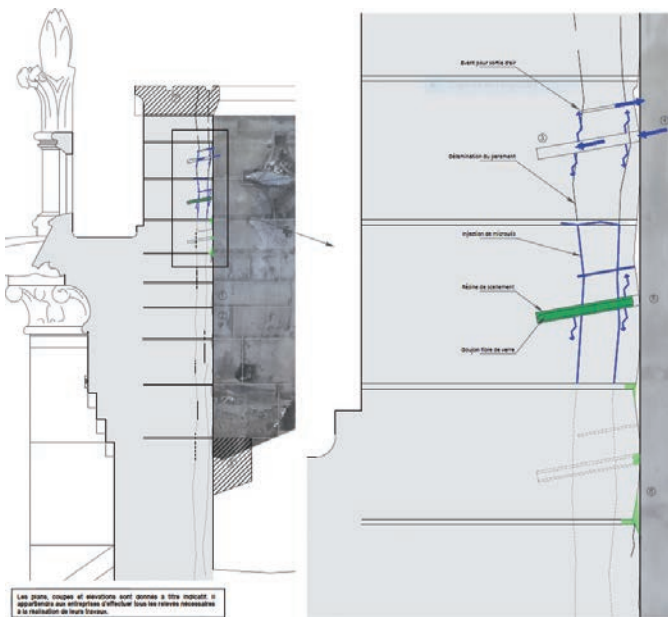


Figure 19

Principe de consolidation/ restauration des murs bahuts.

au-dessus des voûtes. Puisque les altérations n'affectent pas leur capacité structurelle, il a été préconisé de conserver/figer l'état d'altération des parements en se limitant à une opération de consolidation. Cette dernière est formalisée par un protocole dont l'objectif est de solidariser à nouveau les éléments déplaqués par les

hautes températures de l'incendie. Il commence en premier lieu par un dépoussiérage fin des parements afin d'identifier les zones fissurées et/ou déplaquées. Il faudra ensuite réaliser une première série de forages à travers les pierres déplaquées, avec une faible pente vers l'intérieur, pour injecter un coulis de micro-mortier thixotropique

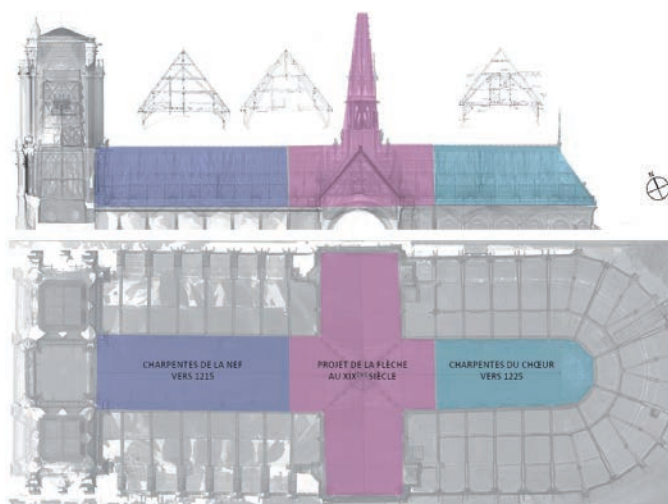


Figure 20

La forêt : les charpentes de Notre-Dame de Paris.

de chaux (LEDAN TA2) qui se diffusera dans le réseau de fissures. Une seconde série de forage permettra alors de sceller des tiges en fibre de verre à la résine ; elles maintiendront les couches déplaquées sur les parties saines/stables de la pierre (figure 19).

La dernière intervention sur la structure des murs bahuts concernera les pierres sommitales aussi appelées pierres d'arase qui seront remplacées en totalité en pierre neuve. Leur état étant particulièrement dégradé du fait de leur exposition sur deux faces à l'incendie, leur conservation n'était plus envisageable pour répondre à leur objectif premier, à savoir : servir de base à la charpente restituée.

2 Le matériau chêne

Le matériau chêne intervient dans la reconstruction des charpentes de la cathédrale

Notre-Dame de Paris : à la fois dans les charpentes qui avaient été érigées au XIX^e siècle (la flèche et les bras de transept), mais aussi dans les charpentes disparues qui dataient du Moyen Âge (le chœur et la nef).

2.1. La forêt disparue

Ce que l'on appelle la forêt n'est pas un seul ensemble de charpente mais finalement trois ensembles issus de périodes de construction distinctes (figure 20) :

- les charpentes de la nef, édifiées aux alentours de 1215 ;
- les charpentes du chœur, construites vers 1180, puis démontées et reconstruites vers 1225, ce dernier état ayant subsisté jusqu'au soir de l'incendie ;
- les charpentes de la flèche, des transepts et des travées de la nef et du chœur les plus proches de la flèche, reconstruites entre 1858 et 1864 par Viollet-le-Duc.

Le dessin de la flèche de Viollet-le-Duc était inspiré de celui de la flèche du XIII^e siècle, tel que l'avait analysé et compris l'architecte. De même, il s'était inspiré de celui des charpentes gothiques du chœur pour composer les charpentes des bras du transept.

Les dispositions des charpentes médiévales qui couvraient les bras de transept sont totalement inconnues.

L'ensemble Viollet-le-Duc (flèche et bras de transept) et l'ensemble médiéval (chœur et nef) avaient en commun la nature des bois en œuvre, d'excellente qualité : des bois de brin, très droits, comportant très peu de défauts et très peu de nœuds. Entre les deux ensembles, la technique de transformation diffère : la flèche et le transept étaient réalisés en bois de sciage, issus d'un sciage mécanique à vive arête (*figure 21*) alors que les bois du chœur et de la nef étaient des bois verts (frais d'abattage) taillés manuellement, à la doloire.

L'intervention d'Eugène Viollet-le-Duc au XIX^e siècle sur la toiture de la cathédrale Notre-Dame de Paris formait un ensemble cohérent, indissociable structurellement. Dans cette logique, la CNPA¹² qui s'est tenue le 9 juillet 2020, a opté pour un parti de reconstruction global de cet ensemble, à savoir, sa restitution à l'identique.

« La Commission nationale du patrimoine et de l'architecture approuve à l'unanimité le parti de restauration proposé

consistant à rétablir l'architecture de Viollet-le-Duc, notamment en ce qui concerne la couverture et la flèche, dans le respect des matériaux d'origine : le chêne pour la charpente et le plomb pour la couverture. »

Pour les charpentes dites médiévales, la CNPA, qui s'est tenue le 25 mars 2021, a opté pour un parti de reconstruction en reconstitution raisonnée.

« À l'unanimité moins quatre abstentions, la Commission nationale du patrimoine et de l'architecture se prononce en faveur de la proposition [...] de restauration en reconstitution raisonnée, consistant en une reconstitution fidèle des charpentes, dans leur état Viollet-le-Duc pour le transept et la flèche, et dans leur état médiéval pour la nef et le chœur, sans reproduire les éléments correspondant à des modifications ou réparations de la charpente originelle, destinés à pallier



Figure 21

Les bois du fût de la flèche.

12. Commission Nationale du Patrimoine et de l'Architecture.

des accidents survenus au fil du temps et qui n'auraient plus d'utilité pour la stabilité de l'ouvrage. Concernant la découpe du bois, elle valide le principe d'un façonnage par sciage pour la charpente de la flèche et du transept, et d'un dégrossissage par sciage puis d'une finition manuelle pour la charpente de la nef et du chœur. »

2.2. La restauration des charpentes

La restauration des charpentes a pour objectif la restitution, le plus fidèlement possible, des charpentes disparues dans leur état de référence mais également la restitution des savoir-faire, façons et procédés ancestraux utilisés et mis en œuvre à l'occasion de la construction originelle des charpentes incendiées. Ils sont en effet indispensables à la bonne satisfaction de l'objectif de restitution fidèle des ouvrages de charpente disparus, enjeu principal de cette opération.

Les très bonnes caractéristiques mécaniques du chêne (grande résistance mécanique et souplesse), en font un matériau parfaitement adapté aux contraintes de l'édifice. L'usage de bois longs est généralisé : les pièces de plus de 13 m de longueur sont courantes (extraits notamment).

Les observations sur les ouvrages (charpentes gothiques et charpentes du ^{XIX}^e siècle) montrent que la conception des charpentes va de pair avec l'emploi parfaitement maîtrisé du matériau bois. Celui-ci, loin d'être homogène, continue de vivre de nombreuses années

après abattage. Le bois est donc largement tributaire de son mode d'abattage, de sa taille et de son séchage.

L'emploi de bois de brin, soigneusement choisi et taillé à la hache en respectant le fil du bois, permettant un excellent contrôle des déformations au séchage, et garantissant à terme un usage optimisé de ses propriétés mécaniques, semble avoir garanti la longévité des charpentes gothiques.

La stabilité de la flèche a quant à elle été garantie pendant cent cinquante ans par l'emploi de bois secs ou ressuyés parfaitement choisis, donc maîtrisés et stables quant à leurs variations dimensionnelles et géométriques.

Les deux usages procèdent de la même logique : une maîtrise et une connaissance approfondie du matériau, dans un processus de prélèvement et de transformation donnés et totalement contrôlés.

Enfin, le chêne est un matériau noble, durable et dont la culture s'inscrit dans une tradition nationale comme nous le verrons ci-après.

La restitution des charpentes est rendue possible grâce à une très grande quantité de documents issus de sources variées et complémentaires.

L'état de la connaissance des charpentes et couvertures disparues s'avère remarquablement complet.

Les sources authentiques sont d'une grande variété :

- dessins originaux de projet (pour les travaux du ^{XIX}^e siècle) ;
- nombreux vestiges ;
- descriptions écrites ;

- descriptions graphiques (relevés bi-dimensionnels et tri-dimensionnels) ;
- milliers de photographies, larges ou de détails ;
- mémoires vivantes (couvreurs, charpentiers, architectes) ;
- savoir-faire technique (charpentiers, couvreurs, mais aussi ingénieurs, forestiers, ...).

Ces sources offrent une description quasi exhaustive des ouvrages :

- pour les charpentes gothiques, sont ainsi connus :
 - les développements et évolutions historiques ;
 - la description géométrique complète ;

- les modes constructifs (assemblages, caractéristiques et taille des bois) ;
 - le comportement statique ;
 - l'état sanitaire avant incendie ;
- pour les charpentes XIX^e siècle, on atteint le même niveau d'information que pour les charpentes gothiques.

La **figure 22** est un extrait du relevé réalisé par Rémi Fromont et Cédric Trenteseaux en 2014.

Le relevé de 2014 (**figure 22**), donne des informations à la fois sur la géométrie générale de l'ouvrage mais aussi sur les sections qui étaient employées, sur la nature des

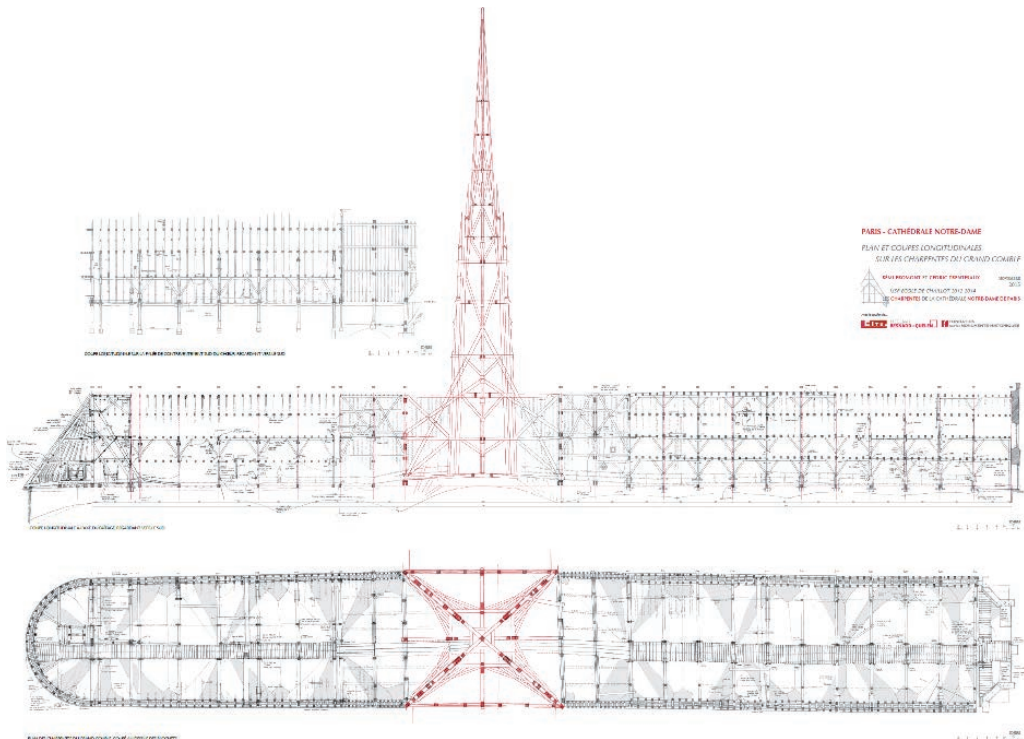


Figure 22

Les charpentes du chœur et de la nef : un exemple de la richesse des données sur les détails de la charpente.

assemblages, sur certaines pathologies.

Le projet de la flèche était lui aussi extrêmement bien documenté, notamment grâce aux archives de Bellu, le charpentier de Viollet-le-Duc au XIX^e siècle. Les plans d'exécution de la flèche, réalisés par Bellu, ont été conservés à la médiathèque de l'architecture et du patrimoine de Charenton-le-Pont. Ces documents, extrêmement précis et parfois cotés au millimètre, ont permis de redessiner et comprendre certaines subtilités de la structure de la flèche.

Le projet de reconstruction de la flèche et des charpentes de la cathédrale Notre-Dame de Paris découle donc d'une analyse détaillée des ouvrages disparus, par une équipe variée et complémentaire dans les profils qui la composent : architectes, ingénieurs, charpentiers, spécialistes du matériau bois ou chercheurs,

forestiers, dendrochronologues. L'étude de la somme de documentations dont nous disposons nous a permis de comprendre davantage la charpente disparue en avril 2019 et de la redessiner avec précision, y compris les assemblages qui la composaient (*figure 23*).

Notre analyse a également porté sur la compréhension des quelques pathologies que l'on pouvait constater dans cette structure.

L'exemple suivant (*figure 24*) montre un assemblage reliant dans la longueur (par enture) des poteaux arêtiers, pièces longilignes qui s'élèvent jusqu'au sommet de la flèche. On constate dans cet assemblage qu'une des deux pièces s'est comme enroulée sur elle-même (on dit qu'elle est vissée), menant à l'ouverture de l'assemblage.

On retrouve certains exemples de cette pathologie dans les vestiges de l'incendie (*figure 25*).

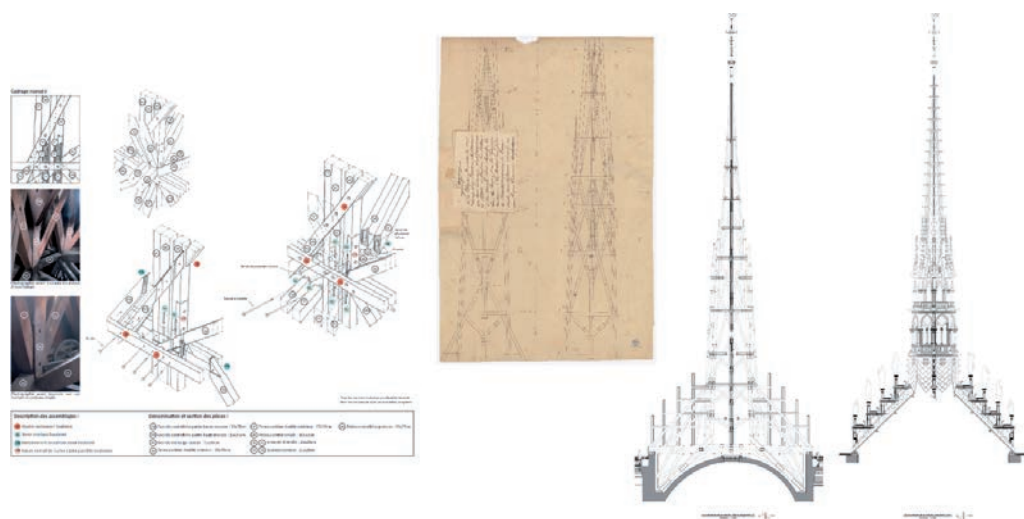


Figure 23

Les charpentes de la flèche et du transept.

Ce défaut est inhérent au matériau même. Il s'agit d'un comportement du bois qui se déforme lors de son développement : il est donc possible de déceler ce défaut lorsque l'arbre est sur pied mais aussi au moment du choix de l'arbre. Sur la **figure 26**, la grume est torse, le défaut est présent avant même que la pièce n'ait été taillée et mise en œuvre. Le choix de la matière première est donc indissociable du projet de conception de la restauration.

L'analyse des défauts à proscrire nous a conduits assez naturellement à élaborer un cahier des charges permettant d'orienter la sélection des bois et d'identifier les pièces de charpente les plus sollicitées sur lesquelles des défauts devaient absolument être proscrits. Ce cahier des charges s'orientait vers des bois très droits, non nerveux, au port centré, peu décroissants, c'est-à-dire dont le diamètre en tête diffère peu du diamètre en pied, sans branches mortes ou alors des branches qui n'avaient pas des diamètres importants dans la longueur utile, purgés de tous les défauts que l'on peut imaginer (la roultre¹³, la gélivure¹⁴, la pourriture) et dont l'abattage se déroulerait en période de sève basse.

En effet, il est traditionnellement important d'abattre les arbres en période de sève basse (période hivernale), pour éviter les attaques d'insectes

lignivores¹⁵, la présence de sève favorisant les piqûres. Le chêne étant un matériau vivant, les arbres exempts de défauts correspondent à une culture du matériau bien spécifique, dont la France possède le savoir-faire. La sylviculture est l'art de conduire la forêt de façon durable en contrôlant la croissance des arbres pour pouvoir les utiliser dans un usage précis. L'art de la sylviculture, théorisé sous Colbert¹⁶, apparaît surtout pour produire des bois capables d'approvisionner la production de tonnellerie et de charpente de Marine.

Cet art participe également à la régénération de la forêt : l'abattage a lieu à une période contrôlée, décidé par des experts forestiers ou techniciens de l'ONF qui conduisent la croissance des arbres sur plusieurs générations. Ainsi, l'abattage d'une parcelle permet-il à des petites pousses (**figure 27**) de trouver leur place et de pousser de la façon la plus rectiligne possible en allant rapidement chercher de la lumière. Un exemple d'une des plus belles forêts de France correspondant à ce type de culture des chênes (en futaie régulière, **figure 28**), est la parcelle de la Futaie des clos, dans la forêt de Bercé dans la Sarthe. Il s'agit d'une forêt domaniale protégée, composée de sujets extraordinaires par leur dimension et régularité et dont aucun arbre n'a été abattu pour la reconstruction de Notre-Dame.

13. Maladie des arbres, décollement des couches ligneuses dû au gel.

14. Fente creusée par le gel dans les arbres.

15. Se dit d'un insecte qui se nourrit de bois.

16. Cet art existait peut-être auparavant mais ce mot n'est connu qu'à partir de Colbert.

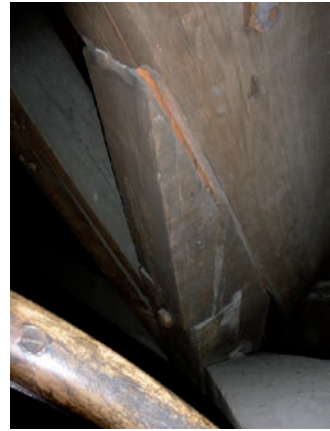


Figure 24

Exemple d'une pathologie du bois : une pièce vissée.



Figure 25

Pathologie de bois.



Figure 26

La grume de bois.



Figure 27

Petites pousses d'arbres.



Figure 28

Futaie des clos, forêt de Bercé, Sarthe.



Figure 29

Présence d'un charpentier à côté d'un arbre qui permet d'évaluer la taille de l'arbre.

Sur la **figure 29**, on appréhende la dimension de ces arbres en distinguant une silhouette en bas à droite.

Pour la reconstruction de la flèche, les arbres ont été sélectionnés dans des forêts françaises permettant de répondre à un cahier des charges construit selon trois catégories :

- les pièces courantes ;
- les pièces exceptionnelles par leur longueur (à partir de 14 m de long) ;
- les pièces exceptionnelles par leur rôle : le poinçon¹⁷ par exemple qui est la pièce centrale, composée de plusieurs pièces mises bout à bout et qui constituent la colonne vertébrale de la flèche.

17. Instrument métallique terminé en pointe pour percer, entamer les matières dures.

Pour ces trois catégories, tout en s'appuyant sur la norme qui caractérise le matériau chêne et aidés de spécialistes, nous avons pu déterminer les défauts à éviter dès la sélection des bois sur pieds ou une fois abattus. Ont ainsi été pros crits les arbres vissés, pour les raisons que nous avons énoncées avant, les cœurs étoilés comme sur la (**figure 30**), les nœuds morts ou pourris, les fentes. Ont été acceptés, dans certaines conditions, les nœuds sains dans une limite de diamètre et de quantité.

Les bois sélectionnés sont bien répertoriés afin d'assurer leur traçabilité. Ils ont été débités par des scieurs et sont en cours de ressuyage dans des conditions particulières : en extérieur, à l'abri du soleil ardent pour éviter un séchage trop rapide qui permettrait de créer des fentes, dans une zone fraîche et ventilée, les pièces étant espacées les unes des autres et stockées en palanquées sur des tasseaux appelés chantiers.

Pour la reconstruction des charpentes médiévales, les enjeux ne sont pas exactement les mêmes : les bois seront taillés selon une technique très particulière, à la doloire (taille manuelle), ce qui nécessite que les bois soient frais. Les arbres doivent alors se situer entre 50 et 60 % d'humidité, sachant qu'un arbre sur pied est environ à 60 % d'humidité, et la taille doit se faire dans les quelques mois qui suivent l'abattage. Cette technique de taille manuelle consiste à ébaucher ou à équarrir¹⁸,

18. Tailler pour rendre carré, régulier.



Figure 30

Cœur étoilé.

c'est-à-dire enlever l'écorce à la doloire¹⁹. Cette taille permet de respecter le fil du bois, ce qui confère à l'ouvrage taillé une grande souplesse et une grande résistance puisque les fibres du bois ne sont pas entaillées.

La technique de taille manuelle n'est pas courante de nos jours, il s'agit pourtant d'une

technique datant au moins du Moyen Âge et dont certaines organisations assurent une transmission des savoir-faire. C'est le cas de Charpentiers sans frontières qui ont réalisé deux fermes témoins dont une qui a été présentée sur le parvis, lors des journées du patrimoine : cette dernière image (figure 31) permet de conclure en se projetant sur le chantier, lequel démarrera dans les prochains mois.

19. Petite hache.



Figure 31

Ferme témoin des Charpentiers sans frontières.

Tracer les **plombs** de **Notre-Dame** de Paris par leur **signature** **isotopique** et **élémentaire**

Spécialiste des études du transfert des contaminants et des éléments traces dans l'environnement, directrice de recherche au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement¹ du CEA.

1 **Le plomb à Notre-Dame de Paris et dans Paris**

Il y a beaucoup de sources possibles de plomb dans Notre-Dame : Maxime L'Héritier² décrit par exemple les agrafes³

1. www.lsce.ipsl.fr/

2. Maxime L'Héritier : conférence sur « L'apport des analyses chimiques à la connaissance des armatures de fer de Notre-Dame de Paris ».

3. Une agrafe de toit sert à fixer ou maintenir différents éléments, par exemple les feuilles de couverture.

de fer, qui sont scellées avec du plomb. Il y a aussi du plomb dans les armatures⁴ de vitraux et dans les peintures. Nous allons essayer, à travers la signature isotopique et élémentaire des poussières de plomb émises par l'incendie, d'identifier leur origine.

Le plomb à Notre-Dame est une longue histoire. Une

4. L'armature d'un vitrail désigne les éléments métalliques qui divisent et maintiennent les différents morceaux de verre composant l'ensemble du vitrail.

première toiture en plomb est mise en place vers 1215 (Alexa Dufraisse⁵). Ensuite, ont lieu de nombreuses réfections et réparations dont celle en 1726 de la grande réfection de la toiture par le cardinal de Noailles, puis celle de la période des grands travaux de Viollet-le-Duc⁶ entre 1845 et 1864.

5. Alexa Dufraisse, conférence sur « Mémoire du bois : apport de la chimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris ».

6. Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879) est un architecte français, connu pour ses travaux de restauration de monuments médiévaux.

En 2019, l'échafaudage alors en place était en grande partie destiné à rénover cette toiture en plomb et beaucoup de travaux étaient prévus (figure 1).

Malheureusement, très peu de temps après la fin du montage de l'échafaudage, la cathédrale a brûlé, au moins la toiture et la charpente.

Il est difficile de savoir à Paris quel est le plomb émis par l'incendie de Notre-Dame car il y a en fait énormément de sources de plomb dans Paris même (figure 2).

Dans le monde entier, toutes les communautés urbaines ont cette particularité d'être

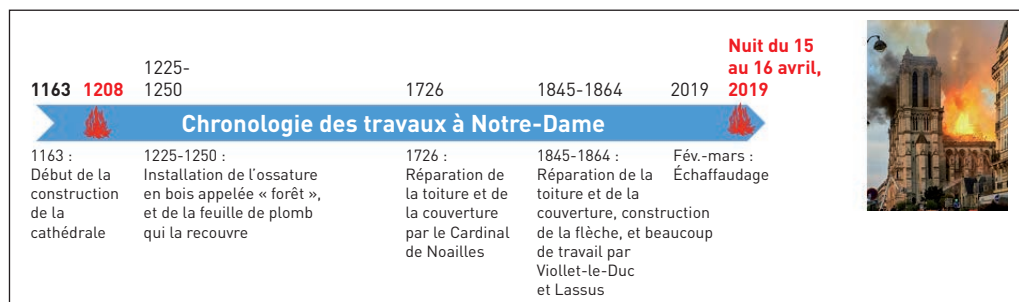


Figure 1

Le plomb à Notre-Dame de Paris, une longue histoire.

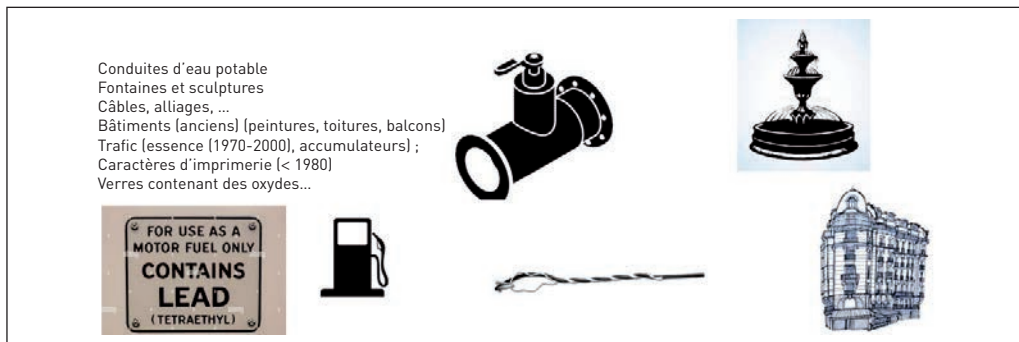


Figure 2

Les sources de plomb dans Paris.

souvent très enrichies en plomb.

L'une des sources principales vient des additifs plombés utilisés dans les essences en France, à partir de 1920 en petite quantité mais massivement entre 1970 et 1985, avant d'être interdits en 2000 : on en trouve encore largement les traces dans une ville comme Paris.

Il y a aussi le plomb issu de tous les usages qui correspondent à la décoration des villes comme les sculptures et les fontaines.

Mais Paris présente en outre une particularité : lors de l'époque haussmannienne, sous Napoléon III, lorsque l'on a ouvert de grandes avenues, on a construit des immeubles qui contiennent beaucoup de plomb dans leurs peintures et dans les éléments d'étanchéité des toits et des balcons. La dernière source de plomb urbain est une particularité aussi haussmannienne car c'est Belgrand qui a mis en place un système d'adduction d'eau potable après une grande épidémie de choléra dans Paris en 1832 ; il devenait vraiment indispensable d'assainir Paris et le système d'adduction d'eau potable et d'évacuation des eaux usées a été fabriqué en partie en plomb et en partie en fonte.

Il y a donc beaucoup de plomb à Paris et il faut un travail d'analyse de chimiste pour identifier la signature isotopique et élémentaire des poussières contenant du plomb qui ont été émises lors de l'incendie pour savoir si celui-ci a contribué à augmenter la contamination en plomb de Paris (**figure 3**).



Figure 3

Les fumées de l'incendie de Notre-Dame contiennent du plomb.

2 La signature isotopique et élémentaire, un moyen d'identification de la source de plomb due à l'incendie

2.1. Qu'est-ce que la signature isotopique ?

Pour identifier l'origine du plomb, on utilise sa signature isotopique, c'est-à-dire les rapports entre les quatre isotopes⁷ stables du plomb, qui sont le 206, le 207, le 208 et le 204.

Les quatre isotopes sont stables, mais un seul, le plomb 204, existait au tout début de l'histoire de l'univers, et maintenant il ne représente plus que 1,4 % du plomb total qui existe sur Terre. Les trois

7. Deux isotopes sont des atomes possédant le même nombre de protons et d'électrons, mais un nombre de neutrons différents. Leurs propriétés chimiques sont identiques car elles dépendent du cortège électronique. La légère différence de masse de deux isotopes entraîne une différence de certaines propriétés physiques (stabilité notamment).

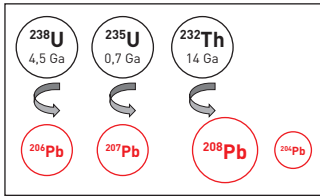


Figure 4

L'origine radiogénique des isotopes 206, 207, 208 du plomb.

autres isotopes représentent la majeure partie du plomb sur Terre et sont non radioactifs. Ils sont radiogéniques, c'est-à-dire générés par la radioactivité à partir des isotopes de l'uranium 238,235 et du thorium 232, par des chaînes de décroissance radioactive⁸ (figure 4).

Dans les mines de plomb, suivant l'âge de la mine et la composition de la roche qui encaisse le filon⁹ plombifère,

8. Lors du phénomène de radioactivité, certains éléments lourds se décomposent jusqu'à parvenir à un atome stable : par exemple, l'uranium 238 possède 238 protons, et il se fragmente en atomes plus légers jusqu'à parvenir à 206 protons, ce qui correspond au plomb 206. La désintégration des atomes s'accompagne d'une émission de rayonnement.

9. Un filon est une masse de métal ou de minéraux se trouvant entre deux couches de roches différentes.

on peut observer des concentrations en uranium et en thorium différentes. Les temps de demi-vie de ces isotopes radioactifs sont en gigannées, et suivant l'âge de mise en place du filon, les rapports entre les quantités des isotopes stables de plomb produits vont être légèrement différents. Tout l'intérêt repose dans ce « légèrement différents » : ces différences sont caractéristiques de la mine et constituent ce qu'on appelle une signature isotopique. Chaque mine a donc son empreinte isotopique qui sera conservée dans les objets fabriqués.

La figure 5 montre que les relations entre les rapports des isotopes 206/207 et 208/206 des trois isotopes du plomb sont caractéristiques des différentes mines.

Nous avons établi deux graphiques pour mieux différencier les mines (figure 5), chaque mine ayant sa signature isotopique. Au XIX^e siècle, au moment de la construction du Paris haussmannien, mais au moment aussi de la dernière réfection de la toiture en plomb de Notre-Dame, c'est l'Espagne qui fournissait le plus de plomb « neuf » à la France. Si l'on considère les trois mines espagnoles (figure 5 : Rio Tinto, Cartagena, Mazarron), on voit qu'elles ont des signatures isotopiques très différentes. Quand il y a de gros chantiers de ce type, même si le recyclage existait et qu'il était déjà très important, on peut penser qu'il y ait eu effectivement besoin d'importer du plomb « neuf » d'Espagne. En couplant les données économiques et les

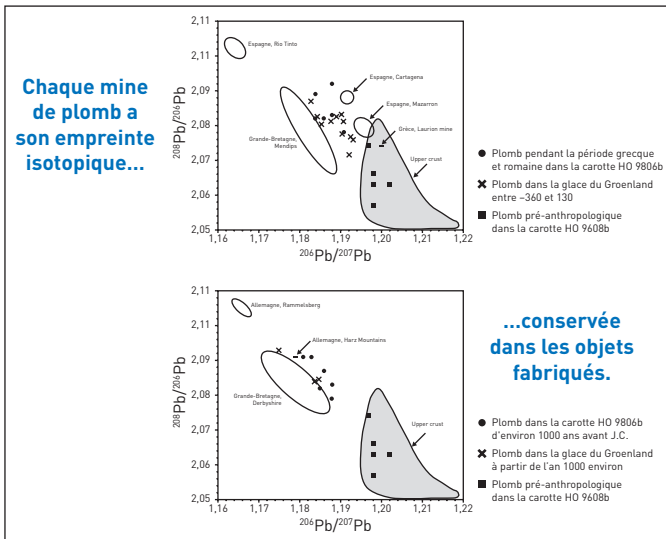


Figure 5

Signature isotopique du plomb selon la mine d'extraction.

Source : d'après Alfonso et coll., 2001.

données isotopiques, on peut donc dater et donner une signature isotopique aux différents plombs qui ont été utilisés dans Notre-Dame depuis sa construction au Moyen Âge, jusqu'à la dernière réfection, même s'il y a eu d'autres travaux après. En théorie tout du moins, car le recyclage potentiel du plomb des anciennes toitures dans les nouvelles peut brouiller le message.

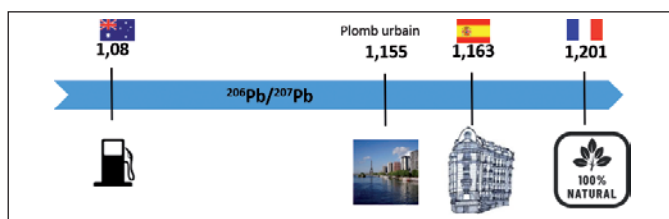


Figure 6

Signature des principales sources de plomb à Paris.

Source : d'après L. Lestel (CNRS, Paris), Ayrault et coll. (2012, 2014).

2.2. Signature isotopique d'un plomb selon son origine

Le fait de connaître ces signatures isotopiques permet d'identifier les sources principales de plomb dans Paris. Ce sont les rapports $206/207^{10}$ qui sont représentés pour faciliter la lecture (figure 6).

Dans le cas de l'essence, en France on utilisait des additifs au plomb qui étaient produits par la même entreprise, toujours au même endroit. Donc à partir des archives de cette société, on peut reconstituer quelles sources de plomb métal avaient été utilisées pour ces additifs et en déterminer la signature, ce qui est confirmé dans les prélèvements environnementaux. C'est une signature très spécifique (1,08) extrêmement différente de celle du plomb naturel dans le bassin de la Seine (1,201).

La signature du plomb qui est inhérente à l'infrastructure de la ville de Paris et que l'on retrouve dans les déchets urbains, notamment dans les eaux usées, est de 1,155

pour le rapport $206/207$, que nous avons baptisé « plomb urbain », qui correspond à ce que l'on retrouve très couramment dans les poussières de Paris (figure 6).

Comme plusieurs objets peuvent avoir des signatures isotopiques du plomb proches, pour mieux discriminer leur origine, on ajoute à ces signatures isotopiques les signatures élémentaires¹¹. Pour cela, on dose dans les poussières étudiées les concentrations pour le plus grand nombre possible de métaux, de métalloïdes¹², mais aussi d'éléments majeurs¹³ et autres traces (figure 7) afin de mieux caractériser leur empreinte géochimique.

11. La signature élémentaire permet de différencier entre eux les différents éléments chimiques de l'échantillon (plomb et cuivre par exemple), tandis que la signature isotopique caractérise deux isotopes d'un même élément (plomb 206 et plomb 207 par exemple).

12. Un métalloïde est un corps qui possède certaines propriétés des métaux et d'autres propriétés opposées.

13. Les éléments majeurs sont les dix éléments qui composent 95 % de la croûte terrestre : Si, Al, Ca, Mg, Na, K, Ti, Fe, Mn et P.

10. 206 et 207 désigne le nombre de neutrons dans les atomes de plomb des échantillons considérés.

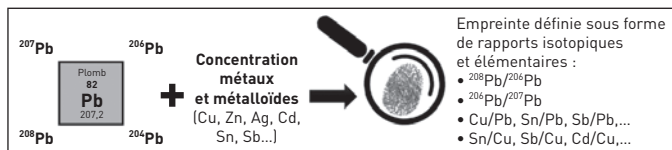


Figure 7

Signatures géochimiques des différentes sources à partir des isotopes du plomb et des concentrations élémentaires contenus dans les échantillons étudiés.



Figure 8

Fumée de l'incendie de Notre-Dame émettant des poussières de plomb.

L'empreinte isotopique et géochimique des poussières émises par le panache de Notre-Dame que l'on voit sur la **figure 8** et qui part sur la Seine a été ainsi déterminée pour un choix donné de prélèvements.

L'empreinte de ces poussières a ensuite été comparée avec celles de différentes sources de plomb dans Paris (**figure 9**) : avec celles des éléments de plomb des matériaux de construction contemporains de Notre-Dame, puis avec celles des échantillons qui représentent les sources anthropiques principales telles que le trafic routier et le bâti parisien. Le bâti correspond à tous les bâtiments, avec les toitures, les éléments singuliers des toitures (les toitures en zinc et en ardoise possèdent de nombreux éléments de plomb), les peintures à la céruse ou les peintures antirouilles (« minium ») sur les balcons, les tuyauteries, etc.

3 Traçage des poussières émises par l'incendie de Notre-Dame

3.1. Choix des prélèvements à analyser dans Notre-Dame

C'est au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), en particulier les chercheuses Aurélia Azéma et Delphine Syvilay, qui ont entre juin 2019 et janvier 2020 récolté dix-neuf échantillons de poussières localisées, comme on peut le voir sur le plan de la **figure 10**, dans différents endroits de Notre-Dame et si possible pas trop près de la zone de chute de la flèche. La forme des points détermine le niveau d'échantillonnage : au niveau du sol, c'est carré, au niveau des tribunes, c'est rond, au niveau des voûtes, c'est un hexagone (**figure 10**).

La **figure 11** montre les différents supports de ces prélèvements. Normalement, on ne doit échantillonner des poussières que sur des supports extrêmement bien nettoyés, prévus à cet effet, totalement inertes, sans contaminants, etc., ce qui n'était pas possible dans le cas de Notre-Dame.

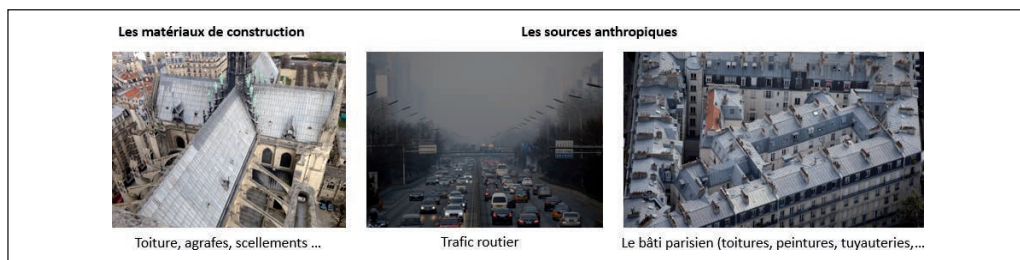


Figure 9

Les différentes sources de plombs dans Notre-Dame et Paris.

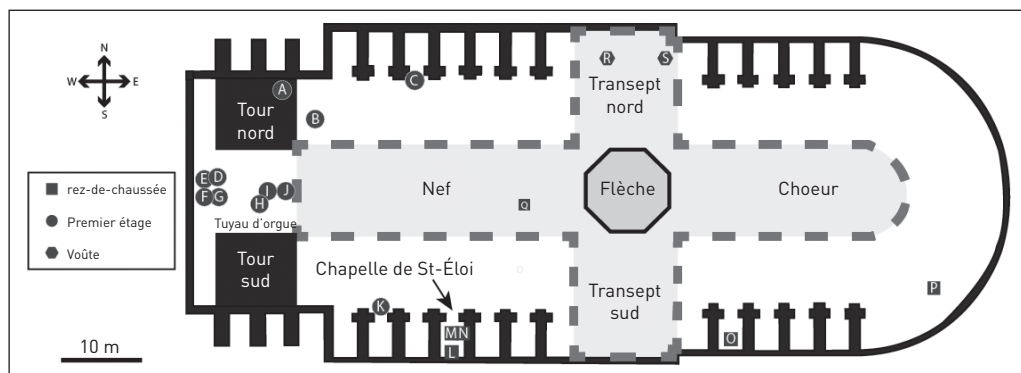


Figure 10

Plan simplifié de Notre-Dame de Paris (modifié d'après Aubert, 1920) montrant la localisation des dix-neuf prélèvements réalisés de juin 2019 à janvier 2020 par Aurélia Azéma et Delphine Syvilay (LRMH).



Figure 11

Prélèvements d'échantillons sur différents supports.

Ces dix-neuf prélèvements ont été réalisés sur des supports qui n'étaient pas forcément non contaminants, comme par exemple les poussières récupérées sur des objets métalliques qui peuvent apporter une contamination. Des poussières peuvent aussi contenir non seulement les poussières émises par l'incendie, mais aussi des poussières présentes avant l'incendie. On imagine bien que sur le tissu

représenté sur la **figure 11** (image du bas à droite), qui avait été mis en place bien avant l'incendie sur une sculpture, il avait pu se déposer un peu ou beaucoup de poussières avant l'incendie (**figure 12**, image en bas à gauche) ; nous avons aussi du plomb fondu très oxydé, déposé sur une pierre d'un mur d'extrados¹⁴,

14. L'extrados est la surface extérieure courbée d'une voûte.

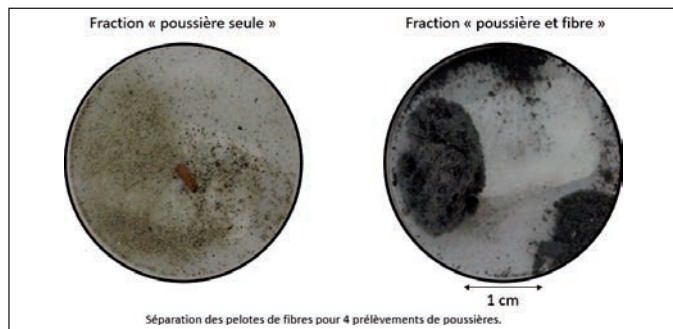


Figure 12

Exemples de types de prélèvement observés à la loupe binoculaire.

des échantillons ont été récupérés sur des supports en bois et notamment sur le banc de l'organiste (figure 11, en haut à gauche). L'organiste jouait le soir de l'incendie, donc on peut penser que le bois étant un support inerte, cet échantillon n'a pas de métaux. De plus, nettoyé avec soin par l'organiste, ce sera donc un échantillon de choix, probablement pas contaminé par des poussières intérieures à l'incendie.

3.2. Analyse des prélèvements

Une observation à la loupe binoculaire des poussières prélevées permet de remarquer qu'on a des fractions qui contiennent effectivement seulement des poussières (figure 12 à gauche), avec un petit morceau de bois facilement séparable, mais aussi d'autres échantillons qui contiennent des pelotes de fibres toutes emmêlées les unes avec les autres (Figure 12 à droite). Nous avons pu séparer les poussières de ces pelotes de fibres.

Les échantillons sont ensuite traités dans des digesteurs (figure 13) pour décomposer la matière organique et minérale.

Le digesteur est un four à micro-ondes sous pression où

les échantillons de poussières sont traités par des acides fluorhydrique, nitrique, chlorhydrique et perchlorique¹⁵ concentrés. On obtient une solution qui est injectée dans un spectromètre de masse¹⁶, ici, à couplage inductif¹⁷ (figure 14).

Ce spectromètre de masse permet d'obtenir les analyses élémentaires de trente ou quarante éléments et les rapports isotopiques du plomb dans les échantillons. La figure 15 présente les résultats obtenus pour différents substrats dans différents endroits de la cathédrale. La concentration exprimée en g/g pour l'argent, l'antimoine, le cadmium, le bismuth, l'étain, le cuivre est reportée en fonction de la concentration en plomb exprimée en g/kg.

On observe que certains échantillons contiennent des quantités extrêmement importantes de plomb. La couleur des points symbolise le type de support : les points marron sont pris sur du bois, les points roses sur un échantillon de peinture trouvé dans un échantillon de poussière, que l'on a séparé et analysé séparément. La forme du point, rond, carré ou hexagonal, détermine le niveau d'échantillonnage (figure 10). Pour



Figure 13

Décomposition de la matière organique et minérale des prélèvements pour obtenir une solution grâce à un digesteur.

15. Acide perchlorique : HClO_4 .

16. Un spectromètre de masse permet de séparer des éléments de masses différentes. Les atomes sont fondus, vaporisés, ionisés et accélérés. Ils atteignent des vitesses différentes selon leurs masses, ce qui permet de les séparer et de mesurer leur concentration.

17. Lors d'un chauffage par induction, un courant électrique variable circule dans des bobines ; cela crée un champ magnétique variable, qui est lui-même responsable du chauffage du gaz étudié.



Figure 14

Analyses élémentaires et isotopiques par spectrométrie de masse.

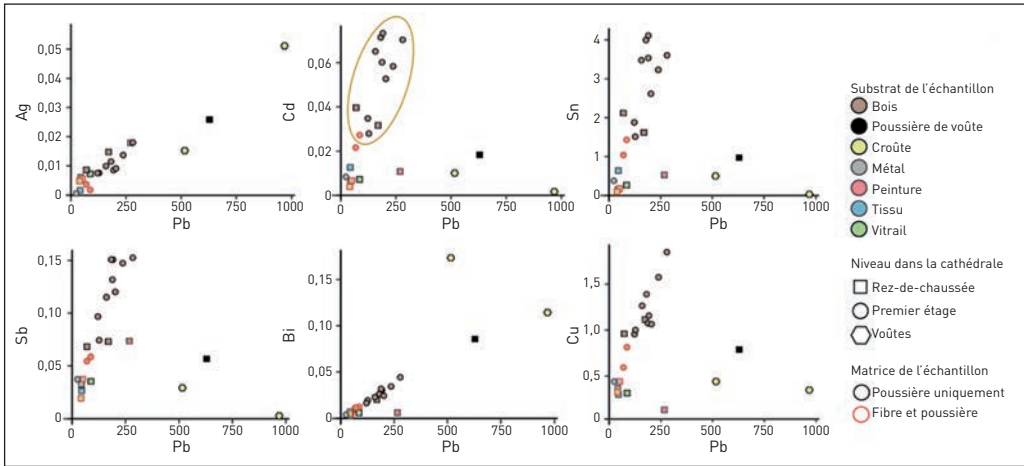


Figure 15

Concentrations élémentaires exprimées en g/kg.

la couleur du tour du point : si c'est noir, c'est juste de la poussière ; si c'est rouge, cela veut dire que c'est issu d'une pelote de fibres.

On voit que les échantillons pris sur des supports en bois

sont très homogènes en termes de concentration en plomb (figure 15, voir zone entourée en jaune), et que c'est le cas pour tous les éléments étudiés.

Ce sont des échantillons qui sont typiquement plus attractifs

pour ce type de détermination parce que l'on peut constater qu'ils ne sont pas contaminés par le support, ce qui est normal puisque le bois contient de faibles concentrations en métaux, voire aucune.

À partir de ces analyses, on peut tracer des droites de corrélations¹⁸ qui vont permettre de produire des rapports entre les concentrations des éléments et les concentrations en plomb qui vont être typiques des poussières de Notre-Dame. Ils vont pouvoir donner un premier indice et constituent la première partie de l'empreinte des poussières émises par l'incendie de Notre-Dame (figure 16).

La deuxième partie de l'empreinte est obtenue à partir des rapports isotopiques du

plomb. Les résultats pour tous les échantillons sont reportés sur la figure 17 : c'est le rapport entre les isotopes 206/207 en fonction du rapport entre les isotopes 208/206. On y retrouve les échantillons sur le bois (figure 17, points marron), la peinture qui se distingue très précisément du reste (figure 17, carré rose, en bas à droite) et les échantillons de fibres (figure 17, figurés entourés en rouge), qui semblent regroupés dans une zone différente de celle du bois.

Et effectivement, on a bien ici la signature isotopique des poussières émises par l'incendie de Notre-Dame qui est bien représentée par les échantillons prélevés à l'étage des tribunes et sur support en bois (figure 17, zone entourée).

Une autre représentation intéressante est le rapport 206/207 des isotopes du plomb en fonction de l'inverse de la concentration en plomb (figure 18). Cette représentation est très

18. La droite de corrélation montre une relation entre deux quantités ; ici, la concentration en métaux tels que l'argent, le cadmium... est une fonction affine de la concentration en plomb.

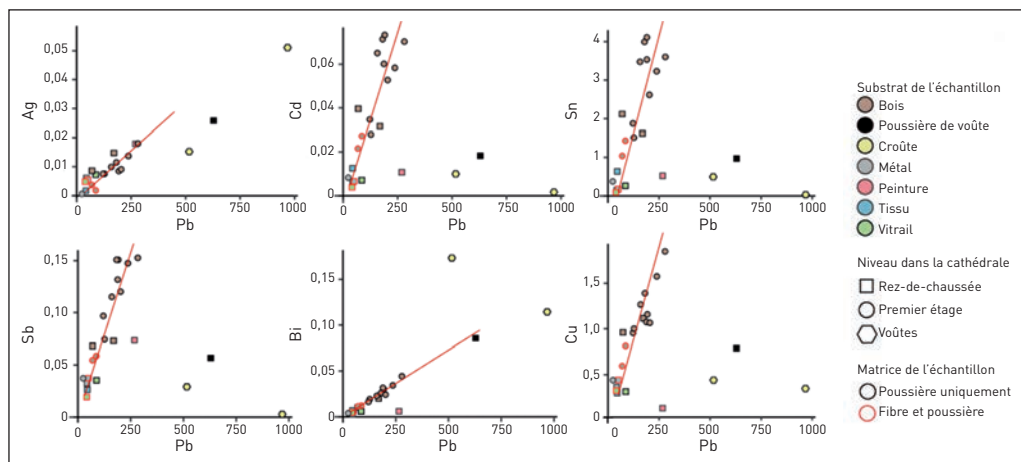


Figure 16

Empreintes des poussières émises par l'incendie de Notre-Dame : corrélations entre les concentrations des éléments en g/kg et les concentrations en plomb en g par kg.

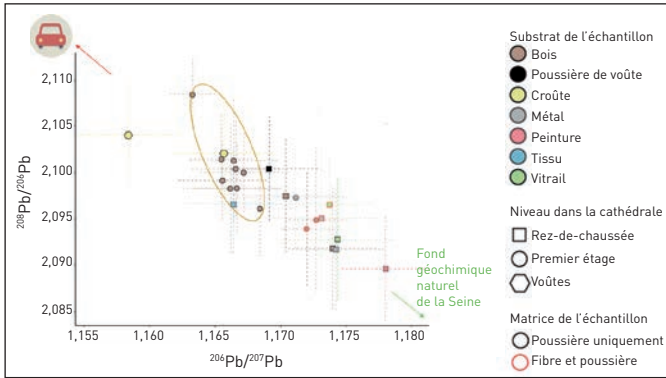


Figure 17

Rapports isotopiques du plomb des poussières de l'incendie de Notre-Dame.

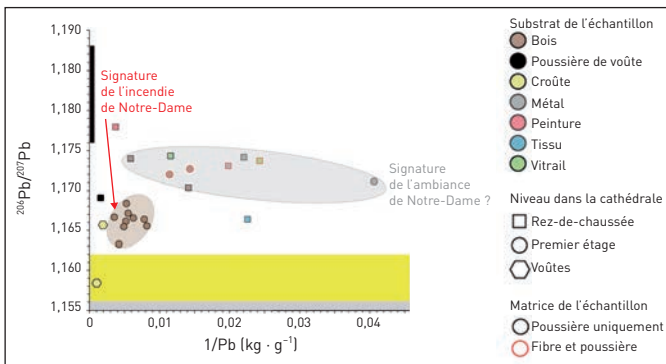


Figure 18

Échantillons représentatifs de l'incendie de Notre-Dame de Paris.
 Exclusion des échantillons collectés sur des supports contaminants (pollution du signal).
 Exclusion des échantillons à matrices fibreuses (pollution et/ou dilution du signal).
 Exclusion des échantillons provenant du RDC (dilution du signal).

souvent utilisée en recherche environnementale parce qu'elle permet de mettre en évidence des pôles de mélange ; dans le cas de Notre-Dame, si le plomb de l'incendie était issu de multiples sources de plomb, cela s'étalerait sur une droite. Or, on voit que les prélèvements sont extrêmement bien groupés.

C'est donc bien la signature isotopique du plomb de l'incendie : l'empreinte de l'incendie de Notre-Dame.

L'autre zone, plus linéaire, représente probablement l'ambiance de Notre-Dame avant l'incendie puisqu'on voit ici que les échantillons de fibres en particulier sont dans cette zone.

L’empreinte isotopique de l’incendie de Notre-Dame dans Paris

Nous avons voulu resituer l’empreinte isotopique de l’incendie de Notre-Dame dans les signatures isotopiques de l’ensemble des sources de plomb que l’on connaît pour Paris, ainsi que pour des monuments tels que la Sainte Chapelle et la cathédrale de Chartres, qui ont été construits en même temps que Notre-Dame.

Nous avons donc aussi situé sur le graphique de la **figure 19** les signatures isotopiques de ce qui caractérise le plomb urbain, le plomb que l’on va trouver dans les eaux usées parisiennes, ainsi que tout ce qui est incinérateur de déchets urbains (figure 19, zone en haut à gauche, présence de triangles rouges, oranges et verts). Pour le plomb atmosphérique, nous avons aussi utilisé des poussières atmosphériques prélevées dans les rues de Paris en 2003-2004 (triangles blancs) parce qu’avec l’arrêt total des additifs au plomb dans l’essence en 2000, les analyses isotopiques du plomb dans l’atmosphère parisienne ont été arrêtées. En revanche, les triangles jaunes représentent des échantillons récents puisque ce sont des miels qui ont été prélevés dans les ruchers parisiens. Ce sont des ruchers *intramuros* qui sont à l’intérieur du périphérique, et c’est le travail d’une équipe canadienne, réalisé dans les mois qui ont suivi l’incendie. On voit que les miels se distinguent vraiment de la signature isotopique de l’incendie (figure 18 au milieu). Nous avons aussi les plombs de construction (figure 19 à droite, losanges gris et orange).

Cette signature de l’incendie est très proche de la signature des sédiments de la Seine (un travail fait bien avant l’incendie de Notre-Dame). On y retrouve aussi la croûte de plomb

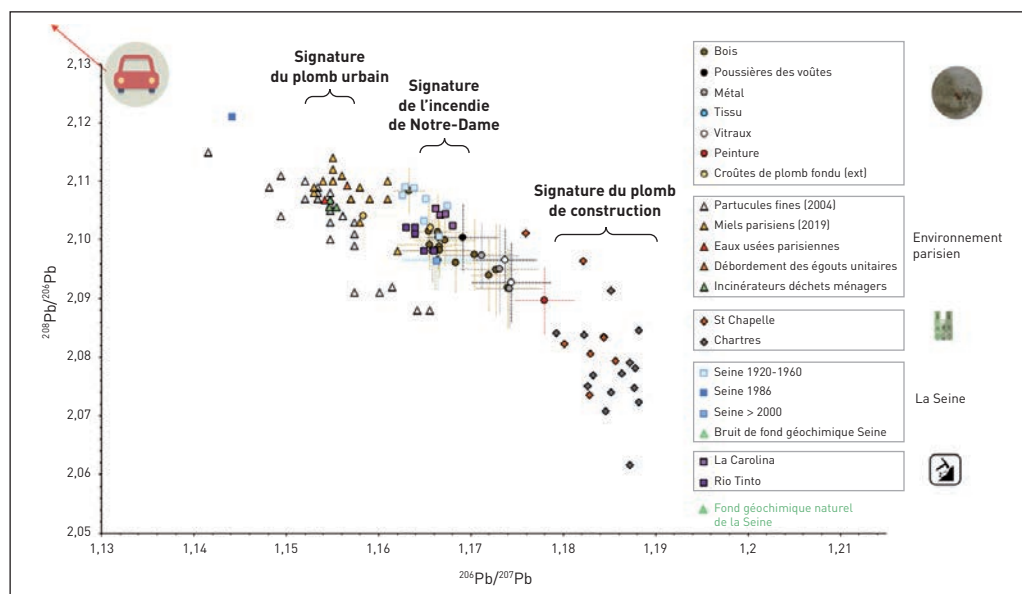


Figure 19

L'empreinte isotopique de l'incendie de Notre-Dame de Paris dans les sources de plomb à Paris.

que l'on a récoltée sur la crête de faîtage¹⁹, qui est une œuvre de Viollet-le-Duc. Et cette signature de l'incendie se situe entre les signatures isotopiques de deux mines espagnoles : Rio Tinto et La Carolina. L'Espagne était le plus grand fournisseur de plomb neuf en France au XIX^e siècle, époque de la dernière réfection. Les autres échantillons collectés dans Notre-Dame racontent une histoire différente, notamment cet échantillon ici sur la figure 19, point rouge, qui est l'échantillon de peinture et qui tend à ressembler à des plombs de construction moyenâgeux.

19. Le faîtage est la ligne de rencontre des versants de la toiture.

Partie 2

Ils travaillent pour sauver
 Notre-Dame

Charpente de sécurisation des arcs-boutants et des voûtes

PDG de l'entreprise SAS-Le Bras Frères.

Spécialiste de la restauration de monuments historiques, en règle générale sur les différents corps d'états.

Ce chapitre présente les travaux d'étaie¹ des arcs-boutants² qui ont été réalisés par l'entreprise Le Bras Frères sur la cathédrale, mais également les cintres³ qui ont permis d'étayer des voûtes du vaisseau de la nef. L'intervention de sécurisation

1. Action de poser des éléments de soutien ou de renfort sur un ouvrage pour supporter des charges et éviter un affaissement.

2. Pilier qui se termine en demi-cercle qui permet de soutenir un mur ou une voûte de l'extérieur.

3. Éléments de construction provisoire en charpente en forme de demi-cercle permettant de soutenir une voûte le temps de sa construction.

de la cathédrale a démarré dès le 16 avril au matin. Les premiers travaux ont consisté à sécuriser le pignon nord et le pignon sud du transept, ainsi que la dépose des statues. Dans les jours qui ont suivi, la volonté a été de très rapidement mettre hors d'eau la cathédrale par des systèmes de poutraison⁴, de bâchage et de faire un premier état des lieux sur l'échafaudage incendié. Cela consistait notamment à le sécuriser, remettre en place plus de deux cents

4. Ensemble de poutres, ou bien de poutrelles, d'un plancher de bâtiment ou d'une charpente.

vérins⁵, et de le renforcer avant de pouvoir modéliser la structure qui permettrait d'appréhender par la suite le processus de dépose. Au bout de trois jours, il y avait près de trois cents compagnons sur le site, tous corps d'état confondus (maître verrier, tailleur de pierre, restaurateur, archéologue) : autrement dit, une véritable fourmilière géante. Il faut savoir que les personnes travaillant dans le monument historique sont des « compagnons », présents chaque jour au chevet de la cathédrale, et qui se lèvent, non pas pour aller chercher un salaire, mais pour vivre de leur passion. Alors quand ils se retrouvent confrontés à la lourde tâche de sécuriser la cathédrale Notre-Dame de Paris, ils ne vivent pas un chantier, mais une véritable mission, décuplant l'énergie mise en œuvre.

1 Étaient par mise sous cintres des arcs-boutants

Les architectes avaient demandé, au vu des premiers diagnostics réalisés sur les voûtes, dont plusieurs étaient effondrées ou très fragilisées (cf. chapitre de messieurs Fromont et Prunet), que les poussées des voûtes ne soient plus contrecarrées par les arcs-boutants. Il fallait mettre en place un système pour équilibrer l'ensemble dans le cas où des voûtes complémentaires s'effondraient,

5. Tube cylindrique dans lequel une pièce mobile, appelée piston, sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre. Il a pour but de produire un mouvement mécanique.

notamment avec l'assèchement des joints, source d'inquiétude importante. Il a donc fallu réfléchir très rapidement à mettre en place une méthodologie de sécurisation de ces voûtes, d'où la pose des cintres. L'idée était que ces cintres puissent reprendre les efforts, mais qu'ils puissent également être un support pour les travaux de restauration et permettre de supporter la poussée des arcs-boutants. Dès le mois d'avril 2019, l'architecte en chef et la DRAC⁶ à l'époque, ont voulu que les travaux de sécurisation soient, d'une part, pertinents pour sécuriser la cathédrale, mais aussi d'autre part, qu'ils soient déjà pensés de manière rationnelle et adaptés aux travaux de restauration qui allaient intervenir dans le futur.

Les vingt-huit arcs-boutants ont été entièrement mis sous cintres. La première des tâches pour réaliser cette mise sous cintre a été de faire un relevé précis. En l'occurrence, nous avons scanné complètement la cathédrale pour obtenir un nuage de points très précis, pour pouvoir développer les ortho-images comme nous le voyons ici et ainsi modéliser les cintres des arcs-boutants (*figure 1*). Rappelons qu'il y a vingt-huit cintres, et que chacun est unique. Nous avons l'impression qu'il y a une certaine symétrie, une certaine régularité dans l'architecture de la cathédrale, mais la réalité est tout autre : il y a presque un mètre d'écart entre les cintres les plus divergents. En l'occurrence, comme

6. Direction Régionale des Affaires Culturelles.

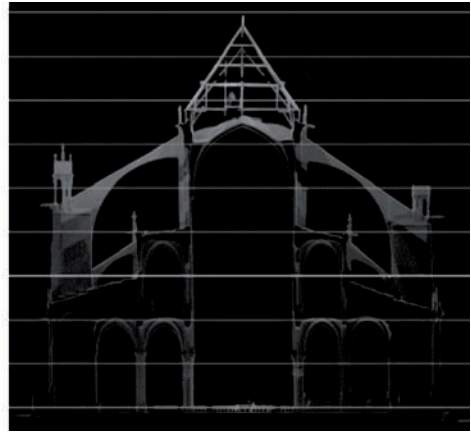
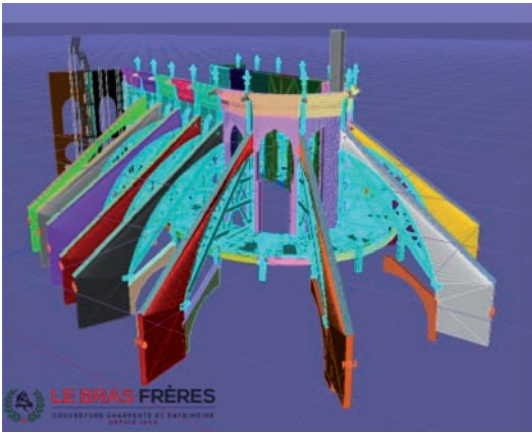


Figure 1

Nuage de points réalisé après un scan précis de la cathédrale (gauche) et ortho-image créée à partir de ce nuage de points (droite).

ces cintres doivent s'insérer avec un jeu de huit centimètres sous les arcs-boutants, il faut adapter à chaque fois le dessin, le modèle, pour l'incorporer parfaitement à l'architecture de la cathédrale. Le travail que Le Bras Frères a effectué, est un travail collaboratif avec l'ensemble des intervenants sur le chantier. En plus des architectes, le bureau d'études Bestrema nous a donné les caractéristiques mécaniques à prendre en compte dans la conception et dans le calcul de nos cintres, notamment les efforts à reprendre : que ce soient les efforts des structures en pierre de la cathédrale, les efforts pour le cintre lui-même mais aussi les échafaudages qu'il allait recevoir par la suite (**figure 2**). La **figure 3** montre le positionnement des cintres : la première contrainte était de ne pouvoir prendre que trois points d'appui sur les parties structurellement fortes de la cathédrale.

L'autre contrainte était que ces cintres devaient permettre un passage linéaire sur toutes les galeries et prendre en compte des efforts de résistance au vent qui seraient ramenés par les échafaudages ultérieurement posés. Dès le mois d'avril, tout était envisagé pour prendre en compte tout ce qui pourrait arriver dans les quatre ans à venir, et ne pas avoir d'adaptation complémentaire, dans un souci de gain de temps et de rationalisation des dépenses.

Pour pallier le degré d'urgence, il a fallu concevoir un système de mise en place innovant, contrairement à ce qui peut se faire d'habitude sur des projets de restauration où l'on étaye un ou deux arcs-boutants. Par conséquent, il a donc été nécessaire de réfléchir à une pré-construction en atelier. Les cintres sont arrivés assemblés en deux parties (**figure 4**) : les éléments de la partie de cintre appelée la demi-ferme ont été

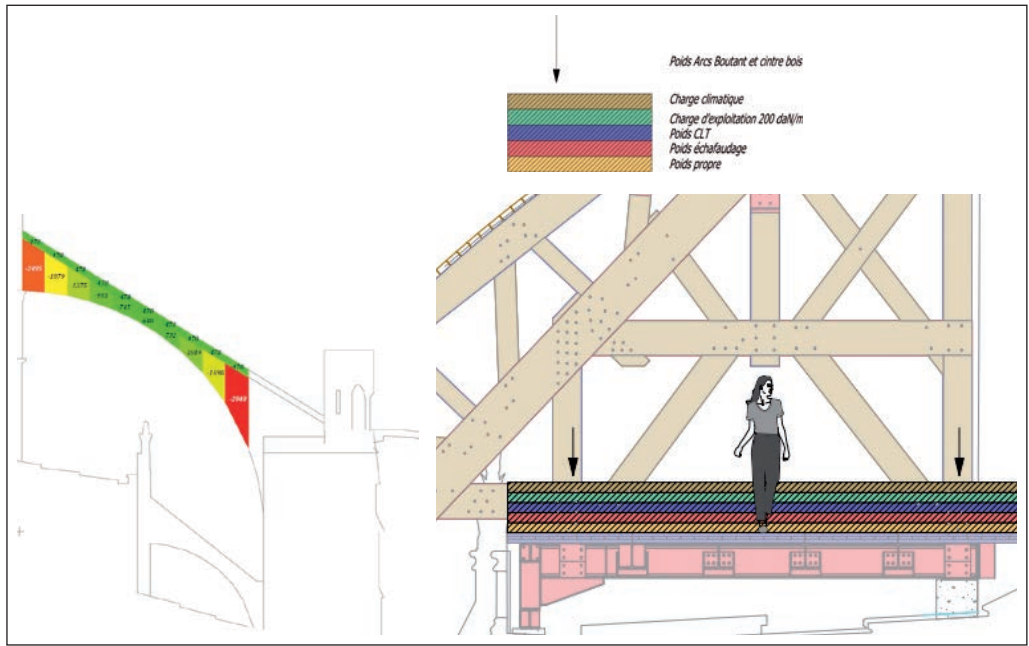


Figure 2
Schémas de conception des cintres par le bureau d'études Bestrema : modélisation des efforts à prévoir.

Figure 3
Schémas des cintres des arcs-boutants.

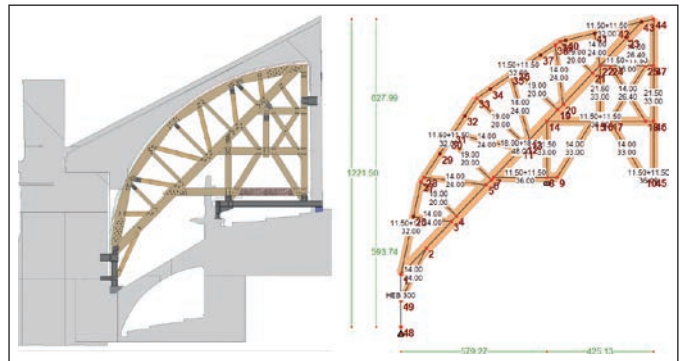
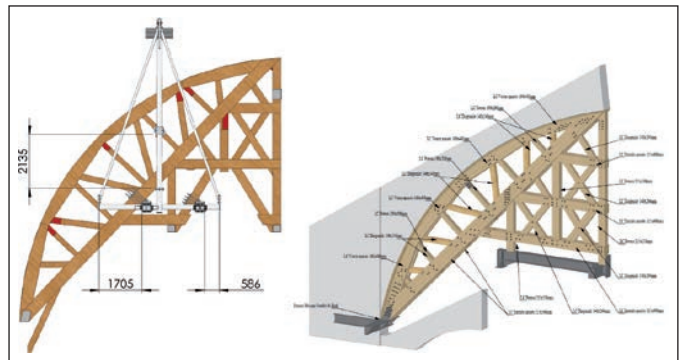


Figure 4
Schémas de l'étude du levage des cintres des arcs-boutants.



assemblés sur sites et levés en une seule pièce. Pour ce faire, il a fallu concevoir un outil, appelé palonnier, construit spécifiquement pour le levage de ces cintres et incluant des dispositifs de fixation réglables (*figure 4*). Parce que – comme nous l’avons expliqué précédemment – nous traitons des cintres tous différents et dont le centre de gravité est aussi à chaque fois différent, nous avons prévu un jeu de réglage qui permette de lever le cintre, mais de manière parfaitement équilibrée : deux millimètres de décalage peuvent entraîner huit centimètres de faux équilibre sur la structure. Ces éléments mesurant seize mètres de long et pesant huit tonnes, cela donne une idée des difficultés à résoudre !

Venons-en à la fabrication de ces éléments. Habituellement, pour les monuments historiques où l’on taille les charpentes à la main, on restaure dans le souci de conservation du maximum d’éléments anciens. Or sur ce chantier, nous sommes plutôt dans une démarche neuve, en l’occurrence de taille numérique.

Les éléments ont donc été pré-assemblés en ateliers, l’ensemble des ferrures étant découpé de manière automatisée. On voit le levage du premier cintre sur la *figure 5* ainsi que les structures métalliques sur lesquelles vont reposer les cintres, avec les socles d’appui aux différents endroits qui nous ont été autorisés (*figure 6*). Le palonnier qui permet de lever les cintres et de les insérer est présenté sur la *figure 7*. Il faut faire preuve d’une extrême précision et d’une extrême précaution, parce que l’on intervient sur un monument fragilisé ; il ne s’agit pas de confondre urgence et précipitation. Sur la *figure 8*, on voit la liaison entre le cintre et l’arc-boutant qui se fait par deux éléments : nous avons un résilient et des couchis. Les couchis sont des petites lamelles de bois qui viennent faire la jonction. Le résilient lui, nous permet de faire l’interface entre le bois et la pierre afin de créer une tolérance sur le degré d’hygrométrie⁷ que peuvent supporter ces

7. Mesure du degré d’humidité présent dans l’air.



Figure 5

Levage du premier cintre des arcs-boutants.

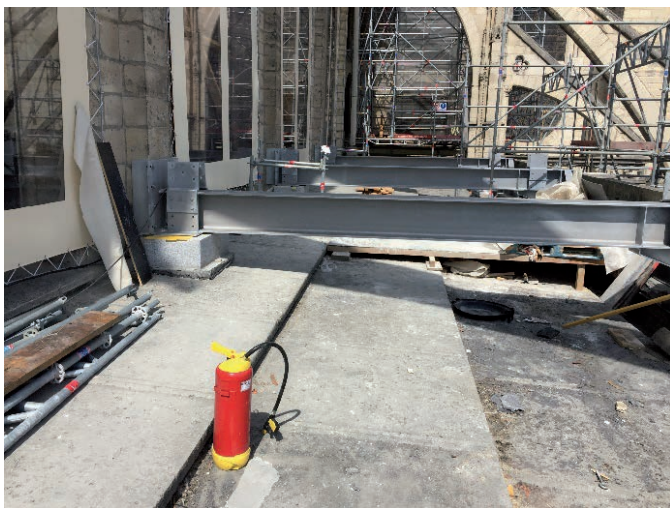


Figure 6

Structures métalliques sur lesquelles vont reposer les cintres.

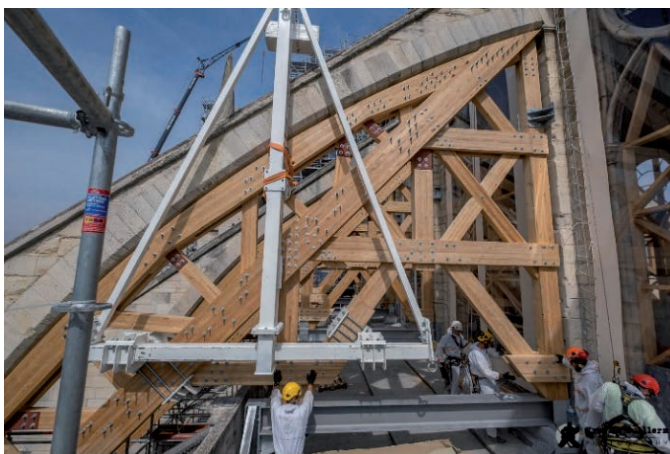


Figure 7

Palonnier permettant le levage des cintres.

couchis, et donc aux volumes différents qu'ils peuvent subir. Une fois les cintres posés, on ajoute une structure métallique sur laquelle est posé un plancher en lamellé croisé

(*figure 9*). C'est un plancher de circulation et de travail qui va permettre aussi la pose des échafaudages le long des murs gouttereaux pour restaurer les grands combles.



Figure 8

Liaison entre le cintre et l'arc-boutant.



Figure 9

Plancher en CLT (lamellé-croisé).

2 Étaieage par mise sous cintres des arcs de voûtes et des voûtains

Une fois les cintres posés sur les arcs-boutants, un travail colossal a été réalisé en collaboration avec les cordistes de démontage de l'échafaudage incendié. Dès que l'échafaudage incendié a pu être sécurisé et démonté, il a fallu intervenir sur la sécurisation des voûtes, donc

à l'intérieur de la cathédrale, en adoptant à peu près le même principe que pour les arcs-boutants, à la différence près que là, il n'y a pas de moyen de grutage par le dessus. Il faut donc pouvoir amener des éléments préfabriqués et les disposer sous les voûtes.

Le même protocole a été appliqué : relevé et scan 3D de l'ensemble des structures (figure 10), mise en place d'un

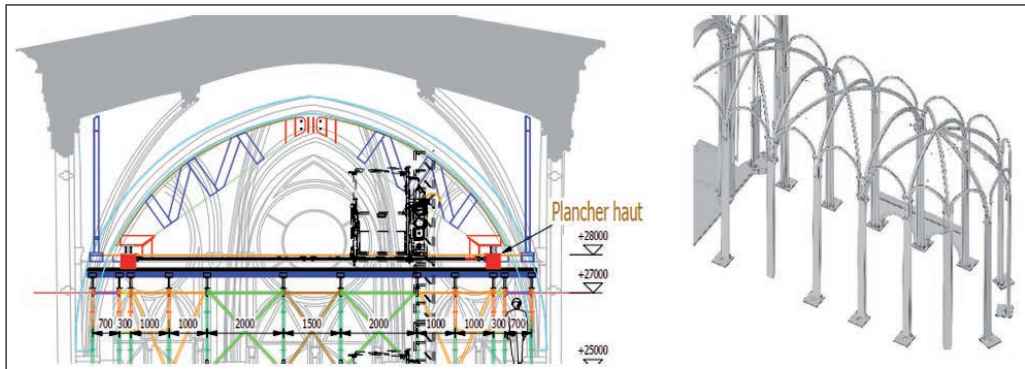


Figure 10

Relevé et scan 3D de l'intérieur de la cathédrale.

platelage d'échafaudage⁸, autrement dit, tout un système d'étalement sur toute la hauteur de la cathédrale. Actuellement, l'intérieur de la cathédrale est rempli d'échafaudages avec un platelage en partie haute qui permet de supporter les cintres. On voit sur la **figure 11**, que la structure est conçue à partir de la structure primaire qui vient vraiment sous les arcs, et d'une structure secondaire qui vient étayer les voûtes. Les cintres sont amenés assemblés, ils sont positionnés sur des ferrures déjà mises en place (**figure 12**), des systèmes métalliques de réglages sont installés (**figure 13**), et un système de vérin hydraulique permet justement de lever les structures en sous-œuvre (**figure 14**). Ce système de levage est très important et très sensible, il nous permet d'être extrêmement précis et ainsi de ne pas risquer d'endommager les voûtes, très nettement fragilisées. Ce travail est réalisé de part et d'autre. Nous venons alors serrer une ferrure métallique qui sert de

clé de voûte (**figure 15**) ; ensuite, nous mettons en place un tirant⁹ pour équilibrer l'ensemble de la structure (**figure 16**). Nous reproduisons ce travail sur l'ensemble des arcs. Une fois les tirants installés, parfaitement équilibrés, nous pouvons alors nous passer des étalements et installer la structure secondaire (**figure 17**).

Quelques chiffres donnent un ordre de grandeur de l'ampleur des travaux réalisés. Vingt-huit cintres, deux cent trente mètres de cubes de bois pour la partie cintre des arcs-boutants, deux cents mètres cubes pour les cintres des voûtes. Au total, entre la sécurisation des pignons, les planchers au-dessus des murs gouttereaux de la nef, les planchers en partie basse et les différents étalements qui ont été réalisés, c'est près de mille cinq cents mètres cubes d'étalement qui ont été réalisés sur la cathédrale depuis le début des travaux, commencés dès le 16 avril sur le pignon nord.

8. Ensemble de planchers juxtaposés les uns à côtés des autres permettant de créer une surface plane pour les travaux de charpente ou de toiture.

9. Membrane qui reprend des efforts de traction entre deux poussées divergentes, et évite le déversement d'un mur ou encore l'écartement des pièces de charpente.

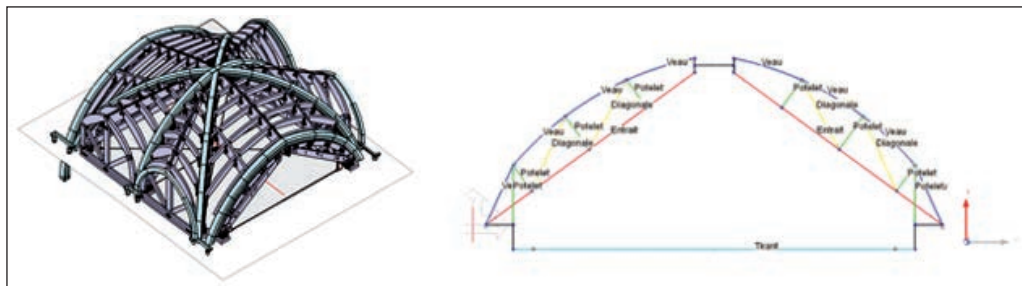


Figure 11

Schémas des deux structures (primaire et secondaire).

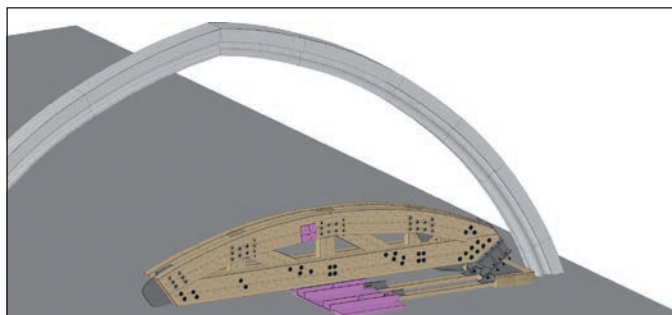


Figure 13

Installation des systèmes métalliques de réglage.

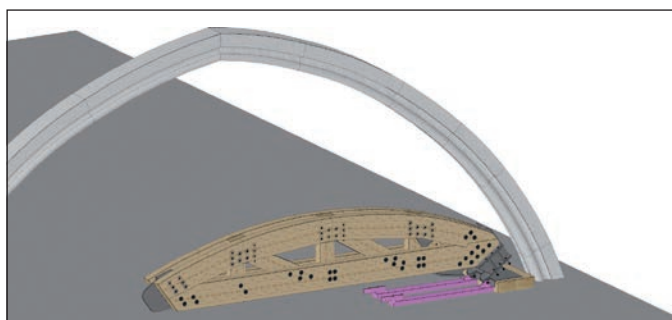


Figure 12

Cintre positionné sur des ferrures après assemblage.

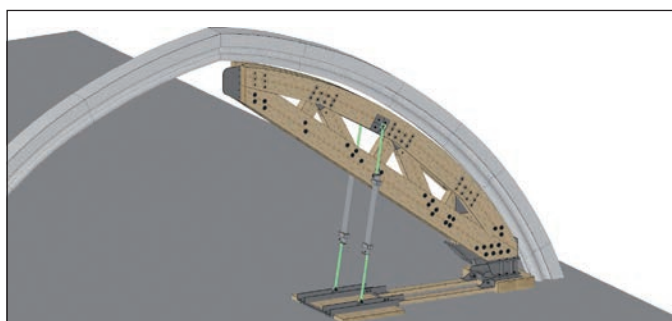


Figure 14

Vérin hydraulique permettant le levage du cintre en sous-œuvre.

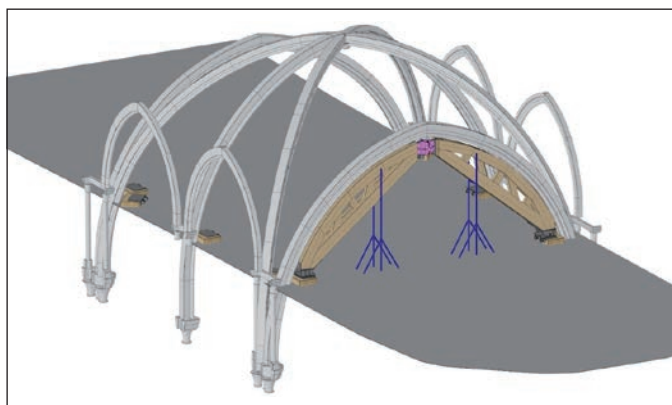


Figure 15

Serrage de la clé métallique (clé de voûte).

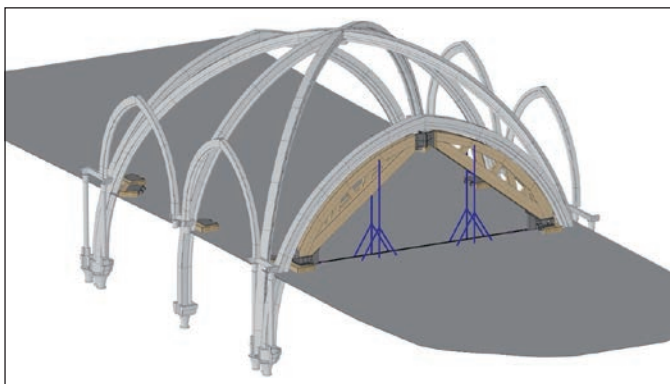


Figure 16

Mise en place d'un tirant permettant d'équilibrer la structure.



Figure 17

Pose de la structure secondaire.

La restauration des statues en cuivre de la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Directeur général de la société SOCRA, spécialiste de la restauration des objets métalliques et en particulier des statues. L'intervention de la SOCRA sur les statues de la flèche de Notre-Dame, déjà engagée dans le programme de restauration précédant l'incendie d'avril 2019, a largement fait connaître la haute qualité de ses compétences dans un domaine si rare et si précieux. Ce chapitre nous fait partager leur engagement dans le soin du patrimoine.

1 Contexte

En 1858, le ministère de la Culture donne l'autorisation de rétablir la flèche de la cathédrale Notre-Dame qui avait été érigée vers 1250 et démolie du fait de différents problèmes structurels entre 1786 et 1792. La **figure 1** montre un croquis de la flèche du XIII^e siècle.

La nouvelle flèche construite par Viollet-le-Duc¹ sur une structure en bois, repose sur les quatre piliers du

transept. Elle est réalisée avec des chênes provenant de Champagne et certaines poutres mesurent plus de 15 mètres de long. La **figure 2** montre un détail de la structure où l'on voit apparaître les éléments au niveau des noues² de la charpente et des grandes contrefiches³ qui soutiennent les fameuses statues en cuivre (**figure 2**). La charpente est érigée par l'entreprise Bellu. Les décors en plomb qui vont la recouvrir sont réalisés par les sculpteurs Pyanet et Martrou.

1. Architecte français aujourd'hui surtout connu pour son implication dans la restauration de nombreux monuments (la cathédrale Notre-Dame de Paris) ou du Mont Saint-Michel par exemple.

2. Une noue est une intersection entre deux toitures.

3. La contrefiche est une pièce de bois oblique que l'on trouve dans la construction d'une charpente.

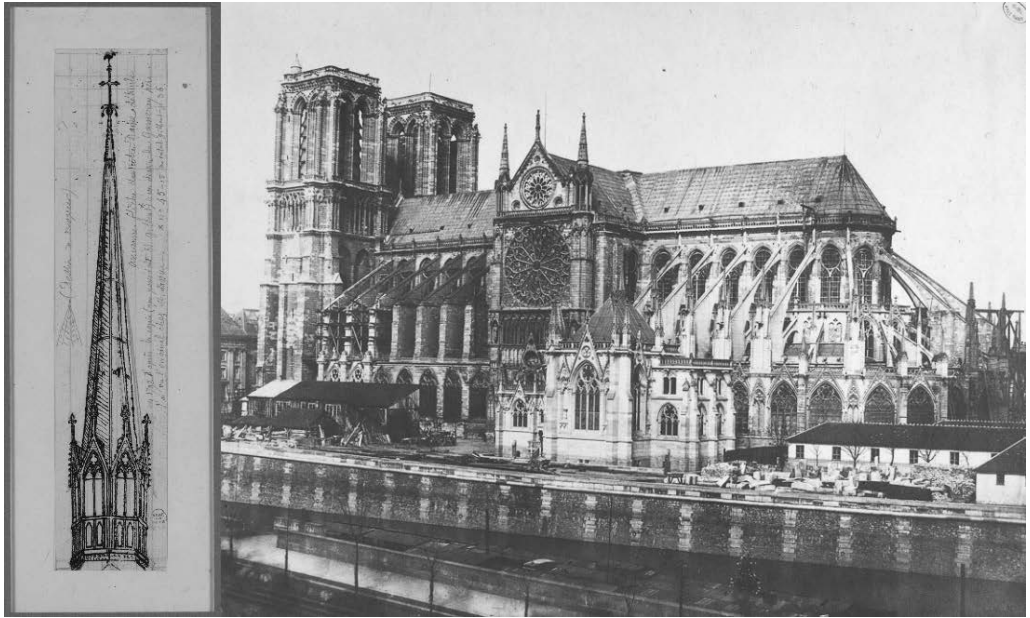


Figure 1

Croquis de la flèche du XIII^e siècle (à gauche) et de la cathédrale Notre-Dame (à droite) avant la reconstruction de la flèche.

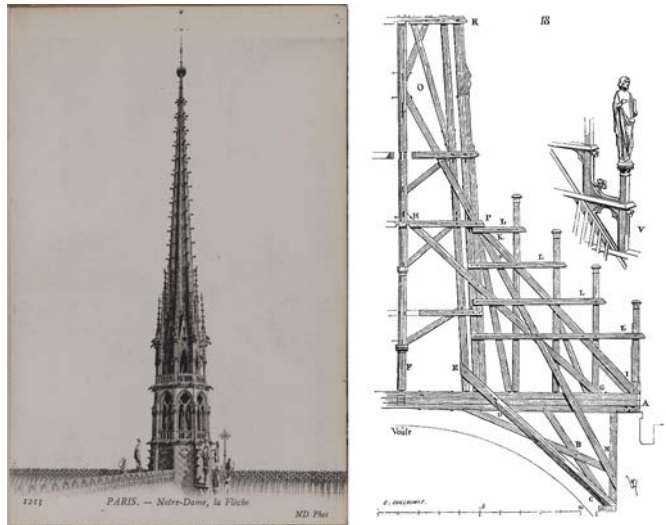


Figure 2

La flèche de Notre-Dame (à gauche) et les détails de la structure avec la présence des noues de charpente et des contrefiches qui supportent les statues de cuivre (à droite).



Figure 3

Décors en plomb vus de près (à gauche) et photos de ces mêmes décors au niveau des statues de cuivre (à droite).

Ces derniers, assez importants (**figure 3**), sont faits en plomb coulé ou martelé et fixés à la structure par des armatures métalliques.

La première pièce de bois est mise en place au mois de février 1859 (**figure 4**) et six mois plus tard, la structure de la flèche est entièrement

terminée. Un coq est posé au sommet (**figure 5**) dans lequel viennent prendre place plusieurs reliques : une relique de la vraie croix, une de la Sainte Couronne et une de sainte Geneviève.

Les photos de la **figure 6** montrent le coq d'origine et le coq détérioré dans son état



Figure 4

Érection de la flèche de bois de Notre-Dame de Paris.



Figure 5

Dessin présentant le modèle du coq situé en haut de la flèche.

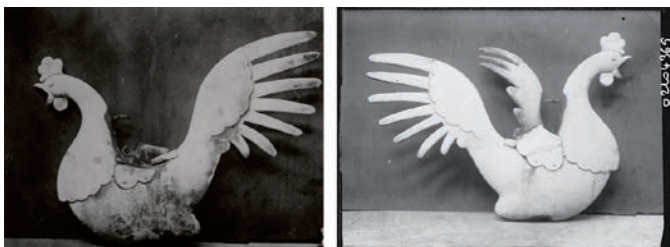


Figure 6

Le coq de la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris : le coq découvert en 1935 (à gauche) et le coq d'origine (à droite).

de 1935 où déjà, la structure en bois avait provoqué une altération du plomb. L'acide pyroligneux⁴ qui se trouve dans le bois a altéré très vite la structure et dès 1885, des travaux de restauration ont été entrepris.

4. L'acide pyroligneux, également appelé vinaigre de bois ou acide de bois, est un liquide sombre produit par la distillation destructive du bois et d'autres matières végétales.

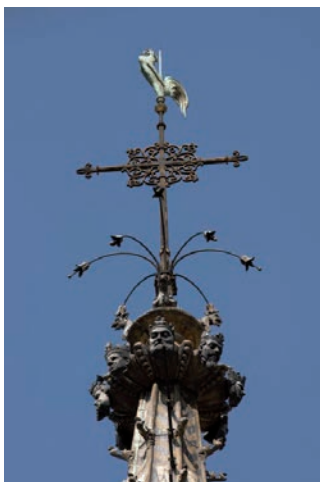


Figure 7

Toiture et flèche de la Sainte-Chapelle

D'autres travaux ont lieu sur la flèche : en 1928, 1935, et les derniers, en 2019, qui doivent reprendre la restauration de façon fondamentale. En 1935, on constate nettement le mauvais état du coq et de ses ailes, les problèmes d'oxydation de structures internes qui vont donc nécessiter sa restauration. Viollet-le-Duc fait donc appel aux établissements Durand car ils ont réalisé les décors en plomb de Notre-Dame mais aussi parce qu'ils ont mené une intervention sur la toiture et la flèche de la Sainte-Chapelle (figure 7).

En 1860, à la mort de Durand, l'entreprise est rachetée par les établissements Monduit qui, associés aux établissements Béchet, restructurent l'entreprise, poursuivent les travaux de décoration de la flèche et vont s'installer rue de Chazelles dans le 17^e arrondissement de Paris. Les statues seront mises en place après la construction de la flèche : de nouveaux échafaudages vont être assemblés au niveau des noues et en 1860, la première statue sera posée. C'est en septembre 1861 que le décor entier sera installé. Viollet-le-Duc fait appel à

UNE PETITE TENTATION « PEOPLE » CHEZ VIOLLET-LE-DUC ?

Viollet-le-Duc accorde toute sa confiance au sculpteur Geoffroy-Dechaume qui se voit remettre la seule esquisse faite par Viollet-le-Duc pour l'apôtre saint Thomas (*figure 8*), saint patron des architectes. Tout le monde connaît l'histoire – cette statue l'aide à obtenir l'autorisation de représenter un architecte à la place de saint Thomas. Ce que l'on sait aussi, c'est qu'il omet de préciser qu'il veut se représenter lui-même.

L'esquisse faite à Geoffroy-Dechaume, destinée à donner l'attitude générale de la statue, est de qualité et reste le seul croquis abouti aujourd'hui connu pour les seize sculptures (*figure 9*) de la flèche. Les sculptures seront réalisées en cuivre (*figure 10*).

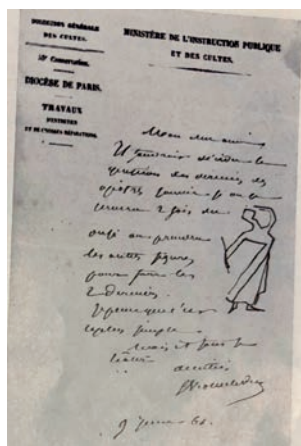


Figure 8

Lettre accompagnant le don à Geoffroy-Dechaume du seul croquis de la sculpture de l'apôtre réalisé par Viollet-le-Duc.



Figure 9

Seul croquis abouti connu aujourd'hui pour les seize sculptures.



Figure 10

Statues de cuivre sur la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Geoffroy-Dechaume, son sculpteur attiré pour réaliser les maquettes de ces statues représentant les douze apôtres et les quatre évangélistes. Geoffroy-Dechaume a carte blanche pour réaliser les maquettes.

Viollet-le-Duc souhaite qu'à l'extrémité des excroissances de la charpente viennent reposer des sculptures monumentales, chose possible si elles ne sont pas trop lourdes. On ne peut donc pas envisager des sculptures en plomb ou en bronze d'à peu près 3,4 mètres. Viollet-le-Duc demande alors aux ateliers Monduit de réaliser des

sculptures en cuivre repoussé, avec armures métalliques permettant ainsi d'alléger le poids à environ 150 kg par statue, poids au fond relativement léger face au volume de l'œuvre. Geoffroy-Dechaume va créer des maquettes à l'échelle à partir desquelles les établissements Monduit vont décortiquer la structure pour fabriquer des matrices en fonte. Sur ces dernières, les dinandiers⁵ – c'est-à-dire les personnes qui vont travailler le cuivre à chaud – vont

5. Le dinandier fabrique des objets utilitaires et décoratifs par martelage à partir d'une feuille de cuivre, d'étain ou de fer blanc.

SUITES DE LA STATUE DE SAINT THOMAS – VIOLLET-LE-DUC

Lorsque les ateliers Monduit ferment en 1870, certaines matrices en fonte – ou des répliques (*figure 11*) puisqu'ils réalisent également quelques répliques des statues en cuivre – sont conservées et données au château de Pierrefonds, en région parisienne. La statue-portrait de Viollet-le-Duc en saint Thomas, saint patron des architectes (*figure 12*) est en fait la seule qui regarde la flèche. Lors de sa construction, beaucoup prédisent à Viollet-le-Duc que sa flèche ne tiendra pas ; il semble ainsi se retourner dans un mouvement de défi. Sur sa règle d'architecte, est inscrite la mention latine qui dit qu'il ne doute pas de la stabilité et de la pérennité de son œuvre. Et elle a en effet tenu jusqu'en avril 2019, démontrant ainsi que l'on peut être un rien vaniteux, tout en étant un grand homme.



Figure 11

Matrices en fonte et répliques des statues de cuivre par les ateliers Monduit.



Figure 12

Saint Michel représentant le portrait de Viollet-le-Duc en saint Thomas.

pouvoir emboutir en martelant la feuille de cuivre et créer les formes de la statue. Pour des raisons économiques, il va être suggéré à Geoffroy-Dechaume et à Monduit, de n'utiliser que quatre modèles de corps pour représenter les douze apôtres ; seulement les têtes, les attributs et les positions des mains ou des bras feront la différence entre les statues.

2 Raison de l'intervention de la société SOCRA

Le cadre d'intervention de la société SOCRA précède l'incendie d'avril 2019. C'est

celui des travaux de restauration initiés par la DRAC Île-de-France⁶ en 2019 pour la restauration complète de la flèche de la cathédrale de Notre-Dame.

La structure est intrinsèquement complexe puisque constituée d'une structure métallique en fer pur – formant crinoline⁷ – sur laquelle vient se fixer une peau de cuivre. Des problèmes d'oxydation préférentielle des matériaux fragilisant la structure se sont

6. Direction régionale des affaires culturelles Île-de-France

7. La crinoline est une fine robe du XIX^e siècle, maintenu par un réseau d'armature en fibre.

LA STATUE DE LA LIBERTÉ RATTRAPE VIOLLET-LE-DUC

Viollet-le-Duc décède en 1879, époque à laquelle commence le projet de réalisation de la Statue de la Liberté dans les ateliers Monduit. Cette dernière a été réalisée selon la même technique que les statues de la flèche si ce n'est que la peau de cuivre en est beaucoup plus épaisse que celle des statues de Notre-Dame (un peu moins d'1 mm contre 3 mm pour la Statue de la Liberté).

La **figure 13** est une photo de la Statue de la Liberté, montée rue de Chazelles dans le 17^e arrondissement de Paris. Un hommage à Viollet-le-Duc la rend particulièrement émouvante : en son honneur, Monduit décide en effet d'installer la réplique exacte à l'échelle 1 qu'il a réalisée de sa statue, et la pose en bas de l'échafaudage pour que Viollet-le-Duc assiste au montage à blanc de la Statue de la Liberté (**figure 14**).



Figure 13

Agrandissement de la base de la Statue de la Liberté. On voit clairement la réplique de la statue de Viollet-le-Duc réalisée par Monduit et placée au pied de la Statue de la Liberté.



Figure 14

Montage de la Statue de la liberté rue Chazelles dans le 17^e arrondissement de Paris par les ateliers Monduit.

donc déroulés avec le temps. Une corrosion galvanique s'est produite entre le fer pur et le cuivre. L'oxydation du métal formant l'armature a provoqué des contraintes mécaniques au niveau des joints ou des plaques de cuivre, et donc des entrées d'eau qui accélèrent les processus d'altération. Le projet de restauration complet de la flèche avait déjà permis d'intervenir sur ces statues.

Nous avons identifié sur les statues de la flèche – avant l'incendie d'avril 2019 – des

problèmes d'épiderme, de joints et de soudure entre les plaques de cuivre. Un grand nombre de réparations avaient été faites dans les années 1980-1990, mais elles restaient assez succinctes avec des injections de mastic ou d'éléments peu compatibles avec les matériaux d'origine. Il fallait absolument déposer les statues pour poursuivre le montage de l'échafaudage nécessaire à la restauration de la flèche ; nous n'aurions pas pu intervenir sur ces statues, échafaudage monté (**figure 15**).



Figure 15

Statue de cuivre avec l'échafaudage monté.

3 Travaux de restauration par la société SOCRA

Notre première intervention sur place a consisté en un constat sanitaire du degré d'altération des matériaux, en particulier au niveau des armatures internes. Incidemment, nous avons appris qu'il y avait des armatures non pas par la lecture de documents mais parce que les ateliers Monduit ont réalisé énormément de sculptures de ce type : le lion de la place Denfert-Rochereau, les quadriges du Grand Palais, l'Archange du Mont Saint-Michel, le saint Michel de Saint-Michel-Mont-Mercure, énormément de statues que nous avons eu la chance de restaurer. Par conséquent, nous connaissions exactement le mode constructif. Et nous savions que généralement, l'armature interne est accessible au niveau de l'occiput des statues (le haut du crâne) : pour preuve, l'intervention que nous avons réalisée sur l'Archange du Mont Saint-Michel où

effectivement, en retirant la couronne, le casque de l'Archange, nous avons directement accès à un crochet au niveau de l'armature intérieure prévu, pour déplacer la statue. Nous avons donc en premier lieu retiré cette partie par dessoudage pour constater l'état de l'armature interne (*figure 16*).

Contrairement à l'Archange du Mont Saint-Michel, et du fait des options choisies par les sculpteurs, les têtes sont parfois penchées de côté empêchant l'armature, qui s'arrête au niveau des épaules, d'arriver jusqu'au visage. Il nous a alors fallu retirer complètement la tête (*figure 17*).

La *figure 18* donne une vue interne de la statue où l'on constate la présence de cette fameuse crinoline en fer, fixée par des omégas⁸ en cuivre à la peau de cuivre. On observe également l'axe central dans lequel vient se fixer cette armature.

8. Pattes de fixation d'une forme particulière.



Figure 16

Ouverture de l'occiput d'une des statues pour avoir accès à l'armature.



Figure 17

Tête retirée d'une statue de cuivre.



Figure 18

Vue interne d'une statue avec la crinoline interne et l'axe central sur lequel se fixe l'armature.

On constate un état d'altération classique avec une oxydation de surface mais suffisamment cohérente pour que l'on puisse se servir de cette armature pour soulever les statues.

Les statues sont placées sur les éléments en bois munis de sortes de diapasons métalliques. L'ensemble est recouvert de plomb (figures 19 et 20) ; le plomb vient recouvrir le bois et la statue vient s'enfiler sur l'axe fixé à la structure. L'ensemble est simplement boulonné à la base par la remontée du plomb et du cuivre, ce par des boulons en bronze.

Il a été très facile de déboulonner les socles (figure 20) ; nous avons d'ailleurs eu l'impression qu'ils avaient tout juste été boulonnés la veille ! Nous avons procédé à un levage systématique (figure 21) de toutes les statues.

L'intervention de la grue était prévue sur une demi-journée. L'accès à l'île de la Cité est très compliqué et nous n'avons eu en gros qu'une

demi-journée pour pouvoir les déposer. Tout ce travail en amont était primordial pour que l'on puisse tout effectuer le jour de la dépose et qu'il n'y ait pas de problèmes lors de cette étape. La figure 22 montre le système de grutage, la figure 23, le levage. Les statues sont maintenues en interne par un système directement lié à l'armature métallique.



Figure 19

Socle de la statue en bois recouvert de plomb et comportant un axe sur lequel s'encastre la statue.



Figure 20

Vue du dessus du socle.



Figure 21

Levage d'une statue de cuivre.



Figure 22

Système de grutage pour le levage des statues.

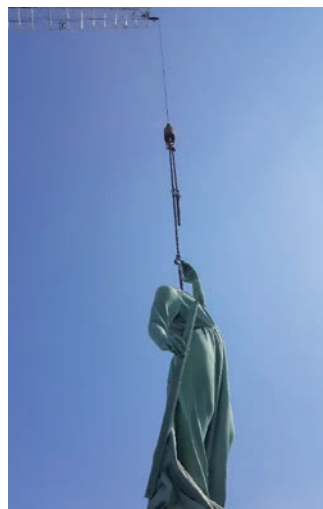


Figure 23

Levage d'une statue.

Après les opérations sur site, les statues sont arrivées dans nos ateliers où nous avons commencé, comme pour tout travail de restauration, par établir un inventaire très précis des œuvres et de leur état d'altération (figure 24). Nous avons démonté les différents

éléments – par exemple, les différentes plaques qui constituent l'épiderme de la statue (figure 25) – et avons réalisé un inventaire de toutes les pièces que l'on a numérotées, en repérant leurs dimensions, leur état de conservation. Ainsi avons-nous constitué une sorte



Figure 24

Arrivée des statues dans les ateliers.





Figure 25

Démontage des différentes statues et visualisation des différentes plaques de cuivre les constituant.

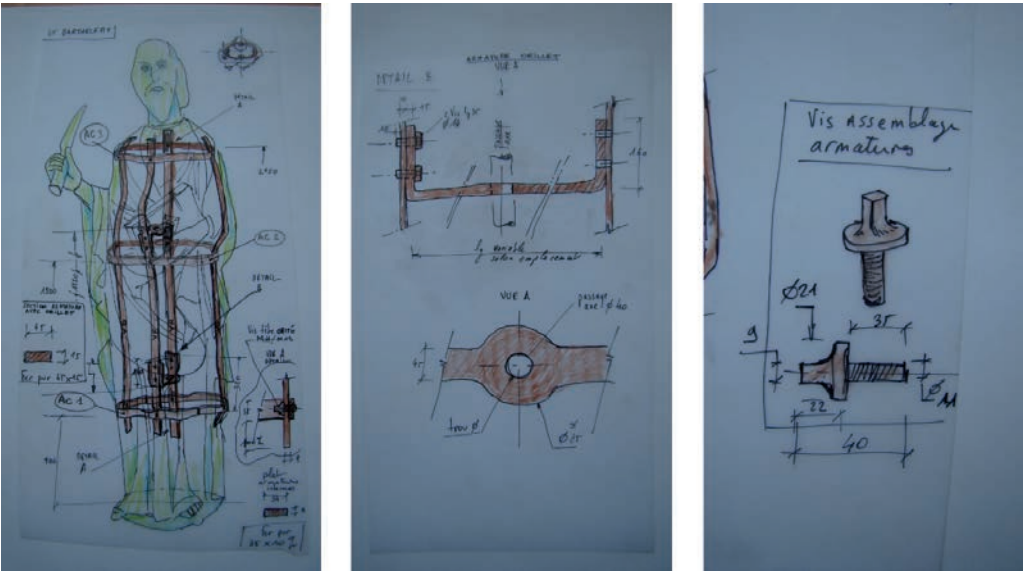


Figure 26

Inventaire des différentes pièces des statues de cuivre et de leurs états.

de banque de données pour chaque statue (**figure 26**). Les démontages laissent souvent apparaître l'état très détérioré des armatures : problèmes d'oxydation de certaines pièces métalliques

(**figure 27**), de corrosion entre le fer pur et le cuivre. On observe aussi l'état, l'aspect feuilleté de l'armature qui a perdu par endroits toute son épaisseur (**figure 28**), allant jusqu'à des ruptures



Figure 27

Problème de corrosion au niveau de l'armature métallique.



Figure 28

Aspect feuilleté de l'armature qui a perdu en épaisseur à cause de la corrosion.

complètes de l'armature (figure 29), c'est-à-dire que l'armature est parfois complètement disloquée, surtout en partie basse au niveau des omégas (figure 30).

C'est un phénomène que l'on connaît, pour l'avoir déjà traité sur différentes structures de la même époque (corrosion galvanique). Une fois cet inventaire réalisé, nous avons déterminé les pièces à remplacer.

Nous sommes au cœur d'une activité où la conservation est quelque chose de primordial : la priorité est de conserver le matériau d'origine. Nous aurions pu tout refaire à neuf en acier inox mais ce n'est ni notre culture ni notre métier : nous ne sommes pas des charpentiers métalliques, nous ne construisons pas des hangars dans les zones commerciales, nous sommes



Figure 30

Crochet « oméga » ayant subi de la corrosion galvanique et maintenant le fer et le cuivre ensemble.



Figure 29

Rupture de l'armature de fer.

des « restaurateurs de sculptures » et nous avons tenté de conserver au maximum le matériau en place. Si nous ne l'avons pas conservé, c'est qu'il avait complètement disparu (**figure 31**) ; nous l'avons alors restitué dans un matériau compatible ou identique.

Notre approche ne va pas sans difficultés : en restaurant dans un matériau identique, très vite, nous sommes confrontés aux mêmes problématiques. Toutefois, entre-temps, des recherches et de nombreux travaux ont fait progresser la technique. Pour la restauration des statues de Notre-Dame, nous avons tiré le plus grand parti du travail accompli avec le LRMH⁹ sur les quadriges du Grand Palais, ce qui nous a permis de mettre en place un protocole dont la pérennité est garantie. La structure complètement altérée de la **figure 31**, a été recrée à l'identique, grâce à un moulage en plâtre

9. Laboratoire de Recherche des Matériaux Historiques.

(**figure 32**) qui permet d'avoir la forme parfaite de la partie manquante pour ensuite la restituer à la forge et pouvoir la remplacer.

Le travail qui vient d'être décrit est effectué avant le démontage de l'armature (**figure 33**). Lorsque toutes les pièces sont repérées puis moulées, tout a été démonté et traité par sablage¹⁰ afin d'ôter toutes les traces de corrosion. Nous avons ensuite entièrement repeint ces éléments avec un complexe de peinture époxy-peinture polyuréthane¹¹ (**figure 34**).

La **figure 35** montre le travail de la forge. On y voit le compagnon serrurier en train de réaliser un élément central d'une des statues tandis que

10. Technique industrielle de nettoyage des grandes surfaces.

11. Le polyuréthane est un assemblage de plusieurs motifs (monomères) d'uréthane. C'est une molécule faite par synthèse chimique. L'assemblage des deux peintures constitue une peinture anti-corrosion.



Figure 31

Armature avec une portion manquante, disparue à cause de la corrosion.



Figure 32

Armature avec le moulage en plâtre.

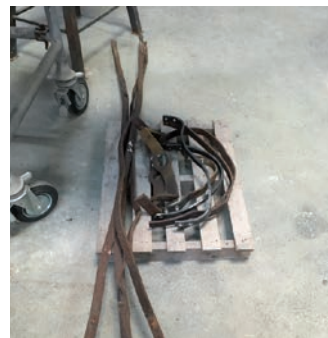


Figure 33

Démontage de l'armature.

sur la **figure 36** montre les travaux de restitution de l'élément manquant.

La crinoline de la statue est entièrement remontée (**figure 37**) et repeinte pour réaliser une barrière « définitivement étanche » entre cette armature et la peau de cuivre. En complément de la peinture anti-corrosion, est ajoutée une couche de téflon (**figure 38**) entre l'armature et toute la structure en cuivre

afin d'isoler de façon définitive la structure interne de l'épiderme en cuivre, ce qui stoppera la corrosion galvanique.

Les techniques que nous venons d'exposer ont d'abord été réalisées sur les quadriges du Grand Palais mais ensuite sur toutes les statues en cuivre qui ont été restaurées ces quinze dernières années. Parallèlement, un sablage sur la peau de cuivre est effectué (**figure 39** et **40**)



Figure 34

Pièces de l'armature peintes à la peinture époxy et polyuréthane après sablage.



Figure 35

Serrurier réalisant un élément central des statues.



Figure 36

Travaux de restitution de la partie manquante de l'armature.



Figure 37

Remontage de la crinoline après sablage et application de la peinture anti-corrosion.



Figure 38

Ajout de téflon sur l'armature en cuivre.

par micro-abrasion très fine pour supprimer l'oxydation de surface.

L'état de surface final que nous connaissons (vert-de-gris) n'est pas celui d'une patine artistique volontaire ; il s'agit en fait d'une oxydation classique d'un métal à base de cuivre au contact de l'atmosphère. Nous avons sablé puis remonté la totalité des éléments autour de l'armature. Nous avons refixé la peau de

cuivre autour de ces armatures (**figure 41**) en remettant en place des omégas à la panne à souder¹². Les feuilles de cuivre ont été soudées sur une petite éclisse¹³ en métal pré-étamée (**figure 42**), qui vient recouvrir les deux feuilles métalliques,

12. Outil permettant la réalisation de soudures.
 13. Pièce d'assemblage permettant d'immobiliser plusieurs parties mobiles d'une structure.



Figure 39

Sablage de la peau de cuivre.



Figure 40

Gommage réalisé pour retirer la couche d'oxydation du cuivre.



Figure 41

Refixation de la peau de cuivre sur l'armature.



Figure 42

Soudure des feuilles de cuivre aux éclisses.

le tout soudé avec une brasure¹⁴ plomb-étain.

La soudure se fait à partir de ces éclisses que l'on pré-étame¹⁵. Reste ensuite un travail de maîtrise extrêmement délicat de la température pour que l'étamage de cette éclisse permette de fusionner avec les plaques de cuivre que l'on va venir mettre en superposition.

La **figure 43** montre l'éclisse où les peaux de cuivre sont mises en superposition. Pour travailler sur ces statues, il faut parfois les soulever (**figure 44**). En effet, malgré une armature interne, le moindre impact peut provoquer une déformation sur la peau en cuivre.

Au cours de tout ce travail de restauration, il n'a pas été nécessaire de restituer des parties lacunaires ou

manquantes. Les pathologies à traiter étaient liées à l'embou-tissage de la taule, à la rupture de soudure entre les plaques. En fait, nous n'avons recréé qu'un seul élément, le socle ; plus précisément, la peau de cuivre qui venait recouvrir le socle d'un des évangélistes (**figure 45**). À partir d'une seule feuille de plomb, nous avons remodelé le socle de cette statue. C'est à la base un travail de chauffage du cuivre, de recuit, de martelage sur des formes que l'on a fabriquées. Ce travail systématique – très complexe et qui se fait à l'œil – va permettre d'étirer le cuivre sans provoquer de déchirures, de plis. C'est en fonction de la tonalité que va prendre la feuille de cuivre que le dinandier va savoir s'il peut retravailler le cuivre ou s'il faut attendre. De l'expérience, toujours de l'expérience !

La **figure 46** montre quelques exemples de martelage des feuilles de cuivre. Arrivés à ce stade du travail de restauration de l'armature, de



Figure 43

Photo de l'éclisse où il y a superposition des plaques de cuivre.

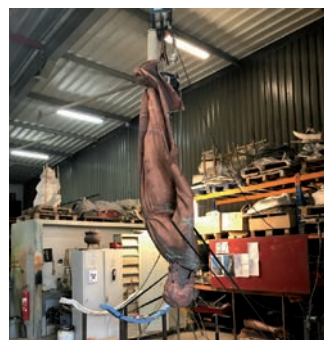


Figure 44

Soulèvement des statues de cuivre pour pouvoir travailler dessus.



Figure 45

Différentes étapes du travail de la plaque de plomb permettant de recréer le socle manquant d'un des évangélistes.

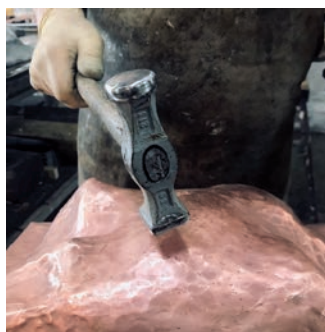


Figure 46

Martelage d'une feuille de cuivre (à gauche) et mise en place d'une plaque martelée dans la tête d'une statue (à droite).

l'épiderme, se pose alors la question de l'aspect définitif de ces statues. On connaît la tonalité verte liée à l'oxydation du cuivre. Pourtant la Statue de la Liberté en cuivre est brune. En fait, le cuivre natif commence à s'oxyder par des colorations plutôt brunâtres (cuprite). L'oxydation du cuivre telle que nous la connaissons ne se produit qu'au bout de plusieurs décennies. On observe très bien cette évolution sur les statues de la

flèche de Notre-Dame. La **figure 47** montre les statues photographiées (noir et blanc) très peu de temps après leur mise en place et l'on distingue bien qu'elles sont très sombres, alors que **figure 48**, prise quarante ans après, elles sont devenues complètement blanches. Avec le LRMH, nous avons travaillé avec Aurélie Azéma sur ces questions de patine et avons pris la décision de restituer à ces statues la patine « naturelle »,



Figure 47

Image des statues très peu de temps après la mise en place.



Figure 48

Image des statues de cuivre quarante ans après leur installation.

celle-là même qui se produit au niveau du cuivre dans les premières années. Quand vous posez une gouttière en cuivre chez vous, elle est de teinte rosée, (c'est le cuivre natif) et ce n'est qu'après qu'elle va commencer à brunir. C'est ce phénomène que nous avons reproduit de façon artificielle

(figure 49), avec l'application de différents réactifs, à chaud ou à froid, et dans un premier temps à froid avec le barège, qui est un polysulfure de potassium¹⁶ que l'on applique au pinceau et qui fait tout de

16. Composé chimique contenant des atomes de soufre.



Figure 49

Application de barège sur les statues de cuivre.

suite réagir le cuivre pour lui donner un aspect très sombre. Cette technique permet d'atteindre les zones profondes pour correction des nuances ; nous avons travaillé à chaud avec un dichromate d'ammonium¹⁷ mais à des températures de chauffe inférieures

17. Composé chimique orange et toxique. À la chaleur, il se dégrade en un composé vert.

à la température de fusion de la brasure à l'étain-plomb (si vous n'y prenez pas garde, vous démontez la statue !). Et encore une fois, c'est la maîtrise des températures qui a permis d'obtenir ce type de résultats que l'on peut observer non plus uniquement chez SOCRA à Périgueux (*figure 50*) mais directement à la Cité de l'architecture à Paris (*figure 51*).



Figure 50

Statues restaurées dans les ateliers de SOCRA à Périgueux.

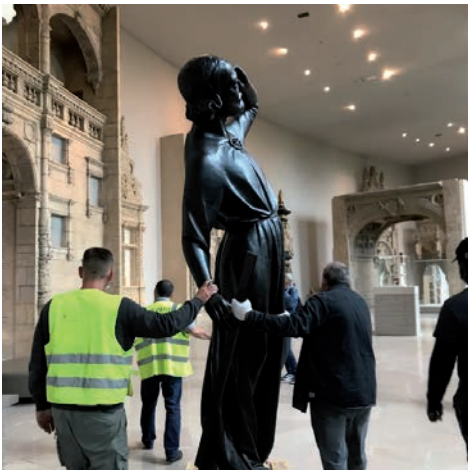


Figure 51

Statues de cuivre restaurées à la Cité de l'architecture de Paris.

Conclusion

On le sait, ce n'est pas qu'à l'occasion des accidents ou des catastrophes que l'on s'intéresse à Notre-Dame. L'entretien, la surveillance et la restauration mobilisent continuellement toute la communauté des spécialistes. C'est une condition essentielle pour respecter et valoriser le patrimoine national. Les circonstances ont fait que l'entreprise SOCRA était déjà sur les lieux avant l'incendie pour son programme de restauration. Elle a donc pu être efficace très rapidement et replacer le Chantier de Notre-Dame avec ses spécificités techniques et culturelles dans l'histoire de la vie du patrimoine. C'est une chance pour les lecteurs qui ont ainsi le meilleur accès à ces merveilles techniques et artistiques – dont finalement, peu de gens ont une conscience aiguë.

Le travail de SOCRA sur la flèche de Notre-Dame est aussi bien sûr, l'occasion d'un hommage à Viollet-le-Duc qui, il y a cent cinquante ans, avait traité des situations analogues. Il est certes connu et admiré mais après la lecture de ce chapitre, nous comprenons davantage son bonheur à être à la fois un artiste et un ingénieur.

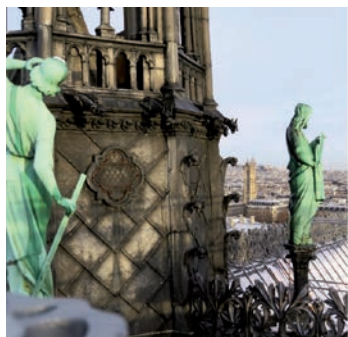
Annexes

Quelques documents supplémentaires sur la flèche



Annexe 1

Croquis et photo de la flèche.



Annexe 2

Décors en plomb de la flèche.

Conservation-restauration de peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb

Witold Nowik et Marie Parant-Andaloro

Witold Nowik est docteur en chimie analytique. Il a travaillé à l'Institut d'études et de conservation des biens culturels de l'université Nicolas Copernic à Torun (Pologne), puis au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques en France (LRMH) ainsi qu'au Centre de Recherches et de Restauration des Musées de France (C2RMF). Depuis 2017, il est responsable du pôle « Peinture murale et polychromie » au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques. Actuellement, en supplément d'activités d'enseignement, il est membre du groupe « Décor » du chantier scientifique de Notre-Dame (CNRS et ministère de la Culture).

Marie Parant-Andaloro a été formée à l'école des Beaux-Arts de Toulouse, spécialité « Restauration de tableaux ». Elle a travaillé dans les années 1980/1990 dans une entreprise de restauration œuvrant exclusivement pour les Monuments Historiques. En 1991, elle crée son atelier dont l'essentiel de l'activité concerne les Monuments Historiques. Dans un souci de perfectionnement, elle obtient une licence en histoire de l'art (1989) et un Master en conservation restauration des biens culturels (2008) à l'université de Paris-I Panthéon- Sorbonne. Elle s'est spécialisée dans la restauration de grands décors.

1 **Élaboration du protocole de nettoyage des peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb**

Ce chapitre traite de la sélection de méthodologies pour le nettoyage de peintures murales. Plus précisément, il s'agit du nettoyage de la pollution par le plomb exogène

consécutif à l'incendie de la cathédrale. Une application à l'échelle d'une chapelle test, rédigée par Marie Parant-Andaloro sera également présentée, allant jusqu'au nettoyage du plomb de la chapelle Saint-Ferdinand du déambulatoire, pris comme opération pilote du grand chantier de restauration des peintures.

1.1. Contexte

L'incendie a détruit la toiture de Notre-Dame à 99 %. Une grande partie du plomb de sa couverture s'est répandue sur la voûte sous forme de fragments tombés en coulures, tandis qu'une autre partie s'est retrouvée dans l'atmosphère, sous forme d'aérosols. L'évaluation de cette dernière partie est incertaine : certains auteurs s'avancent sur une masse envolée d'environ 180 kg alors que d'autres l'estiment plutôt aux alentours d'une tonne. Dans tous les cas, la pollution superficielle post-incendie à l'intérieur de la cathédrale était très hétérogène. Une quantité importante de plomb sous forme d'aérosols s'est déposée sur les peintures murales des chapelles du chœur. Il s'est alors agi d'éliminer la pollution résultante.

À l'intérieur de la cathédrale, le niveau de pollution post-incendie était variable : de

11 mg/m² à 36 mg/m² de plomb au niveau des tribunes et de 0180 mg/m² à 19 mg/m² au niveau du rez-de-chaussée. La limite réglementaire liée à la toxicité du plomb surfacique est 1 mg/m². Les quantités de pollution au plomb sur les surfaces à l'intérieur de la cathédrale étaient donc globalement bien plus élevées.

Pourquoi nous sommes-nous préoccupés de l'élimination du plomb exogène ? La présence d'une pollution élevée de plomb à l'intérieur de la cathédrale impose un protocole plomb à toutes les équipes intervenantes. Ce dernier est très contraignant et nécessite des moyens de protection individuelle et collective lourds – des masques avec une assistance respiratoire par exemple – ainsi que des procédures de sortie de chantier qui impliquent une décontamination en plus du temps de présence sur le chantier.

1.2. Mise en place des essais

Pour mettre au point le protocole d'élimination du plomb exogène, nous avons réalisé des essais dans le passage de la sacristie qui se trouve au niveau du déambulatoire de la cathédrale (*figures 1 et 2*), situé non loin des zones d'effondrement de la structure de la voûte. Ces zones ont constitué un point d'entrée de la pollution par aérosols à l'intérieur de la cathédrale. Les décorations peintes des chapelles qui entourent le déambulatoire ont été exécutées à l'huile sur une préparation du mur adéquate. Elles ont été réalisées entre 1848 et 1868



Figure 1

Photographie du passage de la sacristie.

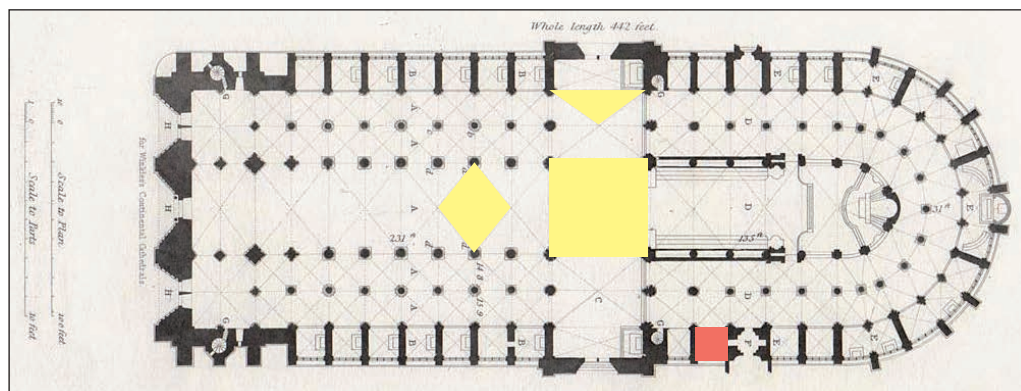


Figure 2

Plan de la cathédrale Notre-Dame de Paris avec en jaune les zones d'effondrement des voûtes et en rouge le passage de la sacristie.

par l'entreprise Courtin et Anzelme, pendant les travaux de restauration menés par Viollet-le-Duc.

La **figure 3** représente la chapelle Saint-Germain, restaurée en 2018 par l'équipe de Marie Parant-Andaloro. Comme nous pouvons le voir sur cet exemple, les chapelles étaient entièrement peintes – parois et voûtes. Les décors des autres chapelles sont aujourd'hui recouverts par les salissures qui se sont accumulées au long des années. Nous avons pu visualiser les peintures de la sacristie à l'état neuf grâce à un ouvrage édité en 1870 (à la fin des travaux de restauration du 19^{e} siècle) et qui montre les relevés de décors des chapelles (**figure 4**).

Les tests de protocoles de déplombage ont été menés sur deux registres différents du mur ouest du passage, en prenant en compte le fait que la répartition de plomb était non uniforme, comme cela a été mis en évidence par les

mesures de la pollution à différents niveaux de la cathédrale. Nous avons délimité un registre haut à peu près au niveau de la naissance de voûte, à 3,5 m du sol, et un autre plus bas à 1,5 m, qui correspondait à la hauteur d'une personne pouvant rentrer en



Figure 3

La chapelle Saint-Germain après restauration.

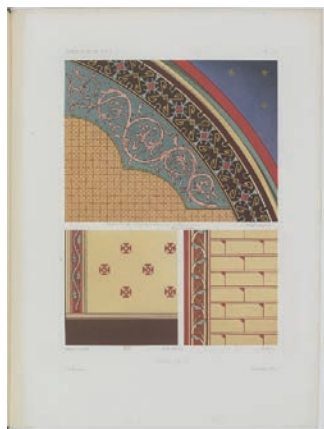


Figure 4

Planche LIX, M. Ouradou, E. Viollet-le-Duc, « Peintures murales des chapelles de Notre-Dame de Paris », éd. Morel, Paris 1870.



Figure 5

Décor du passage de la sacristie de Notre-Dame avant la réalisation des tests de dépollution.

contact direct avec les surfaces polluées. Sur ces deux registres, nous avons délimité des carrés de 40 cm x 40 cm (figure 5), pour pouvoir faire les tests sur des surfaces assez importantes et qui en même temps, permettait des évaluations de l'efficacité

d'élimination du plomb exogène selon diverses méthodes. Dans ces zones du registre haut et du registre bas, nous avons gardé un carré témoin ; les carrés restants ont été nettoyés préalablement par aspiration THE avec brossage (figure 6).



Figure 6

Brossage et aspiration d'un des carrés tests.

Par la suite, nous avons gardé un carré nettoyé par cette méthode et traité un autre par un essuyage avec un papier absorbant humidifié. Deux carrés restants ont été réservés à l'application de gels de nettoyage (*figure 7*). L'un d'eux a été utilisé pour l'application en un seul passage et l'autre a été réservé au nettoyage par plusieurs passages, dont le nombre restait à définir après un premier essai. Les essais ont eu lieu les 17 et 18 septembre 2019. Une remarque sur la composition du gel de nettoyage : les produits sont fabriqués sur le chantier à partir d'un solvant (l'eau dans notre cas), d'un produit gélifiant, qui pour nous est un copolymère d'acide acrylique et d'acrylate (*figure 8*). Ce produit en solution présente également des propriétés tensioactives et légèrement complexantes. Les solutions de ce type de copolymère sont

acides (pH d'environ 3) et ne présentent pas une viscosité élevée. Pour obtenir un gel, il est nécessaire de ramener le pH de la solution vers des valeurs plus importantes. Le diagramme (*figure 9*) montre la formation des gels pour différents produits gélifiants à base d'acrylates. Le domaine de leur gélification, caractérisée par augmentation de viscosité, se situe globalement entre pH 4 et pH 11. Pour y arriver, nous avons utilisé la solution du citrate d'ammonium tribasique (*figure 10*) qui a permis de tamponner la solution de ce copolymère autour de pH 7 et d'obtenir un gel. En même temps, il a donné la possibilité de la séquestration des différents cations métalliques, notamment du plomb, avec l'ion citrate.

Les essais ont été accompagnés de contrôles de l'efficacité d'élimination du plomb exogène, qui était réalisés avec quelques méthodes optiques



Figure 7

Application de gel de nettoyage sur un des carrés tests.

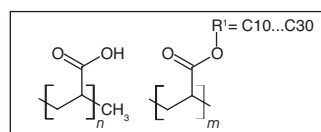


Figure 8

Copolymère d'acide acrylique et d'acrylate.

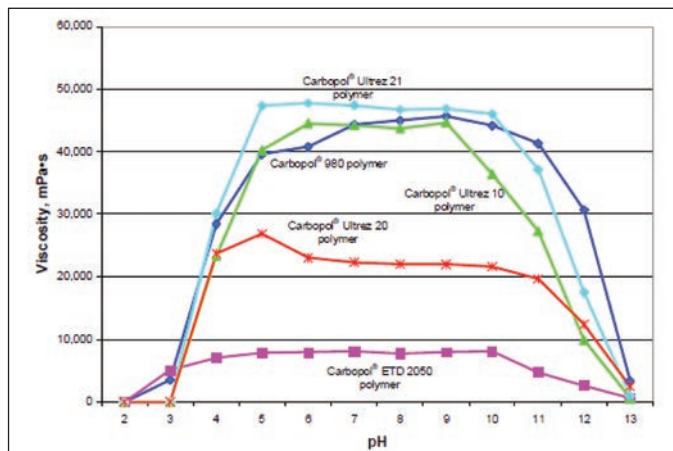


Figure 9

Viscosité des différents gels formés par quelques acrylates en fonction du pH.

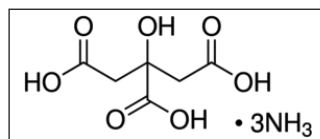


Figure 10

Molécule du citrate d'ammonium tribasique.

et physico-chimiques sélectionnées. Nous nous sommes tout d'abord appuyés sur l'observation comparative des surfaces non nettoyées puis nettoyées par microscopie de terrain (*figure 11*).

La méthode des tests au scotch (*figure 12*), généralement employés pour les contrôles de cohésion des différents matériaux, a été utilisée ici

simplement pour prélever superficiellement la salissure et la pollution au plomb. Nous avons aussi eu recours à l'évaluation de la quantité de pollution au plomb par la méthode de spectroscopie de fluorescence X (*figure 13*) et le test lingette. Ce dernier est un essai normé, qui permet d'évaluer la quantité de plomb surfacique acido-soluble.

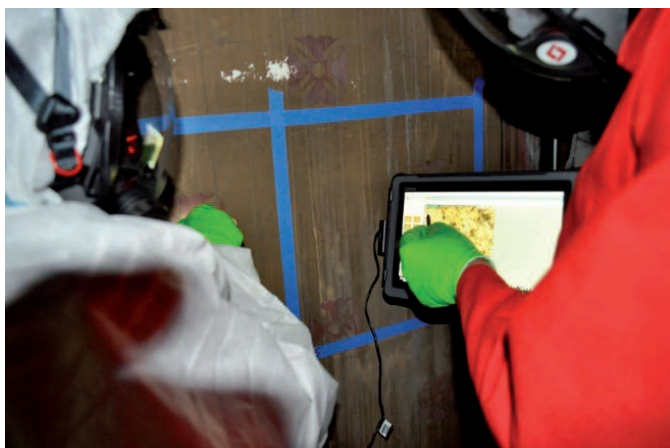


Figure 11

Microscopie digitale de terrain.

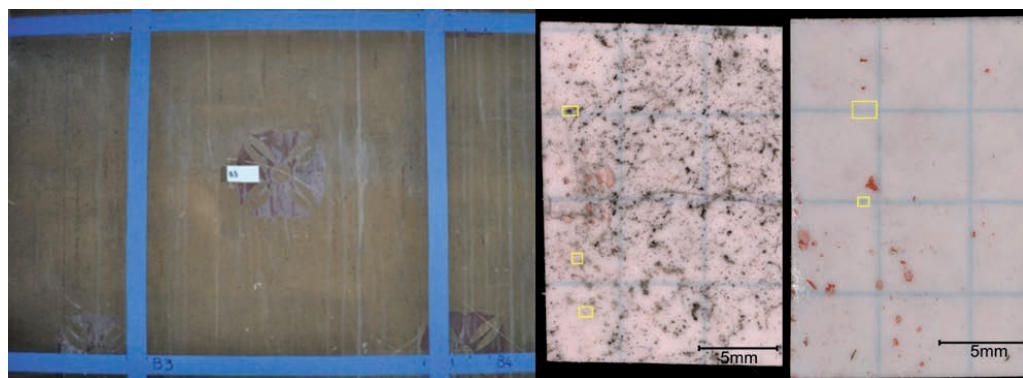


Figure 12

Tests au scotch. À gauche, un prélèvement avec la bandelette de scotch ; à droite, observation au microscope de la surface de scotch, appliquée sur les carrés avant application du gel et après application du gel.



Figure 13

Analyse par la spectroscopie de fluorescence X.

Les scotchs avec les prélèvements superficiels de salissure ont été amenés au laboratoire et observés en microscopie optique et au MEB (microscopie optique à balayage). Après la série d'essais, nous avons pu comparer les résultats obtenus (figure 14). À gauche, nous avons le carré témoin et le carré dépoussiéré se trouve en quatrième position. Le papier absorbant humidifié (appelé ici lingette humide) a

été testé sur le carré en position 2, puis le gel a été appliqué sur les carrés 3 et 5. Ces essais montrent qu'après le dépoussiérage, on élimine surtout une partie qui semble être un peu duveteuse, bien visible sur le prélèvement du carré témoin, mais on ne change pas l'état de nettoyage de la peinture – elle reste toujours très sombre. Avec un papier absorbant humidifié, on arrive déjà à nettoyer un peu plus la surface



Figure 14

Résultats macroscopiques obtenus après les différents tests. Dans l'ordre : le témoin, le résultat après passage à la lingette humide, le résultat après l'application d'une couche de gel, le résultat après dépoussiérage et le résultat après deux passages de gel.

et peut-être aussi à éliminer le plomb. Mais un résultat beaucoup plus évident est obtenu avec le gel. Même une seule application améliore grandement l'état de lisibilité de la peinture. Finalement, nous avons considéré l'application du gel en deux fois comme suffisante pour nettoyer ces surfaces, car elle améliore

encore l'état de nettoyage de la peinture, mais relativement peu par rapport à une seule application. L'observation des surfaces des carrés tests au microscope (figure 15) permet des comparaisons plus détaillées (par exemple : elles montrent la présence de fibres textiles dans la couche de salissures).

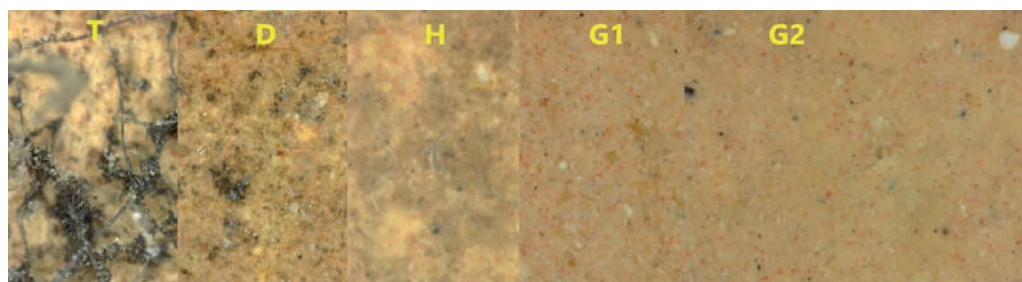


Figure 15

Résultats observés au microscope de terrain. T : témoin ; D : après dépoussiérage ; H : après nettoyage à la lingette humide ; G1 : après un passage de gel et G2 : après deux passages de gel.

1.3. Résultats obtenus après les essais

En réalité, la salissure présente à la surface de la peinture est très complexe et contient du plomb avec d'autres dépôts. Après le nettoyage par l'aspiration, la surface devient plus lisse. Il est possible d'observer encore quelques restes de petits amas de salissure non nettoyés, mais la situation est améliorée d'une manière importante. L'utilisation du papier absorbant humidifié donne l'impression d'étaler un peu les restes de salissures qui n'ont pas été aspirés. En revanche, les deux cas d'applications de gel, en un et deux passages, rendent la surface de peinture très nette. Les observations sur les tests faits avec du scotch (*figure 12*) après le nettoyage montrent dans la partie basse de la figure à gauche, la présence de particules colorées. Toutefois, il ne s'agit pas de salissures. Elles ont été identifiées comme des micro-fragments de la peinture originale qui ont été malheureusement décollés par le scotch.

L'efficacité d'élimination du plomb a été évaluée par la spectroscopie de fluorescence X, mais le fait que la peinture contient des pigments au plomb ne permet pas de noter de différences claires entre les résultats avant et après nettoyage. Les variabilités observées pour les différentes mesures correspondent probablement à la marge d'erreur de la méthode. En revanche, l'évaluation de la teneur en plomb superficiel par le test lingette, correspondant à une norme française, permet de prélever le plomb de la

surface puis, après solubilisation dans un acide, de l'analyser par spectroscopie d'émission atomique. Par cette méthode, nous avons pu démontrer que nous sommes arrivés à diminuer la quantité de plomb présent sur la peinture (*figures 16 et 17*). Pour le carré témoin, les valeurs de plomb acido-soluble d'ordre de 12 à 16 mg/m² sont très éloignées du 1 mg/m² fatidique. Le dépoussiérage diminue cette pollution d'un tiers. La lingette, ou plutôt le papier absorbant humidifié appliqué après le dépoussiérage, la diminue encore mais nous restons loin de cette limite. Ce qui permet d'éliminer la pollution de manière vraiment efficace, c'est l'application de gel en une ou deux fois, faisant tomber la quantité de plomb exogène à des valeurs inférieures à la limite. Une petite anomalie de valeurs observée sur le registre bas, avec augmentation de



Figure 16

Réalisation du test lingette.

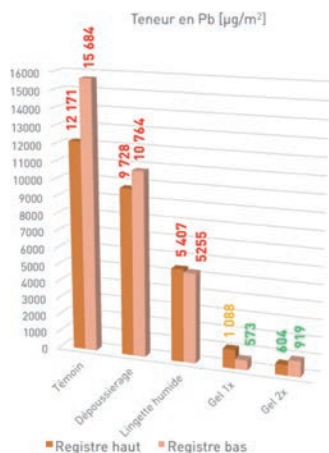


Figure 17

Évaluation de teneur en Pb superficiel acido-soluble (« test lingette »).

teneur en plomb après deux applications par rapport à une seule, suggère que la répétition d'application du gel remobilise peut-être le plomb de la couche de peinture. On atteindrait alors la limite d'élimination de la pollution.

Le protocole retenu a été l'utilisation de gels de nettoyage. Sa mise en œuvre sur un chantier test a été faite à la chapelle Saint-Ferdinand.

2 Mise en place du protocole

Pour la mise en œuvre du protocole de nettoyage de la pollution au plomb, nous avons travaillé dans la chapelle Saint-Ferdinand, située à l'opposé de la chapelle où les tests ont été faits et qui est toute proche des zones d'effondrement (figure 18).

La chapelle a été confinée pendant tout notre travail afin d'être complètement isolée du chantier de sécurisation de la cathédrale et du démontage de l'échafaudage. La figure 19

montre la chapelle Saint-Ferdinand sans échafaudage avant restauration ; la figure 20 une partie de l'équipe portant l'équipement de protection individuelle obligatoire.

La tenue classique de Notre-Dame est constituée de chaussures de sécurité et de casques. Nous avons par ailleurs des combinaisons à usage unique, des gants jetables et à la ceinture, un moteur qui amène de l'air filtré dans les cagoules avec visière. À l'arrivée dans la chapelle, la première préoccupation a été le dépoussiérage. La figure 21 montre la voûte et la figure 22 l'étage inférieur de la voûte.

Dans un premier temps, la poussière est éliminée à l'aide d'un pinceau doux (un spalter), puis aspirée avec un aspirateur très haute efficacité (THE), équipé d'un filtre adapté à la poussière de plomb. Nous reprenons le protocole exposé plus haut pour éliminer les particules de plomb, également efficace pour nettoyer la couche picturale. L'objectif

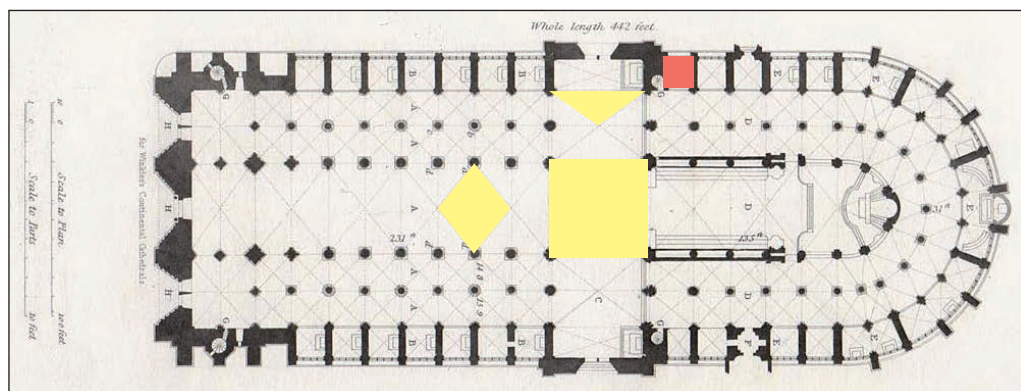


Figure 18

Plan de la cathédrale Notre-Dame de Paris avec en jaune les zones d'effondrement et en rouge la chapelle Saint-Ferdinand.



Figure 19

Photo de la chapelle Saint-Ferdinand sans échafaudage avant restauration.



Figure 20

Photo d'une partie de l'équipe.



Figure 21

Photo de la voûte de la chapelle Saint-Ferdinand.



Figure 22

Photo de l'étage inférieur de la chapelle Saint-Ferdinand.

est un nettoyage homogène de l'ensemble du décor, de la voûte au rez-de-chaussée. La grande problématique de la peinture murale est l'homogénéité du nettoyage sur des surfaces très importantes. Après

avoir employé différents pourcentages de gel (**figure 23**), nous retenons le gel à 2 % de citrate d'ammonium.

Cette concentration a été utilisée tout le long du nettoyage. Le nombre de passages varie

en fonction des niveaux : pour la partie basse, la plus encrassée parce qu'à portée de mains, au moins quatre passages ont été nécessaires alors que deux ont suffi pour les autres niveaux. Les **figures 24** et **25** montrent les équipes préparant le mélange constituant le gel, ce dernier étant préparé par quantités d'environ 5 litres.

Les opérations de base sont les suivantes : passage du gel avec un pinceau, brosse de la surface avec une brosse dure, protection de la couche picturale inférieure au moyen d'une éponge. Ces opérations sont répétées trois ou quatre fois que l'on soit sur les chapiteaux ou sur les murs. La **figure 26** montre le



Figure 23

Résultats des tests réalisés.



Figure 24

Membres de l'équipe préparant le mélange.



Figure 25

Membre de l'équipe nettoyant un mur de la chapelle.



Figure 26

Même processus de nettoyage sur le chapiteau et les murs.

résultat obtenu. Le petit carré clair montre que l'on est passé d'un gris très foncé à un blanc cassé assez joli.

La **figure 27** montre les différents outils utilisés : le papier absorbant, les pinceaux et pour le rinçage, les pulvérisateurs et l'éponge.

La **figure 28** montre la voûte en cours de nettoyage. La

différence chromatique est frappante : le décor de Viollet-le-Duc est d'une qualité extraordinaire, avec des liants et des pigments de qualité exceptionnelle. La **figure 29** montre l'étoile réalisée à la feuille d'or.

Après le nettoyage au niveau de la voûte, nous passons au nettoyage au niveau du



Figure 27

Différents outils utilisés lors de la phase de nettoyage.



Figure 28

Voûte de la chapelle en cours de nettoyage.



Figure 29

Étoile du décor de Viollet-le-Duc réalisée à la feuille d'or.

deuxième registre (*figure 30*). La gamme colorée est beaucoup plus lumineuse et nous nous sommes contentés d'un simple nettoyage. Sauf altération par des dégâts des eaux ou des infiltrations d'eau, nous découvrons une peinture en très bon état de conservation qui ne réclame aucune intervention. Les motifs sont réalisés à la feuille d'or avec un filet noir qui souligne les aigles. Il s'agit là d'un travail d'une très grande qualité !

Les *figures 31* et *32* sont des photos prises au niveau de la voûte – avant et après notre intervention. Pour passer d'un état à l'autre, nous avons d'abord dépoussiéré. A également eu lieu la dépose des vitraux restaurés en atelier et le re-fixage de la couche picturale, la consolidation de la couche picturale et des enduits. Une fois la couche picturale sécurisée, nous

avons pu dépoussiérer la surface avec un aspirateur THE. Puis, nous avons nettoyé et repris les enduits pour faire la réintégration colorée. Dans ce cas précis, les vitraux ont été reposés d'abord et ce n'est qu'après que nous avons recoloré les joints pour arriver à un ensemble chromatique cohérent et homogène.

La restauration de cette chapelle a duré six mois. Elle a été effectuée par un groupement de neuf restaurateurs avec en moyenne quatre intervenants par jour ; ceci correspond à l'équivalent de quatre-vingts jours de travail pour une personne. La *figure 33* montre la chapelle Saint-Ferdinand après restauration et retrait des échafaudages.

Cette restauration s'est déroulée en co-activité avec les restaurateurs de vitraux – l'entreprise Vitrail France de l'entreprise de parement Pierre Noël et des restaurateurs de



Figure 30

Nettoyage du deuxième niveau de registre de la chapelle.



Figure 31

Photo de la voûte de la chapelle avant restauration.



Figure 32

Photo de la voûte après restauration.

sculptures, l'entreprise SOCRA². L'exemplarité de ce chantier réside dans le fait que tout a été restauré en même temps ce qui est assez rare puisque dans le domaine de la peinture murale, on s'occupe généralement de la peinture mais pas spéciale-

2. La SOCRA est une entreprise française spécialisée dans la conservation, la restauration, la reproduction et la production d'œuvres d'art et de monuments.

ment de la pierre. Nous avons un ensemble qui possède une gamme colorée exceptionnelle puisque le rouge et le bleu des vitraux font écho aux couleurs des registres supérieurs tandis que la couleur de la pierre nettoyée que l'on voit **figure 33** (image au centre ; les voûtes), se retrouve sur les colonnes et les arcs de la voûte. On assiste donc à un véritable jeu d'intérieur et d'extérieur.

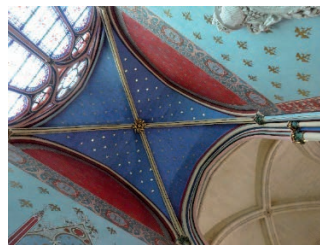


Figure 33

Photos de la chapelle Saint-Ferdinand après restauration et retrait des échafaudages.

Conclusion

Les métiers d'art... ! Le concept paraît parfois démodé, semblant appartenir au passé ! Tous ces objets magnifiques, fruits de savoir-faire traditionnels ne sont-ils pas aujourd'hui fabriqués par des automates, des robots copieurs qui prospèrent loin de nos latitudes ?

Le travail présenté dans ce chapitre sur la restauration des peintures vieilles de nombreux siècles montre qu'il ne faut pas se laisser aller au pessimisme, à l'abandon. Oui, les grandes causes comme celle de la restauration de Notre-Dame réintroduisent nos métiers dans une actualité où les artisans soigneux, appliqués, revivifient les anciennes pratiques pour offrir de magnifiques restaurations, véritables re-créations réalisées sous nos yeux. L'incendie a réveillé l'admiration pour les œuvres anciennes mais aussi la conscience de ces précieux savoir-faire et la fascination que leurs performances provoquent.

Il faut leur dire merci et leur exprimer l'importance du rôle qu'ils jouent au sein de notre société.

Remerciements

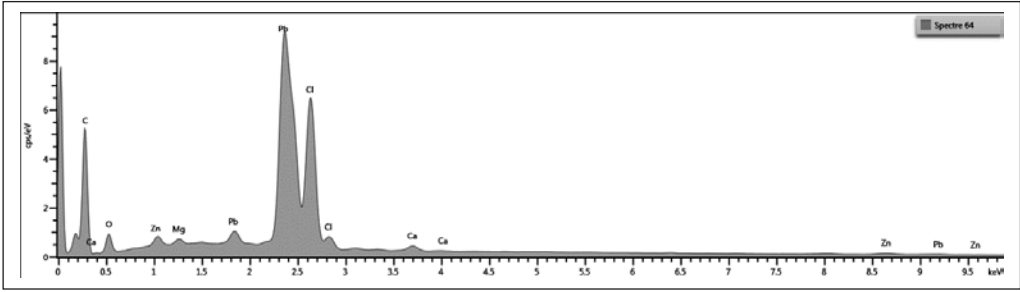
Les remerciements de Marie Parant-Andaloro vont naturellement à tous les membres du groupement³ qui ont participé à la restauration : Jessica Barré, Delphine Burgart, Anaïs Grousseau, Marie-Cécile Kfourri, Felicja Lamprecht, Charlotte Phelouzat, Isabelle Stetten et Agnès Roze.

Witold Nowik remercie les collègues du pôle « Peinture murale et polychromie » du LRMH⁴ : Stéphanie Duchêne et Didier Brissaud qui ont participé à l'étude du protocole de déplombage.

3. Groupement GMPA : Groupement Marie Parant-Andarolo.

4. LRMH : Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

Annexe



Annexe I

Mise en évidence de la pollution superficielle au plomb post-incendie dans la cathédrale avec la sonde EDX.

Conservation des maçonneries endommagées par les sels solubles à la suite de l'incendie de Notre-Dame de Paris en 2019

Responsable du pôle scientifique « Pierre » du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

Elle est enseignante à l'école de Chaillot, à l'Institut National du Patrimoine et collabore à diverses formations post-universitaires en France et à l'étranger.

1 Introduction

1.1. Les sels et l'altération des matériaux inorganiques poreux

Ce chapitre traite de l'endommagement de la pierre par les changements de phase des sels solubles. Il évoque également quelques pistes de remédiation à cette importante problématique de notre patrimoine bâti.

Les sels sont responsables de dégradations dans l'environnement naturel, mais aussi sur le bâti. Pour illustrer ce point, j'ai choisi le cas de l'halite¹,

un sel bien connu. Voici trois cas d'altérations liées à la cristallisation de ce sel : (i) celui de l'ancien grenier à sel de Honfleur, édifié en 1670 en vue du stockage du sel pour la gabelle (**figure 1**) ; (ii) le cas d'un muret (**figure 2**) en brique, matériau inorganique poreux qui, comme la pierre, est susceptible d'absorber de l'eau par succion capillaire. Le chlorure de sodium dispersé au sol comme sel de déverglaçage a pénétré dans cette maçonnerie sous forme dissoute, puis est venu précipiter en surface sous forme d'efflorescences ; (iii) le troisième cas est la cathédrale de Nikorshminda en Géorgie (**figure 3**), dont le

1. Espèce minérale solide composée de chlorure de sodium de formule brute NaCl.

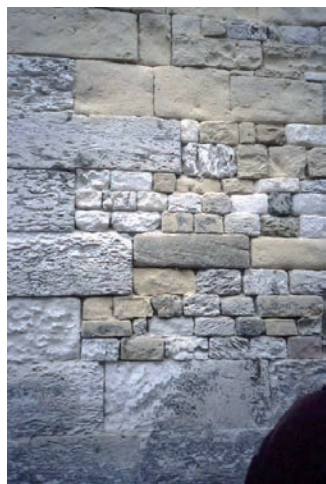


Figure 1

Parement du grenier à sel de Honfleur (France) : l'halite (NaCl) qui contamine cette maçonnerie induit d'importantes pertes de pierre et de mortier.

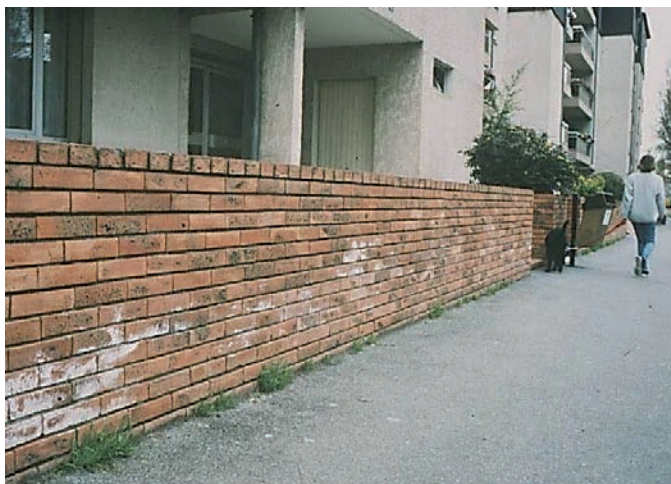


Figure 2

Muret en brique à Nogent-sur-Marne (France), cas de dégradation par du sel de déverglaçage.



Figure 3

Cathédrale de Nikorshminda (Géorgie), cas de dégradation causée par un produit de traitement (hypochlorite de sodium utilisé comme biocide).

parement extérieur a malheureusement été traité avec de l'hypochlorite de sodium² pour éliminer les contaminations biologiques. Cet oxydant très puissant est un excellent biocide, mais il est formellement déconseillé de l'utiliser sur la pierre car il contient beaucoup de chlorure de sodium.

1.2. L'humidité relative d'équilibre

L'une des propriétés importantes des sels est « humidité relative d'équilibre », dont l'acronyme est HRE.

Pour définir cette propriété, nous considérerons une saumure³

2. Composé de formule brute NaClO . Ce solide très instable est couramment utilisé en solution aqueuse comme agent désinfectant et blanchissant (ex. : eau de Javel).

3. Solution aqueuse d'un sel, saturée ou en forte concentration.

saturée⁴ en un sel, située en milieu clos et à une température donnée. On appelle humidité relative l'équilibre de ce sel, l'humidité relative qu'atteindra à l'équilibre l'air situé au-dessus de cette saumure (figure 4). Par exemple, dans le cas de l'halite (NaCl), l'HRE a pour valeur 75 % à 20 °C. Dans le cas de la nitronatrite $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, l'HRE est égale à 53 % à la même température.

Si l'humidité ambiante change, par exemple en plaçant les saumures saturées au contact d'un grand volume d'air dont l'humidité relative est abaissée jusqu'à 30 %, c'est-à-dire au-dessous de l'HRE des deux sels, les deux solutions vont s'évaporer et les sels cristalliseront (figure 5).

4. Relatif à une solution qui ne peut plus dissoudre une quantité supplémentaire de substance.

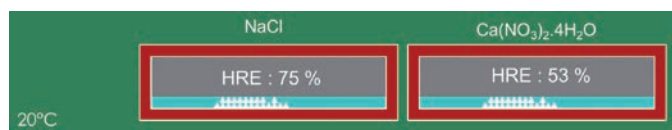


Figure 4

L'air, situé au-dessus d'une saumure saturée de chlorure de sodium (à gauche), et de nitrocalcite (à droite) atteint une humidité relative constante à une température de 20 °C : respectivement 75 % et 53 %. Ces valeurs correspondent à l'humidité relative d'équilibre (HRE) de ces sels.

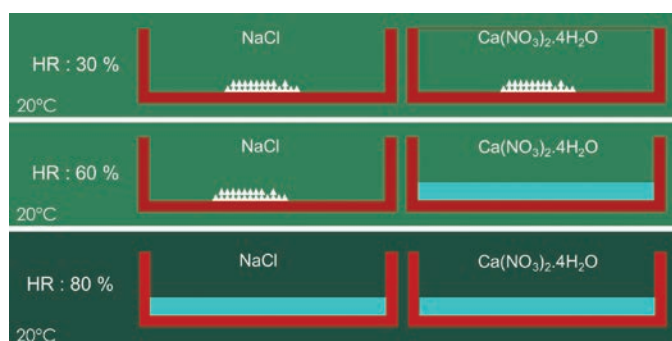


Figure 5

Effet de l'humidité relative (HR) ambiante sur deux sels à température constante (20 °C) : le chlorure de sodium (HRE : 75 %) et la nitrocalcite (HRE : 53 %).

Dans un deuxième temps, si ces saumures saturées sont placées dans un environnement atmosphérique ayant une humidité relative de 60 %, le chlorure de sodium restera à l'état cristallisé car l'HR est inférieure à son HRE. En revanche, la nitrocalcite, dont l'HRE est plus basse que l'humidité ambiante, va capter des molécules d'eau dans l'atmosphère puis se dissoudra dans l'eau captée. Ce sel sera devenu déliquescent⁵.

Enfin, dans un troisième temps, si l'humidité ambiante

est amenée jusqu'à 80 %, le chlorure de sodium tout comme la nitrocalcite précédemment, captera des molécules d'eau dans l'atmosphère puis se dissoudra dans l'eau captée car l'humidité ambiante sera devenue supérieure à l'HRE du NaCl. À son tour, ce sel sera devenu déliquescent. Cette propriété joue directement sur l'interaction entre les solutions salines et les matériaux inorganiques poreux des monuments : mortiers d'enduits, de réparation et de joints, pierres, terres cuites, briques. Si des sculptures ou maçonneries sont contaminées par

5. Qui absorbe tant l'humidité qu'il se délite, qu'il se dissout.

du chlorure de sodium, elles subiront des dégradations par cristallisation saline à chaque fois que l'humidité ambiante passera au-dessous de l'HRE de ce sel, qui rappelons-le, est égale à 75 % à 20 °C.

La dangerosité de ce sel dans un lieu donné dépendra ainsi du nombre annuel de passages du sel de l'état déliquescents ($HR > HRE$) à l'état cristallisé ($HR < HRE$).

Dans l'exemple analysé **figure 6**, est représentée la variation de l'humidité relative entre le 15 novembre 2019 et le 2 février 2020 dans la chapelle Saint-Éloi située au début de la nef de Notre-Dame (**figure 7**). Pour le chlorure de sodium, il y a eu en un mois et demi, 7 événements potentiels de cristallisation, mais seulement 6 événements pour la nitrocalcite. Ces sels ont eu sur ce site – et dans ce laps de temps – un potentiel destructeur très différent.

2 La pollution saline, source de dégradation sur les voûtes en place et les éléments tombés au sol

2.1. Description des différentes parties de Notre-Dame

Pour mieux appréhender l'exposé qui va suivre, il est important de rappeler la nomenclature des grandes parties de l'édifice. La **figure 7** indique où se trouvent la nef, le transept, le chœur et la chapelle Saint-Éloi. L'élévation du bras sud du transept est bien visible sur le modèle 3D.

2.2. Pollution saline des pierres tombées au sol

Les sels solubles pénètrent dans les matériaux poreux à l'état dissout, par succion capillaire. L'endommagement par les sels à Notre-Dame provient de ce que la cathédrale,

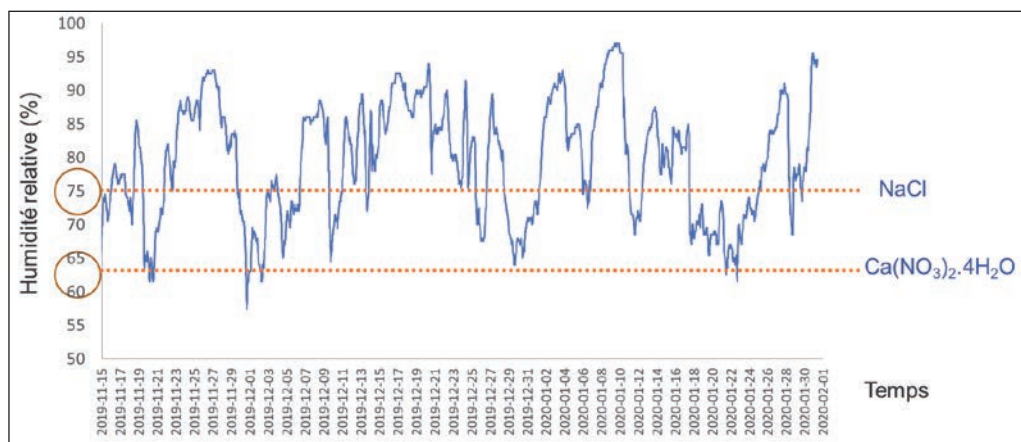


Figure 6

Évolution de l'humidité relative de l'air dans la chapelle Saint-Éloi de Notre-Dame entre le 15 novembre 2019 et le 2 février 2020. Les traits en pointillés rouges correspondent respectivement aux humidités relatives d'équilibre du chlorure de sodium (NaCl) et de la nitrocalcite [Ca(NO₃)₂·4H₂O].

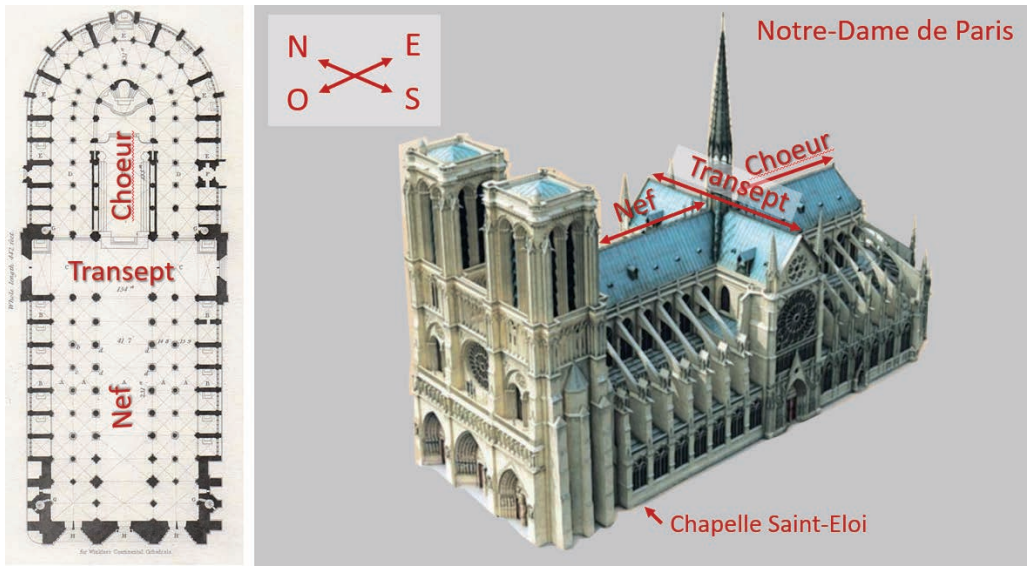


Figure 7

Plan et image extérieure de Notre-Dame situant la nef, le transept, le chœur et la chapelle Saint-Éloi.

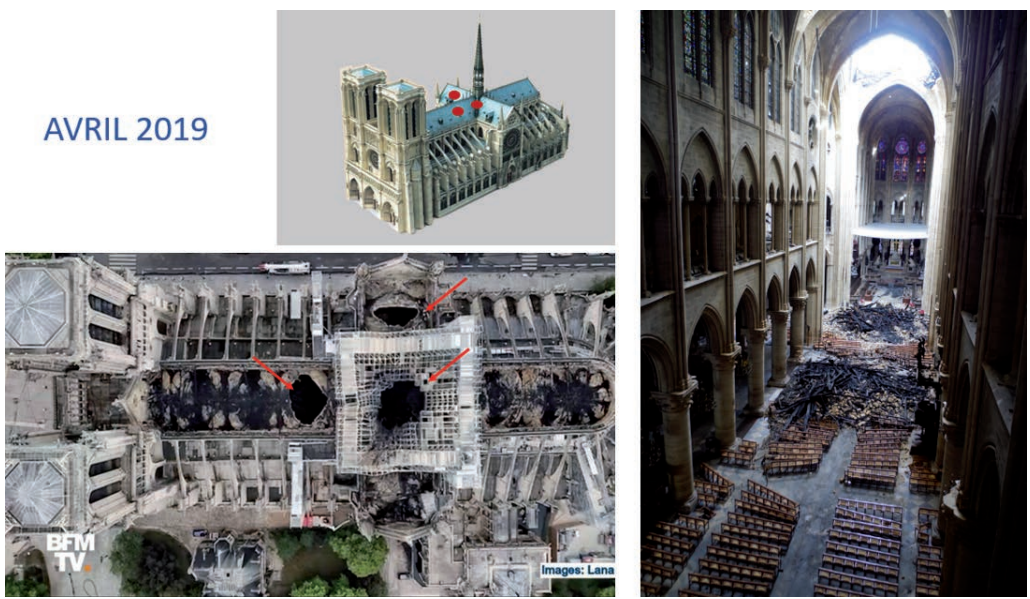


Figure 8

État de la cathédrale juste après l'incendie ; en haut à gauche : image représentant par des points rouges les endroits où les voûtes se sont effondrées ; en bas à gauche : photographie extérieure zénithale ; à droite : photo montrant la nef, la croisée et le chœur, avec les monticules de débris au droit de deux des voûtes crevées.

en perdant sa toiture, a vu son réseau d'évacuation d'eau de pluie devenir en grande partie inefficace. De plus, pendant l'incendie, lorsque les voûtes se sont effondrées, leurs pierres et mortiers sont tombés au sol, entraînant tout ce qui s'était accumulé dessus : poutres enflammées, plomb fondu et oxydé, chapes d'extrados, armatures de crêtes de faîtage, débris de l'échafaudage au niveau de la croisée (**figure 8**).

L'incendie s'est propagé très localement à l'intérieur de la cathédrale et a été vite éteint par les pompiers. Dans certains endroits, notamment dans le bras nord du transept, le sol dallé a été inondé jusqu'à 10 cm de haut, comme en témoigne la trace horizontale noire sur les pierres jonchant le sol (**figure 9**). Cette trace correspond à la limite supérieure atteinte par l'eau de l'inondation où flottaient les débris de charbon. Tout ce que pouvait contenir l'eau

comme espèces solubles, en particulier des sels, a pénétré par capillarité dans les pierres.

Au fur et à mesure du tri des vestiges (**figure 10**), notre collègue géologue du laboratoire, Lise Leroux, a veillé à récolter des pierres représentatives de la variété des types de pierres existants. D'autres pierres ont été prélevées par notre équipe : celles présentant un encrassement, des éclaboussures de plomb, des fissures, épaufrures et altérations chromatiques liées à l'élévation de température. Toutes ces altérations nécessitaient un diagnostic précis et des tests nous permettant de conseiller les architectes sur les mesures à prendre.

Avant marquage et nettoyage, une quantification des sels (chlorures, nitrates, sulfates, pour les ions négatifs) a été réalisée sur treize d'entre elles, issues des voûtes crevées du bras nord et de la croisée du transept (**figure 11**). On considère que c'est à partir



Figure 9

À gauche, haut et bas : extinction du brasier après l'effondrement de la voûte de la nef. À droite : pierres issues la voûte effondrée, jonchant le sol du bras nord du transept. La trace horizontale noire à 10 cm au-dessus du sol indique le niveau de l'eau au plus haut de l'inondation liée à l'extinction du feu.



Figure 10

Tri, récolte et marquage de pierres mises de côté pour identification des lithotypes et diverses caractérisations, dont la quantification des sels solubles.

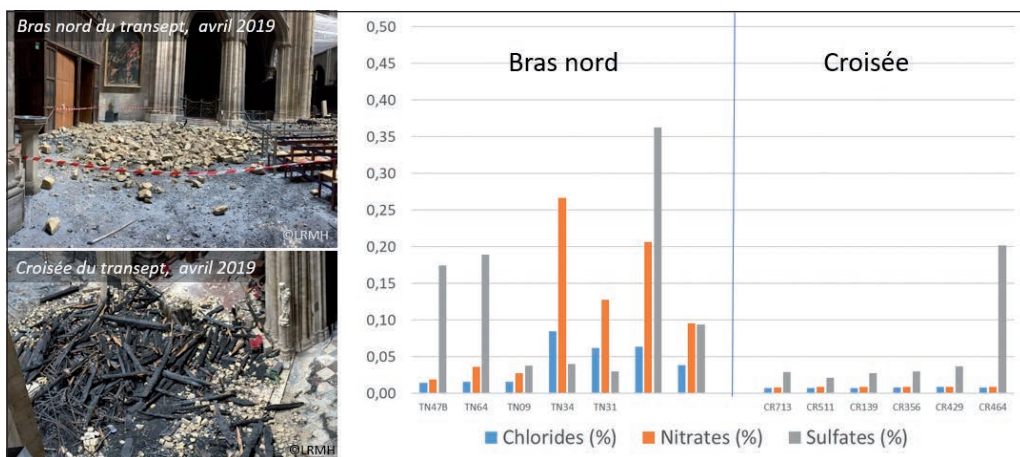


Figure 11

À gauche, vues des éléments de voûtes et charpente, issus des effondrements des voûtes du bras nord et de la croisée du transept. À droite : taux de chlorures, nitrates et sulfates mesurés dans une sélection de treize pierres récoltées dans ces deux zones.

de 0,1 % que les quantités deviennent anormales pour les chlorures. Dans le cas présent, aucune pierre issue de la voûte effondrée du bras nord ne présentait un taux de chlorures supérieur au seuil. Il n'en était pas de même pour les sulfates et les nitrates qui, sans présenter des teneurs considérables, montraient une pollution saline évidente. Au sein des pierres issues de la voûte de la croisée, il n'y avait en revanche aucune pollution saline, à l'exception d'un taux de sulfates moyennement élevé dans une pierre.

Cette importante différence de contamination entre des pierres récoltées à ces deux endroits proches l'un de l'autre est probablement multi-causale. On sait que lorsque les pierres des voûtes de la croisée du transept sont tombées, leur nombre important compte tenu de la grande surface effondrée a induit la formation d'un monticule de presque 6 m de haut. Les pierres situées en hauteur dans le tas n'ont ainsi pas été impactées par l'inondation et ce, d'autant moins

– on le sait maintenant – que l'eau a pu s'échapper au moins localement à travers le dallage et la voûte effondrée de certains carreaux, ces larges conduits d'air situés sous le sol et destinés au chauffage de l'édifice. Dans le transept nord, un seul voûtain (zone entre deux arcs) s'est effondré, peu de pierres sont tombées, ce qui fait que l'impact mécanique des pierres a été moins important, le dallage ne s'est pas fragmenté et l'inondation a pu envahir l'espace. La durée du contact avec l'eau polluée par des sels a été bien plus longue à ce niveau.

2.3. Pollution saline des voûtes

Le texte reproduit en **figure 12** provient du *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle* de Viollet-le-Duc. Il explique qu'au-dessus des voûtes, on avait l'habitude d'appliquer une chape de protection contre les incendies. Dans un certain nombre d'édifices dont Notre-Dame, cette chape était en



« Aujourd'hui on entend par chape l'enduit que l'on pose sur l'extrados d'une voûte pour le protéger. Toutes les voûtes ogivales étaient couvertes d'une chape en mortier ou en plâtre. En cas d'incendie, cette précaution suffit pour empêcher la braise de calciner l'extrados de voûtes surtout si la chape est de plâtre. »

Viollet-le-Duc : *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, 1854-1868, tome 2

Figure 12

Extrados d'une succession de voûtains dans la partie nord de la nef. Une chape de plâtre recouvre l'appareil de pierres. Sa couleur blanche à l'origine était devenue grisâtre, mais les oxydes de plomb déposés pendant l'incendie ont coloré sa surface en vert olive. Cette photo a été prise un mois après l'incendie.

plâtre⁶. Ce matériau est constitué pour l'essentiel de sulfate de calcium bihydraté⁷, un sel passablement soluble⁸ dans l'eau (2g/L à 20 °C). Bien évidemment, les débris jonchant le sol sous les voûtes effondrées contenaient également des fragments de cette chape, lesquels ont pu se dissoudre dans l'eau et venir polluer les pierres.

La photo de la **figure 13** est prise depuis un plateau d'échafaudage, situé au bord du trou de la croisée. Trois arcs sont visibles, formant la limite entre la croisée et, à gauche, le bras nord du transept, en face, le chœur et, à droite, le bras sud du transept. L'échafaudage

6. Matériau de construction isolant et ignifuge (non combustible) fabriqué à partir de matières premières rocheuses telles que le gypse (sulfate de calcium bihydraté).

7. Dont la formule brute contient deux molécules d'eau.

8. Qui peut se dissoudre dans un liquide, un solvant.

construit avant l'incendie pour restaurer la flèche au-dessus de la croisée du transept a incroyablement bien résisté malgré le stress intense de l'incendie. Cependant, ses éléments étaient soudés et il a fallu le découper pièce par pièce, après des travaux préparatoires considérables pour le sécuriser. Le processus de dépose s'est achevé durant l'hiver 2020-2021. Ainsi, ce n'est que plus de deux ans après l'effondrement de sa voûte que la croisée du transept a pu être entièrement mise hors d'eau (**figure 14**).

Considérant la moyenne de pluviosité en région parisienne et la superficie du trou de la croisée du transept (environ 200 m²) on peut estimer qu'environ 200 000 litres d'eau sont tombés en cumulé au sol et sur les voûtes, jouxtant le trou de la croisée entre avril 2019 et mai 2021. Ceci nous amène à évoquer la pollution saline des voûtes restées en place.



Figure 13

Trois des quatre arcs délimitant l'espace autrefois occupé par la voûte de la croisée. Les voûtes attenantes ainsi que le sol de la croisée ont été impactés par la pluie pendant deux ans avant que le toit provisoire visible ici ne puisse être posé.

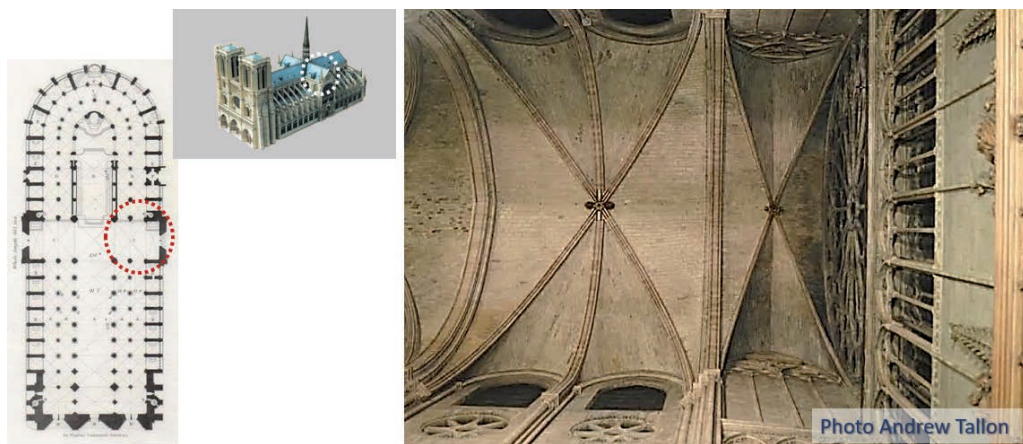


Figure 14

Voûtes du bras sud du transept photographées par Andrew Tallon en 2012. De gauche à droite : (i) un des voûtains de la croisée, (ii) voûte sexpartite (iii) voûte quadripartite (à droite). Le plan de la cathédrale situe l'emplacement de ces voûtes.

La photo de voûtes montrée en figure 14 a été prise en 2012 par Andrew Tallon, historien de l'art belge, qui a créé bien avant l'incendie un relevé 3D précis de Notre-Dame de Paris. On y voit les voûtes sexpartite et quadripartite du bras sud du transept. La voûte de la croisée est toujours en place, à gauche.

Dans la même partie de l'édifice, l'état des deux voûtes fin 2020-2021 est présenté en **figure 15**. Les surfaces sont largement impactées par des cristallisations salines nommées efflorescences⁹. Dans la zone proche du trou de la croisée, de très graves altérations se manifestant par des desquamations¹⁰ et de la

désagrégation granulaire¹¹. Ces phénomènes sont extrêmement préoccupants car les pierres des voûtains n'ont que 20 cm d'épaisseur : lorsque 5 cm sont perdus, il y a lieu de s'inquiéter. La contamination saline est ici principalement du gypse, ce minéral mentionné plus haut à propos de la chape de plâtre. C'est la dissolution de ce minéral par l'eau de pluie et sans doute celle de l'incendie, puis sa cristallisation, qui a provoqué les dégradations de la voûte du transept sud.

2.4. Les remèdes à la pollution saline

Le meilleur remède pour traiter une pollution saline est de plonger l'objet dans un bain pour dissoudre les sels et les

9. Migration d'éléments minéraux à la surface d'un matériau poreux en formant un dépôt.

10. Écaillage superficiel des roches, qui détache des plaques d'épaisseur millimétrique ou centimétrique.

11. Fait que les différents grains composant la roche se séparent les uns des autres, se désagrègent.



Figure 15

Voûtes du bras sud du transept moins de deux ans après l'incendie, montrant de larges zones blanches correspondant à des efflorescences de gypse, ainsi que des pertes de pierre par desquamation et désagrégation granulaire.

éliminer par diffusion¹² des ions. Dans le cas de Notre-Dame, c'était évidemment impossible. C'est donc un autre principe lié aux propriétés capillaires des matériaux poreux – l'advection – qui a été mis en œuvre.

Pour que l'advection soit possible, il faut que l'objet à traiter soit un solide poreux et capillaire. Un cataplasme lui-même poreux et capillaire, imbibé d'eau, est appliqué sur l'objet. Le réseau poreux du cataplasme doit être capable à la fois de fournir de l'eau au support pour dissoudre les sels, mais aussi dans un deuxième temps, d'exercer une succion de l'eau préalablement apportée au support et transformée en une solution saline. Ainsi, le

réseau poreux du cataplasme doit pouvoir d'abord développer une pression capillaire plus faible que celle du support, puis dans un deuxième temps, être capable de développer une pression capillaire plus forte que celle du support. Pour remplir ces conditions les formulations sont souvent composées de matériaux très fins comme des argiles ou des poudres de cellulose, auxquels sont adjoints des granulats. Pour assurer une taille de pores adéquate, on compte à la fois sur la taille des grains et sur le retrait de séchage. Mais l'advection n'est possible que si le contact capillaire entre l'objet et le cataplasme est maintenu pendant tout le processus de dessalement ; autrement dit, le cataplasme ne doit pas se détacher en rétrécissant trop au séchage.

12. Transport des éléments dû à une différence de concentration.

Pour étudier le réseau poreux d'un cataplasme, deux techniques analytiques sont utilisées : la microscopie électronique à balayage (MEB) pour examiner l'agencement, la taille et la forme de ses composants (*figure 16*), et la porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) pour mesurer sa distribution porale (*figure 17*).

En *figure 16*, deux types de cataplasmes sont comparés au MEB : l'un est en poudre de cellulose (CEL), et l'autre est un mélange de kaolin (une argile composée de kaolinite pour l'essentiel) et de sable.

On constate aisément que les pores du cataplasme CEL sont très proches en taille, et que le constituant est un matériau fibreux très poreux (Nt : 80 %) et dont la porosité interstitielle est relativement grande (diamètre : 0,05 μm). L'autre cataplasme montre de gros pores, un grain de sable partiellement dénudé et un matériau particulaire de texture très fine, la kaolinite, qui développe une porosité interstitielle extrêmement petite (diamètre : 10 μm).

L'analyse par MIP de ces mêmes cataplasmes complète leur caractérisation. Les

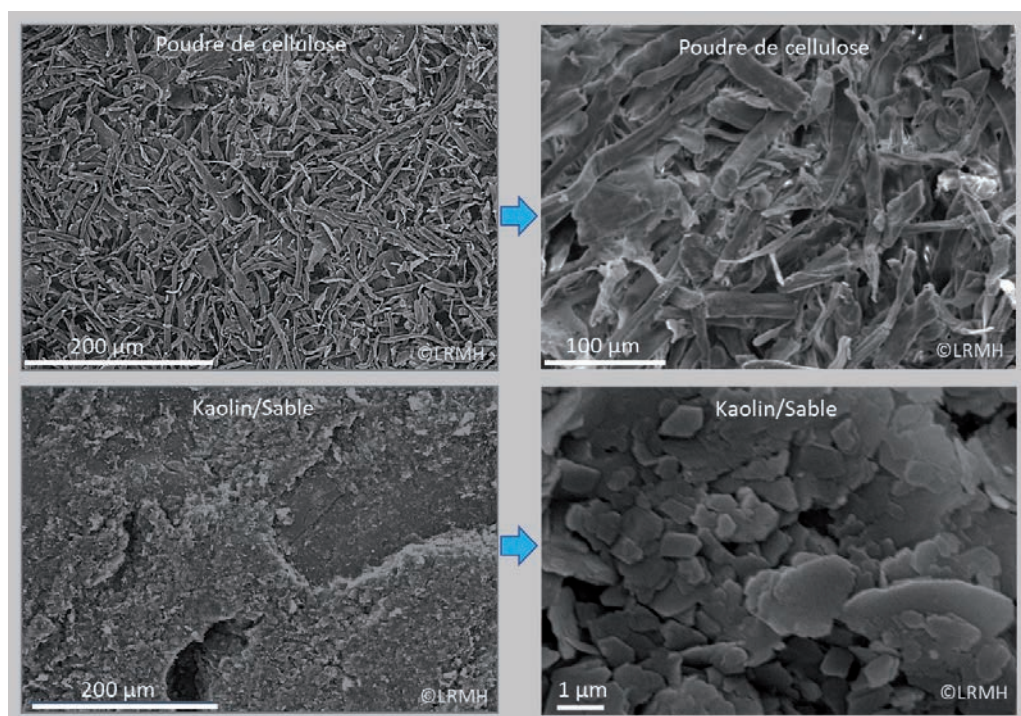


Figure 16

Images en microscopie électronique à balayage de deux cataplasmes de dessalement : en haut de la poudre de cellulose, se présentant sous forme de fibres, en bas un mélange kaolin-sable, dont la fraction argileuse est composée de plaquettes de kaolinite extrêmement petites.

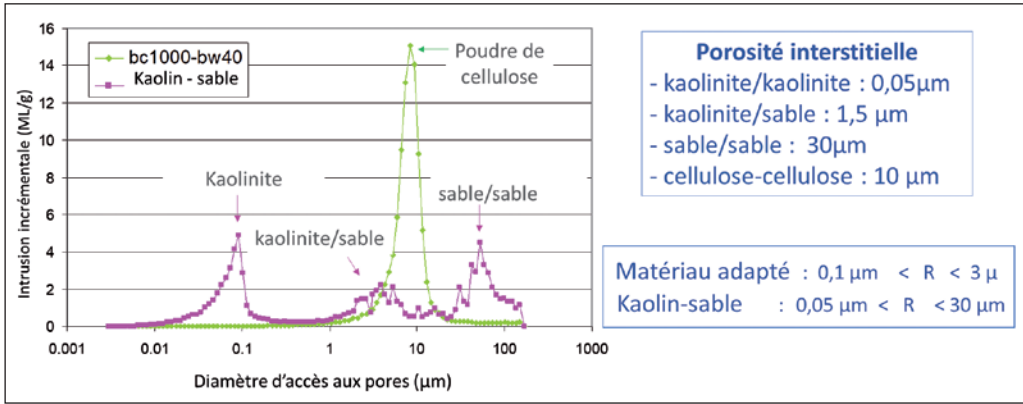


Figure 17

Distribution porale par intrusion de mercure (MIP) de deux cataplasmes candidats : kaolin Imerys/sable 0,5-1 mm et poudre de cellulose.

courbes de la **figure 17** permettent de visualiser leur distribution porale : le mélange Kaolin-sable est en rose, la poudre de cellulose en vert. L'analyse MIP des pierres des voûtes de Notre-Dame a permis de conclure que c'est le mélange kaolin-sable qui remplit les conditions requises pour les opérations de dessalement : celui-ci présente en effet deux gammes de pores majoritaires qui encadrent les gammes de pores des pierres des voûtes de Notre-Dame, les plus affectés par les désordres dus aux sels. C'est cette formulation-là que notre laboratoire a proposée aux architectes de Notre-Dame.

Les photos de la **figure 18** ont été prises en 2022, au cours des opérations de dessalement des voûtes. Après une aspiration de toutes ces surfaces, non illustrée ici, sont indiquées les différentes étapes du processus :

(i) ouverture des joints qui seront restitués après dessalement ; (ii) application d'un cataplasme de kaolin-sable – préalablement humecté – à l'aide d'un pistolet pneumatique à crépir ; (iii) talochage, destiné à lisser la surface et à réduire l'épaisseur à 5-10 mm (hors joints), pour que la compresse adhère bien et n'ait pas de retrait de séchage ; (iv) une fois appliqué, le cataplasme va sécher à un rythme dépendant de l'humidité du support. Le cataplasme ressemble tout à fait à un enduit : il reste adhérent sur des parties horizontales en surplomb, ce qui n'était pas du tout évident au départ et a beaucoup facilité les opérations. Il est censé rester le plus longtemps possible pour pouvoir absorber les sels jusqu'au séchage complet de la voûte. La tâche à accomplir est considérable, les compagnons font preuve d'un dévouement et d'un professionnalisme exceptionnels.



Figure 18

Chantier de conservation-restauration des voûtes du bras sud du transept.

3 Les impacts indirects de l'incendie sur Notre-Dame

3.1. Les problèmes de sels liés au nettoyage des maçonneries intérieures

Alors que les chapelles du chœur de la cathédrale ont gardé leurs décors peints au ^{xix}^e siècle sous la direction de Viollet-le-Duc, les maçonneries des quatorze chapelles de la nef en sont aujourd'hui dépourvues. Ces décors ont été éliminés dans les années 1960. Les maçonneries de pierre appareillée se sont encrassées et ont été polluées par le plomb micro-particulaire de l'incendie. Mais une partie non négligeable de la pollution au plomb dans ces chapelles provient des infimes traces du décor ^{xix}^e siècle, réalisé avec de la peinture au plomb.

L'une des chapelles de la nef, Saint-Éloi, a été échafaudée fin 2019 pour réaliser des tests de déplombage et de nettoyage sur tous les matériaux, y compris sur la pierre. Pour répondre aux exigences des autorités sanitaires, l'utilisation des cataplasmes en général, et des agents complexants en particulier, a considérablement augmenté ces dix dernières années en France : il y a encore peu de temps, il était devenu obligatoire que la teneur en plomb en surface atteigne des valeurs inférieures à 1000µg/m² après nettoyage. Ceci a conduit les entreprises à introduire de plus en plus d'agents complexants dans les formules de nettoyage, ceux-ci permettant de réduire drastiquement le taux de plomb résiduel en surface après nettoyage.

La note d'alerte¹³ produite récemment par notre laboratoire en collaboration avec le CICRP et le laboratoire ERM explique simplement le problème : « *Les agents complexants (séquestrants ou chélateurs) sont des substances chimiques qui possèdent la propriété de fixer des ions positifs pour former un complexe soluble stable. Le plus connu est l'EDTA ; les sels di- et tétra-sodiques d'EDTA sont très utilisés pour extraire sous forme de complexes les ions métalliques indésirables comme le fer ou le plomb mais aussi d'autres ions positifs comme le calcium des oxalates ou des sulfates, en particulier le gypse dont les cristallisations sont le liant majeur de nombreuses salissures. Lorsqu'ils captent ces ions indésirables, les agents complexants libèrent en échange des ions sodium. Ce sodium (Na⁺) en excès s'associe naturellement avec les ions négatifs présents en solution, notamment les sulfates abondants sur les supports calcaires ou les liants à base de plâtre. Les sels qui se forment alors, fréquemment des sulfates de sodium (thénardite ou mirabilite), sont identifiés comme des espèces solubles hygroscopiques particulièrement nocives pour les supports contaminés. Des phénomènes de dégradation (efflorescences, désagrégation, desquamation) peuvent se développer rapidement sur les surfaces traitées* ». L'usage de ces composés a entraîné

l'apparition de problèmes importants sur des chantiers de restauration ces dernières années.

Conscients de ces difficultés, nous avons voulu comparer à Notre-Dame des cataplasmes à base de latex ou d'argile, en veillant à évaluer les formules comportant ou non des agents complexants. La **figure 19** résume la procédure en deux étapes suivies pour la campagne de tests.

Il s'est trouvé que l'une des formules à base d'argile contenant des agents complexants s'est très facilement éliminée en étape 1 mais guère en étape 2, entraînant un retard incompatible avec les conditions du futur chantier (**figure 20**).

Soupçonnant une influence des conditions thermohydriques de l'air ambiant sur le comportement déconcertant des cataplasmes, nous avons reporté les différentes étapes du traitement sur le diagramme d'évolution de l'humidité relative et de la température de l'air, que nous avons pris soin d'enregistrer au niveau de la chapelle Saint-Éloi pendant toute la durée des tests (**figure 21**) Nous en avons conclu que ce cataplasme contenait une substance hygroscopique ou qu'une substance hygroscopique s'était formée par interaction entre l'un de ses composants et une ou plusieurs substances présentes sur le support traité. Comme ce même cataplasme, dans sa formulation sans agent complexant, s'est montré satisfaisant en phases 1 comme en phase 2, nous en avons conclu que le composant à incriminer était probablement l'agent

13. Source : <https://www.lrmh.fr/Default/doc/SYRACUSE/233613/note-d-alerte-compresses-et-cataplasmes-susceptibles-de-contenir-des-agents-complexants-mise-en-gard>

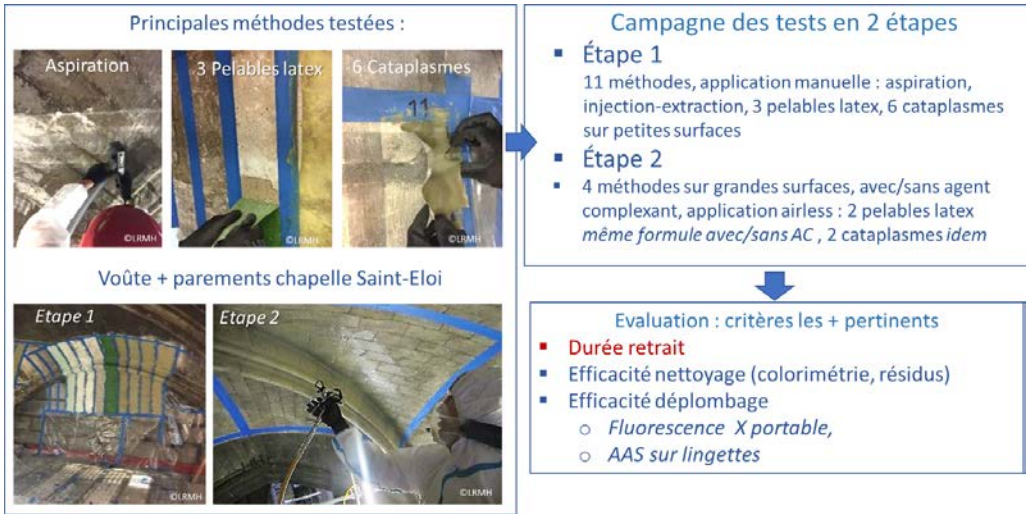


Figure 19

Tests de nettoyage des maçonneries polluées par le plomb dans la chapelle Saint-Éloi.

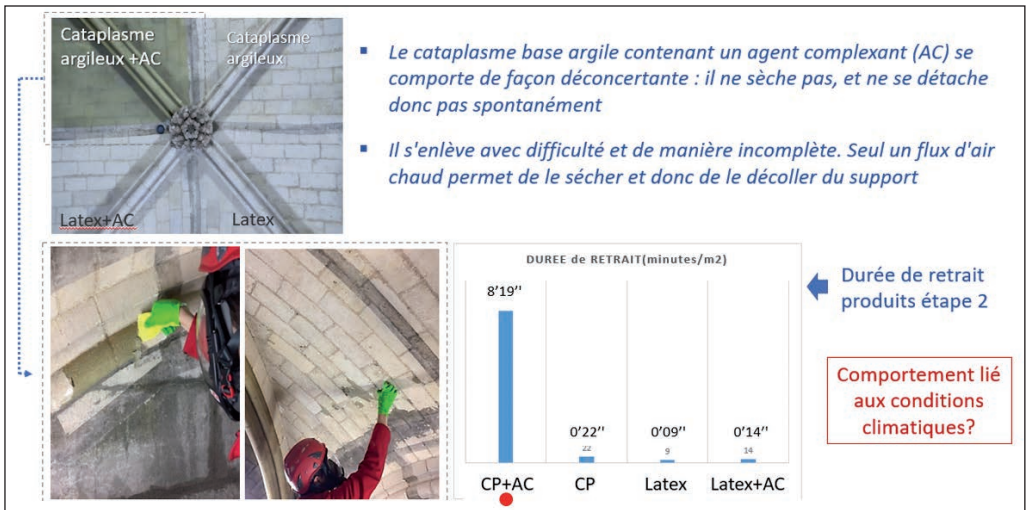


Figure 20

Comparaison des cataplasmes avec et sans complexants. CP : cataplasme ; AC : agent complexant.

ou les agents complexants du cataplasme défectueux.

À l'issue de ces tests, notre laboratoire a proposé aux architectes de n'utiliser aucun produit contenant des agents complexants sur le chantier de nettoyage – déplombage des parements dépourvus de

décors peints à l'intérieur de la cathédrale. Les deux formules sélectionnées par notre laboratoire ont ensuite été testées avec succès dans le cadre d'un chantier expérimental concernant l'intégralité des surfaces d'une chapelle de la nef, et du bas-côté attendant (figure 22).

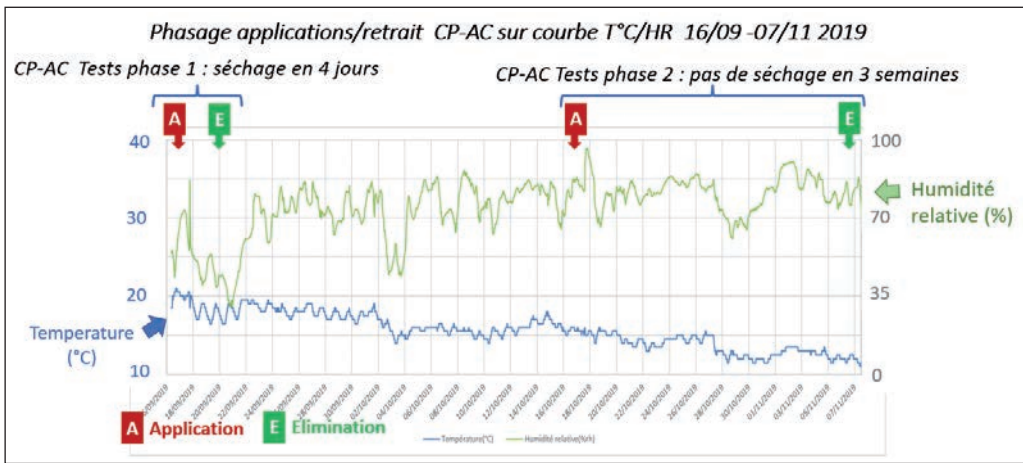
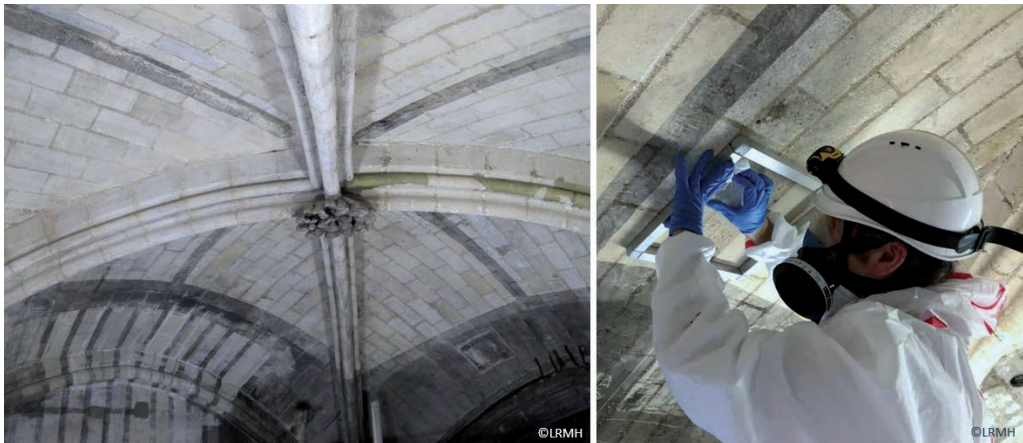


Figure 21

Report des différentes étapes du traitement avec le cataplasme défectueux sur le diagramme d'évolution de l'humidité relative et de la température dans la chapelle ayant fait l'objet de tests de nettoyage.



Tests de nettoyage-déplombage
Résultat étapes 1 et 2

Prélèvement lingette pour mesure
pollution plomb surfacique

Figure 22

Tests de nettoyage-déplombage dans la chapelle Saint-Éloi. À gauche, zone de tests de phase 1 en « code-barres », sur d'étroites bandes de 10 x 200 cm (application manuelle, 11 méthodes) et zone de tests de phase 2 sur des zones de plusieurs m² (4 méthodes parmi les 11 testées en phase 1). À droite : prélèvement par lingette sur une zone nettoyée, pour mesurer la pollution surfacique en plomb acido-soluble.

3.2. Contaminations salines apparues lors de tests de déplombage-nettoyage sur maçonnerie extérieure

Pour finir, nous allons évoquer une opération menée non pas à l'intérieur mais à l'extérieur de la cathédrale, au

niveau d'un parement exposé au nord. Six formulations de cataplasmes du marché ont été appliquées selon la procédure « code-barres » déjà mise en œuvre à l'intérieur de l'édifice. Tous les produits testés étaient proposés comme étant susceptibles de nettoyer

- ❖ Efflorescences de sulfate de sodium
- ❖ Augmentation significative de la teneur en sodium à 0-1cm de profondeur*

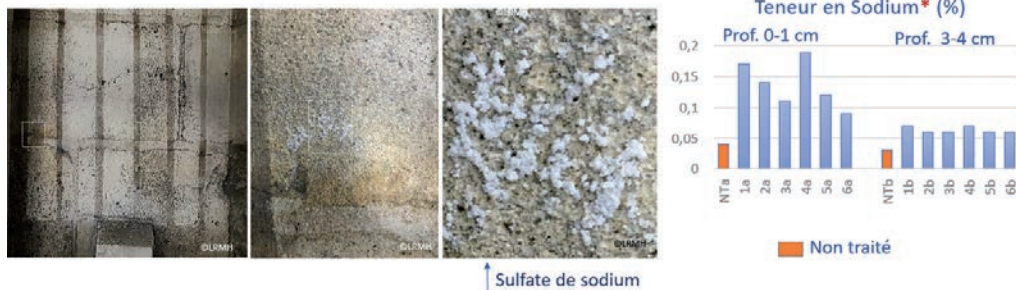


Figure 23

Contamination saline apparue sur maçonnerie extérieure dans les zones d'essais de 6 cataplasmes du marché vendus comme efficaces pour le nettoyage et le déplombage de la pierre. À droite, les diagrammes montrent des teneurs en sodium très importantes par rapport au témoin non traité et ce, surtout à faible profondeur. Source : ERM 2021.

les surfaces extérieures tout en réduisant la contamination par le plomb (**figure 23**). Les termes « cataplasmes » ou « compresses » de nettoyage sont utilisés pour désigner divers mélanges du commerce se présentant sous forme de pâte ou de gel hydraté, constitués le plus souvent d'argiles, de fibres de cellulose mais aussi d'autres charges comme des sables par exemple. Ces matériaux peuvent contenir aussi des ajouts de composés chimiques actifs, en faibles concentrations, constitués par des agents complexants,

des tensio-actifs ou des sels d'ammonium. Ces ajouts ont pour but de favoriser l'extraction des substances indésirables présentes dans les encrassements superficiels d'une maçonnerie ou d'une sculpture.

Pour éviter d'utiliser des cataplasmes ou des compresses susceptibles de conduire à la formation de ces sels nocifs, il est très important de réaliser des tests de nettoyage en suivant l'évolution de la contamination saline des supports et particulièrement, celle du sodium.

Conclusion : un « grand chantier » comme « laboratoire »

La pollution par les sels est l'une des plus redoutables par sa fréquence, son étendue et sa diversité. Elle affecte toutes les circonstances de l'existence : de la vie quotidienne aux réalisations urbaines et industrielles, aux installations récentes si elles manquent de soin aux objets anciens voire, archéologiques. Tout chantier

de restauration rencontre donc ces questions dans ses priorités. Mais la pollution saline est aussi très sensible aux conditions chimiques ou physiques ; c'est dire qu'un incendie comme celui de Notre-Dame place les ingénieurs dans des conditions souvent inédites qui demandent la mise au point de procédures nouvelles.

Ceci donne à la lutte contre la pollution saline à Notre-Dame une originalité particulière. Les procédés connus doivent être adaptés et les facteurs d'échelle obligent parfois à les re-fonder. Les prévisions sont bien délicates et pourtant, le résultat doit absolument être obtenu, d'où la recherche de méthodes et de tests variés qui donnent confiance. Nous pourrions parler d'une approche aussi exigeante que celle des laboratoires de recherche mais conduite à des dimensions géantes. Ce chapitre montre bien ces compétences pragmatiques et intelligentes que les équipes d'opérateurs ont su mettre en œuvre et les progrès qu'elles apporteront bien au-delà du chantier de Notre-Dame.

Remerciements

Les travaux résumés dans cet article sont le fruit de recherches et essais menés en collaboration avec de nombreux collègues que je souhaite ici remercier : Jérémy Hénin et Lise Leroux, respectivement ingénieurs d'étude et de recherche au LRMH ; François Rassinoux, directeur du laboratoire ERM ; Brittany Branche restauratrice de sculptures et Anne Bourgès ingénieur de recherche au C2RMF. Notre intervention à Notre-Dame a été grandement facilitée par la bienveillance et la confiance de Philippe Villeneuve et Pascal Prunet, architectes en chef des Monuments Historiques, ainsi que leurs collaborateurs, en particulier Alexis Giroud, architecte du patrimoine.

Partie 3

Le chantier scientifique
au service des sciences
du patrimoine

La conservation- restauration et la recherche sur les vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Claudine Loisel et Barbara Trichereau

Claudine Loisel est coordinatrice du groupe de travail « Verre », ingénieure de recherche, responsable du pôle scientifique « Vitrail » du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), ministère de la Culture.

Barbara Trichereau est ingénieure d'études au pôle scientifique « Vitrail » au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques.

1 Introduction : état des vitraux après l'incendie du 15 avril 2019

Le 15 avril, tout le monde s'est posé la question : dans quel état seront les vitraux ? Dès le lendemain, la maîtrise d'œuvre¹ du chantier de restauration de Notre-Dame et Philippe Villeneuve, l'architecte en chef des monuments historiques, ont pu assurer que tous les

vitraux historiés² étaient globalement intacts à l'exception de quelques casses thermiques et de petites fragilités ponctuelles. En revanche, (*figure 1*) la vitrerie des combles, au niveau de la toiture, mise en place au XIX^e siècle par Viollet-le-Duc avait été complètement détruite.

2. Les vitraux historiés décrivent les scènes de l'Évangile et de l'Ancien Testament à l'attention des chrétiens analphabètes, également des scènes de la vie quotidienne ou encore, dans le cas des rosaces en bout de nef, sont des symboles théologiques.

1. La maîtrise d'œuvre, MOE architecture : ses missions vont des études préliminaires, à la conduite opérationnelle des travaux, jusqu'à la réception de chantier.



Figure 1

Après l'incendie, la vitrerie située dans les combles de Notre-Dame a subi d'importants dommages.

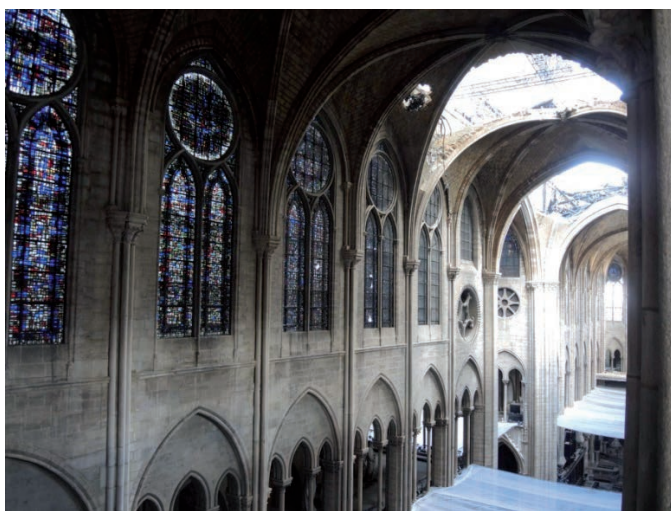


Figure 2

La chute de la flèche a provoqué quelques dégâts légèrement visibles, lacunes blanches, sur quatre panneaux de vitraux.

En bas de la photo de la **figure 1**, on voit que la rose du bras sud du transept est intacte. Sur la photo (**figure 2**) de la nef côté nord, seule une des baies a été éraflée par la chute de la flèche qui a effleuré les vitraux, mais légèrement.

Ce dessin réalisé par *National Geographic* (**figure 3**), montre la disposition des vitraux de Notre-Dame et donne une idée du nombre important de ces derniers.

Vous avez au rez-de-chaussée, ce que l'on appelle classiquement les chapelles basses avec trente-sept baies. Le niveau 1 est le niveau des tribunes avec quarante-trois baies. Le niveau 2 est le niveau des baies hautes avec un ensemble de quarante-quatre baies qui constitue les vitraux historiés. Puis, dans la vitrerie de la charpente, au niveau 4, se trouvaient les trois baies qui ont explosé qui étaient en vitrerie classique losangée de verre, incolore sans peinture, datant du *xix*^e siècle.

Si l'on s'intéresse aux époques de ces vitraux, elles vont du *xii*^e au *xx*^e siècle, et il est rare dans un édifice, d'avoir autant de vitraux d'époques différentes. Les vitraux du *xii*^e siècle se trouvent dans les deux roses du transept : la rose nord et la rose sud. Les vitraux du *xiii*^e siècle sont dans les trois autres roses. Les vitraux du *xvi*^e sont dans la rose occidentale, et les vitraux du *xviii*^e siècle sont dans deux chapelles basses. Avec l'arrivée de Viollet-le-Duc et de son grand projet au *xix*^e siècle, beaucoup de vitraux ont été installés afin de redonner toute sa splendeur à Notre-Dame. Au *xx*^e siècle, en 1960 et 1961, Jacques Le Chevallier a créé les vitraux des baies hautes de la nef.

Sur la **figure 3**, deux liens permettent de trouver des informations complémentaires et des données écrites par les historiens d'art du centre André Chastel sur tout le panel des vitraux de Notre-Dame.



Sites Internet

Pour les vitraux du Moyen Âge : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/vitraux-moyen-age>

Pour les vitraux du XIX^e siècle : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/vitraux-xixe-siecle>

Figure 3

Notre-Dame de Paris et les sites d'accès à l'histoire des vitraux du XIX^e siècle et du Moyen Âge.

2 Réparation et restauration des vitraux de Notre-Dame

Dès le 16 avril 2019, l'organisation des travaux est lancée par Philippe Villeneuve qui s'est très vite entouré de Pascal Prunet et de Rémi Fromont (cf. **chapitre 3**, Matériaux et reconstruction). Compte tenu des trous dans la voûte, il fallait entamer les travaux sur cette maçonnerie haute pour libérer l'espace et travailler aussi sur le renforcement des contreforts. Pour mettre en place ces opérations, il fallait libérer l'espace et déposer notamment les vitraux pour faciliter l'accès : vingt-cinq verrières ont été déposées en neuf jours, du 25 avril au 3 mai, 1^{er} mai compris grâce au regroupement d'ateliers qui a réalisé un travail exceptionnel. Il fallait faire vite : sept groupements d'ateliers avec cinquante-et-une personnes ont œuvré ensemble (les ateliers Babet, Baudoin, Duchemin,

Insingrini-Groult, Loire, Parot, Vitrail France, la manufacture Vincent-Petiet) et ce fut une très belle aventure humaine malgré la catastrophe (**figure 4**).

Très rapidement, deux phases de protocole sont définies et mises en œuvre. La phase 1 est le protocole de décontamination et de restauration mis en



Figure 4

Les équipes de différents ateliers ont déposé les baies hautes pour faciliter les travaux.

place par le LRMH³ pour les différents matériaux. La phase 2, extrêmement importante, permettra de valider les protocoles à l'échelle de l'entreprise, et sera réalisée sur des chapelles tests afin d'évaluer les coûts et les délais pour bien définir les cahiers des charges et lancer les appels d'offres nécessaires à la restauration.

Revenons à la première étape de dépose des vitraux des verrières hautes. Les historiens d'art du centre André Chastel ont été essentiels, aux côtés des restaurateurs et des scientifiques de la conservation que nous sommes, pour soutenir la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage dans ce drame. Un très gros travail de

3. Le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), est un service à compétence nationale du ministère de la Culture, rattaché au service chargé du patrimoine au sein de la direction générale des patrimoines.

numérotation des baies dans l'édifice (*figure 5*) et de documentation sur l'historique et l'iconographie de ces verrières a été réalisé et rassemblé dans des fiches techniques avec numérotation des panneaux (*figure 6*), ce afin de faciliter la dépose des vitraux.

Il ne faut pas oublier qu'un vitrail, ou une verrière, est composé d'un ensemble de panneaux posés sur une serrurerie, constituant en quelque sorte un puzzle géant ; il est donc important de savoir dans quel sens ont été mis les panneaux pour s'y retrouver. Cette documentation très précieuse a notamment été réalisée par Karine Boulanger, historienne d'art du vitrail au centre André Chastel qui s'est mise au travail dès le 16 avril au matin, de façon à fournir les documents au plus vite aux restaurateurs afin qu'ils puissent faire le travail de dépose. La *figure 7* illustre ce travail de dépose.

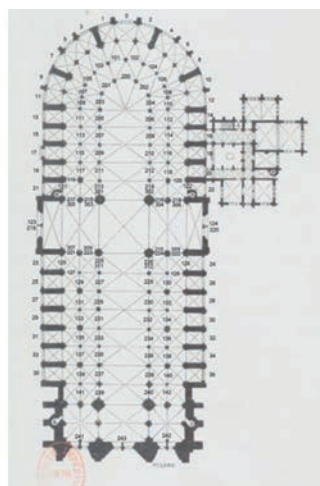


Figure 5

Avant de commencer les travaux, un gros travail de numérotation et de documentation est réalisé.

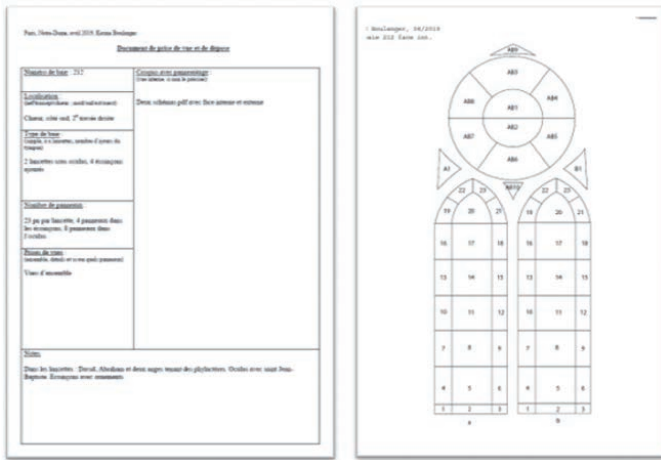


Figure 6

Les panneaux sont soigneusement numérotés et fichés pour faciliter les travaux et éviter de les mélanger.

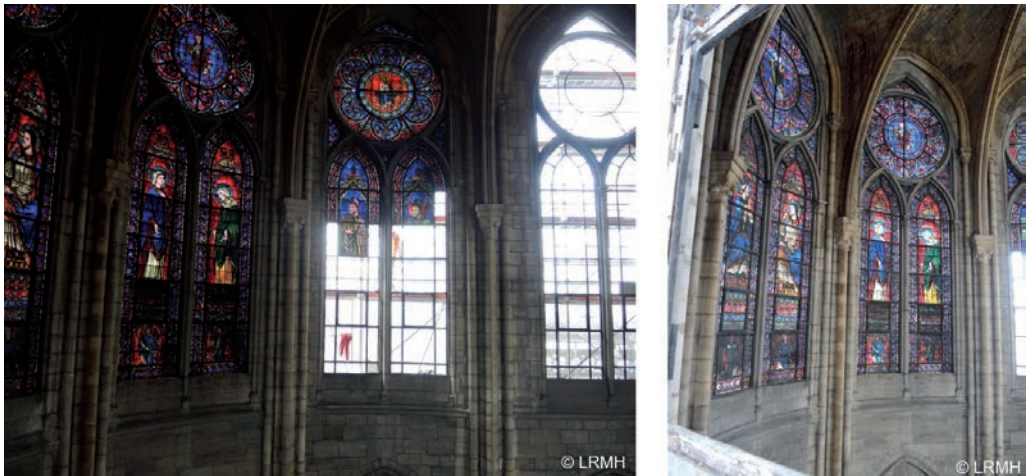


Figure 7

Clichés des vitraux à déposer après l'incendie. On peut constater l'ampleur des travaux à réaliser.

Quand on dépose des vitraux, il faut commencer par démonter ceux du bas et pour monter progressivement. Pour les remettre, il s'agit en fait de faire l'inverse pour éviter les casses. Les panneaux déposés sont mis en caisse et stockés dans des conditions sécurisées en attendant leur future restauration. Il en a été de même dans la

nef avec les vitraux de Jacques Le Chevallier (figure 8).

Les échafaudages nécessaires pour réaliser la dépose ont été aussi montés en urgence mais avec toutes les sécurités qui s'imposaient (figure 9).

Quand le chantier a commencé le 25 avril, nous n'étions pas encore sûrs que l'édifice allait

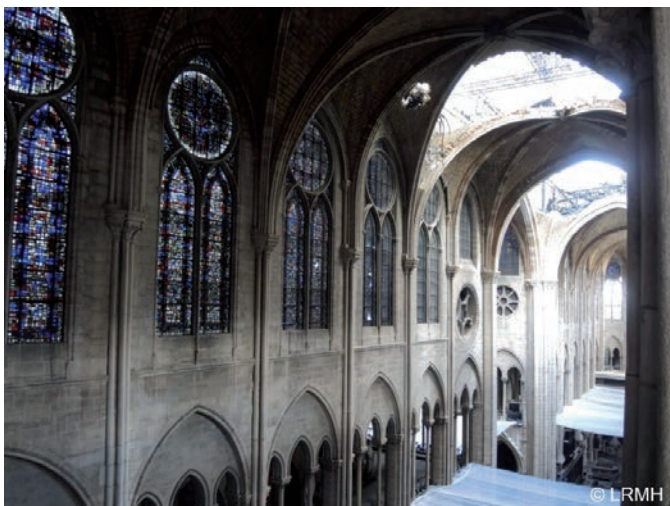


Figure 8

Vitraux de Jacques Le Chevallier, situés du côté nord de la nef.



Figure 9

Les échafaudages nécessaires à la dépose des vitraux ont été construits très rapidement pour permettre un travail en toute sécurité.

tenir ; il fallait donc agir au plus vite. Douze baies, avec soixante-dix-neuf panneaux par baie, donc plus de neuf cent quarante-huit panneaux, devaient être démontés et tout cela dans une grande tension. Il fallait aussi trouver des solutions pour descendre les panneaux de la partie haute. Au niveau du chevet, nous avions

un monte-charge mais pour la nef, que ce soit du côté sud ou du côté nord, il nous fallait trouver une solution efficace, rapide et sûre pour les hommes et pour les œuvres ; c'est l'idée du conteneur qui a été suggérée et validée de façon à être les plus opérationnels possible (figure 10).

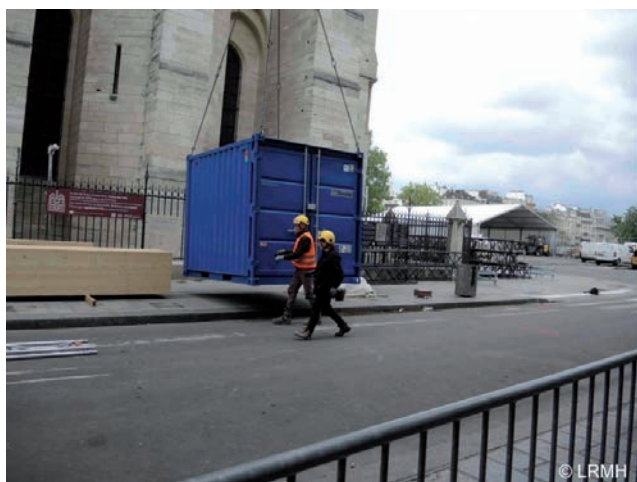


Figure 10

Les panneaux situés des deux côtés de la nef ont été descendus à l'aide d'un conteneur, solution originale et efficace trouvée pour pallier le manque de monte-charge.

De plus, très vite, un nuage de fumée jaunâtre, riche en plomb de la toiture, et évidemment riche en particules, s'est déposé sur tout l'édifice.

2.1. Phase 1 : mise au point du protocole de décontamination

Le laboratoire LRMH a réalisé la mise au point du protocole de décontamination dans deux chapelles figurant en rouge sur la **figure 11** : la chapelle Saint-Éloi et l'entrée de la sacristie des messes. Tous les matériaux étaient concernés – les pôles scientifiques « Vitrail », « Pierre », « Métal », « Bois », « Peinture murale » – puisqu'évidemment, nous avons le même dépôt de surface sur une petite épaisseur. Il a donc été intéressant de croiser nos regards et nos données pour mieux comprendre et caractériser la nature chimique du dépôt. Chacun des pôles devait ensuite optimiser ses méthodes d'élimination tout en préservant les matériaux.

2.2. Phase 2 : validation des protocoles de décontamination auprès des entreprises

Cette première phase terminée, la phase 2 s'est tout de suite enclenchée sur les chapelles de la Guadalupe et de Saint-Ferdinand en haut de la **figure 11**, côté nord.

Pour la chapelle de la Guadalupe, l'idée a été de faire une intervention de décontamination *in situ* pour abaisser le niveau de plomb. Pour cette étape, les restaurateurs ont dû travailler avec les équipements de protection individuelle (EPI) très contraignants mais indispensables à la sécurité des personnes.

Dans la chapelle Saint-Ferdinand, choix a été fait de procéder à la décontamination mais aussi à une restauration. L'exemple resplendissant des peintures murales est présenté dans le chapitre de Marie Parent-Andaloro. Sur les vitraux, le résultat s'est révélé aussi de très bonne qualité puisque la restauration a pu

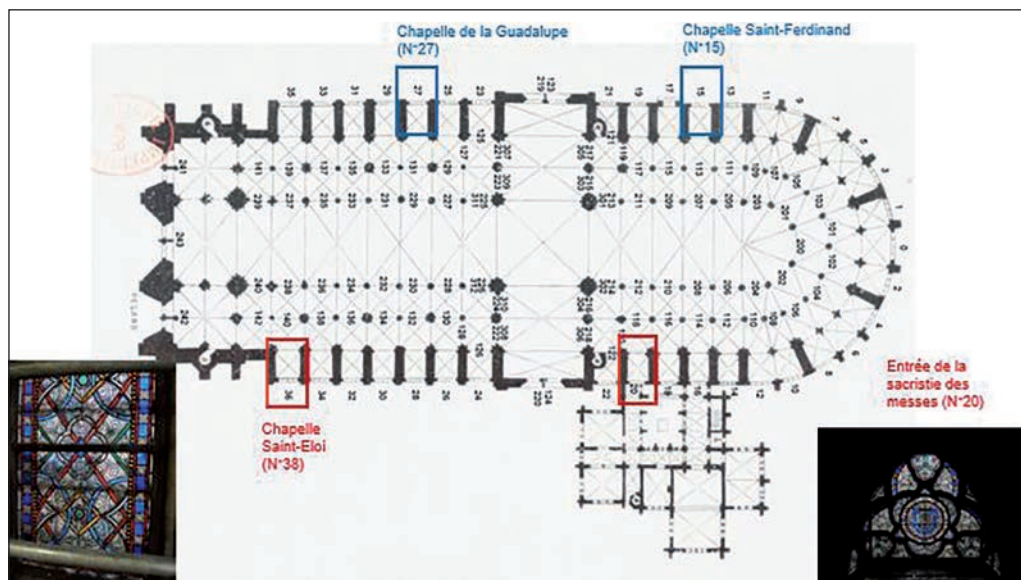


Figure 11

Les différents lieux qui ont permis la mise en place du protocole de décontamination et de restauration, et le cahier des charges pour les entreprises.

être faite sur panneaux déposés dans les ateliers.

Riche de toutes ces données et de tous ces résultats, la maîtrise d'œuvre – donc les architectes – a pu élaborer le cahier des charges et lancer les appels d'offres aux entreprises.

2.3. Protocole de décontamination des vitraux

Pour mettre au point le protocole de décontamination des peintures et des vitraux, le LRMH est intervenu directement sur le terrain comme on le voit sur la **figure 12** afin d'établir un premier diagnostic.

Puis, très vite, des prélèvements ont été effectués pour analyser les dépôts, leur consistance, leur composition chimique pour adopter un traitement de décontamination adapté.

Un grand nombre de techniques, dont quelques-unes sont expliquées dans d'autres chapitres de cet ouvrage, sont utilisées ; ici, nous insisterons davantage sur la méthodologie.

Par exemple, dans les techniques de prélèvement sur les vitraux, nous avons utilisé une procédure de « scotch test » pour caractériser ces dépôts, évidemment associée à toute une méthodologie de localisation et de numérotation. Le scotch est appliqué sur les vitraux, dans des zones bien identifiées, en appuyant de façon uniforme. Il faut que tout soit réalisé par la même personne pour que les prélèvements soient comparables. Après mise en sachet et référencement de ce dernier, les analyses sont menées en laboratoire (**figure 13**).



Figure 12

Le LRMH est intervenu directement sur le terrain pour mener des observations et des caractérisations et faire des prélèvements.

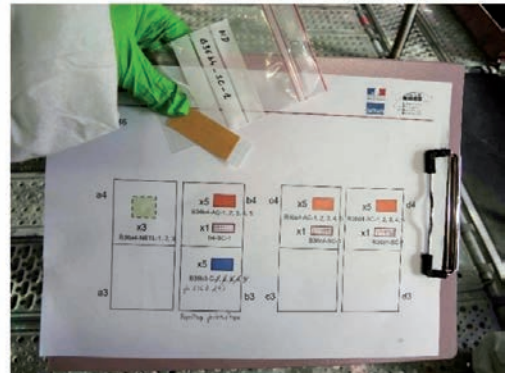


Figure 13

Les quatre étapes de la réalisation d'un « scotch test » pour permettre la caractérisation des dépôts sur les vitraux et les peintures.

La même méthodologie a été utilisée pour la pierre, pour la peinture murale, et nous avons pu ainsi comparer nos données. Les observations à l'œil nu ont été très vite complétées

par des observations au microscope 3D (figure 14) ; ces dernières ont permis d'élaborer des cartographies comme celles de la figure 15 sur l'ampleur de la baie.

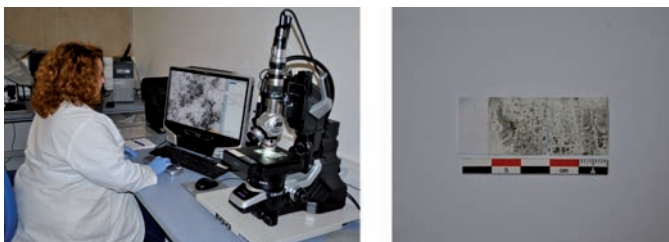


Figure 14

Le microscope 3D permet d'étudier les dépôts.

Mais il faut garder à l'esprit que ces vitraux datent de 1960, et qu'ils n'avaient jamais été touchés. On y retrouve donc un cumul de dépôt de particules atmosphériques datant de 1960, archive du temps assez intéressante.

Au laboratoire, ces analyses sont complétées par l'analyse au microscope électronique à balayage⁴ associé à une microsonde. Le procédé permet d'obtenir une information complémentaire sur la morphologie ainsi qu'une composition chimique qualitative et donc, de savoir quels éléments chimiques sont présents sans avoir toutefois vraiment la composition chimique quantitative.

Les résultats d'analyse ont mis en évidence la présence de beaucoup de gypse, de sulfate de calcium provenant de l'altération des mastics. Les verres, que ce soit ceux du XIX^e ou du XX^e siècle, étaient en parfait

état de conservation : pas de formation de produits d'altération, gypse ou syngénite⁵.

Les résidus de mastics proviennent de l'étape de masticage, réalisée lors de la fabrication du vitrail : on découpe les pièces de verre, on les peint, on les cuit, et on les insère dans une résille de plomb ; puis on applique du mastic, qui est un carbonate de calcium avec de l'huile de lin, de façon à rendre étanche la zone entre le plomb et le verre. Évidemment, sur la surface des vitraux, il reste toujours des petits résidus de mastic qui s'altèrent avec le temps et ce sont ces carbonates de calcium qui par des phénomènes de sulfatation⁶ vont se transformer en sulfate de calcium.

Sur les clichés de microscopie à balayage (figure 16), on peut voir des petites billes bien rondes et bien brillantes qui ont aussi été retrouvées sur les pierres et qui ont été identifiées comme du plomb provenant de la toiture, ainsi

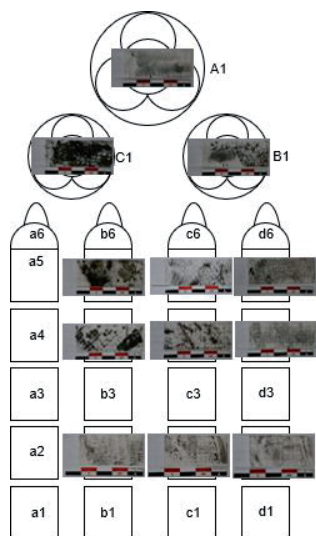


Figure 15

L'utilisation d'un outil tel que le microscope 3D permet de cartographier l'état du vitrail.

4. La microscopie électronique à balayage ou *Scanning Electron Microscopy* en anglais est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

5. La syngénite est un minéral rare de sulfate de potassium et de calcium de formule $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$.
6. La sulfatation est le transfert d'un sulfate SO_4^{2-} ou groupe de sulfates à un accepteur.

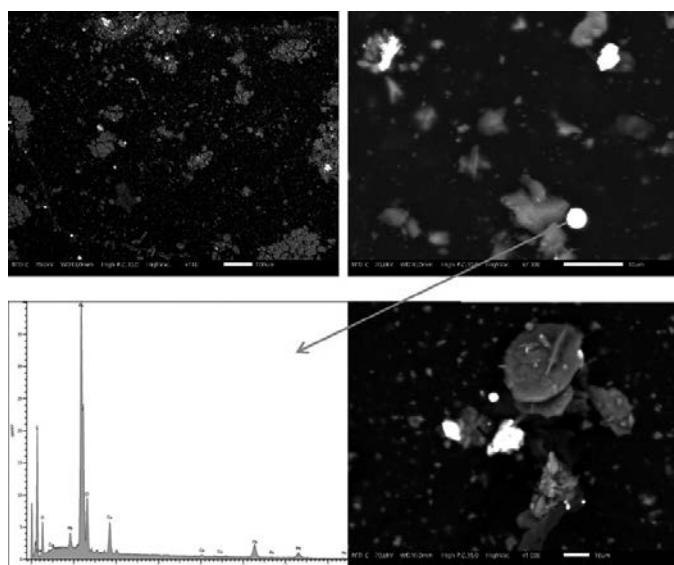


Figure 16

Le microscope électronique à balayage permet d'identifier les composants présents, notamment le plomb issu de la toiture.

que d'autres particules atmosphériques très petites.

La présence de plomb est plus importante du côté façade occidentale que du côté chevet car le nuage d'incendie s'est déplacé vers l'ouest. Toutes les données ont été croisées pour mieux comprendre les trajectoires du plomb. Mais il ne faut pas oublier que le vitrail contient intrinsèquement du plomb puisque les peintures brunes opaques (appelées grisaille), majoritairement présentes sur les verres, sont composées de silicate de plomb avec des oxydes de fer ou parfois de cuivre, et que les pièces de verre sont insérées dans un réseau de plomb. Donc, quand on parle de plomb dans le domaine du vitrail, il faut bien faire la part des choses. Les comparaisons avec les résultats des collègues des pôles

scientifiques « Pierre » et « Peinture murale », ont permis d'identifier la présence de particules de plomb provenant de l'incendie de la toiture.

Pour le vitrail, quelles sont les conclusions des analyses ? Une décontamination est possible sur les vitraux du XIX^e siècle qui ont des peintures de bonne adhérence. Il nous est possible de procéder à un nettoyage à l'aide d'un pinceau doux, couplé d'une aspiration contrôlée à l'aide d'un aspirateur équipé de filtres spécifique (filtres HEPA⁷, *figure 17*). Par la suite, la restauration sera réalisée sur panneaux déposés dans un atelier spécialisé de restauration de vitraux.

Ce protocole a été appliqué à l'échelle de l'entreprise dans

7. Filtre HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) : filtre à particules aériennes à haute efficacité.

les deux chapelles côté nord pour évaluer les coûts et les délais. La **figure 18** montre l'espace de confinement créé autour des chapelles afin de procéder à un essai de décontamination en isolant cet espace propre du reste de la cathédrale contaminée.

À l'intérieur de cet espace de confinement, les vitraux ont été déposés pour être restaurés dans l'atelier Vitrail France à Neuville-sur-Sarthe (**figure 19**). Le résultat de la restauration est présenté sur la **figure 20** où l'on retrouve l'harmonie des couleurs

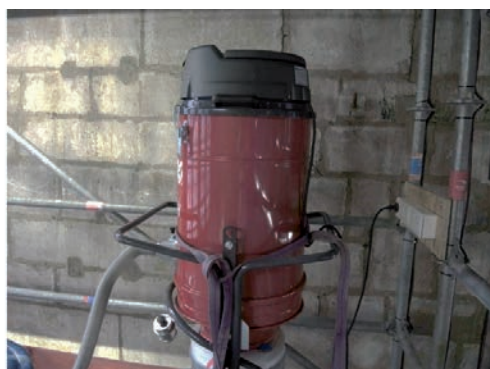


Figure 17

Pinceau et aspirateur à filtre HEPA qui permettent de retirer la couche de dépôt en douceur et de laisser ensuite le champ libre pour la restauration.



Figure 18

Un système de confinement créé à l'aide de bâches permet d'isoler les parties décontaminées de la cathédrale.



Figure 19

Les vitraux déposés dans l'atelier Vitrail France où ils vont être restaurés.



Figure 20

Les vitraux de la chapelle Saint-Ferdinand après décontamination et restauration.

des peintures murales et de l'ensemble de ces très beaux vitraux du ^{xix}^e siècle.

3 Le groupe de travail « Verre »

Depuis l'incendie de Notre-Dame, il a été décidé de créer des groupes de travail spécialisés, et notamment un groupe de travail « Verre » dont l'objectif est de réaliser un état des lieux des recherches dans ce domaine. De leur côté, les historiens souhaitent actualiser l'inventaire des vitraux d'Île-de-France datant de 1959, dans lequel sont décrits les vitraux de Notre-Dame. Réaliser un état des lieux des recherches, mettre en place des programmes de recherche scientifique autour de la cathédrale... une belle mouvance se met alors en place avec ces groupes de travail et ce chantier scientifique CNRS-ministère de la

Culture. L'objectif est de soutenir les actions de restauration pour Notre-Dame mais aussi de dépasser ce cadre en visant un élargissement vers les autres monuments. Un an après l'incendie de Notre-Dame, le 18 juillet 2020, nous avons eu à faire face à un autre incendie, celui de la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes où la façade occidentale, un joyau constitué de magnifiques vitraux datant du début du ^{xvi}^e siècle, a explosé et a été malheureusement très endommagé. L'expérience acquise sur le Chantier de Notre-Dame nous a permis d'utiliser la méthodologie mise au point pour arriver en renfort et répondre à la demande du terrain sur cette nouvelle catastrophe – et ce, même si chaque catastrophe détient ses propres particularités.

Dans ce groupe de travail « Verre », nous avons identifié

deux thématiques très importantes : la première se situe dans la continuité de ce qui a été présenté dans la mise au point des protocoles, c'est-à-dire caractériser les dépôts de surface sur les vitraux et comprendre leurs interactions avec les matériaux. La seconde concerne la recherche sur la connaissance des vitraux du ^{XII}^e au ^{XX}^e siècle, domaine particulièrement riche pour Notre-Dame.

Pour la première thématique, trois projets ont été mis en place : un premier sur la conservation/restauration des vitraux soumis à des catastrophes. Un deuxième qui concerne l'interaction du plomb sur les matériaux à Notre-Dame et le troisième qui porte sur le développement d'un nouvel outil pour la caractérisation stratigraphique des dépôts sur les vitraux de Notre-Dame.

La thématique 2 est traitée sur les vitraux qui sont dans les ateliers. Il s'agit de caractériser des verres et des peintures au cours et après la restauration et de mettre à jour le recensement des vitraux parisiens publié en 1978 par Louis Grodecki, Françoise Perrot et Jean Taralon et qui constitue le premier volume du recensement des vitraux de France.

3.1. Conservation/ restauration des vitraux soumis à des catastrophes

Un travail a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de Master 2 en conservation/restauration des biens culturels pour diagnostiquer la nature des dépôts, les états des surfaces des œuvres, et comment

optimiser les protocoles d'urgence face à une catastrophe en croisant les deux cas de Notre-Dame de Paris et de la cathédrale Saint-Pierre-et-Saint-Paul de Nantes.

La caractérisation des dépôts et des états de surface est réalisée par des techniques de microscopie. Les méthodes et traitements de restauration chimiques ou mécaniques sont par la suite optimisés.

Sans lumière, un vitrail ne ressemble pas à grand-chose comme on peut le constater sur le panneau noir de la **figure 22a** qui correspond à la face interne d'un des panneaux du ^{XIX}^e siècle du Maréchal de Metz.

En revanche, lorsque la lumière vient jouer sur le vitrail, une force de luminosité extrêmement intéressante (**figure 22b**) transforme son aspect.

Le second projet « PlombND », financé par la région Île-de-France dans le cadre du Domaine d'Intérêt Majeur (DIM), matériaux anciens et patrimoniaux, toujours en cours de réalisation, regroupe trois partenaires : le LRMH, l'IMPMC⁸ et le LISA⁹. Il a pour objectif de caractériser les dépôts plombifères à l'échelle macro et nano en utilisant des microscopies avancées sur les différents matériaux : le verre, la pierre et le métal.

Le but est de comprendre les mécanismes de formation des dépôts de surface, les conséquences sur leur interaction avec le verre et d'élaborer des

8. L'Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie.

9. Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques.

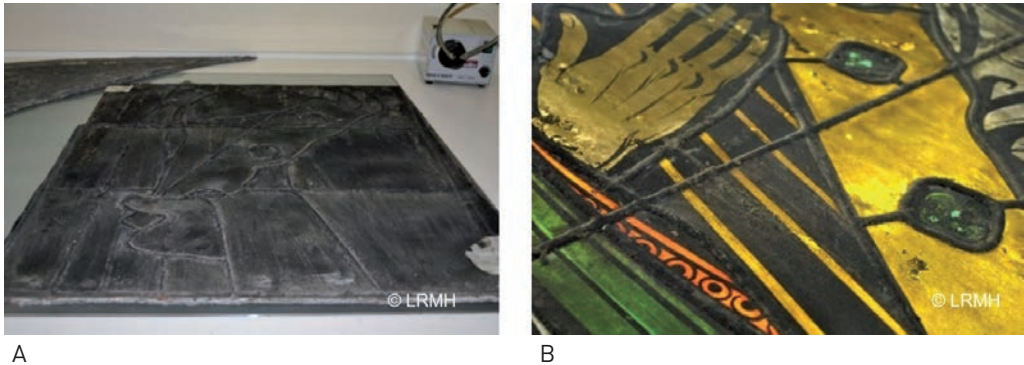


Figure 22

a) Face interne d'un panneau datant du XIX^e siècle, non éclairé, sans lumière transmise. b) Même vitrail cette fois avec la lumière transmise.

protocoles de décontamination adaptés pour chaque matériau support.

Le troisième projet se déroule dans le cadre d'une thèse financée par la Fondation EDF et en partenariat avec le C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France), qui possède dans son sous-sol ce magnifique outil qu'est l'accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire¹⁰ (AGLAE) (figure 23). Il s'agit de se concentrer sur l'observation et l'analyse de la couche stratigraphique du dépôt pour obtenir une information sur la caractérisation du plomb à la surface et en profondeur.

3.2. La pluralité des approches dans les études de vitraux en ateliers

La thématique 2 précédemment évoquée regroupe les

historiens de l'art du vitrail et les scientifiques de tout l'univers de la conservation : les chimistes, les physiciens, les géologues, les restaurateurs avec les architectes et les conservateurs. Les principaux enjeux scientifiques sont listés figure 24. Le degré

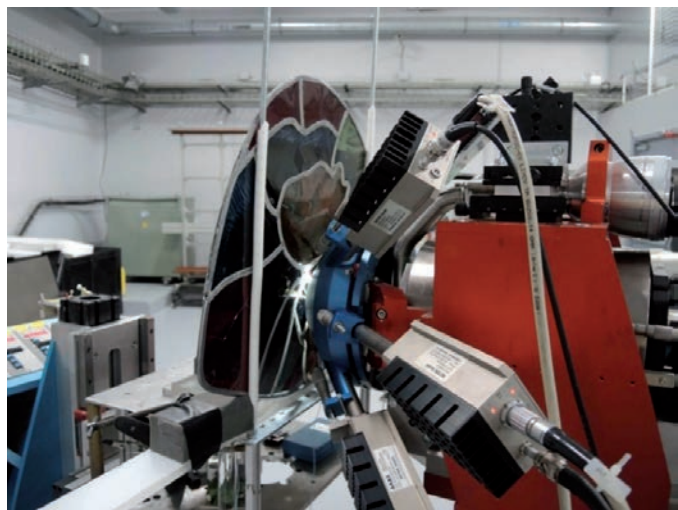


Figure 23

AGLAE, l'accélérateur pour l'analyse élémentaire des œuvres d'art et d'archéologie du Grand Louvre.

10. AGLAE, l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire est un appareil d'analyse destiné à l'étude des Œuvres d'art et d'archéologie.

Enjeux scientifiques :

- S'interroger sur le degré d'authenticité des vitraux
- Définir et quantifier la palette de couleurs des verres employés
- Déterminer les compositions chimiques (matrice vitreuse et éléments colorants) pour remonter aux matières premières
- Discuter des conditions de fabrication des verres
- Compréhension des processus d'altération des verres
- Distinguer les provenances temporelles et géographiques des verres

Méthodologie

- Archives, bibliographie, étude en atelier des matériaux et de leur mise en œuvre, étude de la peinture : historien de l'art
- Analyses des matériaux : scientifique de la conservation, chimiste, physicien...
- Observation des états de surface et de la morphologie
- Comparaison de verres provenant de plusieurs sites

Figure 24

Les différents enjeux scientifiques et la méthodologie mis en œuvre pour les vitraux étudiés dans les ateliers.

d'authenticité des vitraux est intéressant lorsqu'on est face à eux pendant une restauration. Définir et quantifier la palette de couleurs, déterminer la composition chimique de la matrice vitreuse et identifier les éléments colorants pour remonter aux matières premières sont des objectifs difficiles que nous essayons d'atteindre. Discuter des conditions de fabrication d'un verre, savoir s'il a été fabriqué en cive¹¹ ou en manchon¹², ouvre encore d'autres voies. Comprendre les processus d'altération des verres reste toujours une base du métier

11. Technique de soufflage à la canne permettant la fabrication d'un verre plat. Synonyme de soufflage en plateau, les feuilles obtenues présentent une forme circulaire que l'on appelle « cive ». La cive ou plateau est une pièce de verre circulaire et plate avec une boudine en son centre, zone d'attache de la canne du souffleur de verre.

12. Technique de soufflage à la canne permettant la fabrication d'un verre plat grâce à l'obtention d'un manchon ou cylindre. Celui-ci est ensuite réchauffé puis étendu pour former une feuille rectangulaire.

de chimiste mais il est aussi important de distinguer les provenances temporelles et géographiques des différents ensembles.

Dans la méthodologie présentée (**figure 24**), on utilise évidemment les archives, la bibliographie et les historiens de l'art jouent un rôle essentiel. L'analyse des matériaux peut être faite par les scientifiques de la conservation : les chimistes, les physiciens. L'observation des états de surface, de leur morphologie, peut raconter beaucoup aussi de l'histoire d'un verre et puis évidemment, il faut comparer les résultats provenant de plusieurs sites.

Les méthodes non invasives et non destructives sont favorisées pour préserver ces œuvres d'art que sont les vitraux. En cela, l'Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire (AGLAE) est intéressant mais bien entendu, il ne peut pas analyser tous les panneaux. Il faut donc compléter avec d'autres techniques d'analyse comme les techniques de spectrométrie de fluorescence X qui, bien que qualitatives, sont extrêmement

utiles. Les spectroscopies Raman, la spectroscopie optique, l'imagerie hyper-spectrale¹³, toutes ces technologies sont utilisées par les équipes pour mieux comprendre et caractériser l'ensemble des vitraux de Notre-Dame.

La **figure 25** montre les différents acteurs du recensement des vitraux parisiens à l'œuvre. Issus de différentes disciplines, ils sont des historiens d'art, des experts des vitraux capables d'analyser l'authenticité des œuvres suivant un

13. L'imagerie hyper-spectrale ou spectro-imagerie est une technologie permettant d'obtenir l'image d'une scène dans un grand nombre de bandes spectrales à la fois étroites et contiguës.

ensemble de caractéristiques (morphologie, coloration, vibration du verre) suivant les nervures du verre.

Par exemple, pour l'analyse d'authenticité sur les trois roses, il faut prendre chaque panneau, identifier les pièces d'origine, les pièces de restauration et dans ces dernières, identifier celles des différentes restaurations. Pour ce panneau (**figure 26**) – indiqué en jaune sur la **figure 27** – qui reste assez simple, sur la figure de droite les zones non colorées indiquent les verres d'origine, les pièces de restauration sont de couleur orange ; les bouche-trous, en violet, sont des pièces anciennes de réemploi. Le verre n'est jamais



Figure 25

Les différents acteurs du recensement des vitraux à l'œuvre sur les chantiers.



Figure 26

Exemple d'une critique d'authenticité et des conclusions tirées.

Figure 27

Baie nord du transept, le panneau signalé en jaune a été soumis à une critique d'authenticité.



perdu, il est soit réutilisé ou refondu. On trouve donc déjà à l'époque, cette notion de recyclage et de conservation.

Plus de quatre-vingt-onze panneaux ont été étudiés depuis plus d'un an sur les trois roses ; les trois roses ne sont pas déposées car il faut compter deux ans par baie pour une restauration

respectueuse et de qualité. De plus, alors que les peintures des vitraux du XIX^e siècle ont une bonne adhérence, sur ces roses, les peintures du XII^e et du XIII^e siècle sont très fragiles. Dans le cadre de la réalisation de ce travail, les échafaudages mis en place pour accéder aux voûtes ont été très utiles, permettant de mener la critique d'authenticité des vitraux pour mieux les caractériser, mieux les documenter et anticiper la restauration à venir dans les prochaines années.

Cette cartographie des pièces anciennes sera ensuite un outil de travail fort utile pour les architectes. Les critiques d'authenticité ont été faites pour la rose sud, la rose nord et la rose occidentale et tous les membres et partenaires de ce groupe de travail sont représentés sur la **figure 28**, autour de la photo, au centre de la rose nord.



Figure 28

Tous les membres et partenaires du groupe de travail « Verre » sans qui rien ne serait possible.

Conclusion

Pour en savoir plus sur l'évolution de tous ces programmes liés à la restauration de Notre-Dame, n'hésitez pas à consulter le site internet du LRMH : vous y trouverez une revue de presse et de nombreuses informations régulièrement mises à jour.

Nous vous suggérons également le dossier « Notre-Dame » paru dans la revue semestrielle *Monumental* (2021) (figure 29).

Le *National Geographic* a quant à lui publié un article complet (figure 30).

Enfin, un très beau documentaire intitulé « La face cachée de Notre-Dame » est sorti à l'automne 2022 (figure 31).



Figure 29

Édition spéciale Notre-Dame de Paris, *Monumental*, 2021.

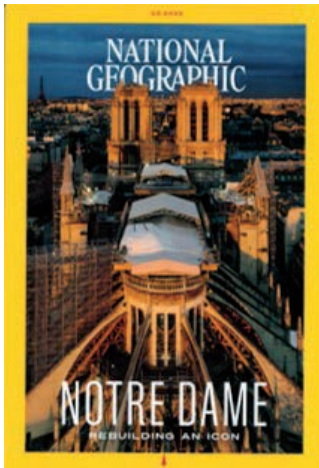


Figure 30

Le National Geographic, dossier détaillé sur Notre-Dame, 2022.



Figure 31

Le documentaire « La face cachée de Notre-Dame » met en lumière tout le travail réalisé par les scientifiques et les équipes de restauration.

Mémoire du bois : apport de la chimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris

Chargée de recherche au CNRS, UMR 7209 Archéozologie, archéobotanique : Sociétés, Pratiques et Environnements (ASSPE), CNRS/MNHN, Paris.

Spécialiste d'une discipline dont on ne prononce le nom que rarement, la dendro-anthracologie, c'est-à-dire l'identification et l'étude des cernes des bois archéologiques carbonisés pour comprendre les modes d'exploitation de la forêt par les sociétés passées.

1 Les charpentes de la cathédrale de Notre-Dame

1.1. Quelques notions

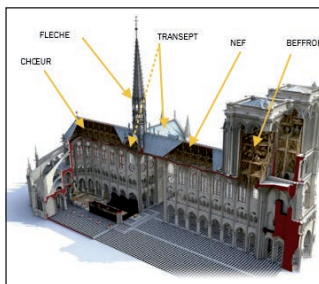
Notre-Dame de Paris ! Son nom à lui seul évoque un chef-d'œuvre architectural en pierre, véritable prouesse des artisans du Moyen Âge. Mais c'est oublier un peu vite que sa charpente retient l'intérêt des architectes depuis le XIX^e siècle. Bien qu'étant aujourd'hui l'une des charpentes médiévales les

mieux documentées, de nombreuses questions restent en suspens et nous amènent à nous interroger un peu plus sur le travail des hommes qui a conduit à l'édification de ce joyau.

La **figure 1** permet de localiser cette charpente au sein de l'édifice. On la retrouve à l'aplomb du vaisseau principal composé de la nef, du chœur et des bras du transept qui forment la traverse d'un plan en croix avec le vaisseau principal.

Figure 1

Localisation des charpentes dans Notre-Dame (Restitution de L. Stefanon in Sandron et Tallon 2019. Notre-Dame de Paris : neuf siècles d'histoire).



À cela s'ajoutent la flèche et les beffrois, tours de bois dans lesquelles les cloches sont suspendues. En dehors des beffrois et de la flèche, ces charpentes sont formées d'une succession de structures triangulaires que l'on appelle des fermes (figure 2).

1.2. État des connaissances

Une documentation récente a été réalisée par Cédric Trentesaux, architecte, et Rémi Fromont architecte en chef des Monuments Historiques, aujourd'hui en

charge de la restauration de la cathédrale. Leur relevé architectural (figure 3) a été mené entre 2014 et 2015. Très riche en détails archéologiques, ce travail apporte de nombreux renseignements sur les usages et les évolutions de la charpente, sur ses déformations, sur le repérage des réparations et sur l'étude des marquages et des systèmes de levage.

La figure 4 est un modèle numérique en 3D, réalisé par le groupe de travail « Écosystème numérique du chantier scientifique » (coord. L. de Luca). Cette figure montre que toutes les fermes ne sont pas construites selon le même modèle ; il existe une variabilité entre la nef, le chœur, les bras du transept mais aussi au sein de ces ensembles. Cette variabilité traduit le fait que nous n'avons pas affaire à « une » charpente mais à « des » charpentes, ce que montre d'ailleurs la figure 5, un autre modèle

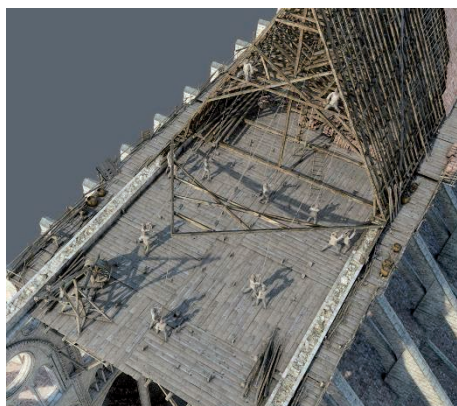


Figure 2

Assemblages et levages de fermes. À gauche : reconstitution réalisée dans le cadre de l'étude de la cathédrale de Bourges où un plancher a été installé pour permettre le montage des fermes et leur levage. © F. Epaud.

À droite : ferme reconstruite sur un modèle identique à la ferme n°7 de la nef de Notre-Dame (source : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr>).

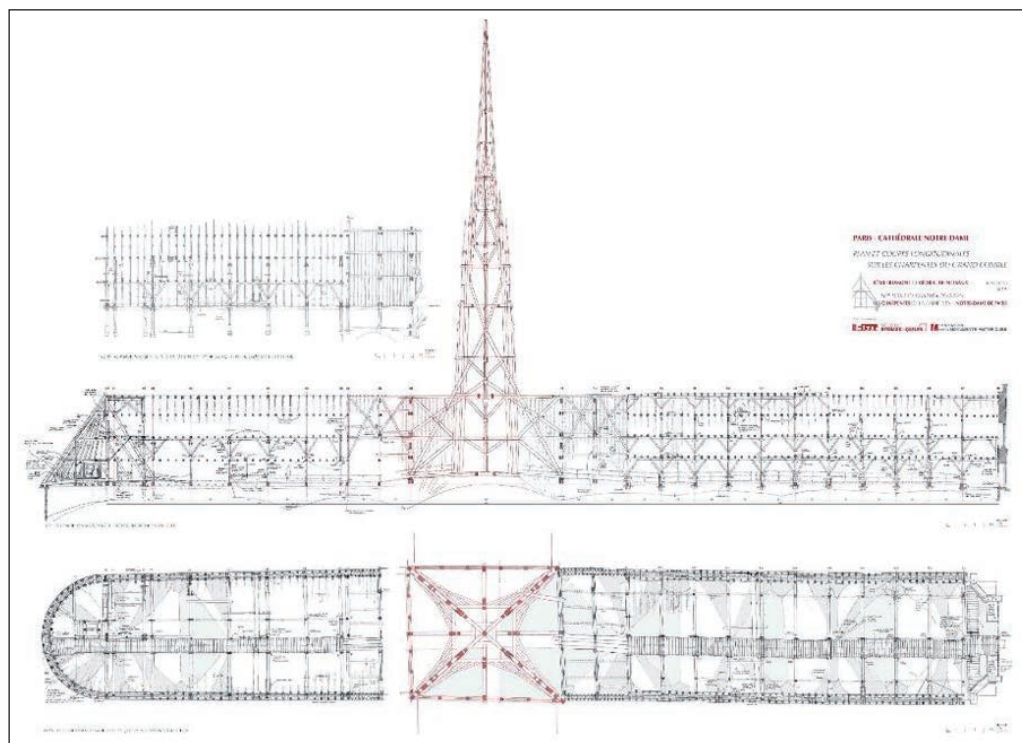


Figure 3
Relevé architectural réalisé par Fromont et Trenteseaux en 2015.

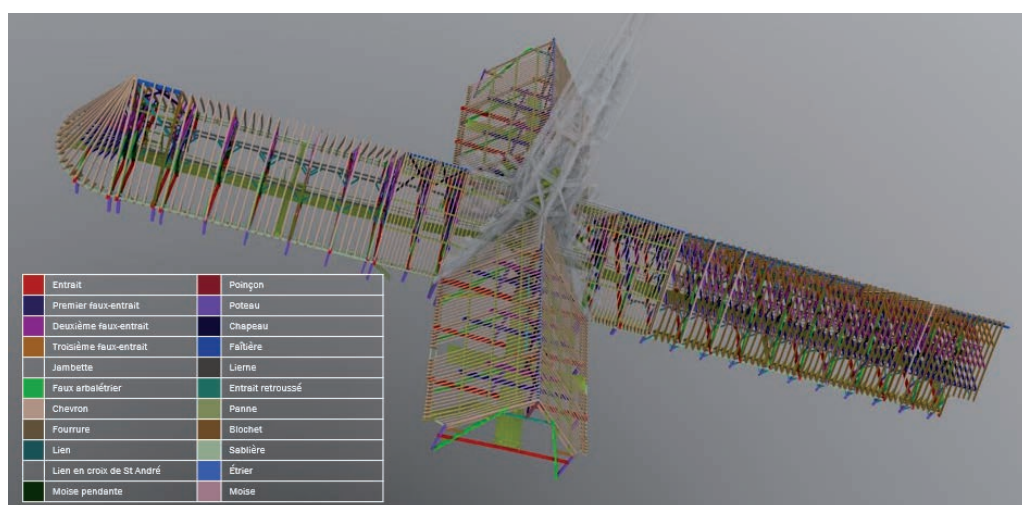


Figure 4
Modèle numérique 3D de la charpente. Un code couleur a été attribué à chaque pièce architecturale.
© K. Jacquot.

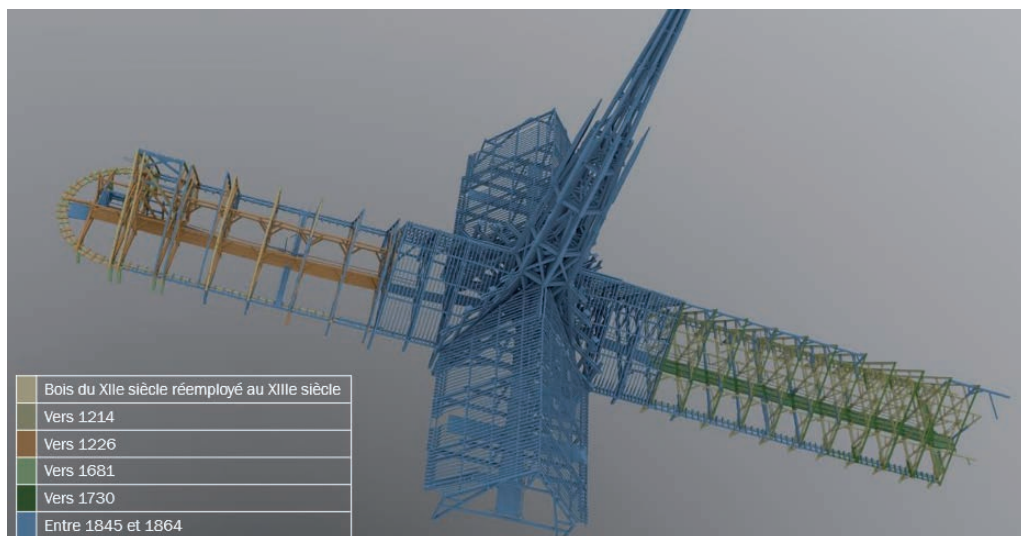


Figure 5

Modèle numérique 3D de la charpente et phasages chronologiques. En bleu, les fermes du transept et de la flèche qui datent de la grande restauration de 1860 de Viollet-le-Duc¹. Cette restauration a empiété sur deux fermes du chœur et trois de la nef. Le reste du chœur et de la nef est du XIII^e siècle, à l'exception de quelques ajouts et de réparations, également figurés en bleu. La charpente de la nef, plus perfectionnée, a été construite postérieurement. Enfin, une partie des bois du chœur réemploie ceux d'une première charpente de la fin du XII^e siècle, démantelée pour surélever les murs et donc, la toiture. © K. Jacquot.

réalisé en fonction des phases chronologiques de construction connues.

1.3. Des charpentes qui ont encore de nombreux secrets à révéler

L'histoire de ces charpentes est plutôt bien documentée ; elles font partie des grandes charpentes médiévales remarquables par leur conception, leur réalisation et par leur état de conservation.

1. Viollet-le-Duc : architecte collaborateur du concours lancé par la Commission des monuments historiques en 1843 pour trouver un projet de rénovation de la cathédrale alors délabrée.

Néanmoins elles restent mal connues dans les détails, et selon les termes de Fromont et Trenteseaux « *les anciennes descriptions précises et détaillées sont rares voire même parfois incohérentes et laissent ainsi de nombreuses interrogations* ». Parmi ces interrogations, certaines peuvent trouver leurs réponses grâce à l'étude des bois carbonisés. Il s'agit notamment d'identifier précisément les essences de bois² qui composent ces charpentes, d'approfondir la chronologie fine de leur réalisation, de caractériser la

2. Essences de bois : l'essence d'un bois désigne l'espèce ou la sous-espèce à laquelle appartenait l'arbre d'où provient ce bois.

forme, l'âge des bois et leur provenance géographique. Le dernier point n'est pas directement lié à la connaissance de la charpente mais plutôt au climat des XII^e et XIII^e siècles, période qui correspond à une amélioration climatique identifiée par les scientifiques et nommée « Anomalie climatique médiévale ». Pour chacune de ces questions, nous présentons ci-dessous les hypothèses de travail et les méthodes employées – entre autres, celle de la biogéochimie (**encadré**) – pour les tester.

2 L'arbre et la mémoire du bois

2.1. L'arbre, un enregistreur de son environnement

L'arbre est un enregistreur de son environnement, ce qui se traduit par exemple par sa physionomie (**figure 8**).

De même, le bois qui constitue le tronc de l'arbre, enregistre année après année certaines variations de l'environnement. Tous les ans, l'arbre forme un nouveau cerne de croissance en périphérie qui s'ajoute, à la manière de poupées

QU'EST-CE QUE LA BIOGÉOCHIMIE ?

La biogéochimie est une discipline qui se situe entre la chimie, l'écologie, la biologie et les géosciences (**figure 6**). Elle s'intéresse au fonctionnement des écosystèmes et notamment, au processus de transfert des éléments chimiques du monde abiotique – atmosphère, sédiments – au monde biotique à savoir les organismes vivants qui, à leur tour, vont retransmettre ces éléments à l'environnement. Nous allons donc particulièrement nous intéresser au cycle biogéochimique entre l'arbre et son environnement (**figure 7**).

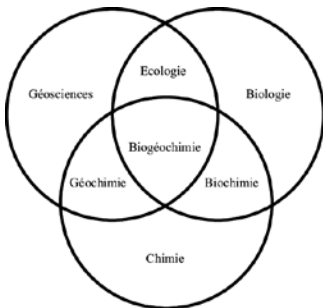


Figure 6

Présentation des domaines scientifiques mis en jeu dans la biogéochimie.

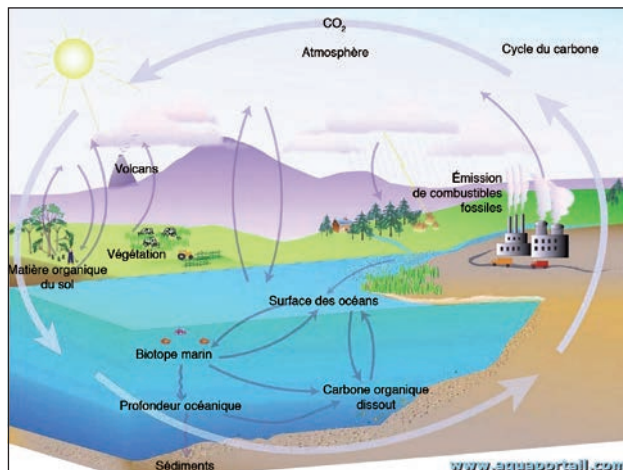


Figure 7

Processus de transfert par cycle du carbone.

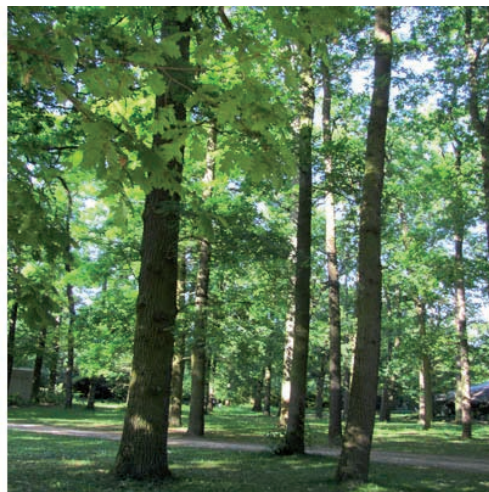


Figure 8

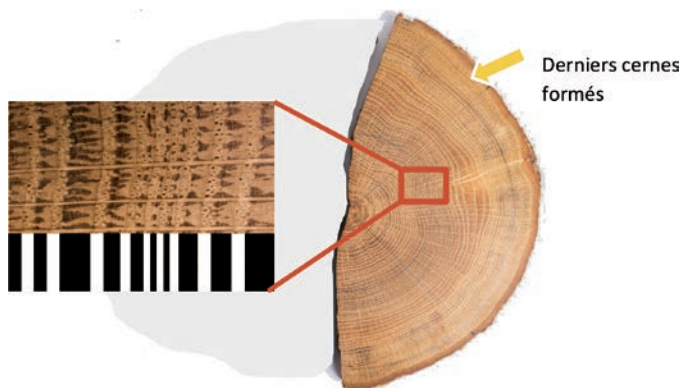
La physionomie d'un arbre dépend de la présence ou non d'autres individus à son voisinage (Source : <http://www.snv.jussieu.fr>). À gauche : un chêne isolé. Le tronc est trapu, les branches maîtresses démarrent assez bas et le houppier de l'arbre constitué des feuilles est extrêmement bien développé. En l'absence d'arbres concurrents, cet individu a pu croître sans gêne. À droite, des chênes de la même espèce constituent un boisement : les troncs sont élancés, droits et rectilignes, il n'y a pas de branches basses importantes et le houppier est extrêmement peu développé. C'est ici la conséquence de la présence de nombreux individus dans le voisinage.

russes, aux précédents. En milieu tempéré, l'arbre forme du bois au printemps et en été (figure 9), c'est-à-dire au cours de deux périodes pendant lesquelles la photosynthèse est effective. Au fil du temps, l'arbre va ainsi former une sorte de « code-barres » qui reflétera à la fois son potentiel génétique, son âge, son environnement (par exemple, la présence ou

l'absence d'arbres voisins, une maladie, un été sec, etc.). Ces largeurs de cerne, qui constituent un outil de datation, peuvent être combinées à d'autres indicateurs tels que les compositions chimiques, moléculaires, isotopiques, ce afin d'obtenir des données encore plus fines sur les modes de croissance, les zones de provenance du bois et le climat passé.

Figure 9

Vue d'une coupe transversale de chêne. Les anneaux concentriques sont les cerne du bois. On distingue ainsi à l'échelle d'un cerne (une année) un bois de printemps (schématisé par des bandes blanches) et un bois d'été (schématisé par des bandes noires) formant au fil du temps un « code-barres ». © A. Dufraisse.



2.2. Le bois et la carbonisation

Lors de la carbonisation, le bois subit des déformations anatomiques, mécaniques et chimiques. La **figure 10** présente une rondelle de « chêne sessile », carbonisée et non carbonisée. On constate une réduction de taille – le retrait du bois – avec l'apparition de fentes de retrait³. Le charbon est par ailleurs un matériau friable qui se fragmente, contrairement au bois. Il existe de même des modifications chimiques et isotopiques, invisibles à l'œil

3. Fentes de retrait : fente se formant dans le bois lorsque celui-ci perd par séchage, une partie de l'eau le composant.

nu en dehors de la couleur noire. Après carbonisation, l'information contenue dans le bois peut être modifiée. C'est pourquoi une partie des chercheurs du groupe de travail « Bois et Charpente » concentre ses efforts sur la calibration du signal en fonction des intensités de carbonisation subies par le bois.

2.3. Le bois, un outil de datation

Des arbres d'une espèce, qui ont poussé dans des conditions proches, (dans une même région et donc dans le même microclimat avec les mêmes sécheresses et les mêmes tempêtes) présentent



Figure 10

Rondelle de chêne non carbonisée (à droite) et carbonisée à 400 °C pendant une heure (à gauche). © CNRS.

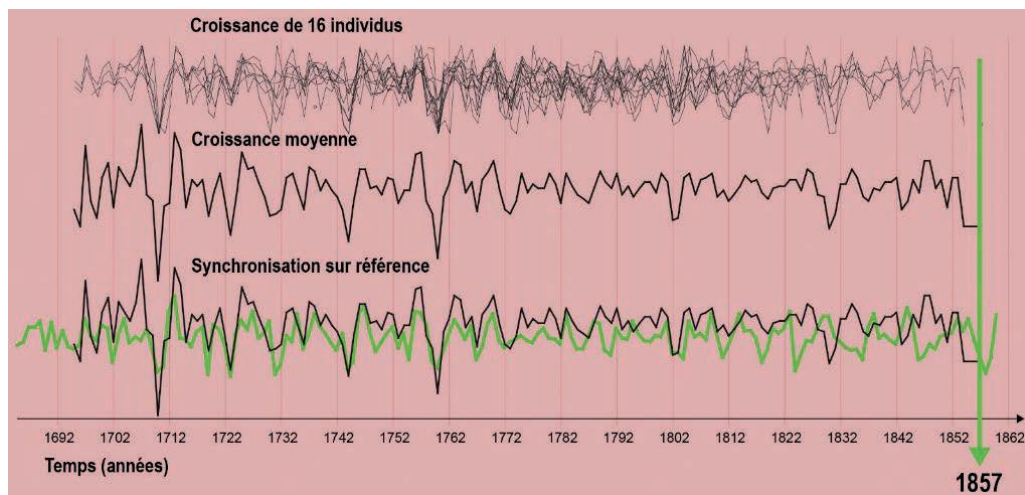


Figure 11

Traduction de code-barres en courbes de croissance. Les codes-barres ont été transformés en courbes de croissance avec les largeurs de cernes en ordonnées et le temps en abscisses. En haut, nous pouvons observer les courbes individuelles de seize échantillons archéologiques à partir desquels une courbe de référence moyenne a été construite et synchronisée avec la courbe de référence (en vert) en recherchant des portions communes. © O. Girardclos.

des codes-barres qui se ressemblent (figure 9). Fondée sur ce principe, l'étude des largeurs de cernes de plusieurs dizaines d'arbres d'une même région, contribue à construire un code-barres moyen pour servir de référence. De proche en proche, en intégrant des arbres de charpentes anciennes, des bois préhistoriques, on arrive à obtenir un code-barres moyen à l'échelle de l'ouest de l'Europe sur les huit mille dernières années et qui sert de référence (figure 11). Cette démarche permet de dater un bois trouvé en contexte archéologique et de connaître sa date d'abattage à l'année près si le dernier cerne est présent. Il est même possible d'estimer la saison d'abattage en fonction de la présence de bois de

printemps seul ou de bois de printemps et de bois d'été.

Si le dernier cerne est absent mais que l'aubier⁴ du bois est présent, il est possible de proposer une fourchette d'estimation. Enfin, lorsque l'aubier est totalement absent, la date est dite « *terminus post quem* » autrement dit, il s'agit de la date à partir de laquelle l'arbre a été abattu. Pour dater les bois d'une charpente, on se retrouve face à la contrainte de l'équarrissage – le fait de chercher à donner une section carrée au tronc pour obtenir une poutre (figure 12). En façonnant ainsi le bois, on peut effacer

4. Partie vivante de l'arbre située en périphérie du tronc dans laquelle la sève brute circule. Ce compartiment qui représente une vingtaine d'années chez le chêne, apparaît plus clair (figure 9).



Figure 12

Perte de l'information en fonction de l'équarrissage © O. Girardclos.

totalemment ou partiellemment les cernes périphériques, notamment l'aubier. La date d'abattage n'est alors plus à l'année près ; elle devient une fourchette de datation ou une date *post quem*.

3 Apport de la dendro-anthracologie à la connaissance du bois des charpentes et de son environnement

Revenons aux charpentes de Notre-Dame. Certains ont surnommé ces charpentes « forêt » parce que les milliers de bois qui ont servi à sa construction donnaient l'illusion d'une forêt construite en chêne (figure 13). On estime que 800 à 1 000 chênes ont été nécessaires à sa construction, chaque pièce importante provenant d'un arbre différent.

Quelles informations peut-on tirer de cette charpente carbonisée ? Cela peut sembler paradoxal mais c'est justement parce qu'elle est détruite et que les bois carbonisés ne sont pas réutilisables pour la reconstruction de la charpente

que l'on peut les découper et les étudier – bien entendu dans le respect de la conservation de certains éléments patrimoniaux, afin de répondre aux questions précédemment posées. Aujourd'hui, l'étude des bois carbonisés commence à peine et les réponses sont donc préliminaires.



Figure 13

La charpente de la nef de Notre-Dame, plus perfectionnée que celle du chœur, a disparu lors de l'incendie du 15 avril. © F. Epaud. A. Dufraisse.

3.1. L'essence de la charpente de Notre-Dame

Au moins trois espèces de chênes poussent dans la moitié nord de la France (*figure 14*) ; laquelle ou lesquelles ont été exploitées pour construire les charpentes de Notre-Dame ? On ne le sait pas... Pour répondre à cette question nous utiliserons à la fois l'ADN, qui ne sera conservé que sur les parties les moins carbonisées (*figure 15*) et l'anatomie du bois puisqu'elle est conservée pendant la carbonisation.

3.2. Combien de charpentes à Notre-Dame ?

Pour répondre à cette question, il convient d'affiner la chronologie en datant non seulement l'année d'abatage du bois mais aussi en déterminant quand il a été mis en œuvre. Pour ce faire, il nous a fallu mobiliser plusieurs indices issus des rôles

architecturaux : la localisation dans la cathédrale, les types de fermes, l'étude des assemblages pour réunir les pièces de bois et les marques laissées par les charpentiers.

La seconde contrainte, propre à Notre-Dame cette fois-ci, c'est la carbonisation qui va également induire une perte de matière dans les parties les plus périphériques, les premières exposées aux flammes ; non seulement le dernier cerne sera perdu mais les séquences dendrochronologiques (nos fameux codes-barres) risquent d'être raccourcies au point qu'elles pourraient correspondre à plusieurs parties de notre courbe de référence. C'est la raison pour laquelle la dendrochronologie sera couplée à la datation radiocarbone qui repose sur l'isotope du carbone 14 (*encadré*).

La datation ne servira pas uniquement au phasage chronologique ; elle permettra d'apporter d'autres informa-



Figure 14

Les trois espèces de chênes poussant dans la moitié nord de la France. De gauche à droite : le chêne pédonculé, le chêne sessile et le chêne pubescent. (Source : <http://www.snv.jussieu.fr>).



Figure 15

Chêne carbonisé en périphérie.

LA DATATION PAR LE CARBONE 14

Petit rappel ici sur ce que sont des isotopes. Deux atomes sont dits isotopes lorsqu'ils ont le même nombre de protons (marqué par la lettre Z), mais un nombre de neutrons différent (qui s'additionne pour donner la lettre A). Par exemple, pour le carbone, nous distinguons 3 isotopes (*figure 16*), le carbone 12, le carbone 13 et le carbone 14.

Dans l'atmosphère, la présence du carbone 12 est bien plus importante que celle du carbone 13. Le carbone 14 lui, est vraiment en quantité infime : il est donc bien difficile de le mesurer ! Tant qu'un individu est en vie, il absorbe le carbone de l'atmosphère selon le rapport de ces isotopes à une période donnée. À sa mort, les échanges de carbone avec la biosphère cessent. Or le carbone 14 est un isotope radioactif, contrairement au carbone 12 et au carbone 13 qui sont des isotopes stables. Autrement dit, leurs teneurs ne se modifient pas dans le temps – nous y reviendrons plus tard. Le carbone 14, lui, se désintègre en diminuant de moitié tous les 5 700 ans environ. Au cours de sa désintégration, il produit un isotope fils dit « radiogénique », ici l'azote 14. Ainsi, la datation par le radiocarbone a-t-elle pour but de mesurer la radioactivité résiduelle permettant de dater l'âge de la mort d'un individu.

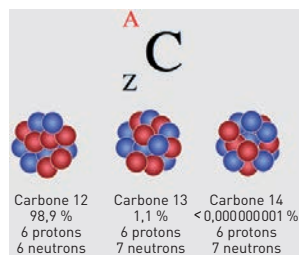


Figure 16

Le carbone et ses isotopes

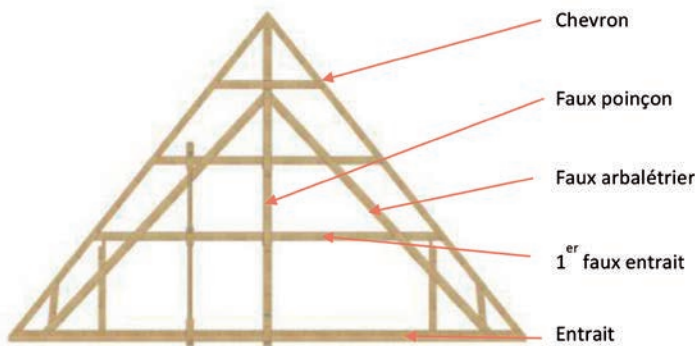
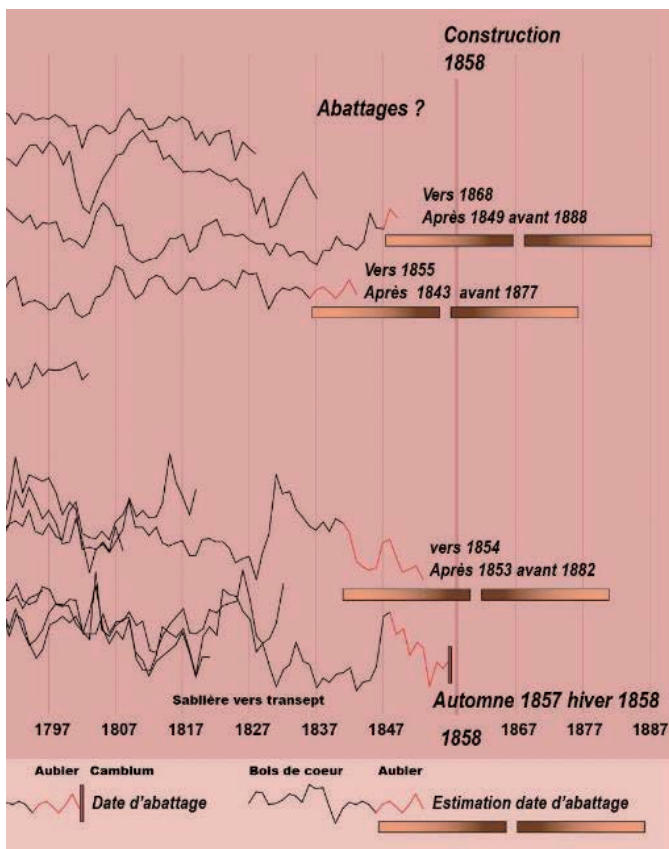
tions, entre autres sur le temps qui sépare l'abattage du bois de sa mise en œuvre lorsque les sources textuelles peuvent être mobilisées. *Figure 17*, en voici un exemple : il s'agit de la datation de plusieurs bois de la flèche de Viollet-le-Duc. Un seul de ces bois présente le dernier cerne (le cambium) ; celui-ci permet de le dater aux alentours de l'automne 1857/hiver 1858 puisque le dernier cerne était complet. Or, dans le journal des travaux de Viollet-le-Duc, une mention stipule que la flèche a été construite en septembre 1858. Ces données indiquent donc que le bois a été abattu seulement quelque mois avant sa mise en œuvre et qu'il n'a pas été séché avant d'être utilisé comme on le ferait aujourd'hui.

3.3. Sylviculture et provenance des bois de la charpente

La troisième grande hypothèse est celle de l'existence d'une sylviculture spécifique pour la période médiévale ; il faut entendre par là des pratiques de mise en gestion et de mise en valeur d'une forêt ou d'un boisement pour en obtenir un bénéfice économique. La *figure 18* reproduit le dessin d'une ferme avec le nom des plus grandes pièces ainsi qu'une photo de la charpente. Chaque pièce de grande dimension est réalisée à partir d'un seul tenant, c'est-à-dire à partir d'un seul tronc d'arbre. Parmi les éléments les plus grands, certaines pièces peuvent atteindre 14 m de long ; d'autres sont comprises entre 7 et 12 m. Les

Figure 17

Datation de plusieurs bois sur la flèche de Viollet-le-Duc. Certains bois ne présentent pas d'aubier (en noir), d'autres en présentent (en rouge) ; un seul bois présente le dernier cerne complet (ligne verticale). © O. Girardclos.



Pièces de charpente	Section moyenne des bois équarris (cm)	Diamètre du tronc à la base (cm)	Longueur (m)
Entrait principal	25 x 22 (N1 + N05-N11)	40	14
	29 x 24.5 (N02-N04)	45	
Chevron	16,5 x 16,5	30	11,8
1 ^{er} faux entrait	23,5 x 16	30	9,6
Faux arbalétrier	21 x 16	30	9,3
Faux poinçon	22,5 x 17,5	35	7,3



Figure 18

La ferme et ses différentes composantes : en haut à gauche, un schéma détaillé d'une ferme ; en haut à droite la photo d'une ferme ; en bas, un tableau contenant les mesures des différentes composantes. © F. Epaud.

sections équarries permettent d'évaluer les diamètres des troncs à la base autour de 30/40 cm voire, 45 cm. Nous avons donc affaire à des troncs d'arbres très élancés (en bas à droite, figure 18) qui correspondent à des arbres de plus de 25 m de haut, la partie supérieure, le houpier, n'étant pas exploitable.

La morphologie du tronc apporte des indices sur les conditions de croissance et de vie de l'arbre. Ici, typiquement, ils ont poussé dans un milieu dense. Par ailleurs, les données dendrochronologiques réalisées sur des échantillons prélevés avant l'incendie montrent que ces arbres étaient âgés de quatre-vingts à cent ans et n'étaient pas pluricentenaires comme on n'a pu souvent l'entendre.

Pour répondre à cette question de sylviculture, une première approche consiste à sélectionner certaines pièces après incendie pour en faire une étude de largeur de cernes sur toute la longueur et ainsi restituer, malgré l'équarrissage et la carbonisation, le profil d'élancements de départ qui pourra être comparé à des chênes actuels. Une seconde approche s'attache à déterminer la provenance géographique.

Ainsi, deux hypothèses de travail sont en cours : la première est que les bois proviennent du Bassin parisien et la seconde qu'une partie des bois a été peut-être transportée par voie fluviale (par bateaux ou par radeaux). Pour identifier l'origine géographique des bois, nous combinons les largeurs de cernes

(qui, on l'a vu, présentent des signatures communes à l'échelle d'une même zone géographique), la composition chimique et isotopique des bois (qui va refléter le substrat, l'ADN qui permet aussi de séparer géographiquement certains lignages) ou encore les sources textuelles.

Pour en venir plus précisément à la composition chimique et isotopique, nous allons nous intéresser aux éléments majeurs – comme le potassium, le calcium et l'aluminium qui sont des indicateurs du pH – et à l'isotope du strontium (*figure 19*).

La *figure 20* montre que l'arbre puise ses éléments nutritifs dans l'eau du sol pour nourrir et fabriquer ses tissus. De multiples études ont montré un lien entre la composition de la sève et celle du bois. Or, la composition de la sève va dépendre de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol laquelle dépend du pH du sol lui-même déterminé par le substrat. Les effets de la carbonisation sur la composition élémentaire ont été testés. Le graphe de la *figure 21* montre l'évolution du rapport manganèse sur potassium (ratio utilisé pour caractériser le pH d'un sol). Nous constatons que *i)* les teneurs en manganèse discriminent très largement les chênes ayant poussé sur sol acide, *ii)* l'écart se creuse entre les chênes sur sol calcaire et ceux sur sol acide avec l'augmentation des températures.

Venons-en aux isotopes du strontium (*figure 22*). Le strontium est un analogue du calcium qui est très bien

Tableau périodique des éléments chimiques

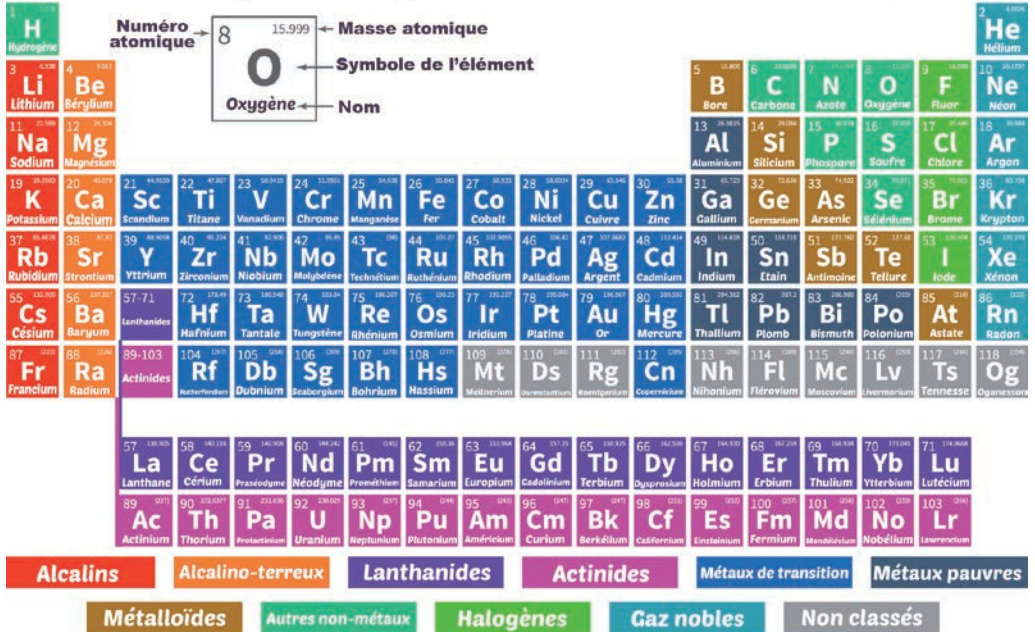


Figure 19

Tableau périodique des éléments chimiques (source : <https://www.listedemots.com/liste-elements-chimiques>).

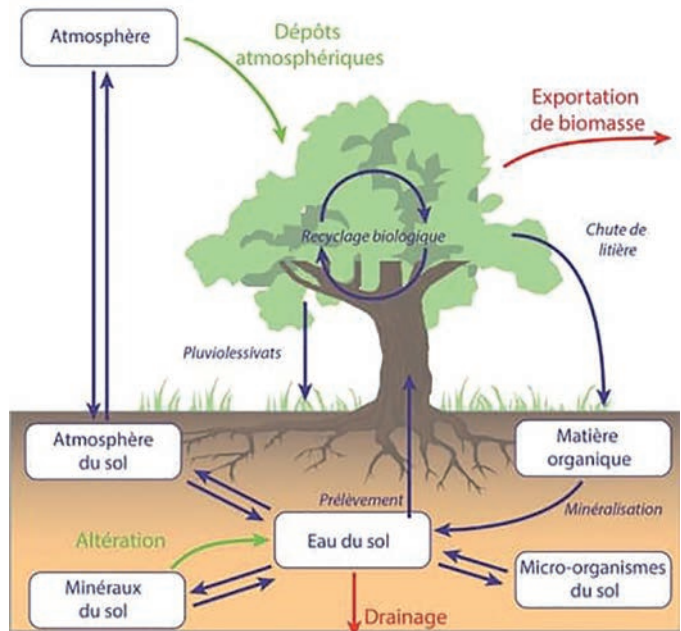


Figure 20

Cycle élémentaire de l'arbre.

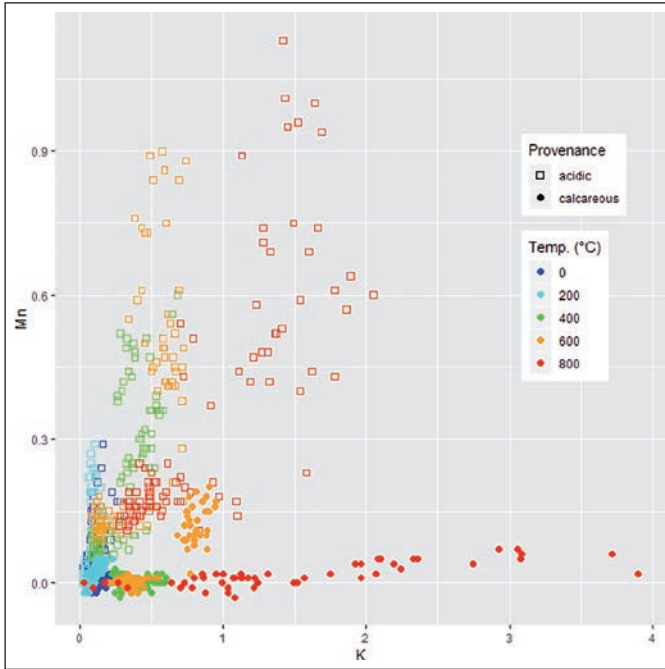


Figure 21

Évolution du rapport manganèse/potassium dans différents sols et à différentes températures (sols acides : carrés vides ; sols calcaires : ronds pleins). © A. Stulc Imbert, J.-L. Dupoue, S. Ponton.

absorbé par les plantes. De fait, le strontium l'est aussi. Le strontium possède quatre isotopes. Trois sont stables et le strontium 87 est radio-génique, car il provient de la désintégration radioactive du rubidium. Or, le rubidium est un analogue du potassium que l'on trouve sur des roches de type granite et donc, assez acides. Par conséquent, le strontium 87 est plus important sur ce type de roche et le rapport strontium 87/strontium 86 permet de discriminer les roches calcaires des roches acides.

La **figure 23** montre un exemple d'application dans la région du Pays basque espagnol sur des

chênes caducifoliés⁵ avec huit peuplements de chênes actuels sur des roches carbonatées⁶ (en bleu), et sur des roches silicatées⁷ (en rouge). Les résultats montrent des différences significatives entre les roches carbonatées et les roches silicatées.

Pour répondre à la question de la provenance géographique

5. Caducifolié : se dit d'un arbre qui perd ses feuilles l'hiver.

6. Roches carbonatées : roches composées d'au moins 50 % de carbonates. Un carbonate est un sel dont l'ion négatif est CO_3^{2-} (par exemple le bicarbonate de soude - CO_3HNa - est un carbonate).

7. Roches silicatées : roches dont la composition principale est le silicate - SiO_2 .

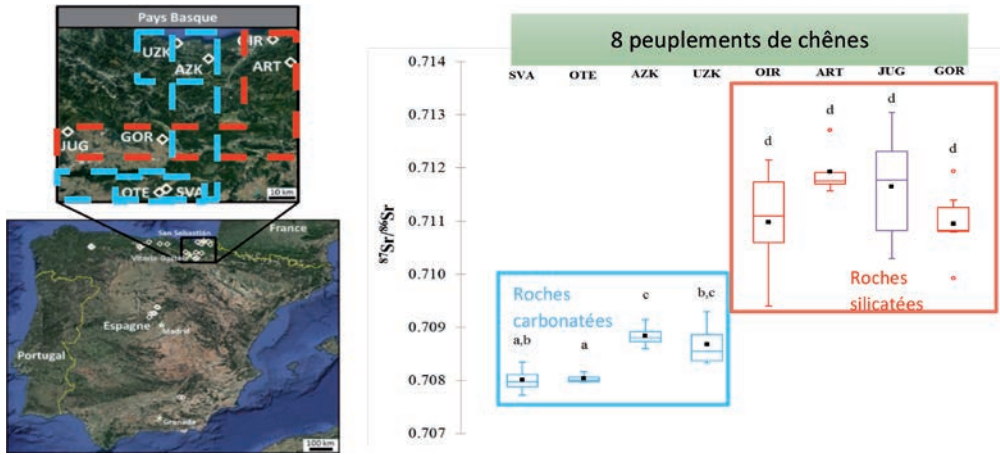


Figure 23

Rapport de strontium 87 sur strontium 86 (droite) en fonction de la localisation de groupes de chênes au Pays basque (gauche).

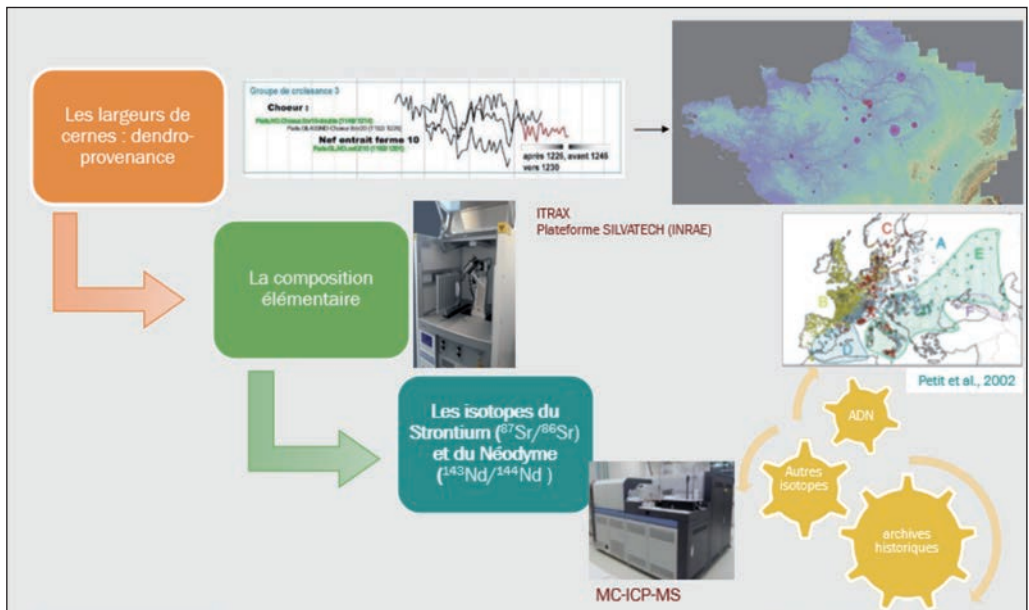


Figure 24

Les méthodes de datation en dendrochronologie, appliquées aux bois de Notre-Dame. © A. Dufraisse.

des bois de Notre-Dame, il est donc nécessaire de construire un référentiel des forêts de chênes situées dans le bassin de la Seine, ayant poussé sur des sols et des substrats contrastés. On y documente les

forêts, le diamètre et la hauteur des arbres. On prélève des carottes de bois pour y mener les analyses précédemment évoquées (figure 24). On prélève également les sols pour faire le lien entre carotte et sol.

Ces données vont servir de base de comparaison pour étudier les bois de Notre-Dame.

4 Le climat des XII^e et XIII^e siècles : un analogue au réchauffement climatique actuel ?

La dernière partie de ce chapitre ne concerne pas directement la connaissance de la charpente et de sa construction mais le climat médiéval. Les bois exploités pour la charpente de Notre-Dame ont en effet poussé au cours du XI^e/XII^e siècle, une période appelée « Anomalie climatique médiévale ». C'est une période d'amélioration climatique, identifiée en différents endroits du monde, qui est d'un intérêt majeur pour comprendre le réchauffement climatique que nous vivons actuellement, puisqu'elle intervient en l'absence d'activités humaines impactantes. Les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène – qui dépendent du fonctionnement physiologique de l'arbre qui s'adapte au climat – sont pour cette étude les marqueurs choisis. Les isotopes de l'oxygène sont plutôt indicateurs de températures alors que les isotopes du carbone sont plutôt indicateurs des précipitations.

De manière générale, en dendroclimatologie, on travaille sur la cellulose, un des constituants du bois (pour rappel, le bois est essentiellement formé de lignine, cellulose et hémicellulose⁸). Chaque constituant présentant des

rapports isotopiques différents. C'est la raison pour laquelle la cellulose est toujours privilégiée comme objet d'étude. Il faut noter que la carbonisation devient un processus potentiellement gênant : elle va entraîner des réactions en cascade avec une dégradation progressive de la matière organique et en premier lieu, de la cellulose autour de 350/400 °C. Un travail de calibration du signal isotopique du carbone et de l'oxygène entre bois non carbonisé et bois carbonisé est en cours pour permettre d'extraire les données pertinentes nécessaires à caractériser le climat passé.

La **figure 26** est un exemple d'application récente utilisant l'oxygène du bois non carbonisé. Il concerne des chênes de la forêt de Fontainebleau et des poutres de la charpente du château qui ont été carottées. Les carottes ont été datées par dendrochronologie, la cellulose (**figure 25**) a été extraite cerne par cerne et la composition

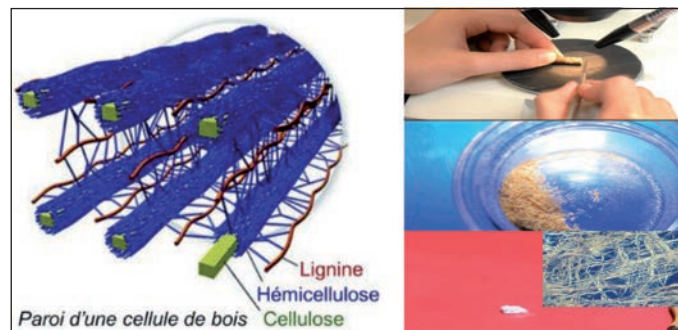


Figure 25

Disposition de la lignine, de l'hémicellulose et de la cellulose les unes par rapport aux autres dans une cellule de bois (à gauche). Les étapes de récupération de la cellulose, cerne par cerne (à droite).

8. Lignine, cellulose et hémicellulose : trois polymères organiques qui représentent les composés principaux du bois.

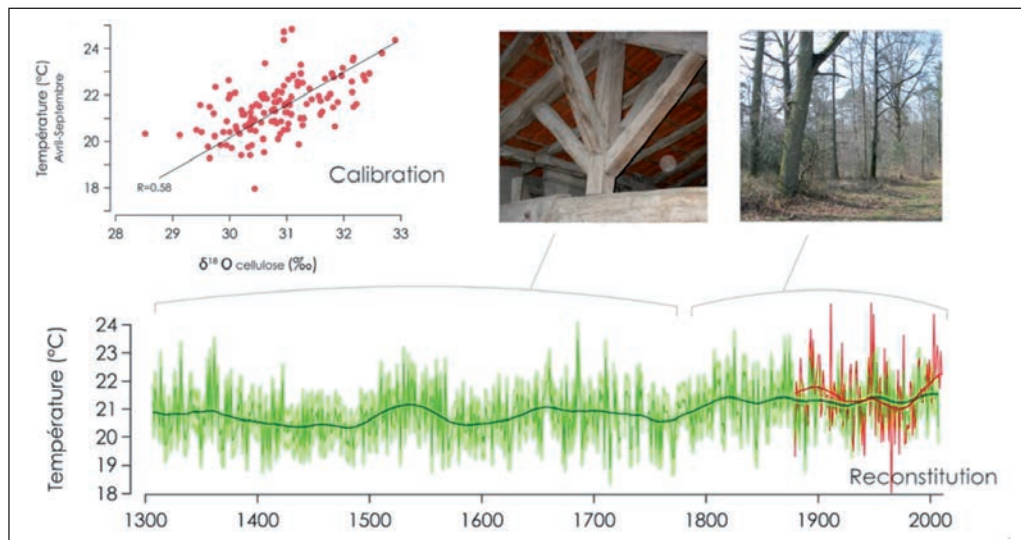


Figure 26

Exemple de l'utilisation des isotopes de l'oxygène pour étudier la température dans la forêt de Fontainebleau. En haut à gauche, la calibration entre les différences de rapport de ^{18}O et la température et en bas, la courbe de la température calculée en fonction de l'année. La courbe vert foncé est une restitution de la température avec les marges d'erreur en vert clair. La courbe en gras au milieu correspond aux données moyennes de la dendrochronologie et la courbe rouge, aux données météorologiques du site. © V. Daux.

isotopique de l'oxygène a été déterminée. Les différents rapports de l' ^{18}O sont liés à la température, ils sont transformés en échelle de température grâce à une calibration

faite avec des arbres vivants (figure 26). Cette reconstitution met en évidence le fait que les températures des dernières décennies sont plus élevées que celles des siècles précédents.

Conclusion et remerciements

Le projet « Mémoire du bois », appliqué aux charpentes de Notre-Dame de Paris, regroupe un collectif de chercheurs comprenant de nombreux spécialistes. Près de soixante-dix chercheurs travaillent aujourd'hui sur ces problématiques. Ils sont des spécialistes de l'étude des bois vivants, des bois archéologiques, carbonisés, non carbonisés, de l'écologie, de la génétique, du climat, de la datation. C'est aussi une belle opportunité pour eux de former des étudiants aux parcours universitaires en chimie, en biologie ou en archéologie.

L'apport des analyses chimiques à la connaissance des armatures de fer de Notre-Dame de Paris

Maître de conférences en Histoire médiévale à l'université Paris 8 et chercheur au sein du laboratoire ArScAn¹ du CNRS².

Il va être question ici des recherches sur l'usage du fer et plus généralement des métaux et notamment sur la circulation des métaux au Moyen Âge en prenant pour sujet d'étude la cathédrale Notre-Dame de Paris.

1 Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre est un travail collectif qui se déroule dans le cadre du chantier scientifique de Notre-Dame, en particulier dans celui des travaux du groupe « Métal »³ qui s'intéresse plus particulièrement au fer. Les utilisations du fer à Notre-Dame de Paris seront tout d'abord évoquées en détaillant ce que l'incendie a apporté à cette connaissance. Nous nous interrogerons

ensuite sur les questionnements historiques et archéologiques quant à la nature, la qualité, la provenance de ces matériaux – que la chimie permet d'aborder.

2 L'élément fer dans la construction de Notre-Dame

Où retrouve-t-on du fer à Notre-Dame et que savait-on avant l'incendie ?

Sur ce dernier point, la réponse est « pas grand-chose ! ». Seuls quelques éléments étaient donnés dans le dictionnaire de Viollet-le-Duc sur un emploi d'agrafes (**figure 1**) au sein des maçonneries du chœur

1. Archéologies et Sciences de l'Antiquité.

2. Centre National de la Recherche Scientifique.

3. <https://www.notre-dame.science/gt-metal/>

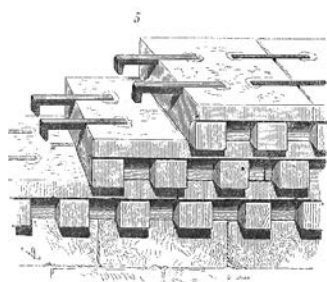


Figure 1

Agrafes schématisées par Viollet-le-Duc dans le Dictionnaire raisonné.



Figure 3

Armature de crête de faitage après l'incendie.

(probablement dès l'époque médiévale), de tirants⁴ et de chaînages⁵ (figure 2) ou d'armatures des crêtes de faitages en plomb (figure 3) que lui-même a contribué à ajouter lors de sa restauration au milieu du XIX^e siècle.

4. Tirant : « Sous une arcade ou une voûte, les tirants servent à empêcher l'écartement des murs ou des piédroits » [1].

5. Chaînage : « Armature en métal ou en béton armé ceinturant un bâtiment pour prévenir tout écartement des murs » [2].

L'incendie a mis en évidence beaucoup d'autres éléments et a permis de constater que le fer était utilisé comme moyen structurel dans la maçonnerie par exemple, pour le liant⁶ d'éléments de décors, dans la charpente également, pour des consolidations diverses sous de nombreuses formes : des agrafes (figure 4), des clous, etc. Il a aussi contribué à révéler

6. Liant : « Matériau ayant la propriété de maintenir ensemble des agrégats » [3].



Figure 2

Vues des tirants et chaînages posés par Lassus dans le haut chœur en 1846.

les crêtes de faîtages en faisant fondre le plomb (*figure 3*).

Nous retrouvons des agrafes de fer dans la structure de Notre-Dame dès les premiers étages (*figure 5*), au-dessus des grandes arcades d'une dizaine de mètres de hauteur, élevées au milieu du XII^e siècle. Ces agrafes sont présentées *figure 6* avec leur répartition dans la structure, à la fois dans

la nef et dans le chœur. Nous comptons plusieurs centaines de pièces, chacune pesant 2 à 3 kg environ. Nous trouvons également des agrafes masquées, complètement invisibles avant l'incendie, mais qui ont pu être mises en évidence grâce à des changements de pierres et grâce à un détecteur de métal (*figure 7*). Des agrafes sont aussi employées pour



Figure 4

Agrafes de fer trouvées sous la charpente de Notre-Dame de Paris, au sommet des murs.

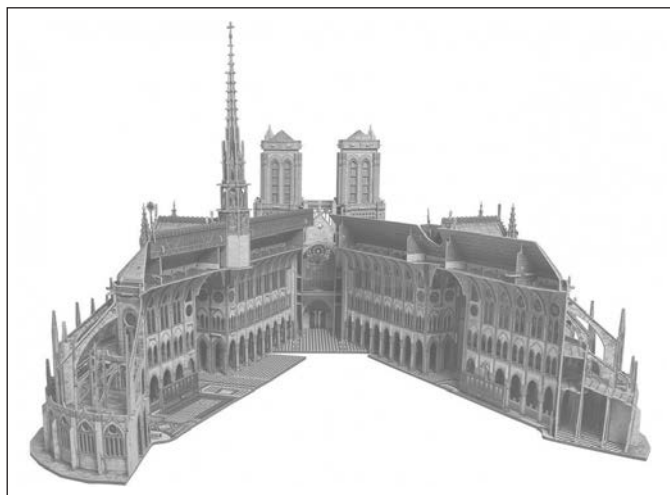


Figure 5

Représentation tridimensionnelle de Notre-Dame de Paris.



Figure 6

Agrafes au sol des tribunes.

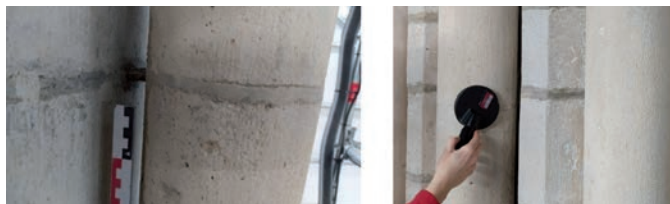


Figure 7

Mise en évidence d'une agrafe servant à maintenir un fût monolithique. Détecteur de métal positionné sur une colonne permettant de mettre en évidence une agrafe.



Figure 8

Vue générale des fûts de colonnes monolithiques.

consolider les fûts de colonnettes monolithiques⁷ très fragiles (figure 8) au niveau de la nef et des chapelles de l'édifice. Nous pouvons aussi mentionner les clous utilisés dans la charpente ainsi que d'autres armatures...

Il faut souligner l'important travail d'inventaire mis en place par le SRA⁸ et le Laboratoire des Recherches sur les Monuments Historiques. La répartition des éléments présents sur les voûtes après l'incendie a été établie par une véritable fouille archéologique suivant un carroyage préalablement établi à l'enlèvement de ces vestiges. Ainsi, avons-nous pu comprendre la répartition des différents

7. « Élément structural fait d'un seul bloc de pierre de grandes dimensions » [4].

8. Service Régional de l'Archéologie.

types de clous (figure 9). Certains d'entre eux ont vraisemblablement contribué aux scellements des éléments de la passerelle de la charpente (cf. chapitre 10). Enfin, diverses armatures qui tiennent une grande partie du décor en plomb sont à mentionner. C'est le cas des crêtes⁹ de faîtage¹⁰ par exemple, installées par Viollet-le-Duc au milieu du XIX^e siècle (figure 10), ou d'autres éléments de la flèche qui tiennent également avec des armatures de fer. Des armatures de fer ont donc été largement employées dans la structure de l'édifice.

9. « Ornement, motif décoratif placé au-dessus des faitières » [5].

10. « Pièce supérieure de la charpente d'un toit, composée généralement d'une ou plusieurs poutres de bois ou de métal auxquelles s'appuient les chevrons, et formant l'arrête centrale » [6].

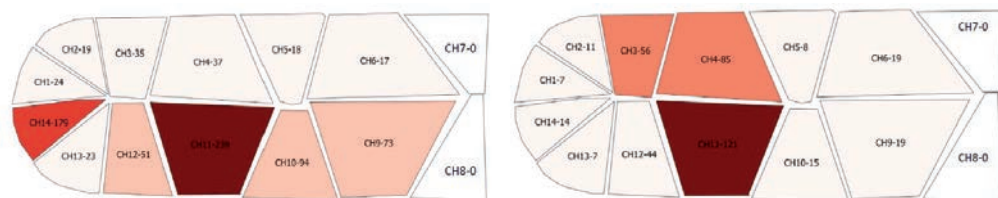


Figure 9

Distribution des clous prélevés sur les voûtes du chœur de Notre-Dame après l'incendie, par type (petits clous à gauche / gros clous à droite).

Figure 10

Armatures en fer (à gauche) des crêtes de faîtage en plomb (à droite), avant l'incendie.



3 Analyses et caractérisations chimiques

La **figure 11** donne un échantillonnage de la variété des objets sur lesquels nos études se sont portées et dont beaucoup ont été révélés par l'incendie de 2019, car ils étaient auparavant masqués ou inaccessibles.

3.1. Objectifs

Quelles sont les problématiques que l'on peut établir à partir de ce métal mis en œuvre dans la construction de Notre-Dame ?

Grâce à ces quelques diapositives, nous comprenons déjà les usages qui ont été faits du métal de l'époque médiévale jusqu'au XIX^e siècle. Nous pouvons aussi aborder la question de la nature, de la qualité et de son évolution au cours du temps, comprendre les aspects économiques relatifs à la gestion du chantier de construction, la provenance, l'approvisionnement des matériaux et également leur datation et leur chronologie. Nous nous intéressons également aux questions, très importantes, liées au recyclage ; nous avons parlé du réemploi des bois de la charpente



Figure 11

Variété des objets d'études pour Notre-Dame. Clous provenant de la charpente. Clous provenant du chœur. Agrafe de fer prélevée pour études. Agrafes référencées pour études. Élément d'un faitage. Élément d'un tirant pour structure de pierre. © Cyril Frésillon/CNRS Images.

(cf. **chapitre 10**), qu'en est-il pour le métal ?

Le chantier scientifique de Notre-Dame se déroule après qu'un certain nombre de méthodologies ont été mises en place, notamment au sein du laboratoire « Archéomatériaux et prévision de l'Altération »¹¹ (depuis quasiment vingt ans). Nous avons donc pu aborder l'ensemble de ces questionnements avec des protocoles d'étude métallographique élaborés et qualifiés et avec des protocoles d'étude également qualifiés d'analyses chimiques des impuretés présentes au sein de ces matrices¹² métalliques. Nous parlerons des questions de datation radiocarbone¹³ à la fin du chapitre.

À la suite de l'incendie, plusieurs dizaines de pièces – des agrafes, des clous, des crêtes de faîtage, un tirant etc. – ont pu être soumises à ces analyses ; nous en présentons ici brièvement les résultats.

3.2. Filières opératoires de production du fer

En préambule, évoquons les filières de production du fer historiques au cours du

Moyen Âge et de la période moderne.

Deux filières techniques de production vont se succéder mais aussi se superposer en partie vers la fin du Moyen Âge et au début de l'Époque moderne. La filière directe, la plus ancienne, existe depuis l'âge du Fer : dans un bas fourneau, le minerai¹⁴ de fer est transformé à une température inférieure à la fusion du fer. Le minerai (en général un oxyde¹⁵ ou un hydroxyde) est réduit¹⁶ pour obtenir du fer métallique. Les impuretés sont évacuées hors du haut fourneau dans les scories¹⁷ (**figure 12**).

À partir de la fin du Moyen Âge, dès le milieu du ^{xiv}^e siècle (mais principalement aux ^{xv}^e-^{xvi}^e siècles pour le nord du royaume de France), une deuxième filière se développe : d'autres types de structures vont apparaître, notamment grâce à l'utilisation de l'énergie hydraulique qui va permettre d'activer de gros soufflets, de faire monter la hauteur des cheminées et donc la température, de dépasser la fusion du fer et de produire non

11. LAPA NIMBE/IRAMAT CEA/CNRS

12. « Ensemble de tous les constituants d'un échantillon contenant l'analyte [entité chimique qui est recherchée qualitativement ou quantitativement au sein de l'échantillon] » [7].

13. « Technique permettant d'estimer l'époque de fabrication d'une œuvre en mesurant le rapport entre les isotopes 14 (radioactif) et 12 (stable) du carbone contenu dans les résidus organiques » [8].

14. « Tout minéral naturel, ou toute association minérale, susceptible d'être utilisé comme source de fer » [9].

15. « Composé résultant de la combinaison de l'oxygène avec un corps » [10].

16. Réaction chimique qui fait intervenir un couple oxydant/réducteur (Ox/Red) et qui consiste en un échange d'électrons. L'équation chimique associée à la réduction s'écrit : $Ox + n e^- \rightarrow Red$.

17. « Résidu solide des opérations de traitement des minerais métalliques ou de l'affinage de certains métaux surnageant dans le métal en fusion » [11].

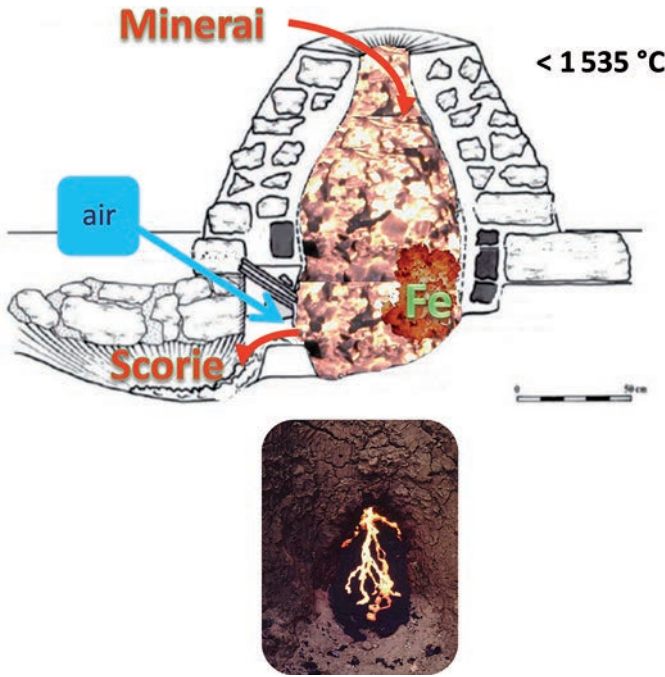


Figure 12

Schéma de fonctionnement d'un bas fourneau. Scorie s'écoulant en dehors du bas fourneau.

plus du fer mais de la fonte¹⁸. En dépassant cette fusion, le carbone diffuse¹⁹ bien davantage dans le fer liquide que dans le fer solide. La fonte, un alliage²⁰ de fer et de carbone à plus de 2 % doit dans un deuxième temps être décarburée²¹, affinée, et être transformée en fer forgeable ; en effet, la fonte peut être coulée mais trop dure et cassante,

elle ne peut pas être forgée. C'est la filière « indirecte » (figure 13) car le fer est produit en deux étapes : celle de la fonte en fourneau puis celle de l'affinage (figure 14). Dans la France du nord, ce procédé

18. « Alliage de fer, de carbone et autres éléments, obtenu par fusion du minerai de fer en haut fourneau » [12].

19. « Sauts effectués par des atomes dans les défauts (lacunes, joints de grain, interstitiels) du cristal, sous l'effet de l'agitation thermique » [13].

20. « Action [] de combiner ou de mélanger deux ou plusieurs métaux » [14].

21. « Opération métallurgique qui consiste à éliminer une partie du carbone contenu dans l'acier liquide » [15].

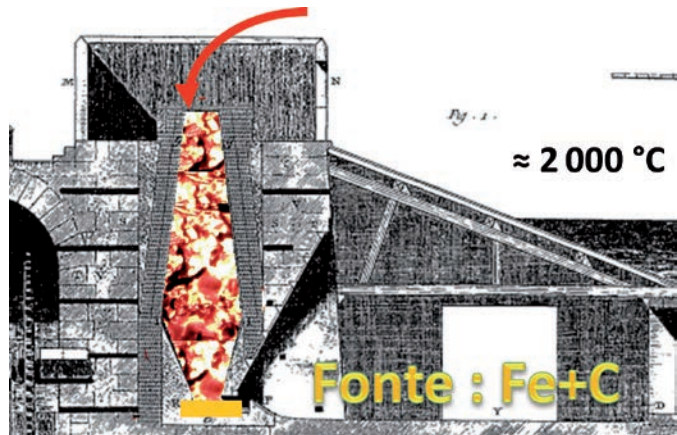


Figure 13

Schéma de fonctionnement d'un haut fourneau.



Figure 14

Affinage de la fonte par décarburation (vue d'un tableau d'Henri Blès, vers 1525-1550).

se répand durant la deuxième moitié du xv^e siècle ; à noter qu'il était parfois présent dans d'autres régions.

3.3. Analyses métallographiques d'une agrafe et d'un clou

La première étape de l'étude des matériaux prélevés sur

Notre-Dame est la détermination de leur structure par des analyses métallographiques²². La **figure 15** montre une des agrafes de la tribune du chœur ; **figure 16**, nous en voyons la micrographie. Elle est polie pour permettre une vision en microscopie optique²³.

Son attaque par des réactifs révèle une structure métallographique hétérogène. L'image parle d'elle-même : nous distinguons des zones ferritiques, c'est-à-dire où il n'y a pas de tout de carbone mais du fer pur et l'on devine les grains de fer assez réguliers parce



Figure 15

Agrafe brisée de la tribune du chœur prélevée pour analyses métallographique (vue avant prélèvement).

22. « Étude des métaux » [16].

23. « Elle se compose de quelques éléments principaux que sont un (des) objectif(s), un oculaire ainsi que d'un dispositif d'éclairage permettant d'atteindre des grossissements compris entre 30 et 1 500. La lumière utile à l'observation des échantillons s'étant des UV aux IR sur la gamme de longueurs d'onde [220 ; 1 700] nm » [17] ; [18].

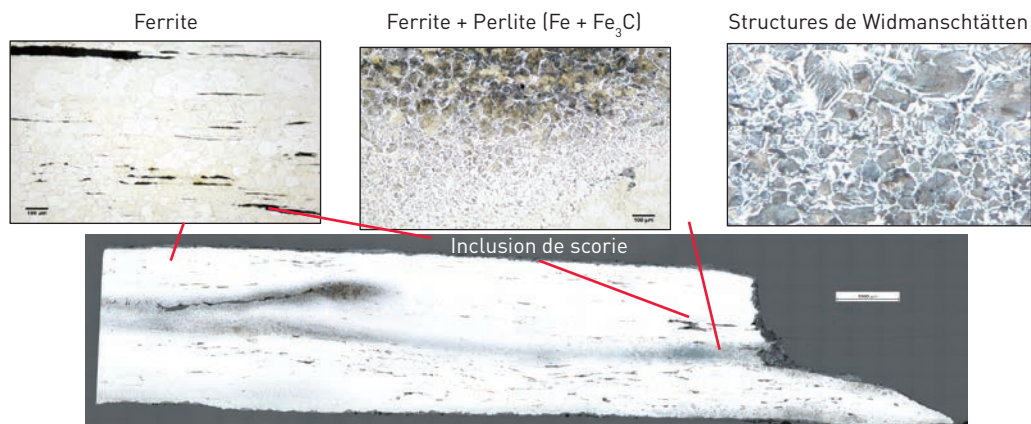


Figure 16

Micrographie d'une agrafe des tribunes du chœur de Notre-Dame après attaque au nital.

qu'ils ont recristallisé après la dernière forge. Les nombreux points noirs sont des inclusions²⁴ non métalliques ; ce sont les déchets – les scories – restés coincés dans cette matrice métallique jusqu'à aujourd'hui. Nous avons également en foncé une variété de zones hétérogènes : des mélanges de ferrite²⁵ et de perlite²⁶, voire juste de la perlite (un acier avec 0,8 % de carbone), un acier eutectoïde²⁷ qui prend la forme de bandes liées à l'allongement du matériau.

24. « Intégration au sein d'un composé hôte d'un composé de nature différente » [19].

25. « Oxyde polymétallique à base d'ions fer » [20].

26. Association de ferrite et de carbure de fer Fe_3C (cémentite).

27. En métallurgie, les diagrammes de phase font apparaître des transformations appelées eutectoïdes impliquant la transformation d'une phase solide (de métaux) en deux nouvelles phases solides distinctes. L'équation bilan associée est : $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$ [où α , β et γ désignent des phases solides distinctes de métaux].

Les agrafes ont des formes semblables à des barres de fer, simplement allongées et repliées. Certaines microstructures²⁸ traduisent des refroidissements rapides, probablement à l'air, à l'extérieur du fourneau. D'autres structures ne sont pas à l'équilibre, ce qui est très classique dans les fers anciens comme les fers de cathédrales. Notre-Dame est typique de bien d'autres monuments étudiés auparavant. Quelques pièces comme le clou de charpente de la **figure 17** montrent des structures beaucoup plus carburées ; la mise en forme de certains de ces clous était faite en roulant une feuille de fer sur elle-même.

Sur la **figure 18**, qui montre les surfaces et teneurs moyennes en carbone, nous notons la présence d'alliages ferreux qui sont véritablement des aciers avec plus de la moitié

28. « Structure d'un alliage étudiée par le procédé de la micrographie » [21].



Figure 17

Analyse métallographique d'un clou de la charpente de Notre-Dame.

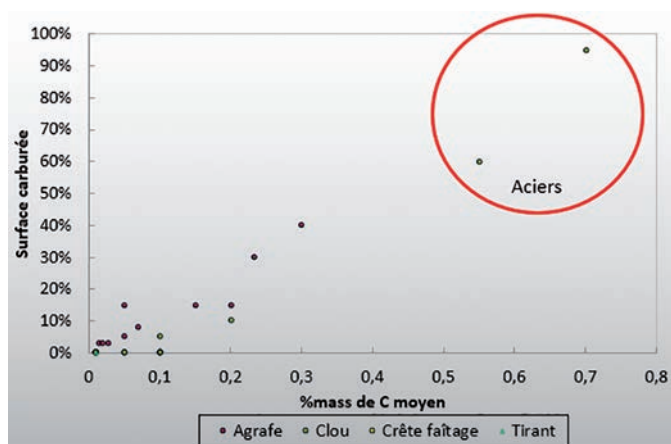


Figure 18

Surface carburée [en %] en fonction du pourcentage massique moyen de carbone présent dans divers matériaux : agrafe, clou, crête de faitage et tirant.

de leur surface carburée et des taux de carbone avoisinant 0,6-0,7 %. Cependant, la plupart des structures sont hétérogènes ou à dominante très fortement ferritique.

De tels tableaux sont assez classiques sur l'ensemble des cathédrales étudiées jusqu'alors. D'autres impu-

retés comme du phosphore peuvent aussi modifier le comportement mécanique de ces matériaux. La **figure 19** montre que beaucoup d'agrafes sont faites en soudant ensemble plusieurs pièces de fer ; les lignes de soudure apparaissent très bien dans le matériau et montrent que trois voire,

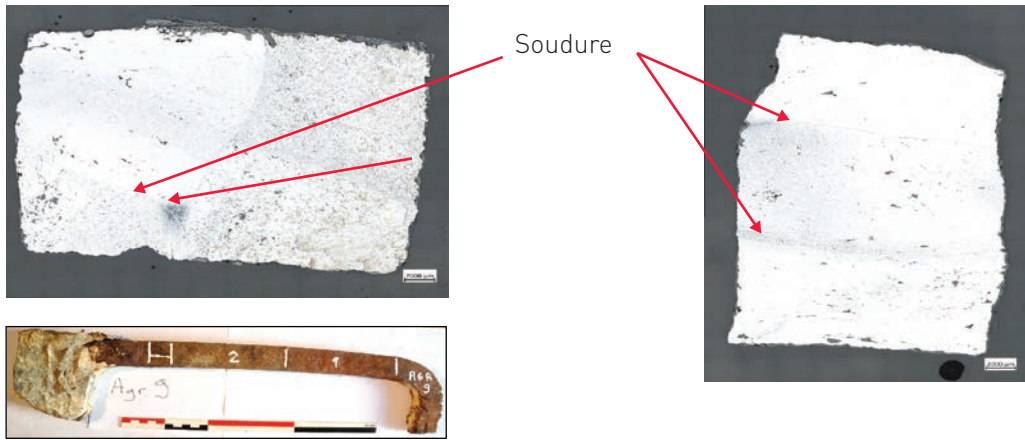


Figure 19

Analyse métallographique d'une agrafe. On distingue la présence de soudures utilisées par le procédé de fabrication.

quatre pièces, ont parfois été soudées les unes aux autres. Ceci pose question ; ces situations demeurent très rares pour les monuments précédemment étudiés. Première hypothèse : nous avons affaire à du recyclage car le fer ne se fondait pas à l'époque médiévale. En effet, la seule façon de le recycler à l'époque, c'est de le reforge, de le remélanger à la forge mais toujours sur un état solide puis de souder différentes pièces ensemble pour en former une plus grande. Deuxième hypothèse : ces petits modules de fer qui ont été soudés pour faire des agrafes sont liés aux contraintes de la production ou du marché.

C'est là où l'analyse chimique des impuretés, de taille micrométrique à millimétrique (figure 20), est précieuse. Elles proviennent d'éléments qui contiennent une partie de l'information chimique comme

la composition du minerai de fer, utilisé pour réaliser le matériau ; cette composition va se conserver au cours des transformations jusqu'à l'intérieur des matrices sous la forme d'inclusions incomplètement expurgées. Les impuretés constituent ainsi des capsules microscopiques d'informations ; l'analyse de leur composition peut permettre d'aborder de nombreuses questions comme celles développées dans le **chapitre 12**, consacré aux matériaux du patrimoine.

3.4. Composition chimique des inclusions

La micrographie des fers observés permet de distinguer plusieurs zones (figure 19) où l'on peut reconnaître les deux lignes de soudure superposées dans cette coupe transversale. Par une analyse de chaque inclusion au moyen

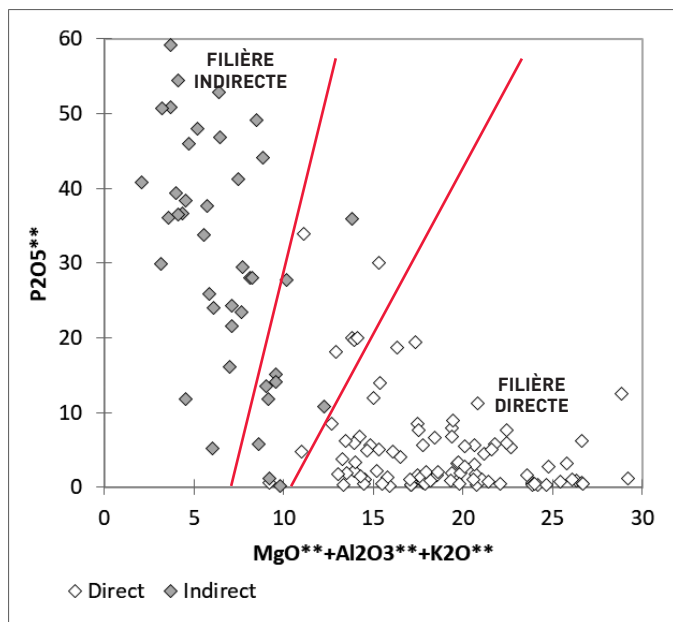


Figure 20

Répartition des inclusions en fonction de leur composition chimique permettant de déterminer la nature des filières opératoires de production (indirecte ou directe). D'après Ph. Dillmann, M. L'Héritier, "Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings : supply of materials and diffusion of smelting processes", *Journal of Archaeological Science*, 34, 2007, p. 1810-823.

d'un microscope électronique à balayage (MEB)²⁹ et en spectrométrie dispersive en énergie³⁰, nous pouvons déterminer les différences de composition. Par

29. « Technique d'observation de la topographie des surfaces. Son principe de fonctionnement est basé sur la détection d'électrons secondaires émergents de la surface sous l'impact d'un très fin pinceau d'électrons primaires qui balaye la surface observée » [22].

30. « Le spectromètre, défini comme un instrument spectral qui disperse dans l'espace la lumière émise par une source de radiation, qui isole une ou des bandes (ou fenêtres) spectrales spécifiques contenant les raies des analytes et qui mesure l'intensité des raies au moyen d'un ou plusieurs détecteurs » [23].

exemple, au niveau des lignes de soudures, il existe des inclusions qui correspondent aux ajouts qui ont été faits pour aider à ne pas oxyder³¹ ce fer au moment où l'on chauffe pour le souder. En outre, les inclusions de la partie centrale du fer sont faites d'un matériau de composition différente. La composition des inclusions dans la partie centrale est différente de celle de la partie haute et de la partie basse. Nous pouvons en déduire que nous sommes face à une soudure « en gueule-de-loup » : nous avons ouvert un morceau de fer pour en glisser un autre à l'intérieur et refermer le tout à la forge en chauffant.

L'étude met donc en évidence un procédé spécifique de mise en forme et que l'on retrouve sur la quasi-totalité des échantillons. Les inclusions nous livrent aussi des informations sur la nature des filières techniques employées pour réaliser le matériau [figure 20]. Que l'on passe par la fonte ou que l'on produise du fer directement, la nature des impuretés trouvées à l'intérieur du matériau sera différente. Elle provient quasiment directement du minerai et de la scorie dans le cadre de la filière directe en bas fourneaux alors qu'elle résulte plutôt des opérations de décarburation de la fonte dans le cadre de la filière indirecte. Un abaque³²

31. Réaction chimique qui fait intervenir un couple oxydant/réducteur (Ox/Red) et qui consiste en un échange d'électrons. L'équation chimique associée à la réduction s'écrit : $\text{Red} \rightarrow \text{Ox} + n\text{e}^-$.

32. « Système de courbes planes tracées dans un repère orthogonal, utilisé pour effectuer graphiquement des calculs algébriques » [24].

de référence a été produit au cours des vingt années d'études qui ont précédé les travaux sur Notre-Dame ; nous pouvons désormais l'utiliser pour placer la composition des inclusions de scorie. L'étude requiert la caractérisation d'une centaine à plusieurs milliers d'inclusions pour un objet, ou même pour une partie d'un objet comme on l'a vu précédemment.

Grâce à ces travaux, nous constatons que les agrafes sont toutes en fer de bas fourneau, donc réalisées par le procédé utilisé au Moyen Âge (XII^e, XIII^e et XIV^e siècles) tandis que les pièces du XIX^e siècle sont naturellement fabriquées avec des procédés plus modernes – essentiellement en passant par l'affinage de la fonte. Le corpus de clous se trouve majoritairement dans des fers de hauts fourneaux et d'affinerie ; vraisemblablement, nous avons ici affaire à des objets produits à partir de procédés qui n'existaient pas (ou pas majoritairement en tout cas) avant la fin du XV^e ou le XVI^e siècle.

Ces résultats sont à replacer dans un cadre de consolidation, de réparation des charpentes et à associer à l'étude menée par le groupe « Bois ». Quelques clous sont cependant issus de la filière directe – peut-être le signe que nous nous trouvons dans des schémas de réemploi, de recyclage.

3.5. Caractérisations chimiques des éléments rares afin de retracer les régions d'approvisionnement en fer de Notre-Dame

L'étude des inclusions et leur caractérisation chimique ne se limite aux éléments majeurs ;

elle s'intéresse aussi aux éléments traces, comme les terres rares³³. Elle fournit alors des renseignements d'une tout autre nature. Elle vise par exemple à retracer les différentes sources de minerais, les régions de production qui ont approvisionné le Chantier de Notre-Dame. Ces études sont en cours.

Comme pour les bois, nous disposons d'un référentiel chimique en cours de construction, alimenté en continu au fil des études des sites archéologiques. Ces derniers livrent des scories que l'on peut analyser et comparer au cas de Notre-Dame. Bien entendu, de nombreux travaux sont encore à entreprendre, notamment en région francilienne, afin d'essayer de comprendre d'où vient ce fer. L'une des déductions de ces premières analyses est que tous les fers ne viennent pas du même endroit. Si tel était le cas, nous aurions, **figure 21**, une droite. Or nous avons plusieurs droites et donc un grand nombre de sources différentes pour une petite dizaine d'agrafes. À peu de chose près, quasiment chaque agrafe semble ainsi avoir une origine différente ; nous voyons même que certaines agrafes ont plusieurs origines, ce qui confirme *a priori* la pratique du

33. « Les terres rares sont constituées du groupe des lanthanides (éléments 57 à 71 du tableau de Mendeleïev), auxquels sont habituellement ajoutés l'yttrium et le scandium. Elles forment une famille très homogène de 17 éléments aux propriétés chimiques extrêmement voisines (propriétés magnétiques, propriétés optiques, température de fusion et d'ébullition élevées) » [25].

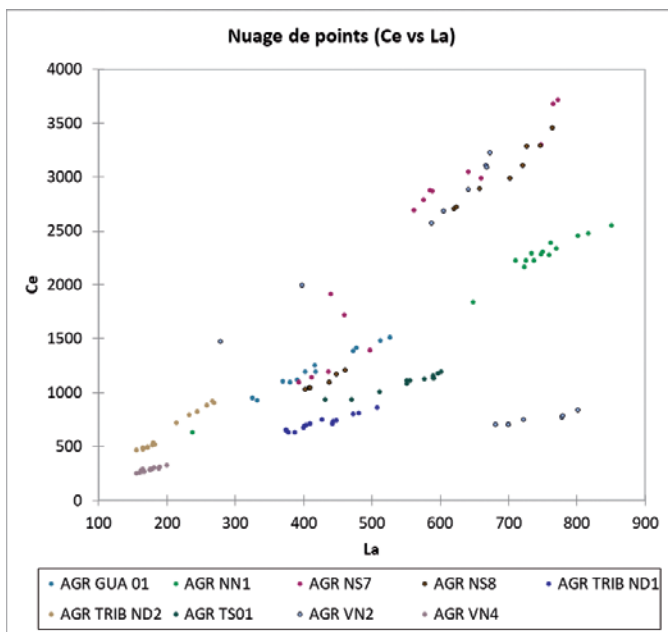


Figure 21

Répartition des inclusions en fonction de leur teneur (en ppm) en lanthane (La) et cérium (Ce) qui met en évidence différentes sources de minerai.
1 pt = 1 inclusion

recyclage évoquée plus haut ou du moins, l'existence de la pratique de l'assemblage de plusieurs matériaux d'origines vraiment distinctes.

3.6. Question du recyclage du fer

Recyclage ou pas ? Beaucoup de questions restent en suspens à ce sujet.

Est-ce que Notre-Dame a été construite avec 80 % de fer recyclé ou a-t-on plutôt approvisionné des barres forgées dans des centres, les fournisseurs des forgerons s'approvisionnant dans différentes régions. Paris est une place marchande majeure, peut-être la plus importante du royaume de France et nous pouvons

penser que du fer arrive de toutes parts et que le forgeron, par contrainte logistique plutôt que technique, assemble différentes pièces de fer pour forger son agrafe de 3 kg. Ce sont quelques exemples de questions que l'on espère pouvoir élucider en poursuivant le chantier de restauration.

3.7. Datation radiocarbone

Dernier point abordé, celui de la datation radiocarbone (cf. **chapitre 10**).

Il est en effet très stimulant d'apprendre à retrouver la date où le fer a été fabriqué et donc peut-être mis en œuvre dans l'édifice. Bien sûr, s'il s'agit de fer recyclé, c'est un peu compliqué. Toutefois, nous

souhaitons pouvoir mettre en regard une datation du matériau avec la datation supposée du bâti dans lequel il se trouve. Les matrices métalliques d'alliages ferreux et l'acier en particulier, contiennent du carbone et se prêtent bien aux techniques de datation radiocarbone. Après attaques par des réactifs, nous pouvons voir sur les micrographies d'échantillons, les zones aciérées et les zones ferritiques, contenant donc du carbone. Nous recueillons ce carbone localisé dans les carbures de fer³⁴, dans la perlite, pour le dater par une datation radiocarbone classique.

Plus précisément, nous faisons une attaque métallographique (figure 22), et nous prélevons le carbone au foret sur les bandes carburées. Le carbone est extrait sous forme gazeuse puis graphitisé et daté par datation radiocarbone par AMS³⁵

34. « Composé formé par la combinaison du carbone avec du fer » [26]. Un exemple de carbure de fer est la cémentite de formule chimique Fe_3C .

35. Spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) : technique de physique nucléaire [...] qui, appliquée au ^{14}C « permet de transformer les atomes de carbone de l'échantillon à dater en un faisceau d'ions mesurables en éliminant une grande partie des atomes ou molécules possédant la masse atomique 14. Appliquée à la datation pour le ^{14}C , cette technique permet de compter directement les atomes de ^{14}C sans attendre leurs désintégrations comme dans les méthodes classiques par comptage » [27]. La SMA couple ainsi la spectrométrie de masse à un accélérateur. La spectrométrie de masse est une technique permettant d'identifier et de détecter des fragments moléculaires par enregistrement de leur rapport masse/charge (rapport nommé m/z).

au laboratoire de mesure du radiocarbone (figure 23). Nous avons pu dater quelques pièces, quelques agrafes qui viennent des tribunes, d'autres qui viennent du haut des murs, quelques clous. Nous avons des précisions qui sont celles de datations radiocarbone avec un pallier relativement important sur le XII^e siècle.

En recalant les dates obtenues avec le début du chantier des tribunes (vers 1160) et le chantier des parties hautes (vers 1210), nous sommes en cohérence avec la construction de la charpente de la nef (1215, cf. chapitre 10). Les fers mesurés ont été produits au milieu du XII^e et au début du XIII^e siècle ; nous avons schématisé les

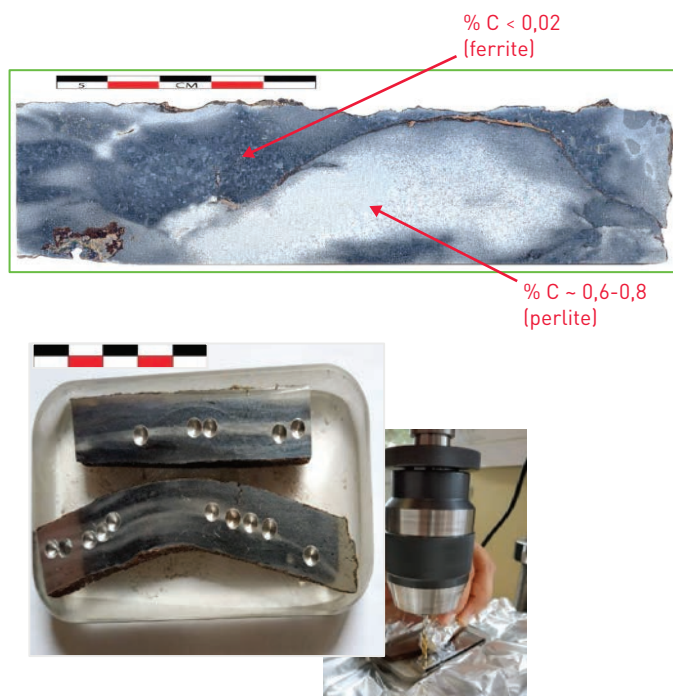


Figure 22

Prélèvement sur des échantillons attaqués par des réactifs pour datation radiocarbone sur les bandes carburées.

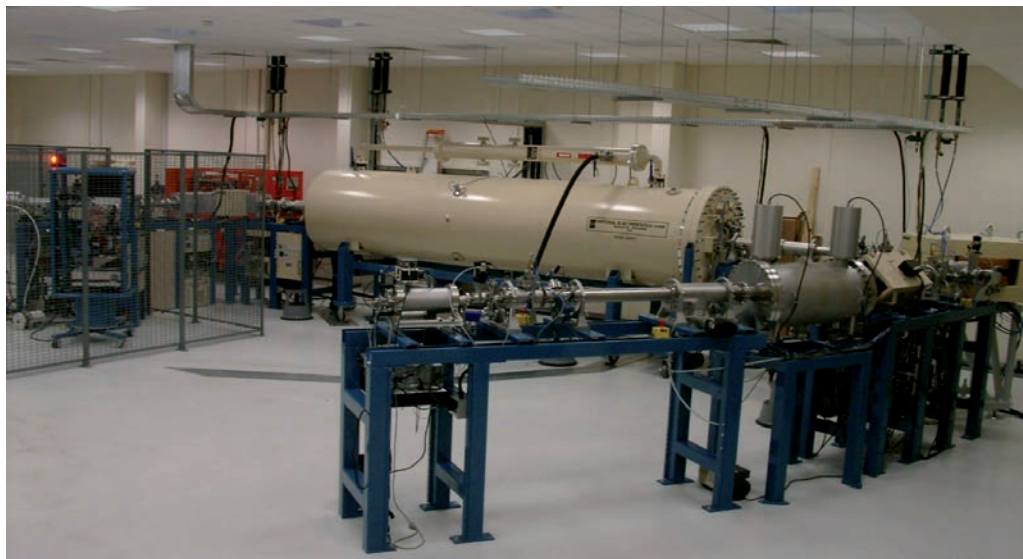


Figure 23

Spectromètre de masse par accélérateur ARTEMIS (Accélérateur pour la Recherche en Sciences de la Terre, Environnement, Muséologie Installé à Saclay).

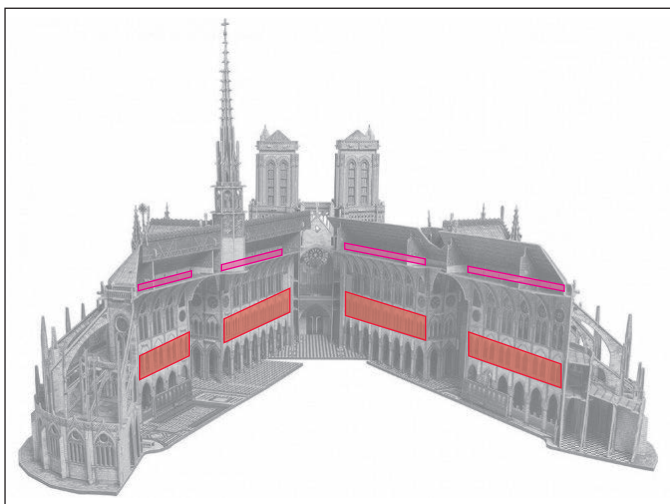


Figure 24

Localisation des deux étages sur lesquels se trouvent les agrafes analysées.

deux étages où ils se sont trouvés dans la structure de l'édifice (figure 24).

La datation peut en principe répondre à de nombreuses questions. Voici quelques pistes pour les années à venir :

– elle peut permettre d'arriver à une forme de modélisation des chantiers de construction. Il reste encore des écarts de l'ordre d'une cinquantaine d'années entre le chantier de la nef et la production des agrafes ; des

études complémentaires pourraient réduire les écarts ;

– les études disponibles sur les clous sont encore embryonnaires. En effet, nous n'avons daté que deux clous qui ne correspondent en fait à aucune période remarquable dans l'étude des charpentes. Leur installation correspond-elle à des phases de consolidation

jusqu'ici inconnues ou a-t-on affaire à des clous recyclés dont l'âge ne correspond pas à celui du bâti dans lequel ils sont mis en œuvre ?

Bien entendu, cette liste de pistes de recherches sur Notre-Dame, permise par les datations et à conduire dans un proche avenir, n'est pas limitative !

Conclusions et perspectives : quelques certitudes

La datation nous permet d'assurer de manière définitive l'intégration très précoce du métal dans l'architecture : Notre-Dame possédait des renforts en fer dès 1160. C'est quarante à cinquante ans avant la cathédrale de Chartres ou la cathédrale de Bourges – les premières églises gothiques que l'on savait jusqu'alors bardées de fer. Il y a ici un lien probable avec l'ampleur du chantier de Notre-Dame, sa hauteur sous voûte, la hauteur de ses premières arcades et nous pourrions dire que les architectes ont répondu à ces défis techniques en intégrant le métal dans la construction.

Avec encore beaucoup de questions ouvertes

- sur la qualité et les défauts des pièces utilisées à Notre-Dame de Paris qui ne diffèrent pas des autres cathédrales, ce qui interroge sur la question des réparations et des consolidations de l'édifice ;
- sur l'approvisionnement en matériaux ;
- sur le recyclage des matériaux ;
- sur l'environnement parisien au Moyen Âge qui semble suffisamment riche pour drainer du métal venu de partout.

Bibliographie

- [1] Ferauge, M., & Mignerey, P. (1996). « L'utilisation du fer dans l'architecture gothique : l'exemple de la cathédrale de Bourges ». *Bulletin Monumental*, 154 (2), 129-148. <https://doi.org/10.3406/bulmo.1996.4550>
- [2] Définition : *Chaînage* - *Dictionnaire de français Larousse*. (s. d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cha%C3%AEnage/14437>
- [3] Définition : *Liant*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/liant>
- [4] Définition : *Monolithe*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/monolithe>
- [5] Définition : *Crête*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/crete>
- [6] Définition : *Faitage*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/faitage>
- [7] Skoog, D. A., West, D. M., Holler, J. F., & Crouch, S. R. (2013). *Fundamentals of Analytical Chemistry* (9^e éd.). Cengage Learning.
- [8] [2013]. « Les méthodes usuelles d'analyse des œuvres d'art ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [9] Astier, J. (2011). « Minerais et fondants ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [10] « Tout savoir sur l'oxyde ». *Techniques de l'ingénieur* (s. d.). <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/oxyde>
- [11] Définition : *Scorie*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/scorie>
- [12] Définition : *Fonte*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/fonte>
- [13] Guiraldenq, P. (1994). « Diffusion dans les métaux ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [14] Définition : *Alliage*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/fonte>
- [15] Masson, J.-M. (2007). « Élaboration de l'acier moulé - Analyse des processus métallurgiques ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [16] Définition : *Métallographie*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/metallographie>
- [17] Pokorny, J. A. (1994). « Métallographie ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [18] Roblin, G. (1999). « Microscopie optique ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [19] « Tout savoir sur l'inclusion ». *Techniques de l'ingénieur* (s. d.). <https://www-techniques-ingenieur-fr.portail.psl.eu/glossaire/inclusion>
- [20] Beuzelin, P. (1987). « Ferrites doux ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [21] Définition : *Microstructure*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/microstructure>
- [22] Ruste, J. (2013). « Microscopie électronique à balayage - Principe et équipement ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [23] Mermet, J.-M. (2002). « Systèmes dispersifs en spectrométrie atomique ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [24] Définition : *Abaque* - *Dictionnaire de français Larousse*. (s. d.). <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/abaque/32>
- [25] Lévêque, A., Maestro, P., (1993). « Terres rares ». *Techniques de l'ingénieur*.
- [26] Définition : *Carbure*. (s. d.). <https://www.cnrtl.fr/definition/academie8/carbure>
- [27] *Radioactivité* : *Spectrométrie SMA*. (s. d.). https://www.laradioactivite.com/site/pages/Spectrometrie_SMA.htm

Matériaux du patrimoine, compréhension du passé, prévision du futur : quelques exemples

Directeur de recherche au CNRS, spécialiste de l'étude des métaux anciens par des méthodes physico-chimiques.

Ses recherches portent notamment sur la conservation des objets du patrimoine métallique. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2020. Philippe Dillmann est co-coordonnateur du chantier scientifique CNRS/ministère de la Culture Notre-Dame et membre du conseil scientifique de l'Établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Le chantier scientifique de Notre-Dame a profité d'une compétence préexistante de la recherche en science des matériaux ainsi qu'en science du patrimoine. Ceci a permis d'aborder les questions posées par le bâtiment sinistré avec des méthodologies et des programmes de recherche déjà bien consolidés. Évidemment,

ceux-ci ont évolué au cours de cet extraordinaire chantier et pour reprendre l'expression de Pascal Prunet, c'est bien un travail de science *par* et *pour* Notre-Dame qui est réalisé. Ce chapitre traite des matériaux du patrimoine en général : compréhension du passé et prévision du futur (*figure 1*). La tâche n'est pas facile, l'objectif ambitieux...



Figure 1

Présentation du chapitre.

1 Considérations générales

1.1. Étude des matériaux du patrimoine : une démarche spécifique

Le patrimoine peut être culturel mais aussi naturel – dans ce dernier cas, il est constitué de paysages, de sédiments, de roches rares. Il peut être « tangible » (le patrimoine matériel) – c'est ce qui va concerner le présent chapitre – mais également intangible (danses traditionnelles, plats culturels, ...). On réduit ainsi ici la définition du patrimoine à l'aspect matériel et au domaine « matériaux » qui, selon l'acception du *Trésor de la langue française*, établi par les linguistes du CNRS désigne : « un type de matière qui entre dans la construction d'un objet fabriqué » (figure 2).

La question des contours du domaine est toujours d'actualité ; par exemple, pour la région Île-de-France, au sein du programme DIM (Domaine d'Intérêt Majeur), « Matériau

du patrimoine », s'est initialement posée la question, résolue par l'affirmative, d'intégrer en plus des matériaux naturels du patrimoine naturel, d'autres types de matériaux, comme les ossements, les restes végétaux et alimentaires, les fossiles. Ce chapitre ne traitera pas de ces derniers qui font par ailleurs l'objet d'une recherche très dynamique.

Même en procédant aux restrictions mentionnées, il reste une très grande variété de matériaux, inorganique, organique, ou matériaux mixtes. Le domaine est aujourd'hui pluridisciplinaire, même si l'on se cantonne à la chimie, entre les approches sur les bois, les papiers ou les métaux, les obsidiennes, les plâtres, les briques, etc. Ici, il sera également question des déchets d'élaboration et de mise en forme que les archéologues trouvent sur les sites de production et qui apportent des informations précieuses sur divers aspects que nous présenterons par la suite.

La recherche sur les matériaux ainsi circonscrits peut se décliner en fonction de la date de leur réalisation (*figure 3*), depuis la nature du matériau qui a été utilisé et fabriqué à

partir de matières premières. Il y a des processus physico- et thermo-chimiques de transformation de la matière première à bien cerner (réduction des minerais par exemple).

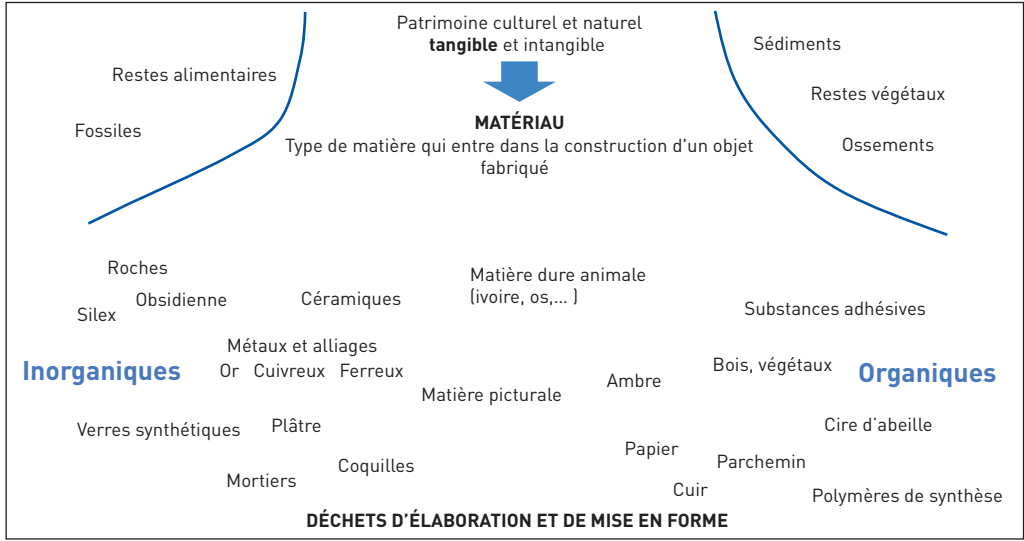


Figure 2

Types de matériaux.

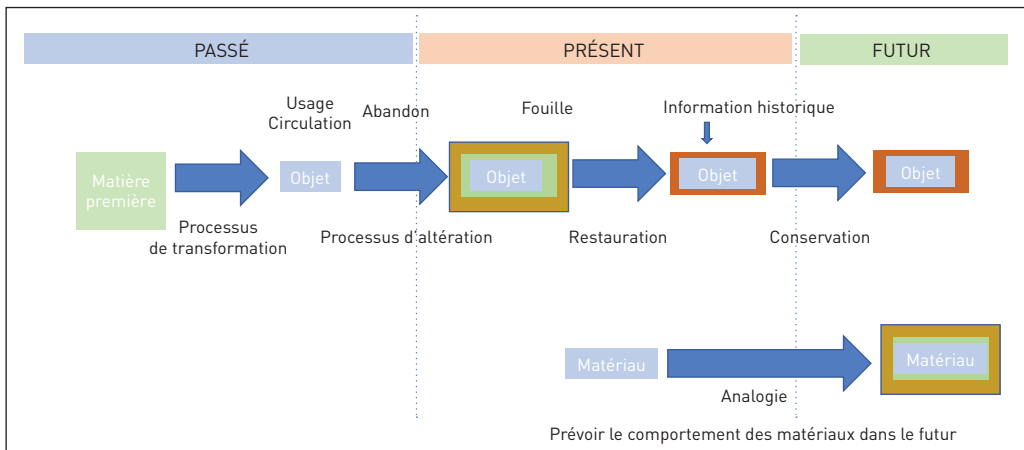


Figure 3

Axe des temps de la vie d'un matériau.

Le matériau ou l'objet qui en est issu a été en usage, a circulé : il a donc une valeur, une qualité, qu'il est possible d'étudier. Il a été échangé sur des circuits commerciaux : toutes les problématiques qui **traitent du passé peuvent être restituées**. De plus, l'objet a été abandonné ou, à l'instar des monuments, est parvenu jusqu'à notre époque après diverses vicissitudes, subissant des processus d'altération. Si bien qu'en nous parvenant (**le présent**), il est un système modifié avec des produits d'altération dans lequel on peut essayer de retrouver une information historique, notamment par le canal de la chimie. La compréhension des processus d'altération permet d'effectuer des diagnostics et de mettre au point des traitements de restauration, voire de conservation. **Cela concerne évidemment le futur**. On balaye ainsi l'ensemble de l'axe temporel.

Il nous faut citer ici une autre application de l'étude des matériaux anciens, et plus particulièrement des matériaux archéologiques qui est d'aider par analogie à prévoir l'évolution de matériaux actuels pour les siècles à venir. C'est le cas des études développées notamment par le CEA, le CNRS et l'ANDRA (l'Agence Nationale de gestion des Déchets Radioactifs), pour concevoir la multi-barrière qui doit séparer de la biosphère les déchets vitrifiés issus de l'énergie nucléaire. Cette multi-barrière est composée de verre [les déchets sont vitrifiés], d'acier-inox, d'acier et l'ensemble est stocké dans des galeries constituées de divers matériaux, elles-mêmes au contact

d'argile ou de différents autres environnements. Dans ces démarches complexes, qui font intervenir à la fois la simulation, les expériences de court terme en laboratoire et celles sur site (site expérimental CIGEO notamment) sont intégrées des démarches sur les objets archéologiques, dont on essaie de comprendre les processus d'altération et de tirer des paramètres physico-chimiques comme la porosité, le transport, la réactivité, qui seront potentiellement, eux aussi, réinjectés dans les modèles et dans les processus prédictifs.

Les informations premières (**figure 4**) glanées sur ces matériaux sont généralement liées à leur âge. C'est l'application qui vient tout de suite à l'esprit des non-spécialistes : on peut dater la période de fabrication, d'usage ou d'abandon, notamment avec des techniques isotopiques (carbone 14), la dendrochronologie, etc. À l'occasion, en utilisant les mesures isotopiques, il est possible de collecter des informations de type exogène : Alexa Dufraisse (cf. **chapitre 10**) cite les études permettant de rassembler de nombreuses données sur le climat ancien (l'optimum climatique médiéval par exemple) ; il est aussi possible d'amasser beaucoup d'indications à partir d'un matériau comme l'ivoire qui, provenant de défenses, éclaire sur le régime alimentaire. Des informations économiques et d'histoire des techniques peuvent également être collectées : quelles étaient les matières premières utilisées ? Quelle est la nature de ces matériaux ? Leur qualité ? Quels étaient les procédés de

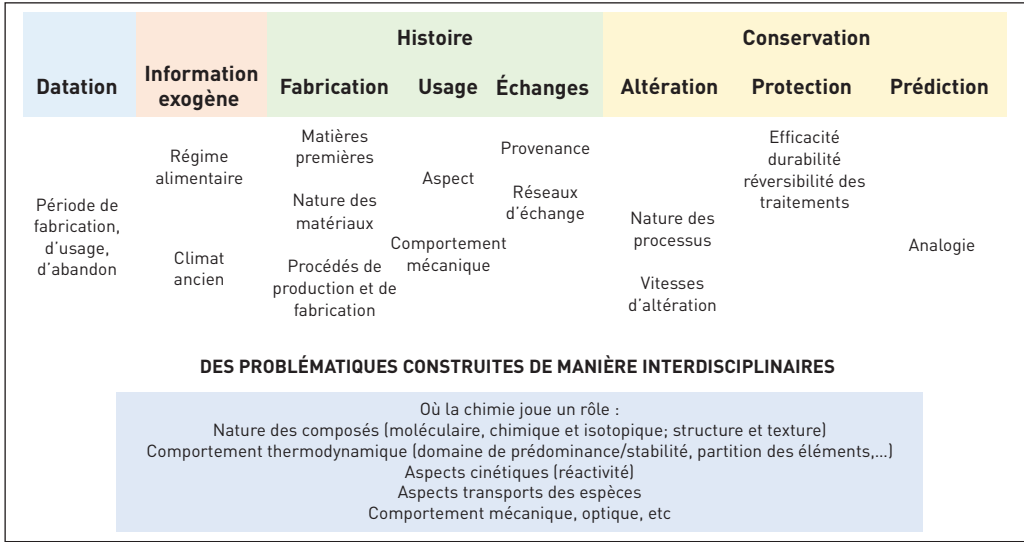


Figure 4

Informations fournies par les matériaux du patrimoine.

fabrication et quelle maîtrise en avait-on ? Quels étaient les usages, l'aspect, le comportement mécanique ? Comment étaient-ils échangés ? Et enfin, des questions liées à la conservation, l'altération en elles-mêmes : quelles étaient la nature des processus, les vitesses d'altération et quel traitement de protection peut-on mettre en œuvre ?

Aujourd'hui, ces études sont souvent co-construites, faisant appel à de nombreuses disciplines : histoire, chimie, archéologie, géologie. Ainsi, certains laboratoires du CNRS ou du ministère de la Culture, sont-ils totalement interdisciplinaires et donnent l'exemple de la construction de problématiques historiques (entre archéologues et physico-chimistes) ou de conservation (entre restaurateurs, conservateurs, scientifiques de la conservation et chimistes).

Dans toutes ces études, bien évidemment, la chimie est partout, jouant un rôle fondamental, notamment par l'identification de la nature des constituants, que les investigations soient de nature moléculaire, structurale, texturale ou isotopique, ou portant sur des questions liées au comportement thermodynamique ou cinétique. Avec la longue durée, les aspects dimensionnants de la thermodynamique prennent une importance majeure (avec des questions de domaines de prédominance, de stabilité, de partition des éléments dans des processus hautes températures, etc.). Par ailleurs, les aspects de réactivité, de cinétique, de transport, et également de comportements (qui sont plus physiques), de mécanique ou d'optique, peuvent entrer en jeu.

Au-delà de ces questionnements, lorsque l'on fait de la

chimie ou des sciences sur les matériaux du patrimoine, il convient de bien considérer la chaîne analytique (figure 5), les objets et les échantillons étant de grande valeur. Des questions pratiques et très concrètes, se posent alors : l'objet est-il déplaçable en laboratoire ? Le prélèvement est-il possible ou faut-il faire appel à l'instrumentation portable ? Les expériences sur les matériaux du patrimoine ont généré une dynamique spectaculaire dans le développement de l'instrumentation portable. Et si l'on peut prélever, où prélever ? Quelle est la taille du prélèvement ? Il est possible d'effectuer de la radiographie, de la tomographie avant de prélever, pour localiser les zones d'intérêt. Ensuite, l'analyse est-elle destructive ? Elle est d'abord invasive, puisqu'elle s'appuie sur un prélèvement de matière, puis destructive si l'analyse nécessite de détruire l'échantillon,

en le dissolvant par exemple. Parfois, l'échantillon devient lui-même un objet du patrimoine et sera référencé dans une « matériauthèque » pour servir aux études des générations futures de chercheurs. Dans tous les cas, il convient de référencer et stocker les données constituant **ce que les chercheurs appellent dorénavant un objet « augmenté »**.

Livio De Luca a créé un « double numérique » de Notre-Dame de Paris destiné à stocker l'ensemble des données - données spatiales (scans 3D) mais également données analytiques sur les matériaux. Leur sauvegarde, leur gestion, leur interopérabilité constituent aujourd'hui un point majeur de la recherche, traité notamment par l'ÉquipESPADON qui est composée d'un certain nombre de laboratoires du domaine. On distingue la dualité : objet unique (la Joconde, sur laquelle on ne va pas faire de l'analyse destructive), et la

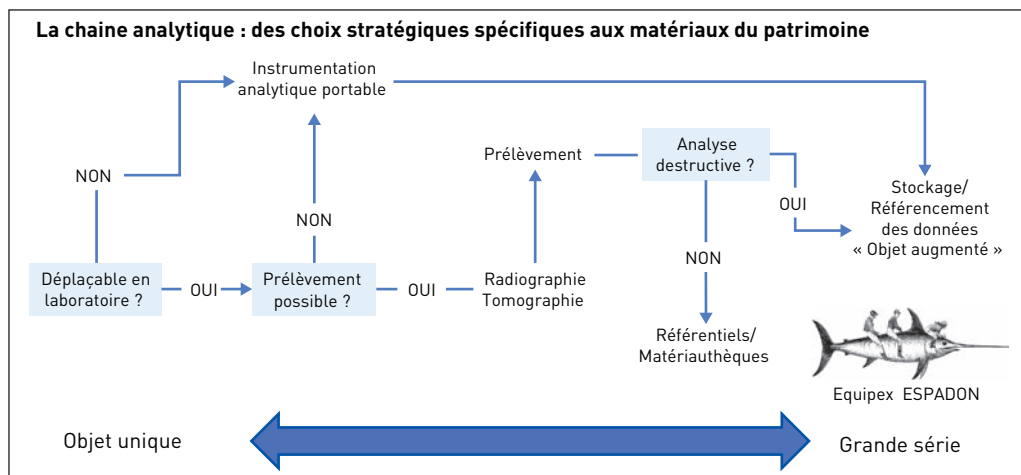


Figure 5

La chaîne analytique des matériaux du patrimoine.

nécessaire grande série pour donner une valeur statistique à certains résultats, plus particulièrement pour toutes les approches archéologiques. Pour la signature isotopique des plombs de Notre-Dame par exemple, si une grande série d'analyses n'avait pas été menée, la valeur des résultats serait fortement diminuée. Autre exemple : avec des accumulations de tessons, il est possible d'appliquer une approche de grande série avec des problèmes de chimie analytique spécifiques qui permettent de traiter des informations avec des méthodes statistiques.

1.2. Les méthodes actuelles

Ces dernières années, l'instrumentation portable s'est considérablement développée

(figure 6) et ouvre un champ d'application des méthodes d'analyse. La collection « Sciences archéologiques » a récemment produit un ouvrage sur l'utilisation de cette instrumentation portable en archéométrie et en sciences du patrimoine (en *open access* sur le site de la collection).

L'objet représenté sur la (figure 7) est un clou archéologique du XVI^e siècle recouvert de ses produits de corrosion. Il permet d'illustrer ces nouvelles possibilités de l'analyse des matériaux. Sa coupe transversale le montre constitué de son métal hétérogène à l'échelle de la centaine de micromètres. Puis, aux dimensions plus fines, des produits de corrosion apparaissent dont les constituants ont différentes propriétés qu'il faut étudier jusqu'à l'échelle nanométrique

Les développements récents de l'instrumentation portable

Raman © MONARIS

Fluorescence X

Imagerie Hyperspectrale

Fluorescence UV

Diffraction des Rayons X

LIBS

Spectroscopies vibrationnelles

Éditions des archives contemporaines / collection sciences archéologiques

Figure 6

L'instrumentation portable.

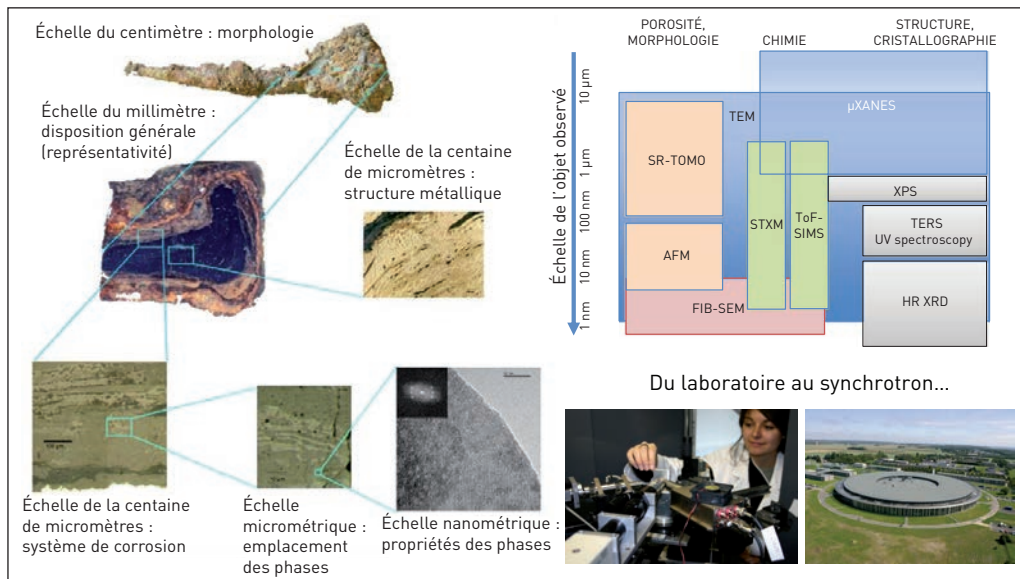


Figure 7

Diversité des méthodes et des échelles d'analyse à travers l'exemple du clou.

pour comprendre le comportement macroscopique. Cette importance du microscopique pour comprendre le macroscopique s'applique à ce clou comme à un très grand nombre d'objets, de matériaux du patrimoine, souvent fortement hétérogènes du fait des processus d'élaboration. Un grand nombre de méthodes sont utilisées à l'heure actuelle de la tomographie à l'usage du rayonnement synchrotron pour l'étude multi-échelles des éléments dimensionnants. Avant de présenter quelques exemples, quelques mots sur la **dialectique scientifique spécifique (figure 8) que génèrent les études sur les objets du patrimoine**, uniques par le fait qu'ils nous sont parvenus après avoir traversé divers aléas. Nous ne sommes pas ici

dans le cas décrit par Marcelin Berthelot où le chimiste synthétise le système qu'il va étudier. Nous avons des systèmes nouveaux pour nous qu'il nous faut comprendre. Malgré tout, en tant que scientifiques, nous avons besoin d'établir une dialectique « question-réponse » avec des hypothèses et des modèles.

C'est là qu'intervient la **restitution au laboratoire**, étape déterminante où l'on va reconstituer les matériaux, les faire vieillir artificiellement, instrumenter leur fabrication. Ce travail peut aussi être réalisé par les archéologues par ce que l'on appelle l'expérimentation archéologique, où les hypothèses suggérées par les observations physico-chimiques sur le matériau peuvent être testées par

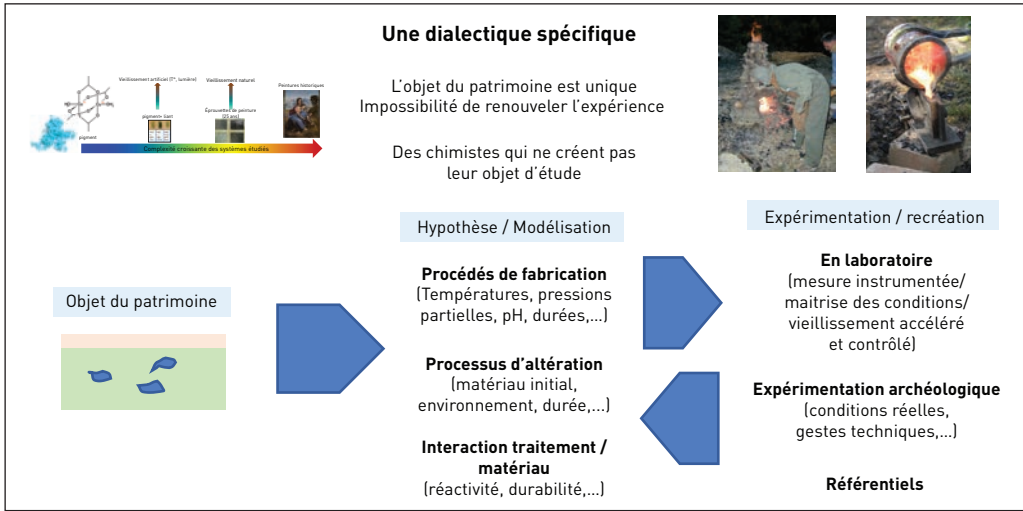


Figure 8

La dialectique scientifique spécifique aux matériaux du patrimoine.

l'expérimentation archéologique (la réanalyse de l'objet et l'émission de nouvelles hypothèses si nécessaire).

Après ces considérations générales, passons maintenant en revue trois axes de recherche illustratifs : 1) la compréhension des procédés ; 2) l'origine des matériaux utilisés ; 3) la conservation des matériaux.

2 Comprendre les procédés anciens

2.1. Identifier les matières premières utilisées

La **compréhension des procédés** peut être abordée par l'identification de l'usage de certaines matières premières. Martine Regert au CEPAM (figure 9), s'intéresse par exemple aux adhésifs de la Préhistoire. À l'aide de la chromatographie en phase

gazeuse, elle a mis en évidence l'utilisation d'un traitement adhésif utilisant du brai de bouleau, un goudron végétal fabriqué par traitement thermique. Pour éviter que l'écorce de bouleau ne se décompose, il lui a fallu se situer entre 350 et 400 degrés. Sans l'approche chimique, il aurait été impossible d'identifier ces adhésifs.

2.2. Comprendre les techniques de fabrication

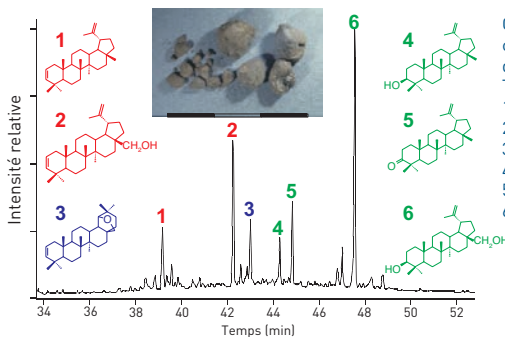
Un deuxième exemple concerne les techniques de fabrication ; elles concernent la période antique avec les poteries sigillées romaines (figure 10) qui sont étudiées par l'équipe de Philippe Sciau au CEMES. Ces objets sont extrêmement répandus dans l'Empire romain du premier siècle avant J.-C. au VII^e siècle après J.-C. Leur couleur ocre caractéristique est due, au

Détecter les adhésifs de la Préhistoire : identification moléculaire



- Innovation du Paléolithique moyen (~45000)
- Conservés dans de rares cas (milieux chauds et secs - Égypte, lacustres ou gelés)
- Les techniques chromatographiques et de spectrométrie de masse permet de les identifier

Chromatogramme de brai de bouleau (goudron végétal fabriqué par traitement thermique contrôlé (< 400 °C) d'écorce de bouleau)



Cortège moléculaire caractéristique du brai de bouleau.
 Triterpènes pentacycliques :
 1 - C₃₀H₄₈
 2 - lupen-2,20(29)-dien-28-ol
 3 - allobétul-2-ène
 4 - lupéol
 5 - lupénone
 6 - bétuline

Vert : écorce de bouleau ; Rouge traitement thermique anthropique (1 = déshydratation de 4 et 2 = déshydratation de 6) ; Bleu : marqueur dégradation naturelle post-dépositionnelle.

Rageot et al, JAS, 2021

Figure 9

Travaux concernant les adhésifs de la Préhistoire.

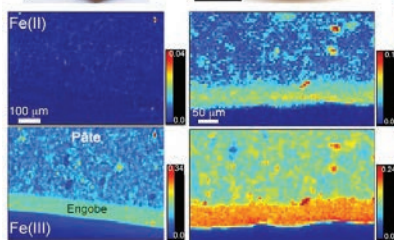
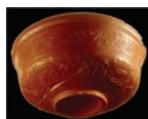
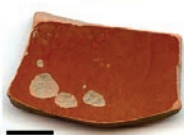
Les techniques de fabrication des poteries sigillées romaines

Cuisson en atmosphère oxydante (évacuation des fumées) : fer à la valence III

Vaisselle à l'aspect ocre brillant produite massivement du 1^{er} s. av. JC au 7^e s. ap. J.-C. (Europe, Afrique, Proche-orient)

a) La Graufesenque

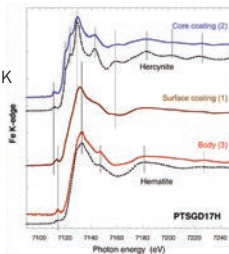
b) Arezzo



Des atmosphère plus ou moins oxydantes

Spectroscopie XANES au seuil K du fer

Absorption des rayons X et µXRD



Utilisation du rayonnement synchrotron - focalisé (forte brillance) - réglable en énergie

CEMES Sciau et al. AAS 2020

Figure 10

Travaux de Philippe Sciau concernant la fabrication des poteries sigillées romaines.

niveau de l'engobe (la surface de la céramique), à la présence de fer à la valence III. Philippe Sciau a pu comparer les techniques d'engobe sur des tessons de différents ateliers grâce aux rayons X.

Ces derniers, produits par les anneaux synchrotron et par ce qu'ils peuvent être accordés en longueur d'onde, permettent de balayer le seuil d'absorption d'un élément donné ; ils peuvent également être

focalisés sur de très petites surfaces, constituant ainsi une sonde chimique locale d'un atome. Pour étudier l'absorption, il faut s'intéresser aux interférences de part et d'autre de ce seuil ; ceci livre des informations sur l'environnement atomique ou le degré d'oxydation. Ces cartographies (là encore, on utilise un microfaisceau) montrent que certains ateliers maîtrisaient parfaitement l'évacuation des fumées (qui était plutôt en atmosphère réductrice) pour tout de suite arriver en atmosphère oxydante et produire un engobe uniquement composé de phases type fer III (type maghémite, hématite) et quelques fois de phases d'épsilon Fe_2O_3 , plus rares et spécifiques. Dans d'autres ateliers, comme à Arrezzo ou dans le sud de la France, une part non négligeable d'espèces contient

encore du fer II, témoignant d'une moins bonne maîtrise du processus.

Quelques travaux de Philippe Walter (*figure 11*) viennent illustrer un autre exemple lié à la **compréhension d'un savoir-faire** en technique picturale et ce, avec deux tableaux de la période italienne de Nicolas Poussin. Les sources écrites proposaient que Nicolas Poussin ait suivi une technique spécifique dite « *Aguzzo* », se servant d'un liant de colle et d'œuf. Les équipes de Philippe Walter ont utilisé le TOF-SIMS, donc la spectrométrie de masse qui permet de différencier les molécules par leurs masses. Elles ont montré que sur la couche de peinture, outre les pigments présents, ni colle ni œuf, des protéines donc, n'avaient pu être détectées. Grâce à une procédure spécifique qui a tenu compte

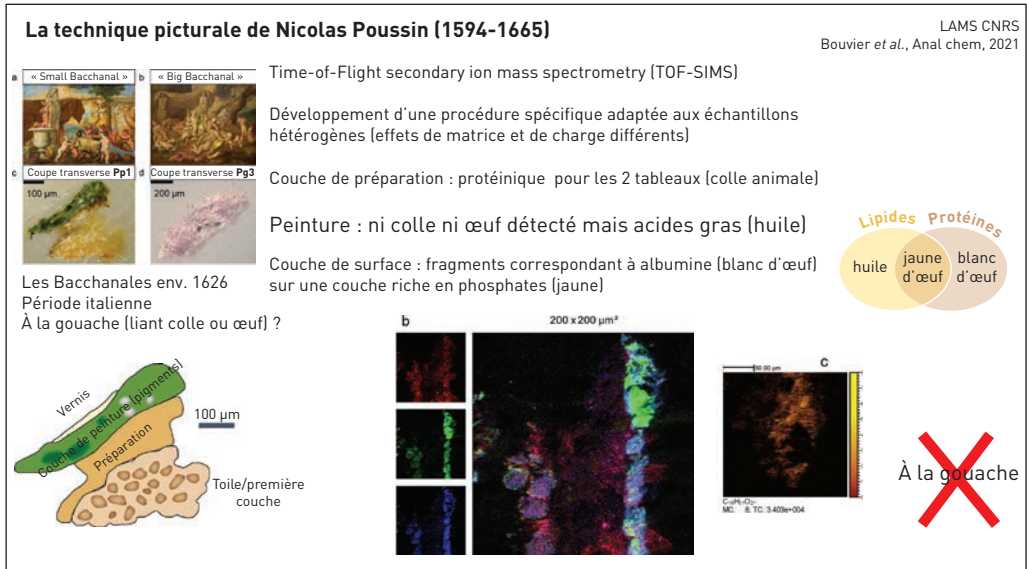


Figure 11

Travaux de Philippe Walter concernant les peintures de Nicolas Poussin.

des effets de matrice et des effets de charge – différents en fonction des matériaux constitutifs du micro-prélèvement – il a été possible de mettre en évidence l'utilisation de lipides caractéristiques de la peinture à l'huile, alors même que l'hypothèse éliminait l'usage de cette technique spécifique. Ces exemples montrent comment la chimie, intégrée à un raisonnement pluridisciplinaire, permet de répondre de manière quasi certaine à des questions sur les procédés de fabrication.

3 La circulation des matériaux

3.1. Principe de la circulation des matériaux

La circulation des matériaux est le deuxième grand point de ce chapitre. Les questions sont toujours les mêmes, quels que soient les matériaux, mais la façon d'y répondre diffère : il existe des zones de production, des zones de consommation

à l'autre bout de la chaîne et parfois des zones de transformation intermédiaires où vont être assemblés les produits de deux zones de production différentes.

La méthode générale consiste à identifier **une signature de la zone de production**, qu'elle soit chimique, isotopique ou moléculaire, et d'essayer de la retrouver, en comprenant les processus de fabrication, dans l'objet trouvé sur les sites de consommation (*figure 12*).

3.2. Identifier la provenance et la dynamique de circulation des matériaux

Il est possible de déterminer cette signature de manière assez élémentaire. Ainsi, les travaux de l'équipe de Ina Reiche au C2RMF (*figure 13*), se sont-ils intéressés à l'ivoire utilisé par les Aurignaciens, à la Préhistoire. Cet ivoire est issu de défenses de mam-mouths dont le régime alimentaire, comme cela a été démontré par des études faites

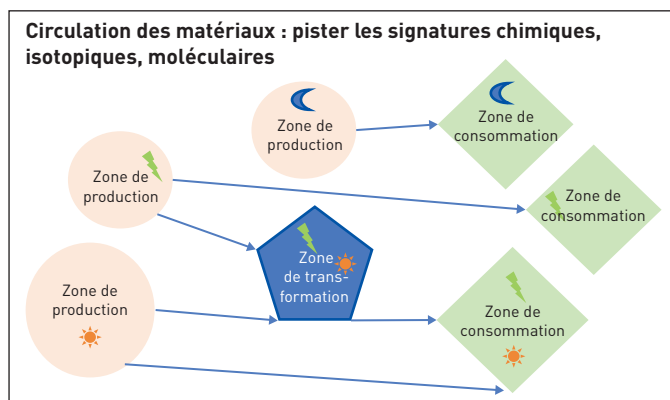


Figure 12

Schéma des zones mises en jeu dans la circulation des matériaux et de leurs signatures spécifiques.

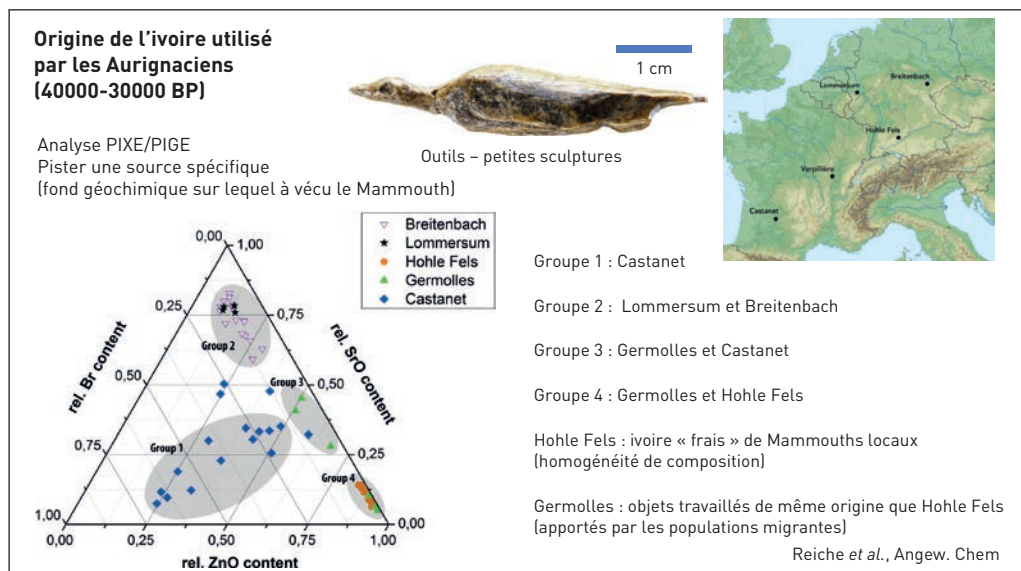


Figure 13

Travaux relatifs à l'ivoire utilisé par les Aurignaciens.

sur des éléphants contemporains, influence la composition chimique. De petites sculptures ou des petits outils de cette époque, ont été retrouvés sur les sites préhistoriques. Les chercheurs ont pu identifier différentes compositions parmi ces objets et notamment montrer que des ensembles différents, sur des sites distants de quelques centaines de kilomètres, partageaient des ivoires de même provenance ; de quoi réfléchir sur les réseaux d'échanges à cette époque.

Une autre étude a utilisé la spectrométrie Raman. Conduite au laboratoire MONARIS, elle est menée par l'équipe de Ludovic Bellot-Gurlet, en collaboration avec Alain Queffelec de l'université de Bordeaux. Elle s'intéresse à l'industrie lapidaire

des petits matériaux lithiques, caractéristiques de la culture saladoïde ; de tels objets ont été retrouvés sur des sites de consommation dans les Antilles. La **figure 14** montre des résultats de spectrométrie Raman collectés dans les musées locaux à l'aide d'un instrument portable. À travers la signature vibrationnelle Raman, les différentes roches ont pu être identifiées ; pour certaines - ici la néphrite -, les sources les plus proches se situent à au moins 1000 km, preuve que pour cette culture, dans son contexte géographique et temporel, les échanges se faisaient à grande distance.

La provenance des alliages ferreux a été abordée dans le **chapitre 11**. Le travail schématisé sur la **figure 15** commence par la compréhension

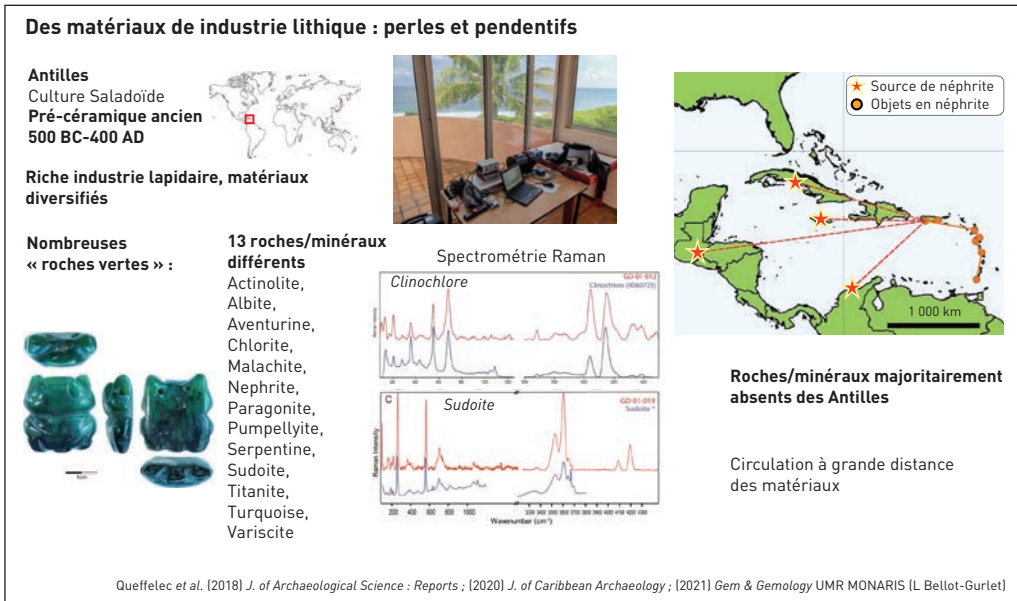


Figure 14

Travaux de Ludovic Bellot-Gurlet et Alain Queffelec relatifs aux matériaux de l'industrie lithique.

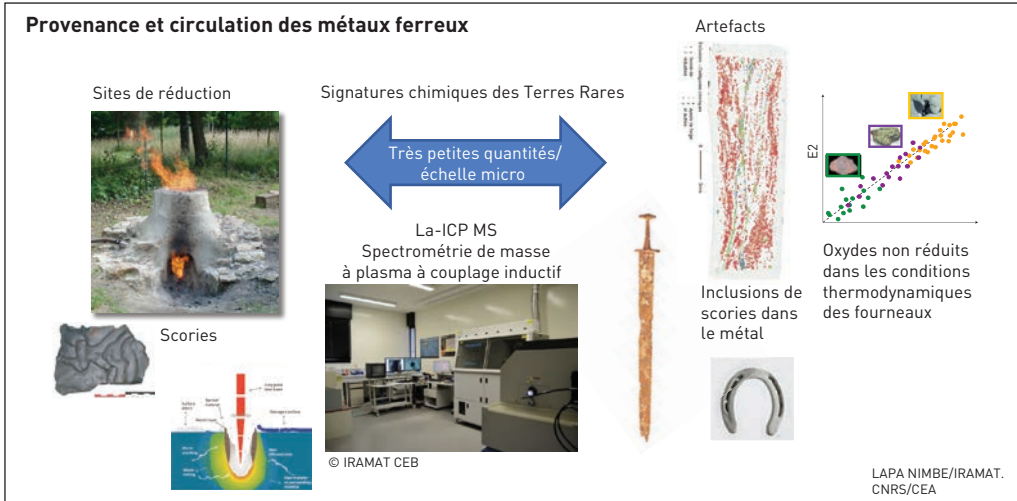


Figure 15

Travaux relatifs à la provenance et la circulation des métaux ferreux.

des conditions thermodynamiques qui régnaient dans le bas fourneau. Cela permet de pister la signature chimique en éléments traces, notamment des terres rares présentes en très petites quantités dans les déchets de production trouvés sur les sites archéologiques, les scories, et dont certains fragments sont restés piégés dans le matériau final sous forme d'inclusions dans l'objet. La spectrométrie de

masse par ablation laser avec plasma à couplage inductif offre la possibilité d'analyser des inclusions de quelque 50 micromètres ; des inclusions de taille bien plus petite ont aussi été caractérisées dans le matériau.

C'est notamment le cas sur les armures de la fin de la Renaissance (**figure 16**, travaux d'Émilie Berard, JAAS, 2021). Ces dernières étaient réalisées dans différents centres de production (dont un centre milanais) et le métal qui les constitue contient des inclusions qui, cette fois-ci, font quelques micromètres. Dans ce cas, en collaboration avec l'université de Pau, il a fallu utiliser des lasers femtoseconde pour identifier leur composition. À la suite d'un traitement statistique, Émilie Berard a identifié la signature

chimique des armures milanaises, ce qui permet désormais de distinguer les armures réellement produites à Milan et dans le nord de l'Italie des armures produites dans d'autres centres de production. Là encore, cela aide à distinguer les influences culturelles et à préciser les savoir-faire d'une période (ici, celle allant de la fin du Moyen Âge à la Renaissance).

Les comparaisons avec des signatures des zones de production se font par cartographie des compositions issues de l'analyse chimique, mais peuvent aussi faire appel à l'analyse isotopique voire, à d'autres types d'analyses encore ; les variations de ces signatures chimiques, constituent des référentiels permettant des études à grande échelle (**figure 17**). Cette

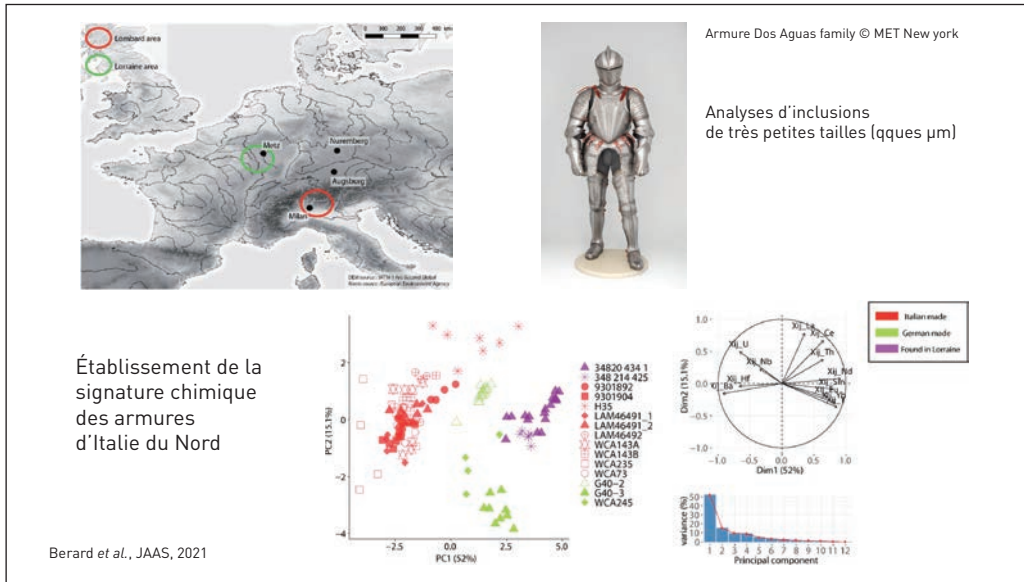


Figure 16

Travaux d'étude des armures datant de la fin de la Renaissance, par Émilie Berard.

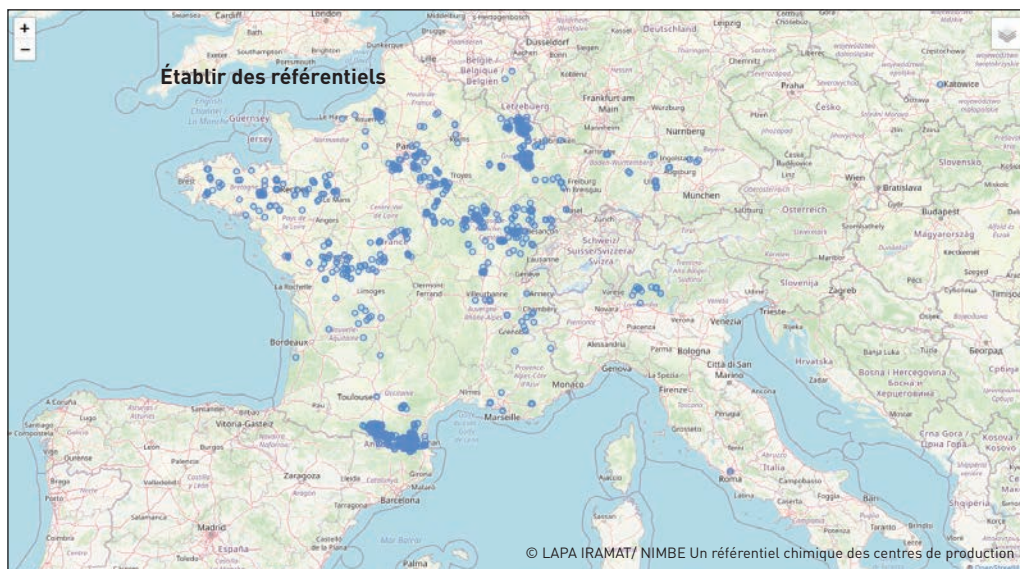


Figure 17

CHIPS un référentiel chimique des centres de production des métaux ferreux.

question des référentiels, du partage de ces derniers entre les laboratoires est une question qui, à l'heure de l'*open data*, mobilise désormais le monde de la recherche. Elle est en effet cruciale, d'une part, pour assurer la constitution raisonnée avec les méta-informations nécessaires et d'autre part, pour assurer le partage des données protégées.

Cette approche par composition a aussi été réalisée par d'autres équipes comme celles de Bernard Gratuze et Nadine Schibille, l'IRAMAT d'Orléans. Ces derniers se sont intéressés aux verres au natron de la période antique et ont pu, à partir de l'analyse de la signature des sources de production, restituer les réseaux d'échange, identifiant

notamment l'usage des différentes sources sur tout le pourtour méditerranéen (figure 18).

La signature isotopique présente de nombreuses et très intéressantes caractéristiques. La figure 19 montre un exemple issu des travaux des programmes SEALIP et de l'ANR BROGLASEA, dirigés par Oliver Pryce. Ce dernier s'est intéressé à l'isotopie du plomb pour la signature isotopique des productions anciennes du cuivre primaire en Asie du Sud-Est aux âges du bronze, ce qui a permis d'identifier les différentes signatures isotopiques dans des alliages cuivre, plomb, parfois étain.

Le principe est toujours le même et là encore, la chimie analytique y joue un rôle déterminant. La question des

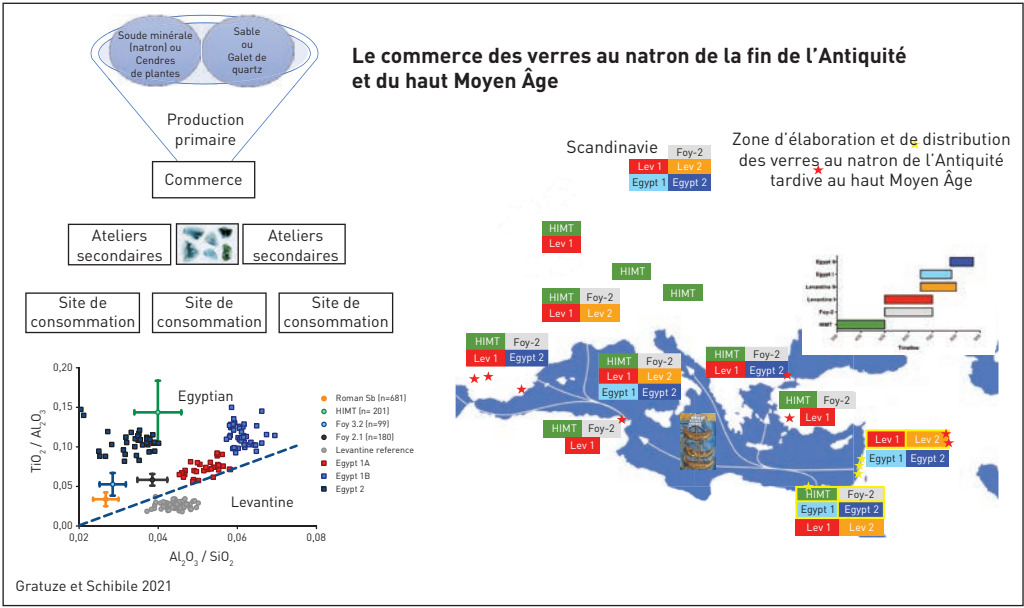


Figure 18

Travaux de Bernard Gratuze et Nadine Schibile, étudiant les verres au natron.

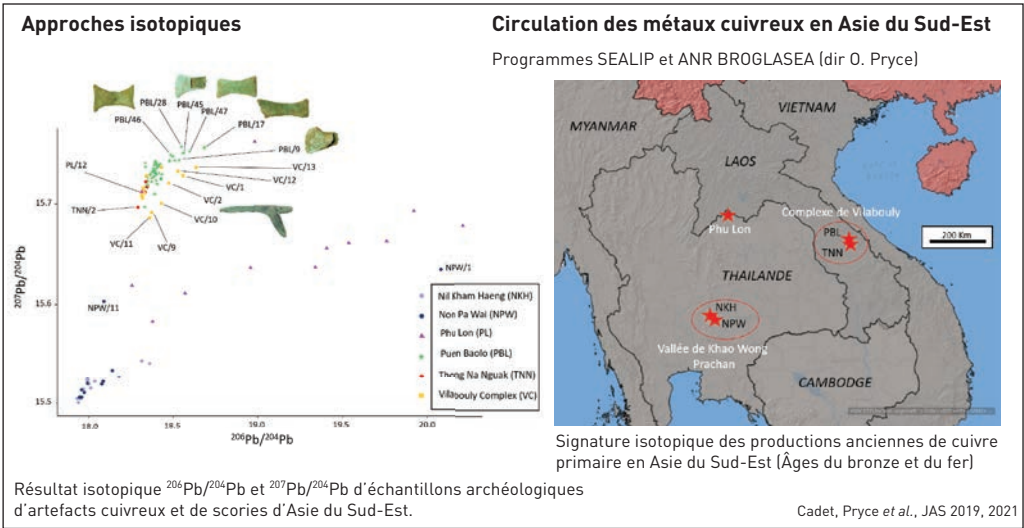


Figure 19

Travaux de Mélissa Cadet et Oliver Pryce sur le cuivre et l'isotopie du plomb.

référentiels et des traitements statistiques des données, reste fondamentale. Les nuages de points ne sont pas du tout gaussiens, nous avons une

distribution souvent complexe ce qui fait que les méthodes classiques restent parfois limitées, notamment pour les cas frontières.

4 Conserver les matériaux

Le troisième volet du domaine concerne la conservation des matériaux. Elle commence par la maîtrise d'une réalité redoutable : la corrosion et l'altération qui, comme le disait Gérard Béranger « *est un matériau, est une interface, et puis est un milieu* ».

4.1. Comprendre l'influence du milieu sur les processus d'altération

Pour comprendre les processus d'altération, il faut déjà comprendre le milieu environnant (*figure 20*) qui peut, pour les matériaux du patrimoine, être très varié et nécessiter des spécialités nombreuses pour sa caractérisation. Pour les objets archéologiques, il peut s'agir des sols qui peuvent être aérés, désaérés, à des pH différents, etc. ou bien de milieux aquatiques avec des salinités différentes ou encore, d'atmosphère extérieure (avec tous les problèmes engendrés par la pollution). Il s'agit

aussi d'atmosphères sous abri (qui ne sont pas toujours les vitrines des musées dans lesquelles on peut contrôler l'hygrométrie ou d'autres paramètres) qui peuvent être l'intérieur des cathédrales (ici, la cathédrale de Beauvais), ou l'intérieur de réserves de musées qui n'ont pas les moyens de contrôler ces paramètres. **Dans tous les cas, un point important est celui de la mesure instrumentée des variations des conditions sur une durée raisonnable, c'est-à-dire quelques années, et donc l'instrumentation des sites archéologiques ou des monuments.**

La *figure 21* donne la mesure de la variation de la composition de l'eau sur un site de production de fer en Normandie, ainsi que la mesure en RH et en température réalisée pendant plusieurs années sur la cathédrale d'Amiens afin de comprendre et de mesurer les caractéristiques de l'environnement et de saisir ainsi les processus d'altération du matériau.



Figure 20

Les types de milieu à appréhender pour comprendre les processus d'altération.

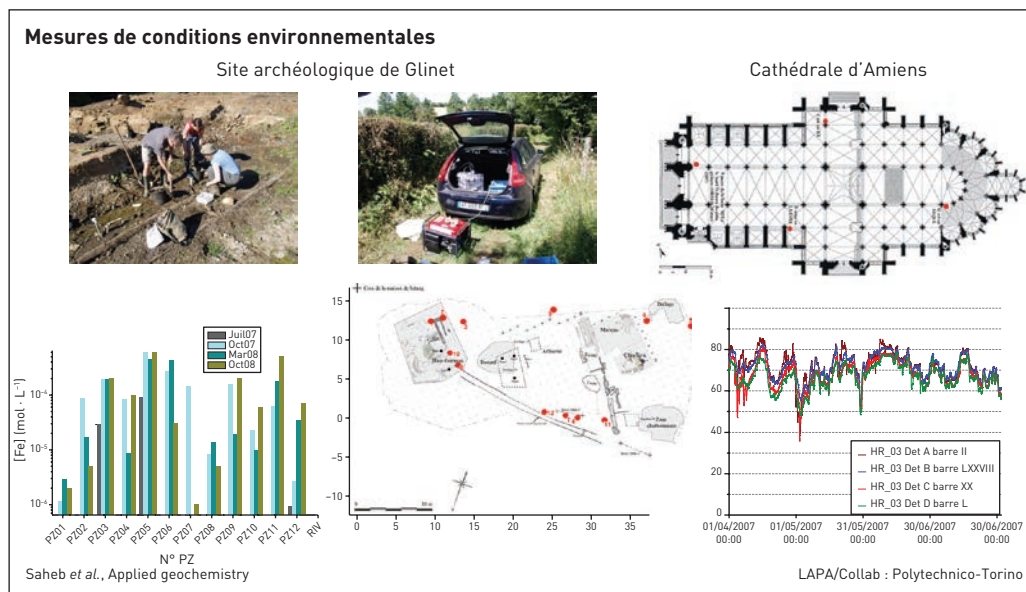


Figure 21

Les mesures des conditions environnementales dans différents milieux.

La **figure 22** est un exemple de l'équipe d'IPANEMA¹, qui s'est intéressée à ce que les archéologues appellent « la minéralisation » et la préservation des textiles cellulosiques², en particulier à base de lin. Diverses méthodes, de la tomographie synchrotron, de la microscopie par génération de seconde harmonique³, mais également de la spectroscopie IR à transformer de Fourier⁴ ou infra-rouge cou-

plé à un AFM⁵ ont été croisées. Cela a permis d'une part, de restituer les processus de fossilisation avec apport de silice par l'eau mais également de mettre en lumière le rôle abiotique⁶ joué par certains métaux présents sur le site archéologique, en particulier le cuivre. L'étude a également mis en évidence la préservation des chaînes celluloses sous forme de matière carbonée, et ce, sur des sites du Moyen-Orient datant de deux à trois millions d'années avant J.-C.

On voit la mobilisation de ces nombreuses approches pour

1. L'Institut Photonique d'Analyse Non-destructive Européen des Matériaux Anciens.
2. Textiles composés principalement de cellulose.
3. Technique d'imagerie basée sur un effet optique non linéaire selon lequel un échantillon émet de la lumière d'harmonique deux à partir de lumière incidente.
4. Développement mathématique en série de fonctions périodiques.

5. Microscope à Force Atomique : microscope permettant d'observer la surface d'un matériau à l'échelle atomique.
6. Se dit d'un milieu qui n'est pas favorable à la vie.

Minéralisation / préservation des textiles celluloseux

Gonur-Depe (Turkmenistan), Nausharo (Baluchistan), Tello (Irak) 2- 3000 av JC
Restes archéologiques « minéralisés » de textiles (lin)

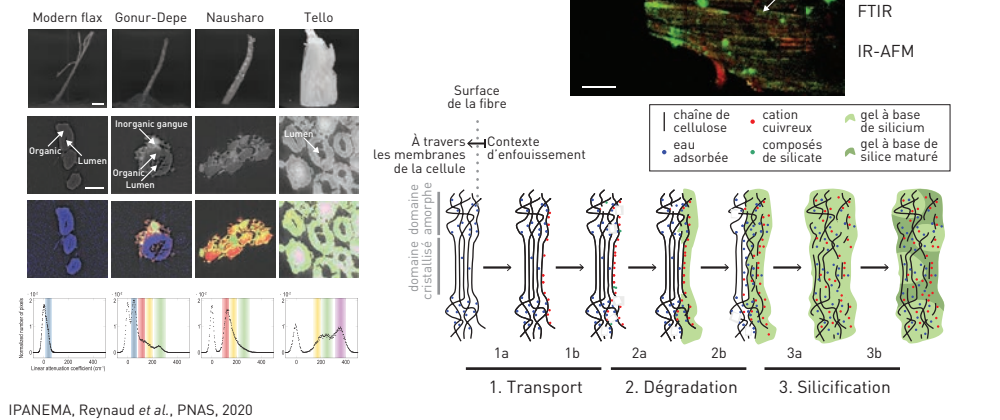


Figure 22

Travaux de l'équipe d'IPANEMA concernant la minéralisation et la préservation des textiles celluloseux.

comprendre l'altération du matériau face à son environnement. L'importance de ces travaux vient en particulier du fait que l'altération peut gêner l'interprétation de l'information historique. Si l'on reprend l'exemple des petits objets en ivoire développé plus haut, on voit (figure 23) sur le profil des éléments d'intérêt un enrichissement sur les bords, dû à des phénomènes de diffusion de l'oxyde de zinc en provenance du sol ; ils rendent cette partie de l'objet inanalysable. Il convient de s'intéresser à des endroits *ad hoc*⁷. Cette étude de l'influence des conditions post-abandon sur l'information contenue dans le matériau, donc l'information historique s'appelle la taphonomie.

7. « Pour cela », se dit de quelque chose qui est destiné à un usage particulier, à répondre à un besoin.

4.2. Étude des mécanismes d'altération

Les mécanismes d'altération eux-mêmes peuvent être divers et complexes. En ce sens, un exemple de l'équipe d'Anne-Solenn Le Hô du C2RMF (figure 24) est très instructif. Il s'agit encore de techniques picturales, avec l'emploi d'un pigment – le vert-de-gris – qui produit des verts caractéristiques, employé entre le xv^e et le xvii^e siècle ; notons que son usage a par la suite été abandonné car le pigment brunissait lorsqu'il était exposé à la lumière. Les parties de tableau, situées en dessous du cadre sont restées vertes et cette observation a permis de mettre en évidence le brunissement dû à la lumière. À partir de la reconstitution en laboratoire et d'analyses sur des échantillons, il a été possible de pointer l'évolution des

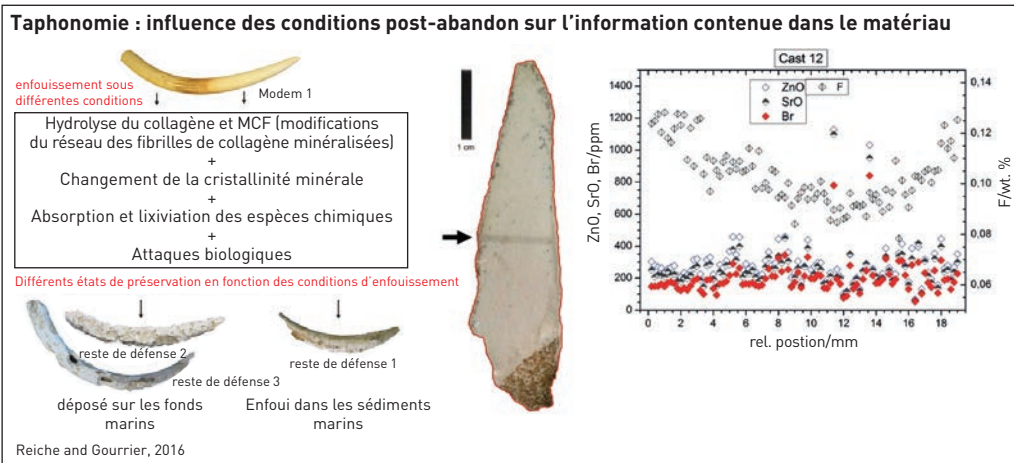


Figure 23

La taphonomie appliquée à des objets en ivoire.

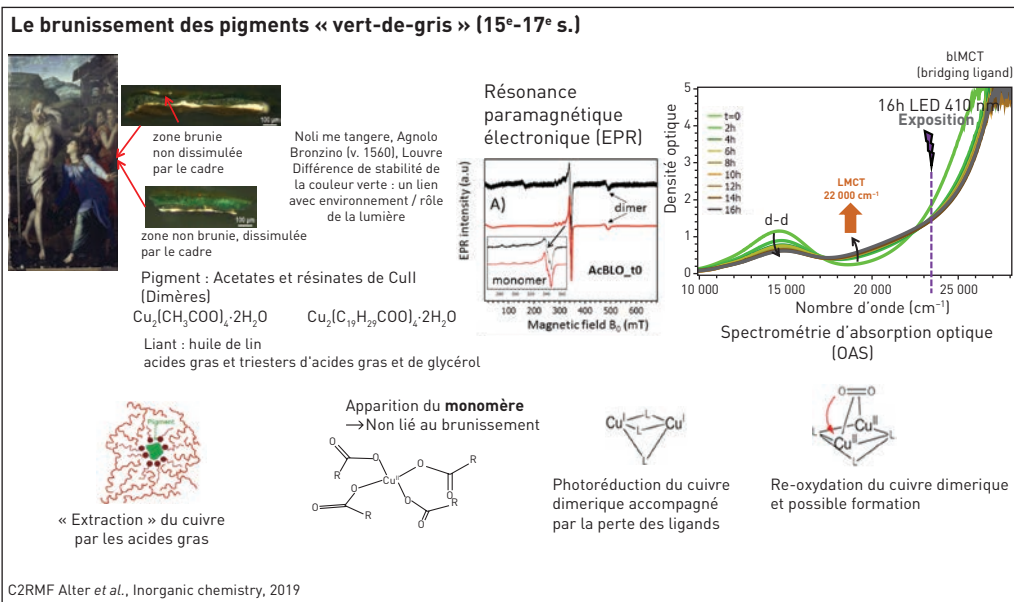


Figure 24

Extraits des travaux de l'équipe de Anne-Solenn Le Hô concernant le brunissement des pigments « vert-de-gris ».

acétates⁸ et des résinates⁹ de cuivre II qui composent le pigment de ces verts-de-gris et qui se trouvent au contact de

liant (de type huile de lin). Le croisement de différentes techniques, (ici la résonance paramagnétique électronique¹⁰ et

8. Ester ou sel de l'acide acétique.
 9. Composé combinant une résine et une base pouvant être transformé en sel.

10. Technique de spectroscopie qui, sous champ magnétique, permet de détecter les espèces possédant au moins un électron non apparié.

la spectrométrie d'absorption optique¹¹) a permis de restituer le mécanisme d'altération. Il met en jeu une première réaction de ces pigments d'acétate et de résinate avec le liant qui génère la formation de monomères non liés au brunissement, suivie d'une phase de dégradation du polymère¹² aux monomères¹³ ; sur les dimères restants, un processus de photo-réduction du cuivre dimérique suivi par un processus de réoxydation avec formation de ponts péroxydiques¹⁴ explique le brunissement. Nous voyons bien comment la combinaison de différentes méthodes peut permettre d'expliquer les phénomènes de brunissement.

D'autres approches sollicitent le matériau ancien en lui-même. On peut ainsi replacer l'objet avec sa couche d'altération qui peut faire quelques centaines de micromètres, voire plus, dans des conditions d'altération (de corrosion) primitives tout en remplaçant les composés oxydants ou ceux qui jouent un rôle dans les réactions d'oxydation par certains de leurs isotopes. Il est ainsi possible d'utiliser de l'eau lourde, du D_2O ¹⁵ ou

de l'oxygène 18^{16} pour pister les processus d'oxydation. Ces méthodes permettent de comprendre les phénomènes de transport à l'intérieur de ces milieux relativement poreux, de porosités différentes et hétérogènes ; elles donnent aussi l'occasion, si l'on détecte et localise des nouvelles phases précipitées, de saisir des questions de réactivité ou de découplage de réactions au sein de la couche d'altération.

La mise en œuvre de ces travaux, souvent lourde du fait de l'instrumentation, requiert en général un travail multi-équipe ; tel est le cas avec l'équipe d'Aurélie Verney-Caron sur les verres et les vitraux de cathédrale sur lesquels nous n'avons pas eu seulement à considérer la formation d'un gel mais aussi à envisager d'autres processus de dissolution et re-précipitation. La *figure 25* montre ainsi le transport du D_2O en atmosphère insaturée, détecté par TOF-SIMS, le SIMS du Muséum d'Histoire Naturelle ; à noter que le Nano SIMS a également été utilisé pour d'autres études de corrosion.

D'autres travaux, conduits au sein de mon laboratoire montrent le rôle d'une couche barrière interfaciale nanométrique pour contrôler les processus de corrosion. La microsonde nucléaire du laboratoire NIMBE¹⁷, a permis de mettre en évidence un découplage des réactions anodiques et cathodiques dû à la présence de phases électriquement

11. Méthode de spectroscopie basée sur l'analyse de l'absorption d'une radiation par l'échantillon étudié.

12. Molécule de masse molaire importante, composée de plusieurs répétitions d'un ou plusieurs motifs moléculaires, les monomères.

13. Motifs constitutifs des molécules polymères.

14. Pont formé par liaison entre deux atomes d'oxygène.

15. Molécule voisine de H_2O , dont l'hydrogène est remplacé par son isotope plus lourd, le deutérium.

16. Atome isotope de l'oxygène, possédant 18 nucléons.

17. Nanosciences et Innovation pour les Matériaux, la Biomédecine et l'Énergie.

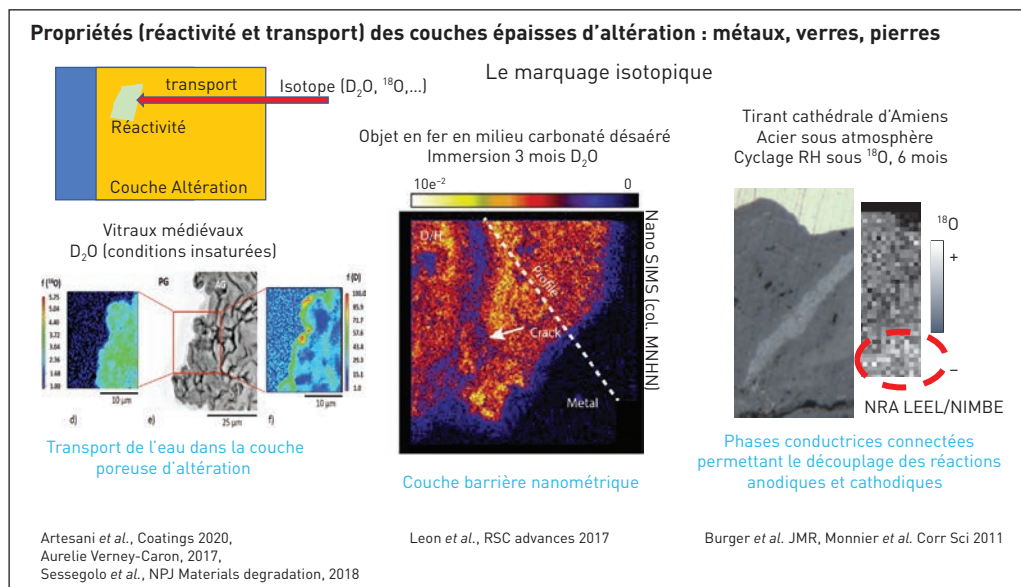


Figure 25

Étude des matériaux altérés et des propriétés de leur couche d'altération par remise en corrosion en milieu marqué isotopiquement.

conductrices au sein de la couche de produits d'altération. Tous ces exemples montrent que pour comprendre les processus physico-chimiques mis en jeu en corrosion on « retorture » les matériaux du patrimoine mais en conservant leurs caractéristiques propres et en utilisant différents marqueurs isotopiques.

Sur les traitements de restauration, il est également possible d'essayer de comprendre les cinétiques des phénomènes physico-chimiques. La **figure 26** présente un traitement de déchloration qui consiste à retirer le chlore qui s'est accumulé dans les objets métalliques à l'interface métal/produit. À l'issue d'une fouille, lorsque l'objet est remis à l'air, il peut se réoxyder (ce sont souvent des phases fer II qui sont

produites dans le sol), en général, avec génération de phases de moindre densité qui causent des processus de fracturation et des processus cycliques : **un objet qui a été conservé pendant plusieurs centaines d'années dans les sols, peut être détruit en quelques années.** Pour pallier, des traitements de déchloration sont mis en place : il s'agit de différents types de bains, voire des traitements électrochimiques dont il convient d'étudier l'efficacité en fonction des paramètres de l'expérience, notamment l'aération de la solution¹⁸.

La **figure 27** montre l'exemple d'une cellule issue d'un prélèvement sur un « objet » – le système complet. Nous avons

18. Quantité d'air solubilisée dans une solution.

Traitements de restauration
Mécanismes et cinétiques de la déchloration des objet archéologiques ferreux

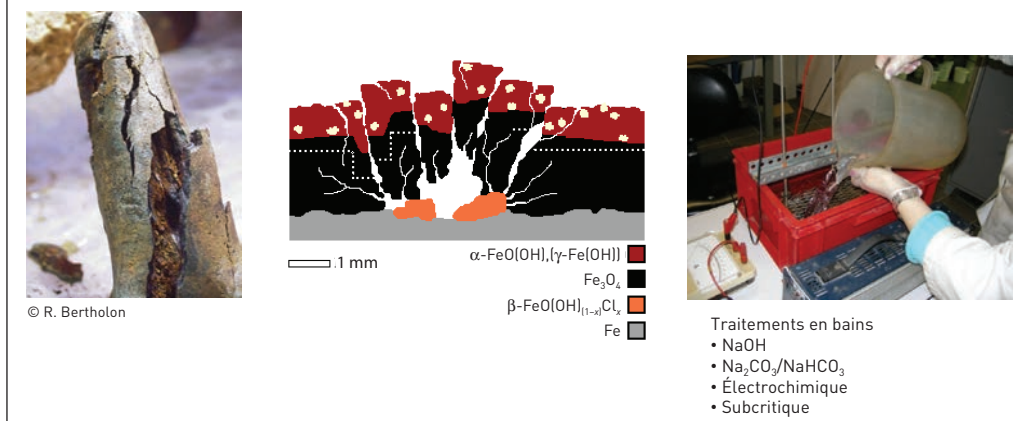


Figure 26

Exemple d'un traitement de restauration, la déchloration.

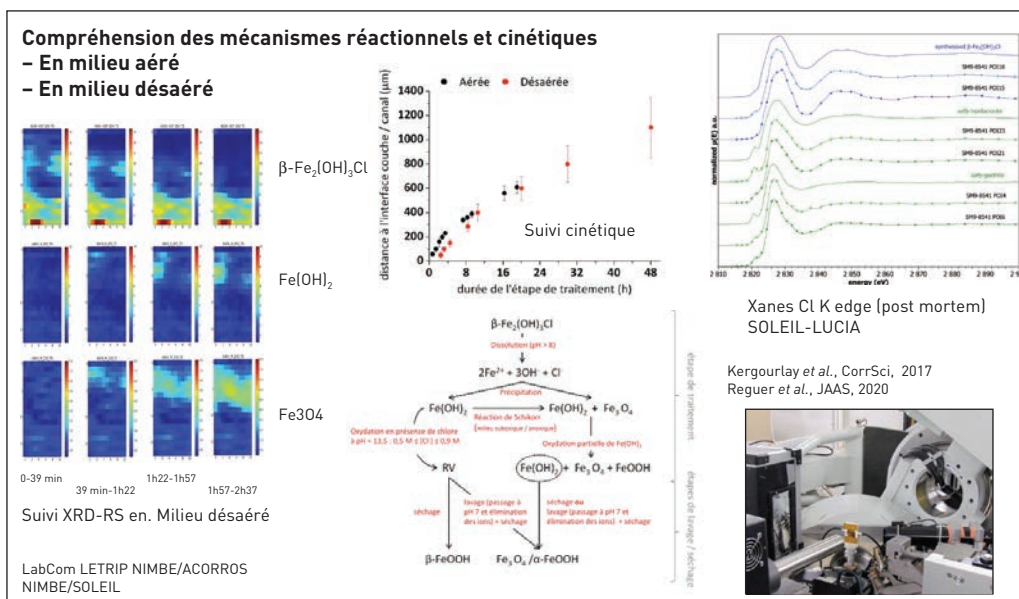


Figure 27

Travaux relatifs à la compréhension des mécanismes réactionnels et cinétiques d'altération.

suivi sur la ligne DiffAbs du synchrotron SOLEIL, la progression du front de déchloration avec la disparition de la phase chlorée, l'apparition de phases intermédiaires instables comme $\text{Fe}(\text{OH})_2$ puis

la précipitation finale d'autres types de phases. Ceci nous a permis de mieux comprendre les mécanismes et d'établir également un suivi cinétique afin d'améliorer les traitements de restauration.

4.3. De la conservation à la prévention

Évoquons maintenant les traitements sur les matériaux du patrimoine qui empêchent la détérioration du temps...

En premier lieu, il convient d'évoquer les exigences spécifiques liées au traitement de protection et de conservation (figure 28). Il doit y avoir compatibilité avec des surfaces qui souvent sont hétérogènes et poreuses, le traitement doit être résistant mais également si possible, réversible. Il doit être transparent afin de ne pas altérer l'aspect visuel, non toxique (de plus en plus) et à bas coûts de maintenance puisque nous n'avons pas tous les jours la chance de travailler sur un chantier comme celui de Notre-Dame de Paris ! Il faut penser aux milliers d'objets, stockés dans les réserves, pour leur donner une protection efficace par des traitements à bas coûts.

La figure 29 expose les travaux initiés avec François Mirambet du C2RMF et d'Emmanuel Rocca de l'Institut Jean Lamour, aujourd'hui poursuivis dans notre laboratoire, en collaboration avec le C2RMF. L'idée est d'utiliser des acides carboxyliques de différentes chaînes pour former une couche hydrophobe de carboxylates réagissant avec le cuivre – des essais ont d'abord été menés avec le fer.

Un certain nombre d'études se concentrent sur la **pénétration de ces composés à l'intérieur du milieu poreux** ; ils constituent un réservoir d'acide carboxylique qui forme des complexes

protecteurs. Une des solutions testées est l'usage de procédés sol-gel¹⁹ pour piéger les agrégats d'acides et les emmener sans réagir dans la couche poreuse pour constituer un réservoir qui va libérer progressivement l'acide carboxylique et prévenir l'arrivée de l'eau.

Un ensemble de recherches plus ou moins avancées sur l'échelle TRL²⁰ fait progresser cette perspective d'une protection préalable résistante. Certaines sont dans **la vallée de la mort, d'autres non, d'autres sont sous forme de proof of concept²¹, d'autres sont utilisées actuellement**. Les gels ont ainsi été mentionnés et les nanosciences convoquées (figure 30).

19. Procédé utilisant la polymérisation pour produire un matériau vitreux.

20. L'échelle *Technology Readiness Level* (TRL) permet d'évaluer le niveau de maturité d'une technologie.

21. Preuve de concept.

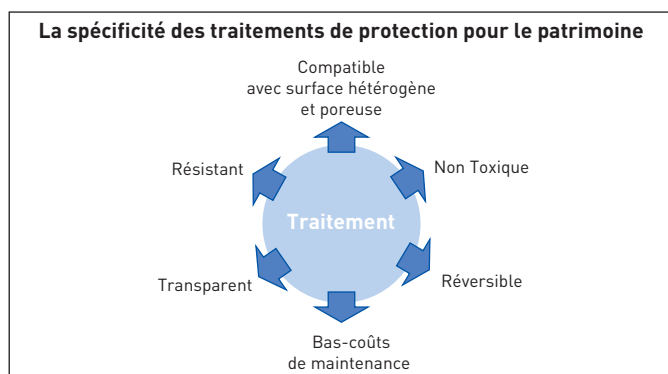
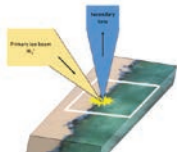


Figure 28

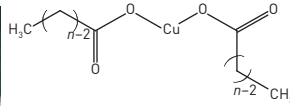
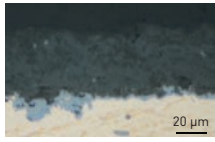
Les exigences spécifiques liées au traitement de protection et de conservation.

Traitements de protection des métaux du patrimoine

Acides carboxyliques (HC₇, HC₁₀,...) formant une couche hydrophobe de carboxylate



TOF-SIMS
N. Nuns UCCS UMR8181 Lille

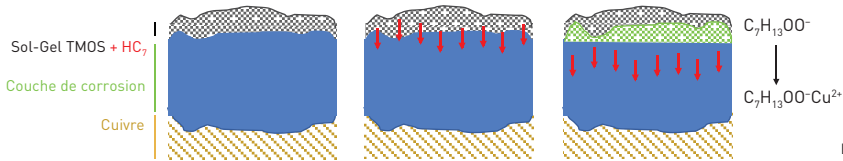


D. Neff, E. Achain, E. Ferrari (NIMBE)
F. Mirambet (C2RMF)
E. Rocca (IJL)

Paramètre clef : pénétration (tenue augmentée)
Achain, CorrSci, 2021, Bouttemy Suf, Int, 2018



- Procédé sol-gel : amélioration de la pénétration des agrégats acides
- Réservoir HC_n, disponible dans la couche pour formation de carboxylates de Cu



Lob et al. 2022

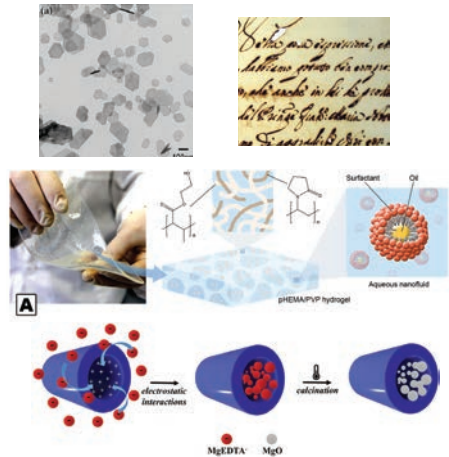
D. Neff, T. Tran-Thi, S. Lob, C. Richter (NIMBE/LAPA/LEDNA/LPMS), 2022

Figure 29

Travaux concernant les traitements de protection des métaux du patrimoine.

Nanosciences pour la conservation restauration

- Nanoparticules
 - Métaux, oxydes, hydroxydes,...
 - Diffusion dans les milieux poreux
 - Biocides antibactériens, antifongiques (Ag, TiO₂, ZnO,...)
 - Consolidation des matériaux (bétons, pierres, bois, céramiques, papier,...)
 - Contrôle du pH : désacidification du papier (hydroxydes et carbonates alcalins, dispersions colloïdales et solvants organiques)
- Nanostructured Fluids, Gels
 - Nettoyage des surfaces
- Nanotubes, encapsulation, émulsions
 - Halloysites,...
 - Vecteurs de nano-composés (surfactants, inhibiteurs de corrosions)
 - Relâchement contrôlé ou progressif



David et al., Materials 2020, Baglioni et al., Molecules, 2021

Lorenzo Lisuzzo et al. 2021

Figure 30

Les nanosciences adaptées à la conservation et restauration de matériaux.

Avec l'usage de la myriade de nanoparticules disponibles (de métaux, d'oxydes, d'hydroxydes) et la diversité de leurs propriétés (biocides, antibactériennes, consolidation, contrôle du pH, désacidification du papier, ETC) que l'utilisation de fluides nanostructurés, de gels, voire de nanotubes ou d'encapsulation met à notre disposition,

il est ainsi possible de libérer des nanocomposés de manière contrôlée (avec des changements de pH par exemple) ou progressive dans la couche

poreuse. Ces **études se développent de plus en plus et préparent l'avenir des techniques de restauration et de conservation du patrimoine**

Conclusion : les enjeux de la conservation et la restauration des matériaux du patrimoine

Les objectifs courts et longs termes des **études des matériaux du patrimoine** (*figure 31*) peuvent se résumer ainsi :

- continuer à **travailler pour l'interdisciplinarité**. La principale difficulté ici est peut-être la construction de relations de confiance solides et durables entre les différentes disciplines. Il faut sans cesse continuer à les entretenir, les travailler et les soutenir ;
- **la question des référentiels** qu'il faut consolider, partager et étendre, en tout cas dans les règles de l'art de la gestion des données actuelles ;
- les questions **d'acquisition multi-spectrale**, d'images multi-spectrales, de spectroscopie, de croisement des données spectroscopiques qui pourraient être traitées par les approches chimométriques²² ou d'intelligence artificielle. Nous pourrions y porter l'effort comme cela a été le cas pour les matériaux ;
- le **concept de l'objet augmenté** de ces données : dorénavant, l'objet doit toujours être complété de ses données analytiques. Il y a de très belles choses qui sont faites au C2RMF, à Notre-Dame, mais il faudrait pouvoir élargir à un grand nombre de laboratoires qui étudient les objets du patrimoine ;

22. Approches couplant la chimie analytique et l'analyse de données mathématiques.



Figure 31

Les enjeux actuels de l'étude de la conservation et la restauration des matériaux du patrimoine.

– des questions de **modélisation multi-échelle** des processus d'altération, d'élaboration et puis la chimie verte pour la conservation avec l'usage de biopolymères, voire de micro-organismes ;

– **la chimie verte et les nanosciences.**

Au-delà de la recherche scientifique, les enjeux résumés sur la *figure 31* constituent un bel objectif pour les amoureux du patrimoine, ceux qui le respectent comme témoin de ce que nous avons été mais aussi comme base de ce que nous deviendrons.