

Fondation de la Maison de la Chimie

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris



Mercredi 9 Février 2022

Chimie et Notre-Dame

*La science au service
d'une résurrection*

RECUEIL DES RÉSUMÉS

En partenariat
avec


MINISTÈRE
DE LA CULTURE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Mercredi 9 Février 2022

Fondation de la Maison de la Chimie
Maison de la Chimie
28 bis rue Sainé-Dominique 75007 Paris

En partenariat avec
MINISTÈRE DE LA CULTURE
Chirs

Chimie et Notre-Dame

La science au service d'une résurrection

RÉSUMÉS DE LA TABLE RONDE ET DES CONFÉRENCES

TABLE RONDE : Ils travaillent pour (sauver Notre-Dame)

Débats animés par **Marc J. LEDOUX**, avec la participation de :
(par ordre alphabétique des auteurs)

	Pages
Richard BOYER <i>La restauration des statues en cuivre de la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris.</i>	03
Julien Le BRAS <i>Charpente de sécurisation des arcs boutants et des voûtes.</i>	04
Witold NOWIK - Marie PARANT <i>Conservation-restauration de peintures polluées par dépôt d'aérosols de plomb.</i>	06

CONFÉRENCES :

(par ordre alphabétique des auteurs)

Pages

Sophie AYRAULT

07

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

Livio De LUCA

08

Un écosystème numérique pour l'analyse et la mémorisation multidimensionnelle du chantier scientifique Notre-Dame.

Philippe DILLMANN

09

Matériaux du patrimoine, compréhension du passé, prévision du futur. Quelques exemples.

Alexa DUFRAISSE

10

Mémoire du bois : apport de la chimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris.

Rémi FROMONT - Pascal PRUNET

12

Notre-Dame de Paris, matériaux et construction.

Général d'armée Jean-Louis GEORGELIN

13

Le chantier de Notre-Dame de Paris : état et perspectives.

Maxime L'HERITIER

14

L'apport des analyses chimiques à la connaissance des armatures de fer de Notre-Dame de Paris.

Pascal LIEVAUX - Aline MAGNIEN

15

De la chimie des matériaux à l'alchimie des équipes.

Claudine LOISEL

16

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

Véronique VERGÈS-BELMIN

17

Notre-Dame de Paris, matériaux et construction.

TABLE RONDE animée par **Marc J. LEDOUX****Ils travaillent pour (sauver Notre-Dame)***(par ordre alphabétique des auteurs)***La restauration des statues en cuivre de la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris.****Richard BOYER*****Directeur général SOCRA***

Le 11 avril 2019, eut lieu la dépose des statues des douze apôtres et des quatre évangélistes qui ornent la base de la flèche de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Elles devaient rejoindre les ateliers de la SOCRA en Dordogne pour une restauration fondamentale. Quatre jours plus tard un incendie ravage la flèche et la charpente de l'édifice, faisant de ces œuvres de véritables miraculées. Durant les deux années qui suivirent, les statues, créées par le sculpteur Geoffroy-Dechaume et réalisées par les ateliers Monduit, furent restaurées en atelier suivant des protocoles spécifiques pour le traitement des armatures internes et de l'épiderme en cuivre. Les pathologies rencontrées sont celles que nous rencontrons habituellement sur ce type d'ouvrage : altération de l'épiderme, corrosion galvanique de l'armature interne en fer pur. Cette campagne de restauration aura été également l'occasion d'aborder les questions relatives à l'aspect de surface de l'épiderme en cuivre et des traitements de finition. Aujourd'hui présentées dans les galeries de la Cité de l'Architecture et du Patrimoine à Paris, ces œuvres retrouveront leur emplacement d'origine à la fin des travaux de reconstruction de la flèche.

Mots Clés : Notre-Dame de Paris, Geoffroy-Dechaume, Ateliers Monduit, Corrosion galvanique

Charpente de sécurisation des arcs boutants et des voûtes.

Julien LE BRAS

Président Directeur Général Groupe Le Bras Frères

Le lendemain de l'incendie de la toiture de Notre-Dame, la course contre la montre est engagée. Sous l'impulsion et les directives de l'architecte en chef Philippe Villeneuve, rejoint plus tard par Rémi Fromont et Pascal Prunet, les hommes se lancent dans le sauvetage et la sécurité de la cathédrale.

Engagés dans cette réussite, ils ont fait appel à plusieurs entreprises afin de répondre et exécuter leurs consignes. Des tailleurs de pierres, des échafaudeurs, des cordistes, des couvreurs et des charpentiers ont travaillé sans relâche pour sauvegarder le monument.

Mon entreprise LE BRAS FRERES a réalisé tous les travaux de confortement par cintres et étaitements sur la cathédrale. Depuis le début des opérations de sécurisation, nous avons coordonné l'ensemble des travaux de renforcements bois et métalliques sur le monument. A savoir, nous avons travaillé :

- Sur la conception des cintres bois pour soutenir les arcs-boutants,
- Sur la réalisation des planchers bois pour ceinturer les murs gouttereaux et ainsi aider à la poursuite des travaux de sauvegarde,
- Sur les renforts des Beffrois,
- Sur les nombreux étrésillonnements des zones sinistrées,
- Sur la conception de chevalements intérieurs,
- Sur les renforts de voûtes.

Fortement investis dans la sauvegarde de ce monument, mon entreprise animée essentiellement par du personnel passionné par son métier, nous possédons toutes les technicités et le savoir-faire nécessaire pour que la cathédrale Notre-Dame, chantier emblématique hors du commun, retrouve sa beauté d'antan.

Mon bureau d'études interne à l'entreprise, composé de jeunes ingénieurs et dessinateurs hautement qualifiés, nous a permis une grande réactivité sur l'étude et l'exécution des travaux. La charge de travail à ce moment était tellement importante qu'il a fallu que toute la société LE BRAS FRERES soit mobilisée, et ceci, depuis la secrétaire jusqu'au compagnon travaillant à l'atelier ou ceux directement sur terrain, sans oublier le service logistique. Tous les salariés de l'entreprise (présents ou non sur ce chantier) étaient concernés et mobilisés. C'est grâce à l'implication de tous que la sécurisation de l'édifice a pu se faire.

Toutes ces prestations de consolidation et sécurisation ont été visées par les architectes en chef des monuments historiques. Leurs appuis historiques et techniques ont permis de coordonner parfaitement et rapidement les opérations.

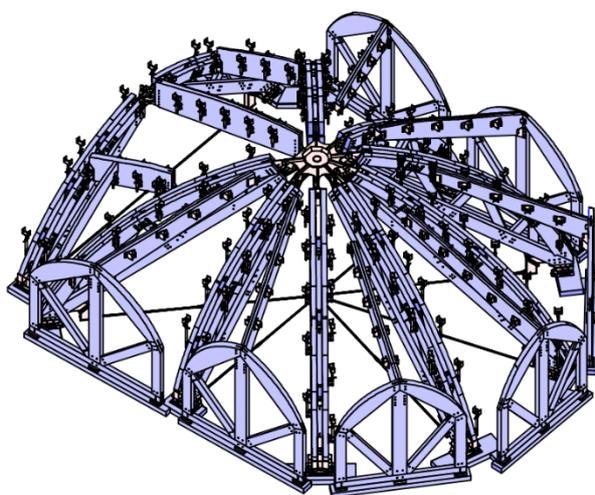
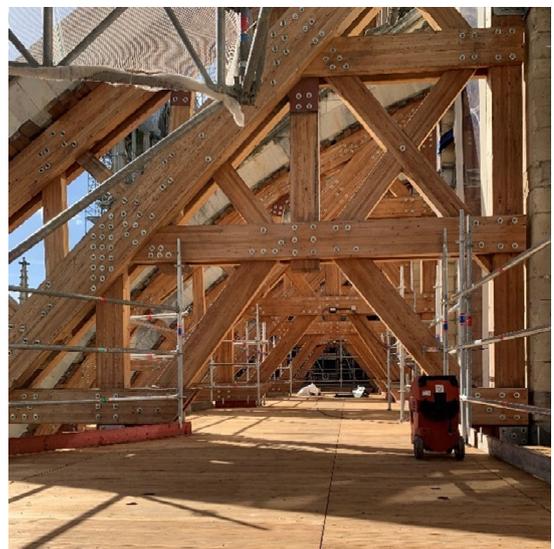
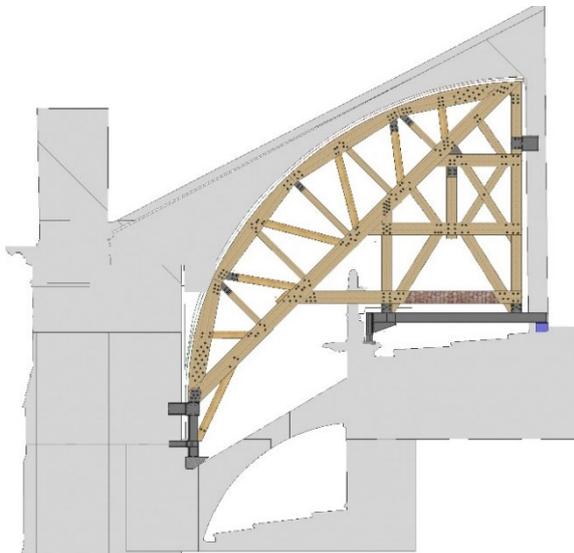
La compétence professionnelle et la conviction de chaque membre de mon entreprise nous ont permis de finaliser la sécurisation et le confortement de ce monument. En permanence, je suis resté en étroite collaboration avec les compagnons charpentiers et échafaudeurs, le bureau d'étude, les ateliers et les donneurs d'ordres.

Sur toute cette opération, nous avons été dirigés et soutenus par le Directeur Général des opérations de sauvegarde de la cathédrale Notre-Dame, il a été un moteur important tout au long de ces travaux.

Le travail de la reconstruction est encore long, nous devons garder le rythme sur le long terme.

Ce jour, je vais vous présenter plus particulièrement la sauvegarde des voûtes à travers la méthodologie d'étalement par cintres que l'on a accomplie au niveau des arcs-boutants et des voûtes.

Seront présentées toutes les étapes pour la sauvegarde du monument. Nous commencerons par la numérisation, la conception mécanique des cintres, jusqu'à l'aboutissement de la pose. A cela, nous expliquerons les phases de fabrication et assemblage de toutes ces pièces.



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

Marie PARANT-ANDAROLO^{a,*}, Witold NOWIK^{b,c,*}

^a Restauratrice de peintures murales indépendante

^b Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), Ministère de la Culture

^c Centre de Recherche sur la Conservation (CRC, USR 3224), Sorbonne Universités, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture, CNRS

Pendant l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris, survenu le 15 avril 2019, les peintures murales situées dans le déambulatoire n'ont pas été directement endommagées grâce à leur éloignement du centre d'incendie, localisé sur la toiture du transept et partie est de la nef. En revanche, cet incendie a provoqué une dispersion du plomb couvrant la toiture, entre autres, en forme d'un aérosol, qui ensuite s'est déposé autour de la cathédrale résultant en une importante pollution des abords du bâtiment. L'intérieur n'a pas échappé à ce dépôt de microparticules de plomb qui a recouvert les sols, mais aussi les murs y compris les peintures.

La dépollution de l'intérieur de la cathédrale va permettre, aux équipes chargées des travaux de restauration, un accès facilité par des protections allégées. Dans le cadre de cette intervention, il était nécessaire de mettre au point un 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.

La mise au point de cette méthode s'est déroulée dans le passage de la Sacristie et a été suivie par les contrôles de quantité de plomb soluble [1]. Plusieurs niveaux d'intervention ont été testés : aspiration avec brossage, application d'un papier absorbant humidifié et application d'un gel nettoyant. C'est un gel aqueux fait avec un complexant qui, appliqué en deux passages après un dépoussiérage minutieux, a donné les résultats les plus satisfaisants.

Le chantier des chapelles tests a permis la mise en pratique et à l'échelle de ce protocole. Pendant six mois, une équipe de neuf restauratrices de peintures murales a restauré le décor de la chapelle Saint-Ferdinand, en collaboration avec le LRMH et en coactivité avec des restaurateurs de vitraux (Vitrail France), de sculptures (SOCRA) et de maçonneries (Pierre Noël). Ainsi, à la fin du chantier, tous les éléments constitutifs du décor de Viollet-le-Duc (vitrail, sculpture, pierre) étaient restaurés. Dans ce contexte singulier pour nous, restaurateurs de peintures murales, ce chantier était exemplaire.

Références :

[1] Nowik W., Duchêne S., Brissaud D. « Essais d'élimination de plomb exogène des peintures décoratives de chapelles du cœur de Notre-Dame », Monumental, 1, 104-105, 2021.

Mots Clés : Peinture murale, Conservation-restauration, Pollution au plomb, Incendie, Cathédrale Notre-Dame de Paris.

CONFÉRENCES PLÉNIÈRES ET SESSIONS PARALLÈLES

(par ordre alphabétique des auteurs)

**Tracer les plombs de Notre-Dame de Paris
à l'aide de leurs signatures isotopique et élémentaire.**

Justine BRIARD^{a,d}, Sophie AYRAULT^{a,*}, Matthieu ROY-BARMAN^a, Louise BORDIER^a, Maxime L'HÉRITIER^b,
Aurélia AZÉMA^c, Delphine SYVILAY^c, Sandrine BARON^d

^a *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE UMR 8212, CEA - CNRS - UVSQ,
Université Paris-Saclay*

^b *Université Paris 8, Archéologie et Sciences de l'Antiquité, ArScAn UMR 7041, CNRS*

^c *Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, CRC USR 3224, Muséum National d'Histoire
Naturelle - CNRS - Ministère de la Culture*

^d *Laboratoire Travaux et Recherches Archéologiques sur les Cultures, les Espaces et les Sociétés,
TRACES UMR 5608, CNRS - Université de Toulouse*

En avril 2019, l'incendie de la cathédrale Notre-Dame a répandu sur Paris une quantité inconnue de poussière 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 appliqué aux échantillons de poussières riches en plomb collectés en différents endroits à l'intérieur de Notre-Dame. Ainsi, la signature isotopique radiogénique du plomb (Pb) (rapports isotopiques $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) et les concentrations d'une trentaine d'éléments chimiques (plomb, cuivre, antimoine, bismuth, étain...) ont été déterminés par spectrométrie de masse. Une stratégie développée spécifiquement pour cette étude a été employée pour éliminer toute source de contamination métallique potentielle due aux substrats d'échantillonnage ou aux poussières précédemment déposées. Il en a résulté que seuls les échantillons collectés sur des supports en bois, et au niveau supérieur dans Notre-Dame pouvaient être utilisés pour une détermination fiable de la signature chimique de l'incendie. Ainsi, la signature des poussières se situe entre la signature de minerais espagnols utilisés en France durant le XIX^e siècle (i.e., à la période de la construction du Paris Haussmannien) [1], des monuments historiques contemporains à la construction de Notre-Dame, et des sédiments actuels de la Seine [2]. De plus, cette étude met en évidence des rapports élémentaires (ex. Sn/Cu) permettant une caractérisation plus spécifique de la signature. 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 poussière contenant du plomb.

Références : 1. Lestel, L., *Non-ferrous metals (Pb, Cu, Zn) needs and city development: the Paris example (1815-2009)*. Regional Environmental Change, 2012. **12**(2): p. 311-323.; 2. Ayrault, S., et al., *Lead contamination of the Seine River, France: Geochemical implications of a historical perspective*. Chemosphere, 2012. **87**(8): p. 902-902-910.

Mots Clés : Monuments historiques, Isotopes du plomb, Métaux, Pollution environnementale, Traçage chimique.



Un écosystème numérique pour l'analyse et la mémorisation multidimensionnelle du chantier scientifique Notre-Dame.

Livio De LUCA

UMR 3495 CNRS-MC MAP

(Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine). Campus CNRS, Marseille

La recherche sur le patrimoine fait de la confrontation entre objets matériels et études pluridisciplinaires le terrain de la production de savoirs. A l'ère du numérique, c'est alors un cadre privilégié pour étudier l'analyse et l'interprétation collective des faits, objets et phénomènes qui rassemblent une nouvelle génération de données vers la construction de nouvelles ressources scientifiques et culturelles - notre patrimoine de demain. En introduisant une approche pionnière dans le champ de la modélisation conceptuelle et de la numérisation, notre projet bénéficie du cadre exceptionnel du chantier scientifique de Notre-Dame de Paris (impliquant aujourd'hui 175 chercheurs issus de disciplines comme l'archéologie, l'anthropologie, l'architecture, l'histoire, la chimie, la physique et l'informatique science) pour construire un corpus emblématique de données sur les pratiques scientifiques en sciences du patrimoine, à l'ère du numérique. Il s'agit d'accompagner le chantier scientifique Notre-Dame de Paris en intégrant progressivement les données, les informations et les connaissances sur l'architecture de la cathédrale, ses transformations dans le temps, son comportement structurel et acoustique, ses matériaux. L'environnement numérique collaboratif en cours de construction permet de gérer le cycle de vie des données (collecte, catégorisation, enrichissement sémantique, analyse et visualisation, archivage pérenne) tout en ouvrant les portes à l'introduction de mécanismes de corrélation inédits basés sur l'intersection de critères spatiaux, temporels, morphologiques et sémantiques.

Dans le cadre de l'opportunité de produire collectivement et d'analyser des masses de données scientifiques nées numériques, nous ambitionnons de proposer une approche généralisable, une méthodologie reproductible et un écosystème numérique ouvert et réutilisable pour construire des « cathédrales de connaissances » pluridisciplinaires par la recherche collaborative sur les objets matériels. En introduisant et en expérimentant une nouvelle génération de méthodes et d'outils pour la production et l'analyse de données multidimensionnelles sémantiquement enrichies, notre approche déplace le curseur de la numérisation, de l'objet physique aux connaissances mobilisées pour le comprendre, afin d'étudier l'interdépendance entre ses caractéristiques complexes et les objets de connaissance connexes construits par les chercheurs à travers leurs pratiques de recherche.

Mots Clés : Numérisation du patrimoine, Modélisation conceptuelle, Systèmes d'information, Enrichissement sémantique, Humanités numériques.

Matériaux du patrimoine, compréhension du passé, prévision du futur : quelques exemples.

Philippe DILLMANN

Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération, IRAMAT, NIMBE, CNRS, CEA,
Université de Paris-Saclay

Les matériaux du patrimoine peuvent être de nature très diverse (roches et silex, céramiques, métaux et alliages, verres, matière picturale, papier, bois, végétaux, ...). Ils ont été agencés pour former des objets plus ou moins complexes et hétérogènes, de différentes qualités. Ils peuvent avoir été élaborés selon des procédés variés, mettant en jeu des déformations mécaniques mais également des transformations chimiques et thermochimiques de tous ordres. Ils sont souvent hétérogènes, et ce de l'échelle fonctionnelle à celle submicrométrique. Leur composition et leur microstructure recèlent de ce fait un grand nombre d'informations sur les savoir-faire techniques et les réseaux d'échanges, mais également les origines ou la période d'utilisation de ces matériaux [1]. C'est pourquoi leur analyse et leur étude physico-chimique, qui mets en œuvre des méthodologies adaptées et innovantes, peuvent être considérées comme une source produisant des informations historiques à part entière. Nous verrons comment la mise en œuvre de ces méthodes (allant de la microscopie optique aux techniques sur anneaux synchrotrons, en passant par l'instrumentation portable [2]) peut permettre de comprendre l'histoire technique de certains matériaux comme les céramiques ou la matière picturale, leur réseaux d'échange parfois complexes comme pour les fers et les aciers, le verre ou l'ivoire [3]. Les approches sont aujourd'hui intégrées aux études historiques et les questionnements scientifiques sont co-construits de manière interdisciplinaire. Une fois les objets abandonnés, ou au cours de leurs histoire, les matériaux qui les constituent subissent des processus d'altération dont la compréhension des mécanismes physico-chimiques est cruciale pour le diagnostic de leur état de conservation et la mise en place de traitements de protection. Nous montrerons aussi comment ces études servent également à prévoir le comportement de matériaux employés dans le futur sur la très longue durée. Enfin, nous terminerons cette communication par quelques exemples d'études où la chimie et les nanosciences permettent de mettre en place des traitements de restauration et de protection [4].

Références :

1. Regert M, Guerra M-F, Dupuis G. *Physico-chimie des matériaux archéologiques et culturels*. Editions des Archives Contemporaines; 2016.
2. Benech C, Cantin N, Marie-Angélique Languille, Arnaud Mazuy, Laurianne Robinet, Antoine Zazzo. *Instrumentation portable. Quels enjeux pour l'archéométrie?* Editions des Archives Contemporaines. Paris; 2020.
3. Dillmann P, Bellot-Gurlet L. *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes..* Editions Archives Contemporaines; 2014.
4. Dillmann P, Bellot-Gurlet L, Nenner I. *Nanoscience and cultural heritage*. Atlantic Press; 2016.

Mots Clés : Matériaux du patrimoine, Procédés anciens, Provenance, Altération, Restauration.

Mémoire du bois : apport de la biogéochimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris.

A. DUFRAISSE^a, J. BOUCHEZ^b, C. COUBRAY^{a,c}, V. DAUX^d, F. DELARUE^e,
D. Du BOISGUEHENEUC^{a,d,e}, J.-L. DUPOUEY^f, O. GIRARDCLOS^g, C. HATTE^{d,k}, A. KREMER^h,
T.-T. NGUYEN TU^e, S. PONTON^f, A. POSZWAI, F. SAIANO^j, R. SCALENGHE^j,
A. STULCOVA^{a,e,h}

^a UMR 7209 AASPE CNRS/MNHN

^b Université de Paris, Institut de physique du globe de Paris, CNRS,

^c Institut National de Recherches Archéologiques Préventives

^d UMR 8212 LSCE CEA/ CNRS/UVSQ/Université Paris-Saclay

^e UMR 7619 METIS CNRS/Sorbonne Université

^f UMR 1434 SILVA Université de Lorraine/AgroParisTech/INRAE

^g UMR 6249 LCE CNRS/Université de Franche-Comté

^h UMR 1202 BIOGECO Université de Bordeaux/INRAE

ⁱ UMR 7330 LIEC CNRS/Université de Lorraine

^j Università degli studi di Palermo

^k Institute of Physics - CSE, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

La charpente en chêne de Notre-Dame de Paris est l'un des plus grands chefs-d'œuvre de la charpenterie gothique en France. Elle a été construite au cours du Moyen Âge, entre le XI^e et le XIII^e siècle, à une époque où de profonds changements environnementaux et sociétaux créent une pression importante sur les ressources forestières disponibles. La destruction de la charpente de Notre-Dame de Paris dans l'incendie du 15 avril 2019 a laissé des milliers de fragments de poutres de chêne carbonisés plus ou moins longs et fragmentés, non réutilisables pour la reconstruction. De fait, ces bois médiévaux, rares et précieux, sont aujourd'hui accessibles à la communauté scientifique.

Observée par un œil profane, cette charpente donnait le sentiment d'une « forêt » en raison du grand nombre de poutres nécessaire à sa mise en place. On estime que 800 voire 1000 chênes ont été nécessaires à sa construction, chaque entrain ou chevron provenant d'un arbre différent. 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 des arbres. Certains marqueurs du bois peuvent ainsi être utilisés comme indicateurs des modes de croissance, des zones de provenance ou du climat passé. Analyser la "forêt" de Notre-Dame, c'est remonter le temps, en reconstruisant les forêts et le climat des siècles passés.

Cette communication présentera deux exemples de combinaisons de marqueurs chimiques et isotopiques qui seront testés et analysés sur les bois carbonisés de Notre-Dame.

Le premier exemple repose sur une approche inédite et originale, combinant la composition élémentaire depuis les éléments majeurs jusqu'au groupe des lanthanides, ainsi que les isotopes du strontium et du néodyme pour restituer la provenance géographique des bois. Des essais d'extraction d'ADN seront également menés pour trouver une signature génétique de l'espèce et de l'origine des peuplements. L'identification des provenances apportera des informations précieuses sur la gestion des territoires forestiers, le transport du bois et ses modalités (voies terrestre et/ou fluviale).

L'exploitation des ressources forestières est en effet l'un des fondements économiques de la société médiévale, que ce soit pour la construction, le bois de feu et les activités artisanales.

Le deuxième exemple concerne les compositions isotopiques de l'oxygène et du carbone qui permettent des reconstructions paléoclimatiques fines. Les chênes exploités pour la construction de la charpente de Notre-Dame ont en effet poussé pendant une période d'amélioration climatique, connue sous le nom d'optimum climatique médiéval. Cette période semble se caractériser par de longues séries d'étés secs, vraisemblablement chauds. Des micro-oscillations climatiques pourraient néanmoins avoir eu lieu durant cette période, notamment avec des hivers très rudes ou des épisodes pluvieux. Les bois carbonisés de la cathédrale Notre-Dame constituent donc une porte d'accès unique aux conditions climatiques pour identifier et caractériser cet optimum climatique médiéval.

Chacune de ces approches sera discutée au regard de la carbonisation, processus qui implique des conséquences en cascade sur les signatures élémentaires, isotopiques et moléculaires et dont la compréhension est nécessaire à une interprétation rigoureuse des signaux biogéochimiques.

Mots Clés : Biogéochimie, Bois, Carbonisation, Provenance, Climat.

Notre-Dame de Paris, matériaux et construction.Rémi FROMONT^a, Pascal PRUNET^b^a Architecte en chef des Monuments Historiques, Covalence Architectes^b Architecte en chef des Monuments Historiques, Prunet Architecture et Urbanisme**Le matériau chêne (Rémi Fromont)**

L'incendie du 15 avril 2019 a conduit à la disparition de la quasi-totalité des charpentes et couvertures du grand comble de la cathédrale : charpentes gothiques de la nef et du chœur, flèche et transepts de Viollet-le-Duc. Seuls les beffrois, logés dans les tours du massif occidental, ont été à peu près épargnés par l'incendie.

Le parti de la reconstitution des charpentes et des couvertures dans un état proche de l'identique pose de manière aiguë la question de l'emploi du matériau bois. Le choix des arbres en forêt, la période d'abattage, le mode de débit (sciage mécanique ou manuel), la qualité des bois (nœuds, fils tors, cœurs centrés ou non), le stockage des grumes et des pièces taillées, le taux d'humidité des bois au moment de leur mise en œuvre sont autant des facteurs intéressant directement la qualité du matériau chêne. L'analyse des ouvrages disparus a par ailleurs démontré que, outre la conception structurelle des ouvrages de charpente, ces facteurs ont une forte incidence sur la pérennité des ouvrages et sur notre capacité à les justifier structurellement.

La communication reviendra donc sur le processus qui a présidé à l'établissement des cahiers des charges rédigés par les architectes et présidant au choix et à la taille des bois, tant pour les charpentes de Viollet-le-Duc que pour les charpentes gothiques de la nef et du chœur.

Mots Clés : Charpente, Bois, Chêne.**Le matériau Pierre (Pascal Prunet)**

Lors de l'incendie du 15 avril 2019, les charpentes en feu sont tombées sur les voûtes de la cathédrale, entraînant l'effondrement de plusieurs travées du vaisseau, un arc doubleau et deux voûtains adjacents dans la nef, percutés par la partie supérieure de la flèche, la totalité de la voûte de la croisée, et un voûtain du bras nord. Les hautes températures atteintes par le brasier au contact de l'extrados des voûtes, ont aussi dégradé les pierres des voussoirs, malgré la protection que leur conférait une chape de plâtre, réduisant leur hauteur de deux à trois cm.

Les études menées sur les pierres tombées au sol et en œuvre ainsi que les archives historiques, ont montré qu'elles provenaient de différentes carrières, correspondant à des ressources exploitables lors de la construction et des chantiers successifs de restauration au 18^{ème} siècle et lors de la restauration de Viollet-le-Duc. Le LRMH a aussi pu identifier les caractéristiques de ces pierres d'origines différentes, notamment leurs densités relatives, qu'elles soient utilisées pour les claveaux des arcs, ou pour les voussoirs qui constituent les voûtains.

Les pierres en œuvre présentant des caractéristiques différentes selon leur emploi : nervure ou voûtain, mais aussi au-delà de la question des voûtes, murs en élévation, arase des murs supportant la charpente de toiture... des recherches ont été faites avec le LRMH et le BRGM pour identifier les carrières présentant des ressources dont les caractéristiques étaient compatibles avec les pierres en œuvre ou à remplacer, structurellement (résistance à l'écrasement, poids, porosité) et esthétiquement (couleur, grain...).

Indépendamment de la problématique de la reconstruction des voûtes, la question de la consolidation et du renforcement des parements conservés, ceux des voûtains, rendus nécessaires par les pertes de matière ont aussi été étudiées, et proposées par la réalisation d'une chape de chaux fibrée, et ceux des murs intérieurs des combles, aussi déplaqués par les dilatation des pierres sous l'effet des hautes températures de l'incendie, et qui seront consolidés par brochages en fibre de verre et injections de micromortiers de type Ledan, solution mise au point sur la base de chantiers tests.

Enfin, la protection de l'extrados par une chape de surface résistant au feu a également été étudiée avec le LRMH, afin de protéger les voûtes contre les conséquences d'un éventuel incendie.

Le chantier de Notre-Dame de Paris : état et perspectives.

Général d'armée **Jean-Louis GEORGELIN**

*Représentant spécial du Président de la République
et président de l'Établissement public chargé de la conservation
et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris*

Symbole universel de Paris et de la France, chef-d'œuvre de l'architecture gothique, la cathédrale Notre-Dame de Paris fascine et inspire, depuis plus de huit siècles, les pèlerins, les visiteurs et les artistes du monde entier. Inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco au titre des Rives de la Seine, Notre-Dame de Paris est intimement liée au destin de la France et aux grandes heures de son histoire.

Le 15 avril 2019, un incendie violent a touché au cœur la cathédrale provoquant une vive émotion à travers le monde et un élan de générosité et de solidarité sans précédent.

Grâce à la mobilisation de la brigade de sapeurs-pompiers de Paris, Notre-Dame de Paris a pu être sauvée des flammes.

Depuis l'incendie, un vaste chantier s'est mis en place afin d'assurer la sauvegarde et la renaissance de la cathédrale et de lui redonner sa splendeur.

Jusqu'à l'été 2021, artisans et compagnons venant de toute la France, équipes de l'établissement public, maître d'ouvrage, et architectes en chef des monuments historiques, maître d'œuvre, ingénieurs et chercheurs, experts du ministère de la Culture, ont sauvegardé la cathédrale, étape préalable et nécessaire à sa future restauration.

Grâce à leur travail considérable et à leur mobilisation, Notre-Dame de Paris est entièrement consolidée et sécurisée.

La phase de restauration est désormais résolument engagée afin de tenir l'objectif fixé par le Président de la République de rendre la cathédrale au culte et à la visite en 2024. Les défis qui attendent ces bâtisseurs de cathédrales sont nombreux, faisant de ce chantier une aventure exceptionnelle.

Mots Clés : Notre-Dame de Paris, Patrimoine, Métiers, Sécurisation, Restauration.

L'apport des analyses chimiques à la connaissance des armatures de fer de Notre-Dame de Paris.

Maxime L'HÉRITIER^a, Aurélie AZÉMA^b, Delphine SYVILAY^b,
Emmanuelle DELQUÉ-KOLIC^c, Philippe DILLMANN^d

^a Université Paris 8, ArScAn CNRS UMR 7041

^b LRMH CRC USR 3224

^c LMC14, LSCE CEA/CNRS UVSQ UMR 8212

^d LAPA IRAMAT NIMBE CEA/CNRS

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 la diachronie, 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, grâce aux méthodologies développées depuis une vingtaine d'années [1] : nature et qualité des matériaux mis en œuvre, procédés techniques de production utilisés et mise en forme par les forgerons [2], provenance et approvisionnement du métal pour le chantier [3]. Ces analyses permettent enfin de renseigner la chronologie de ces renforcements [4]. 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 métallographique de ces armatures révèle en premier lieu la nature des alliages ferreux mis en œuvre, très hétérogène, alliant fer, carbone, phosphore et de nombreuses inclusions non métalliques. Certaines pièces se démarquent toutefois par une composition très aciérée. Elle met également en évidence de nombreuses soudures, qui posent la question de la mise en forme de ces barres, par assemblage d'éléments plus petits, et incidemment la question de l'utilisation de matières recyclées et des circuits d'approvisionnement. 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 les différentes sources de métal, illustrant l'activité du marché du fer sur la place parisienne. Enfin, six agrafes et deux clous ont pu être datés par la méthode du radiocarbone. Les résultats obtenus donnent des éléments nouveaux de compréhension des phases de construction et de consolidation de l'édifice.

Références :

- [1] M. L'Héritier, Le fer et le plomb dans la construction monumentale au Moyen Âge, de l'étude des sources écrites à l'analyse de la matière, *Ædificare*, 2019, p. 79-121.
- [2] P. Dillmann, M. L'Héritier, Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings, *JAS*, 34, 2007, p. 1810-1823.
- [3] A. Dissler, P. Dillmann, M. Leroy, M. L'Héritier, S. Bauvais, P. Fluzin, Iron Supply for the Building of Metz Cathedral, *Archaeometry*, 59, 2017, p. 493-510.
- [4] S. Leroy, M. L'Héritier, E. Delqué-Kolic, J.-P. Dumoulin, C. Moreau, P. Dillmann, Consolidation or initial design? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French Gothic Cathedrals, *JAS*, 53, 2015, p. 190-201.

Mots Clés : Alliages ferreux, Métallographie, Archéométrie, Architecture gothique, Datation.

De la chimie des matériaux à l'alchimie des équipes.

Aline MAGNIEN^a, Pascal LIÉVAUX^{b,*}

^a Directrice du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques
Ministère de la Culture

^b adjoint au chef de la Délégation à l'inspection, à la recherche et à l'innovation, direction générale des Patrimoines et de l'Architecture, Ministère de la Culture

Lors de l'incendie du 15 avril 2019, le feu a provoqué de nombreuses altérations chimiques des matériaux en présence, accompagnées bien sûr d'altérations physiques et mécaniques. L'eau utilisée par les pompiers n'a pas moins altéré matières et édifice, de même que celle, venue du ciel, qui a continué de pénétrer dans la cathédrale tant que l'échafaudage initial n'a pas été enlevé. Pierres, plomb, bien sûr, bois, fer et verre ont donc subi des modifications plus ou moins fortes, et dont les implications structurelles sont plus ou moins grandes.

Les scientifiques qui se sont portés au chevet de l'édifice sont pour une partie d'entre eux des spécialistes des matériaux anciens, issus de l'université ou du CNRS, ou de leur conservation et de leur restauration, et dans ce cas, plutôt issus du ministère de la Culture. Ils se sont trouvés confrontés à des altérations de nature diverse. Les températures atteintes ont par exemple transformé le plomb en oxydes, transportés par aérosol, qui se sont déposés sur tout l'intérieur de l'édifice et doivent être enlevés pour pouvoir rendre une cathédrale dépolluée et nettoyée aux fidèles et au public. Ces oxydes sont souvent venus 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. Le nettoyage des différents matériaux concernés (métal des grilles, bois du mobilier, peintures murales, vitraux, pierre) doit être mené selon des techniques qui peuvent aussi relever de processus chimiques mais qui doivent surtout respecter le matériau patrimonial original qui a subi déjà une première attaque. Dans certains cas, par ailleurs, ce plomb a fusionné avec la pierre créant quasiment un nouveau matériau. La pierre elle-même sous l'effet de la chaleur connaît des modifications et des transformations qui se manifestent par des variations de couleur et d'aspects, significatifs de changements structurels internes.

L'eau peut entraîner la formation de sels, et de fortes altérations des matériaux en véhiculant différents matériaux à l'état de solutions, et c'est pourquoi les produits utilisés pour le nettoyage doivent être particulièrement bien choisis.

Par chance, les sculptures de la flèche par Viollet-le-Duc et Geoffroy-Dechaume ont été déposées avant l'incendie et leur restauration a permis des observations précises sur leur histoire, et leur matérialité.

Enfin, au-delà du clin d'œil, le chantier scientifique de Notre-Dame en rassemblant des scientifiques venus de laboratoires et d'horizons très différents a contribué à former une véritable communauté et à rapprocher des gens qui ne se connaissaient pas et ne travaillaient pas ensemble, à renforcer l'interdisciplinarité des approches de ce bâtiment emblématique. Plus encore, de nouvelles méthodes de travail et de recherche, de nouveaux outils se sont mis en place pour rassembler ces connaissances et créer quasiment de nouveaux champs disciplinaires.

En cela, le chantier de Notre-Dame a bien une dimension alchimique humaine.

Mots Clés : Feu, Pierre, Métal, Plomb, Interdisciplinarité.

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

Claudine LOISEL^{a, b, *}, Barbara TRICHEREAU^{a, b}

^a *Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), Ministère de la Culture*

^b *Centre de recherche sur la conservation (CRC, USR 3224), Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture, CNRS*

Lors de l'incendie de la cathédrale Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019, les vitraux historiés ont été protégés dans leur globalité par la résistance de la voûte, qui a rempli son rôle de bouclier malgré les quatre zones perforées. De plus, les soldats du feu ont su intervenir en évitant la projection d'eau directement sur les baies évitant ainsi l'explosion des verrières.

En 2015, une étude préalable avait été menée par l'architecte en chef des monuments historiques de la cathédrale pour préparer les futures restaurations. L'objectif avait été de faire un diagnostic complet pour évaluer l'état de conservation des verres, des peintures et des plombs. L'incendie a entraîné une réorganisation du programme de restauration des vitraux. La priorité actuelle étant de faire entrer le public en 2024, l'objectif a été donné à une décontamination générale et à la restauration des baies hautes déposées. Depuis 2019, deux phases d'études ont été menées sur des chapelles tests pour valider les protocoles d'intervention décrits dans le cahier des charges pour les appels d'offre. Afin d'établir les protocoles de décontamination, une étude globale du LRMH sur tous les matériaux dont les vitraux, a été déployée. De septembre 2019 à janvier 2020, une première phase d'observation et d'analyses a été réalisée sur la chapelle Saint-Éloi et l'entrée de la sacristie des messes, par le pôle scientifique vitrail, afin d'identifier la nature des dépôts et de proposer un protocole de décontamination préservant les verres et les peintures. D'août 2020 à janvier 2021, une deuxième phase a succédé pour évaluer les coûts et les délais des interventions à l'échelle de l'entreprise.

Dans ce contexte, un groupement réunissant historiens de l'art, experts du vitrail, scientifiques de la conservation, chercheurs universitaires s'est créé afin de coordonner la recherche scientifique autour des vitraux de la cathédrale. Ce groupe de travail « Verre » a défini les thématiques de recherche prioritaires [1] : 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 [2].

Références :

[1] <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/verre-1>

[2] <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/notre-dame-de-paris/fr/vitraux-moyen-age>

Mots Clés : Notre-Dame de Paris, Conservation, Restauration, Contamination au plomb, Vitrail, Incendie.

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

Véronique VERGÈS-BELMIN

*Géologue, Ingénieure de recherche, responsable du pôle scientifique Pierre
Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH)*

Le mécanisme et la vitesse de dégradation des pierres sur un monument dépend d'une part de facteurs intrinsèques, comme la composition minéralogique, les capacités de stockage et de transfert hydriques et hygriques, les propriétés thermiques et mécaniques et, d'autre part, de facteurs extrinsèques comme la température, l'apport en eau par la pluie et les remontées capillaires, la nature et la quantité des sels dans les solutions percolantes, l'abondance de ces solutions et, enfin, le facteur biologique. La morphologie du bâtiment et la position architecturale déterminent aussi indirectement le type et l'intensité des dégradations. Parmi ces différents facteurs, les sels viennent assez largement en tête des agents de détérioration.

Un sel est par définition un solide ionique pouvant se dissocier en présence de solvants polaires en particulier l'eau. Le plus connu est sans doute la halite de formule NaCl , mais il en existe de multiples autres. À Notre-Dame, deux sels nous préoccupent : d'une part une variété de sulfate de calcium, le gypse de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, déjà présent sur l'édifice avant l'incendie, et deux variétés du sulfate de sodium, la thénardite (Na_2SO_4) et la mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), pratiquement absents sur l'édifice avant l'incendie, mais dont l'apparition a été soupçonnée puis évaluée pendant les tests menés sur les parements contaminés par le plomb.

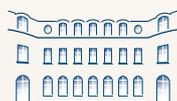
Nous examinerons deux cas d'étude.

Le premier concerne les parements intérieurs et extérieurs des chapelles, nous nous intéresserons à l'impact des méthodes de nettoyage-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. Nous évoquerons les raisons de cette pollution, et examinerons sur quelles bases scientifiques ont été élaborés les conseils donnés par le LRMH puis mis en œuvre par la maîtrise d'œuvre pour diminuer la charge saline des maçonneries de la voûte.



© V. ABERGEL/L. DE LUCA/MAP/SRA-DRAC/AGP/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – le 13 12 21
© V. ABERGEL/L. DE LUCA/MAP/SRA-DRAC/AGP/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – le 13 12 21
© Renato SALERI / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – © Cyril FRESILLON / MASOP / CNRS photographie – © Kevin JACQUOT / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS – © Cyril FRESILLON / RAMAT / NIMBE / ArScan / CEA / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS – © V. ABERGEL/L. DE LUCA/INAP/SRA-DRAC/AGP/Vassar College/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – © V. ABERGEL/L. DE LUCA/INAP/SRA-DRAC/AGP/Vassar College/A-BIME/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – Conception graphique : CB Defretin | Images : © Renato SALERI / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – © Cyril FRESILLON / MASOP / CNRS photographie – © Kevin JACQUOT / MAP / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS – © Cyril FRESILLON / RAMAT / NIMBE / ArScan / CEA / Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris / Ministère de la culture / CNRS – © V. ABERGEL/L. DE LUCA/INAP/SRA-DRAC/AGP/Vassar College/MIS/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS – le 13 12 21



Fondation de la Maison de la Chimie

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique 75007 Paris